OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

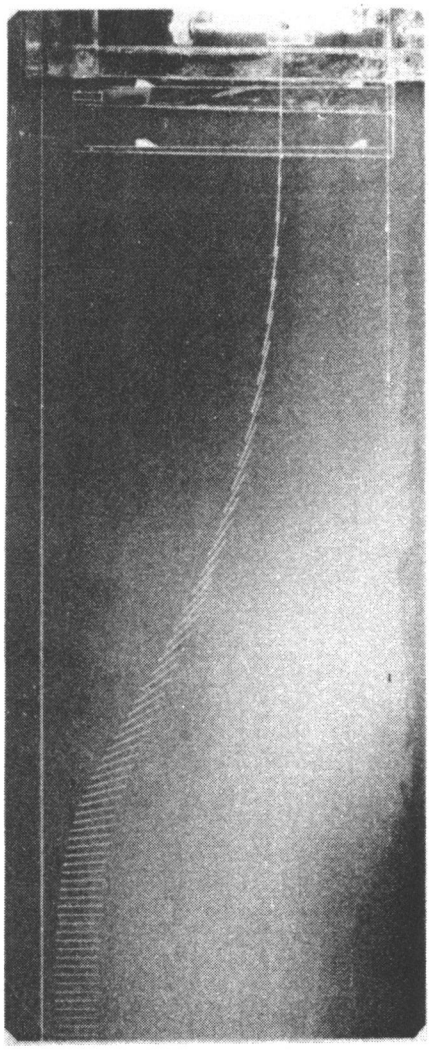
Title	流体中における線状体の運動に関する研究
Author(s)	千葉, 訓司
Citation	大阪大学, 1980, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2331
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

流体中における線状体の運動に関する研究



昭和55年5月

千葉訓司

目　　次

第1章　緒　　論　1
第2章　静止流体中における線状体の運動　7
2.1　緒　　言　7
2.2　静止流体中における線状体の運動に関する理論　8
2.2.1　基礎理論　8
2.2.2　線状体の運動への適用　12
2.2.3　線状体の運動の数値計算　16
(1)　線状体に作用するトカおよび回転モーメントの計算　16
(2)　計算条件および方法　19
2.3　線状体長さの影響　21
2.3.1　線状体の落下軌跡　21
2.3.2　線状体重心の速度および加速度　25
2.3.3　線状体の姿勢および角速度　28
2.4　線状体直径の影響　29
2.4.1　線状体の落下軌跡　29
2.4.2　線状体重心の速度および加速度　30
2.4.3　線状体の姿勢および角速度　32
2.5　初期角度の影響　33
2.5.1　線状体の落下軌跡　33
2.5.2　線状体重心の速度および加速度　35
2.5.3　線状体の姿勢および角速度　37
2.6　線状体比重量の影響　38
2.6.1　線状体の落下軌跡　38
2.6.2　線状体重心の速度および加速度　40
2.6.3　線状体の姿勢および角速度　41
2.7　流体の温度の影響　42
2.7.1　線状体の落下軌跡　42

2.7.2 線状体重心の速度および加速度 44
2.7.3 線状体の姿勢および角速度 47
2.8 空気中における線状体の運動 49
2.8.1 線状体の落下軌跡 49
2.8.2 初期角度の影響 52
2.8.3 線状体直径の影響 59
2.8.4 線状体長さの影響 62
2.9 静止流体中における線状体の落下実験 66
2.9.1 実験装置および方法 66
2.9.2 写真面上から真の落下運動を求める方法 69
(1) 落下運動の読取りおよび初期位置決定方法 69
(2) 被写体距離の変化に対する修正方法 70
2.9.3 線状体の落下特性を求める方法 72
2.10 線状体長さの影響 74
2.10.1 線状体の落下軌跡 74
2.10.2 線状体重心の速度および加速度 77
2.10.3 線状体の姿勢および角速度 82
2.10.4 最終落下位置での線状体の配向 84
2.11 線状体直径の影響 85
2.11.1 線状体の落下軌跡 85
2.11.2 線状体重心の速度 87
2.11.3 線状体の姿勢 89
2.12 初期角度の影響 90
2.12.1 線状体の落下軌跡 90
2.12.2 線状体重心の速度 92
2.12.3 線状体の姿勢 92
2.12.4 最終落下位置での線状体の配向 93
2.13 線状体比重量の影響 94
2.13.1 線状体の落下軌跡 94
2.13.2 線状体重心の速度 95

2.13.3 線状体の姿勢 97
2.14 流体の温度の影響 98
2.14.1 線状体重心の速度 98
2.14.2 線状体の姿勢 99
2.15 空気中における線状体の運動 100
2.15.1 初期角度の影響 100
2.15.2 線状体直径の影響 104
2.15.3 線状体長さの影響 106
2.16 結 言 108
第3章 静止流体中における線状体群の運動 111
3.1 緒 言 111
3.2 静止流体中における線状体回りの流れ 112
3.2.1 実験装置および方法 112
3.2.2 線状体回りの流れ特性 115
3.2.3 姿勢の変化に対する流れ状態の変化 118
3.2.4 線状体直径の影響 124
3.2.5 線状体比重量の影響 126
3.3 静止流体中における線状体群の落下実験 127
3.3.1 実験装置および方法 128
3.4 複数の線状体の落下特性 134
3.5 初期角度の影響 141
3.5.1 $\alpha = 20°$ の場合 141
3.5.2 $\alpha = 40°$ の場合 143
3.5.3 $\alpha = 60°$ の場合 145
3.6 初期位置における線状体の相対位置の影響 151
3.6.1 $\alpha = 20°$ の場合 151
3.6.2 $\alpha = 60°$ の場合 153
(1) 相対距離 L_0 の影響 157
(2) 条件1および条件2の影響 158
3.7 線状体直径の影響 159

3.7.1 $\alpha=0.571$(mm)，条件1の場合 160
3.7.2 $\alpha=0.571$(mm)，条件2の場合 164
3.7.3 $\alpha=0.571$(mm)の線状体がカルマン渦の影響を受ける場合 167
3.8 線状体本数の影響 171
3.8.1 $\alpha=0.915$(mm)の場合 171
3.8.2 $\alpha=0.571$(mm)の場合 178
3.9 線状体が集団で運動する場合の落下特性 183
3.9.1 運動中における水平方向移動距離および姿勢の分布 185
3.9.2 最終落下位置での線状体の配向および落下点分布 189
3.10 結　　言 192
第4章 矩形管内流れ中における線状体の運動 194
4.1 緒　　言 194
4.2 矩形管内流れ中における線状体の落下実験装置 195
4.3 矩形管内流れ特性 196
4.3.1 矩形管内流れの流速分布測定方法 196
4.3.2 矩形管内流れの流速分布算出方法 198
4.3.3 矩形管内流れの流速分布測定結果 199
4.3.4 矩形管内流れの流速分布の数値計算 201
4.4 矩形管内流れ中における線状体の落下実験方法 209
4.4.1 線状体の落下実験方法 209
4.4.2 写真面上から真の落下運動を求める方法 213
4.5 初期角度の影響 215
4.5.1 線状体の落下軌跡 215
4.5.2 線状体重心の速度 216
4.5.3 線状体の姿勢 219
4.6 線状体長さの影響 221
4.6.1 線状体の落下軌跡 221

4.6.2 線状体重心の速度 222
4.6.3 線状体の姿勢 226
4.7 線状体直径の影響 227
4.7.1 線状体の落下軌跡 227
4.7.2 線状体重心の速度 228
4.7.3 線状体の姿勢 230
4.8 線状体比重量の影響 230
4.8.1 線状体の落下軌跡 231
4.8.2 線状体重心の速度 232
4.8.3 線状体の姿勢 233
4.9 流速の影響 234
4.9.1 線状体の落下軌跡 234
4.9.2 線状体重心の速度 235
4.9.3 線状体の姿勢 238
4.10 結 言 239
第5章 ノズル内流れ中における線状体の運動 242
5.1 緒 言 242
5.2 ノズル内流れ中における線状体の落下実験装置 243
5.3 ノズル内流れ特性 244
5.3.1 ノズル内流れの流速分布測定方法 244
5.3.2 ノズル内流れの流速分布算出方法 246
5.3.3 ノズル内流れの流速分布測定結果 248
5.4 ノズル内流れ中における線状体の落下実験方法 250
5.4.1 線状体の落下実験方法 250
5.4.2 写真面上から真の落下運動を求める方法 253
5.5 線状体の落下特性 254
5.6 初期角度の影響 258
5.6.1 線状体の落下軌跡 259
5.6.2 線状体重心の速度 259
5.6.3 線状体の姿勢 263

5.7 線状体長さの影響 265
5.7.1 線状体の落下軌跡 265
5.7.2 線状体重心の速度 267
5.7.3 線状体の姿勢 270
5.8 線状体直径の影響 272
5.8.1 線状体の落下軌跡 272
5.8.2 線状体重心の速度 273
5.8.3 線状体の姿勢 276
5.9 線状体比重量の影響 277
5.9.1 線状体の落下軌跡 277
5.9.2 線状体重心の速度 278
5.9.3 線状体の姿勢 279
5.10 流速の影響 280
5.10.1 線状体の落下軌跡 280
5.10.2 線状体重心の速度 281
5.10.3 線状体の姿勢 283
5.11 $\beta = 45°$の場合の落下特性 284
5.12 結　　言 289
第6章 管内流れ中における線状体の運動に関する理論解析 291
6.1 緒　　言 291
6.2 流れ中における線状体の運動に関する理論 292
6.3 管内流れ中における線状体の運動の数値計算 298
6.3.1 線状体に作用する外力および回転モーメントの計算 298
6.3.2 流速分布の計算および数値計算の条件と方法 301
(1) 一様流れ中における場合 301
(2) 矩形管内での十分に発達した流れ中における場合 303
(3) 矩形管内での流れの助走域における場合 310

(4) ノズル内流れ中における場合 314
6.4 一様流れ中における線状体の運動 319
6.4.1 線状体の落下軌跡 319
6.4.2 線状体重心の速度および加速度 325
6.4.3 線状体の姿勢および角速度 331
6.5 矩形管内での十分に発達した流れ中における線状体の運動 335
6.5.1 線状体の落下軌跡 335
6.5.2 線状体重心の速度および加速度 342
6.5.3 線状体の姿勢および角速度 357
6.6 矩形管内での助走域における線状体の運動 366
6.6.1 線状体の落下軌跡 366
6.6.2 線状体重心の速度および加速度 373
6.6.3 線状体の姿勢および角速度 390
6.7 ノズル内流れ中における線状体の運動 398
6.7.1 線状体の落下軌跡 398
6.7.2 線状体重心の速度および加速度 409
6.7.3 線状体の姿勢および角速度 439
6.8 結 言 454
第7章 回転流体中における線状体の運動 458
7.1 緒 言 458
7.2 回転流体中における線状体の落下実験装置 459
7.3 回転円筒中の流れ特性 460
7.4 回転流体中における線状体の落下実験方法 462
7.4.1 線状体の落下実験方法 462
7.4.2 写真面上から真の落下運動を求める方法 465
7.4.3 線状体の落下特性を求める方法 467
7.5 線状体長さの影響 470
7.5.1 線状体の落下軌跡 470
7.5.2 線状体の姿勢 476

7.5.3 線状体の配向 479
7.6 線状体直径の影響 482
7.6.1 線状体の落下軌跡 482
7.6.2 線状体の姿勢 487
7.6.3 線状体の配向 489
7.7 線状体比重量の影響 492
7.7.1 線状体の落下軌跡 492
7.7.2 線状体の姿勢 495
7.7.3 線状体の配向 496
7.8 初期角度の影響 498
7.8.1 線状体の落下軌跡 498
7.8.2 線状体の姿勢 502
7.8.3 線状体の配向 502
7.9 初期位置の影響 503
7.9.1 線状体の落下軌跡 503
7.9.2 線状体の姿勢 506
7.10 円筒回転数の影響 507
7.10.1 線状体の落下軌跡 507
7.10.2 線状体の姿勢 509
7.11 結 言 511
第8章 結 論 514

参考文献 522

記号 524

謝辞

第1章　緒　論

衣料や産業資材の原料として広く用いられる繊維は，長さと太さの比が数百以上と非常に大きく，形態は直線状のものから曲がったものまであり，断面形状は円形とは限らず複雑な形をした線状体であり，さらに，直径あるいは太さが長さに比べてきわめて小さいため小さい力でも容易に変形するという特性をもっている。

このような特性は，大きい変形性や多孔性を要求される各種製品を作るうえできわめて有利である反面，繊維を処理する工程においてその取扱いが困難である。なぜなら，製品中における繊維の配列が製品の品質を左右するため，工程においてこの形態的に不安定な個々の繊維の運動や姿勢をコントロールしなければならないからである。

繊維の処理を目的とした代表的な工程は紡績であり，そのプロセスは複雑であるが，要するに分離，輸送，集束の3つの単位操作に分類できる。実際の工程では，分離操作は多段階にわたって実施され，繊維塊はしだいに小塊に分離されながら輸送される。この分離と輸送の両工程で，繊維は空気中で挙動することになる。また，集束操作では何回かのダブリングとドラフト作用が繰返され，最終的に糸が形成される。このように，紡績においては工程の前半部で，繊維の流体中における運動を利用する部分が多い。

繊維あるいは繊維集団を流体で処理する技術は，繊維塊の分離工程，輸送工程に関連して繊維工業の各種工程で広く応用されている基本技術の1つであり，また，生産性を向上させる目的および自動化，省力化を進めるためにも，有用な技術として広く応用されているものである。さらに，繊維が流体中で運動する現象は，気流を用いた紡績（空気紡績），不織布の製造，植毛加工，繊維状塵埃の吸引，抄紙などの工程および

繊維複合プラスチックの製造においても多く見られる基本現象の1つである。

流体中での繊維の運動に関しておこなわれた基礎的研究はあるが，それらは，繊維が姿勢，速度などを変化させながら運動した結果，最終的に運動状態がどのようになったかを論じたものが多く，繊維の運動状態に着目して，姿勢，速度などの運動特性がどのように変化するかなど，この現象の基本的事項を詳細に検討したものは少ない。

このように，実際には広く利用されているにもかかわらず，流体中における繊維の基本的運動特性についてはほとんど解明されていないのが現状であり，新しい技術の開発や機械の改良のために解明すべき多くの問題が残っている。そこで，本論文では，繊維のように長さと太さの比の大きい線状体の流体中における運動に関して基礎的研究をおこない，その基本的運動特性を明らかにすることとした。

従来の研究の概要

静止流体中における繊維の運動に関する研究には，空気中で繊維を自由落下させて落下時間および落下速度に対する繊度と繊維長の影響を調べ，その結果にもとづいて繊維を水平気流中に自由落下させた場合，繊度別に分離することが可能であることを示した宇野ら[1),2)]の研究があるが，落下中の速度および姿勢の変化については調べていない。

また，直管内流れ中での繊維の運動を取扱った研究としては，オープンエンド精紡機のコーミングローラとロータ入口間の繊維供給管内を空気輸送される繊維の速度を調べたRipka[3)]の研究，縮小管を使用して流れ方向に繊維を配列させる方法に関するEdberg[4)]の研究があり，縮小管内の高速気流により繊維を流れ方向に配列させることができるという結果を得ている。

しかし，この場合にも，繊維の軌跡および姿勢の変化など，この現象の基本的事項についてはほとんど検討されていない。同じく縮小管の代りに，主流を横断する空気ジェットを用いて繊維の配列化を計ったBangertら[5]の研究があり，空気ジェットを用いることにより比較的低速の気流中でも主流方向に繊維を配列させることができることを示している。また，気流によって運ばれる繊維の速度および姿勢の変化など，その挙動に関する宇野ら[6]の研究があり，両者ともにマルチストロボ撮影により繊維の運動状態をとらえ，計算結果と比較検討している。

いっぽう，回転流体中における繊維の運動に関する研究としては，強制渦流内における線状体の2次元運動を理論解析し，曲管内を空気輸送される線状体の運動状態を実験により調べ，両者を比較した塩見[7]の研究，および繊維を非常に軽い粒子と考えて吸い込みのある渦流や分岐管中での繊維の軌跡を求めたFeldman[8]の研究がある。しかし，前者は重力と浮力の影響を無視し2次元的に運動を取扱っており，後者の場合，粒子と繊維は本質的に形態が異なるので，得られた結果の妥当性について問題が残る。

また，繊維集団の流体中での運動については，気流中を飛走している繊維束の大きさ，繊維の流動形状および速度を調べた福田[9]，黒崎[10]の研究，タンクと矩形管路からなる装置を用いてタンク内および管路内での繊維群の配向を調べた美馬[11]の研究，さらに，空気輸送管内での繊維塊の速度について述べた金谷木ら[12]の研究を挙げることができる。しかし，それらはいずれも繊維あるいは繊維集団が姿勢，速度などを変化させながら運動した後，速度，流動形状あるいは配向がどうなったかを論じたものであり，運動状態の詳しい変化については述べられていない。

本研究の目的と論文の構成

本研究は，細長比（長さと直径の比）の大きい線状体の流体中における運動を取扱ったものであって，従来ほとんど研究されていなかった分野を理論的および実験的に明らかにし，線状体の流体力学的な処理に対する指針を与えようとしたものである。繊維工業で使用される繊維の多くは，形態的異方性がいちじるしく，しかも，実際の工程では集団で相互に干渉し合いながら運動するため，その運動はきわめて複雑である。

そこで，本研究では，実際の現象を取扱う前に，理論解析可能な所まで現象をモデル化あるいは抽象化することにした。まず，形態的なばらつきを除去する目的で繊維のもっとも簡単なモデルとして直線の線状体（以下，本論文では，単に線状体という場合には，長さと直径の比の大きい円形断面をもつまっすぐな物体を意味する。）を考えた。また，繊維群の運動を複数（2本あるいは3本）の線状体の運動にモデル化した。この場合でも，後方の線状体は，前方の線状体の運動によって生ずる流れの影響を受けて運動するため，理論解析は困難である。そこで，さらにモデル化を計り，実際の現象のもっとも簡単なモデルとして，線状体が単一で運動する場合を考え，これ

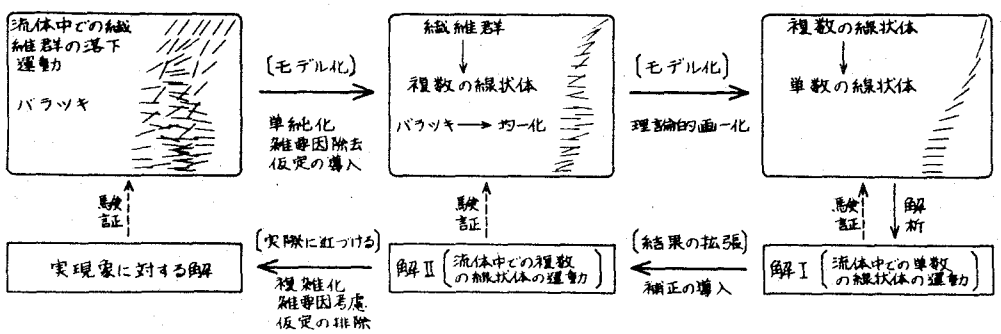


図 1.1　実際の問題を理論的に取扱うときの考え方の関連図

について理論解析と実験をおこない，その比較からこの現象の根底となる事項を把握した。そして，この結果をもとにして順次複雑な場合に解析を拡張していくこととした。

本研究では，実際の繊維の運動をモデル化し，繊維のように細長比の大きい線状体が単一で静止流体中，矩形管内流れ中，ノズル内流れ中および回転流体中で運動する場合，さらに，静止流体中を線状体が複数あるいは集団で相互に干渉し合いながら運動する場合に対し，その運動状態に着目して，線状体の軌跡，速度および姿勢の変化などの基本的運動特性を実験的あるいは理論的に明らかにした基礎的研究であり，得られた結果は，広く繊維を取扱う領域に適用でき，新しい技術の開発および工程や機械の改良に役立つと考えられる。

本論文は8章より成り，その概要を示せばつぎの通りである。

第1章では，本研究で対象とした繊維の概念および本研究の背景にある繊維の処理工程の特徴について述べ，流体中における繊維の運動に関して，従来の研究を概観するとともに本研究の目的，立場および論文の構成を示した。

第2章では，実際の現象のもっとも簡単なモデルとして，線状体が単一で静止流体中を自由落下する場合を考え，すでに *Lamb* が理論解析をおこなっている静止流体中での物体の運動を基礎とし，その考え方を適用することにより線状体の運動を解析した。そして，水中および空気中での場合について数値計算と実験をおこない，その比較からこの現象の根底となる事項を把握し，あわせて諸要因の影響を調べた。

第3章では，第2章のモデルより実際の現象に近いモデルとして，静止流体中を線状体が複数で同時に自由落下する場合と連続的に自由落下する場合について実験をおこない，単一で運動する場合と比較して，線状体が相互に干渉し合いながら落下するとき，運動状態がどのように変わるかを調べ，さらに，諸要因の影響を明らかにした。また，線状体が単一で運動する

とき，その運動に伴なって発生する流れ状態を観察した。

第４章では，線状体が単一で低速の矩形管内流れ中を自由落下する場合の運動特性および諸要因の影響を実験により調べ，静止流体中での線状体の運動と比較して矩形管内流れ中での運動特性を明らかにした。

第５章では，単一の線状体が低速のノズル内流れ中を自由落下する場合について実験的研究をおこない，矩形管内流れ中での運動と比較してノズル内流れ中での運動特性および諸要因の影響を調べた。

第６章では，静止流体中における物体の運動に関するLambの解析結果を流れ中における物体の運動に拡張することにより，線状体が単一で流れ中を運動するときの理論解析をおこなった。そして，一様流れ中，矩形管内での十分に発達した流れ中，矩形管内での助走域およびノズル内流れ中の場合に対して数値計算をおこない，第４章，第５章の実験結果とあわせて，実験と計算の両面から線状体の基本的運動特性を明らかにし，かつ諸要因の影響を調べた。

第７章では，低速で回転する円筒中を線状体が単一で自由落下する場合について実験的研究をおこない，静止流体中での線状体の運動と比較して，回転流体中での運動特性および諸要因の影響を調べた。

第８章では，各章において得られた研究結果を総括し，結論を述べた。

第2章　静止流体中における線状体の運動

2.1　緒　言

流体中での繊維の運動は繊維工業の各種工程で重要な基本現象の1つである。ところが，この現象に関する基礎的研究は少なく，静止空気中での単繊維の落下時間および落下速度に関する研究[1),2)]，さらに，繊維集団の空気輸送速度に関する研究[12)]がおこなわれているに過ぎない。また，それらは主として実験によるものが大部分であり，繊維の落下運動に関する理論解析はほとんどなされていない。

実際の繊維は，長さ，太さ，形態などにかなりの差異があり，また，流体中での運動も単一ではなく集団で相互に干渉し合いながら運動することが多い。

本章では，以上のような複雑な運動を解析する前に，もっとも簡単なモデルとして，直線の線状体が単一で静止流体中を自由落下する場合を考え，これについて理論解析と実験をおこない，その比較からこの現象の根底となる事項を把握する。

ここでは，Lamb により，すでに理論解析がなされている静止流体中での物体の運動[13)]を基礎とし，その考え方を適用することにより線状体の運動を解析する。繊維を取扱う各種工程では，繊維は空気中あるいは水中で運動をおこなうが，線状体の運動の観察，実験は水中の方が容易であることから，主に水中での場合について数値計算と実験をおこない線状体の落下特性および諸要因の影響を調べる。そして，雰囲気流体が変った場合落下特性がどのように変化するかを調べるため，空気中での場合について数値計算と実験をおこない，水中での結果と比較する。

2.2 静止流体中における線状体の運動に関する理論

2.2.1 基礎理論

摩擦のない静止流体中での物体の運動は，Thomson，Tait そしてKirchhoff によって解かれている。これらの手法の基本的な特徴は，物体と流体を1つの力学系として取扱うことにより，物体表面に働く圧力の効果の面倒な計算が避けられる点にある。

まず，単一の物体が無限に広がった流体中で運動する場合，流体の運動はすべて物体の運動によるものであり，したがって，渦なしで循環がないものとする。

この問題を解くには，図2.1に示すように剛体の力学の中でEulerが導入した方法に従い，物体に固定しそれとともに運動する直交座標系 Ox，Oy，Oz をとるのが便利である。もし，任意の瞬間における物体の運動をこの座標系の原点の並進速度成分 u，v，w および座標軸回りの角速度成分 p，q，r で定義すれば，流体の運動を特徴づける速度ポテンシャル Φ は

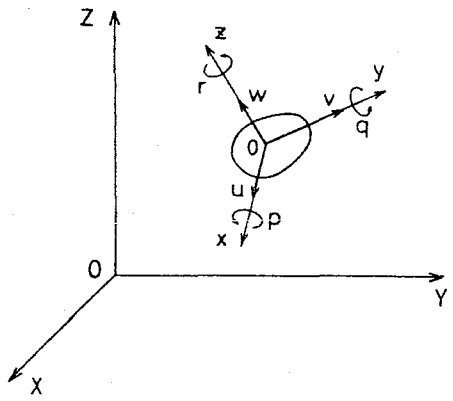


図2.1 運動座標系

$$\Phi = u\phi_1 + v\phi_2 + w\phi_3 + p\chi_1 + q\chi_2 + r\chi_3 \qquad (2.1)$$

と書ける。ここで，ϕ_1，ϕ_2，ϕ_3，χ_1，χ_2，χ_3 は x，y，z で表わされた物体表面の形状で決まる。この表面の任意の点での外向き法線の方向余弦を l_1，m_1，n_1 とすると，表面では流体の法線方向速度は物体のそれと等しいので，

$$\partial\phi/\partial n = l_1(u+qz-ry)+m_1(v+rx-pz)+n_1(w+py-qx) \qquad (2.2)$$

であり，(2.1)式を代入すると，

$$\left.\begin{aligned}&\partial\phi_1/\partial n = l_1 \quad ,\ \partial\phi_2/\partial n = m_1 \quad ,\ \partial\phi_3/\partial n = n_1\\&\partial\chi_1/\partial n = n_1y-m_1z \ ,\ \partial\chi_2/\partial n = l_1z-n_1x \ ,\ \partial\chi_3/\partial n = m_1x-l_1y\end{aligned}\right\} \qquad (2.3)$$

となる。

つぎに，流体の運動エネルギについて考える。

$\partial\phi/\partial n$は流体の内向きの法線速度を表わし，いっぽう，$-\rho\phi$は運動を生じさせるために必要な撃圧力である。撃力によってなされる仕事は，その作用点の初速度と終速度の撃力方向の成分の和$\partial\phi/\partial n$の$1/2$と撃力$-\rho\phi$の積で表わされる。したがって，流体の運動エネルギT_1は，

$$2T_1 = -\rho\iint\phi\,\partial\phi/\partial n\cdot dS \qquad (2.4)$$

で表わされる。ここで，積分は運動する物体の全表面にわたってとる。(2.1)式，(2.2)式を(2.4)式へ代入すれば，

$$\begin{aligned}2T_1 = {}&A_1u^2+B_1v^2+C_1w^2+2A_1'vw+2B_1'wu+2C_1'uv\\&+P_1p^2+Q_1q^2+R_1r^2+2P_1'qr+2Q_1'rp+2R_1'pq\\&+2p(F_1u+G_1v+H_1w)+2q(F_1'u+G_1'v+H_1'w)\\&+2r(F_1''u+G_1''v+H_1''w)\end{aligned} \qquad (2.5)$$

を得る。

(2.5)式の中の21個の係数$A_1, B_1, C_1, \cdots, H_1''$は$x, y, z$で表わされた物体表面の形状と流体の比質量$\rho$によって決まる定数である。たとえば，$A_1$，$A_1'$，$P_1$については，

$$
\left.
\begin{aligned}
A_1 &= -\rho \iint \phi_1 \partial\phi_1/\partial n \, dS = -\rho \iint \phi_1 \ell_1 \, dS \\
A_1' &= -\frac{1}{2}\rho \iint (\phi_2 \partial\phi_3/\partial n + \phi_3 \partial\phi_2/\partial n)\, dS \\
&= -\rho \iint \phi_2 \partial\phi_3/\partial n \, dS = -\rho \iint \phi_3 \partial\phi_2/\partial n \, dS \\
&= -\rho \iint \phi_2 n_1 \, dS \qquad = -\rho \iint \phi_3 m_1 \, dS \\
P_1 &= -\rho \iint \chi_1 \partial\chi_1/\partial n \, dS = -\rho \iint \chi_1 (n_1 y - m_1 z)\, dS
\end{aligned}
\right\} \qquad (2.6)
$$

となる。

いっぽう，物体自身の運動エネルギ T_2 は，

$$
\begin{aligned}
2T_2 = {} & m(u^2+v^2+w^2) \\
& + P_2 p^2 + Q_2 g^2 + R_2 r^2 + 2P_2' gr + 2Q_2' rp + 2R_2' pg \\
& + 2m\{\alpha(vr - wg) + \beta(wp - ur) + \gamma(ug - vp)\}
\end{aligned}
\qquad (2.7)
$$

であり，

したがって，この運動系の全エネルギ $T_1 + T_2$ を T で表わすと，たとえば次式となる。

$$
\begin{aligned}
2T = {} & Au^2 + Bv^2 + Cw^2 + 2A'vw + 2B'wu + 2C'uv \\
& + Pp^2 + Qg^2 + Rr^2 + 2P'gr + 2Q'rp + 2R'pg \\
& + 2p(Fu + Gv + Hw) + 2g(F'u + G'v + H'w) \\
& + 2r(F''u + G''v + H''w)
\end{aligned}
\qquad (2.8)
$$

(2.8)式は複雑である。以下では，物体の運動の物理的意味の把握を容易にするため，この運動エネルギの式を簡単化する。一般形のもっとも対称な書き方は

$$
\begin{aligned}
2T = {} & Au^2 + Bv^2 + Cw^2 + 2A'vw + 2B'wu + 2C'uv \\
& + Pp^2 + Qg^2 + Rr^2 + 2P'gr + 2Q'rp + 2R'pg
\end{aligned}
$$

$$+2Lup+2Mvq+2Nwr$$
$$+2F(vr+wq)+2G(wp+ur)+2H(uq+vp)$$
$$+2F'(vr-wq)+2G'(wp-ur)+2H'(uq-vp)$$
(2.9)

である。

A', B', $C'=0$ となるように座標軸の方向を選び，また，原点を移動させることによって F', G', $H'=0$ とし，21個の係数を15個に減らすことができる。

さらに，物体がもつ対称面の数によって，一般形を簡単化する。

1)、物体が対称面を1つもつ場合

対称面をzx面にとれば，v, p, q の符号を変えても運動エネルギは不変でなければならないから，P', Q', L, M, N, $H=0$ となり，運動エネルギの式は次式となる。

$$2T=Au^2+Bv^2+Cw^2$$
$$+Pp^2+Qq^2+Rr^2+2R'pq$$
$$+2F(vr+wq)+2G(wp+ur) \qquad (2.10)$$

2) 物体が1)の対称面と直交する第2の対称面をもつ場合

第2の対称面をyz面にとると，v, p, r の符号を変えても運動エネルギは不変でなければならないから，R', $G=0$ となり，

$$2T=Au^2+Bv^2+Cw^2+Pp^2+Qq^2+Rr^2$$
$$+2F(vr+wq) \qquad (2.11)$$

となる。

3) 物体が前2つに直角な第3の対称面をもつ場合

第3の対称面をxy面にとれば，この場合には $F=0$ となるの

で，

$$2T = Au^2 + Bv^2 + Cw^2 + Pp^2 + Qq^2 + Rr^2 \qquad (2.12)$$

となる。

2.2.2 線状体の運動への適用

線状体の運動を理論的に考えるため，つぎの仮定を設ける。

(1) 線状体は長さと直径の比の大きいまっすぐな円柱物体とする。
(2) 線状体の軸の回りの回転運動は考えない。
(3) 線状体は一平面内で運動する。

なお，仮定(2)，(3)は実験で確かめられている。

仮定(1)から，線状体は軸を含む直角な2面と軸に直角な面の合計3つの対称面をもつから(2.12)式が適用できる。

ここで，図2.2に示すように座標系を定めると，仮定(2)から $q = 0$ となり，線状体が運動をおこなう平面をxy面と考えると，仮定(3)から w，$p = 0$ となるので，この運動系の全運動エネルギーTは，

$$2T = Au^2 + Bv^2 + Rr^2 \qquad (2.13)$$

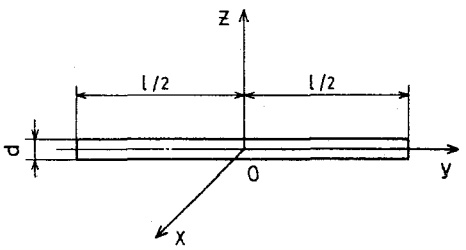


図2.2 線状体に固定した座標系

となる。

A，B，Rを流体の運動エネルギに関する項 A_1，B_1，R_1 と線状体の運動エネルギに関する項 A_2，B_2，R_2 に分けて計算する。

(a) A_1 の計算

直径d，長さℓの円柱が軸に直角な方向に速度uで運動するときの速度ポテンシャルは，

$$\phi = -(u d^2/4r)\cos\theta \qquad (2.14)$$

となる。したがって，(2.1)式から

$$\phi_1 = -(d^2/4r)\cos\theta$$

となり，方向余弦は，

$$\ell_1 = \begin{cases} \cos\theta & ; \text{円柱面上} \\ 0 & ; \text{円柱端面} \end{cases}$$

であるから，(2.6)式より

$$A_1 = \rho(d^2/4)\ell\int_0^{2\pi}\cos^2\theta\, d\theta$$
$$= \rho\pi d^2\ell/4 \qquad (2.15)$$

したがって，A_1は円柱と同体積の流体の質量となる。

(b) B_1の計算

円柱が軸方向に速度vで運動するときの流体の運動エネルギは，

$$2T = -\rho v^2\iint\phi_2 m_1\, dS \qquad (2.16)$$

となり，方向余弦m_1は円柱面上で0，円柱端面で± 1となるので，これは直径dの円板が面に垂直な方向に速度vで運動する場合と同じであり，

$$2T = 4\rho v^2/\pi \int_0^{a/2} \sqrt{(a/2)^2 - r^2} \cdot 2\pi r \cdot dr$$
$$= \rho a^3 v^2/3$$

となり，したがって，

$$B_1 = \rho a^3/3 \qquad (2.17)$$

となる。

(C) R_1の計算

円柱がz軸回りを角速度γで回転するときの流体の運動エネルギは，A_1の結果を利用して，

$$2T = \rho\pi a^2/4 \int_{-l/2}^{l/2} (\gamma y)^2 dy$$
$$= \frac{l^2}{12}(\rho\pi a^2 l/4)\gamma^2$$

したがって，

$$R_1 = \frac{l^2}{12}(\rho\pi a^2 l/4) \qquad (2.18)$$

となる。

(α) A_2, B_2, R_2の計算

A_2, B_2は線状体の質量，R_2はz軸回りの慣性モーメントであるから，

$$\left.\begin{aligned} A_2 &= B_2 = \rho_b \pi a^2 l/4 \\ R_2 &= \frac{l^2}{12}(\rho_b \pi a^2 l/4) \end{aligned}\right\} \qquad (2.19)$$

となる。

したがって，(a)～(α)の結果から A，B，R は線状体の比質量；ρ_b，流体の比質量；ρ，線状体の形状（直径；d，長さ；ℓ）で決まる定数であり，それぞれ次式で表わされる。

$$\left.\begin{aligned} A &= (\rho+\rho_b)\pi d^2\ell/4 \\ B &= \rho d^3/3 + \rho_b\pi d^2\ell/4 \\ R &= (\rho+\rho_b)\pi d^2\ell^3/48 \end{aligned}\right\} \qquad (2.20)$$

いま，図2.3に示すように線状体とともに運動する座標軸を Ox，Oy，その原点（線状体の重心）の座標を（X，Y）とし，x軸とX軸とのなす角度を θ とする。以下では θ を線状体の回転角と呼ぶ。

そこで，運動方程式は，

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\partial T/\partial u) &= r(\partial T/\partial v) - q(\partial T/\partial w) + X \\ \frac{d}{dt}(\partial T/\partial v) &= p(\partial T/\partial w) - r(\partial T/\partial u) + Y \\ \frac{d}{dt}(\partial T/\partial r) &= v(\partial T/\partial u) - u(\partial T/\partial v) \\ &\quad + q(\partial T/\partial p) - p(\partial T/\partial q) + N \end{aligned}\right\} \qquad (2.21)$$

と書ける。ここで，X，Y は線状体に作用する外力の x，y 方向成分であり，N は回転モーメントである。

(2.21)式に(2.13)式を代入して，線状体の運動方程式

$$\left.\begin{aligned} A\,du/dt &= rBv + X \\ B\,dv/dt &= -rAu + Y \\ R\,dr/dt &= (A-B)uv + N \end{aligned}\right\} \qquad (2.22)$$

が得られる。

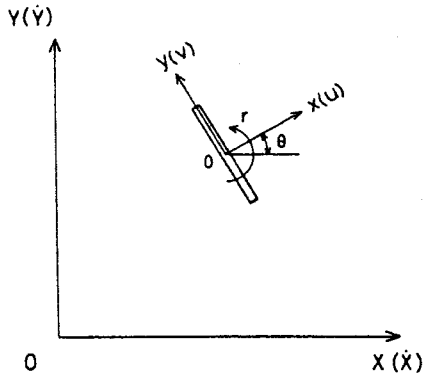


図2.3 座標系

いっぽう，線状体重心のX，Y方向速度は次式で表わされる。

$$\left.\begin{aligned}\dot{X} &= u\cos\theta - v\sin\theta \\ \dot{Y} &= u\sin\theta + v\cos\theta\end{aligned}\right\} \qquad (2.23)$$

また，加速度$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$は(2.23)式を時間tで微分して求まり，

$$\left.\begin{aligned}\ddot{X} &= (du/dt)\cos\theta - (dv/dt)\sin\theta - (u\sin\theta + v\cos\theta)r \\ \ddot{Y} &= (du/dt)\sin\theta + (dv/dt)\cos\theta + (u\cos\theta - v\sin\theta)r\end{aligned}\right\} \qquad (2.24)$$

となる。

2.2.3 線状体の運動の数値計算

この項では，数値計算する際に必要となる線状体に作用する外力および回転モーメントを計算する。さらに，計算条件および計算方法について述べる。

(1) 線状体に作用する外力および回転モーメントの計算

まず，X軸，Y軸をそれぞれ水平方向および鉛直方向に定める。

図2.4に示すように，線状体の端面に直角に働く抗力をD_α，その端面以外の部分が流体から受ける抗力のx，y方向成分をそれぞれD_x，D_y，また，重力と浮力の差による外力をF_Gとし，さらに，線状体重心の速度をUとすると，u，vは負となり，D_x，D_yおよびD_αは正の向きに作用し，F_Gのx，y方向成分は負の向きに作用する。したがって，外力X，Yは次式で表わされる。

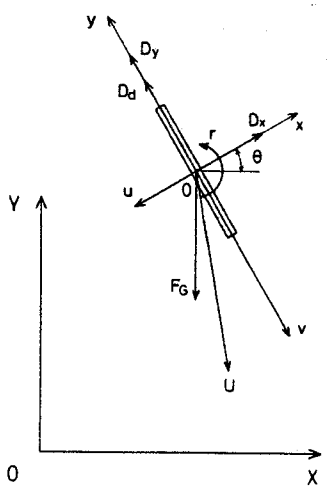


図2.4 線状体に作用する外力

$$\left.\begin{aligned} X &= Dx - F_G \sin\theta \\ Y &= Dy + D_d - F_G \cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (2.25)$$

なお，

$$F_G = (\rho_b - \rho) g \pi d^2 l / 4 \qquad (2.26)$$

となる。

線状体は角速度 r で回転運動しているので，y の位置によって x 方向の速度は変化する。そこで，線状体を n 個の微小要素に分け，その長さを Δl，i 番目の要素の重心の位置を y_i とすると，この点での x 方向速度は，

$$u_i = u - y_i r \qquad (2.27)$$

となる。

ここで対象としている線状体は長さと直径の比が非常に大きいので，軸方向とある角度で運動する線状体回りの流れに対して独立の原理が適用できると仮定する。すなわち，xz 面に平行な面内の流れは，y 方向の流れと無関係であるが，y 方向の流れには軸に直角な面内での流れが関係すると考えると，Dx は，

$$Dx = \sum_{i=1}^{n} 1/2 \, \rho d \cdot \Delta l \cdot C_{di} (-u_i)^2 \qquad (2.28)$$

で表わされる。ただし，総和記号の中の各要素の値は，$-u_i$ と同一の正負の符号をとる。

抗力係数 C_d は $-u_i$ を代表速度とするレイノルズ数

$$Re = |-u_i| d / \nu \qquad (2.29)$$

の関数であり，Re の範囲により次式を用いることにする。

$$C_d = (8\pi/Re)/(2.0022 - \ln Re) \quad , (Re < 1) \qquad (2.30a)$$

$$C_d = -4.078 + 16.631\, Re^{-0.3778} \quad , (1 \leqq Re \leqq 5) \qquad (2.30b)$$

$$C_d = (0.707 + 3.42\, Re^{-1/2})^2 \quad , (5 < Re < 37) \qquad (2.30c)$$

$$C_d = 0.95 + 4\, Re^{-1/2} \quad , (37 \leqq Re < 200) \qquad (2.30d)$$

(2.30a)式は Lamb[14] が Oseen 近似により得た式であり，(2.30c)式は今井[15]の式であり，それぞれのReの範囲で実験値と良く一致するが，範囲外では一致しないので，$1 \leqq Re \leqq 5$ では $Re = 1$，5で接線勾配がそれぞれ(2.30a)式および(2.30c)式と一致し，$Re = 1$ で(2.30a)式の値と一致するようにして求めた(2.30b)式を用いる。また，Reが増加すると，C_d は0.95から1.2の範囲で変化する。円柱の摩擦抗力係数は，$30 < Re < 10^4$ で $4Re^{-1/2}$ で表わされ[16]，ここで必要なReの範囲は高々200であるから，$37 \leqq Re < 200$ では(2.30d)式を用いる。

いっぽう，D_f は摩擦抗力のみであり，その軸方向が流れに傾いて置かれている柱状体の回りの軸方向の流れを表わす式は，流れに直角に置かれている同一形状の柱状体の回りのプラントル数 $Pr = 1$ の場合の強制対流熱移動を表わす式と相似となり，軸方向の摩擦抗力は，表面における $Pr = 1$ の場合の熱移動と相似となるので，

$$D_f = \sum_{i=1}^{n} \pi \rho \nu (-v) \cdot \Delta l \cdot Nu_i \qquad (2.31)$$

で表わされる[17]。ただし，ν は流体の動粘性係数である。

ヌッセルト数 Nu は Re の関数であり，$Pr = 1$ に対する Re と Nu の関係が求められれば，(2.31)式から D_f が計算できる。しかし，$Pr = 1$ の場合の関係は求まっておらず，空気($Pr = 0.71$)に対する実験式が次式のように求められており[18]，ここでは，この式を用いる。

$$Nu = 0.36 + 0.48\,Re^{1/2} \quad , (0.1 < Re < 10^3) \qquad (2.32)$$

ただし，Reは(2.29)式から求める。
また，端面に働く抗力 D_α は，抗力係数を1とすると

$$D_\alpha = 1/2\,\rho(\pi d^2/4)v^2 \qquad (2.33)$$

で表わされる。
最後に，線状体に作用する回転モーメント N は，z 方向の抗力に基づくものであり，

$$N = -\sum_{i=1}^{n} 1/2\,\rho\alpha \cdot \Delta\ell \cdot C_{\alpha i}(-u_i)^2 \cdot y_i \qquad (2.34)$$

となる。ただし，$(-u_i)^2$ は $-u_i$ と同一の正負の符号をとる。

(2) 計算条件および方法

(1)で述べた方法で X，Y および N を求め，線状体の運動方程式(2.22)式と重心の速度を表わす(2.23)式の連立微分方程式を電子計算機用として記憶容量を少なくし，また，丸め誤差の累積を制御するようにくふうした Runge-Kutta-Gill の方法で数値計算し，線状体重心の軌跡 (X, Y)，速度 $(\dot{X}, \dot{Y})$，加速度 $(\ddot{X}, \ddot{Y})$ および線状体の姿勢 θ，角速度 γ を求めた。

数値計算は，まず，静止流体として水を考え，線状体の比重量 γ_0，長さ ℓ，直径 d および初期角度 α を変化させておこなった。初期角度とは初期位置での軸方向と鉛直線のなす角度である。表2.1にこの場合の試料条件および初期条件を示す。

No.1試料，No.2試料はそれぞれ実験で用いた鉛筆の芯，ピアノ線に相当し，γ_0，d の値は実験で用いた試料の平均値を採用し，ℓ は公称長さとした。また，$d = 0.391$ (mm)，$\ell = 30$ (mm) のNo.1試料の場合だけ $\alpha = 1°, 10°, 20°, 30°$ の4種類変化させ

表2.1 試料条件および初期条件

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 ρ_0 (g/cm³)	初期角度 α (°)	初速度 u_0 (mm/s)	初速度 v_0 (mm/s)	初期角速度 r_0 (rad/s)
1	0.391	30 60	1.766	1	-1.0×10^{-2}	-1.0×10^{-2}	1.0×10^{-4}
	0.571	15 30 45 60	1.702	10*			
	0.722	30	1.622	20*			
	0.915	30	1.539	30*			
2	0.310	30 60	7.242				

＊ d=0.391(mm), l=30(mm) のNo.1 試料に対してのみ
α=10, 20 および 30(°) の数値計算をおこなう。

てαの影響を調べ，他の場合にはα=1°で数値計算した。さらに，水の物性値は，実験時の平均水温 29(°C) に対する値 $\rho = 1.016\times10^{-7}$ (gs²/mm⁴)，$\nu = 0.819$ (mm²/s) とした。

つぎに，流体の温度の影響を調べる目的で，α=0.571, 0.915 (mm)，ℓ=60(mm) のNo.1試料に対して，水温 Tw=10, 15, 20, 30(°C) の4種類変化させて数値計算した。そのときの水の物性値を表2.2に示す。なお，初期角度はα=1°とし，他の初期条件は表2.1と同一とした。

表2.2 水の物性値

水温 Tw (°C)	ρ ($\times10^{-9}$ g·s²/mm⁴)	ν (mm²/s)
10	1.019	1.307
15	1.019	1.139
20	1.018	1.004
30	1.015	0.801

これまでは，線状体が水中で運動する場合であるが，流体が変った場合，落下特性がどのように変化するかを調べるため，空気中における線状体の運動を表2.3に示す試料条件および初期条件のもとで数値計算した。この場合，長さℓ，直径αおよび初期角度αの影響を調べた。なお，空気の

表2.3 試料条件および初期条件

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 ρ_0 (g/cm³)	初期角度 α (°)	初速度 u_0 (mm/s)	初速度 v_0 (mm/s)	初期角速度 r_0 (rad/s)
1	0.391	30	1.766	10	-1.0×10^{-2}	-1.0×10^{-2}	1.0×10^{-4}
	0.571	30	1.702	1 10 20 30			
		60		10			
	0.915	30 60	1.539	10			

物性値は実験時の平均室温27.5(℃)，気圧752.4(mmHg)に対する値 $\rho = 1.187 \times 10^{-10}$ ($g s^2/mm^4$)，$\nu = 15.96$ (mm^2/s) とした。

以上の数値計算により，線状体の比重量，長さ，直径，初期角度および流体の温度が重心の軌跡，速度，加速度および姿勢，角速度におよぼす影響を調べることができた。さらに，水中での結果と空気中での結果を比較することにより，主に流体の比重量の違いにより落下特性がどのように変わるかを調べることができた。

以下では，その結果について報告する。その際，落下特性はそれぞれつぎのように表現する。

① 軌跡は重心の水平方向移動距離 X と鉛直方向移動距離 Y の関係で示す。
② 速度は回転角 θ と重心の水平方向速度 $\dot{X}$ および鉛直方向速度 $\dot{Y}$ の関係で示し，加速度も同様に θ と $\ddot{X}$ および $\ddot{Y}$ の関係で示す。
③ 姿勢は落下時間 t と回転角 θ の関係で示す。
④ 角速度は回転角 θ と角速度 γ の関係で示す。

なお，数値計算では Y，$\dot{Y}$ は負となるが，鉛直方向下向きを正の向きとして図示するので，図では正の値になっている。

2.3 線状体長さの影響

この節では，$\alpha = 0.571$ (mm)，$\ell = 15, 30, 45, 60$ (mm) のNO.1試料に対する計算結果から，線状体長さが落下特性におよぼす影響を調べる。

2.3.1 線状体の落下軌跡

$\ell = 30, 60$ (mm) の落下軌跡を図2.5に示す。図中の線状体

の時間間隔は，$\ell = 60\,(mm)$の場合，$\Delta t = 0.4\,(s)$であり，$\ell = 30\,(mm)$の場合，$t \leqq 2.0\,(s)$に対し$\Delta t = 0.4\,(s)$，$t > 2.0\,(s)$に対し$\Delta t = 0.6\,(s)$である。

姿勢が水平近くになるまで回転した場合（$\ell = 30\,(mm)$の場合）を見ると分かるように，重心の軌跡は変曲点（$X = 78\,(mm)$，$Y = 310\,(mm)$付近）をもつ曲線となり，最終的にθは$90°$に漸近し，しかも，線状体は水平方向にはほとんど移動しなくなり，鉛直方向に一定速度で落下する。

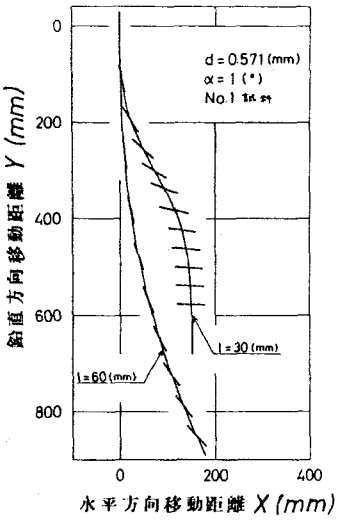


図2.5 落下軌跡におよぼす長さの影響

姿勢が水平方向に漸近するときの重心の速度成分は，θと$\dot{X}$の関係（図2.8）およびθと$\dot{Y}$の関係（図2.9）から，$\dot{X}$は0に近づき，$\dot{Y}$は一定値になることが分かる。

落下軌跡の接線勾配dY/dXは，

$$dY/dX = \dot{Y}/\dot{X} \tag{2.35}$$

となり，dY/dXが最小になるときこの曲線は変曲点をもつ。表2.4に変曲点でのdY/dXの値とそのときのθの値を示す。

dY/dXが最小になるのは$d^2Y/dX^2 = 0$，すなわち

$$\dot{Y}/\dot{X} = \ddot{Y}/\ddot{X} \tag{2.36}$$

が成立つときである。

(2.36)式から，重心の軌跡の変曲点は，重心の運動方向と加速度の方向が一致する点であることが分かる。

加速度の方向は，落下開始直後では重力と浮力の差による外

力によりほぼ鉛直方向下向きである。その後，線状体の運動に伴ない抗力が作用するため，$\ddot{X}$は増大するが，$\ddot{Y}$は減少し負の値になるので，加速度の方向は反時計回りに回転する。やがて，$\ddot{X}$も減少して負の値となり，重心の運動方向と加速度の方向が一致する。ただし，両者の向きは逆になる。その後も，加速度の方向は回転し続け水平方向に漸近する。加速度の方向は，重心の運動方向と加速度の方向が一致するまでの領域では，重心を水平方向に増大させる方向となり，一致した後の領域では，逆に減少させる方向になるため，重心の軌跡は図2.5に示したような曲線となる。

表2.4から，重心の軌跡は，θが60°から65°の範囲内のとき変曲点をもち，また，そのときのθの値は，同一直径の場合にも，同一長さの場合にも細長比ℓ/dが大きいほど小さくなる。いっぽう，dY/dXの値は，同一長さの場合，ℓ/dが大きいほど大きいが，同一直径の場合，NO.1試料とNO.2試料ではℓ/dがおよぼす影響が異なり，NO.1試料ではℓ/dが大きいほど小さくなり，NO.2試料では大きくなる。また，$d=0.391$(mm)のNO.1試料と$d=0.310$(mm)のNO.2試料の場合を比較すると，ρの大きいNO.2試料の方がθの値は大きく，dY/dXの値は小さいことが分かる。

表2.4　軌跡の変曲点における接線勾配と回転角の値

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	接線勾配 dY/dX	接線勾配 θ (°)
1	0.391	30	1.928	59.5
		60	1.911	59.3
	0.571	15	1.803	63.2
		30	1.794	61.9
		45	1.781	61.6
		60	1.772	61.4
	0.722	30	1.611	63.7
	0.915	30	1.456	65.9
2	0.310	30	1.622	62.9
		60	1.633	62.2

なお，比重量および直径が，変曲点でのdY/dXおよびθの値におよぼす影響は，長さの影響より大きい。

つぎに，図2.5から同一回転角に対するX，Yの値は，長さが大きい方が大きくなることが分かる。これを明確にするため，θとXの関係およびθとYの関係を図2.6，2.7に示す。

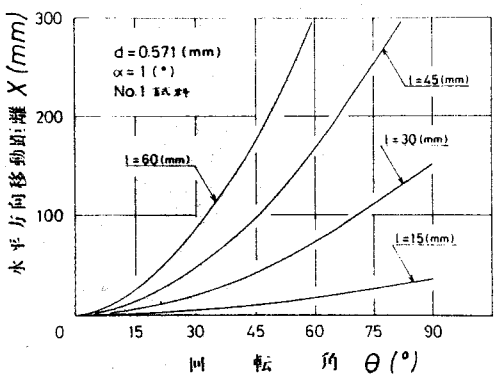


図2.6 水平方向移動距離におよぼす長さの影響

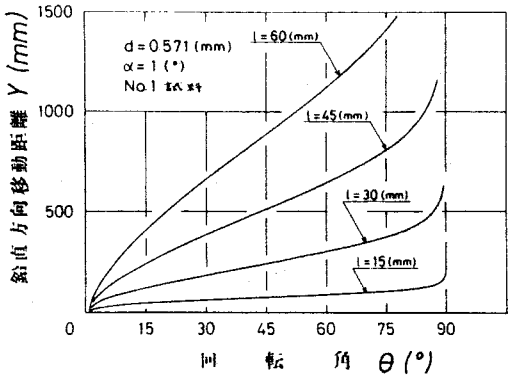


図2.7 鉛直方向移動距離におよぼす長さの影響

θ と X の関係は下に凸の曲線となり，落下開始直後，線状体は鉛直方向に急激に加速されるため，θ と Y の関係は上に凸の曲線で始まり，θ が40°から45°の範囲内のとき変曲点をもち，$\theta = 90°$ の線に漸近する。また，ある回転角に対するこれらの曲線の接線勾配 $dX/d\theta$，$dY/d\theta$ および X，Y の値は，ℓ が大きいほど大きいことが分かる。

接線勾配 $dX/d\theta$，$dY/d\theta$ は，

$$\left.\begin{aligned} dX/d\theta &= \dot{X}/\gamma \\ dY/d\theta &= \dot{Y}/\gamma \end{aligned}\right\} \qquad (2.37)$$

となる。

θ と $\dot{X}$ の関係（図2.8）および θ と $\dot{Y}$ の関係（図2.9）から，長さが，θ と $\dot{X}$ の関係におよぼす影響は，ここでおこなった計算の範囲内ではわずかであり，また，θ と $\dot{Y}$ の関係におよぼす影響は，とくに θ の小さい領域で現われ，$\dot{Y}$ は ℓ が大きいほど大きいが，その後，θ の増加に伴ない長さの影響を受けなくなる。ところが，θ と γ の関係（図2.13）から，ℓ が大きいほど γ は小さくなる。したがって，(2.37)式から，$dX/d\theta$，$dY/d\theta$

は，ℓが大きいほど大きくなることが分かる。

2.3.2 線状体重心の速度および加速度

図2.8において，$\dot{X}$は$\theta=1°$のとき0で，40°から50°の範囲内まで加速され，最大となり，その後減少し，線状体の姿勢が水平方向に近づくと，線状体には水平方向の外力が作用しなくなり，$\theta=90°$で0となる。いっぽう，図2.9において，$\dot{Y}$は落下開始直後に重力と浮力の差による外力により急激に加速され，θが5°以下の範囲内で最大となり，その後抗力の増大により，θの増加に伴ない単調に減少する。θが90°に近づくと鉛直方向に働く抗力と，重力と浮力の差による外力が釣合うため，$\dot{Y}$は一定値となる。

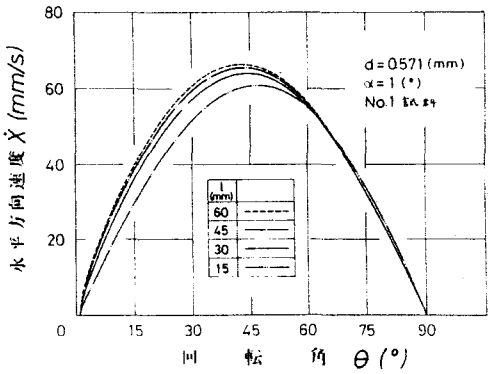


図2.8 水平方向速度におよぼす長さの影響

また，θが約65°以下の領域では，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにℓが大きいほど大きいが，これ以上の領域では，$\dot{X}$はℓが小さい方が大きくなる。しかし，$\dot{X}$におよぼす長さの影響は，65°以下の領域での場合と比較して無視しうるほど小さくなり，$\dot{Y}$は長さの影響を受けない。

表2.5に$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値とそのときのθの値を示す。$\dot{X}$，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は，同一直径の場合にも同一長さの場合にも，ℓ/dが大きいほど小

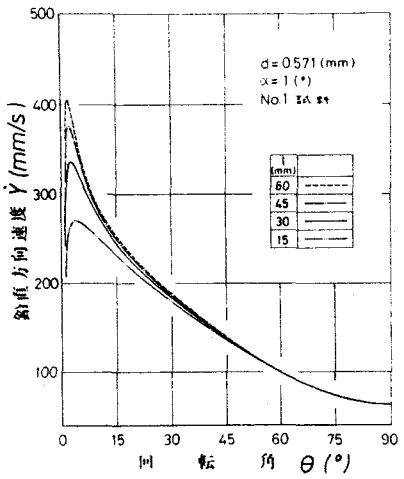


図2.9 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

さくなる。

つぎに，長さが重心の加速度におよぼす影響を調べる。

図2.10において，$\alpha=1°$の場合，線状体は落下開始の瞬間に主に重力と浮力の差にもとづく外力F_αにより，水平方向に約26(mm/s^2)の加速度をもち，$\ddot{X}$は減少して$\theta=1.02°$程度で極小（約23(mm/s^2)）となり，その後増大する。落下開始の瞬間から$\ddot{X}$が減少してゆく様子は，2.5.2項に記載する初期角度が$\ddot{X}$におよぼす影響を表わす図2.29において，$\alpha=10°$～$30°$の場合明確に現われている。増大し始めた$\ddot{X}$は，$3°<\theta<15°$のとき最大となり，減少して$40°<\theta<50°$のとき正の値から負の値へ移り，$65°<\theta<70°$のとき最小となり，$\theta=90°$でふたたび0となる。$\ddot{X}$は$40°<\theta<50°$のとき0となるが，そのときのθの値は，表2.5に示した$\dot{X}$が最大になるときのθの値である。

表2.5　重心速度の最大値とそのときの回転角の値

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	水平方向速度の最大値 $\dot{X}$ (mm/s)	θ (°)	鉛直方向速度の最大値 $\dot{Y}$ (mm/s)	θ (°)
1	0.391	30	44.85	41.8	280.4	1.77
		60	45.91	41.2	320.8	1.38
	0.571	15	60.89	46.8	270.0	4.03
		30	63.99	44.3	336.5	2.66
		45	65.50	43.4	377.2	2.09
		60	66.39	42.8	406.3	1.88
	0.722	30	78.73	46.5	350.7	3.45
	0.915	30	94.35	48.4	356.0	4.37
2	0.310	30	165.04	45.2	756.0	3.78
		60	167.00	43.7	925.7	2.44

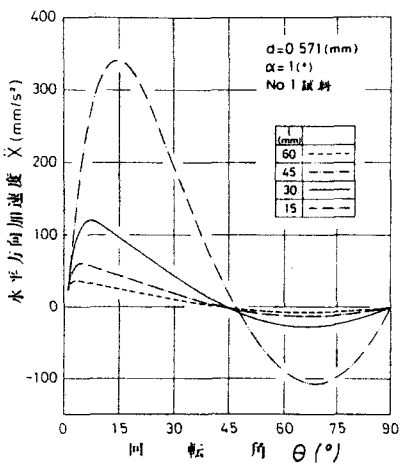


図2.10　水平方向加速度におよぼす長さの影響

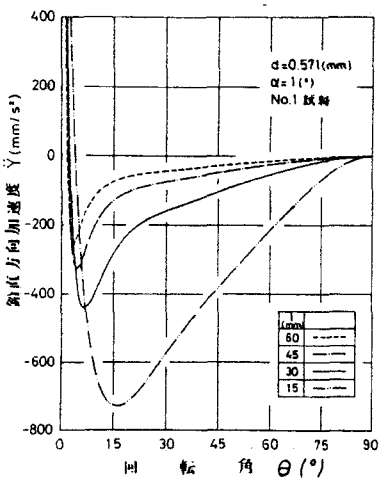


図2.11　鉛直方向加速度におよぼす長さの影響

いっぽう，図2.11において，$\ddot{Y}$は落下開始の瞬間に約4050 (mm/s^2) であり，急激に減少してθが5°以下の範囲内のとき正の値から負の値へ移り，3°<θ<17°のとき最小となり，増大してθ=90°でふたたび0となる。$\ddot{Y}$はθ<5°のとき0となるが，そのときのθの値は，表2.5に示した$\dot{Y}$が最大になるときのθの値である。

表2.6に$\ddot{X}$の最大値と最小値，$\ddot{Y}$の最小値とそのときのθの値を示す。最大値および最小値の絶対値とそのときのθの値は，同一直径の場合にも同一長さの場合にもℓ/αが大きいほど小さくなり，α=0.391 (mm)のNO.1試料とα=0.310 (mm)のNO.2試料の場合を比較すると，γ_bが大きいNO.2試料の方が，これらの値は大きいことが分かる。

ここで，長さが$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$におよぼす影響について考察する。図2.8から，長さがθと$\ddot{X}$の関係におよぼす影響はわずかであり，また，図2.9からθと$\ddot{Y}$の関係におよぼす影響は，とくにθの小さい領域で現われ，$\ddot{Y}$はℓが大きいほど大きいが，その後長さの影響を受けなくなる。ところが，θとγの関係（図2.13）から，ℓが大きいほどγは小さく線状体が回転するのに要する時間は長い。したがって，ℓが大きいほど加速あるいは減速される時間は大きくなる。また，長さが線状体の回転におよぼす影響は，速度におよぼす影響より大きい。したがって，ℓ

表2.6 重心加速度の最大値，最小値とそのときの回転角の値

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	水平方向加速度の最大値 $\ddot{X}_{max}$ (mm/s²)	θ (°)	水平方向加速度の最小値 $\ddot{X}_{min}$ (mm/s²)	θ (°)	鉛直方向加速度の最小値 $\ddot{Y}_{min}$ (mm/s²)	θ (°)
1	0.391	30	30.16	2.81	- 8.56	64.6	- 193.1	3.21
		60	26.59	1.00	- 2.21	63.8	- 86.6	1.88
	0.571	15	341.09	14.35	- 107.13	68.4	- 728.4	16.23
		30	119.89	7.19	- 27.82	66.8	- 441.0	6.81
		45	60.81	4.64	- 12.80	65.9	- 326.5	4.47
		60	36.98	3.22	- 7.35	65.7	- 256.1	3.50
	0.722	30	221.34	10.98	- 55.52	68.1	- 548.1	10.31
	0.915	30	350.78	13.58	- 103.81	70.5	- 596.2	15.02
2	0.310	30	497.86	9.43	- 101.67	66.4	- 1249.0	9.76
		60	153.64	4.17	- 25.43	65.1	- 748.8	4.80

が大きいほど $\ddot{X}$，$\ddot{Y}$ の絶対値は小さくなる。

2.3.3 線状体の姿勢および角速度

落下中の姿勢の変化を表わす t と θ の関係および θ と r の関係を図2.12，2.13に示す。

t と θ の関係は，下に凸の曲線で始まり，θ が10°から20°の範囲内のとき変曲点をもち，$\theta = 90°$ に漸近するような曲線になる。すなわち，r は $10° < \theta < 20°$ まで加速されるが，これ以上の領域では減速され，最終的に，姿勢は水平方向に漸近する。姿勢が水平方向に近づくと線状体に作用する外力は釣合うようになるので，水平な姿勢がもっとも安定した状態である。

また，図2.13から，ℓ が小さいほど r は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。t と θ の関係を表わす曲線が変曲点をもつときの θ の値は，r が最大になるときの θ の値である。表2.7に r の最大値とそのときの θ の値を示す。r の最大値は，同一直径の場合にも同一長さの場合にも，ℓ/d が小さいほど大

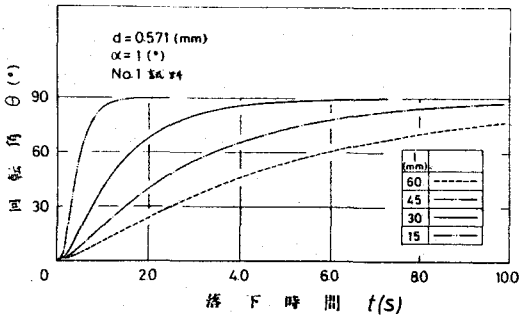


図2.12 姿勢におよぼす長さの影響

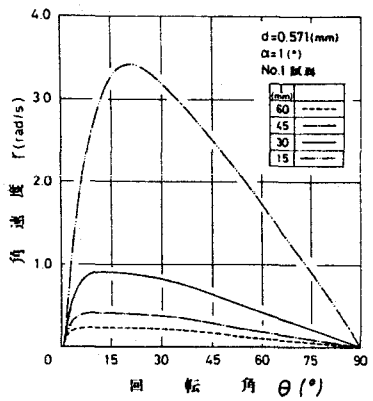


図2.13 角速度におよぼす長さの影響

表2.7 角速度の最大値とそのときの回転角の値

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	角速度の最大値 r (rad/s)	θ (°)
1	0.391	30	0.3114	18.2
		60	0.0796	17.6
	0.571	15	3.4260	20.5
		30	0.9152	13.0
		45	0.4097	12.0
		60	0.2328	12.6
	0.722	30	1.5192	13.7
	0.915	30	2.1146	16.7
2	0.310	30	1.4376	12.4
		60	0.3555	7.1

きく，また，$d=0.391$(mm)のNO.1試料と$d=0.310$(mm)のNO.2試の場合を比較すると，θ_0の大きいNO.2試料の方が大きい。なお，θの値は，長さおよび直径に対して一定の傾向を示さない。

2.4 線状体直径の影響

この節では，$\ell=30$(mm)，$d=0.391$，0.571，0.722，0.915(mm)のNO.1試料に対する計算結果から，線状体直径が落下特性におよぼす影響を調べる。

2.4.1 線状体の落下軌跡

$d=0.391$，0.915(mm)の落下軌跡を図2.14に示す。図中の線状体の時間間隔は，$d=0.391$(mm)の場合，$\Delta t=0.6$(S)であり，$d=0.915$(mm)の場合，$t \leqq 1.0$(S)に対し$\Delta t=0.2$(S)，$t>1.0$(S)に対し$\Delta t=0.4$(S)である。

重心の軌跡は，すでに2.3.1項で説明したように，変曲点をもつ曲線となり，表2.4から，変曲点での接線勾配$\alpha Y/\alpha X$の値は，dが大きいほど小さく，そのときのθの値は大きいことが分かる。すなわち，重心の運動方向と加速度の方向が一致するときの運動方向と線状体の姿勢は，直径が大きいほどより水平に近くなる。

また，図2.14から，同一回転角に対するX，Yの値は，dが小さい方が大きくなることが分かる。これを明確にするため，θとXの関係およびθとYの関係を図2.15，2.16に示す。

これらの図から，ある回転角に対す

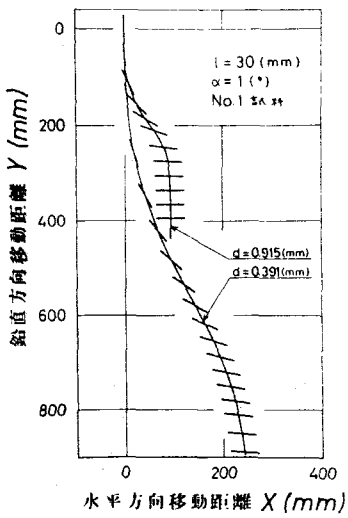


図2.14 落下軌跡におよぼす直径の影響

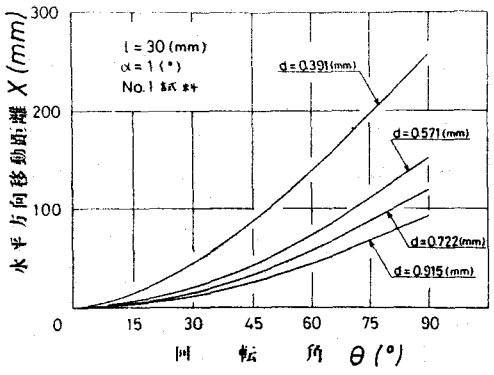


図2.15 水平方向移動距離Xにおよぼす直径の影響

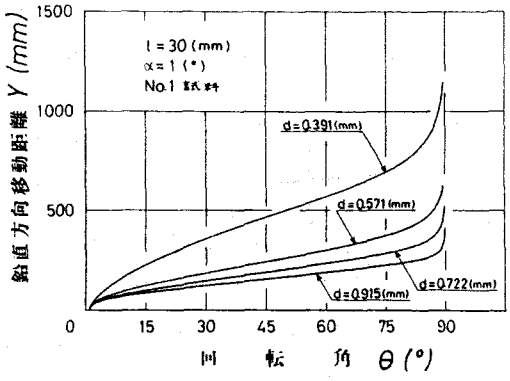


図2.16 鉛直方向移動距離Yにおよぼす直径の影響

る曲線の接線勾配 $dX/d\theta$, $dY/d\theta$ および X, Y の値は，α が小さいほど大きいことが分かる。

θ と $\dot{X}$ の関係（図2.17）および θ と $\dot{Y}$ の関係（図2.18）から，α が大きいほど $\dot{X}$, $\dot{Y}$ は大きく，$\alpha = 0.391$ (mm) と $\alpha = 0.915$ (mm) の最大値を比較すると，$\dot{X}$, $\dot{Y}$ に関してそれぞれ約2.1倍，約1.3倍となる。いっぽう，θ と γ の関係（図2.22）から，α が大きいほど γ は大きく，同様に $\alpha = 0.391$ (mm) と $\alpha = 0.915$ (mm) の場合を比較すると約7倍となる。したがって，$dX/d\theta$, $dY/d\theta$ を表わす（2.37）式から，$dX/d\theta$, $dY/d\theta$ は，α が小さいほど大きくなることが分かる。

そこで，長さの影響を表わす図2.6，2.7と直径の影響を表わす図2.15，2.16を比較すると，ある回転角に対するX，Yの値は，長さ，直径にかかわらず ℓ/α が大きいほど大きくなることが分かる。したがって，ℓ/α のもっとも大きい線状体の姿勢が水平になるのに十分な高さで，線状体を自由落下させれば，最終落下位置で ℓ/α の値により線状体を分類することができる。

2.4.2 線状体重心の速度および加速度

図2.17，2.18において，線状体は，θ が40°から50°の範囲内

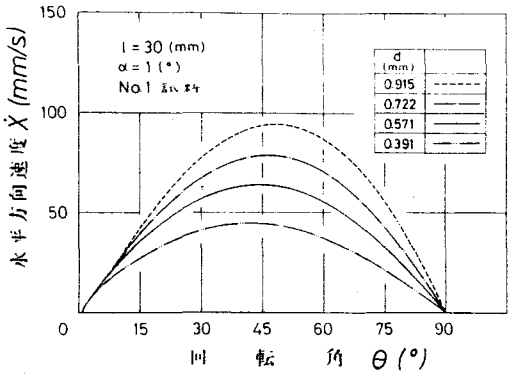


図2.17 水平方向速度におよぼす直径の影響

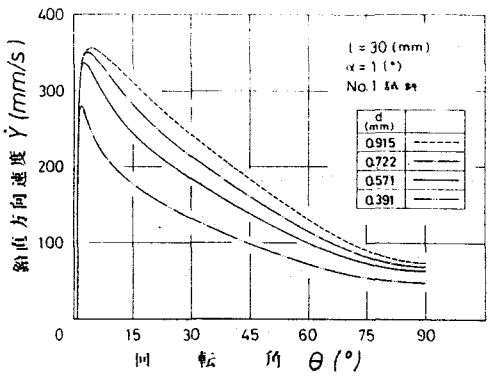


図2.18 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

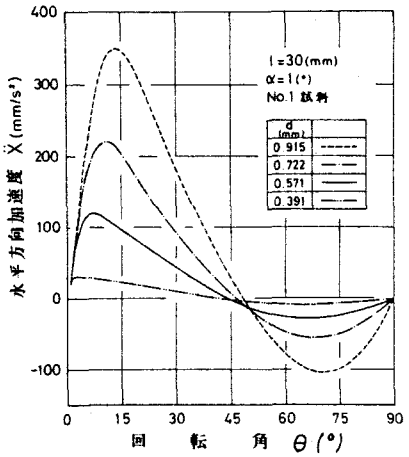


図2.19 水平方向加速度におよぼす直径の影響

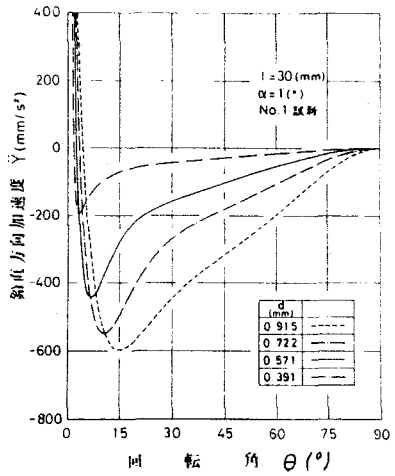


図2.20 鉛直方向加速度におよぼす直径の影響

まで水平方向に加速され，また，θが5°以下の範囲内まで鉛直方向に加速される。さらに，θの全領域（1°～90°）で$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに直径が大きいほど大きくなる。

直径が重心の加速度におよぼす影響を表わす図2.19，2.20において，$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$はそれぞれ10°<θ<50°および0<5°のとき0になるが，そのときのθの値は，$\dot{X}$，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値であり，αが大きいほど大きくなる。表2.5から，$\dot{X}$，$\dot{Y}$

が最大になるときのθの値は，同一直径，同一長さの場合，ℓ/αが大きいほど小さいが，このθの値におよぼす影響は直径の方が長さより大きいため，直径，長さにかかわらずℓ/αが大きいほど小さくなるとは言えない。

つぎに，図2.19，2.20から，$\ddot{X}$は3°<θ<15°のとき最大，64°<θ<71°のとき最小となり，$\ddot{Y}$は3°<θ<16°のとき最小となる。また，これらの最大値および最小値の絶対値とそのときのθの値は，αが大きいほど大きくなる。上述したように，θの全領域で$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$ともにαが大きいほど大きく，また，θとγの関係（図2.22）から，αが大きいほど線状体はより短い時間で回転するので，加速あるいは減速される時間が小さくなる。したがって，αが大きいほど$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の絶対値は大きい。

また，表2.6から，$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$が最大あるいは最小になるときのθの値は，同一直径，同一長さの場合，ℓ/αが大きいほど小さいが，長さ，直径にかかわらずℓ/αが大きいほど小さくなるとは言えない。

2.4.3 線状体の姿勢および角速度

tとθの関係およびθとγの関係を図2.21，2.22に示す。

tとθの関係は，下に凸の曲線で始まり10°<θ<20°のとき変曲点をもち，θ=90°に漸近するような曲線になる。すなわち，γは落下開始直後に加速され，10°<θ<20°のとき最大となり，その後，γおよび重心速度の軸に直角な方向成分uの増大に伴ない，線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントMが増大し角加速度は負になるので，γは減少し，θ=90°で0となる。また，直径が大きいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。

したがって，2.3.3項の結果をあわせて考えると，同一直径，同一長さの場合，ℓ/αが小さいほどγは大きいという結果を得る。そこで，長さが姿勢および角速度におよぼす影響を表わ

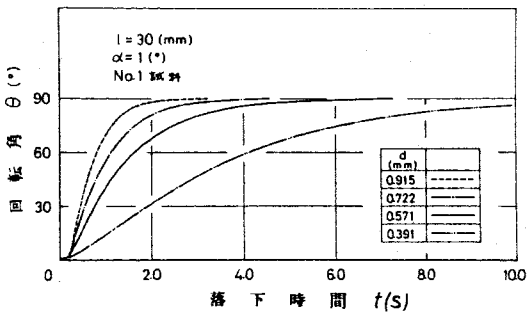


図2.21 姿勢におよぼす直径の影響

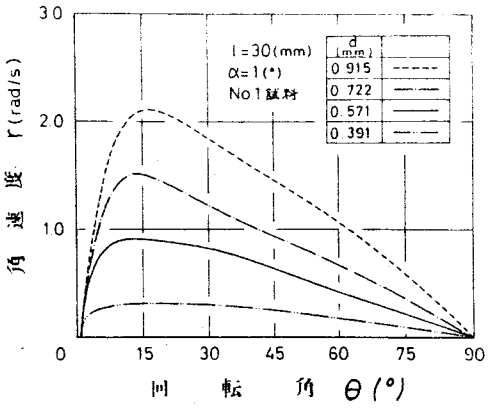


図2.22 角速度におよぼす直径の影響

す図2.12, 2.13と直径の影響を表わす図2.21, 2.22を比較すると, $\alpha = 0.571$ (mm), $\ell = 45$ (mm) の場合と $\alpha = 0.391$ (mm), $\ell = 30$ (mm) の場合を除いて, 長さ, 直径にかかわらず ℓ/α が小さいほどγはθの全領域で大きくなり, 線状体が回転するのに要する時間は短くなるが, この2つの場合には前者が $\ell/\alpha = 78.8$, 後者が 76.7 と前者の方が ℓ/α が大きいにもかかわらずγは大きくなるため, 長さ, 直径にかかわらず ℓ/α が小さいほど角速度は大きいとは言えない。

2.5 初期角度の影響

この節では, $\alpha = 0.391$ (mm), $\ell = 30$ (mm) のNO.1試料に対する $\alpha = 1°, 10°, 20°, 30°$ の計算結果から, 初期角度が落下特性におよぼす影響を調べる。

2.5.1 線状体の落下軌跡

$\alpha = 1°, 30°$ の重心の軌跡と 0.6 (s) ごとの姿勢の変化を図2.23に示す。

初期角度により線状体が運動をおこなう位置が異なるが, 重心の軌跡は変曲点をもつ曲線になり, 最終的に姿勢は水平方

向に漸近し，水平方向にはほとんど移動しなくなり，鉛直方向に一定速度で落下する。また，落下開始後しばらくの間，$\alpha=30°$の方が$\dot{X}$は大きく，$\dot{Y}$は小さいため，同一鉛直方向移動距離でのXの値は大きいが，最終的には$\alpha=1°$の方がXの値は大きくなることが分かる。

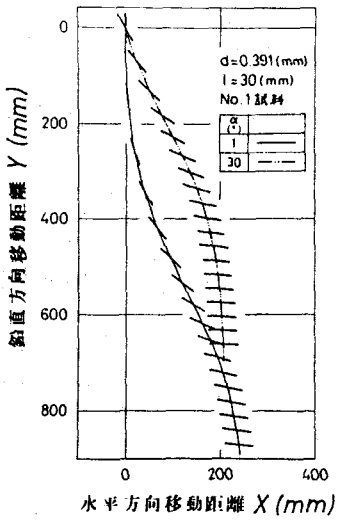


図2.23 落下軌跡におよぼす初期角度の影響

表2.8に軌跡が変曲点をもつ位置(X, Y)と変曲点での$\partial Y/\partial X$とそのときのθの値を示す。

初期角度が大きいほど変曲点をもつ位置(X, Y)は小さくなるが，変曲点での$\partial Y/\partial X$およびθの値は初期角度にかかわらず一致する。したがって，図2.23で$\alpha=30°$の軌跡をX, Y軸に沿って変曲点同志が重なる位置まで平行移動すると，$\alpha=1°$と$\alpha=30°$の軌跡は一致することが予想される。

そこで，これを調べるため，θとXの関係およびθとYの関係を図2.24, 2.25に示す。

ある回転角に対するX, Yの値は，αが小さいほど大きいが，$\alpha=10°\sim30°$の曲線をX軸あるいはY軸に沿って平行移動すると，落下開始直後のθにして約5°の領域を除いて$\alpha=1°$の

表2.8 軌跡が変曲点をもつ位置とこの点での接線勾配と回転角の値

初期角度	接線勾配		水平方向移動距離	鉛直方向移動距離
α (°)	dY/dX	θ (°)	X (mm)	Y (mm)
1	1.928	59.5	136.7	567.4
10	1.928	59.5	129.5	399.7
20	1.928	59.5	113.9	296.6
30	1.928	59.5	92.2	212.4

d=0.391(mm), l=30(mm), No.1 試料

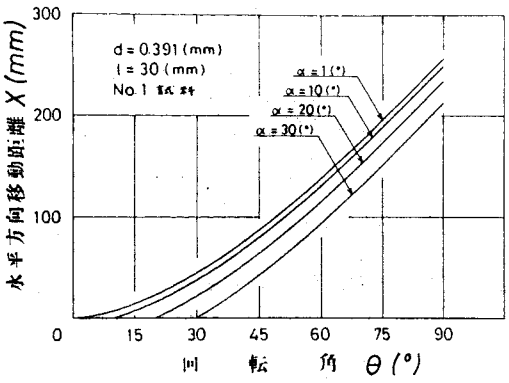


図2.24 水平方向移動距離におよぼす初期角度の影響

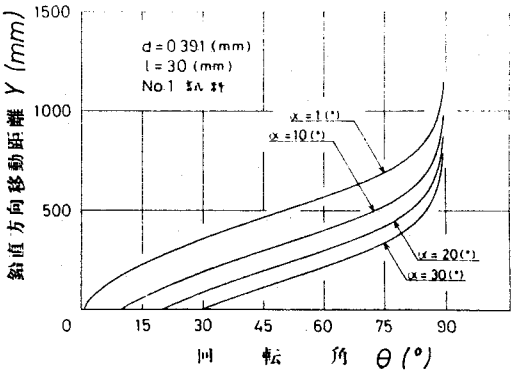


図2.25 鉛直方向移動距離におよぼす初期角度の影響

曲線と一致することが分かる。これは，θと$\dot{X}$の関係（図2.27）およびθと$\dot{Y}$の関係（図2.28）とθとYの関係（図2.31）から，$\alpha=10°\sim30°$のこれらの曲線が，落下開始直後のθにして約5°の領域を除いて$\alpha=1°$の曲線と一致することから（2.37）式を考慮すれば明らかとなる。

したがって，$\alpha=10°\sim30°$の軌跡は，X，Y軸に沿ってθが等しくなる位置まで平行移動すると，落下開始直後のθにして約5°の領域を除いて$\alpha=1°$の軌跡と一致する。

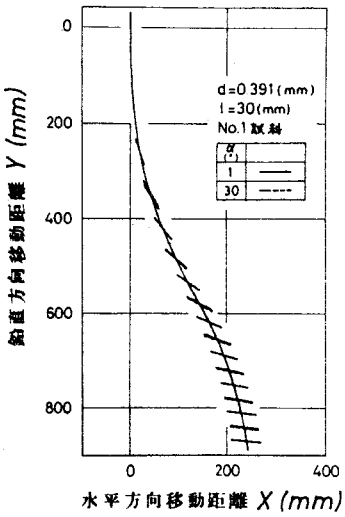


図2.26 落下軌跡におよぼす初期角度の影響

図2.26に$\alpha=30°$の軌跡を平行移動した後の$\alpha=1°$と30°の軌跡を示す。$\alpha=1°$の軌跡が分かれば$\alpha>1°$の軌跡は落下開始直後の領域を除いてすべて分かる。

2.5.2 線状体重心の速度および加速度

図2.27，2.28において，$\alpha=10°\sim30°$の$\dot{X}$，$\dot{Y}$は，落下開始直後急激に加速され$\alpha=1°$の曲線に近づき一致する。また，$\alpha=1°$

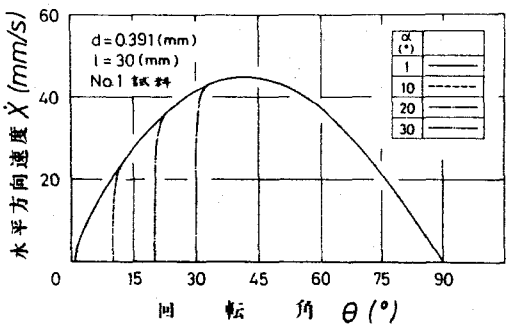


図2.27 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

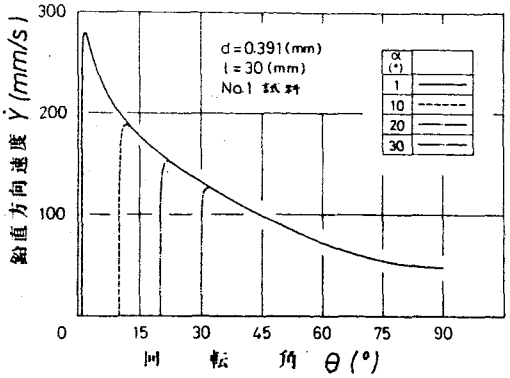


図2.28 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

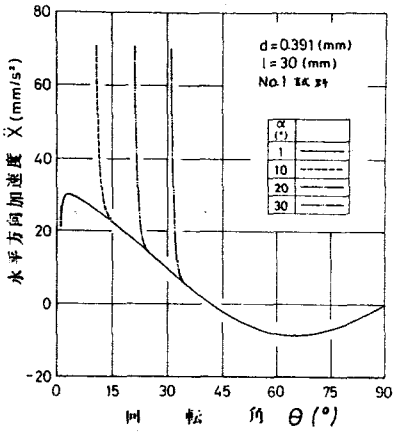


図2.29 水平方向加速度におよぼす初期角度の影響

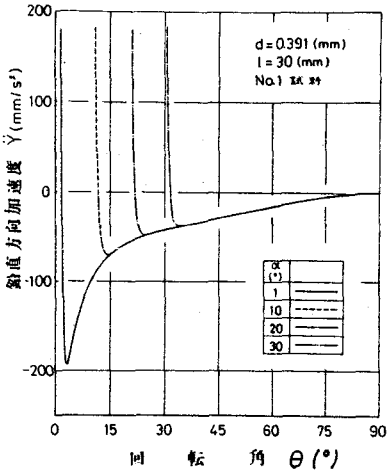


図2.30 鉛直方向加速度におよぼす初期角度の影響

の曲線と一致するまでに線状体が回転する角度は，$\alpha=10°, 20°, 30°$の場合，$\ddot{X}$に関しては5.5°, 5.0°, 4.7°となり，$\ddot{Y}$に関しては4.8°, 4.3°, 3.6°となる。

つぎに，初期角度が重心の加速度におよぼす影響を調べるため，θと$\ddot{X}$の関係およびθと$\ddot{Y}$の関係を図2.29, 2.30に示す。

すでに2.3.2項で述べたように，線状体は落下開始の瞬間に主に重力と浮力の差にもとづく外力F_αにより水平方向に加速

度をもち，$\ddot{X}$は減少して線状体が微小回転した後極小となる。落下開始の瞬間から$\ddot{X}$が減少する様子は，$\alpha=10°\sim30°$の場合明確に現われている。

落下開始の瞬間では，初期角度が大きいほどF_Gのx方向成分は大きく，y方向成分は小さいので，軸に直角な方向の加速度du/dtの絶対値は大きく，軸方向の加速度dv/dtの絶対値は小さくなり（du/dt，dv/dtは負の値である。），加速度を表わす（2.24）式を考慮すれば，$\ddot{X}$は大きく，$\ddot{Y}$は小さくなる。すなわち，$\alpha=1°, 10°, 20°, 30°$の場合，$\ddot{X}=26.7, 261.4, 491.2, 661.8\ (mm/s^2)$，$\ddot{Y}=4261, 4215, 4082, 3879\ (mm/s^2)$となる。しかし，$\alpha=10°\sim30°$の$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$は落下開始直後急激に減少して$\alpha=1°$の曲線に近づき一致する。

2.5.3 線状体の姿勢および角速度

姿勢および角速度の変化を図2.31，2.32に示す。tとθの関係は変曲点をもちθ=90°に漸近するような曲線になる。この曲線が変曲点をもつときのθの値は，$\alpha=1°, 10°, 20°, 30°$の場合，$\theta=18.2°, 18.2°, 23.3°, 32.5°$であり，このθの値は，γが最大になるときの値であるから，角速度が最大になるまでに線状体が回転する角度はαが大きいほど小さくなる。

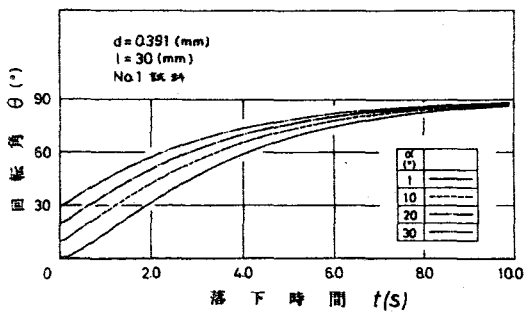


図2.31 姿勢におよぼす初期角度の影響

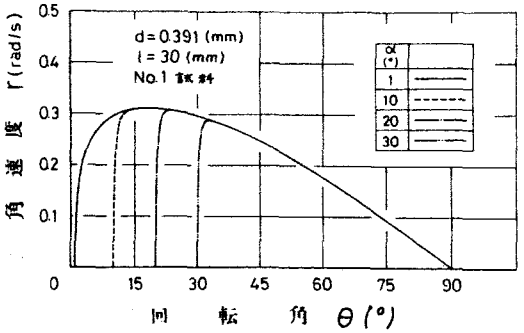


図2.32 角速度におよぼす初期角度の影響

また，$\alpha=10°\sim30°$の曲線を横軸（落下時間軸）に沿って平行移動すると，落下開始直後のθにして約5°の領域を除いて$\alpha=1°$の曲線と重なることが分かる。これは，図2.32において，$\alpha=10°\sim30°$のγが，落下開始直後急激に加速され$\alpha=1°$の曲線に近づき一致することから明確に分かる。なお，$\alpha=1°$の場合と一致するまでに線状体が回転する角度は，$\alpha=10°, 20°, 30°$の場合，5.8°, 5.1°, 4.5°となる。

以上の結果から，落下開始直後の急激な加速領域を除き，初期角度は運動状態に影響をおよぼさず，姿勢が同じであれば初期角度に関係なく運動状態は同一になる。

2.6 線状体比重量の影響

この節では，$d=0.391$(mm)，$\ell=30, 60$(mm)のNO.1試料と$d=0.310$(mm)，$\ell=30, 60$(mm)のNO.2試料に対する計算結果から，線状体比重量が落下特性におよぼす影響について調べる。なお，NO.1試料とNO.2試料では直径も異なるため，2.4節で述べた直径の影響の結果も考慮する必要がある。

2.6.1 線状体の落下軌跡

$\ell=30$(mm)のNO.1試料とNO.2試料の落下軌跡を図2.33に示す。線状体の時間間隔は，NO.1試料の場合，$\Delta t=0.6$(s)，NO.2試料の場合，$\Delta t=0.3$(s)である。

重心の軌跡は変曲点をもつ曲線になり，ρの大きいNO.2試料の方が同一回転角での速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短いことが分かる。また，軌跡が変曲点をもつ位置は，NO.1試料，NO.2試料でそれぞれ(136.7, 567.4)，(148.3, 531.2)であり，2.3.1項に記載した表2.4から，NO.2試料の方が変曲点での$d\gamma/dx$の値は小さく，そのときのθの値は大きくなる。

すでに述べたように，直径が大きいほど変曲点でのdY/dXの値は小さく，θの値は大きくなる。したがって，同一直径で重さが異なる場合，加速度の方向と一致するときの重心の運動方向，およびそのときの線状体の姿勢は，重い方がより水平に近くなる。

つぎに，図2.33から同一回転角に対するYの値は，γ_bの大きいNo.2試料の方が小さいが，Xの値に関しては分かりにくい。そこで，これを明確にするため，姿勢の変化に対するX，Yの変化を図2.34，2.35に示す。

図2.34から，$\ell=30$(mm)の場合，ある回転角に対するXの値は，$\theta<63.5°$の領域ではNo.1試料の方が大きいが，これ以上の領域ではNo.2試料の方が大きい。なお，この図には現われていないが$\ell=60$(mm)の場合，$\theta<59.5°$の領域でNo.1試料の方が大きくなる。

また，図2.35から，Yの値は落下開始直後のθの小さい領域のみでNo.2試料の方が大きくなる。このθの値は$\ell=30, 60$(mm)の場合，2.0°，4.5°である。

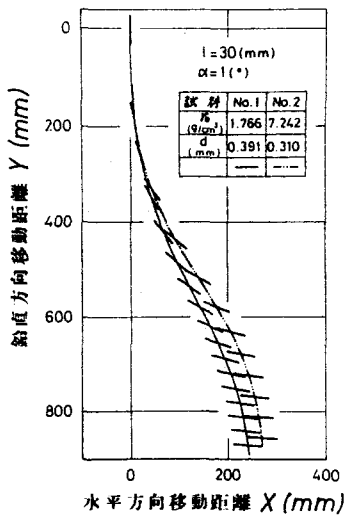


図2.33 落下軌跡におよぼす比重量の影響

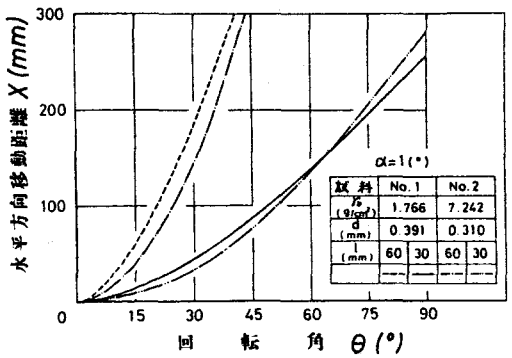


図2.34 水平方向移動距離におよぼす比重量の影響

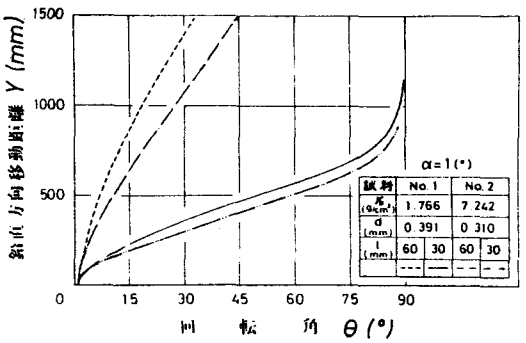


図2.35 鉛直方向移動距離におよぼす比重量の影響

同一回転角におけるX，Yの値は，直径が大きいほど小さいので，NO.1試料と同一直径のNO.2試料の場合，X，Yは図示した値より小さくなり，NO.1試料の方が大きくなるθの領域は拡大される。したがって，NO.1試料と同一直径のNO.2試料の場合，重心の軌跡は図2.33に示す軌跡をX，Y方向に縮小したものになる。

2.6.2 線状体重心の速度および加速度

姿勢の変化に対する重心の速度の変化を図2.36，2.37に示す。線状体は，$\theta = 40° \sim 50°$ の範囲内まで水平方向に加速され，また，$\theta < 5°$ まで鉛直方向に加速される。さらに，θの全領域で $\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに ρ の大きいNO.2試料の方が大きくなる。2.3.2項に記載した表2.5から，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ が最大になるときのθの値はNO.2試料の方が大きくなる。なお，NO.2試料の $\dot{X}$，$\dot{Y}$ の最大値はNO.1試料の約3.7倍，2.8倍である。

$\dot{X}$，$\dot{Y}$ の値およびそれらが最大になるときのθの値は，直径が大きいほど大きい。したがって，同一直径で重さが異なる場合，これらの値は重い方がいっそう大きくなる。

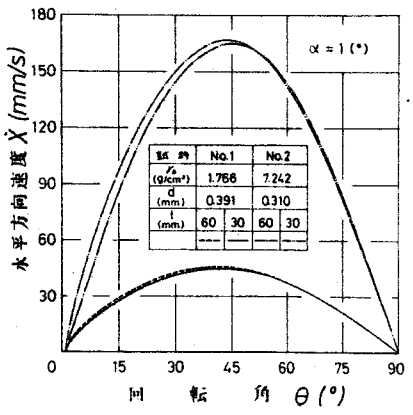


図2.36 水平方向速度におよぼす比重量の影響

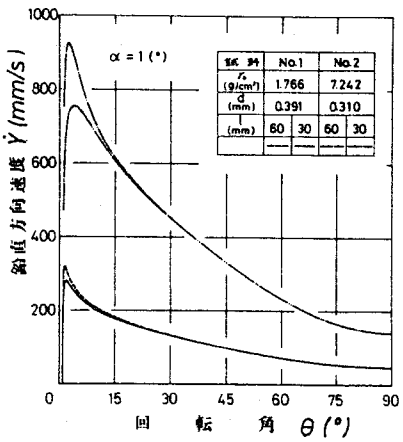


図2.37 鉛直方向速度におよぼす比重量の影響

また，これらの図で$\ell=60(mm)$と$\ell=30(mm)$の場合の差を比較すると，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにNO.2試料の方が大きく，γ_bが大きい方が長さの影響を受け易い。

つぎに，表2.6から$\ddot{X}$の最大値および最小値の絶対値，$\ddot{Y}$の最小値の絶対値とそのときのθの値は，γ_bの大きいNO.2試料の方が大きくなる。上述したように，θの全領域で$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにNO.2試料の方が大きく，また，tとθの関係（図2.38）から，NO.2試料の方が短い時間で回転するので加速あるい減速される時間が小さくなる。したがって，NO.2試料の方が$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の絶対値は大きい。

ここで，直径の影響を考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，上述の値は重い方がいっそう大きくなる。

2.6.3 線状体の姿勢および角速度

姿勢の変化を図2.38に示す。γ_bの大きいNO.2試料の方が角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さい。また，$\ell=30(mm)$のNO.1試料の曲線と$\ell=60(mm)$のNO.2試料の曲線はかなり似た形になる。

2.3.3項に記載した表2.7から，NO.2試料の方がγの最大値は約4.5倍大きく，γが加速されるθの領域は小さいことが分かる。ここで，直径が大きいほど角速度は大きくなることを考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，重い方がいっそう大きくなる。

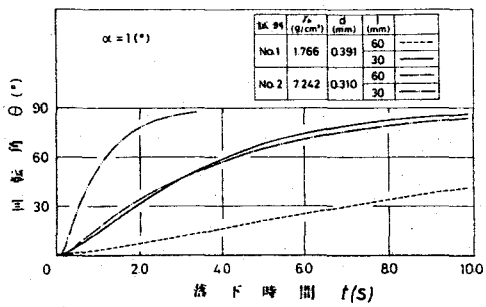


図2.38 姿勢におよぼす比重量の影響

2.7 流体の温度の影響

この節では，$d=0.571, 0.915$ (mm)，$\ell=60$ (mm) の No.1 試料に対して，水温を $T_w=10, 15, 20, 30$ (°C) と変化させた場合の落下特性を調べる。各水温に対する水の物性値は表2.2に示した通りである。水温が変化すると，比質量の変化はわづかであるが，動粘性係数が大きく変わる。

2.7.1 線状体の落下軌跡

$d=0.571$ (mm)，$T_w=10, 30$ (°C) の重心の軌跡と 0.4 (s) ごとの姿勢の変化を図2.39に示す。

水温により重心の軌跡は異なり，同一鉛直方向移動距離での X の値は，$T_w=30$ (°C) のときの方が大きい。この図には示していないが計算によれば，$T_w=30$ (°C) のときの方が X の値が大きいのは，Y が 2040 (mm) 以下の範囲内であり，最終的には $T_w=10$ (°C) の方が X の値は大きくなる。（図2.42参照）また，この図から線状体が回転するのに要する時間は $T_w=30$ (°C) のときの方が小さいことが分かる。なお，図示していないが，$T_w=15, 20$ (°C) の重心の軌跡は $T_w=10$ (°C) と 30 (°C) の軌跡の間に位置する曲線になる。

表2.9に軌跡が変曲点をもつ位置 (X, Y) と変曲点での dY/dX とそのときの θ の値を示す。

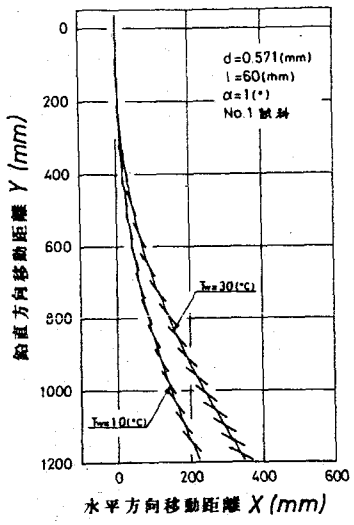


図2.39 落下軌跡におよぼす水温の影響

表2.9 軌跡が変曲点をもつ位置とこの点での接線勾配と回転角の値

線状体直径 d (mm)	水温 T_w (°C)	接線勾配 dX/dY	接線勾配 θ (°)	水平方向移動距離 X (mm)	鉛直方向移動距離 Y (mm)
0.571	10	1.912	59.4	363.8	1476.3
	15	1.888	60.0	339.3	1349.2
	20	1.861	60.0	316.5	1241.5
	30	1.756	61.5	316.2	1140.8
0.915	10	1.718	62.1	199.6	731.4
	15	1.631	62.8	204.1	712.1
	20	1.556	63.4	207.8	696.7
	30	1.433	64.4	213.5	672.7

ℓ=60(mm)，No.1 試料

$d=0.571, 0.915$ (mm) ともに，T_wが大きいほどdY/dXの値は小さく，θの値は大きくなる。すなわち，水温が高いほど，加速度の方向と一致するときの重心の運動方向，およびそのときの線状体の姿勢はより水平に近くなる。ところが，変曲点をもつ位置は，直径により異なる傾向を示し，$d=0.571$ (mm)の場合，T_wが大きいほどX，Yの値は小さくなるが，$d=0.915$ (mm)の場合，T_wが大きいほどYの値は小さくなるが，Xの値は逆に大きくなる。

つぎに，水温がX，Yにおよぼす影響を調べるため，θをパラメータとして，$d=0.571$ (mm)のT_wとXの関係およびT_wとYの関係を図示した。

図2.40，2.41において，水温の変化に対するX，Yの変化を表わす曲線は下に凸となり，同一回転角に対するYの値は，T_wが10 (°C)から30 (°C)の範囲内では，θの全領域でT_wが大きいほど小さいが，Xの値は$\theta \leqq 70°$ではT_wが大きいほど小さいが，$\theta = 80°$の場合，$T_w=30$ (°C)の値は$T_w=20$ (°C)の値より大きくなる。そこで，これを調べるため，$T_w=10, 20, 30$ (°C)のθ

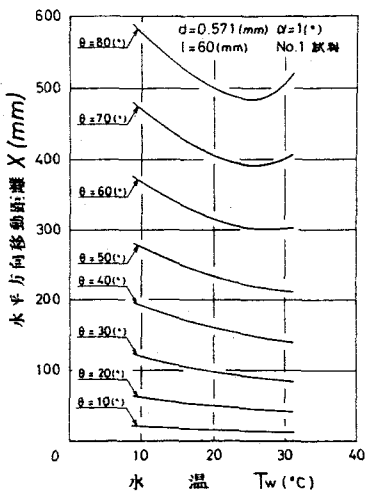


図2.40 水平方向移動距離におよぼす水温の影響

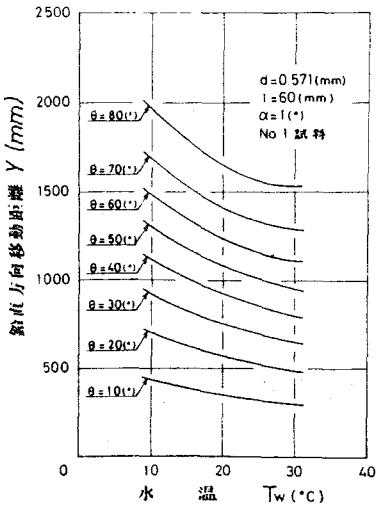


図2.41 鉛直方向移動距離におよぼす水温の影響

とXの関係を図2.42に示す。この図から，$\theta < 79°$ではXの値は$T_W=20$(℃)の方が大きいが，これ以上の領域では$T_W=30$(℃)の方が大きくなる。この原因について考える。

θとγの関係（図2.50）から$T_W=30$(℃)の場合，$\theta=35°$付近から50°付近までの領域でγが急激に減少し，$T_W=20$(℃)の曲線に近づき，$\theta > 50°$ではこれらの差はわずかとなる。ところが，θと$\dot{X}$の関係を表わす図2.43ではこのような現象は見られない。したがって，(2.37)式の第1式，$d\dot{X}/d\theta = \dot{X}/\gamma$を考慮すれば，γの急激な減少によって$T_W=30$(℃)の接線勾配$d\dot{X}/d\theta$が$T_W=20$(℃)のそれより大きくなり，その結果$\theta > 79°$で上述の現象が生じたと考えられる。なお，γが急激に減少する原因については2.7.3項で述べる。

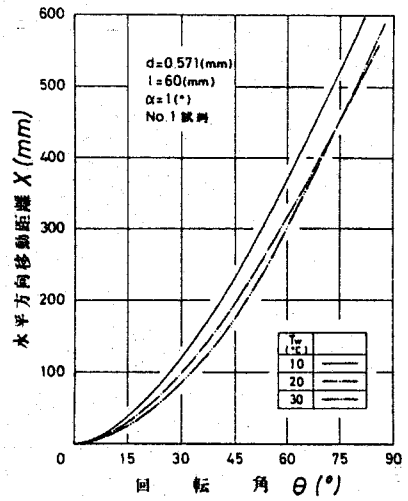


図2.42 水平方向移動距離におよぼす水温の影響

2.7.2 線状体重心の速度および加速度

$d=0.571$(mm)，$T_W=10, 20, 30$(℃)のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図2.43，2.44に示す。

線状体は$\theta=40°\sim45°$の範囲内まで水平方向に加速され，また，$\theta < 2°$まで鉛直方向に加速される。さらに，θの全領域で$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにT_Wが大きいほど大きい。

表2.10に$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値とそのときのθの値を示す。

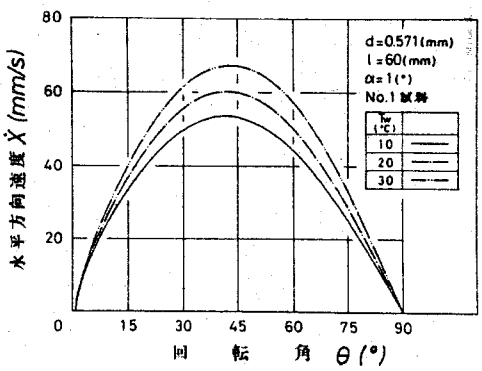


図2.43 水平方向速度におよぼす水温の影響

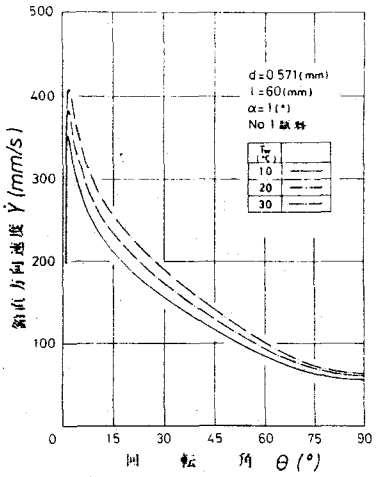


図2.44 鉛直方向速度におよぼす水温の影響

表2.10 重心速度の最大値とそのときの回転角の値

試料直径 d (mm)	水温 Tw(°C)	水平方向速度の最大値 Ẋmax(mm/s)	θ (°)	鉛直方向速度の最大値 Ẏmax(mm/s)	θ (°)
0.571	10	53.56	41.6	353.0	1.63
	15	56.85	41.8	369.1	1.72
	20	60.24	41.9	383.7	1.82
	30	67.30	42.9	408.4	2.04
0.915	10	75.85	44.4	410.0	2.34
	15	82.65	45.2	421.1	2.49
	20	89.52	45.4	431.6	2.64
	30	102.97	45.7	450.5	2.92

l=60(mm), No.1 試料

Ẋ, Ẏが最大になるときのθの値はTwが大きいほど大きく, Tw=15, 20, 30(°C)のẊ, Ẏの最大値は, Tw=10(°C)の値のそれぞれ, 1.06, 1.12, 1.27倍(Ẋ, d=0.571(mm)), 1.05, 1.09, 1.16倍(Ẏ, d=0.571(mm)), 1.09, 1.18, 1.36倍(Ẋ, d=0.915(mm)), 1.03, 1.05, 1.10倍(Ẏ, d=0.915(mm))となる。

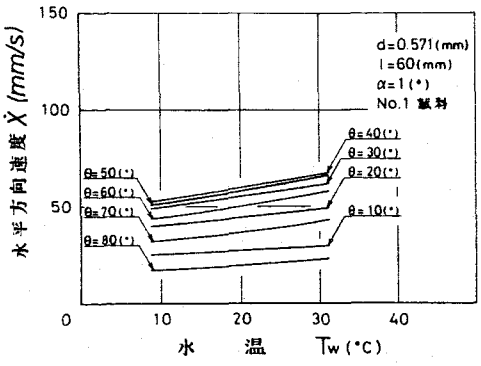


図2.45 水平方向速度におよぼす水温の影響

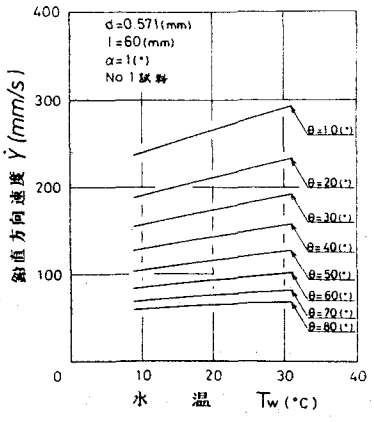


図2.46 鉛直方向速度におよぼす水温の影響

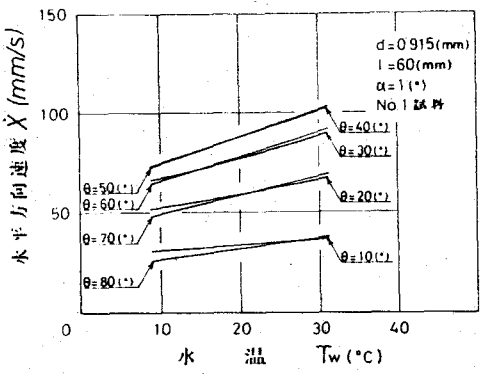


図2.47 水平方向速度におよぼす水温の影響

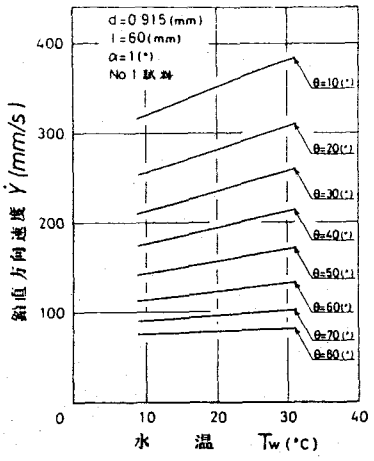


図2.48 鉛直方向速度におよぼす水温の影響

つぎに，水温が変化するとẊ，Ẏがどのように変わるかを調べるため，θをパラメータとしてTwとẊの関係およびTwとẎの関係を図示した。

α=0.571，0.915(mm)ともに，TwとẊの関係およびTwとẎの関係はほぼ直線関係となり（厳密に言えば，Ẋは下に凸，Ẏは上に凸になる。），Ẋに関しては減速領域での方が直線の勾配は大きく，Ẏに関してはθの増加に伴ないその勾配は小さくなる。また，α=0.571(mm)とα=0.915(mm)の勾配を比較すると，Ẋ，Ẏともにα=0.915(mm)の方が大きい。

表2.11 重心加速度の最大値，最小値とそのときの回転角の値

線状体直径	水温	水平方向加速度の最大値		水平方向加速度の最小値		鉛直方向加速度の最小値	
d (mm)	Tw(°C)	$\dot{X}_{max}$(mm/s²)	θ(°)	$\dot{X}_{min}$(mm/s²)	θ(°)	$\dot{Y}_{min}$(mm/s²)	θ(°)
0.571	10	22.05	1.00	-4.56	64.2	-135.9	2.45
	15	21.53	1.95	-5.51	64.6	-167.0	2.72
	20	26.51	2.71	-6.58	64.6	-200.4	3.04
	30	38.41	3.29	-7.60	65.5	-260.9	3.77
0.915	10	72.56	5.86	-15.82	66.2	-324.1	5.39
	15	87.16	6.06	-18.85	66.6	-352.6	6.06
	20	102.89	6.73	-22.14	66.8	-377.2	6.73
	30	137.59	7.24	-29.39	67.2	-409.9	7.24

l=60(mm)，No.1 試料

表2.11に$\ddot{X}$の最大値および最小値，$\ddot{Y}$の最小値とそのときのθの値を示す。最大値および最小値の絶対値とθの値は，T_Wが大きいほど大きくなる。なお，表中の$\alpha=0.571$(mm)，$T_W=10$(℃)の$\ddot{X}$の最大値は落下開始の瞬間での値であり，この場合，落下開始の瞬間から$\ddot{X}$は増大することなく減少し続ける。また，$T_W=15$(℃)の$\ddot{X}$の最大値は，極小の状態から増大した後の値であり，落下開始の瞬間での値はこれより大きい。

2.7.3 線状体の姿勢および角速度

$\alpha=0.571$(mm)，$T_W=10$，20，30(℃)の姿勢および角速度の変化を図2.49，2.50に示す。

tとθの関係は変曲点をもつ曲線になり，T_Wが大きいほどγは大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。

これらの曲線が変曲点をもつときのθの値は，γが最大になるときのθの値であり，γの最大値とそのときのθの値を表2.12に示す。T_Wが大きいほどθの値は小さく，$T_W=15$，20，30(℃)のγの最大値は，$T_W=10$(℃)の値のそれぞれ$\alpha=0.571$(mm)の場合，1.16，1.33，1.70倍，$\alpha=0.915$(mm)の場合，1.15，1.29，1.47倍となる。

つぎに，図2.50において$T_W=30$(℃)の場合，$\theta=35°$付近から50°付近までの領域でγが急激に減少し，$T_W=20$(℃)の曲線

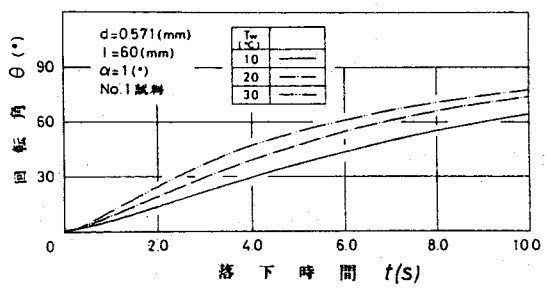


図2.49 姿勢におよぼす水温の影響

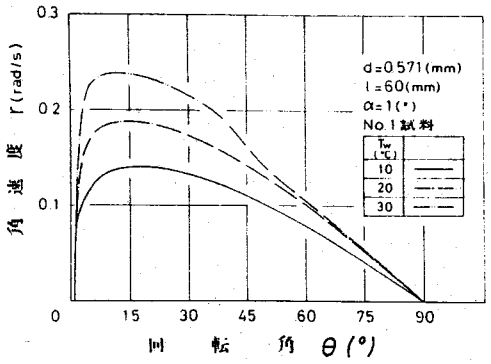


図2.50 角速度におよぼす水温の影響

に近づく現象が見られる。この原因について考える。

2.2.3項で述べたように，抗力係数C_αの式は，Reの範囲により異なり$5<Re<37$では(2.30c)式，$Re\geq 37$では(2.30α)式である。

ところが，(2.30c)式と(2.30α)式は$Re=37$で前者の方が接線勾配が大きく，両曲線は滑らかにつながっていない。これは，従来，実験によっても確かめられており，円柱に対するC_αはReの増加に伴ない減少するが，$Re=40$程度を境として減少の割合が変わる。$Re>40$の範囲ではC_αの減少割合が$Re<40$の範囲に比べて非常に小さくなる。

表2.12　角速度の最大値とそのときの回転角の値

線状体直径 d(mm)	水温 Tw(℃)	角速度の最大値 r (rad/s)	θ(°)
0.571	10	0.1408	17.5
	15	0.1638	16.1
	20	0.1878	14.9
	30	0.2387	12.3
0.915	10	0.4491	10.9
	15	0.5144	10.7
	20	0.5771	10.0
	30	0.6599	9.5

$l=60$(mm)，No.1 試料

線状体に作用する外力および回転モーメントを計算する際，線状体をn個の微小要素に分けたが，線状体の運動方向と回転方向から，線状体の後端($y=l/2$)に近い要素ほど，そのReは大きく，$Tw=30$(℃)の場合，$\theta=35°$付近で後端にもっとも近い要素のReが37を越え，この要素に作用するD_xを計算するときには(2.30α)式を用い，その他の要素に対しては(2.30c)式を用いることになる。ところが，(2.30c)式の方が接線勾配が大きいため，$Re\geq 37$では(2.30α)式を用いた方がC_αの値は大きく，したがって，D_xが大きくなり，全要素のReが37以下であったときに比べて回転モーメントNの減少率が急に小さくなる。Nは回転を押える向きに作用するので角加速度dr/dt(<0)の絶対値は急に大きくなり，rは急に減少する。この状態は先端($y=-l/2$)にもっとも近い要素のReが37以上になる($Tw=30$(℃)の場合，約52°)まで続く。

$Tw\leq 20$(℃)の場合，$Tw=30$(℃)の場合に比べてμ，γは小さく，νが大きいので，θの全領域で$Re<37$となるのでγの

急激な減少は生じない。したがって，水温が高い場合，動粘性係数が小さくなり，線状体の軸方向の位置によって $Re>37$ の所と $Re<37$ の所が存在するため，上述のように再速度が急激に減少する現象が見られる。

以上，この節の結果から流体の温度は落下特性に大きな影響をおよぼすので，実験の際には流体の温度に十分注意する必要がある。

2.8 空気中における線状体の運動

これまでは，線状体が水中で自由落下する場合の落下特性および諸要因の影響を調べたが，この節では，空気中で運動する場合の落下特性および諸要因の影響を調べ，水中での結果と比較して主に流体の比重量の違い（水の比重量は空気の比重量の約900倍）により落下特性がどのように変わるかを明らかにする。

2.8.1 線状体の落下軌跡

$d=0.571$ (mm)，$\alpha=10°$，$\ell=30$，60 (mm) および $\ell=30$ (mm)，$\alpha=10°$，$d=0.571$，0.915 (mm) の重心の軌跡と 0.2 (s) ごとの姿勢の変化を図2.51，2.52に示す。

水中での場合，線状体はほとんど鉛直方向に運動し始めるが，姿勢が除々に水平方向に回転するにつれて，水平方向速度も除々に増大し始める。そして，重心の軌跡は，$\theta=60°\sim65°$ のとき変曲点をもつ曲線になり，最終的に，姿勢は水平方向に漸近し，しかも，線状体は水平方向にはほとんど移動しなくなり，鉛直方向に一定速度で落下する。

これに対し，空気中での場合，線状体が回転して水平な姿勢に近づくが，水平な姿勢になっても回転は止まらず $\theta>90°$ の状態になり，ふたたび逆向きに回転して水平方向に近づく。この

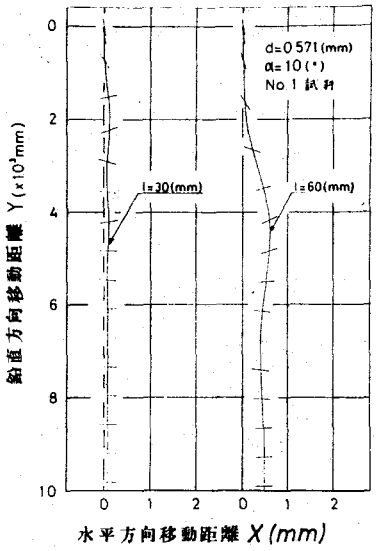


図2.51 落下軌跡におよぼす長さの影響

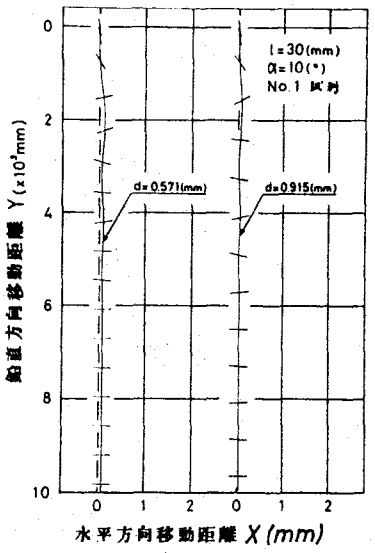


図2.52 落下軌跡におよぼす直径の影響

ように姿勢は水平方向を中心にして振動しながら除々に水平方向に漸近する。すなわち，水平方向を中心にして減衰振動する現象が見られる。姿勢の変化に応じて水平方向速度の向きが変化するため，重心の軌跡も変動し，軌跡にはいくつかの変曲点が見られる。そして，水平な姿勢に漸近するにつれて水平方向速度も0に近づくので，軌跡の変動の振幅は除々に減少し，最終的に，線状体は鉛直方向に一定速度で落下する。

このように，重心の軌跡が変動するのは，空気の比重量が水の比重量の約1/900であるため，線状体に作用する抗力が水中での場合に比べて非常に小さいことが原因していると考えられる。空気中での場合，軌跡が変動するけれども最終落下位置（線状体が水平方向に移動しなくなり，鉛直方向に一定速度で落下しているとき）での水平方向移動距離Xは，同一直径，同一長さの場合ともに，細長比 ℓ/d が大きい方が大きくなり，これは水中での結果と一致する。また，ℓ/d が大きい方が姿勢の変動周期が長いため，軌跡が変動する周期は長くなり，同一

直径の場合，その振幅は大きいことが分かる。いっぽう，同一長さの場合，$\dot{X}$の変化を表わす図2.61を見れば分かるように，直径が小さいほど$\dot{X}$は急激に減衰するので，落下開始後しばらくは直径が小さいほど軌跡の変動の振幅は大きくなるが，やがて，直径が大きい方がその振幅は大きくなる。

つぎに，初期角度の影響を調べる。水中での場合，姿勢の変化に対する重心速度の変化および角速度の変化は，落下開始直後のθの小さい領域を除いて初期角度の影響を受けないことから，$\alpha=10°\sim30°$の軌跡をX，Y軸に沿ってθが等しくなる位置まで平行移動すると，落下開始直後の急激な加速領域を除き$\alpha=1°$の曲線に一致するという結果が得られている。

しかし，空気中での場合，軌跡が変動しその周期はほとんど初期角度の影響を受けないが，振幅は初期角度の影響を受けαが小さいほど大きくなるため，上述の結果は得られない。さらに，αが小さいほど変動の振幅が大きいため，最終落下位置での水平方向移動距離は，$\alpha=1°, 10°, 20°, 30°$の場合，約57.6，77.2，90.1，95.5 (mm)とαが小さいほど小さくなり，この結果は水中での場合と逆になる。

空気中での場合，最初にθが90°以上になるときXは最大になる。ここで，両者のXの最大値を比較すると，空気中での場合の方が$\dot{X}$の最大値は非常に大きいが，短時間のうちに$\dot{X}$は負の値になるため，Xの最大値は水中での場合の方が大きくなる。また，空気の方が比重量が小さく，線状体に作用する抗力が小さいため，$\dot{Y}$の値は水中での場合に比べて10倍以上大きくなる。したがって，Xが最大になるまでの時間は短いが，そのときのYの値は水中での場合より数倍大きい。たとえば，$d=0.915$ (mm)，$\ell=30$ (mm)の場合，Xの最大値およびそのときのYの値は，水中では，約93，400 (mm)，空気中では，約66，1780 (mm)である。

なお，ここで用いた条件の範囲内では，空気中において重心

の軌跡が変動する状態を実験的に確かめるためには，1周期分の変動を観察するにも最低3(m)程度の高さが必要であり，この高さは長さが大きいほど，また，直径が小さいほど大きくする必要があることが分かった。

以上のように，線状体が空気中で運動する場合，姿勢は水平方向を中心にして減衰振動するため，この変動に応じて水平方向速度の向きが変化し，重心の軌跡が変動する現象が生ずる。したがって，以下では重心速度の変化および姿勢の変化におよぼす要因の影響について述べるが，その際水中での場合と異なり，落下時間に伴なって重心の速度，加速度および角速度がどのように変化するか，また，その変化の状態に要因がいかなる影響をおよぼすかを調べる。

2.8.2 初期角度の影響

$d=0.571$(mm)，$\ell=30$(mm)の線状体が水中において$\alpha=1°$で運動する場合，落下開始時から角速度rは急激に加速され，約0.4(s)で最大になり，その後減速されるが，姿勢が水平方向に近づくにつれて角加速度dr/dt(<0)の絶対値が減少するので$r>0$の状態を保ったまま0に漸近する。これに対し，空気中での場合，図2.54に示す$\alpha=1°$の曲線を見れば分かるように，空気の比重量が小さいため，落下開始直後の領域では角加速度

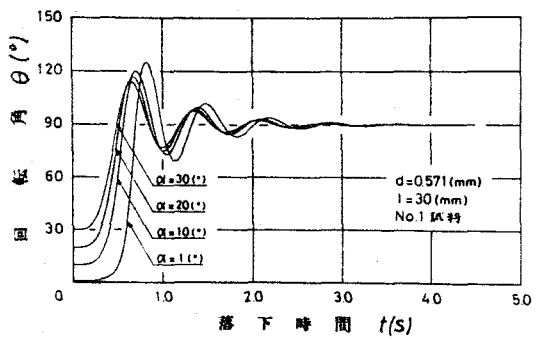


図2.53 姿勢におよぼす初期角度の影響

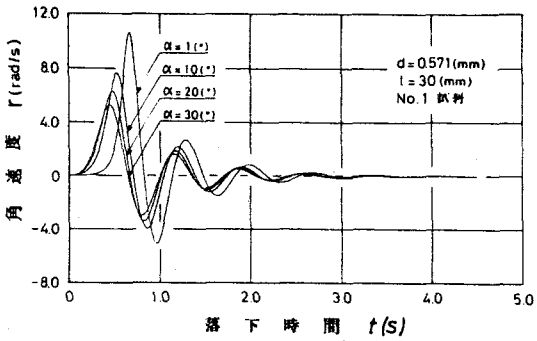


図2.54 角速度におよぼす初期角度の影響

dr/dt (>0) の値が非常に小さく，r はほとんど増大しない。やがて，線状体の軸方向速度の急激な増大に伴ない r は急激に加速され始める。したがって，$t<0.44$ (s) 程度の領域では，水中での場合の方が r の値は大きく，また，$t<0.56$ (s) ($\theta<20°$) 程度の領域では，同一落下時間における姿勢は水中での場合の方がより水平に近くなる。そして，r の増大に伴ない線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメント N が増大し，$\theta=72°$ 程度で r は最大となり，その後急激に減速される。しかし，角速度は，水中での場合，$\theta=13°$ 程度まで加速されるのに対し，空気中での場合，水平に近い姿勢になるまで加速されることおよび回転モーメント N の値が r が大きい割には小さいため，水平な姿勢になっても r は大きく，図2.53を見れば分かるように $\theta>90°$ の状態になる。その後も r は急激に減少し続け，$t=0.82$ (s) 程度で $r=0$，θ が最大，約125°になる。このとき線状体は水平方向に対して約35°傾いており，dr/dt (<0) の絶対値は大きく r は0でとどまらず負の値になるので，今までとは逆向きに回転し始める。そして，r (<0) の絶対値の増大に伴ない回転を押える向きに作用する回転モーメント N が増大し，$\theta=99°$ 程度で r は最小となり，その後増大するが，水平な姿勢になっても r の絶対値は大きくそのまま回転し続けて $\theta<90°$ の状態になる。その後も r は増大し続け，$t=1.14$ (s) 程度で $r=0$，θ が極小，約69°になるが，線状体は水平方向に対して傾いており，r は0でとどまらず正の値になるので，ふたたび今までとは逆向きに回転し始める。すなわち，空気中での場合，線状体は急激に回転して $\theta>90°$ の状態になり，逆向きに回転して水平な姿勢に近づくが，水平な姿勢でとどまらず $\theta<90°$ となり，ふたたび逆向きに回転するというように，水平な姿勢を中心にして振動する現象が生ずる。また，線状体の運動に伴なって，r の極大値および極小値は0に近づき，θ の極大値および極小値は90°に近づく。このように，角速度は0を中心

にして，また，姿勢は水平方向を中心にして減衰振動する。

したがって，雰囲気流体に関係なく水平な姿勢がもっとも安定な姿勢であり，流体は水平な姿勢になるまでの状態に影響をおよぼすことが分かる。さらに，初期角度は，姿勢および角速度の変動周期には影響をおよぼさず，変動の振幅に影響を与え，初期角度が小さいほど振幅は大きくなることが分かる。なお，この周期は約0.7(s)である。

また，図2.53から，落下開始後γは急激に加速されθ>90°となり，その後，θは90°を中心にして減衰振動するため，同一姿勢におけるγの値（tとθの関係を表わす曲線の接線勾配）は，αが小さいほど大きく，水中での場合のように，落下開始直後の急激な加速領域を除きαにかかわらず同一姿勢でのγの値が等しくなる現象は，空気中での場合見られない。

ここで，初期角度が姿勢および角速度の変動の振幅に影響をおよぼす状態を調べる。線状体の比重量は空気の比重量の1400倍程度であるため，落下開始直後の領域では，線状体が流体から受ける抗力は小さく運動にはほとんど影響せず，線状体は重力と浮力の差にもとづく外力の作用を受けて運動をおこなう。このため，αが小さいほど軸方向速度v(<0)の絶対値は大きくなるが，軸に直角な方向速度u(<0)の絶対値は小さく，しかも，αによる差はuの方が大きくなるので，αが小さいほどuvの値は小さい。いっぽう，抗力が小さいため線状体の回転を押える向きに働く回転モーメントNは，角加速度dγ/dtの変化にはほとんど影響しない。したがって，角加速度を表わす(2.22)式の第3式から，dγ/dtはαが小さいほど小さくなることが分かる。その後，αが小さい場合，主に線状体が軸方向に急激に加速されるためuvの値は増大し，γは急激に加速され始める。これに対し，αが大きい場合，主に軸に直角な方向に急激に加速されるため，γは増大する。そして，uは水平な姿勢になるまで加速されるが，vは水平な姿勢に近づく

につれて急激に減速されるが，αが大きいほど線状体が加速される時間が短いので，やがてγの増大に伴ない回転モーメントNが増大し，より短時間のうちにγは減速され始める。したがって，γの最大値はαが大きいほど小さくなる。このため，γが減速している領域では，αが小さいほど回転モーメントNが大きいことが原因となって，$d\gamma/dt$ (<0)の絶対値は大きくなり，γはより急激に減速される。また，αが小さいほどγの最大値は大きいので，θの最大値も大きくなる。これ以後の姿勢および角速度の変化状態にも初期角度の影響が残り，初期状態がもっとも安定な状態（水平な姿勢）から大きく離れるほど変動の振幅は大きくなる。

つぎに，水中での場合と空気中での場合の姿勢の変化の違いについて考える。角加速度を表わす(2.22)式の第3式は減衰振動の方程式に類似した形になっている。すなわち，$(A-B)\mu\beta$が姿勢をもっとも安定な状態にひきもどす力であり，回転モーメントNが姿勢の変化を押える抵抗力に相当する。ここで，水中での場合と空気中での場合の各項のオーダーを比較する。(2.20)式から，空気中での$(A-B)/R$の値は水中での約1/540 (=1.6/860)であり，また，水中での場合に比べて線状体に作用する抗力が小さいので，両者のμ，βの最大値を比べると，空気中での値は水中での約70倍，15倍となる。なお，μが最大になるときの姿勢とβが最大になるときの姿勢は異なる。したがって，$(A-B)\mu\beta/R$の値は，空気中での場合と水中での場合で同程度になることが分かる。いっぽう，回転モーメントNは軸に直角な方向に作用する抗力にもとづくものであり，(2.34)式から，両者のμおよびγが等しい場合，両者のNの値の比率は比重量の比となるので，空気中でのN/Rの値は水中での約1/540となる。以上の結果から，水中での場合は減衰振動の中で抵抗力が大きい場合に相当し，空気中での場合は抵抗力が小さい場合に相当する。したがって，両者の姿勢の変化状態は異なり，

水中での場合，振動することなくもっとも安定な水平な姿勢に漸近するのに対し，空気中での場合，水平な姿勢を中心にして振動しながら漸近する現象が生ずる。

以上のように，空気中での場合，姿勢が水平方向を中心にして減衰振動するので，この姿勢の変化に応じて水平方向の運動の向きが変わり，図2.55，2.56に示すように水平方向速度$\dot{X}$および加速度$\ddot{X}$は0を中心にして減衰振動する。いっぽう，図2.57，2.58において，鉛直方向の運動の向きは変わらないが，姿勢の変動に応じて鉛直方向速度$\dot{Y}$は変動しながら一定値に漸近し，加速度$\ddot{Y}$は変動しながら0に漸近する。

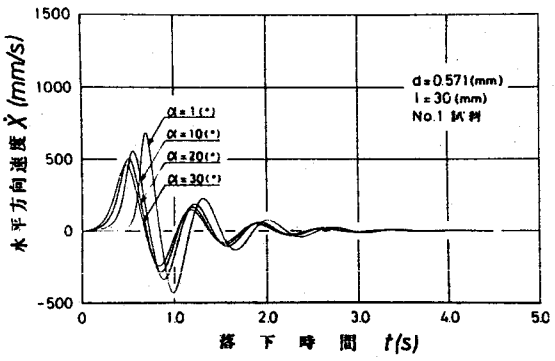


図2.55 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

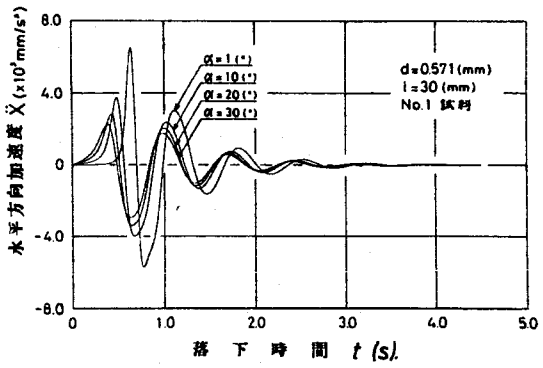


図2.56 水平方向加速度におよぼす初期角度の影響

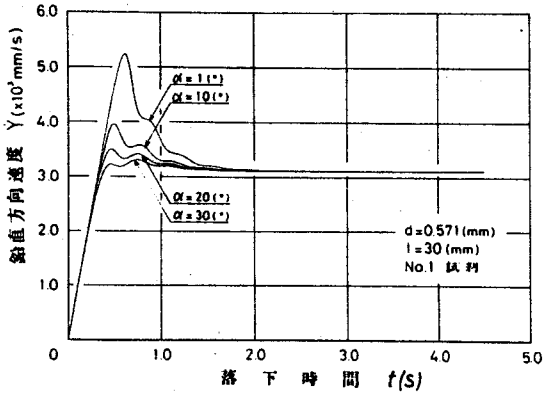


図2.57 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

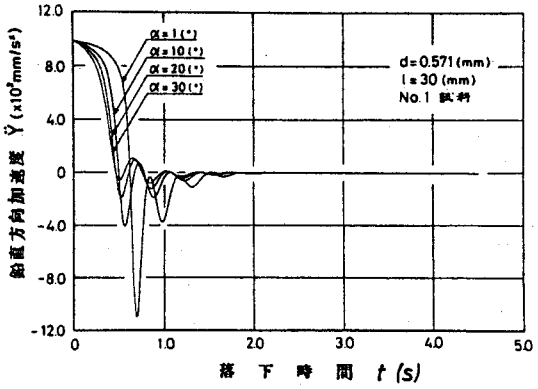


図2.58 鉛直方向加速度におよぼす初期角度の影響

これに対し，$d=0.571$(mm)，$\ell=30$(mm)の線状体が水中において$\alpha=1°$で運動する場合，$\ddot{X}$は0.3(S)程度で最大となり，その後，減少して1.1(S)程度で負の値になるので，$\dot{X}$は加速されて1.1(S)程度で最大となり，その後，減速されるが，姿勢が水平方向に近づくにつれて$\ddot{X}$(<0)の絶対値は減少して0に漸近するので$\dot{X}>0$の状態を保ったまま0に漸近する。

すでに述べたように，空気中での場合，その比重量が小さいため，落下開始直後の領域では姿勢がほとんど変化しない。このため，$\ddot{X}$の増大は水中での場合より小さく，同一落下時間における$\ddot{X}$および$\dot{X}$の値は，それぞれ$t<0.42$(S)および$t<0.53$(S)の領域で水中での場合の方が大きくなる。いっぽう，$\ddot{Y}$は落下開始時から急激に減少し，0.2(S)程度で負の値となり，$t=0.3$(S)程度で最小になる。その後除々に増大して姿勢が水平方向に近づくにつれて0に漸近する。したがって，$\dot{Y}$は落下開始時から急激に増大し，0.2(S)程度で最大となり，その後減速され水平な姿勢に近づくにつれて一定値に漸近する。また，空気の比重量が小さいため，線状体に作用する抗力が小さく，同一落下時間における$\dot{Y}$の値は空気中での場合の方が大きくなる。

ここで，$\alpha=1°$の場合を例にとって，$\dot{X}$，$\ddot{X}$および$\dot{Y}$，$\ddot{Y}$が変動する状態を調べる。

空気中での場合，線状体に作用する抗力が小さいため，落下開始直後の領域では$\ddot{X}$の増大および$\ddot{Y}$の減少は小さく，角速度γが急激に増大し始めてから$\ddot{X}$の増大および$\ddot{Y}$の減少は大きくなる。このため，線状体は，$t=0.62$(S)程度($\theta=43°$程度)まで鉛直方向に加速され，$\ddot{X}$は$t=0.64$(S)程度で最大となり，その後減少して水平な姿勢になる直前で負の値になる。すなわち，線状体は水平な姿勢になる直前まで水平方向に加速され，$\dot{X}$は最大となり，その後減速される。したがって，$\theta>90°$の状態になっても線状体はしばらくの間今までと同じ向きに運動し続ける。いっぽう，軸方向速度vの向きは，水平な姿勢に

なった直後から今までと逆向きになり増大して，θが最大になってふたたび減少し始めた直後，$t=0.84$(S)程度で極大になる。このときから，$\dot{X}$は負の値になる。すなわち，今までと逆向きに運動し始める。そして，θがふたたび90°に近づくにつれて$\dot{X}$(<0)は減少し，水平な姿勢になる直前で最小になる。いっぽう，$t=0.62$(S)程度から$\dot{Y}$は減少し始めるが，$\ddot{Y}$は水平な姿勢になる前，$t=0.69$(S)程度($\theta=82°$程度)で最小となり，その後増大するので，$\dot{Y}$の減少割合は低下する。そして，水平方向の運動の向きが今までと逆向きになる直前に，$\ddot{Y}$(<0)は極大となり，$\dot{Y}$は変曲点をもつ。なお，$\alpha \geq 10°$の場合，$\dot{Y}$の値は$\alpha=7°$の場合に比べて小さく，鉛直方向の抗力が小さいため，$\dot{Y}$が最小になった後増大して正の値になる。すなわち，ふたたび鉛直方向に加速される現象が見られる。

以上のように，姿勢の変動に応じて$\dot{X}$，$\ddot{X}$および$\dot{Y}$，$\ddot{Y}$が変動し，水平な姿勢になる直前に$\dot{X}$は極大あるいは極小になり，水平方向の運動の向きが変わる直前に$\dot{Y}$は極大になり，$\alpha=7°$の場合，$\dot{Y}$は変曲点をもつ。また，θが極大あるいは極小になった直後に水平方向の運動の向きが変わる。

さらに，初期角度は，重心の速度および加速度の変動周期には影響をおよぼさず，変動の振幅に影響を与え，初期角度が小さいほど振幅が大きいことが分かる。なお，この周期は，$\dot{X}$，$\ddot{X}$に関してはθ，γの場合と同一の約0.7(S)となり，$\dot{Y}$，$\ddot{Y}$に関しては，運動の向きが変わるごとに$\ddot{Y}$は極大になるので，$\dot{X}$，$\ddot{X}$の場合の半分の約0.35(S)になる。

また，空気中での場合，$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値は水中の場合の約10倍，20倍となり，線状体は非常に早い速度で運動するので，水中での場合に比べて運動の観察は困難になることが分かる。

2.8.3 線状体直径の影響

姿勢の変化および角速度の変化におよぼす直径の影響を図2.59, 2.60に示す。線状体は細長比 ℓ/α が大きいので，(2.20)式から $(A-B)/R$ の値は同一長さの場合，直径にかかわらずほぼ同じになる。ところが，u，v の絶対値は直径が大きいほど大きいので，前項で述べた姿勢をもっとも安定な状態にひきもどす力 $(A-B)uv/R$ は，直径が大きいほど大きくなる。いっぽう，抗力係数 C_α および回転モーメント N を表わす(2.30)式，(2.34)式から，N の値の比率は α の比以下であるので，姿勢の変化を押える抵抗力 N/R は，直径が大きいほど小さい。したがって，直径が大きいほど姿勢が変動する周期は短く，その振幅は大きいことが分かる。なお，周期は，α=0.391, 0.571, 0.915 (mm)の場合，0.96, 0.70, 0.52 (S)である。直径が大きいほど姿勢が短時間のうちに変化するという結果は水中での結果(図2.21)と一致する。

つぎに，直径が姿勢の変動に伴なって変動する重心の速度にどのような影響をおよぼすかを調べる。図2.61, 2.62において，$\dot{X}$ は0を中心にして減衰振動し，$\dot{Y}$ は減衰振動しながら一定値に漸近する現象が見られる。また，その周期は直径が小さいほど大きく，しかも早く減衰することが分かる。

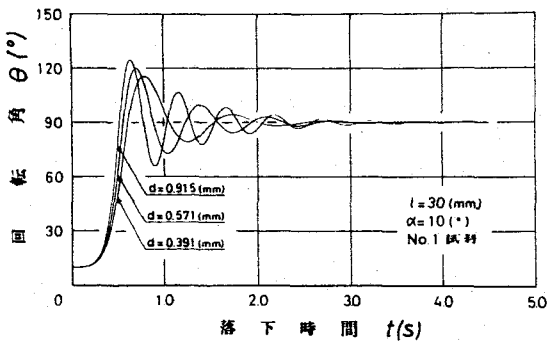


図2.59 姿勢におよぼす直径の影響

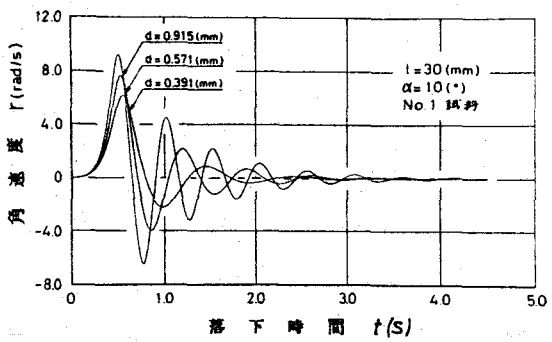


図2.60 角速度におよぼす直径の影響

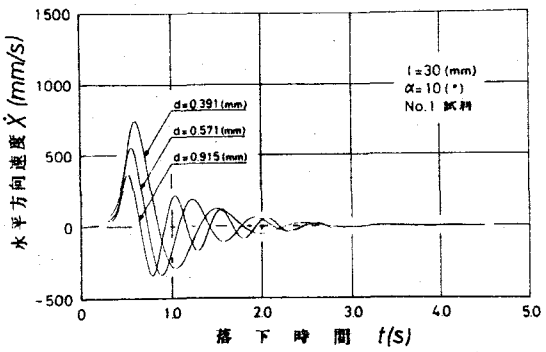


図2.61 水平方向速度におよぼす直径の影響

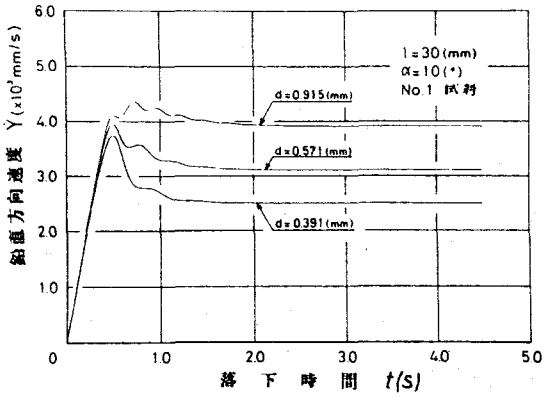


図2.62 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

(2.28)式，(2.30)式から，軸に直角な方向に作用する抗力Dxの比はαの比以下であるので，(2.20)式，(2.25)式から，軸に直角な方向の外力Xに関して，X/A (<0)の絶対値はαが大きいほど大きくなる。いっぽう，軸方向に作用する摩擦抗力Dyの比もαの比以下であるので，軸方向の外力Yに関しても，Y/B (<0)の絶対値はαが大きいほど大きい。したがって，運動方程式(2.22)式を考慮すると，軸に直角な方向および軸方向の加速度 du/dt，dv/dt (<0)の絶対値はαが大きいほど大きいことが分かる。u，vの値はともに負であるので，直径による du/dt の差の方が dv/dt の差より大きく，αが大きいほどu，vの絶対値は大きくなるが，大きくなる割合はuの方が大きいため，(2.23)式から，$\dot{X}$ (>0)はαが小さいほど大きく，$\dot{Y}$ (<0)の絶対値はαが大きいほど大きくなることが分かる。ただし，$\dot{Y}$ に関しては符号を逆にして図示しているので，図2.62では正の値になっている。やがて，uの絶対値およびτが増大するため，dv/dt の絶対値はαが小さいほど大きくなる。したがって，vの絶対値もαが小さいほど大きくなり，t=0.4(s)程度から軸方向に減速され始めるが，減速割合はαが大きいほど大きいので，この状態が水平な姿勢になるまで続く。いっぽう，uは

水平な姿勢になるまで加速され続けており，αが大きいほどその絶対値は大きいので，$\dot{X}$はαが小さいほど大きく，$\dot{Y}$の絶対値はαが大きいほど大きい状態が水平な姿勢になるまで続く。

$\dot{X}$は，水平な姿勢になる直前に最大になるが，この姿勢はαが大きいほどより水平に近い。そして，$\theta > 90°$の状態になった直後からひの向きが変わり，軸方向に加速され始める。$d\omega/dt$はαが大きいほど大きく，この加速状態は，θが最大となりふたたび$90°$に近づき始めた直後まで続き，このときのひの値はαが大きいほど大きくなる。このため，その後の軸方向の減速はαが大きいほど大きいけれども，θがふたたび$90°$に近い値になったときのひの値は，αが大きいほど大きく，$\dot{X}$の最小値の絶対値は大きくなる。そして，これ以後の$\dot{X}$の極大値，極小値はαが大きいほど大きくなる。このように，$\dot{X}$の最大値は，直径が小さいほど大きいが，それ以後の$\dot{X}$の振幅は，直径が大きいほど大きく，直径が小さいほど$\dot{X}$は早く減衰することが分かる。

いっぽう，$\dot{Y}$は最大になった後減速されるが，$\theta > 90°$の状態になった直後から軸方向に加速され始め，この加速はαが大きいほど大きいので，より短時間のうちに$\dot{Y}$がふたたび増大する現象が生ずる。その後も$\dot{Y}$は加速と減速を繰返しながら一定値に漸近する。なお，$\dot{X}$の場合と同様，直径が小さいほど$\dot{Y}$は早く減衰する。

また，前項で述べたように，θが極大あるいは極小になった直後に水平方向の運動の向きが変わるが，この時間的なづれは，直径が大きいほど小さく，$\alpha = 0.915$(mm)の場合，これらの現象はほとんど同時に起こる。さらに，運動の向きが変わる直前に$\dot{Y}$は極大になるが，この時間的なづれは，直径の影響をほとんど受けない。

ここで，水中での結果と比較する。水平方向速度が最大になるまでの領域において，水中での場合と異なり，同一落下時間

における$\dot{X}$の値は直径が小さいほど大きくなる。これは，空気中での場合，その比重量が小さいため，線状体に作用する抗力が小さく，したがって，軸に直角な方向にも軸方向と同程度加速されるからである。たとえば，$d=0.915$ (mm)，$\ell=30$ (mm)の場合，空気中ではβは$t=0.38$ (s)程度まで加速されるが，減速され始めてから間もなく$t=0.44$(s)程度（$\theta=48°$程度）でμの値の方が大きくなる。これに対し，水中では線状体に作用する抗力が大きいため，βは$t=0.2$(s)程度まで加速され，その後減速されるが，軸に直角な方向の加速度が小さいので，$t=1.17$(s)程度（$\theta=76°$程度）でμの値の方が大きくなる。

また，空気中での場合にも，直径が大きいほどより水平に近い姿勢になるまで鉛直方向に加速され（$d=0.391$, 0.571, 0.915 (mm)の場合，それぞれ約50°, 58°, 77°），これは水中での結果と一致する。

以上の結果をまとめると，直径は，姿勢および重心速度の変動周期および振幅に影響をおよぼし，直径が小さいほど周期は長く，しかも早く減衰する。

2.8.4 線状体長さの影響

$d=0.571$, 0.915 (mm)，$\ell=60$(mm)の姿勢および角速度の変化を図2.63，2.64に示す。$\ell=30$ (mm)の結果，図2.59，2.60，と比較して，長さが大きい方が変動の周期は長く，各周期ごとのθ，γの極大値，極小値は，$\theta=90°$あるいは$\gamma=0$に近い値になるが，これらの値が減衰するのに要する時間は長いことが分かる。

$(A-B)/R$の値は同一直径の場合，長さが大きいほど小さい。また，長さが大きいほど軸方向の加速は大きいが，軸に直角な方向の加速が小さいので，落下開始直後では$\mu\beta$の値は長さにかかわらずほぼ同じであるが，やがて，長さが大きい方がこの値は小さくなる。したがって，姿勢をもっとも安定な状態に

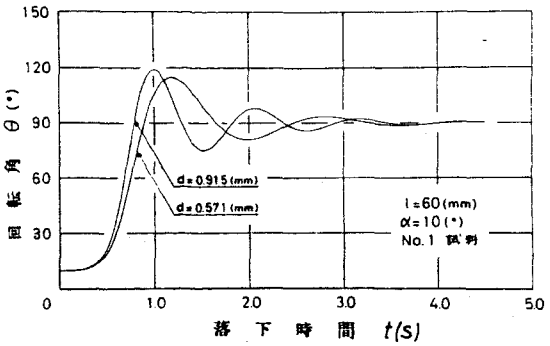


図2.63 姿勢におよぼす長さの影響

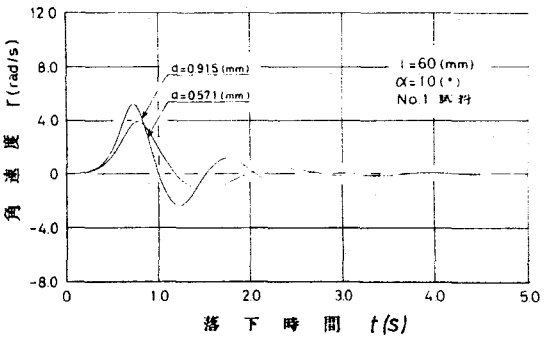


図2.64 角速度におよぼす長さの影響

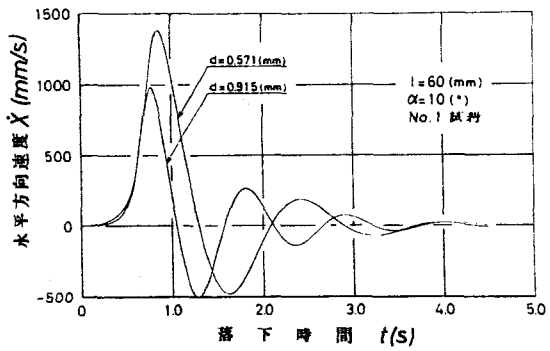


図2.65 水平方向速度におよぼす長さの影響

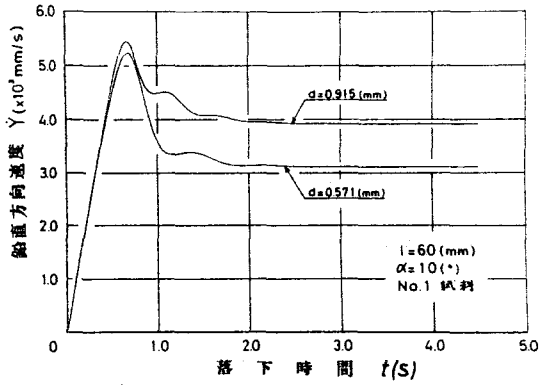


図2.66 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

ひきもどす力 $(A-B)\omega\theta/R$ は長さが大きい方が小さくなる。いっぽう，回転モーメント N の比率は ℓ^3 の比以上であるので，姿勢の変化を押える抵抗力 N/R は長さが大きい方が大きい。したがって，長さが大きい方が姿勢が変動する周期は長く，しかも，各周期ごとの振幅は小さいことが分かる。なお，$\ell=60$ (mm) の周期は，$d=0.571$, 0.915 (mm) の場合，1.62, 1.10 (s) であり，$\ell=30$ (mm) の場合の2倍以上になる。

長さが大きい方が姿勢が変化するのに要する時間が長くなるという結果は，水中での結果（図2.12）と一致する。

つぎに，$\ell=60$ (mm) の重心速度の変化を表わす図2.65, 2.66

と $\ell=30(mm)$ の結果，図2.61，2.62，を比較すると，その周期は，姿勢および角速度におよぼす影響と同様に，長さが大きい方が長くなるが，その振幅は，長さが大きい方が大きいことが分かる。

落下開始直後の領域では，線状体に作用する抗力は小さく，ほとんど重力と浮力の差にもとづく外力により運動をおこなうので，姿勢がより鉛直に近いほど軸方向の加速は大きく，軸に直角な方向の加速は小さくなる。したがって，長さが大きい方が，$\dot{v}(<0)$ の絶対値は大きく，$\dot{u}(<0)$ の絶対値は小さい。しかし，θ の値は長さが小さい方が大きいので，同一落下時間における $\dot{x}$ の値は長さが小さい方が大きく，$\dot{y}(<0)$ の絶対値はわずかに小さくなる。ところが，長さが大きい方が姿勢の変化が小さいので，$\dot{u}$，$\dot{v}$ は長い時間にわたって加速され続け，$\dot{y}$ が最大になるときの $\dot{u}$，$\dot{v}$ の絶対値 および $\dot{x}$ が最大になる（$\dot{x}$ は水平な姿勢になる直前に最大になる。）ときの $\dot{v}$ の絶対値は長さが大きい方が大きくなる。したがって，$\dot{x}$，$\dot{y}$ の最大値は，長さが大きい方が大きくなる。その後も長さが大きい方が姿勢の変化が小さいので，重心速度の変動振幅はより大きくなり，減衰するのに要する時間は長い。このように，$\dot{y}$ の最大値は長さが大きい方が大きくなるが，最終的に漸近する値は長さにかかわらず同一になる。

また，θ が極大あるいは極小になってから水平方向の運動の向きが変わるまでの時間および $\dot{y}$ が極大になってから運動の向きが変わるまでの時間は，長さが大きい方が長くなる傾向にある。

ここで，水中での結果と比較する。落下開始後しばらくの間，同一落下時間における $\dot{x}$ の値は，長さが小さい方が大きくなる。この結果は水中での結果と一致するが，空気中での場合，線状体に作用する抗力が小さいので，長さが $\dot{x}$ の最大値におよぼす影響は，水中での場合に比べて非常に大きい。さらに，空

気中での場合にも，長さが小さい方がより水平に近い姿勢になるまで鉛直方向に加速され（$\ell=30$(mm)の場合，約77°，$\ell=60$(mm)の場合，約55°），これは水中での結果と一致する。

以上の結果をまとめると，長さは，姿勢および重心速度の変動周期および振幅に影響をおよぼし，長さが大きいほど周期は長く，しかも，減衰するのに要する時間が長い。

2.9 静止流体中における線状体の落下実験

線状体の運動の観察は水中の方が容易なため，主に水中で要因を変化させて実験をおこない，あわせておこなった空気中での実験では要因の変化は最少限にとどめた。

実験では，落下特性として，重心の軌跡，速度，加速度および姿勢，角速度の他に最終落下位置での線状体の配向も項目として選んだ。また，落下特性に影響をおよぼす要因は，線状体の比重量，長さ，直径，初期角度および流体の温度とした。

2.9.1 実験装置および方法

水中での落下実験では鉛筆の芯（NO.1試料）とピアノ線（NO.2試料）の2種類の試料を用いた。それらの試料条件および実験条件を表2.13に示す。

この実験では，線状体の比重量γ_b，長さℓ，直径dおよび初期角度αの影響を調べた。なお，$d=0.391$ (mm)，$\ell=30$ (mm)のNO.1試料の場合だけ$\alpha=1°, 10°, 20°, 30°$の4種類変化させ，他の場合には$\alpha=1°, 10°$とした。

表2.13 試料条件および実験条件

試料番号	試料名	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 γ_b (g/cm³)	初期角度 α (°)
1	鉛筆の芯	0.391	30 60	1.766	1
		0.571	15 30 45 60	1.702	10
		0.722	30 60	1.622	20°
		0.915	30 60	1.539	30°
2	ピアノ線	0.206	30 60	7.089	1
		0.310	15 30 45 60	7.242	
		0.411	30 60	7.322	10
		0.512	30 60	7.440	

注) • d=0.391(mm), l=30(mm)の試料に対してのみ α=20(°)および30(°)の落下実験をおこなう

つぎに，流体の温度の影響を調べる目的で，水中での落下実験を$d=0.571, 0.915$ (mm)，$\ell=60$ (mm)のNO.1試料を用いて，水温を$T_w=12.4, 29.9$ (°C)の2種類変化させておこなった。

これまでは，線状体が水中で運動をおこなう場合であるが流体が変った場合（主に流体の比重量が変った場合），落下特性がどのように変化するかを調べるため，空気中で$d=0.571, 0.915$ (mm)，$\ell=30, 60$ (mm)のNO.1試料を用いて，$\alpha=10°, 20°$

，30°変化させて落下実験をおこなった。

試料は切断後，長さのばらつきを小さくする目的とその端面を軸に直角にする目的（予備実験から，軸に対する端面の傾きは線状体の運動に大きな影響をおよぼすことが分かった。）で端面を研摩布で仕上げ，万能投影機で50倍に拡大して端面の状態を調べるとともに，ランダムに抽出した10本の試料の直径を測定した。同様に，10本の試料の長さをノギスで測定し，その平均値をもってそれらの値とした。また，比重量は同じ10本の試料の重量を直示天秤で測定し，次式から求めた。

$$\gamma_b = 4W/\pi d^2 l \qquad (2.38)$$

図2.67に実験装置の概要を示す。水中，空気中の実験ともにこの実験装置を用いた。線状体の落下運動を調べるため，水槽⑥の正面と側面の直角2方向からのマルチストロボ撮影によりNo.1カメラ③とNo.2カメラ④の2枚のフィルム面上に落下状態を記録した。予備実験から，線状体はほぼ一平面内で運動することが分かったが，それを確認する目的でNo.2カメラでの撮影もおこなったわけである。

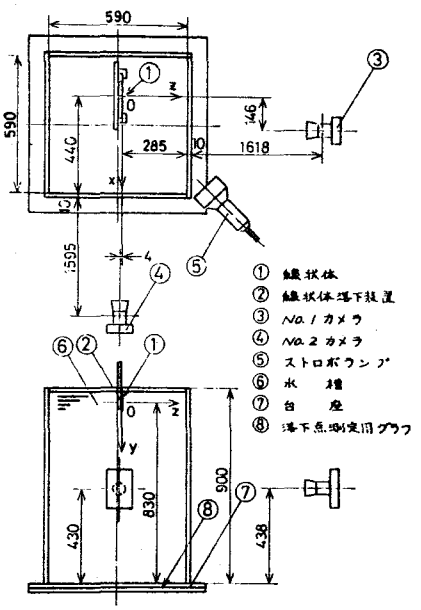


図2.67 実験装置概要

撮影をおこなう水槽の2面は透明アクリル板で製作し，背景となる残りの2面には，ストロボランプ⑤の光が反射して線状体の落下状態が不鮮明にならないように，つや消し黒色塗装した。また，台座⑦の間には落下点測定用グラフ⑧を取付け，線状体の最終落下位置を調べた。なお，本実

験装置の座標系としては，初期位置での線状体⑦の重心を原点（O）とし，落下装置②の線状体設定面に平行な鉛直面内で水平方向NO.2カメラの向きにX軸，鉛直方向下向きにY軸，さらに，XY面に垂直な方向NO.1カメラの向きにZ軸を定めた。

撮影では，実験室全体を暗室とし線状体の落下時間を考慮して，落下状態が十分わかるような写真間隔を得るため，実験条件によりストロボ発光数をS＝240～2100（cpm）の範囲で変化させた。

図2.68に線状体落下装置の概要を示す。2枚の透明塩化ビニール板⑥（立面図でハッチングを入れた部分）の間には初期角度設定用円グラフ③が取付けられており，線状体の設定はこの板を枠から取出しておこなう。まず，円グラフにより所要の初期角度αに線状体⑦を設定し，ピンセット取付け用ネジ①を締めて設定面⑤上に固定する。つぎに，この板を枠の中へ入れピンセット押上げ用ネジ②を回し，ピンセット④を押上げて線状体を落下させた。

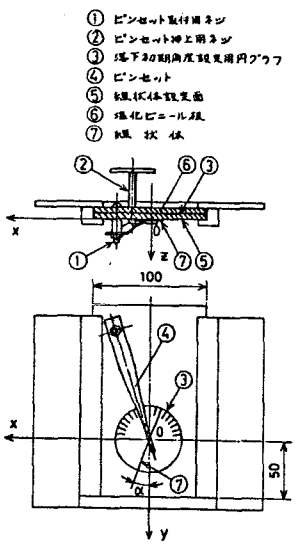


図2.68 線状体落下装置概要

実験では，各実験条件につき15本程度の線状体を落下させ，最終落下位置での線状体重心の水平方向移動距離の平均値を求め，その値に近い実験を2個ないし3個選び，それらの写真から線状体両端の座標を読取る。ここで，運動をおこなう平面がZ方向にづれる場合，運動に伴ない被写体距離が変化するため，写真を真の運動の正射影と考えることはできない。そこで，被写体距離の変化に対する修正をおこなった後の両端の座標から，以下で述べる方法で落下特性を求め，それらを図示し，検討した後その中の1つを実験データとして採用した。

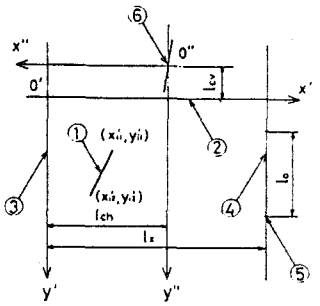
以下では，被写体距離の変化に対する修正の方法および線状体の落下特性を求める方法について述べる。

2.9.2 写真面上から真の落下運動を求める方法

実験から，α を10°以上に設定すると，線状体はほぼXY面内で運動するが，α=7°の場合，角度が小さいため初期状態のみでは運動面がXY面に決まらずZ方向にぶれる場合があった。この場合，運動に伴ない被写体距離が変化するので，この変化に対して修正をおこなう必要がある。ここでは，写真から真の落下運動をXY面に引き直して求める方法について説明する。

(1) 落下運動の読取りおよび初期位置決定の方法

写真から線状体の落下運動を求めるには，この写真にX，Y座標を表わす目印となるものを同時に撮影しておく必要がある。図2.69に落下運動の写真の概要を示す。この写真には，線状体とともに線状体設定面と同一平面上に設けた水平方向基準線②と長さの基準になる目印⑤を付けた鉛直方向基準線2④および線状体が衝突しないように設定面から少し離して設けた鉛直方向基準線1③が撮影されている。ここで，基準線②と③をX'軸，Y'軸とし，線状体両端の座標を読取り，それぞれ (X'_{i1}, Y'_{i1})，(X'_{i2}, Y'_{i2}) とする。この座標は，初期位置での線状体重心を原点（O''）とする座標系（X''，Y''）に変換する必要があり，写真面上でのX'，Y'方向の補正値をそれぞれ l_{ch}，l_{cv} とする。実測した水平方向基準線と初期位置の距離を H_1 (=58.5(mm))，鉛直方向基準線2上の目印の間隔を H_0 (=300(mm))とし，写真面上でのこの間隔



① 線状体
② 水平方向基準線
③ 鉛直方向基準線1
④ 鉛直方向基準線2
⑤ 目印
⑥ 初期位置

図2.69 線状体の落下運動写真概要

を l_0 とすると，

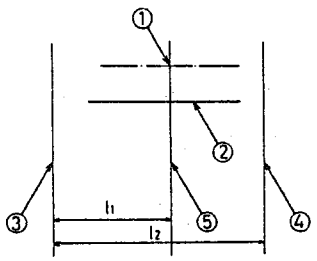
$$l_{cv} = (H_1/H_0)\, l_0 = 0.195\, l_0 \qquad (2.39)$$

となる。

いっぽう，l_{ch} は図2.70にその概要を示す初期位置設定用写真を用いて求める。この写真には，鉛直方向基準線1，2の他に初期位置に設けた鉛直方向基準線⑤が撮影されており，これらの基準線間の距離 l_1，l_2 と落下運動の写真（図2.69）面上の基準線間の距離 l_x から

$$l_{ch} = (l_1/l_2)\, l_x \qquad (2.40)$$

となる。



① 初期位置
② 水平方向基準線
③ 鉛直方向基準線 1
④ 鉛直方向基準線 2
⑤ 鉛直方向基準線

図2.70 初期位置設定用写真概要

したがって，座標系 (x'', y'') での線状体両端の座標は，

$$\left.\begin{aligned} x''_{ij} &= l_{ch} - x'_{ij} \\ y''_{ij} &= l_{cv} + y'_{ij} \end{aligned}\right\} \qquad (2.41)$$
$$(j = 1, 2)$$

で表わされる。

(2) 被写体距離の変化に対する修正方法

図2.71に示すように，被写体距離が異なるとフィルム面上の像の大きさに差が生ずる。すなわち，初期平面および線状体の端の被写体距離を L_1，L とすると，同一高さ H のフィルム面上での高さはそれぞれ h_1，h となり，つぎの関係で表わされる。

$$h_1/h = L/L_1 \qquad (2.42)$$

(2.41)式で表わされる(x''_{ij}, y''_{ij})は写真面上での座標であり，写真の倍率ℓ_0/H_0を考慮すると，被写体距離の変化に対する修正をおこなう前の両端の座標(X''_{ij}, Y''_{ij})は，

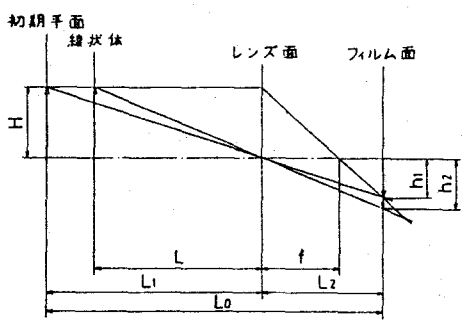
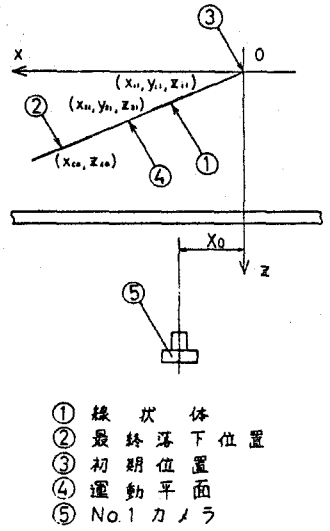


図2.71 被写体距離と像の大きさの関係

$$\left.\begin{aligned} X''_{ij} &= (H_0/\ell_0)(\ell_{ch} - x'_{ij}) \\ Y''_{ij} &= (H_0/\ell_0)(\ell_{cv} + y'_{ij}) \end{aligned}\right\} \quad (2.43)$$

となる。

ここで，図2.72に示すように，線状体両端の真の位置を(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})とし，初期位置③とNO.1カメラ⑤のレンズ中心の水平方向および鉛直方向距離をそれぞれX_0 (=146(mm))，Y_0 (=398(mm))とすると，(2.42)式から



① 線状体
② 最終落下位置
③ 初期位置
④ 運動平面
⑤ No.1 カメラ

図2.72 線状体の落下運動概要

$$\left.\begin{aligned} X_0 - x_{ij} &= \frac{L_1 - z_{ij}/n}{L_1}(X_0 - X''_{ij}) \\ Y_0 - y_{ij} &= \frac{L_1 - z_{ij}/n}{L_1}(Y_0 - Y''_{ij}) \end{aligned}\right\} \quad (2.44)$$

となる。ただし，nは流体の空気に対する屈折率である。

また，線状体はほぼ一平面内で運動するので，最終落下位置②での線状体重心の座標を(x_{c0}, z_{c0})とすると，

$$z_{ij} = (x_{c0}/z_{c0})\, x_{ij}$$

となり，(2.44)式から

$$\left.\begin{aligned} x_{ij} &= \frac{X''_{ij}}{1-\frac{1}{nL_1}\frac{Z_{c0}}{x_{c0}}(X_0-X''_{ij})} \\ y_{ij} &= Y_0-\left(1-\frac{1}{nL_1}\frac{Z_{c0}}{x_{c0}}x_{ij}\right)(Y_0-Y''_{ij}) \end{aligned}\right\} \qquad (2.45)$$

を得る。

線状体の水平方向移動距離 X_{ij} とその正射影 x_{ij} の間には，

$$X_{ij}=\left(\sqrt{x_{c0}^2+Z_{c0}^2}/x_{c0}\right)x_{ij}$$

の関係があり，鉛直方向移動距離 Y_{ij} とその正射影 y_{ij} は等しい。したがって，写真から被写体距離の変化に対する修正をおこない，xy面に引き直して求めた線状体両端の座標は，

$$\left.\begin{aligned} X_{ij} &= \frac{\sqrt{x_{c0}^2+y_{c0}^2}}{x_{c0}}\cdot\frac{X''_{ij}}{1-\frac{1}{nL_1}\frac{Z_{c0}}{x_{c0}}(X_0-X''_{ij})} \\ Y_{ij} &= Y_0-\left\{1-\frac{X''_{ij}}{(X''_{ij}-X_0)+nL_1\frac{x_{c0}}{Z_{c0}}}\right\}(Y_0-Y''_{ij}) \end{aligned}\right\} \quad (j=1,2) \qquad (2.46)$$

となる。

2.9.3 線状体の落下特性を求める方法

前項で述べた方法により，被写体距離の変化に対する修正をし，xy面に引き直して求めた線状体両端の座標 (X_{i1}, Y_{i1})，(X_{i2}, Y_{i2}) から，線状体の落下特性を求めた。

(1) 線状体重心の座標

重心の座標、(X_i, Y_i)は,重心の軌跡,速度および加速度を知る上で必要であり,次式から求まる。

$$\left.\begin{aligned} X_i &= (X_{i1}+X_{i2})/2 \\ Y_i &= (Y_{i1}+Y_{i2})/2 \end{aligned}\right\} \qquad (2.47)$$

(2) 線状体の回転角

回転角θ(軸方向と鉛直線のなす角度)は,線状体の姿勢および角速度を知る上で必要であり,次式から求まる。

$$\theta_i = Tan^{-1}\{(X_{i1}-X_{i2})/(Y_{i1}-Y_{i2})\} \qquad (2.48)$$

(3) 重心の速度

重心の速度は,水平方向と鉛直方向に分けて求める。図2.73に示すように,i番目にマルチストロボ撮影された線状体の水平方向および鉛直方向速度$\dot{X}_i$, $\dot{Y}_i$は,$i-1$, $i+1$番目に撮影された重心の座標(X_{i-1}, Y_{i-1}),(X_{i+1}, Y_{i+1})を用いて次式から求める。

$$\left.\begin{aligned} \dot{X}_i &= S(X_{i+1}-X_{i-1})/2 \\ \dot{Y}_i &= S(Y_{i+1}-Y_{i-1})/2 \end{aligned}\right\} \qquad (2.49)$$

ただし,Sはストロボ発光数である。

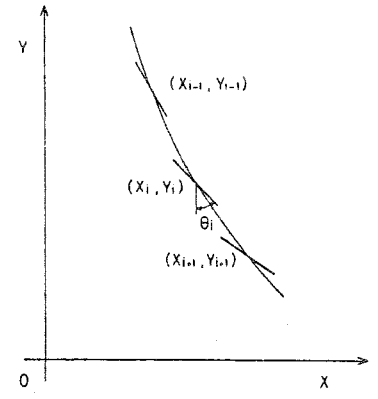


図2.73 マルチストロボ撮影された線状体

(4) 線状体の角速度および重心の加速度

角速度γは,落下時間tと回転角θの関係を図示し,その曲線の接線勾配から求めた。

また，重心の加速度$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$は，回転角θと重心の速度$\dot{X}$，$\dot{Y}$の関係を表わす曲線の接線勾配$d\dot{X}/d\theta$，$d\dot{Y}/d\theta$とそのときの角速度γから，次式により求めた。

$$\left.\begin{aligned}\ddot{X} &= (d\dot{X}/d\theta)\gamma \\ \ddot{Y} &= (d\dot{Y}/d\theta)\gamma\end{aligned}\right\} \qquad (2.50)$$

なお，被写体距離の変化に対する修正から(3)の重心の速度を求めるまでの計算は，写真面上で読取った両端の座標(x'_{ij}, y'_{ij})から電子計算機を用いておこなった。

以上述べた線状体の落下実験により，諸要因が落下特性におよぼす影響を調べることができた。以下では，その結果について報告し，同時に数値計算結果と比較検討する。その際，落下特性は，2.2.3項(2)の①～④と同一の表現方法を用いる。なお，表および図中の長さは公称長さで記載する。

2.10 線状体長さの影響

この節では，$d=0.571$(mm)，$\ell=15, 30, 45, 60$(mm)のNO.1試料に対する実験結果から，線状体長さが落下特性におよぼす影響を調べる。

2.10.1 線状体の落下軌跡

$\ell=30, 60$(mm)の落下軌跡を図2.74に示す。図中の線状体の時間間隔は，$\ell=30$(mm)の場合，$\Delta t=1/3$(s)，$\ell=60$(mm)の場合，$\Delta t=0.5$(s)である。

姿勢が水平近くになるまで回転した場合($\ell=30$(mm)の場合)を見ると分かるように，重心の軌跡は変曲点をもつ曲線となり，最終的にθは90°に漸近し，しかも，線状体は水平方向にはほとんど移動しなくなり，鉛直方向に一定速度で落下する。

姿勢が水平方向に漸近するときの重心の速度成分は，θと$\dot{X}$の関係（図2.77）およびθと$\dot{Y}$の関係（図2.78）から，$\dot{X}$は0となり，$\dot{Y}$は一定値（$\dot{Y}$=70(mm/s)）になることが分かる。

重心の軌跡の接線勾配dY/dXが最小になるときこの曲線は変曲点をもつ。姿勢の変化に対する重心速度の変化を表わす曲線を用いて（2.35）式から計算した変曲点でのdY/dXの値とそのときのθの値を表2.14に示す。この表には比較のため，計算結果も併記してある。実験結果では，軌跡はθが55°から65°の範囲内のとき変曲点をもち，dY/dXの値は，同一直径の場合にも同一長さの場合にも，ℓ/dが大きいほど大きく，計算結果と一部異なる傾向を示すが，計算結果と同様にdY/dXの値におよぼす長さの影響は，直径の影響に比べて小さい。また，全体的に計算結果の方がθの値は大きく，dY/dXの値は小さいが，実験結果とほぼ一致する。

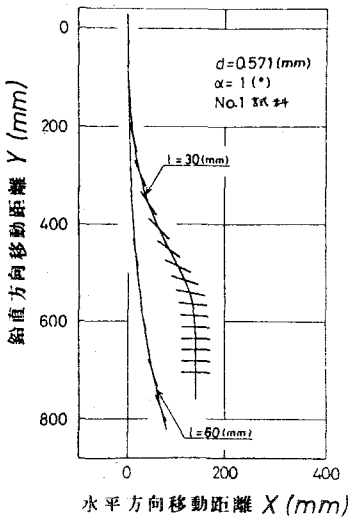


図2.74 落下軌跡におよぼす長さの影響

また，図2.74において，長さの小さいℓ=30(mm)の線状体が水平方向に加速されている領域（Y<410(mm)）では，ℓが

表2.14 軌跡の変曲点における接線勾配と回転角の値

試料番号	線状体直径 d(mm)	線状体長さ l(mm)	数値計算結果 dY/dX	数値計算結果 θ(°)	実験結果 dY/dX	実験結果 θ(°)
1	0.391	30	1.928	59.5	2.24	60
		60	1.911	59.3	——	——
	0.571	15	1.803	63.2	1.83	58
		30	1.794	61.8	1.92	60
		45	1.781	61.5	1.98	58
		60	1.772	61.4	——	——
	0.722	30	1.611	63.7	1.74	62
	0.915	30	1.456	65.9	1.52	62

大きい方が同一鉛直方向移動距離でのdY/dXの値は大きくなる。この領域ではℓが大きい方が同一のYでのθの値は小さい。図2.77から，加速領域ではθが小さいほどXは小さく，また，図2.78から，θが小さいほど$\dot{Y}$は大きくなり，したがって，(2.35)式を考慮すれば，ℓが大きい方がdY/dXは大きくなることが分かる。

さらに，図2.74から，同一回転角に対するX，Yの値はℓが大きい方が大きいことが分かり，この結果は計算結果と一致する。

ここで，重心の軌跡の計算結果（図2.5）と実験結果を比較すると，同一鉛直方向移動距離でのXの値は，計算結果の方が大きく，軌跡の曲線自身は実験結果と一致しないが，その傾向は良く一致していると考えられる。

つぎに，長さがX，Yにおよぼす影響を明確にするため，θとXの関係およびθとYの関係を図2.75，2.76に示す。

図2.75において，θとXの関係は下に凸の曲線で始まり，$50° < \theta < 55°$のとき変曲点をもち上に凸の曲線となり，図2.76において，落下開始直後，線状体は鉛直方向に急激に加速される

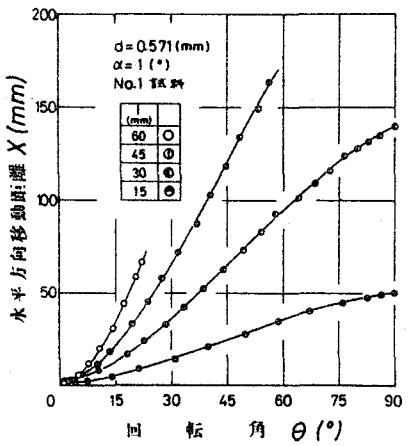


図2.75 水平方向移動距離におよぼす長さの影響

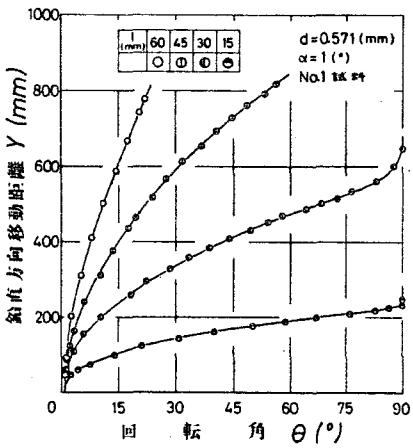


図2.76 鉛直方向移動距離におよぼす長さの影響

ため，θとYの関係は，上に凸の曲線で始まり，65°<θ<75°のとき変曲点をもち，θが90°に近づくと，$\dot{Y}$は一定値となりγは0となるため，θ=90°の線に漸近する。また，ある回転角に対するこれらの曲線の接線勾配$dX/d\theta$，$dY/d\theta$は，ℓが大きいほど大きく，すでに述べたように，θがある値になるまでに重心が移動する距離X，Yもℓが大きいほど大きくなる。

図2.77，2.78から，長さがθと$\dot{X}$の関係におよぼす影響はわずかであり，また，θと$\dot{Y}$の関係におよぼす影響は，とくにθの小さい領域で現われ，$\dot{Y}$はℓが大きいほど大きいが，その後，θの増加に伴ない長さの影響を受けなくなる。ところが，θとγの関係（図2.82）から，ℓが大きいほどγは小さくなる。したがって，(2.37)式から$dX/d\theta$，$dY/d\theta$はℓが大きいほど大きくなることが分かる。

ここで，計算結果と比較すると，ある回転角に対するX，Yの値は，θのほとんど全領域で実験結果の方が大きくなる。この主な原因は，計算結果の方がγの値が大きい（計算結果の方が大きくなるθの領域は長さにより異なるが θ<45°~70°である。）ためであると考えられる。しかし，θ>45°~70°では計算結果の方がγの値は小さく，その結果，ℓ=30(mm)の場合を比較すれば分かるように，θが90°に近づくと計算結果の方がXの値は大きくなる。

以上のように，計算結果と実験結果は数値的には異なるが，長さが姿勢の変化に対するX，Yの変化におよぼす影響は一致する。

2.10.2 線状体重心の速度および加速度

図2.77，2.78において，$\dot{X}$はθ=1°のとき0で，40°から50°の範囲内まで加速され，最大となり，その後減少し，線状体の姿勢が水平方向に近づくと線状体には水平方向の外力が作用しなくなり，θ=90°で0となる。いっぽう，$\dot{Y}$は，落下開始

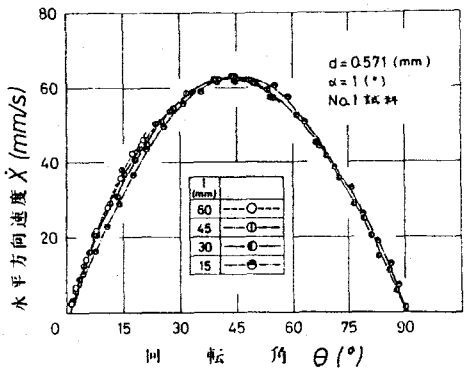


図2.77 水平方向速度におよぼす長さの影響

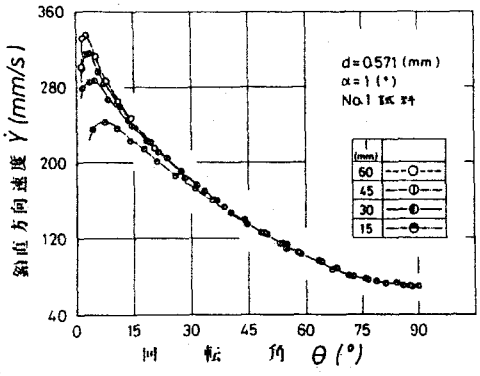


図2.78 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

直後に重力と浮力の差による外力により急激に加速され，θが8°以下の範囲内で最大となり，その後，抗力の増大により，θの増加に伴ない単調に減少する。θが90°に近づくと鉛直方向の外力は釣合うため，Ẏは一定値（Ẏ=70(mm/s)）となる。また，Ẋは加速領域ではℓが大きいほど大きいが，減速領域では逆にℓが大きいほど小さくなる。しかし，長さの影響は，加速領域での場合より小さい。いっぽう，Ẏは，θが約50°以下の領域ではℓが大きいほど大きいが，これ以上の領域では長さの影響を受けない。

表2.15にẊ，Ẏの最大値とそのときのθの値を示す。Ẋの最大値は，長さにかかわらずほぼ一定となるが，そのときの姿勢は40°から50°の範囲内でℓが大きいほどより鉛直に近くなる。また，Ẏが最大になるときの姿勢もℓが大きいほどより鉛直に近い。

ℓが大きいほどẎの最大値が

表2.15 重心速度の最大値とそのときの回転角の値

鋳込棒直径 d (mm)	鋳込棒長さ l (mm)	水平方向速度の最大値 $\dot{X}_{max}$ (mm/s)	θ (°)	鉛直方向速度の最大値 $\dot{Y}_{max}$ (mm/s)	θ (°)
0.391	30	41	41.5	215	4.5
	60	——	——	247	2
0.571	15	63	46	243	7.5
	30	63	43.5	288	6.5
	45	62.5	43	315	3
	60	63	43	335	2
0.722	30	83	44	338	5
	60	83	41	402	2.5
0.915	30	100	44.5	358	7.5
	60	102	43	454	3.5

No. 1 試料

大きくなる原因について考える。落下開始直後の急激な加速領域での姿勢は，ℓが大きいほど鉛直に近い。同一速度の場合，線状体の軸方向に作用する抗力は，軸に直角な方向に作用する抗力より小さく，線状体に作用するヌカの鉛直方向成分は，重力，浮力および抗力であり，これが0となるとき$\dot{Y}$は最大になる。したがって，ℓが大きいほど$\dot{Y}$の最大値は大きくなる。

ここで，計算結果と比較すると，長さが$\dot{X}$，$\dot{Y}$におよぼす影響は，$\dot{X}$の最大値が長さにかかわらずほぼ一定となることを除いて一致する。また，数値的には，$\dot{X}$，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は，$\dot{X}$に関しては計算結果とほぼ一致するが，$\dot{Y}$に関しては計算結果の方が少し小さい。さらに，$\dot{X}$の最大値はℓが大きい場合には，計算結果の方が少し大きいが，逆に，$\ell=15$ (mm)の場合のように小さくなると実験結果の方が少し大きくなる。しかし，実験誤差を考慮するとほぼ一致していると考えてよい。いっぽう，$\dot{Y}$の最大値は，ℓが大きいほど計算結果の方が大きく，実験結果との差は，$\ell=15, 30, 45, 60$ (mm)の場合，それぞれ約27，48，62，71 (mm/s)となる。また，$\theta<55°$程度では，$\dot{Y}$は計算結果の方が大きく，この傾向はとくにθの小さい領域でいちじるしい。

計算結果と実験結果で差が生ずる原因について考察する。原因として，

① 実験では，落下開始直後の領域で線状体が設定面上を滑るため，摩擦力が作用し$\dot{Y}$の増大を妨げる。

② 計算では，抗力係数C_α((2.30)式)として無限長の円柱に対する値を使用した。

③ ヌッセルト数Nu((2.32)式)は$Pr=0.71$に対する結果であり，$Pr=1$の場合には少し大きくなる。

などが考えられる。

以上のように，計算結果と実験結果は数値的に異なる場合も

あるが，数値計算により姿勢の変化に対する速度の変化を十分に表わすことができる。

つぎに，長さが重心の加速度におよぼす影響を調べるため，θと$\ddot{X}$の関係およびθと$\ddot{Y}$の関係を図2.79，2.80に示す。

計算結果（2.3.2項）ですでに述べたように，落下開始の瞬間に線状体は水平方向に約26（mm/s²）の加速度をもち，$\ddot{X}$は減少して極小となり，その後増大する。図2.79において，増大し始めた$\ddot{X}$は$6°<\theta<17°$のとき最大となり，減少して$40°<\theta<50°$で正の値から負の値へ移り，$65°<\theta<75°$のとき最小となり$\theta=90°$でふたたび0となる。$\ddot{X}$は，$40°<\theta<50°$のとき0となるが，そのときのθの値は，表2.15に示した$\dot{X}$が最大になるときのθの値である。いっぽう，図2.80において，$\ddot{Y}$は落下開始の瞬間から急激に減少して$\theta<8°$で正の値から負の値へ移り，$5°<\theta<30°$のとき最小となり増大して$\theta=90°$でふたたび0となる。$\ddot{Y}$は，$\theta<8°$のとき0となるが，そのときのθの値は，表2.15に示した$\dot{Y}$が最大になるときのθの値である。

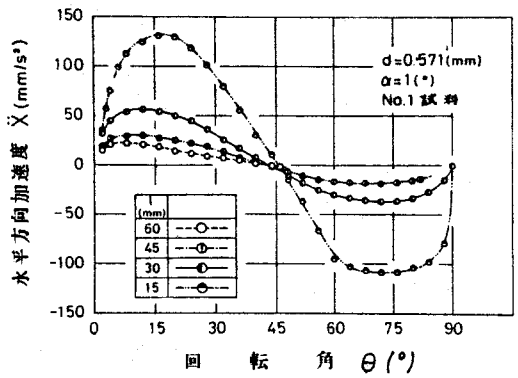


図2.79 水平方向加速度におよぼす長さの影響

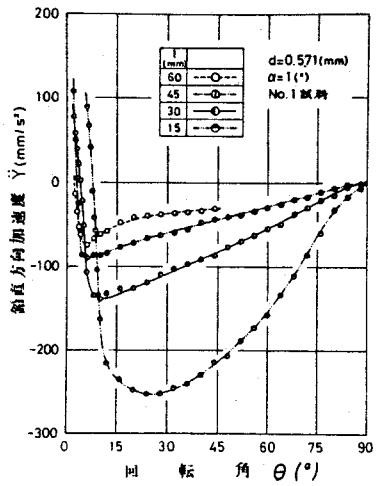


図2.80 鉛直方向加速度におよぼす長さの影響

表2.16 重心加速度の最大値，最小値とそのときの回転角の値

振れ体長さ	水平方向加速度の最大値		水平方向加速度の最小値		鉛直方向加速度の最小値	
l (mm)	$\ddot{X}_{max}$ (mm/s²)	θ(°)	$\ddot{X}_{min}$ (mm/s²)	θ(°)	$\ddot{Y}_{min}$ (mm/s²)	θ(°)
15	132	16.5	-108	73	-252	26
30	57	12	-37	73	-138	10.5
45	31	11	-18	69	-90	6.5
60	23	6.5	———	—	-74	6

d=0.571(mm)，No.1 試料

表2.16に$\ddot{X}$の最大値および最小値，$\ddot{Y}$の最小値とそのときのθの値を示す。最大値および最小値の絶対値とそのときのθの値は，lが大きいほど小さくなる。この傾向は計算結果でも認められ，θと$\ddot{X}$の関係およびθと$\ddot{Y}$の関係を表わす曲線の傾向も計算結果と一致する。しかし，表2.6と表2.16を比較すれば分かるように，θの値は実験結果の方が大きく，$\ddot{X}$の最大値および$\ddot{Y}$の最小値の絶対値は計算結果の方がそれぞれ1.6～2.6倍，2.9～3.7倍大きく，$\ddot{X}$の最小値の絶対値は実験結果の方が1.0～1.4倍大きい。

この原因について考える。図2.8と図2.77（θと$\ddot{X}$の関係）および図2.9と図2.78（θと$\ddot{Y}$の関係）を比較すると，θと$\ddot{X}$の関係を表わす曲線の接線勾配$d\ddot{X}/d\theta$は，θの全領域で計算結果と実験結果でほとんど差がないが，θと$\ddot{Y}$の関係を表わす曲線の接線勾配$d\ddot{Y}/d\theta$は，$\ddot{Y}$が最小になるときのθの値付近では計算結果の方が大きくなる。また，角速度γは，θ＜45°～70°では計算結果の方が大きく，これ以上の領域では小さい。したがって，$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$を表わす(2.50)式を考慮すれば，計算結果と実験結果で差が生ずる原因として，$\ddot{X}$に関してはγの値に差があるためであり，$\ddot{Y}$に関しては$d\ddot{Y}/d\theta$とγの値に差があるためと考えられる。

2.10.3 線状体の姿勢および角速度

姿勢および角速度の変化を図2.81，2.82に示す。すでに計算結果（2.5.3項）で述べたように，tとθの関係は落下開始直後の領域を除き初期角度にかかわらず同一曲線で表わされるので，図2.81には$\alpha=1°, 10°$のデータをプロットしている。

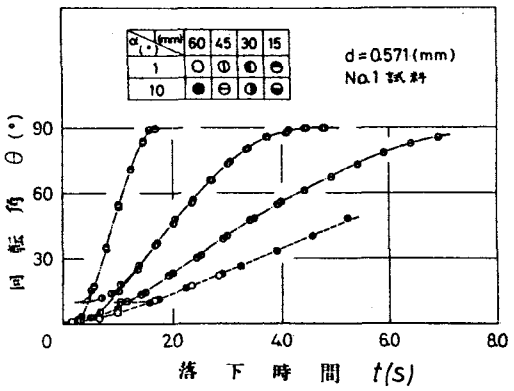


図2.81 姿勢におよぼす長さの影響

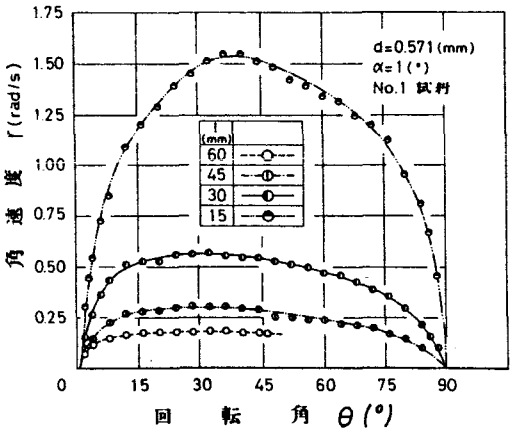


図2.82 角速度におよぼす長さの影響

tとθの関係は，$t=0$での接線勾配がほとんど0の下に凸の曲線で始まり，$30°<\theta<40°$のとき変曲点をもち，$\theta=90°$に漸近するような曲線になる。すなわち，角速度γは$30°<\theta<40°$まで加速されるが，これ以上の領域ではγおよび軸に直角な方向の速度uの増大に伴ない，線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントが増大するため，減速され最終的に線状体の姿勢は水平方向に漸近し，もっとも安定した姿勢になる。また，図2.82において，lが小さいほどγは大きく，線状体が回転するのに要する時間は短くなる。この傾向は計算結果でも認められ，姿勢の変化を表わす曲線の傾向も計算結果と一致する。

tとθの関係を表わす曲線が変曲点をもつときのθの値は，γが最大になるときのθの値である。表2.17にγの最大値とそのときのθの値を示す。

表2.7に示した計算結果と比転すると，γの最大値は計算結果の方がℓ=15，30，45，60(mm)の場合，約2.2，1.6，1.3，1.3倍大きく，そのときのθの値は，実験結果の方が大きい。

表2.17 角速度の最大値とそのときの回転角の値

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	角速度の最大値 r (rad/s)	θ(°)
1	0.391	30	0.35	25
	0.571	15	1.54	38
		30	0.57	30
		45	0.31	29
		60	0.18	30
	0.722	30	0.71	40
	0.915	30	0.94	45

また，θとγの関係を表わす図2.13と図2.82を比較すると，γはθ<45°~70°では計算結果の方が大きく(とくに，θの小さい領域でいちじるしい。)，これ以上の領域では小さい。計算結果の方がγの値が大きくなるθの領域は，ℓが小さいほど広くなり，ℓ=15，30，45，60(mm)の場合，約69°，55°，45°，45°である。この原因について考える。

前項で述べたように，$\dot{\gamma}$はθ<55°程度では計算結果の方が大きい。とくにこの傾向はθの小さい領域でいちじるしい。いっぽう，$\dot{X}$，$\dot{Y}$を表わす(2.23)式から，

$$\left.\begin{aligned} u &= \dot{X}\cos\theta + \dot{Y}\sin\theta \\ v &= -\dot{X}\sin\theta + \dot{Y}\cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (2.57)$$

となり，したがって，u，vの値は計算結果の方が大きく，線状体の角加速度を表わす(2.22)式の第3式を考慮すると，とくにθの小さい領域でγは計算結果の方が大きくなることが分かる。

したがって，前項で述べた①~③の原因が主なものであるが，その他にも，線状体が有限長であることに起因する後端部から発生する自由渦およびこの自由渦に引きづられるように後端部付近の境界層厚さが増大することなど，線状体回りの流れ(3.2.2項参照)についても考慮する必要がある。

以上のように，数値計算により姿勢の変化の傾向を表わすことができる。

2.10.4　最終落下位置での線状体の配向

繊維を取扱う実際の工程において，繊維が運動した後，最終的にどのように配向するかは製品品質との関連から非常に重要である。そこで，実験では，50本程度線状体を落下させ，最終落下位置での配向状態を調べた。

配向の評価はつぎのようにしておこなった。まず，図2.67に示す実験装置に設定したZ軸と最終落下位置での線状体の軸方向のなす角度をβとした。以下ではβを配向角と呼び，βの範囲は$-90° \leqq \beta \leqq 90°$（反時計回りを正）とし，10°ごとの相対度数を求め，$\beta = 0°$近くに分布している場合ほど配向度が良いと評価した。

$\ell = 30, 60$ (mm) の$\alpha = 1°$および10°の場合の配向度を図2.83，2.84に示す。

$\alpha = 1°$の場合，最終落下位置での線状体は$-50° < \beta < 70°$の範囲にほぼ一様に分布し，配向度は非常に悪い。これに対し，$\alpha = 10°$の場合，ほとんどの線状体が$-10° < \beta < 10°$の範囲に分布しており，配向度は良い。また，$\ell = 60$ (mm) の方が幾分

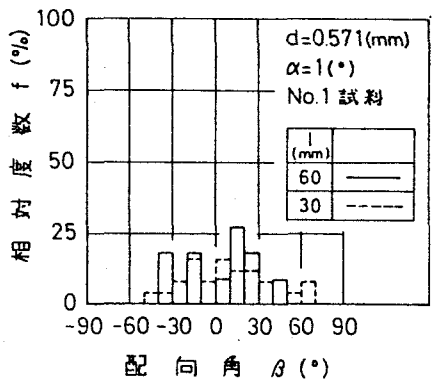


図2.83　配向におよぼす長さの影響

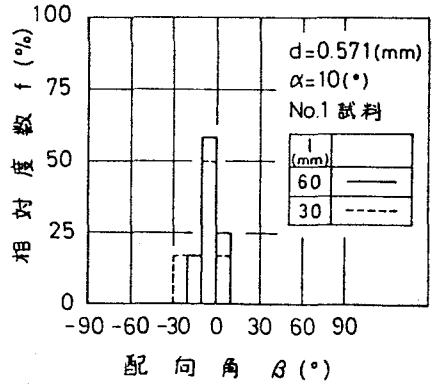


図2.84　配向におよぼす長さの影響

配向度は良いように思える。しかし，長さの影響は，初期角度の影響に比べて無視しうるほど小さい。$\alpha=1°$の場合，配向度は悪いが図2.85に示す$\ell=60$(mm)の線状体の最終落下位置での状態を見れば分かるように，その軸方向はXZ座標の原点，すなわち，初期位置の方向に向いており，本実験で用いたような直線の線状体は，静止流体中では一平面内で運動すると考えてよい。以上の結果から，初期角度を10°以上に設定するとXZ面（図2.67参照）内で運動するが，$\alpha=1°$の場合，角度が小さいため，初期状態のみでは運動面がXZ面に決まらずZ方向にづれる場合が多いことが分かる。

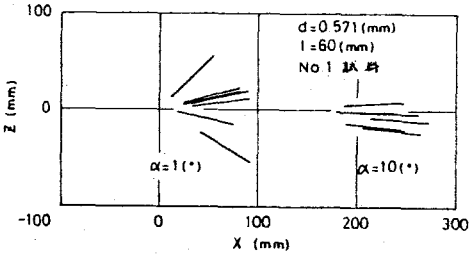


図2.85 最終落下位置での線状体の状態

2.11 線状体直径の影響

この節では，$\ell=30,60$(mm)，$d=0.391,0.571,0.722,0.915$(mm)のNO.1試料に対する実験結果から，線状体直径が落下特性におよぼす影響を調べる。

2.11.1 線状体の落下軌跡

$d=0.391,0.915$(mm)の落下軌跡を図2.86に示す。図中の線状体の時間間隔は，$d=0.391$(mm)の場合，$\Delta t=4/7$(s)，$d=0.915$(mm)の場合，$\Delta t=0.2$(s)である。

重心の落下軌跡は変曲点をもつ曲線となり，表2.14から変曲点での接線勾配dY/dXの値は，dが大きいほど小さくなる。すなわち，加速度の方向と一致するときの運動方向は，直径が大きいほどより水平に近くなる。この傾向は計算結果と一致し，全体的に計算結果の方がθの値は大きく，dY/dXの値は小

さいが実験結果とほぼ一致する。

また，図2.86から，同一回転角に対するYの値は，dが小さい方が大きいが，Xの値に関しては分かりにくい。しかし，最終落下位置でのXの値は，dが小さい方が大きくなる。

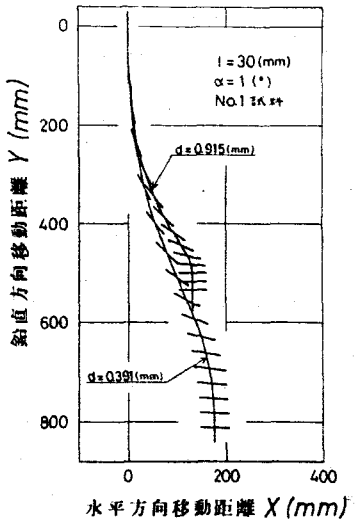


図2.86 落下軌跡におよぼす直径の影響

ここで，重心の軌跡の計算結果(図2.14)と実験結果を比較すると，同一鉛直方向移動距離でのXの値は，d=0.915(mm)に対する計算結果で姿勢が水平近くになった後の領域(この領域では，実験結果の方がXの値は大きい。)を除いて，計算結果の方が大きく，軌跡の曲線自身は実験結果と一致しないが，その傾向は良く一致していると考えられる。

つぎに，直径がX，Yにおよぼす影響を調べるため，l=30(mm)の場合のθとXの関係およびθとYの関係を図2.87，2.88に示す。

θとXの関係およびθとYの関係を表わす曲線は，それぞれ45°<θ<50°，65°<θ<80°で変曲点をもち，変曲点での$dX/d\theta$，$dY/d\theta$の値は，d=0.391，0.571，0.722，0.915(mm)の場合，152，118，123，115(mm)($dX/d\theta$)，330，206，155，115(mm)($dY/d\theta$)となり，dが小さいほど変曲点での接線勾配は大きいが，ある回転角に対する$dX/d\theta$，$dY/d\theta$およびX，Yの値は，直径に対して一定の傾向を示さない。

姿勢の変化に対する重心速度の変化を表わす図2.89，2.90から，dが大きいほど$\dot{X}$，$\dot{Y}$は大きく，d=0.571(mm)と0.915(mm)の最大値を比較すると，$\dot{X}$，$\dot{Y}$に関して約1.6倍，1.2倍となる。いっぽう，tとθの関係(図2.91)から，dが大きいほどYは大きく，同様に両者の最大値を比較すると約1.7倍と

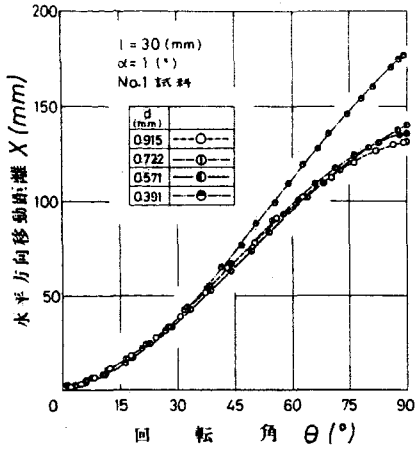


図2.87 水平方向移動距離におよぼす直径の影響

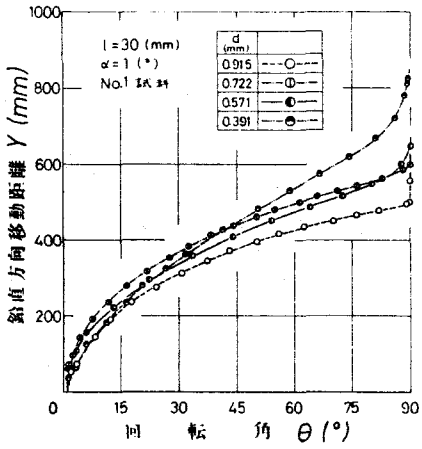


図2.88 鉛直方向移動距離におよぼす直径の影響

となり，直径が速度および角速度におよぼす影響は同程度である。したがって，(2.37)式を考慮すれば，直径がθとXの関係およびθとYの関係におよぼす影響が明確に現われないことが分かる。しかし，θが90°に近づくとX，Yともにαが小さいほど大きくなる。

計算結果では，直径の影響が明確に現われ，αが小さいほど$dX/d\theta$，$dY/d\theta$およびX，Yの値は大きくなった。この主な原因としては計算結果の方がYにおよぼす直径の影響が大きいためと考えられる。

ここで，計算結果と比較すると，$\alpha = 0.391$ (mm)のように直径が小さい場合，ある回転角に対するX，Yの値は計算結果の方が大きく，直径が大きい場合，逆に実験結果の方が大きくなることが分かる。

2.11.2 線状体重心の速度

図2.89，2.90には$\ell = 30, 60$ (mm)のデータをプロットしている。線状体は水平方向に40°<θ<45°まで加速されるが，鉛直方向に加速されるのはθ<8°である。また，θの全領域

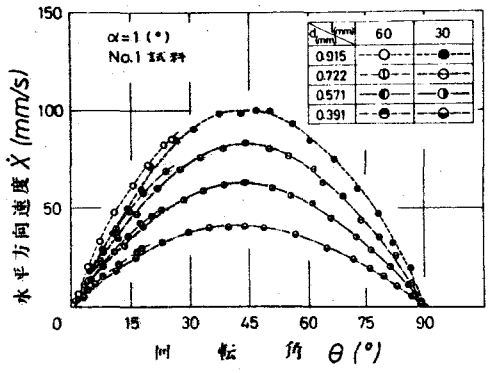


図2.89 水平方向速度におよぼす直径の影響

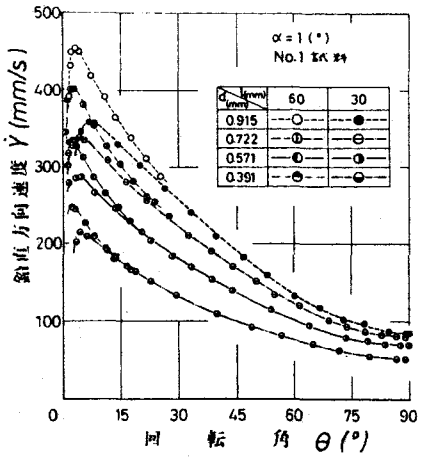


図2.90 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

(1°~90°)で$\dot{X}$, $\dot{Y}$ともに直径が大きいほど大きくなる。さらに, 同一直径でのℓ=60(mm)と30(mm)の場合の差は, $\dot{X}$, $\dot{Y}$ともにαが大きいほど大きく, $\dot{Y}$はαが大きいほどθのより広い領域で長さの影響を受ける。すなわち, $\dot{X}$, $\dot{Y}$ともに直径が大きいほど長さの影響を受け易くなる。

2.10.2項に記載した表2.15から, $\dot{X}$, $\dot{Y}$が最大になるときのθの値は, αが大きいほど大きく, 2.10.2項の結果を考えあわせると同一直径, 同一長さの場合, ℓ/αが大きいほどより鉛直に近い姿勢で速度成分が最大になることが分かる。しかし, 長さ, 直径にかかわらずℓ/αが大きいほどより鉛直に近い姿勢で$\dot{X}$, $\dot{Y}$が最大になるとは言えない。

直径が$\dot{X}$, $\dot{Y}$におよぼす影響の傾向は, 計算結果と一致するが, $\dot{X}$, $\dot{Y}$が最大になるときのθの値は, $\dot{X}$に関しては計算結果の方が少し大きく, $\dot{Y}$に関しては少し小さくなる。また, $\dot{X}$の最大値は, 直径が小さい場合, 計算結果の方が大きいが, 逆に, α=0.915, 0.722(mm)の場合のように大きくなると実験結果の方が大きくなる。しかし, 実験誤差を考慮すれば両者はほぼ一致していると考えてよい。いっぽう, $\dot{Y}$の最大値は, 直

径が小さいほど計算結果の方が大きく，実験結果との差は，ℓ =30(mm)，α=0.391，0.571，0.722，0.915(mm)の場合，約65，48，13，−2(mm/s)（α=0.915(mm)の場合，実験結果の方が大きい。）となる。

以上のように，計算結果と実験結果は数値的に異なる場合もあるが，数値計算により姿勢の変化に対する速度の変化におよぼす直径の影響を十分に表わすことができる。

2.11.3 線状体の姿勢

ℓ=30(mm)のtとθの関係を図2.91に示す。図にはα=1°，10°のデータをプロットしている。線状体の回転は25°<θ<45°まで加速されるが，その後減速され，姿勢は水平方向に漸近する。また，直径が大きいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短くなる。

したがって，2.10.3項の結果を考えあわせると，同一直径，同一長さの場合，ℓ/αが小さいほどγが大きいという結果が得られる。そこで，長さの影響を表わす図2.81と直径の影響を表わす図2.91を比較すると，α=0.571(mm)，ℓ=45(mm)の場合とα=0.391(mm)，ℓ=30(mm)の場合を除いて，長さ，直径にかかわらずℓ/αが小さいほどγはθの全領域で大きく，線状体が回転するのに要する時間は短くなるが，この2つの場合，前者がℓ/α=76.9，後者が78.1と後者の方がℓ/αが大きいにもかかわらずγはわずかに大きくなるので，長さ，直径にかかわらずℓ/αが小さいほど角速度は大きいとは言えない。

以上の傾向は計算でも確かめられており，tとθの

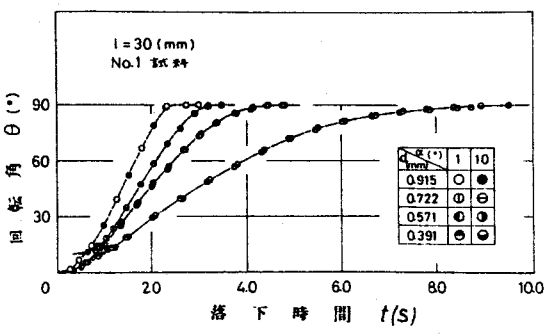


図2.91 姿勢におよぼす直径の影響

関係を表わす曲線の傾向も計算結果と一致する。しかし，Yの最大値とそのときのθの値を示す表2.7と表2.17を比較すると，Yの最大値は，計算結果の方が$\alpha=0.391, 0.571, 0.722, 0.915$ (mm)の場合，約1.1，1.6，2.1，2.2倍大きく，そのときのθの値は実験結果の方が大きい。

以上のように，実験結果とは差が生ずるが，数値計算により姿勢の変化におよぼす直径の影響の傾向を表わすことができる。

2.12 初期角度の影響

この節では，$\alpha=0.391$ (mm)，$\ell=30$ (mm)のNO.1試料に対する$\alpha=1°, 10°, 20°, 30°$の実験結果から，初期角度が落下特性におよぼす影響を調べる。

2.12.1 線状体の落下軌跡

計算結果で述べたように，$\alpha=10°, 20°, 30°$の重心の軌跡は，X，Y軸に沿ってθが等しくなる位置まで平行移動すると落下開

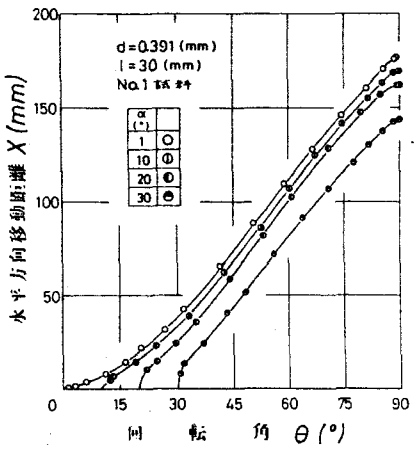


図2.92 水平方向移動距離におよぼす初期角度の影響

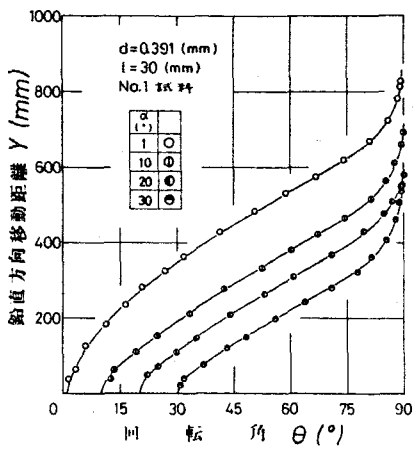


図2.93 鉛直方向移動距離におよぼす初期角度の影響

始直後のθにして約5°の領域を除いてα=1°の軌跡と一致する。(2.5.1項参照)

これを実験結果でも確かめるため，姿勢の変化に対するX，Yの変化を図2.92，2.93に示す。

ある回転角に対するX，Yの値は，αが小さいほど大きいが，α=10°～30°の曲線をX軸あるいはY軸に沿って平行移動すると，落下開始直後の急激な加速領域を除いてα=1°の曲線とほぼ重なることが分かる。

θとẊの関係(図2.95)から，α=10°～30°の曲線は多少差があるが落下開始直後のθの小さい領域を除きα=1°の曲線とほぼ一致し，θとẎの関係(図2.96)から，α=10°～30°の曲線がα=1°の曲線に一致するまでに線状体が回転する角度は，αが小さいほど大きくα=10°の場合，約10°となる。また，tとθの関係(図2.97)から，α=10°～30°の曲線は，落下開始直後のθにして約4°の領域を除きα=1°の曲線に一致する。したがって，(2.37)式を考慮すれば上述のことは明らかとなる。

以上の結果から，計算結果の場合と同様に実験結果でも，α=10°～30°の軌跡をθが等しくなる位置まで平行移動すると落下開始直後のθの小さい領域を除きα=1°の軌跡と一致することが分かる。

図2.94にα=30°の軌跡を平行移動した後のα=1°と30°の重心の軌跡と4/7(s)ごとの姿勢の変化を示す。α=1°の軌跡が分かれば，α>1°の軌跡は落下開始直後の領域を除きすべて分かる。

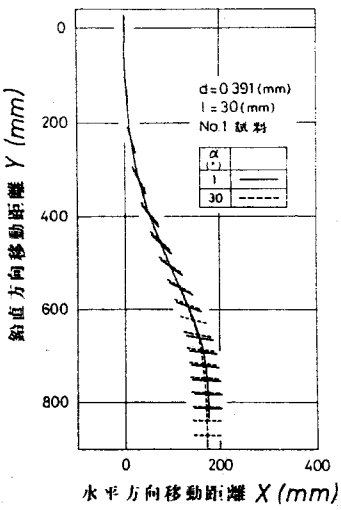


図2.94 落下軌跡におよぼす初期角度の影響

2.12.2 線状体重心の速度

図2.95において，$\alpha=10°\sim30°$の$\dot{X}$は落下開始直後急激に加速されα=1°の曲線に近づくが，αの増大に伴ないθのより広い領域でα=1°の場合より小さくなる。しかし，α=30°の場合でもその差は最大2.5 (mm/s)程度であり，実験誤差を考慮すれば落下開始直後の急激な加速領域を除きα=1°の曲線に一致すると考えてよい。

いっぽう，図2.96において，$\alpha=10°\sim30°$の$\dot{Y}$も落下直後急激に加速されα=1°の曲線に近づき一致する。また，一致するまでに線状体が回転する角度は，αが小さいほど大きく，α=10°, 20°, 30°の場合，約10°, 5°, 2°となる。したがって，初期角度が重心の速度におよぼす影響は計算結果と一致する。

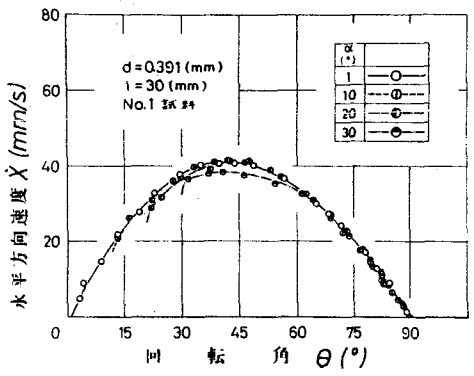


図2.95 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

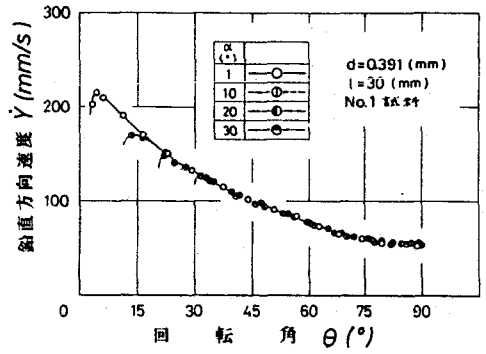


図2.96 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

2.12.3 線状体の姿勢

図2.97において，α=1°の場合，線状体の回転はθ=25°付近まで加速されるが，その後減速され，姿勢は水平方向に漸近する。また，$\alpha=10°\sim30°$の曲線を横軸に沿って平行移動すると，落下開始直後のθにして約4°の領域を除いてα=1°の曲線に

重なる。図2.97は平行移動した後の図である。

したがって，$\alpha=1°$のtとθの関係が分かれば，$\alpha>1°$の場合については落下開始直後の領域を除きすべて分かる。以上の結果は計算結果と一致する。

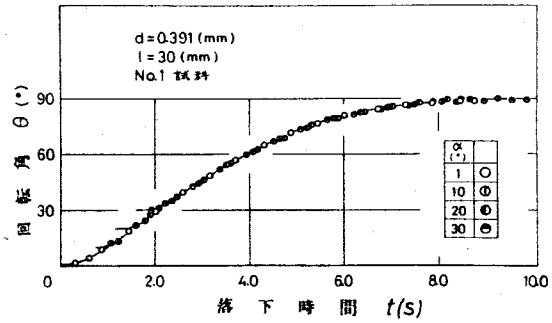


図2.97 姿勢におよぼす初期角度の影響

これまでの結果から，初期角度は，落下開始直後の急激な加速領域における運動にのみ影響を与え，それ以後の領域では，姿勢が同じであれば初期角度に関係なく運動状態は同一になることが実験的にも確かめられた。

2.12.4 最終落下位置での線状体の配向

$\alpha=1°, 10°$の配向度を図2.98に示す。$\alpha=1°$の場合，最終落下位置での線状体はβのほとんど全領域に分布し，配向度は非常に悪い。これに対し，$\alpha=10°$の場合，約70(%)の線状体が$-10°<\beta<10°$の範囲に分布し，配向度は良い。

したがって，αを10°以上に設定すると，線状体はほぼZ-Y面内で運動するので線状体設定面の方向に非常に良く配向することが分かる。

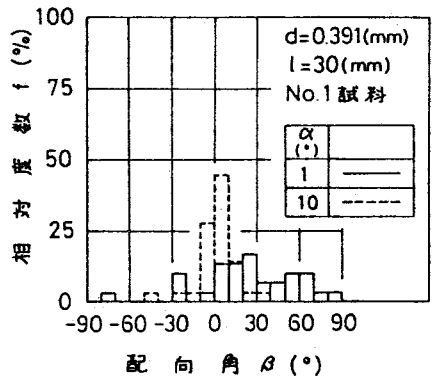


図2.98 配向におよぼす初期角度の影響

2.13 線状体比重量の影響

この節では，主に $d=0.391$ (mm)，$\ell=30, 60$ (mm) のNO.1試料と $d=0.310$ (mm)，$\ell=30, 60$ (mm) のNO.2試料に対する実験結果から，線状体の比重量が落下特性におよぼす影響を調べる。なお，NO.1試料とNO.2試料では直径も異なるため，2.11節で述べた直径の影響の結果も考慮する必要がある。

2.13.1 線状体の落下軌跡

ここでは落下軌跡は示さないが，重心の軌跡の変曲点での接線勾配 dY/dX とそのときの θ の値は，$\ell=30$ (mm) のNO.1試料，NO.2試料の場合，それぞれ $dY/dX=2.24$，1.82，$\theta=60°$，$61°$ であり，γ_b の大きいNO.2試料の方が dY/dX の値は小さくなる。この傾向は計算結果と一致する。また，すでに述べたように，直径が大きいほど変曲点での dY/dX の値は小さい。したがって，同一直径で重さが異なる場合，加速度の方向と一致するときの重心の運動方向は，重い方がより水平に近くなる。

つぎに，比重量がX，Yにおよぼす影響を調べるため，姿勢

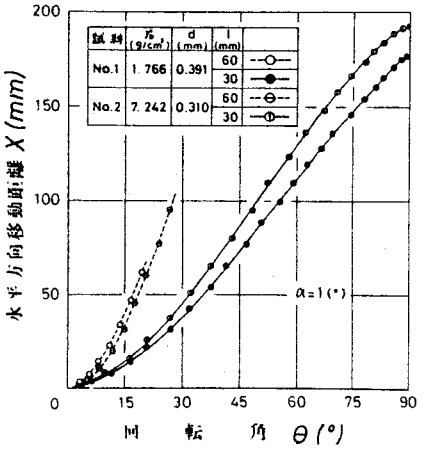


図2.99 水平方向移動距離におよぼす比重量の影響

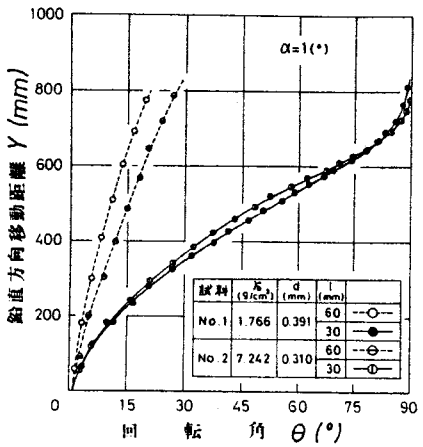


図2.100 鉛直方向移動距離におよぼす比重量の影響

の変化に対するX，Yの変化を図2.99，2.100に示す。

図2.99において，ある回転角に対するXの値は，ℓ=30(mm)の場合，θの全領域でNO.2試料の方が大きくなるが，ℓ=60(mm)の場合，実験の範囲内ではNO.1試料の方が大きい。

また，図2.100において，Yの値は，ℓ=30(mm)の場合，θ<80°程度の領域ではわずかにNO.2試料の方が大きいが，これ以上の領域ではNO.1試料の方が大きくなる。いっぽう，ℓ=60(mm)の場合，実験の範囲内ではYの値はNO.1試料の方が大きい。

2.13.2 線状体重心の速度

姿勢の変化に対する重心速度の変化を図2.101，2.102に示す。図にはℓ=30，60(mm)のデータをプロットしている。

$\dot{X}$は40°<θ<45°まで加速され，$\dot{Y}$はθ<6°まで加速される。また，θの全領域で$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにγ_bの大きいNO.2試料の方が大きくなる。

表2.18にNO.2試料の$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値とそのときのθの値を示す。2.10.2項に記載した表2.15と表2.18を比較すると，$\dot{X}$，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値はNO.2試料の方が大きい

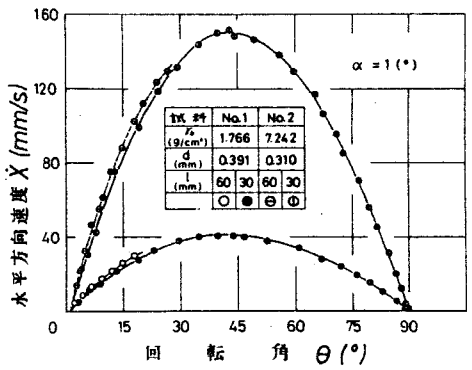


図2.101 水平方向速度におよぼす比重量の影響

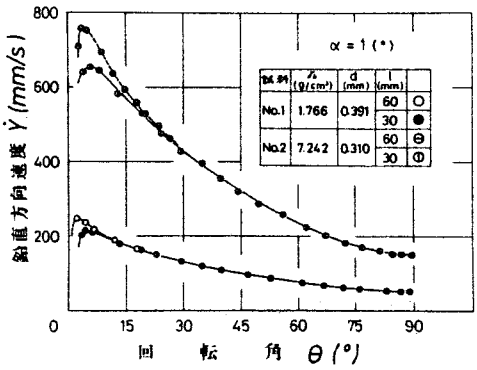


図2.102 鉛直方向速度におよぼす比重量の影響

ことが分かる。なお，$\alpha=0.310$ (mm)のNO.2試料の$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値は，$\alpha=0.391$ (mm)のNO.1試料の約3.7倍，3.1倍になる。

$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値およびそれらが最大になるときのθの値は直径が大きいほど大きい。したがって，同一直径で重さが異なる場合，これらの値は重い方が大きくなる。

表2.18 重心速度の最大値とそのときの回転角の値

線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	水平方向速度の最大値 $\dot{X}_{max}$(mm/s)	θ (°)	鉛直方向速度の最大値 $\dot{Y}_{max}$(mm/s)	θ (°)
0.206	30	85	43	465	3.5
	60	—	—	545	2
0.310	30	150	42.5	655	6
	60	—	—	758	4
0.411	30	245	45	845	7.5
	60	—	—	1066	4
0.512	30	316	48	1008	9
	60	314	42.5	1222	5.5

No. 2 試料

また，図2.101，2.102において，$\ell=60$(mm)と30(mm)の場合の差は，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにNO.2試料の方が大きく，さらに，$\dot{Y}$が長さの影響を受けるθの領域も，NO.2試料の方が大きい。ここで，直径の影響を考慮すると，同一直径の場合，重い方が長さの影響を受け易いことが分かる。

以上実験によって得られた比重量の影響は計算結果と一致する。

ここで，NO.2試料に対して実験結果と計算結果を比較する。$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値は計算結果の方が大きく，実験結果との差は，$\dot{X}$に関しては$\ell=30$(mm)の場合，15 (mm/s)，$\dot{Y}$に関しては$\ell=30$，60(mm)の場合，101，168 (mm/s)となる。また，$\dot{X}$が最大になるときのθの値は計算結果の方が大きく，$\dot{Y}$に関しては逆に小さくなる。以上のように数値的には異なるが，姿勢の変化に対する速度の変化の傾向は一致する。

また，表2.18から，NO.2試料の場合にもNO.1試料と同様に，$\dot{X}$の最大値は直径が大きいほど大きいが，長さにかかわらずほぼ一定となり，$\dot{Y}$の最大値は，同一直径，同一長さの場合ともに，ℓ/αが大きいほど大きい。さらに，$\dot{X}$，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は，同一直径，同一長さの場合ともに，ℓ/αが大きいほど小さい。

2.13.3 線状体の姿勢

姿勢の変化を図2.103に示す。図には ℓ=30, 60(mm) と α=1°, 10° のデータをプロットしている。

γ_b の大きいNO.2試料の方が角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短くなる。また，γ の最大値とそのときの θ の値はNO.1試料の場合，ℓ=30, 60(mm)でそれぞれ γ=0.35, 0.11 (rad/s)，θ=25°, 18°，NO.2試料の場合，γ=1.00, 0.38 (rad/s)，θ=22°, 11°であり，NO.2試料の方が γ の最大値は，2.9～3.5倍大きく，そのときの θ の値は小さくなる。

ここで，直径が大きいほど γ は大きいことを考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，γ は重い方が大きくなる。これは，同一形状の場合，重い方が速度は大きく線状体に対する流体の相対速度が大きくなり，したがって，線状体を回転させる向きに作用するモーメントが大きくなるためと考えられる。

以上の傾向は計算結果でも認められ，数値的には異なるが t と θ の関係を表わす曲線の傾向も計算結果と一致する。

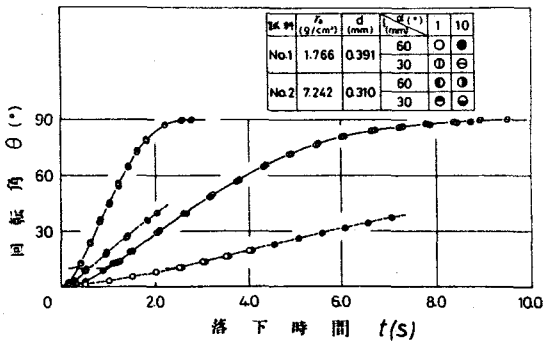


図2.103 姿勢におよぼす比重量の影響

2.14 流体の温度の影響

この節では，$\alpha=0.571$，0.915 (mm)，$\ell=60$ (mm) のNo.1試料を用いて水温を $Tw=12.4$，29.9 (°C) の2種類変えた場合，落下特性とくに重心の速度および姿勢がどのように変化するかを調べる。なお，各水温に対する水の物性値は，$Tw=12.4$，29.9 (°C) の場合，それぞれ $\rho=1.019\times10^{-7}$，1.016×10^{-7} (gs^2/mm^4)，$\nu=1.226$，0.819 (mm^2/s) である。

2.14.1 線状体重心の速度

$\alpha=0.571$，0.915 (mm)，$Tw=12.4$，29.9 (°C) の姿勢の変化に対する重心速度の変化を図2.104，2.105に示す。

$\alpha>1°$ の場合の θ と $\dot{X}$ の関係および θ と $\dot{Y}$ の関係を表わす曲線は，落下開始直後の領域を除き $\alpha=1°$ の曲線と一致することが分かっているので，$Tw=29.9$ (°C) の場合，θ と $\dot{X}$ の関係を表わす曲線は，$\alpha=1°$ と $10°$ の曲線を重ね合わせて求め，θ と $\dot{Y}$ の関係を表わす曲線は，$\alpha=1°$ と $10°$ の曲線と $\theta>50°$ の $\ell=30$ (mm) の曲線を重ね合わせて求めた。$\theta>50°$ の領域で，$\ell=$

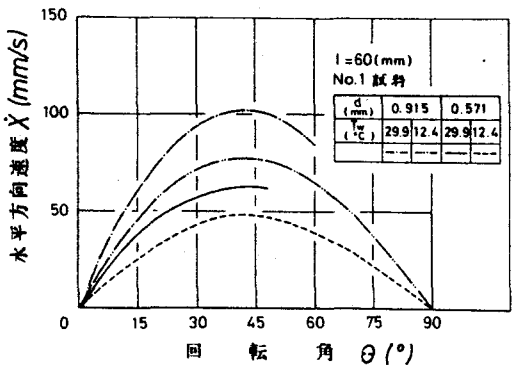


図2.104 水平方向速度におよぼす水温の影響

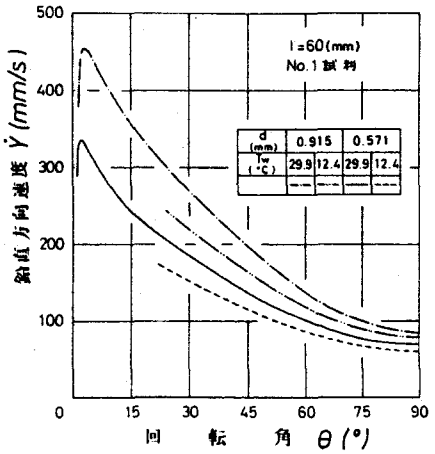


図2.105 鉛直方向速度におよぼす水温の影響

60(mm)のデータが得られなかったため，すでに$\dot{Y}$はこの領域で長さの影響を受けないことが分かっているので，$\ell=30$(mm)の曲線を用いた。

また，$T_W=12.4$(℃)の場合，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに$\alpha=0.571$(mm)では$\alpha=20°$, 40°, 60°の曲線を重ね合わせ，$\alpha=0.915$(mm)では$\alpha=20°$, 60°の曲線を重ね合わせて求めた。

$\dot{X}$は40°<θ<45°まで加速され，また，水温が高い方が動粘性係数は小さく，したがって線状体に作用する抗力が小さいので，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにθの全領域でT_Wが高い方が大きくなる。この傾向は計算結果と一致する。

表2.19に$\dot{X}$の最大値とそのときのθの値およびθ=45°, 90°のときの$\dot{Y}$の値を示す。T_Wが高い方が，より水平に近い姿勢になるまで水平方向に加速される。この傾向は計算結果でも認められた。また，$T_W=29.9$(℃)の$\dot{X}$の最大値およびθ=90°の$\dot{Y}$の値は，$T_W=12.4$(℃)の値の約1.3倍，1.2倍（$\alpha=0.571$(mm)の場合），約1.3倍，1.1倍（$\alpha=0.915$(mm)の場合）となる。

表2.19 $\dot{X}$の最大値とそのときのθの値および
θ=45°, 90°のときの$\dot{Y}$の値

線状体直径	水温	水平方向速度の最大値		鉛直方向速度 $\dot{Y}$ (mm/s)	
d (mm)	T_W(℃)	$\dot{X}_{max}$(mm/s)	θ(°)	θ=45(°)	θ=90(°)
0.571	12.4	48	42	137	70
	29.9	63	43	115	60
0.915	12.4	78	42.5	164	79
	29.9	102	43.5	197	85

l=60(mm), No.1試料

2.14.2 線状体の姿勢

$\alpha=0.571$, 0.915(mm), $T_W=12.4$, 29.9(℃)の姿勢の変化を図2.106に示す。

tとθの関係を表わす曲線は，横軸（落下時間軸）に沿って平行移動すると落下開始直後の領域を除きαにかかわらず一致することが分かっているので，$T_W=29.9$(℃)の場合，$\alpha=1$°と

10°の曲線を重ね合わせ，$T_w=12.4$(℃)の場合，前項で重心の速度を求めたときと同じαの曲線を重ね合わせて求めた。

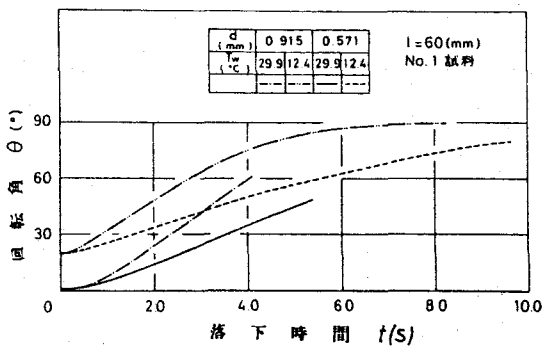


図2.106 姿勢におよぼす水温の影響

水温が高い方が同一回転角に対するγの値は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。この傾向は計算結果と一致する。また，γの最大値は$T_w=29.9$(℃)の場合，$\alpha=0.571$，0.915(mm)で$\gamma=0.18$，0.32(rad/s)，$T_w=12.4$(℃)の場合，$\gamma=0.15$，0.28(rad/s)である。

前項の結果から，水温が高い方が$\dot{x}$，$\dot{y}$は大きい。したがって，(2.51)式からu，vはT_wが高い方が大きくなり，線状体の角加速度を表わす(2.22)式の第3式を考慮すれば，γは水温が高い方が大きくなることが分かる。

2.14.1項，2.14.2項の結果から，数値的には異なるが水温が落下特性におよぼす影響は，実験結果と数値計算結果で一致する。

2.15 空気中における線状体の運動

これまでは，線状体が水中で自由落下する場合の落下特性および諸要因の影響を調べたが，この節では，空気中で運動する場合の落下特性および諸要因の影響を調べ，水中での結果と比較して主に流体の比重量の違いにより落下特性がどのように変わるかを明らかにする。

2.15.1 初期角度の影響

計算結果によると，線状体が空気中で運動する場合，姿勢が水平方向を中心にして減衰振動するため，この変動に応じて

重心の速度が減衰振動し，とくに水平方向速度の向きが変化するため，重心の軌跡が変動する現象が生ずることが分かった。なお，1周期分の軌跡の変動を観察するにも最低3(m)程度の高さが必要であり，ここでは，高さ800(mm)程度で実験をおこなっているので，重心の軌跡が変動する現象を観察することができなかった。しかし，実験から得られた落下開始後の急激な加速領域における運動状態と計算結果を比較検討することにより，姿勢，重心の速度および軌跡が変動する可能性があることを推察することができた。

また，計算結果からも分かるように，水中での場合に比べて運動方向は鉛直に近い。したがって，800(mm)程度の高さでは水平方向に移動する距離が小さいので，ここでは落下軌跡は記載せず，落下時間に伴なって姿勢および重心の速度がどのように変化するか，さらに，その変化の状態に要因がいかなる影響をおよぼすかを調べる。

姿勢の変化を表わす図2.107において，空気の比重量が小さいため，落下開始直後の領域では角速度がほとんど増大しない。やがて，重力と浮力の差による外力の作用を受けて線状体の軸方向速度が急激に増大するため，姿勢は急激に水平方向に回転し始める。そして，$\alpha=10°\sim30°$のすべての場合，角速度が加速されている状態で線状体が底面に到達することが分かる。

水中での場合，角速度の変化に初期角度の影響が現われるのは落下開始直後のθにして約4°の領域であり，これ以後の領域では姿勢の変化に対する角速度の変化は初期角度の影響を受けない。

空気中での場合，図2.107からは明確に分からないが，計算によると同一姿勢におけ

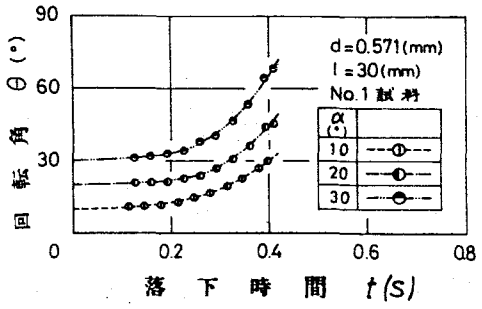


図2.107 姿勢におよぼす初期角度の影響

る角速度の値は，αが小さいほど大きいという結果が得られており，実験でも，$\alpha=0.915$(mm)，$\ell=30$(mm)の場合，$\alpha=0.571$(mm)の場合より姿勢の変化が大きいのでこの傾向がわづかではあるが見られる。

また，水中では，図2.82から$\alpha=0.571$(mm)，$\ell=30$(mm)，$\alpha=1°$の場合，角速度γは$\theta=30°$程度で最大，約0.57(rad/s)，になっており，上述の結果から$\alpha=30°$で実験をおこなった場合，$\theta=32°$程度でγは最大となり，それ以後の領域では$\alpha=1°$の曲線と一致すると考えられる。ところが，空気中での場合，$\alpha=30°$の曲線を見れば分かるように，θが70°近くになっても角速度は加速され続けており，しかも，水中での場合に比べてその値は非常に大きい。

つぎに，計算結果と比較する。$\alpha=30°$の場合，計算結果と実験結果は良く一致しており，たとえば，$\theta=70°$になるのに要する時間およびそのときの角速度は，計算では，$t=0.42$(s)，$\gamma=5.1$(rad/s)，実験では，$t=0.42$(s)，$\gamma=5.2$(rad/s)である。落下開始後の急激な加速領域で，実験結果と計算結果が一致することから，高さを大きくして実験をおこなった場合，姿勢が水平方向を中心にして減衰振動し，この変動に応じて重心の速度および軌跡が減衰振動する現象が観察できると考えられる。

重心の速度の変化を図2.108，2.109に示す。空気中での場合，その比重量が小さいので，落下開始直後の領域では線状体に作用する抗力が小さく，ほとんど重力と浮力の差にもとづくオトカにより運動をおこなう。したがって，その方向はほとんど鉛直方向であるので，鉛直方向には急激に加速されるが，水平方向の加速は小さい。そして，角速度が急激に増大し始めてから水平方向加速度は増大する。同一落下時間における角速度は，初期角度が大きいほど大きいこと，および落下開始時からその運動方向はわづかではあるが初期角度が大きいほど鉛直方向に

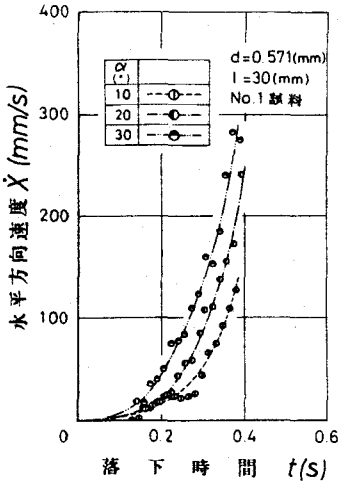


図2.108 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

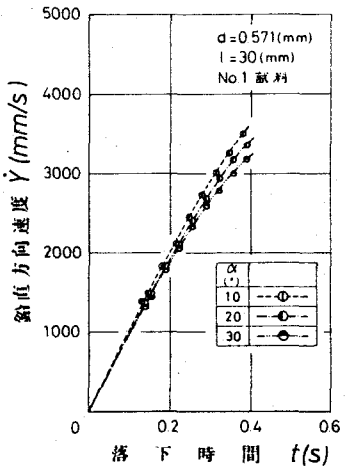


図2.109 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

対して傾いていることから，$\dot{X}$は短時間のうちに増大し始め，同一落下時間における値は，初期角度が大きいほど大きい。いっぽう，初期角度が大きいほどその姿勢は水平方向に近いため，鉛直方向に作用する抗力が大きく$\dot{Y}$は小さくなる。しかし，その抗力は小さいので初期角度による差はわずかであり，水平な姿勢に近づくにつれて除々にその差が明確に現われる。以上の結果は計算結果と一致する。

なお，計算によると，線状体は水平な姿勢になる直前まで水平方向に加速され，初期角度が大きいほど水平な姿勢になるのに要する時間が短いため，$\dot{X}$の最大値は小さいという結果が得られているが，実験では，$\alpha=30°$の場合でも線状体は$\theta=70°$程度で底面に到達するので，加速され続けており，この初期角度の影響を確かめることはできない。また，$\alpha=30°$の場合，計算によると$\theta=81°$程度まで鉛直方向に加速されており，実験では，底面に到達するまで線状体は鉛直方向にも加速され続けていることから，この計算結果は妥当であると考えられる。

また，水中での場合，落下開始直後の急激な加速領域を除き，

姿勢の変化に対する重心の速度の変化は，初期角度の影響を受けない。これに対し，空気中での場合，線状体に作用する抗力が小さいため，$\dot{X}$，$\dot{Y}$は水中での場合に比べて水平に近い姿勢になるまで加速されるので，実験の範囲内ではつねに初期角度の影響が現われており，同一姿勢における$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は初期角度が小さいほど大きい。これは計算結果と一致する。

したがって，姿勢の変化および重心速度の変化におよぼす初期角度の影響を考慮すると，軌跡をX，Y軸に沿ってθが等しくなる位置まで平行移動しても，水中での場合と異なり，初期角度にかかわらず軌跡が一致するということはない。なお，$\dot{X}$，$\dot{Y}$は水中での場合に比べて非常に大きくなることが分かる。

2.15.2 線状体直径の影響

姿勢の変化および重心速度の変化におよぼす直径の影響を図2.110～2.112に示す。

軸に直角な方向の速度uおよび軸方向の速度vにもとづく線状体を水平方向に回転させるモーメントと慣性モーメントの比$(A-B)uv/R$は，直径が大きいほど大きい。いっぽう，軸に直角な方向に作用する抗力にもとづく回転を押える向きに働く回転モーメントと慣性モーメントの比N/Rは，直径が大きいほど小さい。したがって，同一落下時間における角速度は，直径が大きいほど大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。角速度の値は空気中の方がはるかに大きいけれども，この結果は水中での結果と一致する。

また，同一落下時間におけるu，vの値は，直径が大きいほど大きいが，大きくなる割

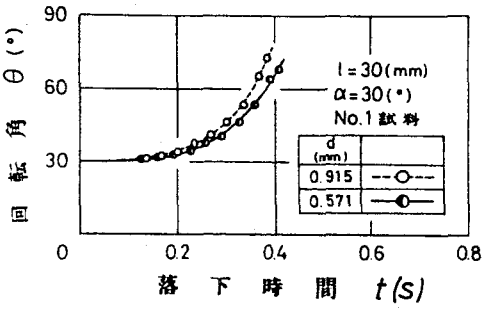


図2.110 姿勢におよぼす直径の影響

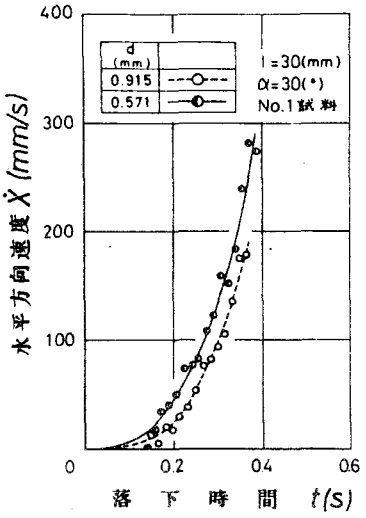


図2.111 水平方向速度におよぼす直径の影響

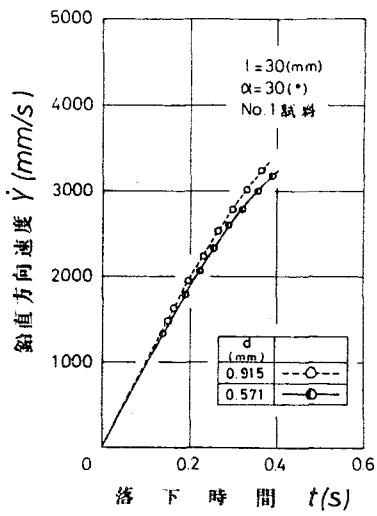


図2.112 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

合はαの方が大きいため，$\dot{X}$は直径が小さいほど大きく，$\dot{Y}$は直径が大きいほど大きくなることが分かる。しかし，図2.112を見れば分かるように$\dot{Y}$の差はわずかである。

水中での場合，姿勢の変化に対する重心速度の変化および姿勢の変化を表わす図2.89～2.91から，$\dot{X}$，$\dot{Y}$が減少し始めてしばらくすると直径が小さいほど同一落下時間における$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値が大きくなる領域が存在するが，これまでの領域では直径が大きいほど$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は大きい。したがって，$\dot{Y}$に関しては空気中での結果と水中での結果は一致するが，$\dot{X}$に関しては逆になる。これは，空気中での場合，その比重量が小さいため線状体に作用する抗力が小さいことが原因で，軸に直角な方向にも軸方向と同程度加速されるからである。

以上述べた実験により得られた落下開始後の急激な加速領域における姿勢の変化および重心速度の変化におよぼす直径の影響は，計算結果と一致する。また，実験では，線状体が底面に到達するときのθの値は約73°であり，角速度および重心速度は加速されている。計算では，$d=0.915$(mm)，$\ell=30$(mm)，

$\alpha=10°$の場合でも，$\dot{Y}$および$\dot{Y}$は，$\theta=77°$程度まで加速されており，しかも，αが大きいほどより水平に近い姿勢になるまで加速されること，および$\dot{X}$は水平な姿勢になる直前まで加速されることから，本実験程度の高さのもとでは，加速状態のまま線状体が底面に到達することが分かる。

2.15.3 線状体長さの影響

姿勢の変化および重心速度の変化におよぼす長さの影響を図2.113～2.115に示す。

軸に直角な方向の速度uおよび軸方向の速度vにもとづく線状体を水平方向に回転させるモーメントと慣性モーメントの比$(A-B)uv/R$は，長さが大きいほど小さい。いっぽう，軸に直角な方向に作用する抗力にもとづく回転を押える向きに働く回転モーメントと慣性モーメントの比N/Rは，長さが大きいほど大きい。したがって，同一落下時間における角速度は長さが大きいほど小さく，線状体が回転するのに要する時間は長い。この結果は水中での結果と一致する。

また，落下開始直後の領域では，線状体に作用する抗力は小さく，ほとんど重力と浮力の差にもとづく外力により運動をおこない，長さが大きい方が姿勢がより鉛直に近いので，同一落下時間におけるuの値は小さく，vの値は大きい。しかし，θの値は長さが小さい方が大きいので，同一落下時間における$\dot{X}$の値は長さが小さい方が大きく，$\dot{Y}$の値は小さくなることが分かる。しかし，図2.115を見れば分かるように$\dot{Y}$の差はわずかである。

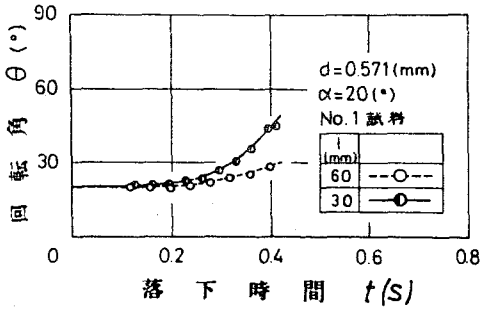


図2.113 姿勢におよぼす長さの影響

水中での場合，姿勢の変化に対する重心速度の変化を表

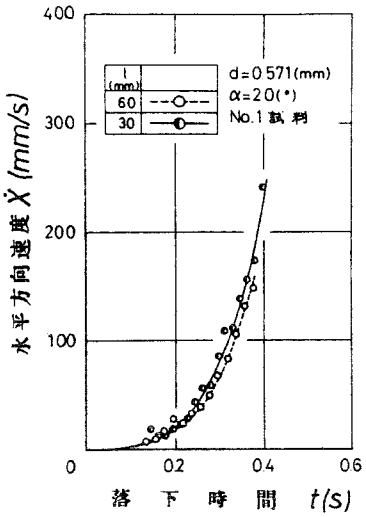


図2.114 水平方向速度におよぼす長さの影響

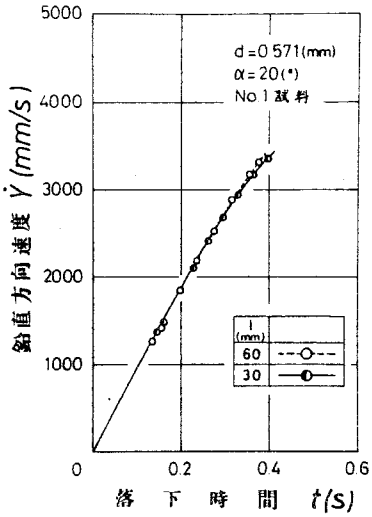


図2.115 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

わす図2.77, 2.78および姿勢の変化を表わす図2.81から，$\dot{X}$に関しては落下開始後しばらくの間，同一落下時間における値は，長さが小さいほど大きく，逆に$\dot{Y}$はつねに長さが大きいほど大きいことが分かり，空気中での結果と一致する。

また，計算結果および水中での実験結果によると，落下開始後しばらくの間，$\dot{X}$は長さが小さい方が大きいが，やがて逆の状態になり，$\dot{X}$の最大値は長さが大きい方が大きくなる。ところが，空気中での実験では，$\ell=30(mm)$の場合でも，線状体が底面に到達するときの姿勢は$\theta=45°$程度であり，$\dot{X}$は水平な姿勢になる直前まで加速されるので，まだ加速状態にあり，この長さの影響を確かめることはできない。しかし，長さが大きい方が姿勢の変化が小さく，長い時間にわたって水平方向に加速されることから，$\dot{X}$の最大値は長さが大きい方が大きくなると考えられる。

2.16 結 言

本章では，直線の線状体が単一で静止流体中を自由落下する場合について理論解析をおこなった。そして，水中および空気中での場合に対して数値計算と実験をおこない，その比較からこの現象の根底となる事項を把握した。また，同時に水中での場合，線状体の比重量，長さ，直径，初期角度および水温などの要因が落下特性におよぼす影響を調べた。さらに，水中での結果と空気中での結果を比較して，主に流体の比重量の違いにより落下特性がどのように変化するかを調べた。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 水中での場合，線状体は，ほとんど鉛直方向に運動し始めるが，姿勢が除々に水平方向に回転するにつれて，水平方向にも運動し始める。そして，重心の軌跡は，$\theta = 60° \sim 65°$で変曲点をもつ曲線になり，最終的に，姿勢は水平方向に漸近し，しかも，線状体は水平方向にはほとんど移動しなくなり，鉛直方向に一定速度で落下する。

(2) 線状体は，$\theta = 40° \sim 50°$まで水平方向に加速され，その後減速される。いっぽう，落下開始直後急激に鉛直方向に加速されるが，その後θの増加に伴ない単調に減速され，水平な姿勢に近づくにつれて$\dot{X}$は0に近づき，$\dot{Y}$は一定となる。

(3) 角速度は，$\theta = 10° \sim 20°$まで加速されるが，その後減速され，最終的に，線状体の姿勢は水平方向に漸近する。

(4) 線状体の比重量，長さ，直径および流体の温度は，軌跡の形に影響を与える。また，軌跡をX軸，Y軸に沿って同じ姿勢になる位置まで平行移動すると，落下開始直後の急激な加

速領域を除き初期角度にかかわらず落下軌跡は一致する。したがって，姿勢が同じであれば初期角度に関係なくその運動状態は同一になる。

(5) 重心の速度におよぼす長さの影響は，$\theta < 65°$程度の領域で現われ，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに長さが大きいほど大きい。また，比重量，直径および流体の温度の影響は，θの全領域で現われ，これらの値が大きいほど$\dot{X}$，$\dot{Y}$は大きくなる。

(6) 長さが小さいほど，また，比重量，直径および流体の温度が大きいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。

(7) 最終落下位置での線状体の配向におよぼす長さの影響はほとんど見られず，初期角度が大きいほど配向度は良い。また，直線の線状体は静止流体中では一平面内で運動すると考えてよい。

(8) 計算で得られた落下特性の傾向および諸要因の影響は，実験結果とかなり一致した。

(9) 線状体が空気中で運動する場合，姿勢が水平方向を中心にして減衰振動するので，水平方向の運動の向きが変わり，$\dot{X}$は0を中心にして減衰振動する。いっぽう，$\dot{Y}$も変動しながら一定値に漸近する。したがって，重心の軌跡が減衰振動する現象が生ずる。

また，初期角度は，姿勢および重心の速度の変動周期には影響をおよぼさず，振幅に影響を与え，長さおよび直径は，周期と振幅の両方に影響をおよぼす。

(10) 重心の軌跡，速度および姿勢が変動する現象を観察することはできなかったが，実験から得られた落下開始後の急激な加速領域における運動状態と計算結果を比較検討することにより，落下特性が変動する可能性があることを推察することができた。なお，空気中での場合，その比重量が小さいため，線状体に作用する抗力が小さいことが原因となってこの現象が生じたと考えられる。

第3章　静止流体中における線状体群の運動

3.1　緒　言

流体中での繊維の運動は，繊維工業の各種工程で重要な基本現象の1つである。実際の繊維の多くは曲がった形態をもち，断面形状は円形とは限らず，長さと太さの比は数百以上と非常に大きく，また，長さ，太さ，形態などにかなりの差異があり，さらに，繊維を取扱う各種工程での運動も単一ではなく集団として相互に干渉し合いながら運動する。このため，その運動は複雑であり，繊維の基本的挙動はほとんど解明されていない。

いっぽう，この現象に関する基礎的研究としては，静止空気中での単繊維の落下時間および落下速度に関する宇野[1),2)]の研究，オープンエンド精紡機の繊維供給管内を飛動している繊維束の大きさおよび繊維の流動形状を調べた福田[9)]の研究，さらに，タンクと矩形管路からなる装置を用いてタンク内および管路内での繊維群の配向を調べた美馬[11)]の研究などがあるが，それらはいづれも繊維が姿勢，速度などを変化させながら運動した結果として落下速度，流動形状あるいは配向がどうなったかを論じたものであり，繊維の運動そのものに着目した研究ではない。

第2章では，この複雑な運動を解析する前に，もっとも簡単なモデルとして直線の線状体が単一で静止流体中を自由落下する場合を考え，これについて理論解析と実験をおこない，線状体の落下特性および諸要因の影響を明らかにした。

本章では，第2章のモデルより実際の現象に近いモデルとして直線の線状体が複数あるいは集団で静止流体中を自由落下する場合を考え，線状体が相互に干渉し合いながら運動するときの落下特性および諸要因の影響を実験により調べ，単一で運動する場合と比較して，線状体同志の相互干渉が姿勢の変化お

よび運動状態にどのような影響をおよぼすかなど，この現象の基本的事項を明らかにする。なお，線状体の運動の観察は水中の方が容易であることから，実験は水中でおこなうことにした。

3.2 静止流体中における線状体回りの流れ

線状体が複数あるいは集団で静止流体中を自由落下する場合，前方の線状体の運動に伴なって発生する流れの影響を受けて，後方の線状体は単一の場合とは異なった運動をおこなう。すなわち，複数あるいは集団で運動する場合，線状体同志が相互に干渉し合いながら運動することが特徴である。そこで，線状体の落下実験をおこなう前に，線状体が単一で運動するときの線状体回りの流れ模様を調べる必要がある。

3.2.1 実験装置および方法

線状体回りの流れを調べるために，流れの可視化をおこなった。白色水彩絵具をPVAで溶かし線状体の表面に薄く塗布し乾燥させた後，線状体を水中で落下させると，絵具が除々に溶解して線状体を離れ，線状体回りの流れを鮮やかに可視化することができる。そして，その状態を撮影することにより線状体回りの流れを調べた。

実験装置の概要を図3.1に示す。撮影は水槽⑦の正面および側面の直角2方向からNO.1カメラ⑤，NO.2カメラ⑥によりおこなった。水槽は第2章の線状体の落下実験に用いたものと

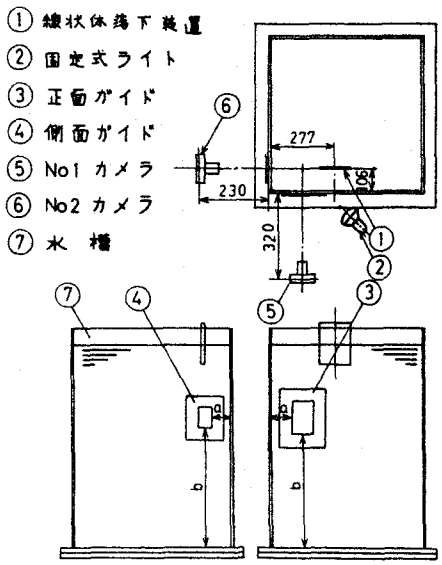


図3.1 実験装置概要

同じで，撮影をおこなう2面は透明アクリル板で製作してあり，背景となる2面にはつや消し黒色塗装がしてある。また，撮影位置を明示するため，透明アクリル板上にガイド③，④を取付け，このガイドに合わせてカメラを移動させた。なお，カメラには水槽まで達するカバーを取付けて照明の光が直接カメラに入らないようにした。

本実験に用いた線状体落下装置は，単数の線状体の落下実験に用いた装置を少し改良したもので，線状体全体を設定面⑤上に接触させる型式ではなく，設定面上に先端のとがった突起物を2個取付け，この突起物とピンセット②で線状体を軽く保持する型式にした。これは，線状体全体を設定面に接触させると線状体に塗布したPVAが水中で溶解して，線状体が設定面から離れにくくなるからである。なお，初期角度αの設定は円グラフ③によりおこない，白色水彩絵具が溶け始めてからピンセットを押上げて線状体を落下させた。（図2.68参照）

つぎに，試料条件および実験条件について説明する。その軸が流れに対して直角に置かれている円柱回りの流れは，直径dを代表長さ，流速Uを代表速度とするレイノルズ数$Re=Ud/\nu$に応じて変化する。その変化の様子[19]を図3.2に示す。(1)はReが非常に小さい場合を表わす。このとき流線の形は流れ方向に対して対称であるばかりでなく，前後方向にも対称である。Re

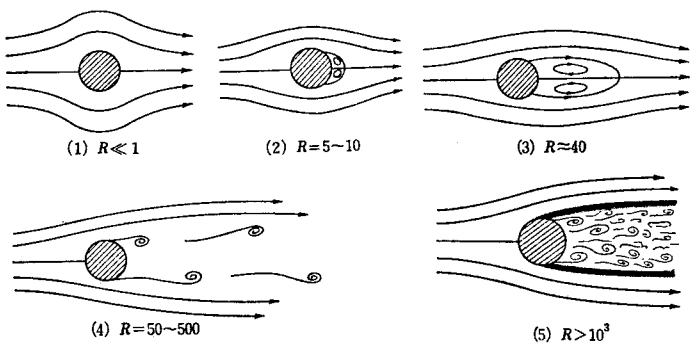


図3.2　円柱回りの流れ状態の変化

を上げていくと，この前後の対称性がしだいに破れ，Reが5程度になると，円柱の下流側に閉じた流線の領域，いわば“渦の目玉”ができる。この状態が(2)である。Reを増加すると，渦の目玉の領域はしだいに長さを増し，$Re \approx 40$で長さは円柱の半径の数倍程度になる。Reが40程度を越えると，渦の目玉は上下方向に振動し始め，上下対称性が破れる。さらに，成長した目玉は主流に乗って流されていく。このように円柱の背後の上側と下側から交互に生み出された渦の目玉は，規則正しく並んで2列の渦列（カルマンの渦列）を構成する。カルマンの渦列は(4)に示すように，$Re = 50 \sim 500$程度の流れで見られる。さらに，Reが10^3程度になると円柱背後の領域では乱流状態が現われる。

したがって，線状体の場合にも静止流体中で運動するときその回りの流れ状態は，直径を代表長さ，軸に直角な方向の重心速度uを代表速度とする$Re_n = u \cdot d/\nu$に応じて大きく変化すると考えられる。そこで，第2章の単数の線状体の落下実験結果を基にして，Re_nが50を越える場合と越えない場合，すなわちカルマン渦が発生する場合と発生しない場合の試料条件を予測し，前者を代表する試料として$d = 0.915$(mm)のNO.1試料（鉛筆の芯），後者を代表する試料として$d = 0.571$(mm)のNO.1試料を選んだ。また，両者の中間程度のRe_nを有する試料として$d = 0.310$(mm)のNO.2試料（ピアノ線）を用いることにした。なお，長さはすべて$\ell = 30, 60$(mm)とした。

また，単数の線状体の落下実験から，重心の速度の水平方向および鉛直方向成分$\dot{X}$，$\dot{Y}$は，落下直後の急激な加速領域を除き，初期角度αには無関係に線状体の姿勢θによって決まることおよび線状体の移動距離と姿勢はαに依存することが分かっている（2.5節，2.12節参照）ので，初期角度と撮影位置を適当に組合わせて，$\theta \leqq 90°$の範囲で7種類程度の姿勢にお

ける線状体回りの流れを撮影した。以上のようにして，運動に伴なって変化する線状体回りの流れを3次元的に調べることができた。

3.2.2 線状体回りの流れ特性

2.7節および2.14節から，水温が変わると比重量，動粘性係数が変化するため，線状体の運動に影響をおよぼすことが分かっている。

線状体回りの流れ状態を撮影した際の水温は16(℃)であり，流れを評価する際の代表値としてレイノルズ数

$$Re_n = |u|\cdot d/\nu \quad , \quad Re_t = |v|\cdot \ell/\nu \qquad (3.1)$$

を用いるが，そのためには線状体重心の軸に直角な方向の速度u，軸方向速度vを知る必要がある。u，vは流れの可視化の実験から求めることはできないが，回転角θは求められる。θが既知であれば，線状体の落下実験からθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係が分かり，次式よりu，vが求められる。

$$\left.\begin{aligned} u &= \dot{X}\cos\theta - \dot{Y}\sin\theta \\ v &= -\dot{X}\sin\theta - \dot{Y}\cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (3.2)$$

ただし，u，v，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに図3.3の向きを正とする。

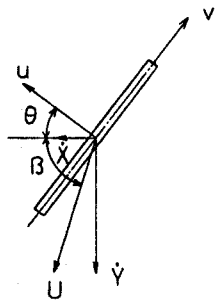


図3.3 重心の速度

ところが，線状体の落下実験の際の水温は$T_W = 12.4$，29.9(℃)であり，重心の速度は水温の影響を受けるため，これらの結果を直接使用することはできない。そこで2.7節の数値計算結果と2つの実験結果から流れの可視化の実験における重心の速度を推定する。数値計算結果と実験結

果は完全に一致しないので推定はつぎのようにしておこなった。数値計算は，$T_W=10,15,20,30$ (℃) についておこなっているので，落下実験時の水温 $T_W=12.4, 29.9$ (℃) および可視化実験時の水温 $T_W=16$ (℃) に対する数値計算値を比例配分により求め，それぞれ $\dot{X}_{N1}$，$\dot{X}_{N2}$，$\dot{X}_N$ とする。いっぽう，落下実験から得られた $T_W=12.4, 29.9$ (℃) に対する水平方向速度を $\dot{X}_{E1}$，$\dot{X}_{E2}$ とし，$T_W=16$ (℃) に対する推定値 $\dot{X}_p$ は

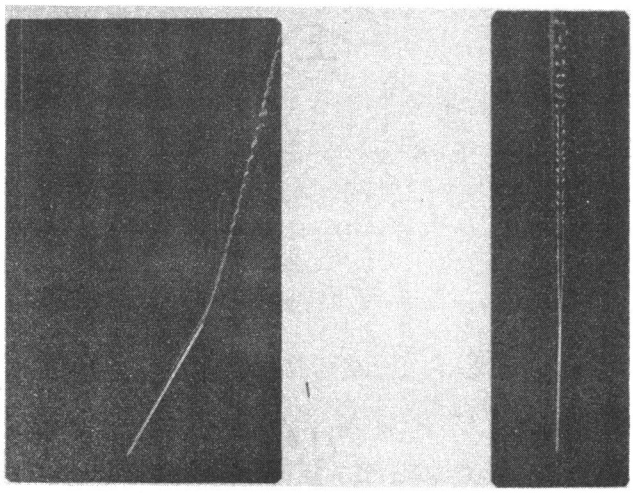
$$\dot{X}_p=(\dot{X}_{E2}-\dot{X}_{E1})(\dot{X}_N-\dot{X}_{N1})/(\dot{X}_{N2}-\dot{X}_{N1})+\dot{X}_{E1} \tag{3.3}$$

から求めた。

なお，$\dot{Y}_p$ も同様の方法で求めた。また，$\dot{X}_p$ および $\dot{Y}_p$ から重心の運動方向 β (図3.3参照) を計算した。

以下では，線状体回りの流れ特性および姿勢，直径，比重量が流れ特性におよぼす影響について述べる。

図3.4に撮影された線状体回りの流れ状態の1例を示す。これは，$d=0.915$ (mm)，$\ell=60$ (mm) のNO.1試料の場合であり，$\theta=30°$，$\beta=71.7°$，$Re_n=41.8$，$Re_t=1.35\times10^4$ である。また，



(1)　　(2)

図3.4　線状体回りの流れ状態

(1)が正面から撮影された写真（No.1カメラ），(2)が側面から撮影された写真（No.2カメラ）である。線状体は軸方向とある角度をなして運動するために，線状体の近傍には軸対称な境界層が発生するのではなく，線状体が軸方向に運動する場合に発生する軸対称な境界層と軸に直角な方向に運動する際，背後に生ずる伴流が重なり合った状態の流れが発生している。すでに述べたように，伴流の状態はRenの大きさによっては線状体の後方にカルマン渦が発生する場合もある。また，線状体の両端面は軸に直角であるから，とがった後縁が存在し，翼両端から発生するような一対の自由渦が後端部の両側から後方に流れることが分かる。この自由渦は後端のとがった円周部から多数生ずるが，これらの渦は不安定なため，さらに後方ではしだいに巻込まれて一対の自由渦になる。この現象は，図3.4(2)において，線状体の後方に遠ざかるに従い渦が大きくなり，その状態がより明確になることからも分かる。また，この渦の向きは，線状体回りの流れの模式図，図3.5に示すように，渦列の外側から内側しかも上方から下方である。さらに，この自由渦の幅bは，線状体の後端部の直後でいったん減少し，その後除々に広がって後方ではほぼ一定になる。なお，自由渦が左右対称になっていることから，線状体はその軸の回りで回転しないことが分かる。

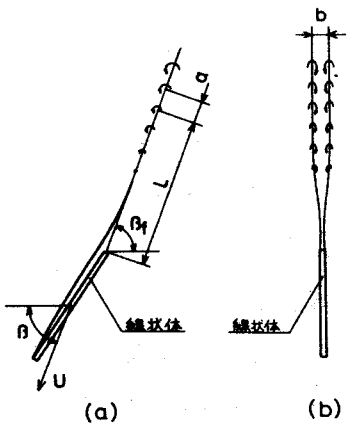


図3.5 線状体回りの流れの模式図

ここで，線状体の後方に流れる自由渦の方向，図3.5のβ_f，を写真から測定した結果を図3.6に示す。この図は，線状体重心の運動方向βと自由渦の方向β_fを比較したもので，両者は良く一致することが分かる。また，自由渦に引きづられるように，後

端部付近の境界層厚さが少し大きくなるという現象も現われている。

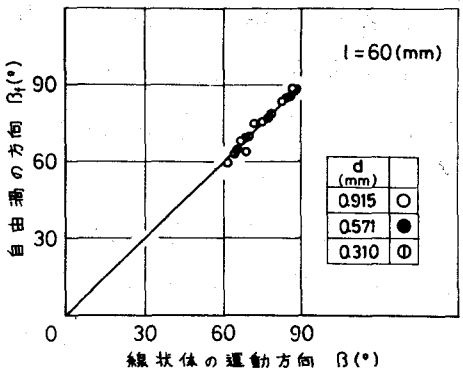


図3.6 自由渦の方向

3.2.3 姿勢の変化に対する流れ状態の変化

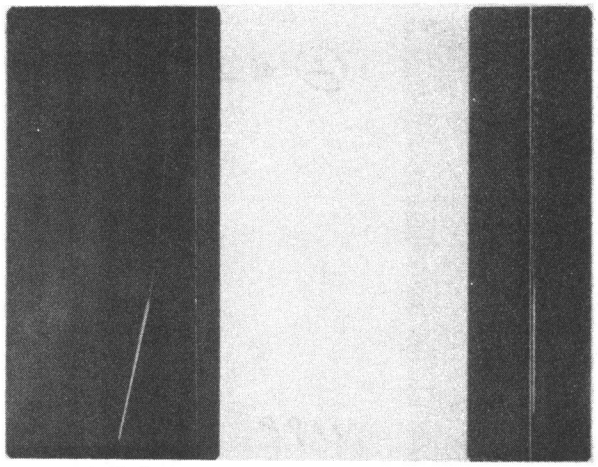
線状体の運動に伴なって，姿勢および重心の速度が変化するため，線状体回りの流れ状態も変わる。ここでは，もっとも顕著に流れ状態の変化が現われた $d=0.915$ (mm)，$l=60$ (mm) の No.1 試料の場合を例にとって，姿勢が変化することによって流れ状態がどのように変わるかを調べる。

図3.7 (a)~(h) に各姿勢における流れ状態を示す。また，そのときの運動状態，すなわち姿勢 θ，速度 u，v，レイノルズ数 Re_n，Re_t，運動方向 β を表3.1に示す。

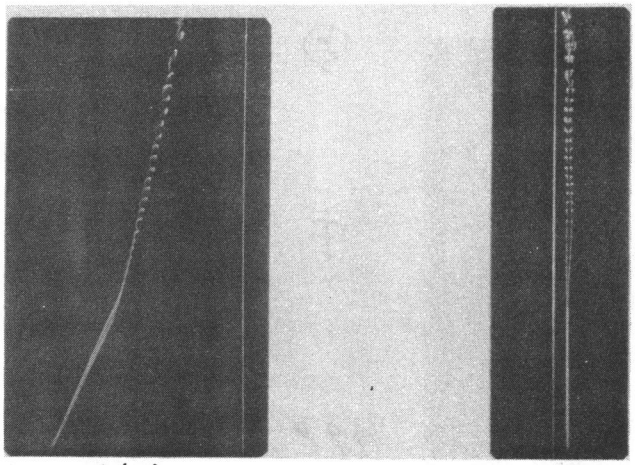
(a) のように θ が小さい場合，Re_n は小さく，線状体の背後に生ずる渦の目玉（双子渦）の領域の長さは小さい，しかも Re_t が大きいため軸方向の境界層厚さは薄く，したがって，この両者が重なり合った線状体の背後の流れの領域は非常に小さなものとなる。また，後端部から後方に

表3.1 線状体の運動状態

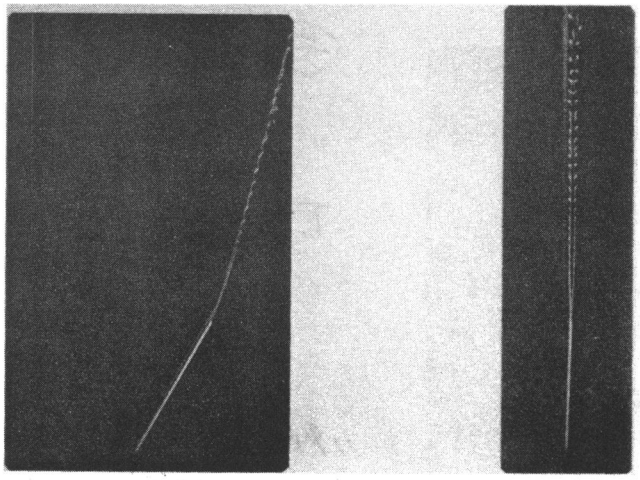
d (mm)	No. 図番号	θ (°)	u (mm/s)	v (mm/s)	Ren	Ret	β (°)
0.915	a	12.9	32.1	334.8	27.0	1.87×10^4	82.6
	b	24.5	43.1	262.3	36.5	1.48	74.8
	c	30.0	49.6	240.1	41.8	1.35	71.7
	d	36.6	56.2	214.0	47.6	1.21	68.1
	e	39.8	58.9	201.5	49.6	1.13	66.5
	f	68.7	75.7	89.7	63.6	0.50	61.5
	g	78.5	79.5	51.1	66.8	0.29	68.8
	h	88.6	80.4	6.8	67.8	0.04	86.6
0.571	a	9.2	21.4	244.8	11.2	1.33	85.8
	b	24.2	35.2	175.8	18.0	0.93	77.1
	c	40.4	45.5	132.0	23.1	0.70	68.6
	d	88.7	63.3	3.5	32.3	0.02	88.1
0.310	a	55.3	126.6	226.5	34.7	1.12	63.9
	b	88.8	146.4	8.6	39.8	0.04	87.8



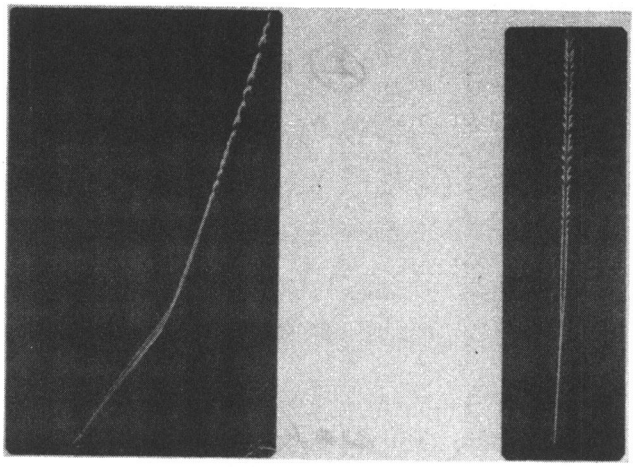
(a1) (a2)



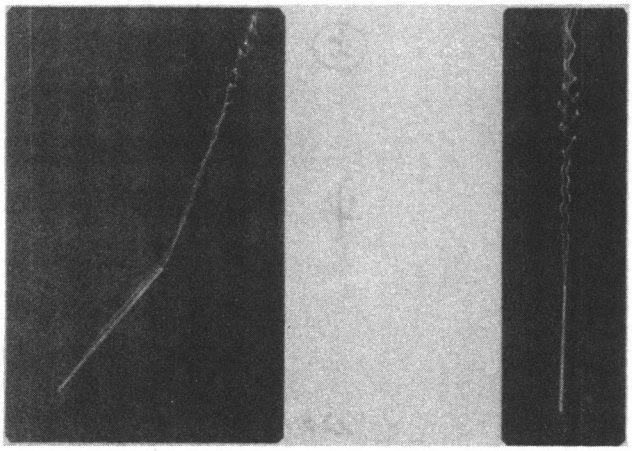
(b1) (b2)



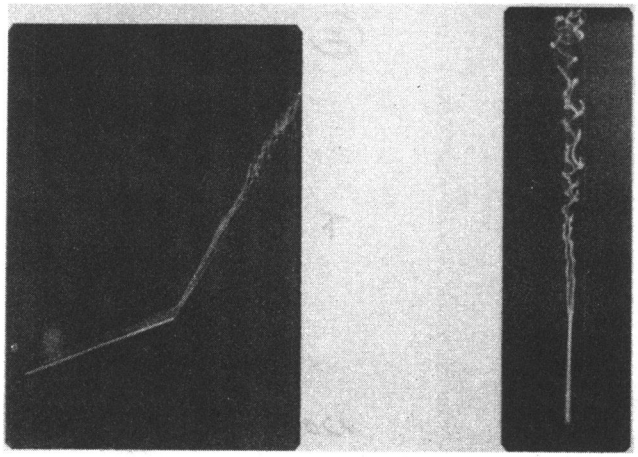
(C1) (C2)



(d1) (d2)



(e1) (e2)



(f1) (f2)

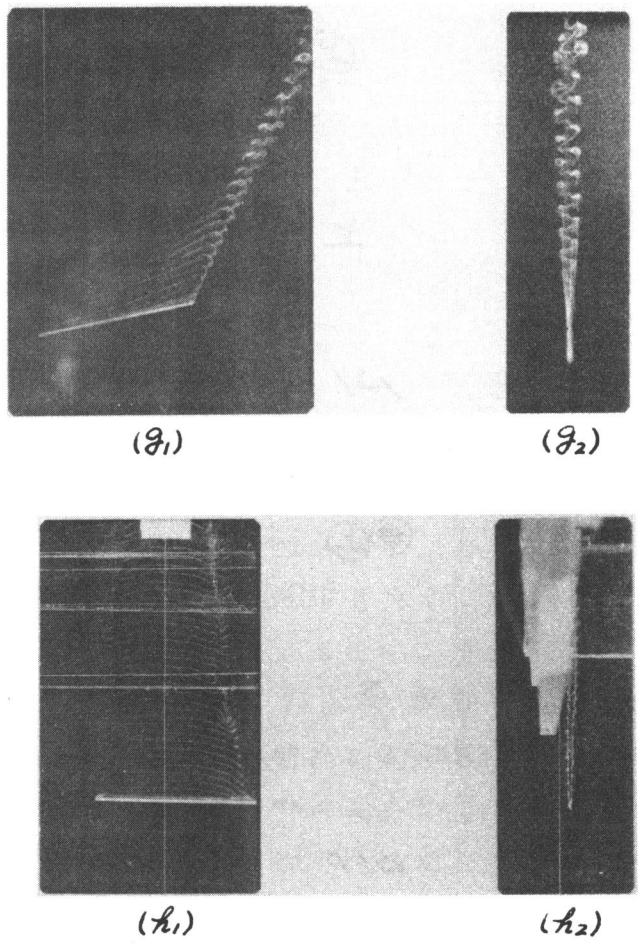


図 3.7　線状体回りの流れ状態の変化

流れる自由渦の大きさも小さい。ところが，(b)～(d)のようにしだいにθが増加すると，Renは増しRetは減少するため，双子渦の領域は大きくなり，軸方向の境界層厚さも増すので，線状体背後の流れの領域は除々に大きくなる。また，自由渦の大きさおよび渦の幅bは，θが増すにつれて大きくなる傾向にあり，(b)の場合，約2.6 (mm)，(d)の場合，約4.4 (mm)となる。さらに，θが増加し，Renが50程度になると(e)のように，(a)～(d)では見られなかった流れが発生する。すなわち，線状体の背後にはカルマン渦が構成され，この渦列は，線状体がまだかな

りの速度で軸方向にも運動しているため軸方向に流され，やがて線状体の後端部から後方に流される自由渦と重なり合って後方に流される。このため，今まで見られたような左右対称に並んだ自由渦は見られなくなり，左右に交互に並んだカルマン渦の目玉を右，左，右，左というふうに渡っていく。また，(f)，(g)のように姿勢がさらに水平方向に近づくと，線状体の軸方向速度は低下し，軸に直角な方向の速度は増大するため，カルマン渦は線状体の軸に直角な方向にも流されるようになり，線状体の背後の領域にはカルマン渦の中心が階段状の縞模様になって現われる。なお，(e)～(g)を比較すれば分かるように，姿勢が水平方向に近づくにつれて，Re_nが増大するためカルマン渦は線状体により近い領域でしかも明確に現われる。最後に，線状体の姿勢がほとんど水平になると，(h)に見られるようにカルマン渦の中心はほぼ等間隔の縞模様を形成し，渦列の幅もほぼ一定となる。また，線状体は有限長であるので端面の影響が現われ，両端部付近には線状体の中央部に回り込む流れが発生し，この流れにカルマン渦が引き込まれている状態が見られる。

つぎに，図3.5(a)に示すように，線状体の後端部から後方に流れる自由渦あるいはカルマン渦の方向に沿って測った距離を

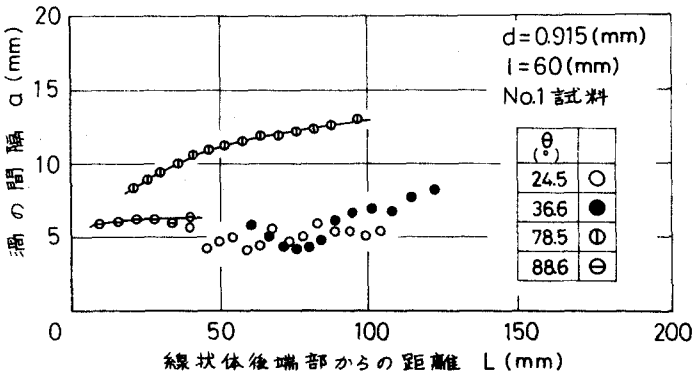


図3.8　渦の間隔の変化

をL，渦の間隔をa，さらに(b)に示すように，自由渦の場合には向い合う渦の中心間距離，カルマン渦の場合には交互に並んだ2列の渦の中心間距離を渦の幅bとし，渦の間隔および幅が線状体の姿勢あるいはLによってどのように変化するかを調べる。図3.8にθをパラメータとしたLと渦の間隔aの関係および図3.9にLと渦の幅bの関係を示す。線状体が軸方向にも運動している場合（θ≦78.5°の場合），自由渦，カルマン渦にかかわらずLが増加するにつれて，渦の間隔は増す傾向にあることが分かる。ところが，姿勢がほとんど水平になり，線状体がほとんど軸方向に運動しなくなると，渦の間隔はほぼ一定となる。また，カルマン渦の方が間隔は広くなることが分かる。いっぽう，渦の幅は，自由渦の場合すでに述べたように，Lが大きくなるとほぼ一定となり，θ=24.5°の場合，約2.6(mm)，θ=36.6°の場合，約4.4(mm)となり，θが増加するにつれて大きくなる傾向にある。また，カルマン渦の場合，図3.9から，渦の幅はLの増加に伴ない増大することが分かる。この傾向はθ=78.5°の場合に顕著に現われ，L=20～100(mm)の範囲でbは5(mm)程度から11(mm)程度までほぼ直線的に増大し，θ=88.6°の場合，線状体に近い領域ではbはわずかに増大する傾向が見られるが，線状体から遠ざかるにつれてbはほぼ一定となる。

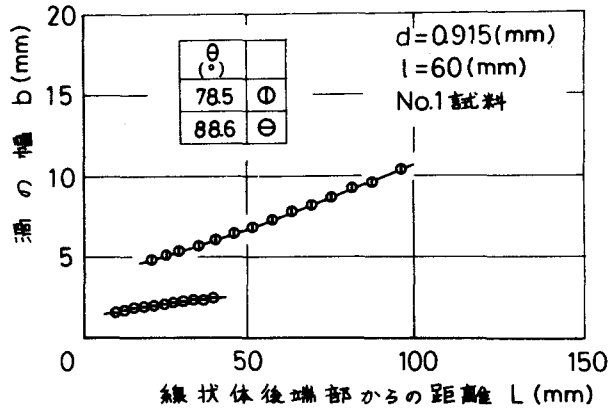


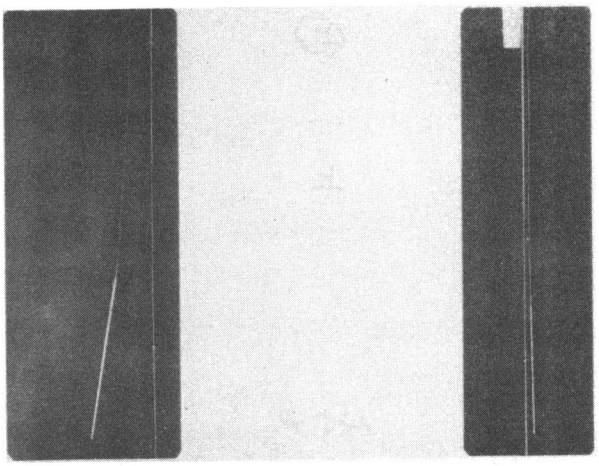
図3.9 渦の幅の変化

以上のように，姿勢の変化に伴なって運動状態が変わるため，線状体回りの流れ状態も変化し，Renが50程度を越えると

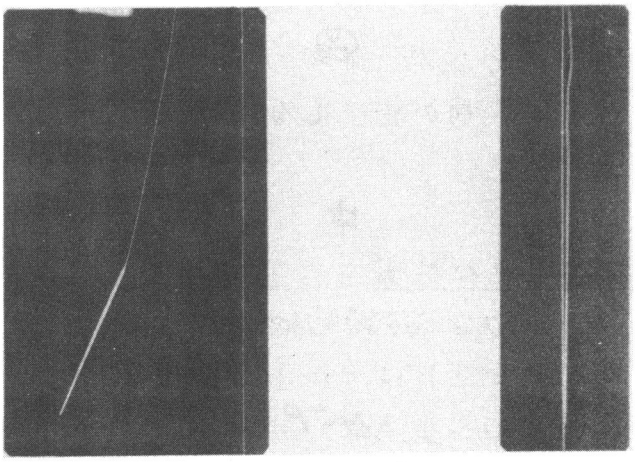
カルマン渦が発生し流れ状態が大きく変わることが分かった。また，このRenの値は円柱を流れに直角に置いた場合にカルマン渦が発生するレイノルズ数と一致することが確認できた。さらに，後端部から後方に流れる自由渦の幅は高々5(mm)程度であり，カルマン渦の幅は姿勢によっては10(mm)程度になることも分かった。

3.2.4 線状体直径の影響

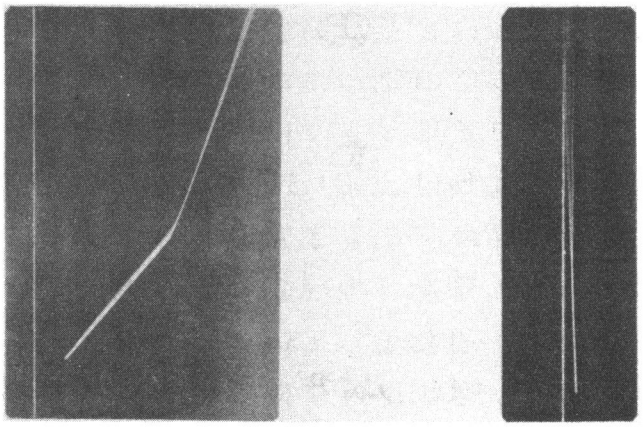
$d=0.571$ (mm)のNO.1試料の各姿勢における線状体回りの流れ状態を図3.10(a)~(d)に示す。また，そのときの運動状態は表3.1に示してある。(a)~(d)のどの姿勢においても$d=0.915$(mm)の場合見られたカルマン渦の発生は見られない。これは，第2章で述べたように，重心の速度成分$\dot{X}$，$\dot{Y}$はθの全領域で直径が小さいほど小さくなり(2.4節，2.11節参照)，したがってRenが小さく，表3.1において姿勢がほとんど水平の場合でも約32であることから，カルマン渦が発生するRenの範囲まで到達していないためである。また，$d=0.571$(mm)の場合，軸方向に沿って発達する境界層と線状体の背後に生ずる伴流とが重なり合った流れの領域も$d=0.915$(mm)の場合に比べて小さく，線状体の後端部から発生する自由渦には，$d=0.915$(mm)の場合見られたような明確な渦の目玉は見られない。ただし，(a)~(c)において，θが小さい場合((a)の場合)，自由渦は後端部から発生するものが1列見られるだけであるが，θが増すにつれて((b),(c)の場合)2列，3列と増加することが分かる。(c)の場合，自由渦は3列見られるが，2列が後端部から生じそれらの間に先端部から生じた1列が位置している。また，その姿勢がほぼ水平である(d)の場合，そのRenから考えて線状体の背後には双子渦が発生しており，(d_2)から線状体の後方には渦が流されていく状態は見られない。したがって，双子渦は線状体とともに運動していることが分かる。



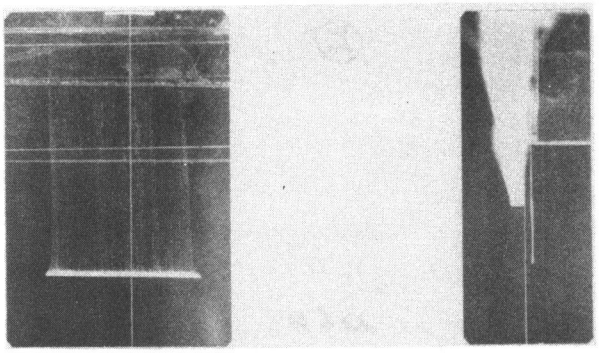
(a_1) (a_2)



(b_1) (b_2)



(C_1) (C_2)



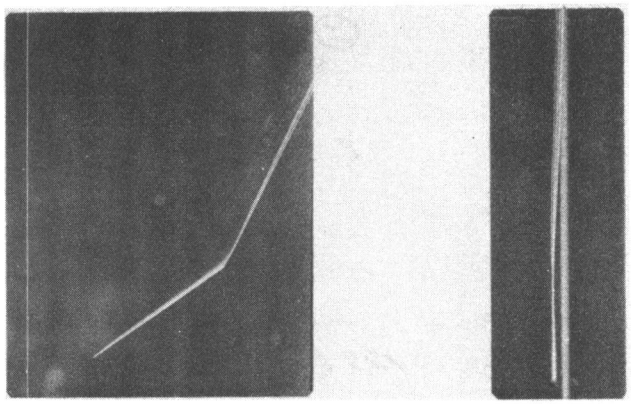
(d_1)　　(d_2)

図3.10　線状体回りの流れ状態の変化

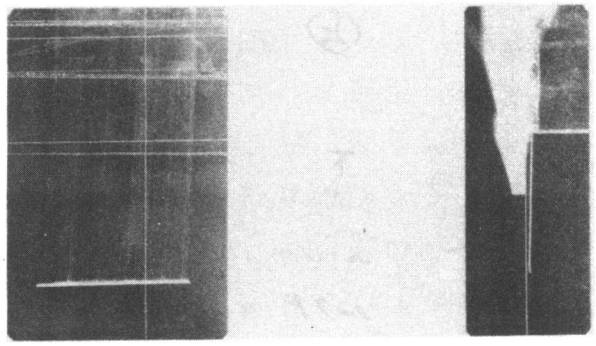
以上，$d=0.571$ (mm) の場合と $d=0.915$ (mm) の場合の比較から，$d=0.571$ (mm) の場合，姿勢の変化に対する流れ状態の変化は少なく，カルマン渦が発生しないため流れ状態は単純である。

3.2.5 線状体比重量の影響

$d=0.310$ (mm) のNO.2試料の結果を図3.11(a),(b)に示す。この場合，表3.1を見れば分かるように，$d=0.571$ (mm) のNO.1試料の場合と比べて Re_t は非常に大きいが，Re_n は少し大きい程度であり，しかも Re_n はカルマン渦が発生する範囲まで達していないので，線状体回りの流れ状態は $d=0.571$ (mm) のNO.1試料の場合とほとんど同じである。すなわち，線状体の後端部から発生する自由渦には明確な渦の目玉は見られない。しかし，自由渦は波打つように細かく変動していることが分かる。この細かい変動は $d=0.571$ (mm) のNO.1試料の場合にはほとんど見られなかった。また，θ が増すにつれて自由渦が1列，2列，3列と増加する現象がこの場合にも見られる。(a)の場合，自由渦が3列発生している。さらに，(b)からその姿勢がほぼ水平の場合，線状体の背後に発生した双子渦は線状体から離れず，線状体とともに運動することが分かる。また，



(a_1)　　(a_2)



(b_1)　　(b_2)

図3.11　線状体回りの流れ状態の変化

この場合にも端面の影響が現われ，両端部付近で線状体背後の流れはわづかに縮小される。

なお，線状体長さが重心の速度におよぼす影響はθの値の小さい領域で現われる（2.3節，2.10節参照）が，直径あるいは比重量の影響に比べて小さく，$\ell = 30$ (mm) の線状体回りの流れ状態は，$\ell = 60$ (mm) の場合とほとんど同じであることが分かった。

3.3 静止流体中における線状体群の落下実験

静止流体中を線状体が単一で運動するとき，線状体の背後に

は，軸方向に沿って発達する境界層と伴流とが重なり合った流れの領域が発生し，さらに線状体の後端部から自由渦が生ずる。また，Re_nが50程度を越えると伴流は双子渦からカルマン渦へと変化し，流れの状態が大きく変わる。したがって，線状体が複数あるいは集団で運動する場合，主に前方の線状体の運動に伴なって発生する自由渦およびカルマン渦の影響を受けて，後方の線状体は単一の場合とは異なった運動をおこなうと考えられる。

そこで，実験は複数（2本，3本）の線状体を同時落下させる場合と100本程度の線状体を集団で連続的に落下させる場合についておこない，落下特性として，複数の線状体の実験では重心の軌跡，速度および姿勢，集団で落下する場合には姿勢の分布および最終落下位置での線状体の配向と落下点分布を考え，初期位置での線状体の位置関係，初期角度，直径および線状体の本数が落下特性におよぼす影響を調べた。

3.3.1 実験装置および方法

線状体回りの流れ状態を調べた結果，$d=0.915$ (mm)のNo.1試料の場合，カルマン渦が発生し，$d=0.571$ (mm)のNo.1試料および$d=0.310$ (mm)のNo.2試料の場合，カルマン渦の発生は見られなかった。そこで，本実験では，後方の線状体がカルマン渦の影響を受ける場合と受けない場合に大別して，前者を代表する試料として$d=0.915$ (mm)のNo.1試料，後者の代表として$d=0.571$ (mm)のNo.1試料を選び，この2種類の試料を用いた。なお，長さは$\ell=60$ (mm)とした。これらの試料条件を表3.2に示す。

表3.2 試料条件

試料番号	試料名	線状体直径 d(mm)	線状体長さ l(mm)	線状体比重量 γ_b(g/cm³)
1	鉛筆芯	0.571	60	1.702
		0.915		1.539

試料は長さのばらつきを小さくする目的とその端面を軸に直角にする目的で端

面を研摩布で仕上げた。また，長さ，直径，比重量はランダムに抽出した10本の試料に対して測定をし，その平均値をもってそれらの値とした。

(i)実験条件

複数の線状体を同時落下させる場合の初期角度αおよび初期位置での2本あるいは3本の線状体の相対位置について説明する。

単数の線状体の落下実験結果から，線状体重心の水平方向速度$\dot{X}$はθが40°から50°の範囲内まで加速されることが分かっているので，前方の線状体の運動に伴なって発生する流れの影響を受けて，後方の線状体の姿勢が水平方向に回転するとき$\dot{X}$が加速される場合と減速される場合を考え，$\alpha=20°, 60°$とし，さらにこれらの中間の場合として$\alpha=40°$を選んだ。なお，2本あるいは3本の線状体は同じ初期角度に設定することにした。

また，初期位置での線状体の相対位置は，線状体の後端部から発生する自由渦の方向が重心の運動方向と一致するという結果にもとづいて，つぎに述べる方法により決定した。図3.12に示すように，自由渦の方向に沿って測った前方の線状体後端から，自由渦の方向が後方の線状体と交わる点までの距離L_0を基準として，後方の線状体の先端部が自由渦に長さy_0だけ入った場合と後端部が自由渦から長さy_0だけ出る場合の2種類を考え，$y_0=15$(mm)，$L_0=30, 70$(mm)とし$\alpha=20°, 40°, 60°$に対して線状体重心の相対位置(a, b)を計算し実験条件にした。表3.3に初期位置での2本の線状体の相対位置を示す。なお，表中の条件1は先端部が自由渦に15(mm)入る場合であり，条件2が後端部が15(mm)出る場合である。ま

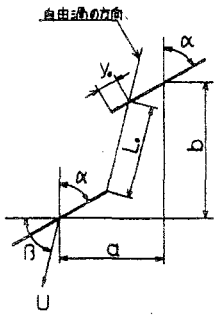


図3.12 線状体の相対位置

た，表3.3は2本の場合であるが，3本の場合には同じ相対位置でもう1本線状体を後方に設定すればよい。

表3.3 初期位置での2本の線状体の相対位置

条件	初期角度 α(°) ＼ 相対距離 L_0(mm)	30	70
1	20	(22,71)	(31,110)
	40	(41,62)	—
	60	(54,49)	(74,83)
2	20	(12,44)	(20,83)
	40	(22,39)	—
	60	(28,34)	(48,68)

2本の線状体の落下実験は，$d=0.915$ (mm)の場合，表3.3に示したすべての実験条件についておこない，$d=0.571$ (mm)の場合，$\alpha=20°, 60°$の条件でおこなった。この実験では，線状体の相対位置，初期角度αおよび直径dの影響を調べた。また，カルマン渦の影響を受けて線状体が運動する場合，直径によりその運動状態がどのように変わるかを調べるために，前方の線状体が$d=0.915$ (mm)で後方が$d=0.571$ (mm)の場合の実験を条件1の$\alpha=60°$, $L_0=30$ (mm)でおこなった。つぎに，線状体本数の影響を調べるために，3本の場合につき$d=0.571, 0.915$ (mm)ともに$\alpha=60°$, $L_0=30$ (mm)，条件1，2で実験をおこなった。

また，100本程度の線状体を集団で連続的に落下させる実験では，初期角度を$\alpha=1°, 20°, 60°$の3種類変化させた。

(ii) 実験装置と方法

図3.13に実験装置の概要を示す。複数の線状体の落下実験では，線状体の運動を調べるため，水槽⑥の正面と側面の直角2方向からのマルチストロボ撮影によりNO.1カメラ③とNO.2カメラ④の2枚のフィルム面上に運動状態を記録した。側面から撮影した目的は，複数の線状体がほぼ同一平面内で運動しているかどうかを確かめるためであり，すでに述べたように自由渦およびカルマン渦の幅は狭く，線状体が運動する平面が大きく離れている場合，後方の線状体は流れの影響を受けない可能性があ

るからである。

水槽は第2章の単数の線状体の落下実験に用いたものと同じで，撮影をおこなう2面は透明アクリル板で製作してあり，背景となる2面にはつや消し黒色塗装がしてある。また，台座⑦の間に落下点測定用グラフ⑧が取付けられており，これで線状体の最終落下点位置を調べた。なお，本実験装置の座標系として初期位置でのもっとも後方に位置する線状体の重心を原点（O）とし，落下装置②の線状体設定面に平行な鉛直面内で水平方向にX軸，鉛直下向きにZ軸，さらにXZ面に垂直な方向にY軸を定めた。

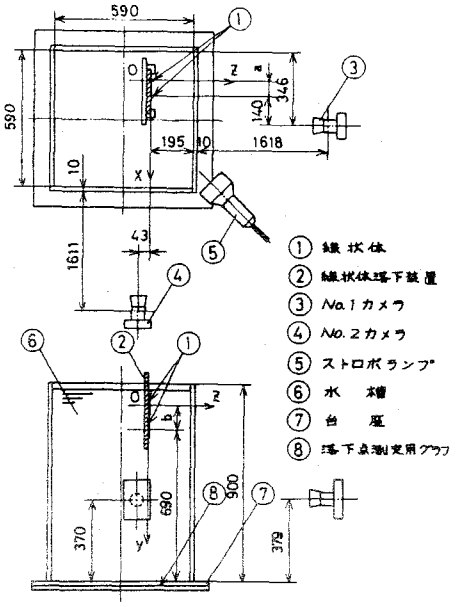


図3.13 実験装置概要

撮影では，実験室全体を暗室とし，線状体の運動状態が十分わかるような写真間隔を得るため，ストロボ発光数をS＝300～480(cpm)の範囲で変化させた。また，撮影は前方を運動している線状体が水槽底面に到達する直前で終了させ，同時刻に撮影された線状体がどれであるかを容易に判断できるようにした。

また，線状体を集団で連続的に落下させる実験では，マルチストロボ撮影はおこなわず，落下装置から水槽底面までつらなって運動している状態を瞬間撮影した。

図3.14に複数の線状体の落下実験に用いた線状体落下装置の概要を示す。2本あるいは3本の線状体を同時に落下させるために，線状体⑨を設定面上に固定する押え棒㋑は長さ170(mm)のガラス棒で製作した。また，スライド部②は2枚の透明塩化ビニール板で製作し，その間には初期角度および初期位置を明

示したグラフが取付けられている。線状体の設定はスライド部全体を固定枠①から取出しておこなう。

まず，押え棒を持上げ，グラフにより所要の初期角度αおよび初期位置に線状体を設定し，押え棒をおろすと回転部⑤に装着してあるバネの力で線状体は固定される。つぎに，押上げ用ボルト⑦を回し，押え棒を押上げて線状体を同時に落下させる。

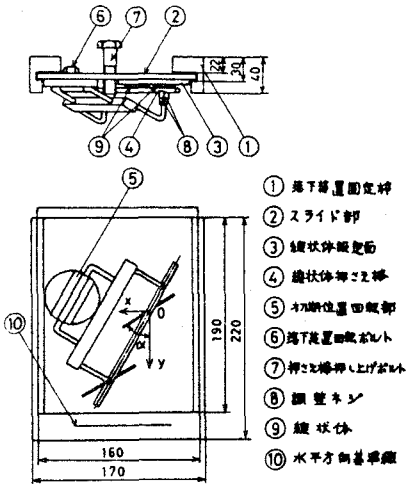


図3.14 落下装置概要

つぎに，線状体を集団で連続的に落下させる実験に用いた落下装置の概要を図3.15に示す。この場合，スライド部②に線状体収納部③が初期角度設定用ボルト⑥で取付けられており，初期角度αの設定は収納部全体を回転させておこなう。

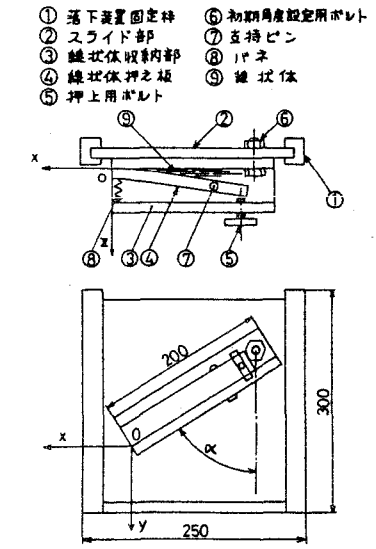


図3.15 落下装置概要

まず，バネ⑧で押付けられている押え板④と収納部の間のテーパ部に線状体⑨を100本程度収納する。つぎに，押上げ用ボルト⑤をゆっくり回し押え板を収納部から離すと，線状体は隙間から集団でしかも連続的に落下する。

なお，この実験における座標系として，収納部と押え板の隙間の先端を原点（0）とし，収納部に平行な鉛直面内で水平方向にX軸，鉛直下向きにY軸，XY面に垂直な方向にZ軸を定めた。

複数の線状体の落下実験では，各実験条件で15回程度線状体を落下させ，最終落下位置での線状体重心の水平方向移動距離の平均値を求め，その値とマルチストロボ撮影した写真を参考にして，その実験条件を代表すると考えられる実験を2個ないし3個選び，それらの写真から線状体両端の座標を読取る。そして，写真の倍率を考慮してこの座標から実際の両端の座標を求め，2.9.3項“線状体の落下特性を求める方法”の(1)～(3)の方法で線状体重心の座標（X，Y），回転角θ（軸方向と鉛直線のなす角度）および重心の速度の水平方向成分$\dot{X}$と鉛直方向成分$\dot{Y}$を計算し，それらを図示し，検討した後その中の1つを実験データとして採用した。なお，線状体が運動する平面がZ方向にづれた場合（ただし，本実験では初期角度αが大きいので線状体はほぼXY面内で運動することがほとんどであった。）には，2.9.2項“写真面上から真の落下運動を求める方法”で述べた方法で被写体距離の変化に対する修正をおこなった。

以上，複数の線状体の落下実験により，初期位置での線状体の相対位置，初期角度，直径および線状体の本数が重心の軌跡，速度，姿勢におよぼす影響を調べることができた。以下ではその結果について報告する。その際，落下特性はつぎのように表現する。

①軌跡は，重心の水平方向移動距離Xと鉛直方向移動距離Yの関係で示す。

②速度は，落下時間tと重心の水平方向速度$\dot{X}$および鉛直方向速度$\dot{Y}$の関係で示す。

③姿勢は，落下時間tと回転角θの関係で示す。

速度の表現方法を単数の線状体の運動の場合と変えたのは，線状体が複数で運動する場合，流れの影響を受けるため，単一で運動する場合と異なりその姿勢だけでは速度が決まらず，落下時間に伴なって大きく変化するからである。

なお，表および図中の長さは公称長さで記載する。また，線状体が集団で運動する場合の落下特性の求め方は，3.9節でその結果について報告するときあわせて説明する。

3.4 複数の線状体の落下特性

この節では，以下で諸要因が落下特性におよぼす影響を述べる前に，線状体の落下特性の概要について説明する。

線状体が複数で運動するとき，後方の線状体は，前方の線状体の運動に伴なって生ずる流れの領域内で運動する場合と流れの領域外で運動する場合の２通りがある。領域外の場合，流れの影響を受けないので，後方の線状体も単一で運動するときと同じ運動をおこなうことになり，各姿勢に応じた速度$\dot{X}$，$\dot{Y}$をもつ。ところが，領域内の場合，姿勢だけでは速度は決まらず，単一で運動する場合の速度に流れの影響が加わった形で速度が決まると考えられる。

そこで，単一で運動する場合の姿勢および重心の速度の変化を基準にして，線状体回りの流れが線状体の運動におよぼす影響を調べた。なお，この姿勢および速度の変化を表わす曲線を"基準曲線"と呼ぶことにする。

(i) 基準曲線

複数の線状体の落下特性を説明する前に，基準曲線について述べる。$\alpha=0.571, 0.915$ (mm)，$\ell=60$ (mm) のNO.1試料を用いて$\alpha=20°, 40°, 60°$変化させて複数の線状体の落下実験と同時におこなった単数の線状体の実験結果を図3.16～図3.20に示す。

θと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係は，落下直後の領域を除きαの影響を受けないことが分かっているので，これらの曲線は$\alpha=20°\sim60°$のデータを重ね合わせて求めた。なお，図3.16，

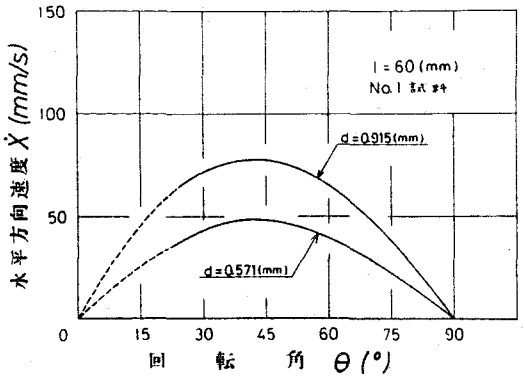


図3.16 水平方向速度の基準曲線

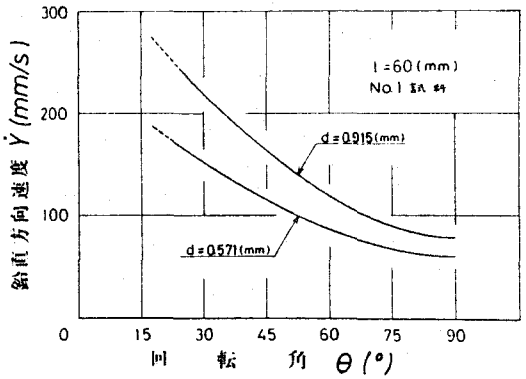


図3.17 鉛直方向速度の基準曲線

3.17には落下直後の急激な加速状態は省略してあり，破線部は推定曲線である。

線状体は $\theta=40°\sim45°$ まで水平方向に加速され，姿勢が水平になると $\dot{X}$ は0になる。また，$\dot{Y}$ は θ の増加に伴なって単調に減少し一定値に近づく。

いっぽう，姿勢の変化を表わすtと θ の関係も，落下時間軸に沿って平行移動すると落下直後の領域を除き α にかかわらず一致するので，$\alpha=20°\sim60°$ のデータを重ね合わせて求めた。角速度は落下後の小さい領域で加速されるが，その後は減速され続け，線状体の姿勢は除々に水平方向に近づく。

つぎに，図3.16～図3.18を用いて，tと $\dot{X}$ の関係およびtと $\dot{Y}$ の関係を求めた。$\dot{X}$ は $\theta=40°\sim45°$ に達するまで加速され，その後は減速され，最終的に0に漸近する。また，$\dot{Y}$ は減速され続け一定値に漸近する。tと重心の速度の関係を表わす曲線の接線勾配は加速度 $\ddot{X}$，$\ddot{Y}$ を表わすが，$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$ ともにその絶対値は直径が大きい方が大きい

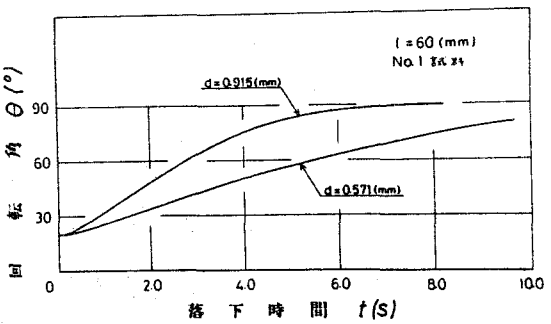


図3.18 姿勢の基準曲線

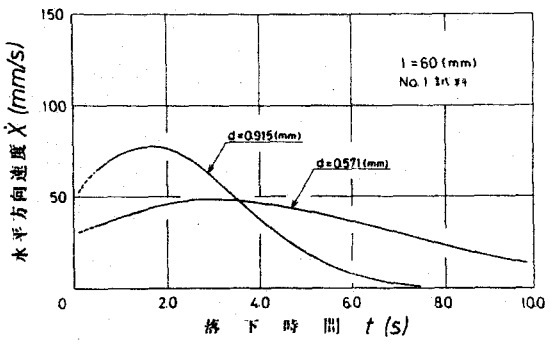


図3.19 水平方向速度の基準曲線

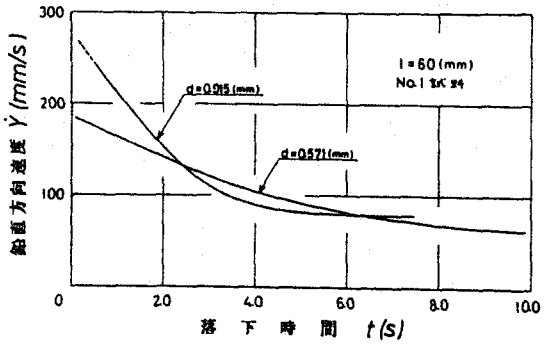


図3.20 鉛直方向速度の基準曲線

ことが分かる。

(ii) 落下特性

複数の線状体の落下特性の概要について説明する。

なお，初期位置においてもっとも前方に位置する線状体から順番に番号を付け線状体1（Slender body 1 を略してS.B.1），線状体2（S.B.2）および線状体3（S.B.3）とし，その回転角θおよび重心の速度Ẋ，Ẏには添字1，2，3を付記し，θ_1，$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$，…，θ_3，$\dot{X}_3$，$\dot{Y}_3$のように表わす。また，複数の場合，線状体同志の相対位置により姿勢および速度が大きく変化するため，線状体の軌跡，姿勢，速度を別々に調べるのではなく，3者を同時に調べながらその運動状態を考察する。

図3.21に$d=0.915\,(mm)$，$\alpha=60°$，2本の線状体の相対距離$L_0=70\,(mm)$，条件1（後方の線状体の先端部が流れに入る場合）の結果を示す。

落下軌跡の図(a)には線状体に番号が付記してあり，これは何番目のストロボの発光によって撮影された線状体であるかを表わしており，同時刻でのS.B.1とS.B.2の位置関係が容易に分かるようにしてある。なお，図中の線状体の時間間隔は$\Delta t=3/8\,(s)$である。以下記載する線状体本数2の落下軌跡の図における線状体の時間間隔は，すべて$d=0.571\,(mm)$の場合，$\Delta t=$

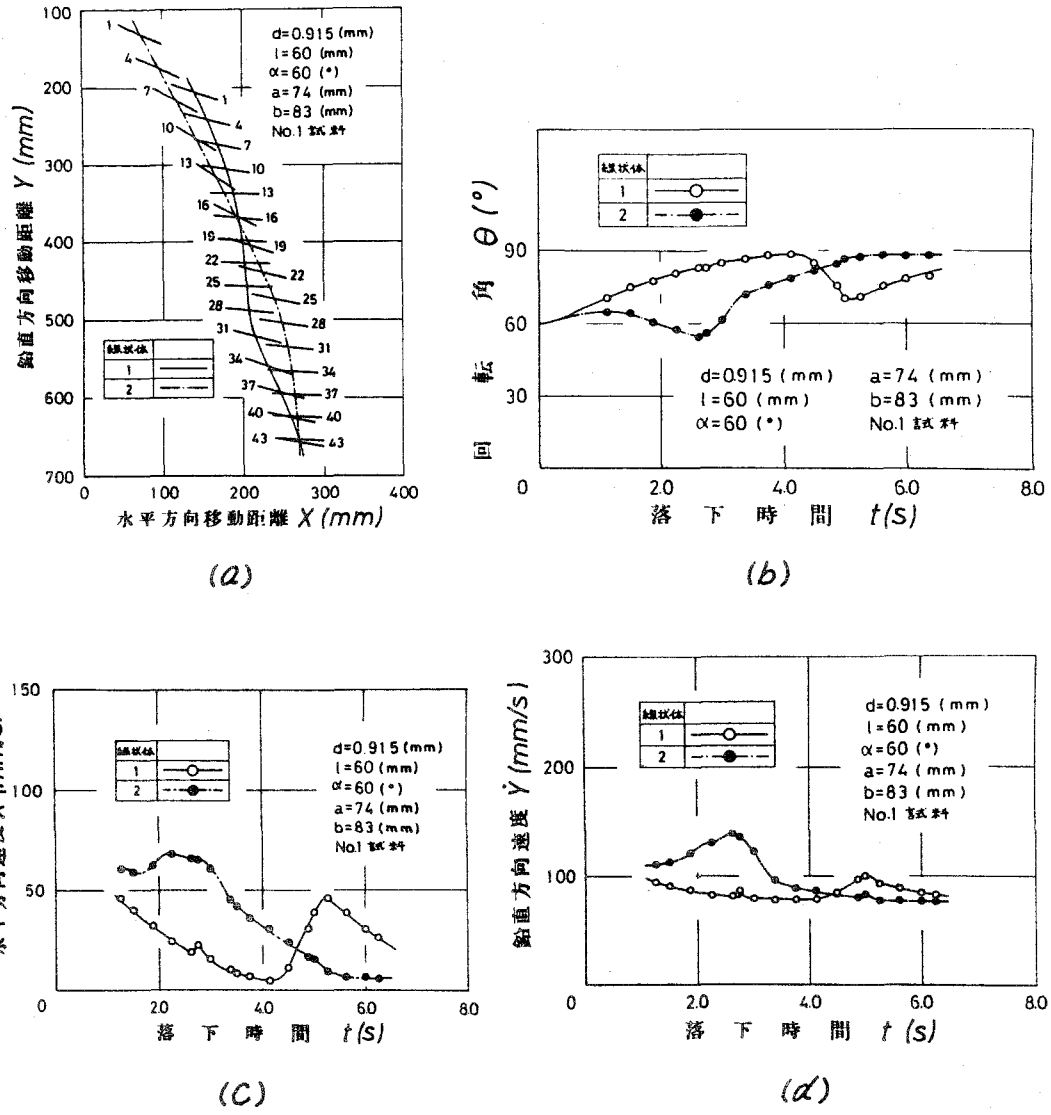


図3.21 複数の線状体の落下特性

$d = 0.915$ (mm), $\alpha = 60°$

$L_0 = 70$ (mm), 条件1

0.4(s), $d = 0.915$ (mm) の場合, $\Delta t = 3/8$ (s) である。また, 図(b)が姿勢の変化, 図(C), (α)がそれぞれ重心速度の水平方向成分および鉛直方向成分の変化を表わしている。

図3.21において, S.B.2の先端部はS.B.1の後端から発生する自由渦の領域に入っているが, 相対距離L_0が大きいため自由

渦の影響が小さく，落下開始後の領域でS.B.2の角速度γ_2は正になり，その姿勢は水平方向にゆっくり回転するが，わづかでも自由渦の影響を受けているので，γ_2はS.B.1の角速度γ_1より小さく$\theta_1 > \theta_2$の状態になる。しかも，$\theta_2 \geq 45°$であるから，$\dot{X}$，$\dot{Y}$とにもS.B.2の方が大きくなり，S.B.2はS.B.1に近づく。このため，自由渦の誘導速度によりθ_2を減少させる向きに作用する回転モーメントは大きくなり，$t = 1.2$(s)程度からその姿勢は鉛直方向に回転し始める。θ_2は65°程度から減少するため$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$ともに増大し，いっぽう，S.B.1の速度はθ_1の増加に伴なって減少し続けている。したがって，S.B.2はS.B.1に近づき14番目の撮影位置付近でS.B.1の先端部寄り（先端から約21(mm)の位置）に衝突する。衝突位置が比較的重心に近いためθ_1の衝撃的な変化は小さく，わづかに減少する程度である。しかし，重心の速度$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$は衝撃的に増大する。

なお，10番目の撮影位置付近から$\dot{X}_2$は減少し始め，$\dot{Y}_2$は急激に増大し始めること，さらに，S.B.1のRe_nが約59であり，S.B.1の後方にはカルマン渦が発生していることから，この付近でカルマン渦の影響を受け始めていると考えられる。

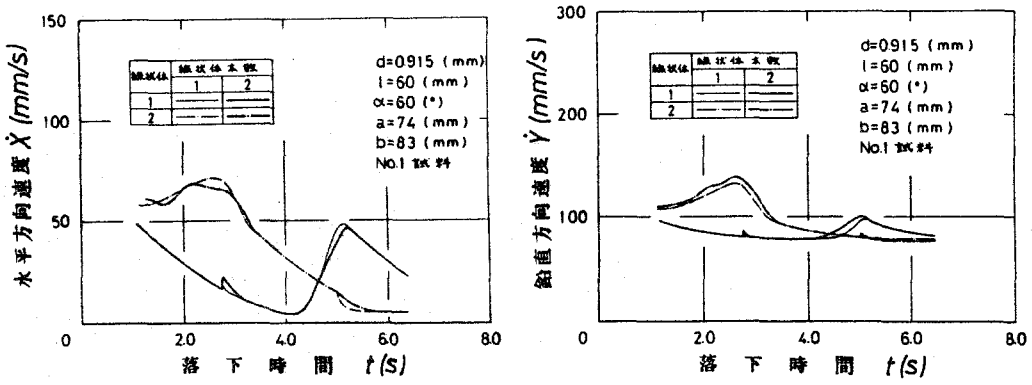
衝突後，S.B.2がS.B.1を追い抜き始めると，S.B.2の先端付近の一部を除いて後端部を含めた大部分がS.B.1の後方に発生しているカルマン渦の領域に入るため，カルマン渦によってθ_2を増大させる向きの回転モーメントが作用し，θ_2は急激に増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$はともに急激に減少する。しかし，まだ$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$，$\dot{Y}_1 < \dot{Y}_2$であるので，S.B.2は20番目の撮影位置付近で完全にS.B.1の前方に出て運動し始める。その後も$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$，$\dot{Y}_1 < \dot{Y}_2$の状態が続き，S.B.2の後端から発生する自由渦はS.B.1の後端部の比較的重心に近い部分におよぶ。いっぽう，S.B.2のRe_nは約58であるから，S.B.2の後方にはカルマン渦が発生しており，このカルマン渦の領域にS.B.1の先端部も含めた大部分が入っている。したがって，この相対位置関係の場合，自由渦

およびカルマン渦はそれぞれθ_1を増大および減少させる向きの回転モーメントを作用させるが，それらが釣合った状態になっているため，S.B.1は単数の場合と同じ運動をおこない，26番目の撮影位置付近（$t=4.2$(s)程度）でS.B.1の姿勢はもっとも水平に近づき約88°となる。この付近では，自由渦も先端部分の比較的重心に近い位置におよんでおり，先端部分はすべてカルマン渦の領域に入っているため，両方の影響を受けて，S.B.1の姿勢は急激に鉛直方向に回転し始める。

θ_1の減少およびS.B.2の流れの影響を受けて，S.B.1の速度$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$は増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$は減少し続けているため，27～28番目の撮影位置付近（$t=4.4$(s)程度）で$\dot{Y}_2 < \dot{Y}_1$となり，29番目付近（$t=4.7$(s)程度）で$\dot{X}_2 < \dot{X}_1$となり，S.B.1はS.B.2に急激に近づいて32番目の撮影位置付近でS.B.2の後端部分（後端から約20(mm)の位置）に衝突する。衝突位置が比較的重心に近いためθ_2の衝撃的な変化は小さく，わづかに増大する。しかし，$\dot{Y}_2$は衝撃的に増大し，$\dot{X}_2$はθ_2の変化の影響で減少する。その後，S.B.1とS.B.2は42番目の撮影位置付近まで交差して運動を続けるが43番目付近（$t=6.4$(s)程度）でS.B.1が完全にS.B.2の前方に出て運動し始める。40番目付近でのS.B.1のRe_nは約58であり，S.B.1の後方にはカルマン渦が発生しているが，この領域にS.B.2の重心を中心とした部分が入っているため，カルマン渦の影響を受けてθ_2が減少あるいは増大する現象は見られない。

(iii) 基準値との比較

前方の線状体の回りの流れが後方の線状体の重心速度におよぼす影響を調べるため，各姿勢に対応する速度を基準曲線から求め，この基準値の変化と複数で線状体が運動するときの速度の変化を比較する。図3.22において，細い線で描かれている曲線が基準値の変化を表わしている。



(a) (b)

図3.22 重心速度の基準値との比較

前方を運動している線状体が後方の線状体に完全に追い抜かれるまでの範囲（ただし，衝突現象は除く），この実験の場合にはS.B.1に関してはt<3.6(s)程度，S.B.2に関してはt=3.6～6.2(s)程度の領域では，単一で運動する場合と同じ運動をするので当然，基準値の変化と一致する。いっぽう，後端から発生する自由渦あるいは後方に生ずるカルマン渦の影響を受けて回転角θが減少している領域，S.B.2のt=1.2～2.8(s)程度の領域およびS.B.1のt=4.3～5.1(s)程度の領域では，Ẋは基準値より小さい値となり，Ẏは基準値より大きい値になる。線状体は自由渦あるいはカルマン渦に引き込まれるように運動するため，Ẋ，Ẏは増大するが，線状体の先端部分が流れの領域に入っているため，回転モーメントは先端部分に作用し，線状体の回転中心は後端部分に位置するので，回転によって重心はXの負の方向およびYの正の方向へ移動する。したがって，Ẋは渦に引き込まれることによって増大するにもかかわらず，線状体自身の回転によって減少させられるため基準値より小さくなる。いっぽう，Ẏは回転によっても増大させられるため，いっそう大きくなる。

逆に，流れの影響を受けてθが増大している領域，S.B.2の

$t = 2.8 \sim 3.4$ (s) 程度の領域では，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに基準値より大きい値になる。この場合，θ が減少する場合と異なり回転モーメントは後端部分に作用するため，$\dot{X}$ も基準値より大きくなる。

以上述べたように，線状体が複数で運動する場合，前方を運動する線状体回りの流れの影響を受けて，姿勢および速度を大きく変えながら後方の線状体が近づき，衝突し，追い抜くというように相対位置を時々刻々変化させ，相互に干渉し合いながら運動を続ける。

3.5 初期角度の影響

この節では，$\alpha = 0.915$ (mm)，2本の線状体の相対距離 $L_0 = 30$ (mm)，条件1（後方の線状体の先端部が流れに入る場合）で $\alpha = 20°, 40°, 60°$ 変化させたときの実験結果から，初期角度が落下特性におよぼす影響を調べる。

3.5.1 $\alpha = 20°$ の場合

図3.23に $\alpha = 20°$ の落下特性を示す。落下開始後間もなく，S.B.1 の後端から発生する自由渦の誘導速度により，S.B.2 には回転角 θ_2 を減少させる向きの回転モーメントが作用し，その姿勢は鉛直方向に回転し始める。θ_2 は 23° 程度から減少するため，$\dot{X}_2$ は減少し，$\dot{Y}_2$ は増大する。したがって，S.B.2 は S.B.1 の発生する自由渦の領域から抜け出し，流れの影響を受けなくなり，単数の場合と同じ運動をする。S.B.2 が S.B.1 の流れの影響を受ける領域は3番目の撮影位置付近（$t = 1.0$ (s) 程度）までである。なお，落下開始後間もなく θ_2 が減少するため，S.B.2 はやがて S.B.1 の下方を運動するようになる。しかし，両者の相対位置関係から，S.B.1 は S.B.2 の運動に伴なって発生する流れの領域には入っていないので，両者ともに単数の場合と同じ運動をおこなう。

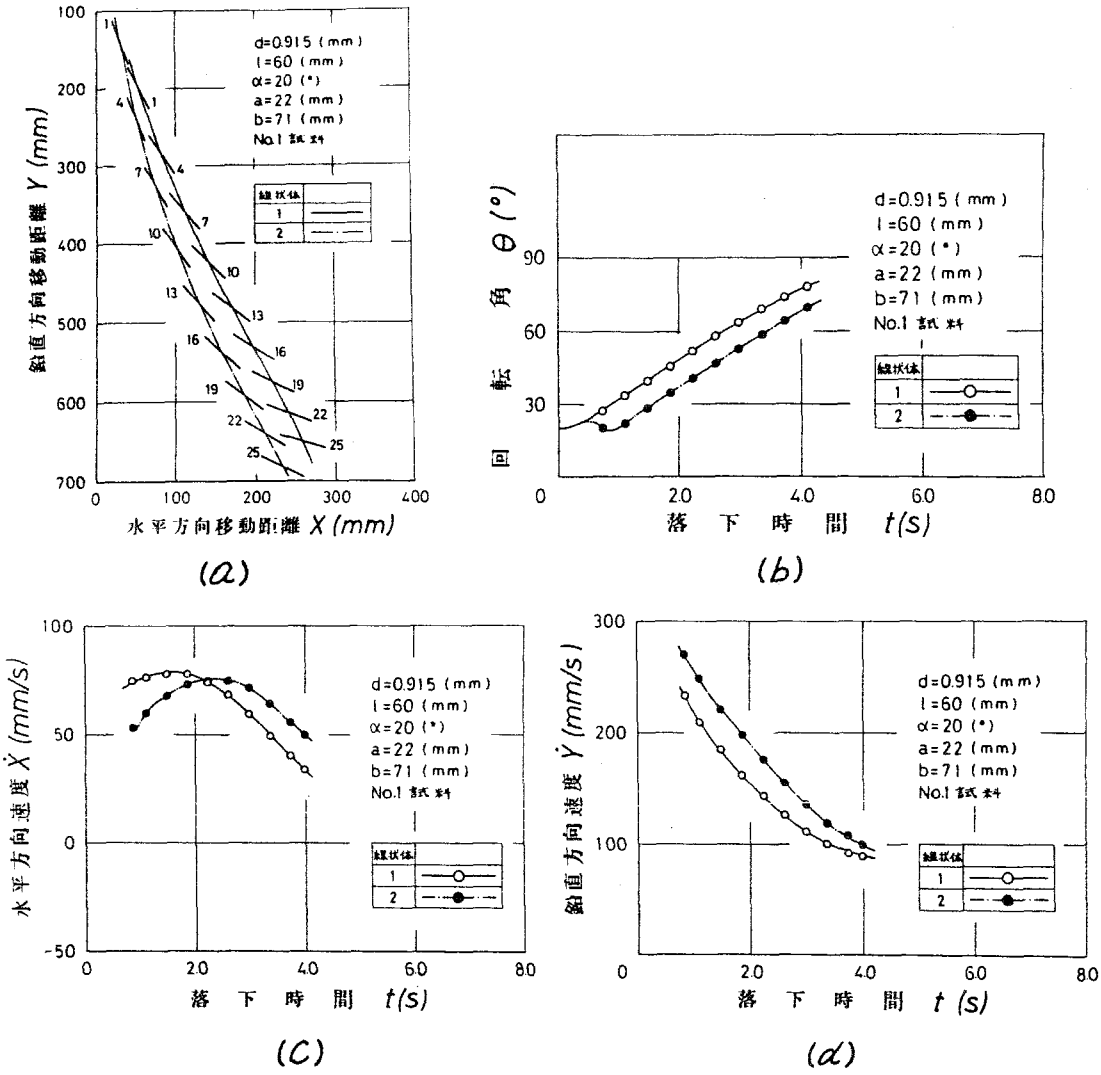


図3.23 複数の線状体の落下特性（初期角度の影響）

$d = 0.915\ (mm)$, $\alpha = 20°$

$L_0 = 30\ (mm)$, 条件1

ここで，S.B.1とS.B.2の重心の速度を比較すると，落下開始後間もなく，θ_2が減少し始めるため，同一落下時間での$\dot{X}$の値はS.B.1の方が大きいが，S.B.2がS.B.1の流れの領域から抜け出すとθ_2が増加し始めるため，$\dot{X}_2$も増大し始め（$\dot{X}$は$\theta = 40° \sim 45°$で最大になる。），落下開始後2.2(S)程度経過す

るとS.B.2の方が大きくなる。いっぽう，$\dot{Y}$はつねに$\theta_2 < \theta_1$であるため同一落下時間ではS.B.2の方が大きくなる。

つぎに，S.B.2がS.B.1の流れの領域内で運動しているときのS.B.2の重心速度の変化と基準値の変化を比較する。図3.24から，流れの影響を受ける時間は短く，しかも自由渦の方向は鉛直に近いため，$\dot{X}$は基準値とほぼ一致し，$\dot{Y}$は基準値よりわずかに大きくなることが分かる。これは3.4節で述べた原因によるが，$\alpha = 20°$の場合，自由渦の方向が鉛直に近いため，渦に引き込まれることによる$\dot{X}$の増大と線状体自身の回転による$\dot{X}$の減少が相殺するので，基準値とほぼ一致したと考えられる。

以上のように，$\alpha = 20°$の場合，落下開始後の小さい領域で流れの影響を受けるだけであり，その後は相互に干渉することなく単一で運動する場合と同じ運動をおこなう。

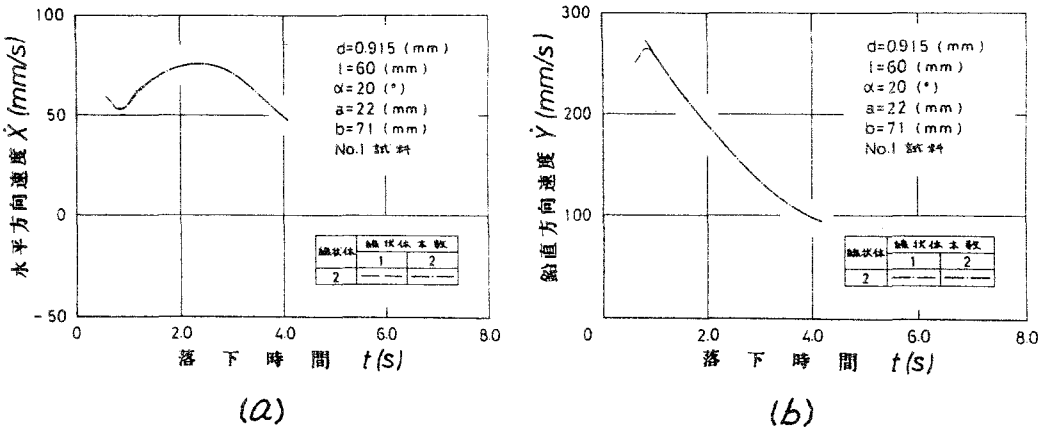


図3.24 重心速度の基準値との比較（初期角度の影響）

3.5.2 $\alpha = 40°$の場合

$\alpha = 40°$の落下特性を図3.25に示す。落下開始後間もなく（0.7(s)程度経過後），S.B.1の後端から発生する自由渦の影響を受けてS.B.2の姿勢は鉛直方向に回転し始める。θ_2は43°程度から減少するため$\dot{X}_2$は減少し，$\dot{Y}_2$は増大するが，S.B.1

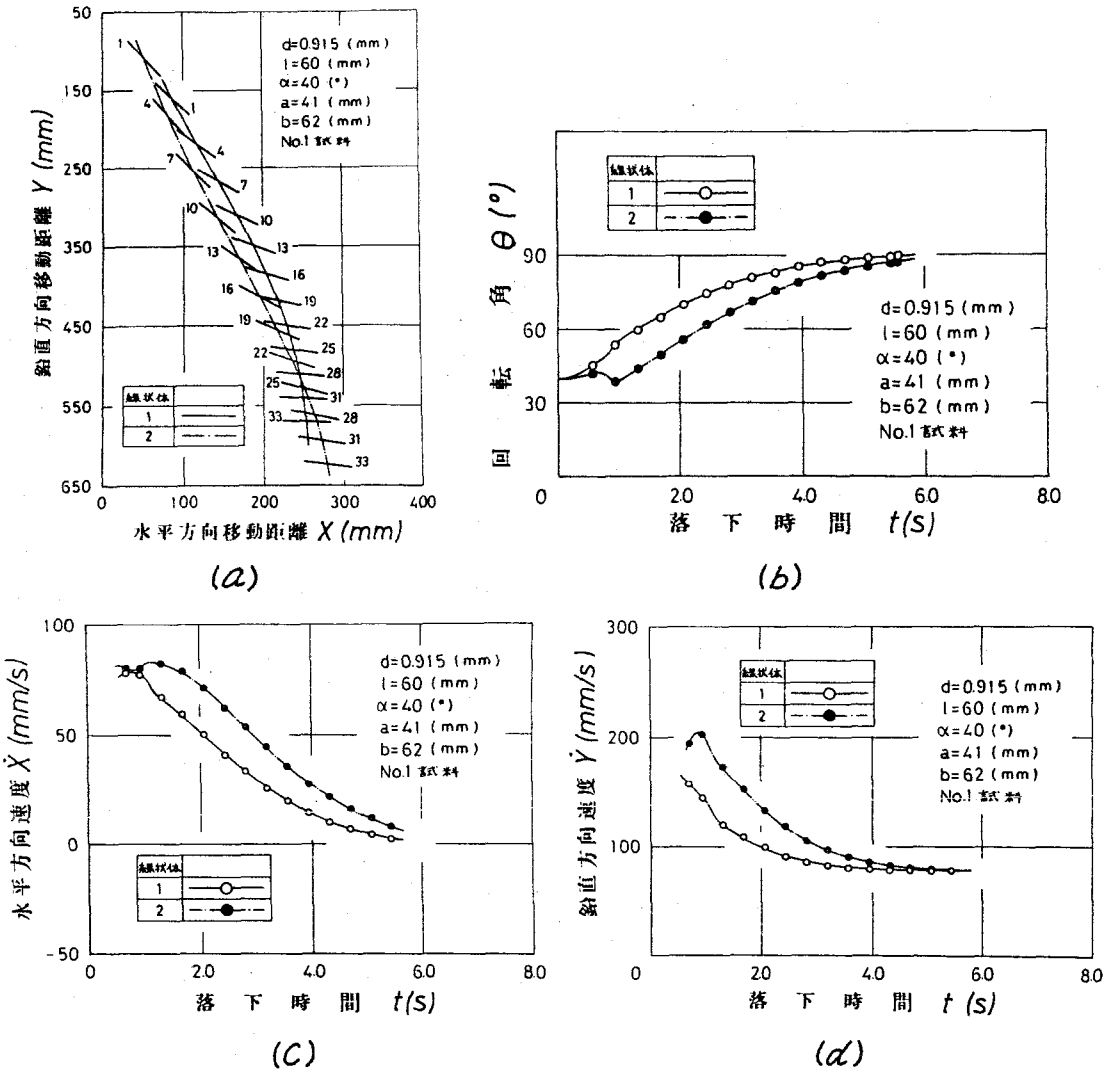


図3.25 複数の線状体の落下特性（初期角度の影響）

$d = 0.915\,(mm)$，$\alpha = 40°$

$L_0 = 30\,(mm)$ ，条件1

の回転角θ_1が50°程度であるため，$\dot{X}_2$の方が同程度か少し大きくなり，また，$\dot{Y}$はS.B.2の方が55 (mm/s)程度大きくなる。したがって，S.B.2はS.B.1に急激に近づき，4番目の撮影位置（$t = 1.0$ (s)程度）でS.B.1の後端部分（後端から約10 (mm)の位置）に衝突し，θ_1は衝撃的に増大する。このため，

衝突直後の領域でS.B.1の速度$\dot{X}_1$, $\dot{Y}_1$は急激に減少する。なお，この領域でのS.B.1のRe_nは約57であるから，S.B.1の後方にはカルマン渦が発生しているが，S.B.2はS.B.1の後端に近い位置を通って追い抜くので，カルマン渦の影響を受けることはほとんどない。そして，6番目の撮影位置付近でS.B.2がS.B.1の下方を運動し始める。しかし，両者の相対位置関係から，S.B.1はS.B.2の流れの領域には入っていないので，両者ともに単数の場合と同じ運動をしばらくするがその後も，$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$, $\dot{Y}_1 < \dot{Y}_2$の状態が続き，S.B.2はS.B.1の前方を運動するようになり，28番目の撮影位置付近でS.B.2の後端から発生する自由渦がS.B.1の後端部におよび始める。このため，S.B.1は流れの影響を受けて運動するはずであるが，図3.25を見れば分かるようにS.B.1はS.B.2の流れの影響を受けないで運動している。そこで，側面から撮影した写真を調べると，衝突後S.B.1とS.B.2は除々にZ方向にづれながら運動していることが分かった。なお，最終落下位置での両者の重心間距離は，Z方向で約17(mm)であった。したがって，渦の幅を考慮すれば，S.B.1が流れの影響を受けずに運動したのは，衝突によって両線状体がZ方向にづれたことが原因である。

以上のように，$\alpha = 40°$の場合，$\alpha = 20°$では見られなかった衝突現象が見られたが，S.B.2がS.B.1の流れの影響を受けなくなってから逆にS.B.1がS.B.2の流れの領域で運動し始めるまでには長い時間を要する。ただし，本実験の場合，両線状体がZ方向にづれたため，S.B.1は流れの影響を受けなかったが，もしZ方向にづれる現象が生じなかった場合約3(S)要する。

3.5.3 $\alpha = 60°$の場合

$\alpha = 60°$の落下特性を図3.26に示す。落下開始から0.5(S)程度経過後，S.B.1の後端から発生する自由渦の影響を受けて，S.B.2の姿勢は鉛直方向に回転し始める。θ_2が62°程度から

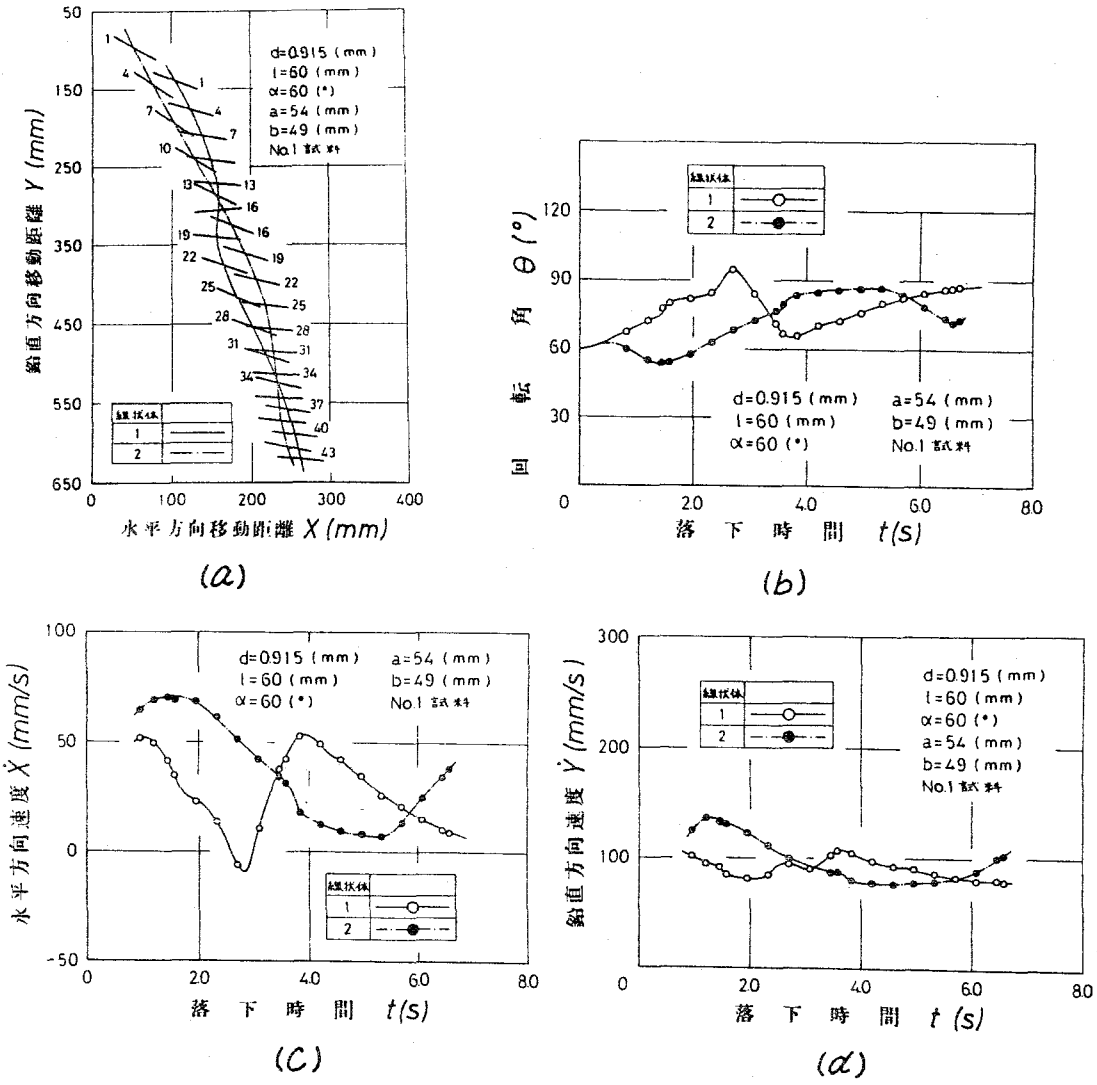


図3.26 複数の線状体の落下特性（初期角度の影響）

$d = 0.915\,(mm)$, $\alpha = 60°$

$L_0 = 30\,(mm)$, 条件 1

減少するため，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$ はともに増大し，S.B.2はS.B.1に急激に近づき6番目の撮影位置付近（$t = 1.5$ (s)程度）でS.B.1の後端部分（後端から約14 (mm)の位置）に衝突し，θ_1 は衝撃的に増大する。このため，衝突直後の領域で $\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$ は急激に減少する。その後，S.B.1とS.B.2は11番目の撮影位置付

まで交差して運動を続けるが，12番目付近（$t=2.2$(S)程度）で S.B.2 は S.B.1 を完全に追い抜く。7番目から11番目の撮影位置付近までの範囲では，S.B.1 の Re_n は約59であり，S.B.1 の後方にカルマン渦が発生しているが，S.B.2 は S.B.1 の後端に近い位置を通って追い抜くのでカルマン渦の影響を受けることはほとんどない。その後も $\dot{X}_1 < \dot{X}_2$，$\dot{Y}_1 < \dot{Y}_2$ の状態が続き，13番目の撮影位置付近から，S.B.2 の後端から発生する自由渦に S.B.1 の後端が入り始めるため，θ_1 は急激に増大し始める。θ_1 は14～15番目の撮影位置付近（$t=2.5$(S)程度）で90°を越えるため，$\dot{X}_1$ は負となり，S.B.1 と S.B.2 は互いに離れていく。したがって，S.B.2 の後端から発生する自由渦が S.B.1 におよぶ位置は，後端部から除々に重心の方へ移り，また，S.B.2 の Re_n は約56であり，後方にカルマン渦が発生しており，この領域に S.B.1 の中央部分が入るため16番目の撮影位置付近で最大（約95°）になる。

その後も，しばらく $\dot{X}_1 < \dot{X}_2$ の状態が続くため，S.B.2 の自由渦が S.B.1 におよぶ位置は重心から先端部の方へ移り，S.B.2 の後方に発生しているカルマン渦の領域に S.B.1 の先端部分が入るため，θ_1 は急激に減少し始め $t=2.9$(S)程度で90°より小さくなる。θ_1 の減少および S.B.2 の流れの影響を受けて，$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$ は増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$ は減少し続けているため，19～20番目の撮影位置付近（$t=3.2$(S)程度）で $\dot{Y}_2 < \dot{Y}_1$ となり，21～22番目付近（$t=3.4$(S)程度）で $\dot{X}_2 < \dot{X}_1$ となり，S.B.1 は S.B.2 に急激に近づき23番目の撮影位置付近（$t=3.6$(S)程度）で S.B.2 の後端部分（後端から約18(mm)の位置）に衝突し，θ_2 は衝撃的に増大する。1回目の衝突（S.B.2 が S.B.1 に衝突した場合）が，重心速度および角速度に大きな差があったため生じたのに対し，今回の衝突は重心速度の差は小さく角速度に大きな差があったため生じたものである。

θ_2 が衝撃的に増大するため，衝突直後の領域で $\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$ は急

激に減少する。また，衝突前のS.B.1の角速度γ_1の絶対値は大きかったので，衝突後も24～25番目の撮影位置付近までθ_1は減少し続ける。その後，S.B.1とS.B.2は30番目の撮影位置付近まで交差して運動を続けるが，31番目付近（$t=4.6(s)$程度）でS.B.1はS.B.2を追い抜く。この場合にも，前回の衝突後の運動と同様に，S.B.1はS.B.2の後端に近い位置を通って追い抜くのでS.B.2の後方に発生しているカルマン渦の影響を受けることはほとんどない。しかし，S.B.2に接触していることが原因と思われるが，S.B.1の接触位置が先端部から後端部に移るにつれて角速度γ_1は減少し，S.B.2を追い抜く31番目付近でθ_1は滑らかにつながらない。すなわち，後端部が接触するようになるにつれて線状体は水平方向に回転しにくくなり，接触が終了するとふたたび角速度は増大する。この現象は前回の衝突の際にも見られたが，今回ほど明確には現われなかった。

その後も$\dot{X}_2 < \dot{X}_1$，$\dot{Y}_2 < \dot{Y}_1$の状態が続き34番目の撮影位置付近から，S.B.1の後端から発生する自由渦にS.B.2の後端が入り始めるが，S.B.1のRe_nは約60であり，S.B.1の後方にカルマン渦が発生しており，この領域に先端付近の一部を除きS.B.2の大部分が入っているため，以前に見られたようなθ_2の急激な増大は見られず，ゆるやかに増大していく。この範囲における角速度γ_2は単数の場合のそれより小さい。これはカルマン渦がθ_2を減少させる向きの回転モーメントを与えているためと考えられる。

その後も，$\dot{X}_2 < \dot{X}_1$の状態が続くためカルマン渦がS.B.2におよぶ領域が先端部の方へ除々に移り，37番目の撮影位置付近でθ_2は最大（約87°）となる。

このときカルマン渦の領域には，後端付近の一部を除きS.B.2の先端部を含めた大部分が入っているので，S.B.2の姿勢は除々に鉛直方向に回転し始める。θ_2の減少およびS.B.1の流れ

の影響を受けて，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$は増大し，$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$はθ_1の増加に伴なって減少し続けているため，S.B.2はS.B.1に急激に近づき，46～47番目の撮影位置（t=6.5(S)程度）でS.B.1の先端部分（先端から約11(mm)の位置）に衝突する。この場合の衝突は，1回目と同様に重心速度および角速度に大きな差があったために生じたものである。

つぎに，前方の線状体の運動に伴なって発生する流れの領域内で運動しているときの後方の線状体の重心速度の変化と基準値の変化を比較する。図3.27から，流れの影響を受けて回転角θが減少している領域，S.B.2のt=0.5～1.5(S)，t=5.3～6.5(S)程度の領域およびS.B.1のt=2.3～3.6(S)程度の領域（ただし，t=2.3～2.7(S)の領域では，S.B.1は水平な姿勢を越えて鉛直方向に回転している。）では，$\dot{X}$は基準値より小さく，$\dot{Y}$は基準値より大きい。ただし，S.B.1のt=2.3～2.7(S)の領域では，$\dot{X}$は負となるためその絶対値で比較して基準値より小さくなる。これは，3.4節で述べたように，自由渦およびカルマン渦に引き込まれるため，$\dot{X}$，$\dot{Y}$は増大するが，線状体自身の回転によって$\dot{X}$は減少し，$\dot{Y}$は増大するためであり，$\dot{X}$と$\dot{Y}$では異なる傾向が現われる。また，S.B.1のt=2.3～3.6(S)

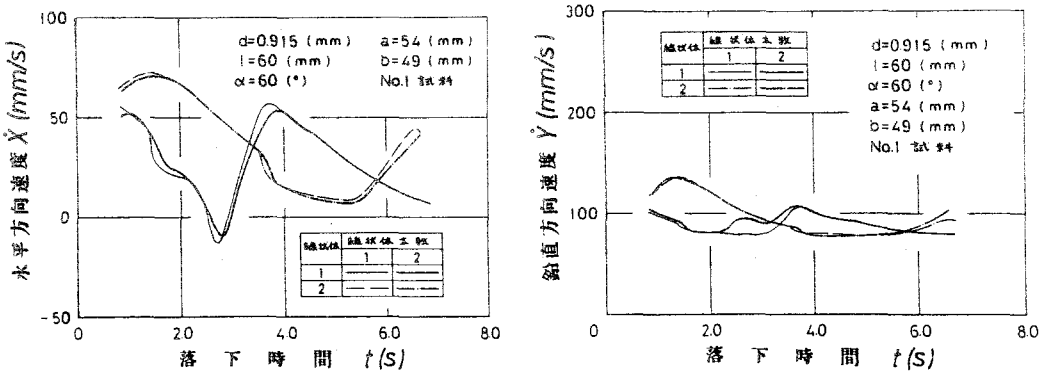


図3.27 重心速度の基準値との比較（初期角度の影響）

程度の領域での場合と他の流れの影響を受けている領域での場合を比較すると，基準値との差はθの減少が急激なほど（前者の場合），すなわち自由渦，カルマン渦のおよぼす影響が大きいほど大きくなる。

以上のように，$\alpha=60°$の場合，流れの影響を受けて前方を運動している線状体に近づき，衝突し，両線状体はしばらく（0.8(S)程度）交差して運動続けるが，完全に追い抜くとすぐに後方の線状体に影響をおよぼし始める。このため，運動中の両線状体の相対距離は小さく，衝突によってx方向にづれ始めてもこの距離が小さいうちに流れの影響を受けるので，$\alpha=40°$の場合見られたような，x方向にづれたために流れの領域をはずれるという現象は見られず，つねに相互に干渉し合いながら運動し続ける。

ここで，初期角度の影響を調べる。3.5.1～3.5.3項の結果から，$\dot{X}$が最大になるときの回転角（$\theta=40°\sim45°$）より初期角度が小さい場合（$\alpha=20°$の場合），落下開始後間もなくθ_2が減少するため，$\dot{X}_2<\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1<\dot{Y}_2$となり，S.B.2はS.B.1の流れの領域から抜け出し，その後両線状体の相対距離は大きくなり，相互に干渉することなく単一の場合と同じ運動をおこなう。いっぽう，αが$\dot{X}$が最大になるときのθの値と同程度の場合（$\alpha=40°$の場合），θ_2の減少に伴ない$\dot{X}_2$の方が同程度か少し大きくなり，$\dot{Y}_1<\dot{Y}_2$になるため，S.B.2はS.B.1に衝突し，S.B.1の下方で運動し始めるが，図3.25と図3.26の重心速度を比較すれば分かるように，衝突後のS.B.2のS.B.1の速度の差は，$\alpha=40°$の方が$\dot{X}$に関しては小さく，$\dot{Y}$に関しては大きいので，S.B.1の一部がS.B.2の流れの領域に入るまでに要する時間は長くなり，両線状体の相対距離は大きくなる。しかも，衝突後のθ_2は，$\alpha=60°$の場合より小さく，したがって，S.B.2の後方に生ずる流れの領域は小さい。以上2つの原因によって，$\alpha=40°$の場合，衝突後の領域で後方の線状体は前方の線状体から発生

する流れの影響を受けにくくなる。また，αが$\dot{X}$が最大になるときのθの値より大きい場合（$\alpha=60°$の場合），衝突後の領域において，衝突した線状体と衝突された線状体の速度差は，$\dot{X}$に関してはαが小さい場合より大きく，$\dot{Y}$に関してはαが小さい場合より小さくなり，さらに衝突した線状体の姿勢はより水平に近いため後方に生ずる流れの領域は広く，衝突後追い抜くとすぐに後方の線状体はこの流れの影響を受け始める。したがって，この場合両線状体はあまり離れることなく，後方の線状体の一部あるいは大部分がつねに前方に位置する線状体の流れの領域内に入っており，相互に干渉し合いながら運動する。

以上のように，$\dot{X}$が加速されるθの領域，$\dot{X}$が最大になるときのθの値と同程度，あるいは$\dot{X}$が減速されるθの領域のどの領域に初期角度があるかによって，両線状体の運動状態は大きく変わり，初期角度が大きいほど両線状体が相互に影響をおよぼし合う度合は強くなり，したがって運動中の姿勢の変化および速度の変化は大きく，その運動状態は複雑になる。

3.6 初期位置における線状体の相対位置の影響

この節では，$d=0.915$(mm)，2本の線状体の相対距離$L_0=70$(mm)，条件2（後方の線状体の後端部が流れに入る場合）で$\alpha=20°, 60°$のときの実験結果について述べ，3.4節および3.5節の結果と比較して，線状体の相対距離L_0および後方の線状体の先端部あるいは後端部のどちらが流れに入っているか（条件1，2）など初期位置での両線状体の相対位置が落下特性におよぼす影響を調べる。

3.6.1 $\alpha=20°$の場合

図3.28に$\alpha=20°$の落下特性を示す。落下開始後間もなく，S.B.1の後端から発生する自由渦がS.B.2の後端部におよぶた

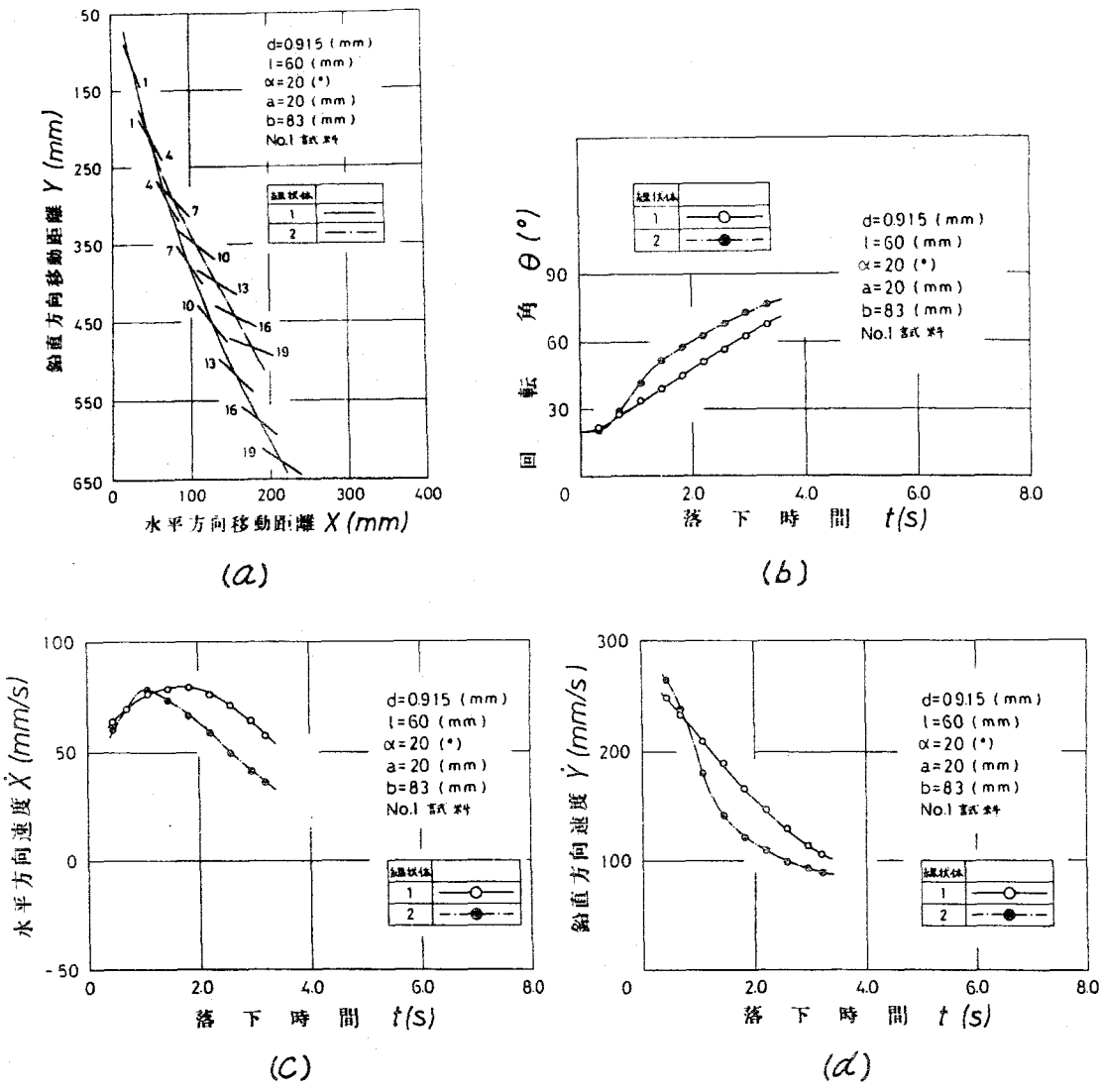


図3.28 複数の線状体の落下特性（相対位置の影響）

$d = 0.915$ (mm)，$\alpha = 20°$

$L_0 = 70$ (mm)　，条件2

め，S.B.2には回転角を増大させる向きの回転モーメントが作用し，その姿勢は水平方向に急激に回転し始める。θ_2は22°程度から増大するため，$\dot{X}_2$は増大し，$\dot{Y}_2$は減少して$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$，$\dot{Y}_2 < \dot{Y}_1$の状態になり，S.B.2とS.B.1は離れていき，10番目の撮影位置付近（$t = 1.4$(s)程度）でS.B.2はS.B.1の発生す

る自由渦の領域から抜け出し，単数の場合と同じ運動をおこなう。

$\dot{X}_2$は7番目の撮影位置付近（$t=1.1$ (s)，$\theta=42°$程度）で最大となりその後減少し，$\dot{X}_1$は増大し続けているため，8番目以後の領域では$\dot{X}_2<\dot{X}_1$となり，$\dot{X}_1$は12番目の撮影位置付近（$t=1.7$ (s)，$\theta=43°$程度）で最大となる。いっぽう，落下開始後間もなくθ_2が増大し始めるため，$\theta_1<\theta_2$となり，$\dot{Y}_2<\dot{Y}_1$の状態が続きS.B.2はつねにS.B.1の上方で運動する。また，両線状体は除々に離れていくため，S.B.2がS.B.1の流れの領域から抜け出した後，ふたたび流れの影響を受けることはなく両者ともに単数の場合と同じ運動をおこなう。

ここで，3.5.1項の結果（$L_0=30$ (mm)，条件1）と比較すると，$\dot{X}$が最大になるときの回転角より初期角度が小さい場合，条件1，2にかかわらず流れの影響を受けるのは落下開始後の小さい領域だけであり，その後は相互に干渉することなく単一で運動する場合と同じ運動をおこなう。しかし，条件1の場合，初期位置において後方に位置していた線状体は，やがて前方に位置していた線状体の下方で運動するようになるが，条件2の場合，つねに上方で運動し続ける。これは，線状体が単一で運動するときの落下特性，すなわち線状体は$\theta=40°\sim45°$の範囲内まで水平方向に加速され，鉛直方向にはθの増加に伴ない単調に減速されるという落下特性，が原因している。

3.6.2 $\alpha=60°$の場合

$\alpha=60°$の落下特性を図3.29に示す。落下開始後間もなくS.B.1の後端から発生する自由渦の影響を受け始めるが，S.B.2とS.B.1の相対距離が大きいため，S.B.2の角速度γ_2はγ_1よりわづかに大きく$\theta_1<\theta_2$の状態で回転角は除々に増大する。θが60°から増大するため$\dot{X}_2<\dot{X}_1$，$\dot{Y}_2<\dot{Y}_1$となりS.B.1とS.B.2は離れていき，S.B.1の後端から発生する自由渦がおよぶ位置

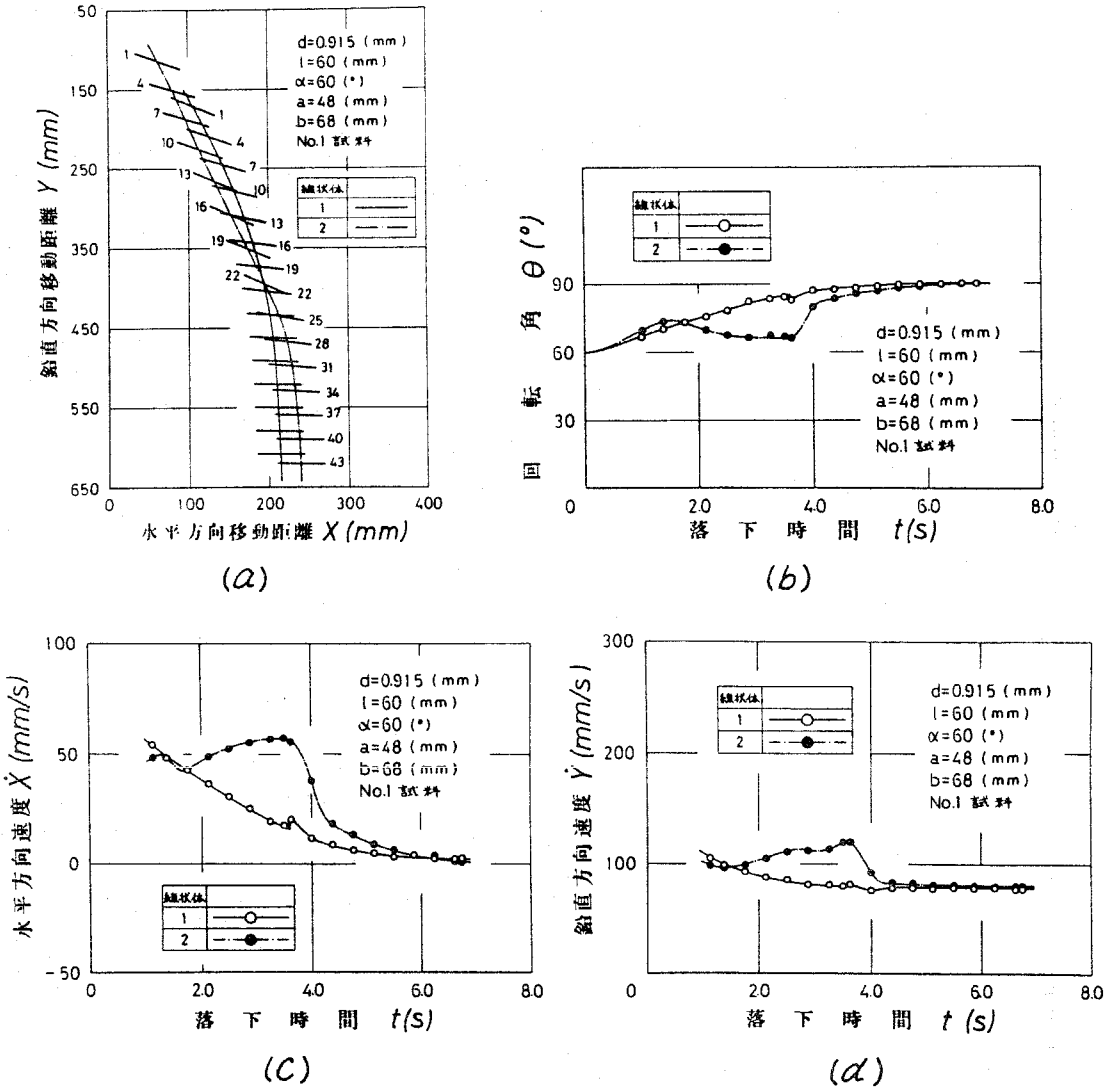


図3.29 複数の線状体の落下特性（相対位置の影響）

$d = 0.915\,(mm)$，$\alpha = 60°$

$L_0 = 70\,(mm)$，条件2

がS.B.2の後端部から除々に重心の方へ移り，5番目の撮影位置付近（$t = 1.5\,(s)$程度）でθ_2は極大（約74°）となる。

S.B.1のRe_nは約60であるから，S.B.1の後方にカルマン渦が発生しており，この領域にS.B.2の重心から先端部の方へ少

し寄った部分が入るためθ_2は除々に減少し始める。θ_2の減少および S.B.1 の流れの影響を受けて$\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$は増大し，$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$, $\dot{Y}_1 < \dot{Y}_2$の状態となって S.B.2 は S.B.1 に近づくが，16番目の撮影位置付近から S.B.1 の自由渦は S.B.2 の後端部分におよんで，θ_2を増大させる向きの回転モーメントを与える。いっぽう，S.B.1 の後方に発生しているカルマン渦の領域に S.B.2 の先端部も含めて大部分が入るため，θ_2を減少させる向きの回転モーメントを与える。また，S.B.2 自身はθ_2を増大させる向きの回転エネルギをもっているが，これらの3者が釣合った状態となり，θ_2がほとんど変化しない状態が続き，21～22番目の撮影位置（$t=3.6$ (S) 程度）で S.B.2 は S.B.1 の先端部分（先端から約3 (mm) の位置）に衝突し，θ_1は衝撃的に減少し$\dot{X}_1$, $\dot{Y}_1$は衝撃的に増大する。とくに，$\dot{X}_1$が増大する割合が大きい。

衝突後，S.B.2 が S.B.1 を追い抜き始めると，S.B.2 の先端付近の一部を除き後端部も含めた大部分が S.B.1 の後方に発生しているカルマン渦の領域に入るため，θ_2を増大させる向きの回転モーメントが作用し，θ_2は急激に増大し，$\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$はともに急激に減少する。S.B.2 は26番目の撮影位置付近（$t=4.2$ (S) 程度）で完全に S.B.1 の前方に出て運動し始める。

その後も，$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$, $\dot{Y}_1 < \dot{Y}_2$の状態が続き，S.B.1 と S.B.2 は離れていき，相対位置関係から S.B.2 の後端から発生する自由渦は S.B.1 の後端部分の比較的重心へ近い部分におよぶ，いっぽう，S.B.2 の Re_n は約63であるから，S.B.2 の後方にカルマン渦が発生しており，この領域に S.B.1 の先端部も含めた部分が入っているため，S.B.1 は S.B.2 の流れの影響を受けて運動をおこなう（θ_1が減少する。）はずであるが，流れの影響を受けないで単数の場合と同じ運動をおこなっている。

そこで，側面から撮影した写真を調べると，衝突後 S.B.1 と S.B.2 は除々に Z 方向にづれながら運動していることが分かった。なお，最終落下位置での両者の重心間距離は Z 方向で

約5 (mm) であった。3.2.3 項に記載した図3.9を見れば分かるように，S.B.2の姿勢は水平に近いため，自由渦およびカルマン渦の幅は小さく約2 (mm) であり，またS.B.1とS.B.2の相対距離が近いため渦の幅のより小さい領域にS.B.1が位置している。したがって，S.B.1がS.B.2の流れの領域外に位置したため，単数の場合と同じ運動をおこなったということが分かる。

つぎに，前方の線状体の流れの影響を受けている領域における後方の線状体の重心速度の変化と基準値の変化を比較する。図3.30において，流れの影響を受けてθが増大している領域，S.B.2のt<1.5 (s)，t=3.6～4.2 (s) 程度の領域では，$\dot{X}$は渦に引き込まれることによって増大し，しかも線状体自身の回転によっても増大するため基準値より大きくなる。また，流れの影響を受けているがθがほとんど変化しない領域，S.B.2のt=2.9～3.6程度の領域では，$\dot{X}$は渦に引き込まれるように運動することによってのみ増大するため，基準値よりわづかに大きい値になる。さらに，θが減少しているS.B.2のt=1.7～2.9 (s) 程度の領域では，前述のθが増大している場合と異なり，線状体自身の回転によって$\dot{X}$が減少するため，渦に引き込

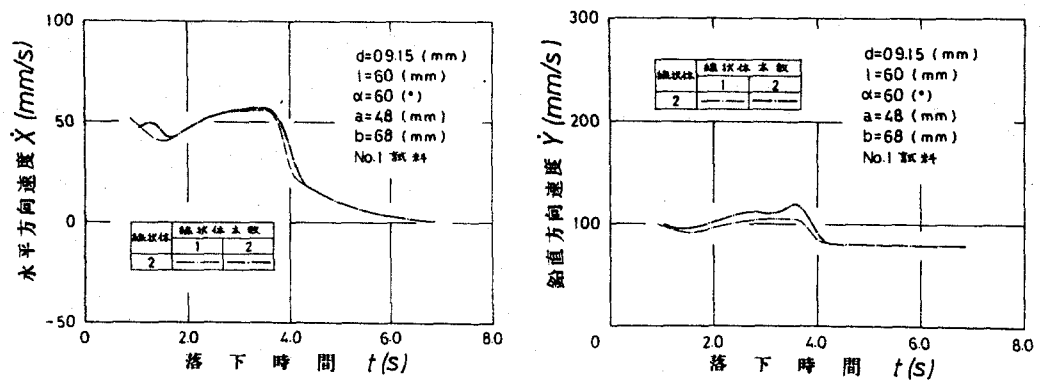


図3.30 重心速度の基準値との比較（相対位置の影響）

まれることによる$\dot{X}$の増大が相殺される。ただし，この場合θ_2の減少はゆるやかであり，回転による$\dot{X}$の減少が小さかったため基準値とほぼ一致したと考えられる。いっぽう，$\dot{Y}$は渦に引き込まれることによっても，線状体自身の回転によっても増大するので，流れの影響を受けている全領域（t<4.2(S)程度で基準値より大きくなる。

ここで，初期位置における線状体の相対位置が落下特性におよぼす影響を調べる。

(1) 相対距離L_0の影響

3.4節に記載した$L_0=70$(mm)の結果（図3.21）と3.5.3項の$L_0=30$(mm)の結果を比較すると，落下開始直後の領域において相対距離が大きい方が，S.B.2が受けるS.B.1の流れの影響は小さくθ_2が減少し始めるまでの時間は長くなり（$L_0=30$(mm)の場合，約0.5(S)，$L_0=70$(mm)の場合，約1.2(S)），θ_2が減少している領域における角速度γ_2の絶対値は小さいことが分かる。なお，当然のことながら，S.B.1に衝突するまでの時間も長くなる。（約1.5(S)と約2.8(S)）したがって，S.B.2に衝突される直前のS.B.1の回転角θ_1は，$L_0=30$(mm)の場合，約75°，$L_0=70$(mm)の場合，約83°，とL_0が大きい方が大きくなり，S.B.1の後方に発生しているカルマン渦の領域は広くなるので，衝突以前にカルマン渦の影響を大きく受ける。このため，衝突直前のS.B.2とS.B.1の速度差は$L_0=70$(mm)の場合の方が大きく，S.B.2はS.B.1のより先端に近い位置（$L_0=30$(mm)の場合，後端から約14(mm)の位置，$L_0=70$(mm)の場合，先端から約21(mm)の位置）に衝突する。したがって，$L_0=70$(mm)の場合，衝突後両線状体が交差して運動を続ける領域（$t=2.8\sim3.4$(S)程度）において，S.B.2の後端部を含めた部分がS.B.1の後方に発生しているカルマン渦の領域に入るため，θ_2は急激に増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$はともに

急激に減少する現象が見られる。しかし，$L_0=30$ (mm)の場合，S.B.2はS.B.1の後端に近い位置を通って追い抜くので，この現象は見られない。また，重心速度の変化を示す図(c),(d)から，$L_0=30$ (mm)の場合，落下直後の加速領域からS.B.1の流れの影響を受け始めるが，$L_0=70$ (mm)の場合，この加速領域を過ぎ速度が減少し始めてからS.B.1の流れの影響を受け始めることが分かる。

以上の結果をまとめると，相対距離が大きい方が，落下開始直後の領域で後方の線状体が受ける前方の線状体の流れの影響は小さい。また，1回目の衝突において，相対距離が大きい方が，前方の線状体のより先端に近い位置に衝突する傾向がある。

(2) 条件1および条件2の影響

3.4節に記載した条件1（線状体の先端部が流れに入っている場合）の結果（図3.21）とこの節に記載した条件2（線状体の後端部が流れに入っている場合）の結果（図3.29）を比較する。両者ともに $L_0=70$ (mm) と相対距離が大きいので，落下開始直後にS.B.2が受けるS.B.1の流れの影響は小さい。

条件2の場合，落下開始後間もなくS.B.1の流れの領域にS.B.2の後端部が入るため，θ_2は除々に増大し始める。このため，$\dot{X}_2<\dot{X}_1$，$\dot{Y}_2<\dot{Y}_1$ となり，S.B.1とS.B.2の相対距離は初期位置での場合より大きくなる。その後，S.B.2の重心から先端部へ少し寄った部分がS.B.1のカルマン渦の領域に入るため，θ_2は除々に減少し始める。減少し始めの領域における角速度$\dot{\theta}_2$の絶対値は条件1の場合とほぼ同じであるが，S.B.2がS.B.1に近づくにつれて条件1の場合と異なり，先端部を含めた大部分がカルマン渦の領域に入るため，θ_2がほとんど変化しない状態が続き，S.B.2とS.B.1の速度差が原因で衝突する。いっぽう，条件1の場合の衝突は，速度および角速度の両方に

大きな差があったために生じたものである。

条件2の場合，いったんθ_2が増大し，その後減少してS.B.2がS.B.1に衝突するため，衝突直前のθ_2は約66°であり，条件1（約55°）より大きく，衝突するまでに要する時間も長い。（条件1の場合，約2.8(S)，条件2の場合，約3.6(S)）また，衝突以前にS.B.2がカルマン渦の影響を受ける領域は，条件1の場合，$t=2.2\sim2.8$(S)程度の領域であるのに対し，条件2の場合，θ_2が減少し始めるときから影響を受け始め，$t=1.5\sim3.6$(S)程度の領域となる。したがって，条件2の場合の方がS.B.2はカルマン渦の影響を大きく受け，S.B.2はS.B.1のより先端に近い位置（条件1の場合，先端から約21(mm)の位置，条件2の場合，先端から約3(mm)の位置）に衝突する。このため，衝突後両線状体が交差して運動を続ける領域（条件1の場合，$t=2.8\sim3.4$(S)程度，条件2の場合，$t=3.6\sim4.2$(S)程度）において，S.B.2の後端部を含めた部分がS.B.1の後方のカルマン渦の領域に入り，θ_2は急激に増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$はともに急激に減少する現象が，条件1，2ともに見られるが，条件2の場合の方がS.B.1のより先端に近い位置に衝突するため，この姿勢および速度の急激な変化は大きくなる。

以上の結果をまとめると，後方の線状体の後端部が流れに入っている場合（条件2）の方が，1回目に衝突するまでに後方の線状体が受けるカルマン渦の影響は大きく，前方の線状体のより先端に近い位置に衝突する傾向がある。

3.7 線状体直径の影響

この節では，$d=0.571$(mm)，$\alpha=60°$，2本の線状体の相対距離$L_0=70$(mm)，条件1および条件2の実験結果について述べ，3.4節および3.6節の$d=0.915$(mm)の結果と比較して，後方の線状体がカルマン渦の影響を受ける場合（$d=0.915$

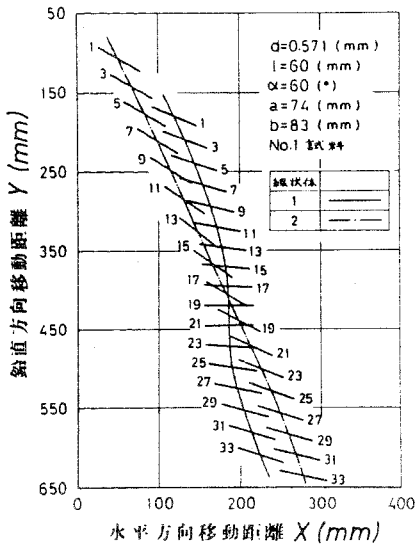
(mm))と受けない場合($\alpha=0.571$(mm))で落下特性がどのように異なるかを調べる。さらに，前方の線状体が$\alpha=0.915$(mm)，後方が$\alpha=0.571$(mm)，$\alpha=60°$，$L_0=30$(mm)，条件1の実験結果について述べ，両線状体ともに$\alpha=0.915$(mm)の場合と比較して，カルマン渦の影響を受けて線状体が運動する場合，直径によりその運動状態がどのように変わるかを調べる。

3.7.1 $\alpha=0.571$(mm)，条件1の場合

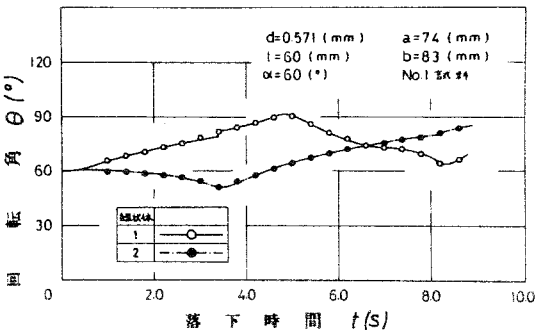
$\alpha=0.571$(mm)，条件1の落下特性を図3.31に示す。落下開始後間もなくS.B.2はS.B.1の後端から発生する自由渦の影響を受け始めるが，S.B.2とS.B.1の相対距離が大きいため自由渦の影響が小さく，自由渦によるθ_2を減少させる向きの回転モーメントとS.B.2自身のθ_2を増大させる向きの回転エネルギがほぼ釣合った状態，すなわちθ_2がほとんど変化しない状態が続く。しかし，θ_1は増加し続けているので$\theta_2<\theta_1$となり，$\dot{X}_1<\dot{X}_2$，$\dot{Y}_1<\dot{Y}_2$となる。したがって，S.B.2はS.B.1に近づき自由渦の影響を大きく受けるようになり，角速度γ_2を除々に増大させながら(γ_2は負であり，γ_2の絶対値が除々に増大する。)，S.B.2の姿勢は鉛直方向に回転し始める。

θ_2の減少および流れの影響を受けて$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$は増大し，いっぽう，S.B.1の速度はθ_1の増加に伴なって減少し続けているため，S.B.2はS.B.1に近づき13番目の撮影位置付近($t=3.4$(s)程度)でS.B.1の後端部分(後端から約22(mm)の位置)に衝突し，θ_1は衝撃的に増大し$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$はわづかに減少する。

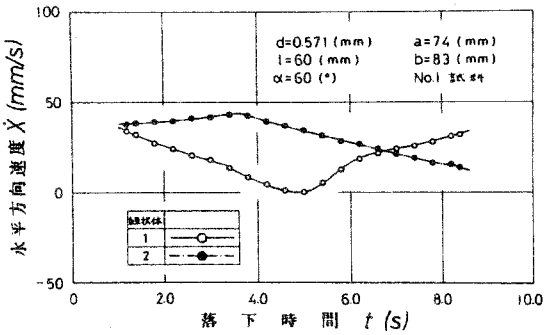
単一で運動する線状体回りの流れ状態を調べた結果から，$\alpha=0.571$(mm)の場合，後端から自由渦は発生するが，線状体の後方にはカルマン渦は発生しないことが分かっている。したがって，前方の線状体が後方の線状体の運動に影響をおよぼす流れは自由渦だけであり，前方の線状体に近づいたとき，自由渦とカルマン渦の両方の影響を受ける場合，たとえば$\alpha=$



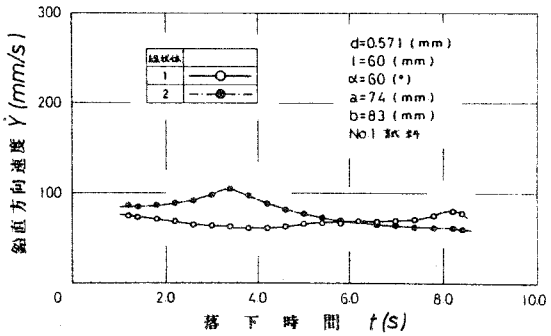
(a)



(b)



(C)



(d)

図 3.31 複数の線状体の落下特性（直径の影響）

$d = 0.571$ (mm), $\alpha = 60°$

$L_0 = 70$ (mm), 条件 1

0.915 (mm), $\alpha = 60°$, $L_0 = 70$ (mm), 条件 1 (図 3.21) の $t = 2.2 \sim 2.8$ (s) 程度の領域と比較して，角速度 γ_2 の絶対値は小さく，$d = 0.915$ (mm) の場合見られたような $\dot{X}_2$ の減少および $\dot{Y}_2$ の急激な増大（この現象はカルマン渦によって生じたものと考えられる。）は見られず，$\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$ ともに除々に増大して S.B.1 に衝突する。

衝突後，S.B.2がS.B.1を追い抜き始めると，S.B.1の自由渦がS.B.2の後端部分におよぶため，θ_2を増大させる向きの回転モーメントが作用し，単一で運動する場合よりγ_2はわづかに大きくなるが，この領域においても自由渦とカルマン渦の両方の影響を受ける$\alpha=0.915$(mm)の場合（たとえば，図3.21の$t=2.8\sim3.4$(s)程度の領域，この場合衝突位置が比較的先端に近いため，S.B.2の後端部を含めた大部分がカルマン渦の領域に入っている。）に見られたようなγ_2の急激な増大現象は生じない。したがって，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$も急激に減少することなく除々に減少する。そして，S.B.2は18番目の撮影位置付近（$t=4.4$(s)程度）で完全にS.B.1の前方に出て運動し始める。

S.B.2がS.B.1を完全に追い抜いた直後から，S.B.2の後端から発生する自由渦にS.B.1の後端部分が入るため，S.B.1は角速度γ_1を増大させながら水平方向に回転し，19番目の撮影位置付近（$t=4.6$(s)程度）でθ_1は90°を越える。$\dot{X}_1<\dot{X}_2$の状態にあるため，S.B.2はS.B.1から離れていきS.B.2の自由渦がS.B.1におよぶ位置は後端部分から除々に重心の方へ移り20～21番目の撮影位置付近（$t=4.9$(s)程度）でθ_1は最大（約92°）となる。その後も，しばらく$\dot{X}_1<\dot{X}_2$の状態が続くため，S.B.2の自由渦がおよぶ位置が重心から先端部の方へ移る。このため，θ_1は減少し始め21～22番目の撮影位置付近（$t=5.1$(s)程度）で90°より小さくなる。

θ_1の減少およびS.B.2の流れの影響を受けて$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$は増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$は減少し続けているので，$\dot{Y}_1$は26番目の撮影位置付近（$t=6.0$(s)程度）で$\dot{Y}_2$より大きくなり，$\dot{X}_1$は29～30番目付近（$t=6.7$(s)程度）で$\dot{X}_2$より大きくなり，S.B.1はS.B.2に近づいて37番目の撮影位置付近（$t=8.2$(s)程度）でS.B.2の後端部分（後端から約13(mm)の位置）に衝突する。なお，S.B.2に衝突する直前の領域（$t=7.8\sim8.2$(s)程度）でθ_1は急激に減少し，$\dot{Y}_1$は急激に増大する現象が見られる。

また，S.B.1が鉛直方向に回転し始めてからS.B.2に衝突するまでの領域で，$d=0.915$ (mm) の場合（$\alpha=60°$, $L_0=30$ (mm)，条件1，図3.26の$t=2.7\sim3.6$ (s) 程度の領域）と比較すると，カルマン渦の影響を受けない場合の方が，γ_1の絶対値ははるかに小さく，S.B.1は除々に鉛直方向に回転しながらS.B.2に近づく。したがって，$d=0.915$ (mm) の場合見られた，θ_1が減少し始めると同時に$\dot{x}_1$，$\dot{y}_1$が急激に増大する現象は見られず，衝突するまでの時間も長い。（$d=0.571$ (mm) の場合，約3.3 (s)，$d=0.915$ (mm) の場合，約0.9 (s)）

つぎに，前方の線状体の流れの影響を受けている領域における後方の線状体の重心速度の変化と基準値の変化を比較する。図3.32において，自由渦の影響を受けて回転角θが減少している領域，S.B.2のtく3.4 (s) 程度およびS.B.1の$t=4.9\sim8.2$ (s) 程度の領域では，$\dot{x}$は渦に引き込まれることによって増大するが，線状体自身の回転によって$\dot{x}$は減少するため，$\dot{x}$の増大が相殺される。ただし，θの減少がゆるやかであり，回転による$\dot{x}$の減少が小さいため，$\dot{x}$は基準値にほぼ等しいかあるいは少し小さい値になる。いっぽう，$\dot{y}$は渦に引き込まれることによっても，線状体自身の回転によっても増大するので，基準値より大きくなる。しかし，$\dot{x}$，$\dot{y}$ともに基準値との差はわずかであり，$d=0.915$ (mm) の場合に比べて小さい。

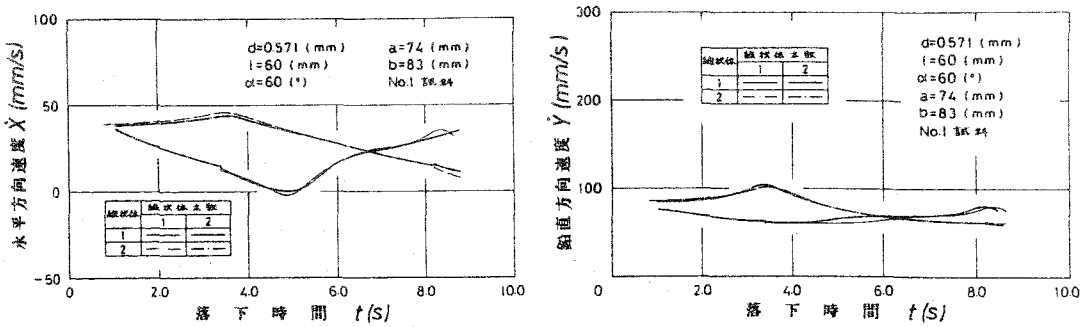


図3.32　重心速度の基準値との比較（直径の影響）

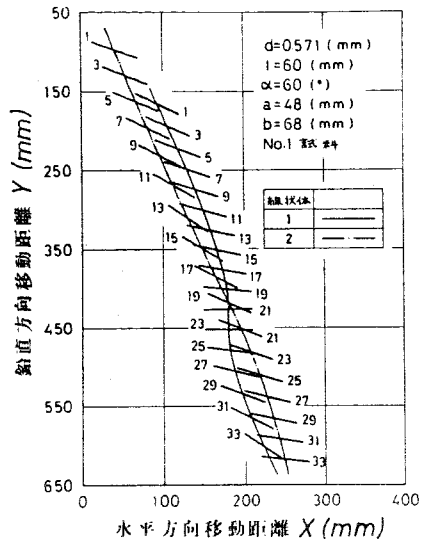
3.7.2 $\alpha=0.571$(mm)，条件2の場合

$\alpha=0.571$(mm)，条件2の落下特性を図3.33に示す。落下開始後間もなくS.B.2の後端部分がS.B.1の後端から発生する自由渦に入っているため，S.B.2の角速度γ_2はγ_1より大きく$\theta_1<\theta_2$の状態で回転角は増大する。θが60°から増大するため$\dot{X}_2<\dot{X}_1$となり，S.B.1とS.B.2は離れていき，S.B.1の後端から発生する自由渦がおよぶ位置がS.B.2の後端部から除々に重心の方へ移り，1番目の撮影位置付近（$t=1.0$(S)程度）でθ_2は極大（約70°）となる。

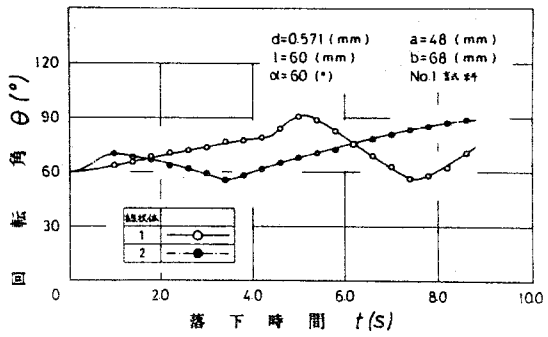
線状体回りの流れの可視化から，$\alpha=0.571$(mm)の場合，回転角が増すにつれて，自由渦が3列発生することが分かっている。すなわち，2列が後端から生じ，それらの間に先端から発生する1列が位置する。（3.2.4項参照）1番目の撮影位置付近では，S.B.1とS.B.2の相対位置関係から，S.B.1の後端から発生する自由渦はS.B.2の重心付近および先端から発生する自由渦には先端部の方へ少し寄った部分が入るため，θ_2は除々に減少し始める。

θ_2の減少およびS.B.1の流れの影響を受けて$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$は増大し，S.B.2はS.B.1に近づき13番目の撮影位置付近（$t=3.4$(S)程度）でS.B.1の後端部分（後端から約25(mm)の位置）に衝突する。衝突位置が比較的重心に近いため，θ_1および$\dot{Y}_1$がわずかに増大する。そして，S.B.2は16番目の撮影位置付近（$t=4.0$(S)程度）で完全にS.B.1の前方に出て運動し始める。

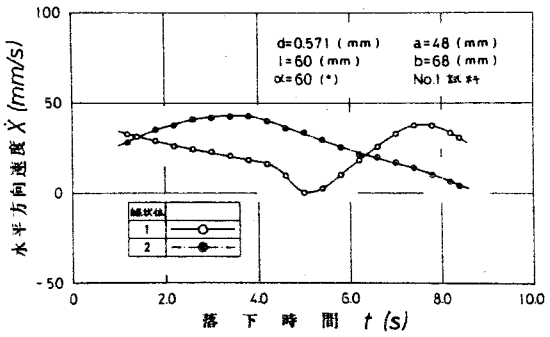
S.B.2がS.B.1を完全に追い抜いた後も$\dot{X}_1<\dot{X}_2$，$\dot{Y}_1<\dot{Y}_2$の状態が続くため，18番目の撮影位置付近（$t=4.4$(S)程度）からS.B.2の後端から発生する自由渦にS.B.1の後端部分が入るため，θ_1は急激に増大し始め，20～21番目（$t=4.9$(S)程度）で90°を越える。$\dot{X}_1<\dot{X}_2$の状態にあるため，S.B.2はS.B.1から離れていき，S.B.2の自由渦がおよぶ位置はS.B.1の後端部から重心の方へ移り21～22番目（$t=5.1$(S)程度）でθ_1は最大（約92°）



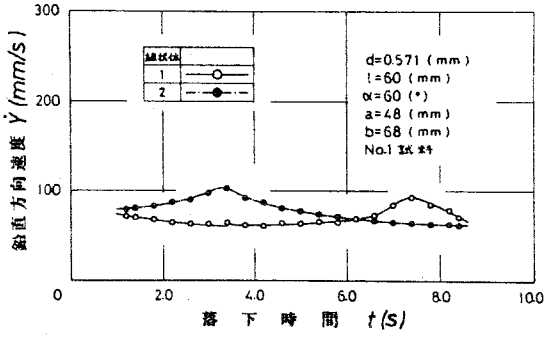
(a)



(b)



(C)



(α)

図3.33 複数の線状体の落下特性（直径の影響）

$d = 0.571$ (mm), $\alpha = 60°$

$L_0 = 70$ (mm) , 条件2

となる。

この付近から，S.B.2の後端から発生する自由渦は，S.B.1の重心から後端部へ少し寄った位置におよび，先端から発生する自由渦は，先端に近い位置におよぶため，S.B.1は鉛直方向に回転し始める。その後も，しばらく $\dot{X}_1 < \dot{X}_2$ の状態が続くため，この流れの領域がおよぶ位置は先端部の方へ移り，θ_1 は減

少し続ける。

θ_1の減少およびS.B.2の流れの影響を受けて$\dot{X}_1$, $\dot{Y}_1$は増大し，$\dot{X}_1$は28番目付近（$t=6.4$(s)程度）で$\dot{X}_2$より大きくなり，$\dot{Y}_1$は27番目付近（$t=6.2$(s)程度）で$\dot{Y}_2$より大きくなり，S.B.1はS.B.2に近づき33番目の撮影位置付近（$t=7.4$(s)程度）でS.B.2の重心に衝突する。しかし，θ_2, $\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$はほとんど変化しない。衝突後，S.B.1がS.B.2を追い抜き始めると，S.B.2の後端から発生する自由渦がS.B.1の後端部分におよぶため，θ_1を増大させる向きの回転モーメントが作用し，単一で運動する場合よりγ_1は大きくなる。

ここで，後方の線状体がカルマン渦の影響を受ける場合（$d=0.915$(mm)）と受けない場合（$d=0.571$(mm)）の落下特性の違いについてまとめると，後方の線状体が前方の線状体に近づく領域で，カルマン渦の影響を受ける場合，後方の線状体の角速度および重心の速度は急激に変化し，前方の線状体に急激に近づいて衝突する。いっぽう，カルマン渦の影響を受けない場合，角速度および重心の速度は除々に変化し，前方の線状体にゆっくり近づいて衝突する。したがって，後方の線状体が鉛直方向に回転し始めてから衝突するまでの時間は，カルマン渦の影響を受ける場合の方が短い。また，複数で運動する場合の重心速度と基準値の差は，$\dot{X}$, $\dot{Y}$ともにカルマン渦の影響を受ける場合の方が大きい。

なお，以上の結果が，カルマン渦の影響によるものか，あるいは単一で運動する場合にも見られる直径が異なることによる落下特性の違い（3.4節に記載した姿勢および重心速度の基準曲線，図3.18～3.20から$d=0.915$(mm)の方が，姿勢および重心速度の変化は急激である。）によるものかは，以下で述べる$d=0.571$(mm)の線状体がカルマン渦の影響を受けて運動する場合の結果から明確になると考えられる。

3.7.3 $d=0.571$(mm)の線状体がカルマン渦の影響を受ける場合

S.B.1が$d=0.915$(mm)，S.B.2が$d=0.571$(mm)の落下特性を図3.34に示す。図(a)中の線状体の時間間隔は$\Delta t=0.4$(s)である。落下開始直後，S.B.1の後端から発生する自由渦の影響を受けてS.B.2は鉛直方向に回転し始める。しかし，S.B.1の方が直径が大きいため，$\dot{X}_2<\dot{X}_1$，$\dot{Y}_2<\dot{Y}_1$の状態が3番目の撮影位置付近（$t=1.6$(s)程度）まで続き，S.B.1はS.B.2から離れていく。なお，3番目の撮影位置での両線状体の重心間距離は，水平方向が約70(mm)，鉛直方向が約65(mm)（初期位置での重心間距離は，$a=54$(mm)，$b=49$(mm)であった。表3.3参照）である。このため，自由渦の影響は小さくなり，自由渦によるθ_2を減少させる向きの回転モーメントはS.B.2自身のθ_2を増大させる向きの回転エネルギよりわずかに小さく，1～3番目付近の領域でθ_2はわずかに増大する傾向を示す。いっぽう，S.B.1の角速度γ_1は大きく，したがって，$\dot{X}_1$および$\dot{Y}_1$の減速も大きいので，落下開始から1.6(s)程度経過すると$\dot{X}_1<\dot{X}_2$，$\dot{Y}_1<\dot{Y}_2$の状態になる。しかし，両線状体の速度差はあまり大きくない（とくに，$\dot{Y}$の差が小さい）ので，S.B.2はS.B.1に除々に近づく。したがって，S.B.2が受ける自由渦およびカルマン渦の影響は小さく，θ_2はほとんど変化しないかあるいはわずかに増大する状態が12番目の撮影位置付近（$t=3.4$(s)程度）まで続く。この位置での重心間距離は，水平方向が約45(mm)，鉛直方向が約50(mm)であり，S.B.1の後方に発生しているカルマン渦の領域にS.B.2の先端から重心近くまでの部分が入るため，S.B.2は鉛直方向に回転し始め，重心速度も除々に増大し始める。そして，カルマン渦の領域に重心を含めた先端部が入るようになり，13番目の撮影位置付近からθ_2は大きく減少し始める。

θ_2の減少およびS.B.1の流れの影響を受けて$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$は急激に

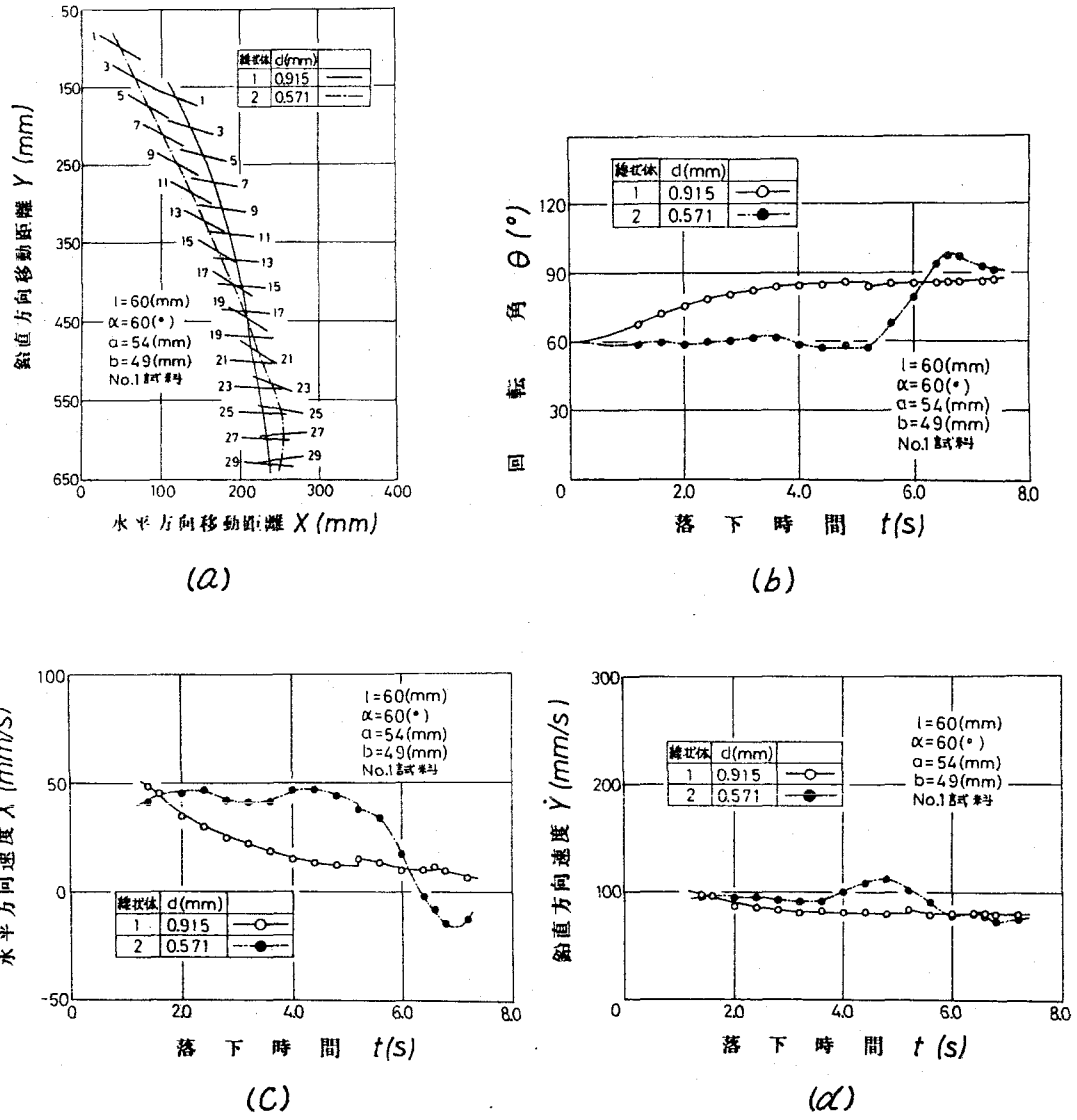


図3.34 複数の線状体の落下特性（直径の影響）

$d = 0.915, 0.571$ (mm), $\alpha = 60°$

$L_0 = 30$ (mm), 条件1

増大し，S.B.2はS.B.1に近づくが，17番目の撮影位置付近から，S.B.2の後端付近の一部を除き大部分がカルマン渦の領域に入るため，カルマン渦によるθ_2を減少させる向きの回転モーメントとS.B.2自身のθ_2を増大させる向きの回転エネルギが釣

合った状態になり，θ_2がほとんど変化しない状態が続き，21番目の撮影位置付近（t=5.2(s)程度）でS.B.2はS.B.1の先端に衝突し，θ_1は衝撃的に減少し，$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$はともに衝撃的に増大する。なお，この衝突はS.B.2とS.B.1の速度差によって生じたものである。また，衝突する前に，S.B.2がすべてS.B.1の後方に発生しているカルマン渦の領域に入って運動する現象は，S.B.1とS.B.2の直径がともにd=0.915(mm)でα=60°，L_0=70(mm)，条件2（図3.29）のt=2.9～3.6(s)程度の領域でも見られ，S.B.2はS.B.1の先端部分（先端から約3(mm)の位置）に衝突した。この場合，条件2（S.B.2の後端部が流れに入る場合）であるため，落下開始後間もなくS.B.1はS.B.2から離れていき，相対距離は初期位置での場合より大きくなり，その後，S.B.2の重心から先端部へ少し寄った部分がカルマン渦の領域に入るため，θ_2は除々に減少し始める。いっぽう，S.B.2の直径がd=0.571(mm)の場合，落下開始後間もなくS.B.1とS.B.2の直径の差によって生ずる速度差のため，S.B.1はS.B.2から離れていき，相対距離は初期位置での場合より大きくなり，しばらくしてからθ_2は減少し始める。以上のように，両実験において，落下開始後の領域でのS.B.1とS.B.2の運動状態が似ているため，上述の現象が見られたと考えられる。

S.B.2がS.B.1に衝突した後，$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$，$\dot{Y}_1 < \dot{Y}_2$の状態は続いているので，S.B.2は水平方向にはS.B.1から離れていき，鉛直方向には近づくが，S.B.2の直径がS.B.1のそれより小さいため，両線状体の速度差は小さく，S.B.2はS.B.1を追い抜くことはできない。しかし，S.B.2が水平方向に離れていくため，S.B.2の先端付近の一部を除き，後端部を含めた部分がS.B.1の後方のカルマン渦の領域に入る。したがって，θ_2を増大させる向きの回転モーメントが作用し，θ_2は急激に増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$はともに急激に減少する。そして，26～27番目の撮影位置付近でθ_2は90°を越え，$\dot{X}_2$は負となり，S.B.2はS.B.1

に近づき28番目付近（$t=6.6$(s)程度）でS.B.1の後端部分（後端から約18(mm)の位置）に衝突する。しかし，$\dot{Y}_1$と$\dot{Y}_2$はほぼ等しいため，θ_1はほとんど変化しない。

衝突後も，$\dot{X}_2<0$，$\dot{X}_1>0$であるため，S.B.2はS.B.1に水平方向には近づくが，$\dot{Y}_1$と$\dot{Y}_2$はほぼ等しいため，鉛直方向には一定の間隔を保ったままである。このため，ふたたびカルマン渦の領域に入るS.B.2の部分が増加し始め，角速度$\dot{\theta}_1$を減少させながらS.B.1の姿勢は水平方向に近づく。

ここで，1回目の衝突後の領域，すなわちカルマン渦の影響を受けてS.B.2の姿勢および速度が急激に変化する領域において，S.B.2の直径が$d=0.915$(mm)の場合の結果（図3.29）と$d=0.571$(mm)の場合の結果を比較する。$d=0.915$(mm)の場合，$t=3.6$(s)程度で衝突するが，S.B.1とS.B.2の直径が同じであるので，そのときのS.B.2とS.B.1の速度差は，$\dot{X}$に関しては約35(mm/s)，$\dot{Y}$に関しては約40(mm/s)と大きく，S.B.2はS.B.1を追い抜き始める。その際，S.B.2の先端付近の一部を除いた部分がカルマン渦の領域に入るため，θ_2は急激に増大し，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$はともに急激に減少する。そして，$t=4.2$(s)程度でS.B.2はS.B.1の前方に出て運動し始める。これに対し，$d=0.571$(mm)の場合，衝突時のS.B.2とS.B.1の速度差は，$\dot{X}$，$\dot{Y}$に関してそれぞれ約30(mm/s)，約20(mm/s)と$d=0.915$(mm)の場合より小さく，S.B.2はS.B1の前方に出ることはできず，カルマン渦の影響を受け続けるため，姿勢および速度は大きく変化し続ける。このように，$d=0.915$(mm)と$d=0.571$(mm)の運動状態に差が現われるのは，単一で運動する場合に見られる，直径が異なることによる速度差，すなわち同じ姿勢の場合，直径が大きいほど速度は大きいことが原因している。

つぎに，この項で述べた$d=0.571$(mm)の線状体がカルマン渦の影響を受けて運動する場合の落下特性と3.7.1項および3.7.2項で述べたカルマン渦の影響を受けないで運動する場合

の結果（図3.31，3.33）を比較する。衝突する前に流れの影響を受けて，後方の線状体の姿勢がほとんど変化しない状態が続き，一定の姿勢を保ったまま衝突する現象および衝突後流れの影響を受けて急激に姿勢および速度が変化する現象は，カルマン渦の影響を受けない場合には見られない。さらに，カルマン渦の影響を受けない場合，衝突からつぎの衝突までに要する時間は4～5(s)であるのに対し，カルマン渦の影響を受ける場合，2.5(s)程度である。また，複数で運動する場合の重心速度と基準値の差は，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにカルマン渦の影響を受ける場合の方が大きいことも分かった。

以上の結果から，後方の線状体の直径が異なると運動状態は多少異なるが，後方の線状体の角速度および重心の速度が急激に変化することおよび衝突からつぎの衝突までの時間が短いことなど，線状体の運動状態が大きく変化するのは，単一で運動する場合にも見られる，直径が異なることによる落下特性の違いによるのではなく，カルマン渦の影響によるものであることが明確になった。

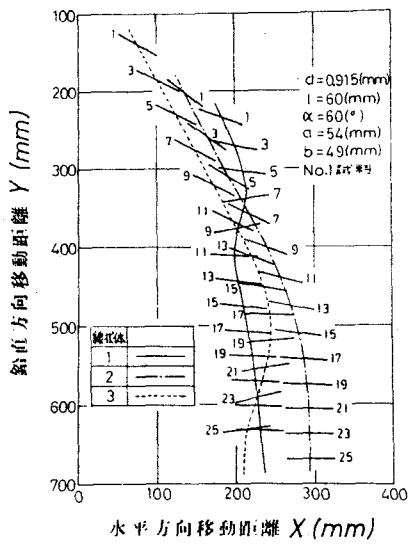
3.8 線状体本数の影響

3.5節～3.7節では，線状体の本数が2の場合について，初期角度，相対位置および直径が落下特性におよぼす影響を調べた。

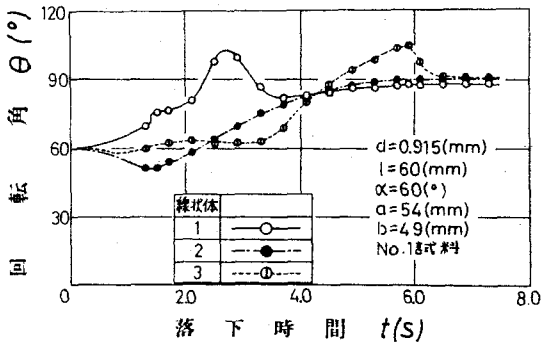
この節では，$d=0.571$，0.915 (mm)，$\alpha=60°$，$L_0=30$ (mm)，条件1（後方の線状体の先端部が流れに入る場合）で本数が3の場合の実験結果について述べ，本数2の結果と比較して本数を増した場合，落下特性がどのように変わるかを調べる。

3.8.1 $d=0.915$ (mm)の場合

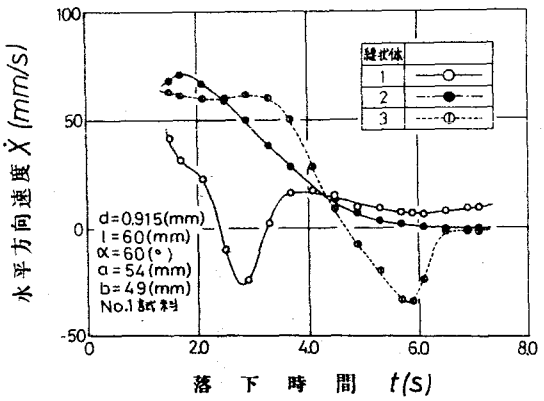
(i) 本数3の落下特性



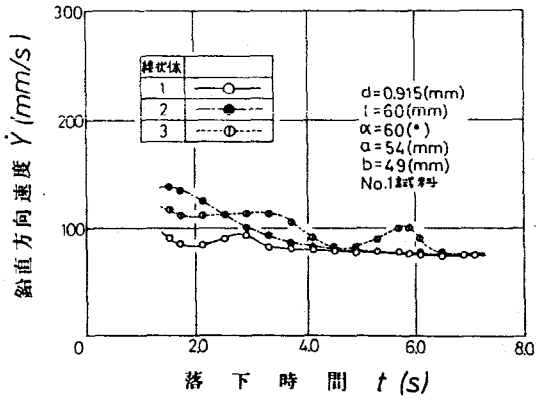
(a)



(b)



(C)



(α)

図3.35 複数の線状体の落下特性（本数の影響）

$d = 0.915\ (mm)$, $\alpha = 60°$

$L_0 = 30\ (mm)$, 条件1

$d = 0.915\ (mm)$ の落下特性を図3.35に示す。図(a)中の線状体の時間間隔は $\Delta t = 0.4\ (s)$ である。落下開始後間もなくS.B.1の後端から発生する自由渦の影響を受けて，S.B.2の姿勢は鉛直方向に回転し始める。θ_2 が60°から減少するため，$\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$

ともに増大し，S.B.2はS.B.1に急激に近づき，1～2番目の撮影位置付近（$t=1.4$(s)程度）でS.B.1の後端部分（後端から約8(mm)の位置）に衝突し，θ_1は衝撃的に増大する。このため，衝突直後の領域で$\dot{X}_1$，$\dot{Y}_1$は急激に減少する。

いっぽう，S.B.3は，S.B.2の後端から発生する自由渦の影響を受けて，鉛直方向に除々に回転し始めるが，S.B.1の自由渦の影響で$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$が増大し，$\dot{X}_3<\dot{X}_2$，$\dot{Y}_3<\dot{Y}_2$の状態になるため，S.B.2がS.B.3から離れていくのでS.B.2の自由渦の影響は小さくなる。したがって，自由渦によるθ_3を減少させる向きの回転モーメントよりS.B.3自身のθ_3を増大させる向きの回転エネルギの方がわずかに大きくなり，S.B.3は除々に水平方向に回転し始める。しかし，S.B.2の角速度γ_2の方がγ_3より大きいため，ふたたび，S.B.3の先端部分がS.B.2の自由渦の領域に大きく入るようになり，上述の回転モーメントと回転エネルギが釣合った状態になるため，6～10番目の撮影位置の範囲でθ_3はほとんど変化しなくなる。

S.B.2がS.B.1に衝突した後，S.B.2はS.B.1の後端を通って追い抜くのでS.B.1の後方に発生しているカルマン渦の影響を受けることなく，4番目の撮影位置付近（$t=1.9$(s)程度）で完全に追い抜く。追い抜くとすぐに，S.B.2の後方に発生しているカルマン渦（S.B.2のRe_nは約52である。）の領域にS.B.1の後端部が入るため，S.B.1は急激に水平方向に回転し始め，$\dot{X}_1$は急激に減少し，$\dot{Y}_1$は増大し，6～7番目付近でθ_1は90°を越え$\dot{X}_1$は負となる。$\dot{X}_1<0$，$\dot{X}_2>0$，$\dot{Y}_1<\dot{Y}_2$であるから，S.B.1はS.B.2に水平方向には近づくが，鉛直方向には離れるため，S.B.2に衝突することはない。しかし，S.B.1が水平方向負の向きに運動するため，S.B.2の後方のカルマン渦の領域に入る部分が後端部から除々に重心の方へ移り，8番目の撮影位置付近（$t=2.7$(s)程度）でθ_1は最大（約103°）になる。その後も，$\dot{X}_1<0$，$\dot{X}_2>0$の状態が続くため，カルマン渦の領域に

S.B.1 の先端部分が入るようになり，θ_1は急激に減少し始め，$t=3.2$(S)程度で90°より小さくなり，$\dot{X}_1$は正になる。θ_1の減少および流れの影響を受けて$\dot{X}_1$は増大するが，まだ$\dot{X}_1 < \dot{X}_2$の状態にあるため，S.B.2はS.B.1から離れていき，13番目の撮影位置付近（$t=3.7$(S)程度）から，S.B.1はS.B.2の流れの領域外で運動し始める。

これまでのS.B.1とS.B.2の運動には，S.B.3はまったく影響をおよぼさないので，上述した，S.B.2がS.B.1に衝突し，追い抜き，その後カルマン渦の影響を受けてS.B.1の姿勢および速度が急激に変化するという運動状態は，他の条件が同じである線状体本数2の場合（図3.26の$t<3.6$(S)程度の領域）にも見られた。ただし，本数3の場合の方が，S.B.2がS.B.1に衝突した位置が後端に近かった（本数2の場合，後端から約14(mm)，本数3の場合，約8(mm)）ため，衝突後S.B.1とS.B.2が交差して運動することなく，短時間のうちにS.B.1はカルマン渦の影響を受け始めるので，S.B.1の姿勢および速度の急激な変化は，本数2の場合より大きく（本数2の場合，θ_1の最大値は約95°，$\dot{X}_1$の最小値は約−10(mm/s)，本数3の場合，約103°と−25(mm/s)），したがって，S.B.2とS.B.1の距離は離れ，S.B.1はS.B.2の流れの領域外で運動し始める。これに対し，本数2の場合，流れの領域内で運動し続けるため，S.B.1は鉛直方向に急激に回転しながらS.B.2に近づき衝突する。以上のように，細かい点では多少異なるが，S.B.1とS.B.2の運動の概要は一致する。

いっぽう，S.B.3は6~10番目の範囲で姿勢をほとんど変化させないで運動を続けていたが，S.B.2の後方のカルマン渦の影響を受けて，$\dot{X}_1$が負となり，S.B.1がS.B.3の下方に位置するようになるため，11番目の撮影位置付近（$t=2.3$(S)程度）からS.B.3はS.B.1の後方に発生しているカルマン渦の影響を受け始め，急激に水平方向に回転し始める。したがって，$\dot{X}_3$，

$\dot{Y}_3$は急激に減少する。しかし，$\dot{X}_1 < \dot{X}_3$，$\dot{Y}_1 < \dot{Y}_3$であるので，S.B.3はS.B.1に近づき，カルマン渦の領域にS.B.3の重心から後端にかけての部分が入るため，θ_3は増大し続け18番目の撮影位置付近で90°を越え，$\dot{X}_3$は負になる。したがって，ふたたびカルマン渦の領域に入るS.B.3の部分が増加し始め，$\dot{X}_3$の絶対値および$\dot{Y}_3$が増大するため，S.B.3はS.B.1に急速に近づき，23～24番目の撮影位置（t=5.8(S)程度）でS.B.1の後端付近を通り抜ける。S.B.3がS.B.1に衝突していないと考えたのは，そのときのθ_1に衝撃的な変化が見られなかったからである。S.B.3の姿勢および速度が急激に変化している領域において，その相対位置から22番目の撮影位置付近まで，S.B.2の自由渦あるいはカルマン渦が，S.B.3の先端部分におよんでいたと考えられるが，S.B.3との距離はS.B.1の方が近いことおよびS.B.1のカルマン渦の領域にS.B.3のより多くの部分が入っていたことが原因で，S.B.1の後方の流れの影響を強く受けて，S.B.3は上述のような運動をおこなったと考えられる。また，この領域におけるS.B.3の角速度γ_3および$\dot{Y}_3$とS.B.2の流れの影響を受けてθ_1が急激に増大した領域（t=1.9～2.7(S)程度の領域）におけるγ_1および$\dot{Y}_1$を比較すると，角速度はS.B.1の方が大きく，$\dot{Y}$はS.B.3の方が大きいことが分かる。これは，S.B.3の場合，S.B.2の流れが先端部分におよんでいるため，θ_3を減少させる向きの回転モーメントが作用し，θ_3の増大を妨げたことおよびS.B.2の流れによって，S.B.3がさらに鉛直方向に引き込まれるように運動したことが原因している。

S.B.3がS.B.1の後端付近を通り抜け始めると，S.B.3の先端部分がS.B.1の後方のカルマン渦の領域に入るため，S.B.3は急激に水平方向に回転し，26番目の撮影位置付近でS.B.1の下方に位置し，S.B.1とほとんど離れず運動する。

いっぽう，S.B.1はt=3.7(S)程度からS.B.2の流れの領

域外で運動し続けていたが，$\dot{X}_1$の方がわづかに大きい状態が続いていたため，ゆっくりS.B.2に近づき，28番目の撮影位置付近（$t=6.7$(S)程度）からS.B.2の後方のカルマン渦の領域に先端部が入り始めるため除々に鉛直方向に回転し始める。

(ii) 本数3の場合と2の場合の落下特性の比較

3本の線状体が相互に干渉し合いながら運動する状態を詳細に述べた。以下では，本数3の場合と2の場合で運動状態がどのように変わるかを調べる。

本数3の場合，S.B.1がS.B.3の流れの影響を受ける領域は，S.B.3がS.B.1の下方に位置する26番目の撮影位置以後の領域（$t>6.3$(S)程度）であるが，S.B.1とS.B.3はほとんど離れないで運動するので，その影響は無視しうるほど小さい。いっぽう，S.B.2はS.B.3の流れの影響をまったく受けない。したがって，S.B.1とS.B.2の運動は，すでに述べたように他の条件が同じである本数2の場合（図3.26）の運動と細かい点で多少異なるが，その概要は一致する。この場合の運動状態の違いは，S.B.2がS.B.1に衝突する位置が少し異なったことが原因しており，S.B.1がカルマン渦の影響を受けて急激に鉛直方向に回転した後，本数3の場合，S.B.1がS.B.2の流れの領域外で運動し始めるのに対し，本数2の場合，鉛直方向に回転しながら，S.B.1がS.B.2に衝突するため，これ以後の両者の運動状態に差が見られる。しかし，本数3の場合にも，28番目の撮影位置付近（$t=6.7$(S)程度）からS.B.1の先端部がS.B.2のカルマン渦の領域に入り始めるため，やがて，S.B.2に近づき衝突する現象が見られると考えられる。

つぎに，S.B.2とS.B.3の運動について考える。落下開始後間もなく$\dot{X}_3<\dot{X}_2$，$\dot{Y}_3<\dot{Y}_2$の状態になるため，S.B.3が受けるS.B.2の流れの影響は小さくS.B.3の姿勢がほとんど変化しない状態が10番目の撮影位置付近まで続くが，11番目付近から

S.B.1の後方に発生しているカルマン渦の影響を受け始め，S.B.3は急激に水平方向に回転し始め，上述したような運動をおこなう。ここで，11番目以後の領域でS.B.1が無かったと仮定した場合，S.B.2とS.B.3の運動状態がどのようになるかを考える。

7番目の撮影位置付近から$\dot{X}_2 < \dot{X}_3$，$\dot{Y}_2 < \dot{Y}_3$の状態になるため，θ_3はほとんど変化しないがS.B.3はS.B.2にゆっくり近づいており，S.B.3が受けるS.B.2の流れの影響は除々に増大する。したがって，S.B.3は鉛直方向に回転し始め，重心速度も除々に増大し始める。そして，S.B.2の後方のカルマン渦の領域に重心を含めた先端部が入るようになり，θ_3は急激に減少し始める。θ_3の減少およびS.B.2の流れの影響を受けて$\dot{X}_3$，$\dot{Y}_3$は急激に増大し，S.B.3はS.B.2に近づくが，S.B.3の後端付近の一部を除き大部分がカルマン渦の領域に入るため，カルマン渦によるθ_3を減少させる向きの回転モーメントとS.B.3自身のθ_3を増大させる向きの回転エネルギが釣合った状態になり，θ_3がほとんど変化しない状態が続き，S.B.3はS.B.2の先端付近に衝突する。ここまでの領域では，S.B.2とS.B.3は，3.7.3項で述べた前方が$\alpha = 0.915$ (mm)の線状体，後方が$\alpha = 0.571$ (mm)の線状体の場合（図3.34）と良く似た運動をおこなうと考えられる。図3.34の場合にも，落下開始後間もなくS.B.1はS.B.2から離れていき，相対距離は初期位置での場合より大きくなった。

衝突後，S.B.3がS.B.2を追い抜き始めると，S.B.3の先端付近の一部を除き後端部を含めた大部分がS.B.2の後方のカルマン渦の領域に入るため，θ_3を増大させる向きの回転モーメントが作用し，θ_3は急激に増大し，$\dot{X}_3$，$\dot{Y}_3$は急激に減少する。しかし，$\dot{X}_2 < \dot{X}_3$，$\dot{Y}_2 < \dot{Y}_3$の状態が続いているので，S.B.3はS.B.2の前方に出て運動し始める。S.B.3がS.B.2から離れていくと，S.B.3の後方に発生しているカルマン渦の領域にS.B.

2の先端部分が入るようになり，S.B.2は急激に鉛直方向に回転し始め，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$ともに急激に増大してS.B.3に近づき衝突する。

後方の線状体の姿勢がほとんど変化しない状態が続き，前方の線状体に衝突した後の領域では，S.B.2とS.B.3は，$d=0.915$ (mm)，$\alpha=60°$，$L_0=70$ (mm)，条件2の結果（図3.29）と良く似た運動をおこなうと考えられる。ただし，図3.29の場合，S.B.2がS.B.1に衝突した後，Σ方向にづれるため，S.B.1はS.B.2の流れの領域外で運動し始め，S.B.1がS.B.2に衝突する現象は見られなかった。

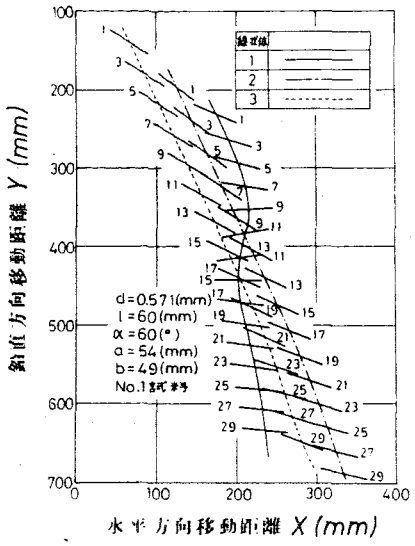
以上のように，11番目の撮影位置以後の領域で，S.B.3がS.B.1の流れの影響を受けないと仮定した場合，S.B.2とS.B.3の運動は，落下開始後間もなく前方の線状体が離れていき，相対距離が初期位置での場合より大きくなった後，後方の線状体が鉛直方向に回転し始めるような運動をおこなう場合の本数2の運動状態と良く似たものになると考えられる。

以上の結果から，線状体本数3の場合，S.B.1とS.B.2の運動状態は，本数2の場合とほとんど一致し，本数の影響を受けるのはもっとも後方に位置するS.B.3であり，落下開始後間もなくS.B.2が離れていくため，その姿勢はほとんど変化しない状態が続き，その後，S.B.1とS.B.2の両方の流れの影響を受けるようになり，S.B.1の流れの影響の方が強いため，S.B.1に近づく。このようにS.B.3は本数2の場合とまったく異なる運動をおこなう。

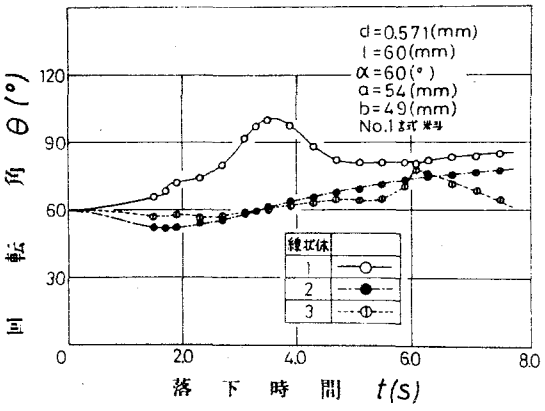
3.8.2 $d=0.571$ (mm)の場合

(i) 本数3の落下特性

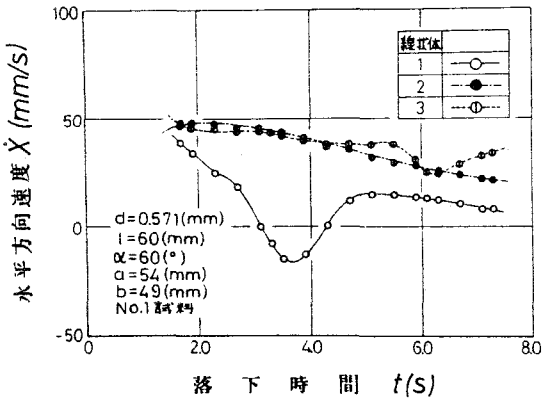
$d=0.571$ (mm)の落下特性を図3.36に示す。図(a)中の線状体の時間間隔は$\Delta t=0.4$ (s)である。落下開始後間もなくS.B.1の後端から発生する自由渦の影響を受けて，S.B.2は鉛直方



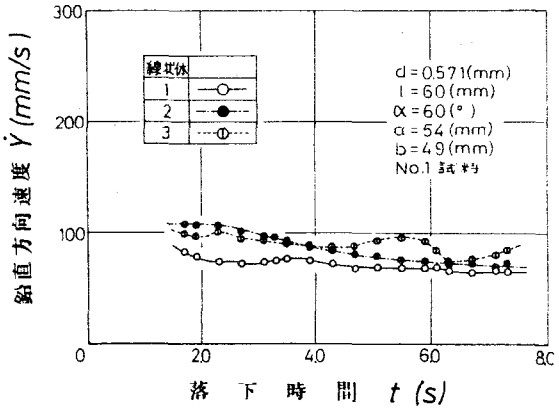
(a)



(b)



(C)



(d)

図3.36 複数の線状体の落下特性（本数の影響）

$d=0.571\,(mm)$，$\alpha=60°$

$L_0=30\,(mm)$，条件1

向に回転し始める。そのため，$\dot{X}_2$，$\dot{Y}_2$ともに増大し，S.B.2はS.B.1に近づき2番目の撮影位置付近（$t=1.7$(s)程度）でS.B.1の後端部分（後端から約4(mm)の位置）に衝突し，θ_1は衝撃的に増大する。

衝突後，S.B.2は4番目の撮影位置付近でS.B.1を完全に追い抜き，追い抜くとすぐにS.B.2の先端から発生している自由渦が，S.B.1の後端部におよぶため，θ_1を増大させる向きの回転モーメントが作用し，S.B.1は水平方向に急激に回転し始め，$\dot{X}_1$は急激に，$\dot{Y}_1$は除々に減少し，S.B.2はS.B.1にふたたび近づく。いっぽう，θ_1は9番目付近で90°を越え，$\dot{X}_1<0$となり，S.B.1は水平方向負の向きに運動し始め，9～10番目の撮影位置（$t=3.2$(s)程度）でS.B.2の後端部分（後端から約9(mm)の位置）に衝突する。その後も，$\dot{X}_1<0$，$\dot{X}_2>0$，$\dot{Y}_1<\dot{Y}_2$の状態が続くため，S.B.1とS.B.2は離れていき，S.B.2の後端から発生する自由渦がS.B.1の後端部分におよび，先端から発生する自由渦が先端部分におよぶようになり，12番目の撮影位置付近（$t=3.7$(s)程度）でθ_1は最大（約100°）になる。

S.B.1は水平方向負の向きに運動し続けるので，S.B.2の後端から発生する自由渦がおよぶ位置が重心から先端部分の方へ移るため，S.B.1は急激に鉛直方向に回転し始め，$t=4.3$(s)程度でθ_1は90°より小さくなり，$\dot{X}_1$は正になる。θ_1の減少および流れの影響を受けて$\dot{X}_1$は増大するが，まだ，$\dot{X}_1<\dot{X}_2$の状態にあるため，S.B.2はS.B.1から離れていき，19番目の撮影位置付近（$t=5.1$(s)程度）から，S.B.1はS.B.2の流れの領域外で運動し始める。

$\alpha=0.571$(mm)の場合，線状体の後方に発生する流れは自由渦だけであるのに対し，$\alpha=0.915$(mm)の場合，自由渦とカルマン渦が発生することおよび単一で運動する場合にも見られる，直径が異なることによる落下特性の違いによって，姿勢および速度の変化は定量的には，同一条件の$\alpha=0.915$(mm)の場合（図3.35）と差が生ずるが，これまでのS.B.1とS.B.2の運動状態は定性的には良く一致している。

いっぽう，S.B.3は，S.B.2の後端から発生する自由渦の影響を受けて鉛直方向に除々に回転し始めるが，S.B.1の自由

渦の影響で$\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$が増大し，$\dot{X}_1$, $\dot{Y}_1$よりわづかに大きくなるため，S.B.2がS.B.3からゆっくり離れていくので，S.B.2の自由渦の影響は小さくなる。したがって，自由渦によるθ_3を減少させる向きの回転モーメントとS.B.3自身のθ_3を増大させる向きの回転エネルギが釣合った状態を経て，8番目の撮影位置付近（$t=2.9$(S)程度）から回転エネルギの方が大きくなり，θ_3は除々に増大する。やがて，S.B.2の流れの影響を受けて，S.B.1が水平方向負の向きに運動してS.B.3の下方に位置するようになるため，17番目の撮影位置付近（$t=4.7$(S)程度）から，S.B.1の先端から発生する自由渦がS.B.3の後端部分の重心寄りにおよぶようになる。いっぽう，$t=4.3$(S)程度から$\dot{X}_2 < \dot{X}_3$, $\dot{Y}_2 < \dot{Y}_3$の状態になり，S.B.3はS.B.2に近づき，自由渦の影響が増大しているので，S.B.1，S.B.2の自由渦による回転モーメントおよびS.B.3自身の回転エネルギの3者が釣合い，θ_3がほとんど変化しない状態が$t=4.7\sim5.5$(S)程度の範囲で続く。この間，$\dot{X}_3$はほとんど変化しないが，S.B.3が両方の自由渦に引き込まれるように運動するため，$\dot{Y}_3$は増大する。このため，S.B.3はS.B.1およびS.B.2に近づき，S.B.1の先端から発生する自由渦がおよぶ位置は重心から後端部の方へ移り，S.B.2の後端から発生する自由渦は先端部から重心の方へ移るため，θ_3を増大させる向きの回転モーメントの方が大きくなり，21番目の撮影位置付近（$t=5.5$(S)程度）からS.B.3は水平方向に急激に回転し始め，$\dot{X}_3$, $\dot{Y}_3$は減少し，24番目の撮影位置付近（$t=6.1$(S)程度）で，S.B.3の後端部分がS.B.1の先端部分に衝突する。この衝突は，主にS.B.3の急激な回転によって生じたものである。このため，θ_1は衝撃的に減少する。

衝突後，S.B.3はS.B.1の流れの影響を受けなくなり，S.B.2の自由渦の影響のみを受けるため，すぐに鉛直方向に回転し始め，$\dot{X}_3$, $\dot{Y}_3$は急激に増大する。いっぽう，S.B.1は28番目

付近でS.B.3に完全に追い抜かれるが，衝突によってz方向にづれるため，S.B.3の流れの影響を受けない。

ここで，前項で述べた$\alpha=0.915$(mm)の結果（図3.35）と比較する。落下開始からθ_3が急激に増大し始めるまでの領域（$\alpha=0.571$(mm)の場合，$t<5.5$(s)，$\alpha=0.915$(mm)の場合，$t<2.3$(s)程度の領域）におけるS.B.3の運動状態は，定性的には$\alpha=0.915$(mm)の場合と一致する。しかし，S.B.1とS.B.2の両方の流れの影響を受けて，S.B.3が水平方向に急激に回転し始めてからの運動状態は，自由渦とカルマン渦では後方の線状体の運動におよぼす影響の大きさに差があることおよび急激な回転を始めたときのS.B.3とS.B.1の距離が$\alpha=0.571$(mm)の場合の方が小さく，短時間のうちにS.B.3がS.B.1に衝突した（$\alpha=0.571$(mm)の場合，約0.7(s)，$\alpha=0.915$(mm)の場合，約3.5(s)）ため，S.B.1の流れの影響を受ける時間が短かったことが原因で，$\alpha=0.915$(mm)の場合と異なる結果になった。すなわち，$\alpha=0.915$(mm)の場合，S.B.3はS.B.2の流れの領域外で運動するようになったが，これに対し，$\alpha=0.571$(mm)の場合，S.B.2の流れの領域内で運動し続ける。

(ii) 本数3の場合と2の場合の落下特性の比較

前項の$\alpha=0.915$(mm)の場合と同様に，S.B.1とS.B.2の運動にはS.B.3の後方の流れはほとんど影響をおよぼさない（$t>6.9$(s)程度の領域でS.B.3はS.B.1の下方に位置する。）ので，S.B.1とS.B.2の運動は，$\alpha=0.571$(mm)，$\alpha=60°$，$L_0=70$(mm)，条件1，本数2の結果（図3.31）と細かい点で多少異なるが定性的には一致する。両者の運動状態の違いは，S.B.2がS.B.1に衝突する位置が異なる（本数2の場合，後端から約22(mm)の位置，本数3の場合，後端から約4(mm)の位置）ことに起因しており，S.B.1が自由渦の影響を受けて急激に鉛直方向に回転した後，本数3の場合，S.B.1がS.B.2の流れの領域

外で運動し始めるのに対し，本数2の場合，S.B.1は流れの領域内で運動し続け，やがてS.B.2に衝突する。

つぎに，S.B.3の運動について考える。落下開始後間もなく $\dot{X}_3 < \dot{X}_2$，$\dot{Y}_3 < \dot{Y}_2$ の状態になるため，S.B.2の流れの影響は小さく，S.B.3の姿勢がゆっくり変化する状態が続き，$t = 4.7$ (s) 程度からS.B.1とS.B.2の両方の流れの影響を受け始め，S.B.1の流れの影響の方が強いため，S.B.3はS.B.1に衝突するが，S.B.1を完全に追い抜くとS.B.2の流れの影響のみを受けるため，急激に鉛直方向に回転しながらS.B.2に近づく。ここで，$t > 4.7$ (s) の領域でS.B.1が無かったと仮定した場合，S.B.3はS.B.1の流れの影響を受けないため，もっと早くに鉛直方向に回転し始め，S.B.2に近づいて衝突すると考えられる。したがって，$\alpha = 0.915$ (mm) の場合と同様に，$\alpha = 0.571$ (mm) の場合にも，本数の影響を受けるのは，もっとも後方に位置するS.B.3である。

以上の結果をまとめると，条件1（後方の線状体の先端部が流れに入る場合），線状体本数3の場合，S.B.1とS.B.2の運動状態は，本数2の場合と定性的にはほとんど一致し，本数の影響を受けるのはもっとも後方に位置するS.B.3であり，落下開始後間もなくS.B.2が離れていくため，その姿勢はほとんど変化しない状態が続き，やがて，S.B.1とS.B.2の両方の流れの影響を受け始め，その運動はいっそう複雑になる。このように，本数3の場合，2本の線状体の後方に発生している流れの影響を同時に受けて運動することが特徴である。

3.9 線状体が集団で運動する場合の落下特性

前節までの結果から，100本程度の線状体を集団で連続的に落下させた場合，線状体は前方を運動している線状体群の流れの影響を受けて，姿勢および速度を大きく変えながら近づき，

衝突し，追い抜くというように相対位置を時々刻々変化させ，相互に干渉し合いながら運動するが，その運動状態は本数2あるいは3の場合よりはるかに複雑になることが予想される。

そこで，線状体が集団で運動する場合には，複数の線状体の運動を調べたときのように個々の線状体の姿勢および速度の変化に着目するのではなく，落下装置から水槽底面までの領域で運動しているある瞬間における線状体全体の状態に着目して，相互に干渉し合いながら運動することにより，同じ距離だけ鉛直方向に移動したとき，水平方向移動距離Xおよび姿勢θがどのように分布するかを調べる。さらに，相互に干渉し合いながら運動した結果，最終落下位置（水槽底面）で線状体がどのように配向するか，また，どのように分布するかを調べる。なお，繊維を取扱う実際の工程において，繊維が集団で運動した後，最終的にどのような配向および分布状態になるかは，製品品質との関連から非常に重要である。

つぎに，落下特性を求める方法について述べる。

(1) 運動中における水平方向移動距離および姿勢の分布

瞬間撮影した写真から，上方，中央部および下方の3種類のYの値を中心にして，鉛直方向の幅20(mm)の領域にその重心が位置する線状体の水平方向移動距離Xおよび姿勢θを読取り，Xに関しては10(mm)あるいは20(mm)ごと，θに関しては10°ごとの相対度数を求める。ただし，$\alpha=1°$の場合，Z方向にも大きく広がるため，直角2方向から撮影した2枚の写真上で，どれとどれが同一の線状体であるかを判断することが困難であり，X，θの読取りに誤差が大きく入るため，読取りはおこなわなかった。また，$\alpha=20°, 60°$の場合でも，Z方向に大きくづれた線状体は除外した。

(2) 最終落下位置での線状体の配向および落下点分布

本実験装置に設定したZ軸（図3.15）と最終落下位置での線状体の軸方向とのなす角度を配向角βとし，$-180° < \beta \leq 180°$（反時計回りを正）の範囲で5°あるいは10°ごとの相対度数を求め，$\beta = 0°$近くに分布している場合ほど配向度が良いと評価する。また，落下点分布は，Z軸と水槽底面との交点を中心にして，10(mm)ごとに同心円を描き，同心円と同心円の間に位置する線状体重心の個数から求める。

以上のようにして落下特性を求め，同時におこなった単数の線状体の実験結果と比較して，単数の線状体の運動状態が，線状体が集団で運動する場合の平均的な運動状態と一致するのかどうか，すなわち，集団の場合，運動状態は単数の場合の運動状態の回りでばらついているだけなのか，あるいは，まったく別の状態になるのかも合わせて調べる。

3.9.1 運動中における水平方向移動距離および姿勢の分布

$d = 0.571$(mm)，$\alpha = 60°$の線状体群の運動状態を図3.37に示す。線状体は前方を運動している線状体群の流れの影響を受けて，相対位置を時々刻々変化させ，相互に干渉し合いながら運動するため，その運動状態は，本数2あるいは3の場合よりはるかに複雑であり，鉛直方向に同じ距離だけ移動したときの水平方向移動距離Xおよび姿勢θは非常にばらついている。とくに，水槽の中央部で運動している線状体の姿勢が大きくばらついており，しかも，下方の領域で運動している線状体の姿勢より傾いていることが分かる。これは，前方を運動し

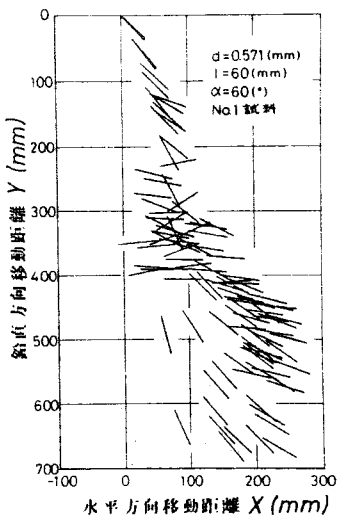


図3.37 線状体群の運動状態

ている線状体の本数が，下方の領域での場合に比べて中央部での場合の方が多いため，線状体群が運動することによって発生する流れの影響をより大きく受けるからである。

そこで，線状体群が相互に干渉し合いながら運動することにより，同じ距離だけ鉛直方向に移動したとき，水平方向移動距離Xおよび姿勢θがどのように分布するかを調べる。

図3.38に$d=0.571$(mm)，$\alpha=60°$の結果を示す。この図には，線状体が単一で運動するときの落下軌跡と線状体を集団で連続的に落下させた場合のXとθの分布が併記されている。なお，Xとθの分布を求めた位置Yは一点鎖線で表わしてある。

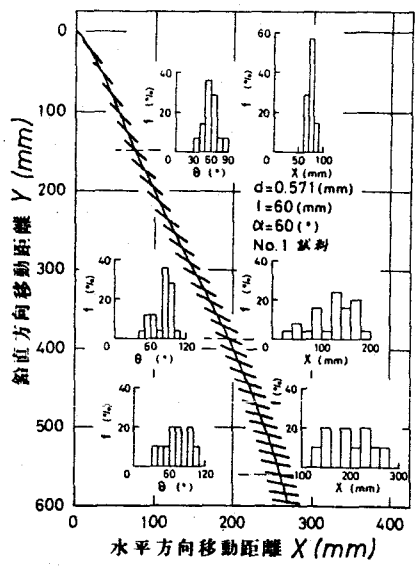


図3.38 水平方向移動距離および姿勢の分布

線状体が集団で運動する場合の運動状態と比較するため，単数の線状体の落下実験は図3.15に示した集団の落下実験で用いた落下装置を用いておこなっているので，線状体の先端部分が落下装置の収納部から離れるにつれて，自重によりその姿勢は除々に鉛直方向に回転する。したがって，線状体が落下装置から完全に離れたときの姿勢は，初期角度より小さくなっており，$d=0.571$(mm)，$\alpha=60°$の場合，約40°である。このため，落下開始直後の運動状態は，第2章で述べた単数の線状体の運動状態と異なり，重心の運動方向がいったん鉛直方向に近づいた後，水平方向に回転し始める。しかし，その後の運動状態は同じであり，重心の軌跡は変曲点をもつ曲線になり，姿勢は除々に水平方向に近づき，これに伴ない水平方向および鉛直方向の速度は減速される。

これに対し，線状体が集団で運動する場合，鉛直方向に同じ距離だけ移動したときのXおよびθの値はばらついており，その分布の範囲は，中央部（Y=390(mm)程度）での場合が下方の領域（Y=560(mm)程度）での場合よりわずかに広く，上方の領域（Y=150(mm)程度）での場合がもっとも狭い。

上方の領域で運動している線状体は，前方の線状体群の流れの影響を受け始めてからの時間が短いためばらつきが小さく，いっぽう，下方の領域で運動している場合，その前方を運動している線状体の本数が中央部での場合に比べて少ないため，流れの影響を受けている時間が長い割にはその影響が小さく，XおよびθがBする範囲が中央部での場合に比べてわずかに狭くなったと考えられる。

このような傾向は，$\alpha=0.571(mm)$，$\alpha=20°$の結果，図3.39および$\alpha=0.915(mm)$，$\alpha=60°$の結果，図3.40において，初期角度および直径が異なる場合にも見られる。

つぎに，線状体が集団で運動する場合のXおよびθの平均値

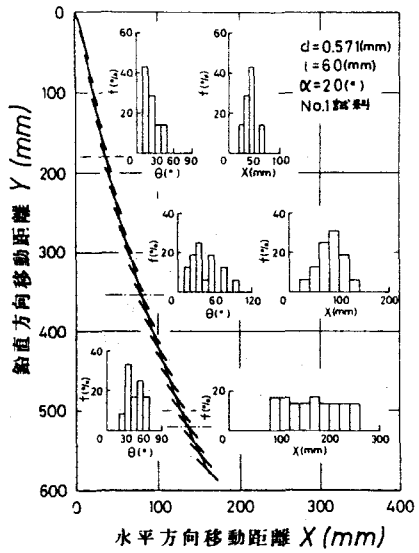


図3.39 水平方向移動距離および姿勢の分布

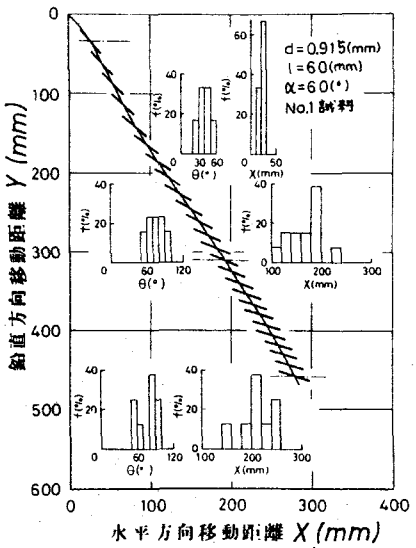


図3.40 水平方向移動距離および姿勢の分布

と単数の場合のXおよびθの値を比較する。表3.4から，同一鉛直方向移動距離に対するθの値は，直径，初期角度にかかわらず，集団で運動する場合の方が大きいことが分かる。したがって，Xの値は初期角度の影響を受け，$\alpha=20°$のとき，集団で運動する場合の方が大きいが，$\alpha=60°$のとき，逆に単数の場合の方が大きくなる。これは，つぎの原因による。

表3.4 集団の場合のX，θの平均値と単数の場合のX，θの値の比較

線状体直径 d (mm)	初期角度 α (°)	集団 $\bar{X}$ (mm)	集団 $\bar{\theta}$ (°)	単一 X (mm)	単一 θ (°)
0.571	20	40.6	24.2	36.3	20.8
		84.1	42.3	80.2	27.9
		161.6	45.3	136.9	39.1
	60	72.4	59.4	74.8	47.5
		122.8	81.0	193.7	67.2
		198.4	71.3	259.7	80.8
0.915	20	18.0	14.0	15.3	15.6
		92.4	36.5	93.4	32.1
		222.1	63.1	176.9	47.6
	60	22.0	39.4	27.1	40.7
		168.0	75.4	192.5	67.3
		213.0	77.8	280.5	72.9

l=60(mm)，No.1 試料

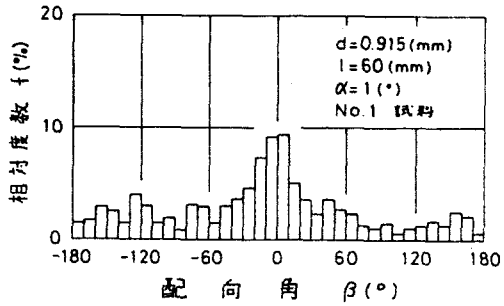
単数の場合，重心の水平方向速度$\dot{X}$は$\theta=40°\sim45°$まで加速され，これ以上の領域では減速される。このため，$\alpha=20°$（落下装置から線状体が完全に離れたときの姿勢は約15°である。）の場合，加速状態にあり，θが大きい方が$\dot{X}$は大きくなり，$\alpha=60°$（落下開始直後の姿勢は約40°である。）の場合，すぐに減速状態に入るため，θが大きい方が$\dot{X}$は小さくなるからである。

以上のように，集団で運動する場合，線状体は線状体群の流れの影響を受けて運動するため，その平均的な運動状態は単数の場合の運動状態と一致しない。

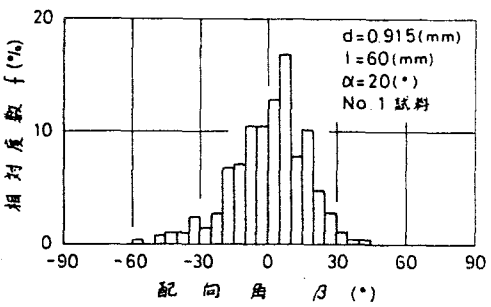
また，集団で運動する場合の各位置における姿勢の差と単数の場合のそれを比較すると，集団の場合，上方の領域から中央部へ移動する間の姿勢の変化は，単数の場合より大きく，逆に，中央部から下方の領域へ移動する間の変化は小さい。さらに，各位置における集団の場合と単数の場合の姿勢を比較すると，両者の差は中央部における場合がもっとも大きい。これらの結果からも，中央部で運動している線状体が，前方の線状体群の流れの影響をもっとも大きく受けていることが分かる。

3.9.2 最終落下位置での線状体の配向および落下点分布

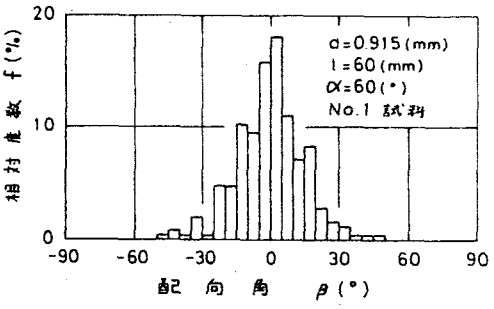
$d=0.915$(mm), $\alpha=1°, 20°, 60°$の配向度を図3.41(a)～(c)に示す。$\alpha=1°$の場合，$\beta=0°$付近（$\beta=0°$はX軸方向であり，この方向にαだけ傾けて線状体を落下させた。）にもっとも多く分布するが，分布する範囲は全円周におよんでいる。これに対し，$\alpha=20°, 60°$の場合，この範囲は$-50°<\beta<50°$程度に狭くなることが分かる。この結果は$d=0.571$(mm)の場合にも得られている。



(a)



(b)



(c)

図3.41 線状体の配向（実験結果）

このように，$\alpha=1°$の場合，配向度は非常に悪いが，図3.43に示す最終落下位置での線状体の状態を見れば分かるように，その軸方向はXZ座標の原点，すなわち，初期位置の方向にほとんど向いている。なお，$\alpha=20°, 60°$の場合にも同様の結果になる。したがって，本実験で用いたような直線の線状体が静止流体中において集団で運動する場合にも，線状体はほぼ一平面内で運動すると考えてよい。そして，初期角度が小さい場合，初期状態のみでは運動面が決まらないため配向度が悪くなり，初期角度が大きくなるにつれて，運動面がXZ面に決まり易くなるため，その方向に良く配向するようになると考えられる。

この結果は，線状体が単一で運動する場合にも得られており，この場合，他の線状体の運動に伴なって発生する流れの影響を受けないので，集団の場合に比べて配向度は良い。

表3.5に配向角βの平均値および標準偏差を示す。初期角度が大きいほどβのばらつきは小さく，配向度が良くなることおよび直径が大きい方がわづかに配向度が良いことが分かる。

また，βの分布はガウス分布に従うと考えられるので，表3.5の値を用いて各区間における確率を計算した。その結果を図3.42(a)～(c)に示す。図3.41と図3.42を比較すれば分かるように実験結果と計算結果はほぼ一致する。

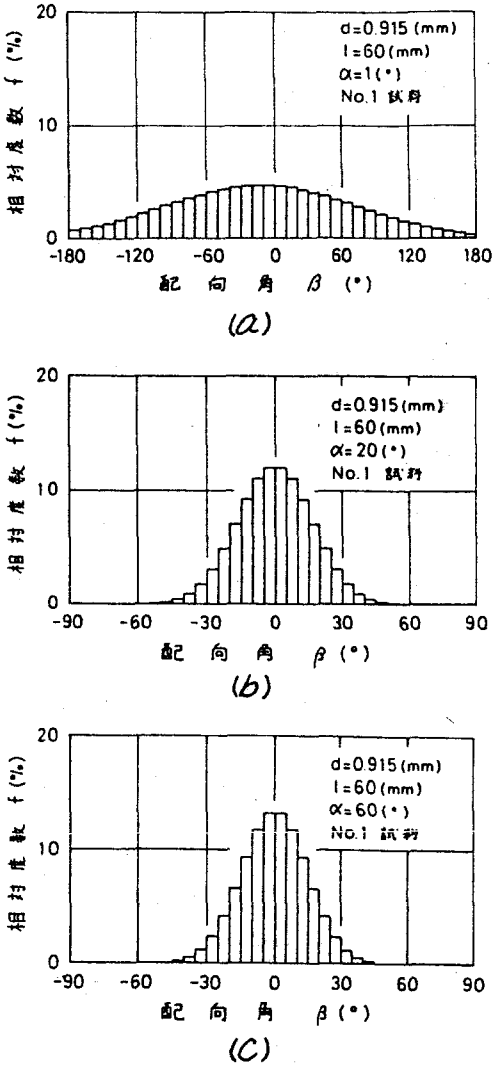


図3.42 線状体の配向（計算結果）

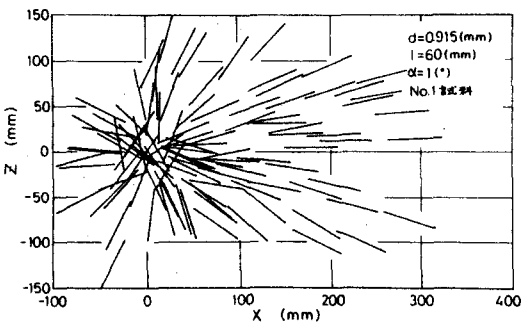


図3.43 線状体の落下状態

表3.5 X，θの平均値と標準偏差

線状体直径	初期角度	水平方向移動距離		配向角	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
d (mm)	α (°)	$\bar{X}$ (mm)	σ_X (mm)	$\bar{\beta}$ (°)	σ_β (°)
0.571	1	93.2	57.4	-12.8	92.6
	20	178.0	54.2	0.3	17.5
	60	196.1	76.5	5.8	16.9
0.915	1	120.0	79.3	-11.5	84.3
	20	234.9	52.9	0.4	16.3
	60	—	—	-0.1	14.7

l = 60 (mm), No. 1 試料

つぎに，$\alpha=0.571$ (mm)，$\alpha=1°$，$20°$，$60°$の落下点分布を図3.44 (a)～(c)に示す。上述の結果から，初期角度が大きくなるにつれて線状体が運動をおこなう平面のばらつきが小さいので，線状体群が運動することによって発生する流れの影響を大きく受けるようになる。したがって，落下点分布は，初期角度が大きくなるにつれて一様な分布に近づく傾向が見られ，$\alpha=60°$の場合，$X=100\sim320$ (mm) 程度の範囲でほぼ一様な分布になる。また，表3.5から水平方向移動距離Xの標準偏差は，直径あるいは初期角度に対して一定の傾向を示さないことが分かる。

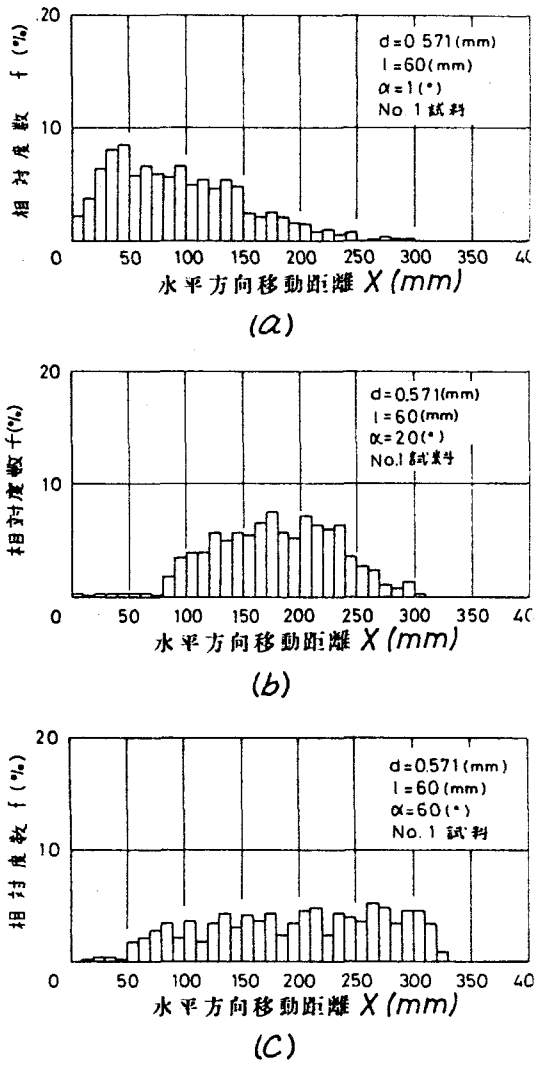


図3.44 線状体の落下点分布

3.10 結 言

本章では，静止流体中を直線の線状体が，複数（2本あるいは3本）で同時に自由落下する場合と100本程度集団で連続的に自由落下する場合について実験的研究をおこない，単一で運動する場合と比較して，線状体が相互に干渉し合いながら運動するとき，その運動状態がどのように変わるかを調べた。また，初期位置での線状体の相対位置，初期角度，直径および線状体の本数が落下特性におよぼす影響を明らかにした。さらに，線状体が単一で運動するとき，その運動に伴なって発生する流れ状態を観察した。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 線状体が単一で運動するとき，背後には軸方向に沿って発達する境界層と伴流が重なり合った流れの領域が発生し，さらに，後端から一対の自由渦が生ずる。また，Re_n が50程度を越えると，伴流は双子渦からカルマン渦へ変化し，流れ状態が大きく変わる。

(2) 線状体が複数で運動する場合，前方の線状体の運動に伴なって発生する流れの影響を受けて，後方の線状体が姿勢および速度を大きく変えながら近づき，衝突し，追い抜くというように相対位置を時々刻々変化させ，相互に干渉し合いながら運動を続ける。

(3) 初期角度が大きいほど，線状体が相互に影響をおよぼし合う度合は強く，しかも，長時間にわたって続く。したがって，運動中の姿勢の変化および速度の変化は大きく，その運動状態は複雑になる。

(4) 初期位置での相対距離が大きい方が，落下開始直後の領域で後方の線状体が受ける前方の線状体の流れの影響は小さい。また，線状体の後端部が流れに入っている場合，落下開始直後の領域で，いったん相対距離は初期位置での場合より大きくなる。したがって，両場合ともに，最初の衝突までの時間は長く，前方の線状体のより先端に近い位置に衝突する傾向がある。

(5) 直径が大きい方が，後方の線状体の角速度および速度が急激に変化し，衝突からつぎの衝突までの時間は短い。これは，単一で運動する場合にも見られる直径が異なることによる落下特性の差ではなく，直径が大きい場合発生するカルマン渦の影響によるものである。

(6) 線状体の本数3の場合，本数の影響を受けるのは，初期位置でもっとも後方に位置する線状体であり，2本の線状体の後方に発生している流れの影響を同時に受けるため，その運動はいっそう複雑になる。

(7) 線状体が複数で運動する場合，自由渦あるいはカルマン渦の影響を受けこ9が減少している領域では，$\dot{x}$は単一で運動する場合より小さく，逆に，9が増大している領域では大きくなる。いっぽう，$\dot{y}$は流れの影響を受けている領域では，つねに大きい。また，両者の差は，$\dot{x}$，$\dot{y}$ともにカルマン渦の影響を受けている場合の方が大きい。

(8) 集団で運動する場合，線状体は，線状体群の後方に発生している流れの影響を受けるため，その平均的な運動状態は，単一で運動する場合と一致しない。また，初期角度が大きくなるにつれて最終落下位置での線状体の配向は良くなり，落下点分布は一様な分布に近づく。

第4章　矩形管内流れ中における線状体の運動

4.1　緒　言

繊維工業の各種工程において繊維あるいは繊維集団を流体輸送する技術は広く応用されており，それに関する研究も，生産性，省力化ならびに製品品質と関連させて数多くおこなわれている。このように応用面で先行している繊維の流体輸送も，その基本的事項，たとえば管内流れ中で繊維がどのような姿勢でどのように運動するか，またその運動が繊維製品の品質にどのように影響するかなどほとんど不明である。

いっぽう，管内流れ中での繊維の運動に関する研究としては，オープンエンド精紡機のコーミングローラとロータ入口間の短いダクト中を空気輸送される繊維の速度を調べたRipka[3]の研究，縮小管を使用して流れ方向に繊維を配列させる方法に関するEdberg[4]の研究，同じく縮小管の代りに，主流を横断する空気ジェットを用いて繊維の配列化を計ったBangert[5]の研究，さらに真直な管路中を気流によって運ばれる繊維の速度，姿勢など，その挙動に関する宇野[6]の研究などがある。しかし，それらはいずれも現象論にとどまり，深く解析的に研究されたものは少ない。

本章では，繊維のもっとも簡単なモデルとして直線の線状体を考え，線状体が単一で低速の矩形管内流れ中を自由落下する場合について実験的研究をおこない，この現象の基本事項を把握し，あわせて第6章で解析的研究をおこなうための基礎データを得ようとするものである。

生産工程では，繊維は気流中および液中で運動する場合が大部分であるが，線状体の観察，実験は水中の方が容易であることから，水中で線状体の落下特性および諸要因の

影響を調べることにした。さらに，静止流体中での線状体の運動との比較もあわせておこなう。

4.2 矩形管内流れ中における線状体の落下実験装置

実験装置の概要を図4.1に示す。貯水タンク⑨に貯えられた水は，ポンプ⑪によりポンプ流量調節用バルブ⑫を経てヘッドタンク①へ導かれる。ヘッドタンクにはオーバーフロー装置が備わっており，位置水頭が一定に保たれる。ヘッドタンクを出た水は流量測定用オリフィス②を通り，流量調節用バルブ④を経て整流部⑤へ入る。整流部では整流格子⑯および整流用金網⑮により，下流側の整流用金網から流出した流れはほぼ一様な流れとなり，線状体が落下運動をおこなうテスト部⑥へ入る。テスト部を通過した流れは，流量調節用バルブ⑧を経て，ふたたび貯水タンクへ排出される。なお，ヘッドタンクでオーバーフローした水も，排水パイプ⑬を通り貯水タンクへ排出される。このように，本実験装置の流れは循環型になっている。

流量調節は流量調節用バルブ④および⑧でおこない，この流量に対応する貯水タンクからヘッドタンクへの送水量は，ポンプ用バルブ⑫により調節する。

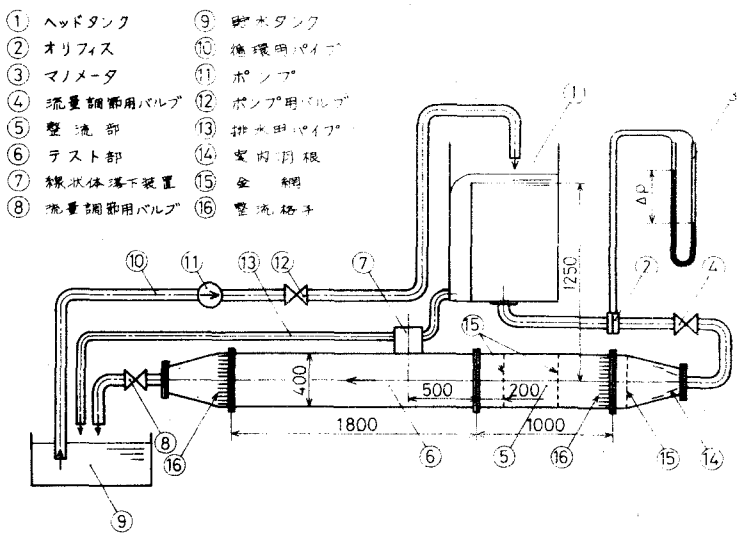


図4.1 実験装置概要

また，オリフィスの差圧は，四塩化炭素を用いたU字管マノメータ③で測定する。

テスト部は，断面内側寸法が幅100(mm)，高さ400(mm)で，厚さ10(mm)の透明アクリル板で製作した。また，4.3節"線状体の落下実験方法"で述べるように，線状体の運動を調べるためにマルチストロボ撮影をおこなうので，撮影の背景となる後面には，ストロボランプの光が反射して線状体の落下状態が不鮮明にならないよう，つや消し黒色塗装した。

線状体落下装置⑦は，テスト部上側に隣接しており，テスト部である矩形管内部の流路とは切り離されている。これは，流れを落下装置が乱さないようにするためである。線状体落下装置の底面とテスト部上面には，4×65(mm)のスリットが設けてあり，落下装置とテスト部はこのスリットでつながっているだけである。

4.3 矩形管内流れ特性

整流部を通過した流れはほぼ一様流になっているので，線状体が運動するテスト部では，流れが発達している(テスト部は流れの助走域である。)と考えられる。そこで，線状体の落下実験をおこなう前に，テスト部での流速分布を調べる必要がある。

4.3.1 矩形管内流れの流速分布測定方法

本実験では，矩形管内の平均流速は，最大80(mm/s)と低速であるため，ピトー管等による測定は困難であり，流速分布の測定はトレーサ法でおこなった。トレーサ粒子としてアルミ微粉末およびポリスチレンビーズを用い，一定の露出時間，一定の露出間隔でトレーサ粒子の描く軌跡を

撮影し，その軌跡の長さおよび間隔から流速分布を求めた。

流速分布測定装置の概要を図4.2に示す。本実験装置の座標系としては，矩形管断面の中心を原点(O)とし，鉛直上向きにY軸，水平面内で流れの向きにX軸，流れと直角方向にZ軸を定めた。

図4.2において，電球⑦の光を幅1(mm)，長さ100(mm)の2重スリット④により平行光線にし，XZ面に平行に，テスト部①の前面から投入する。その際，1/4穴あき回転円板⑤を2重スリットの間で，モータ⑨で回転させ，光が円板の穴を通るとき以外はしゃ断されるようにする。したがって，光が断続的にテスト部に当たり，トレーサ粒子は断続的に光る。また，円板の回転数を変更することにより，露出時間および露出間隔を変えることができる。

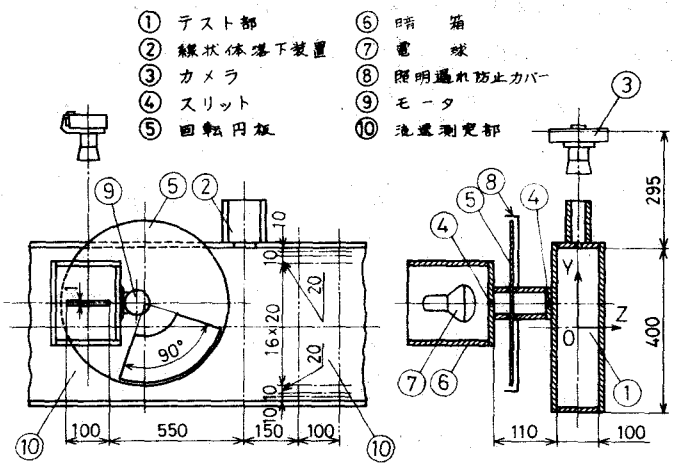


図4.2 矩形管内流速分布測定装置概要

撮影では，実験室全体を暗室とし，線状体が運動をおこなうと考えられる領域の上流側，すなわち初期位置から上流へ150～250(mm)の100(mm)の範囲，および下流側，すなわち初期位置から下流へ550～650(mm)の100(mm)の範囲の2箇所の測定部⑩で，電球，回転円板，スリットが一体となった光源部を矩形管高さ方向(Y方向)に移動させ，壁面近傍10(mm)間隔，中央部20(mm)間隔，計21箇所の各位置におけるトレーサ粒子の描く軌跡を矩形管上方からカメラ③で撮影した。これによって，上述の2箇所の測定部での流速分布を3次元的に求めることができた。

流速分布の測定は，平均流速$U=20(mm/s)$と$80(mm/s)$についておこなった。これは，線状体の落下実験を$U=20$, 40, 60, 80(mm/s)でおこなうため，その最小および最大の流速分布を知ることで，その間の流速に関しても予測できると判断したからである。なお，円板の回転数は$U=20(mm/s)$の場合，$N=60(r.p.m.)$，$U=80(mm/s)$の場合，$N=120(rpm)$とした。

4.3.2 矩形管内流れの流速分布算出方法

トレーサ法で流速分布を測定した際に撮影されたトレーサ粒子の軌跡の一例を図4.3に示す。この図は，$U=20(mm/s)$，測定位置はテスト部の上流側で，矩形管底面からの高さが40(mm)の場合である。この図で，短い線で写っているのが，トレーサ粒子の描く軌跡である。穴あき回転円板により光が断続的に当たるため，このような一直線上にならんだ短い線となって撮影されたのである。また，上下両端に直線で写っているのは，流路を構成しているアクリル板である。

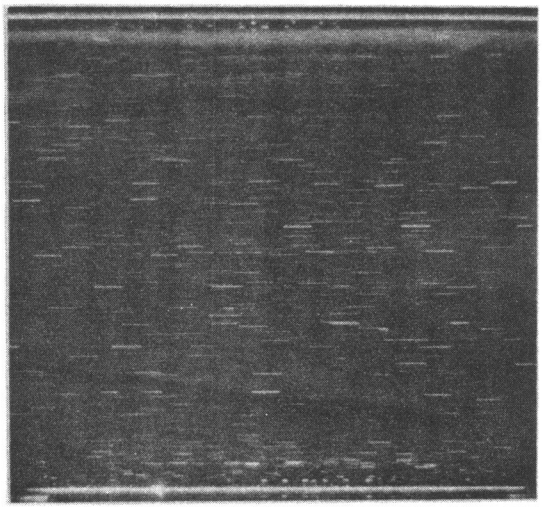


図4.3 矩形管内流速分布撮影例

つぎに，撮影されたトレーサ粒子の描く軌跡を用いて流速を求める方法について述べる。

図4.4にトレーサ粒子の軌跡の模式図を示す。Hは流路の幅であり，実際の長さは4.2節で述べたように100(mm)である。ℓはトレーサ粒子が回転円板1回転当りに描く軌跡の長さである。なお，ℓ'はトレーサ粒子が光っている長

Zで，回転円板の穴の中心角が90°であるから，$h' = h/4$ となり，h の代りに h' を用いても流速が計算できる。また，Zは壁面からトレーサ粒子の軌跡までの距離である。

HとZ（あるいは h'）を写真面上で測定すれば，次式から流速 u (mm/s) を求めることができる。

$$u = (5/3)\,h \cdot N/H \qquad (4.1)$$

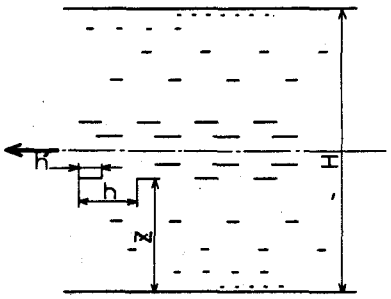


図4.4 トレーサ粒子軌跡の模式図

ただし，Nは円板回転数 (rpm) であり，h，H の単位はmmである。

また，壁面からトレーサ粒子までの距離Zは，次式から本実験装置で設定したZ座標に換算できる。

$$Z = 100\,Z/H - 50 \qquad (4.2)$$

以上のようにして，Zの位置での流速 u を $-50 \leqq Z \leqq 50$ (mm) の範囲で数十点求めることによって，その写真の位置におけるZ方向の流速分布が得られる。そこで，図4.2に示した $-200 \leqq Y \leqq 200$ (mm) の範囲内の各測定位置で，Z方向の流速分布を求めると，流速分布が3次元的に得られる。

4.3.3 矩形管内流れの流速分布測定結果

平均流速 $U = 80$ (mm/s) の場合の測定結果を図4.5，4.6に示す。なお，各位置での流速は平均流速Uで無次元化し，位置Y，Zはそれぞれの最大値（$Y_{max} = 200$ (mm)，$Z_{max} = 50$ (mm)）で無次元化し，＊の印を付けて表わす。

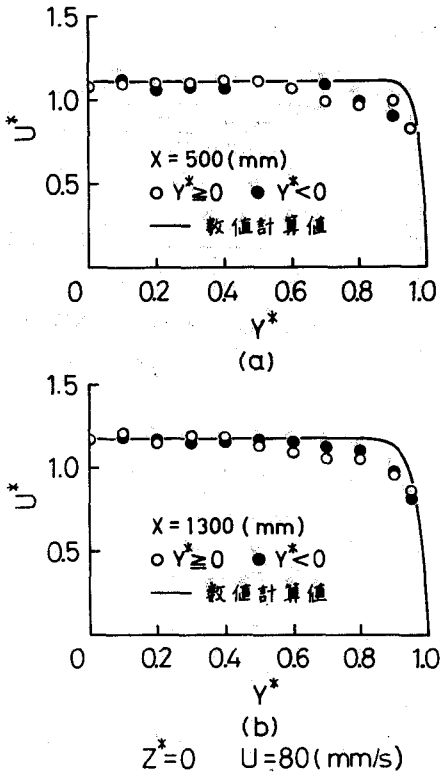


図4.5 矩形管幅方向流速分布

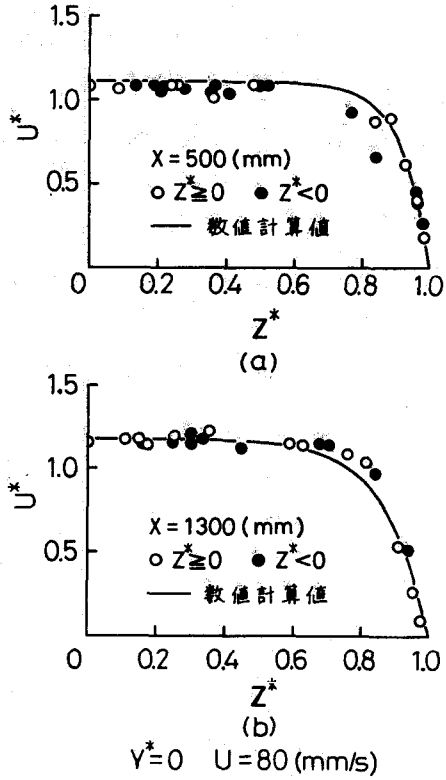


図4.6 矩形管高さ方向流速分布

図4.5は，矩形管高さ方向の中心 $Y^*=0$ における幅方向の流速分布を示し，(a)は上流側の測定部，(b)は下流側の測定部での結果である。また，○印は $0 \leqq Z^* \leqq 1$，●印は $-1 \leqq Z < 0$ における流速測定値である。

Y方向の各位置で，幅方向の流速分布が求まっているので，矩形管幅方向の中心 $Z^*=0$ の位置の値だけ抜き出して，$Z^*=0$ における高さ方向の流速分布を作成した結果が図4.6である。(a)は上流側測定部，(b)は下流側測定部での結果である。

図4.5および図4.6において，流速分布はXY面，XZ面に対してほぼ対称となり，上流側測定部では，流速は $-0.6<Z^*<0.6$ および $-0.6<Y^*<0.6$ の範囲でほぼ一様となり，下流側測定部では，$-0.4<Z^*<0.4$ および $-0.5<Y^*<0.5$ の範囲でほぼ一様になる。また，矩形管中心部の流速（最大流速）は，上流側で約1.08であり，下流側で約1.18となり，線状体が運動をおこなうテスト部で，わずかであるが流れが発達していることが分かる。なお，ここには記載しないが，平均流速 $U=20$(mm/s)の場合，流速が小さいため境界層の発達が早く，最大流速は上流側で約1.15，下流側で約1.35となり，$U=80$(mm/s)の場合に比べて大きい。

4.3.4 矩形管内流れの流速分布の数値計算

[20]

矩形管内の助走域での層流の理論解析に関しては，Hanが境界層方程式の慣性項を線形化するという手法に基づいて計算している。第6章において，矩形管内の助走域での線状体の運動を数値計算する場合，流速分布が必要になるので，ここでは，このHanの方法について述べるとともに数値計算により流速分布を求め，測定結果と比較してこの計算式が十分使用できることを示しておく。

図4.7に示すように，矩形管断面中心を原点(O)とし，軸方向にZ軸，高さ方向にY軸，幅方向にX軸を定め，矩形管の幅を2b，高さを2aとする。

ここで，流速を $\vec{v}(u,v,w)$ とすると，流体の運動方程式はナビエーストークスの式で表わされる。

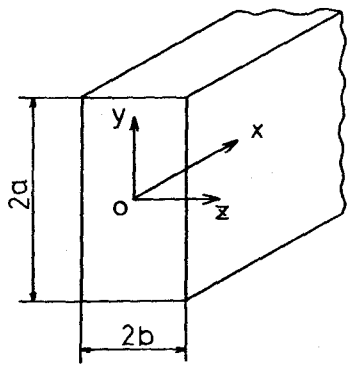


図4.7 座標系

$$\left.\begin{aligned} \partial u/\partial t + u\,\partial u/\partial x + v\,\partial u/\partial y + w\,\partial u/\partial z &= -\frac{1}{\rho}\partial p/\partial x + \nu\Delta u \\ Dv/Dt &= -\frac{1}{\rho}\partial p/\partial y + \nu\Delta v \\ Dw/Dt &= -\frac{1}{\rho}\partial p/\partial z + \nu\Delta w \end{aligned}\right\} \quad (4.3)$$

また，連続の式は

$$div\ v = 0 \qquad (4.4)$$

となる。

そこで，(4.3)式を境界層内において簡単化するために，各項のオーダーを比較すると，定常境界層方程式がつぎのように求まる。

$$\left.\begin{aligned} u\,\partial u/\partial x + v\,\partial u/\partial y + w\,\partial u/\partial z &= -\frac{1}{\rho}\partial p/\partial x + \nu(\partial^2 u/\partial y^2 + \partial^2 u/\partial z^2) \\ \partial p/\partial y = 0 \ ,\ \partial p/\partial z &= 0 \end{aligned}\right\} \quad (4.5)$$

(4.4)式と(4.5)式の連立微分方程式を矩形管断面にわたって積分するとKármánの運動量方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\int_A u^2\,dy\,dz = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx}\int_A dy\,dz + \nu\int_A(\Delta u)\,dy\,dz \qquad (4.6)$$

ただし，ラプラスの演算子は $\Delta \equiv \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ であり，以下ではこのように用いる。

$$\int_A u\,dy\,dz = 4ab\,U \qquad (4.7)$$

(4.6)式の解は境界層方程式(4.5)の第1次近似解となる。この積分方程式の解は，流れを境界層とポテンシャル流れの領域に分割し，壁面で流速は0，両領域の境界で流速が

滑らかに接続するという条件の基で，Shiller および Sparrow によって得られている。しかし，平行平板間の流れおよび円管内の流れに対しては，境界層とポテンシャル流れの領域に分割することは容易であるが，他の断面形状を有する管路の場合，流れを２つの領域に分割することは困難である。そこで，この場合には，Langhaar がおこなった慣性項を $V\beta^2 u$ で置き換えることによって，非線形方程式を線形化する手法が有利である。したがって，(4.5)式はつぎのようになる。

$$\partial^2 u/\partial y^2 + \partial^2 u/\partial z^2 = \beta^2 u + \frac{1}{\mu} dp/dx \qquad (4.8)$$

ただし，　$\beta = \beta(x)$

この線形化の正当性は Langhaar によって検討されている。

(4.8)式の解は，$\beta = 0$ のとき十分発達した流速分布を表わし，$\beta = \infty$ のとき一様な流速分布を表わすことが分かる。また，(4.8)式を用いると助走域における境界層厚さを決める必要がないという点が有利となる。

(4.8)式を解くために，まず，dp/dx および u をつぎのように書く。

$$\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx} = \left(\frac{16}{\pi^2}\right)\left(\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx}\right)\sum_{m,n=1,3,5\cdots}^{\infty}\left(\frac{1}{mn}\right)(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}$$

$$\times \cos\left(\frac{m\pi y}{2a}\right)\cos\left(\frac{n\pi z}{2b}\right) \qquad (4.9)$$

ただし，$|y| < a$ ，$|z| < b$

また，u は次式のようにフーリエ級数に展開する。

$$u = \sum_{m,n=1,3,5\cdots}^{\infty} C_{mn}\cos(m\pi y/2a)\cos(n\pi z/2b) \qquad (4.10)$$

この式は，境界条件 $|y| = a$ ，$|z| = b$ で $u = 0$ を満足して

いる。(4.9)式と(4.10)式を(4.8)式へ代入すると C_{mn} が求まり，したがって，u は次式となる。

$$u=-\left(\frac{16}{\pi^2}\right)\left(\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dx}\right)\sum_{m,n=1,3,5\cdots}^{\infty}(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}\cos\left(\frac{m\pi y}{2a}\right)\times\cos\left(\frac{n\pi z}{2b}\right)\Big/\, mn\left[\left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2+\beta^2\right] \tag{4.11}$$

ここで，連続の式(4.7)を用いて圧力勾配 dp/dx を消去するために，u を矩形管断面にわたって積分すると，平均流速 U は

$$U=-\left(\frac{16}{\pi^2}\right)\left(\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dx}\right)\frac{4}{\pi^2}\sum_{m,n=1,3,5\cdots}^{\infty}\left[m^2n^2\left\{\left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2+\beta^2\right\}\right]^{-1} \tag{4.12}$$

となり，u/U は次式で表わされる。

$$\frac{u}{U}=\left(\frac{\pi^2}{4}\right)\left[\sum_{m,n=1,3,5\cdots}^{\infty}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}\cos(m\pi y/2a)\cos(n\pi z/2b)}{mn\left[m^2+n^2\gamma^2+(2\beta a/\pi)^2\right]}\right]\Big/\left[\sum_{m,n=1,3,5\cdots}^{\infty}\frac{1}{m^2n^2\left[m^2+n^2\gamma^2+(2\beta a/\pi)^2\right]}\right] \tag{4.13}$$

ただし，$\gamma=a/b$

(4.13)式で表わされる流速 u はつぎの条件を満足している。

(a) 連続の式

(b) 壁面上で流速は0である。

(c) $\beta=\infty$ で一様な流速分布になる。

(d) $\beta=0$ で十分発達した流速分布になる。

(e) (c)から(d)まで滑らかに遷移する。

つぎに，$\beta(x)$を求める方法について考える。
まず，入口部での条件は

$$x=0 \quad ; \quad u/U=1 \text{ あるいは } \beta=\infty \qquad (4.14)$$

となり，十分発達した流れに対しては

$$x=\infty \quad ; \quad u/U=(u/U)_{est} \text{ あるいは } \beta=0 \qquad (4.15)$$

ただし，$(u/U)_{est}$は十分発達した場合の流速を表わす。

となる。
いっぽう，境界層方程式(4.5)は，$y=z=0$（矩形管の断面中心線上）で

$$u_0 \partial u_0/\partial x = -\frac{1}{\rho} dp/dx + \nu (\Delta u)_0 \qquad (4.16)$$

u_0；矩形管中心線上の流速

となり，断面にわたって積分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\int_A (u_0^2/2)\,dy\,dz = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx}\int_A dy\,dz + \nu\int_A (\Delta u)_0\,dy\,dz \qquad (4.17)$$

(4.6)式から(4.17)式を辺々引くと

$$\frac{\partial}{\partial x}\int_A (u^2-u_0^2/2)\,dy\,dz = \nu\int_A \{\Delta u-(\Delta u)_0\}\,dy\,dz \qquad (4.18)$$

(4.18)式の積分はβのみの関数になる。したがって，それぞれ次式のようにおく。

$$I_1(\beta) = \int_A (u^2-u_0^2/2)\,dy\,dz \qquad (4.19)$$

$$I_2(\beta) = \left\{ V \int_A [\Delta U - (\Delta U)_0] dy dz \right\}^{-1} \qquad (4.20)$$

(4.18)式～(4.20)式から

$$x = \int_{\beta=\infty}^{\beta} I_2 d(I_1) \qquad (4.21)$$

となり，(4.21)式からxとβの関係が求まる。

また，(4.13)式の中の2重の総和（$m, n = 1, 3, 5 \cdots \infty$）は単一の総和（$n = 1, 3, 5 \cdots \infty$）の形に直すことができ，(4.13)式は次式となる。

$$u/U = F_1 / F_2 \qquad (4.22)$$

ただし，

$$F_1 = \frac{1}{\beta^2 a^2}\left(\frac{\cosh \beta y}{\cosh \beta a} - 1\right) + \sum_{n=1,3,5\cdots}^{\infty} \frac{16(-1)^{\frac{n-1}{2}} \cos(n\pi y/2a)}{\pi^3 n\left[n^2 + (2\beta a/\pi)^2\right]} \times \frac{\cosh\left\{(\pi/2r)\left[n^2 + (2\beta a/\pi)^2\right]^{1/2} z/b\right\}}{\cosh\left\{(\pi/2r)\left[n^2 + (2\beta a/\pi)^2\right]^{1/2}\right\}} \qquad (4.23)$$

$$F_2 = \frac{1}{\beta^2 a^2}\left(\frac{\tanh \beta a}{\beta a} - 1\right) + \sum_{n=1,3,5\cdots}^{\infty} \frac{32}{\pi^4 n^2\left[n^2 + (2\beta a/\pi)^2\right]} \times \frac{\tanh\left\{(\pi/2r)\left[n^2 + (2\beta a/\pi)^2\right]^{1/2}\right\}}{(\pi/2r)\left[n^2 + (2\beta a/\pi)^2\right]^{1/2}} \qquad (4.24)$$

したがって，(4.21)式からxとβの関係が求められるので，矩形管軸方向の任意の位置xに対応するβの値を用いて，(4.22)式～(4.24)式で流速分布を計算すれば，その位置での流速分布が求められる。

つぎに，流速分布を数値計算する手順について述べる。

まず，矩形管の縦横比 $\gamma (= a/b)$ に対して，つぎに示す手順で数値計算をおこないχとβの関係を求める。

(1) 無次元流速を表わす (4.22) 式～(4.24) 式のβに一連の数値を与える。

(2) (4.19) 式，(4.20) 式で積分 $I_1(\beta)$ と $I_2(\beta)$ を計算する。

(3) βをパラメータにして $I_1(\beta)$ と $I_2(\beta)$ の関係を図示する。

(4) (4.21) 式から数値積分によりχの値を求める。

すなわち，図4.8に示すように，$\beta=\infty$ からβまでの範囲内の $I_1(\beta)$ と $I_2(\beta)$ の関係を表わす曲線の下の面積が，βの値に対応するχの値を表わす。

以上のようにして，χとβの関係を求め，(4.22) 式～(4.24) 式から任意の位置χにおける流速分布を数値計算した。

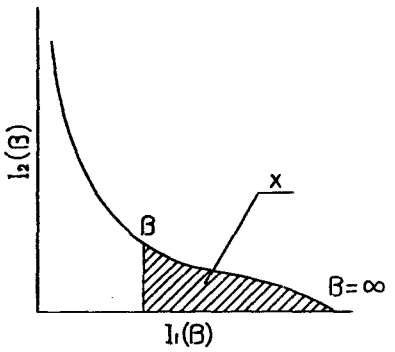


図4.8 χとβの関係

数値計算は，測定結果と比較するために，流速測定部の中心，すなわち線状体の初期位置から上流へ200(mm)の位置および下流へ600(mm)の位置に対しておこなった。(図4.2参照) その際，4.2節で述べたように，整流部の下流側の整流用金網から流出した流れはほぼ一様となっているので，この位置を矩形管の入口部(境界層が発達を始める位置)と考えた。したがって，数値計算をおこなった位置は，$\chi=500$ (mm) および $\chi=1300$ (mm) である。(図4.1参照)

また，矩形管の縦横比は $\gamma=4.0$，水の動粘性係数は流速測定時の水温25(℃)に対する値 $\nu=0.893$ (mm^2/s) とし，平均流速 $U=20, 40, 60, 80$ (mm/s) について数値計算をおこなった。

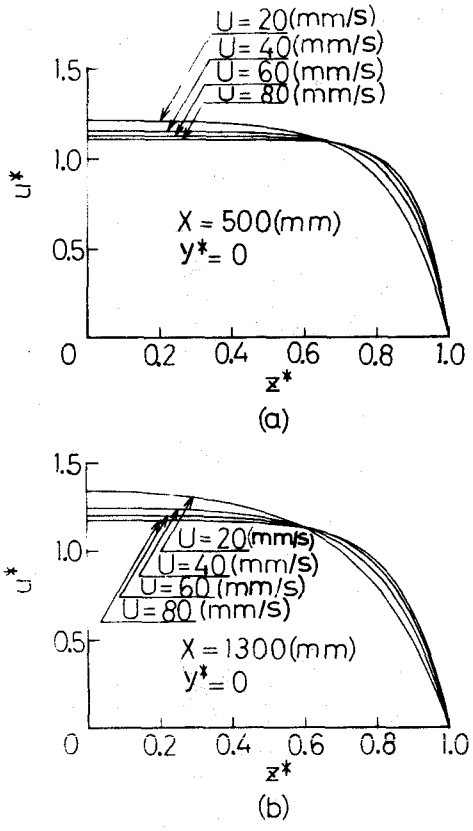


図4.9 矩形管幅方向流速分布

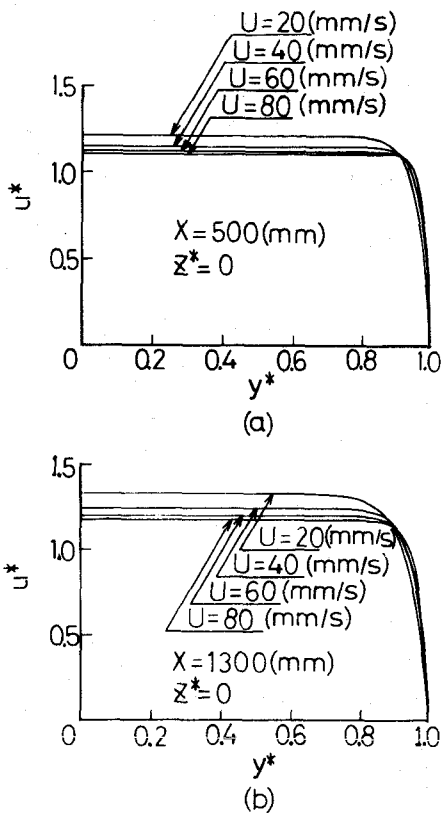


図4.10 矩形管高さ方向流速分布

計算結果を図4.9，4.10に示す。なお，これらの図において，流速およびその位置は無次元化し，＊の印を付けて表わしている。図4.9は矩形管高さ方向の中心$y^*=0$における幅方向の流速分布を示し，図4.10は矩形管幅方向の中心$z^*=0$における高さ方向の流速分布を示している。

平均流速が小さいほど，境界層の発達が早く，最大流速は，$U=20$(mm/s)の場合，$x=500$(mm)で1.22，$x=1300$(mm)で1.34，$U=80$(mm/s)の場合，1.11および1.18となる。また，矩形管の幅は高さに比べて小さいため，境界層

の発達は幅方向の方が早いことが分かる。

ここで，計算結果と測定結果の比較をおこなう。すでに，4.3.3項に記載した図4.5，4.6に計算結果と測定結果が比較してある。これらの図において，実線が計算結果である。Sparrowの報告[21]によると，Hanの方法は$(x/De)/Re$（De；相当直径$(=4ab/(a+b))$，Re；レイノルズ数$(=UDe/\nu)$）が小さい領域，すなわち流れがあまり発達していない領域で実験結果と良く一致することが確認されている。

$U=80$ (mm/s)は，4種類の平均流速の中で$(x/De)/Re$がもっとも小さい場合である。図4.5から，矩形管幅方向の流速分布に関しては，計算結果と測定結果がほぼ一致している。いっぽう，図4.6において，高さ方向の流速分布に関しては，Y^*が0.6程度までは両者はほぼ一致しているが，Y^*が0.6以上になると測定結果の方が小さくなる。

以上のように，計算結果と測定結果はほぼ一致することが確認できたので，第6章において矩形管内の助走域での線状体の運動を数値計算する場合，流速分布はこの項で述べたHanの方法により計算する。

4.4 矩形管内流れ中における線状体の落下実験方法

線状体の落下特性として，重心の軌跡，速度および姿勢を考え，流速，線状体の比重量，長さ，直径および初期角度が落下特性におよぼす影響を調べた。

4.4.1 線状体の落下実験方法

テスト部における所要の流量は，オリフィスの差圧が所定の値になるように，2個の流量調節用バルブおよびポンプ用バルブを調節することによって得た。（図4.1参照）

なお，オリフィスは前もって重量法により検定をおこな

い，最小2乗法で流量とオリフィスの差圧の関係を求めた。また，所要の流量に対応する貯水タンクからヘッドタンクへの送水量をポンプ用バルブで調節し，ヘッドタンク内で適度なオーバーフローが得られるようにした。

上記の方法で流量を調節し，流れが定常状態になった後，線状体を落下させ，運動状態をマルチストロボ撮影した。

図4.11に撮影概要を示す。第2章で述べたように，直線の線状体は静止流体中でほぼ一平面内で運動するので，矩形管内流れ中でも線状体はほぼ一平面内で運動することが予想されるが，それを確認する目的で管路上方からもNO.2カメラ⑥で撮影した。すなわち，管路側方（NO.1カメラ⑤）と上方の直角2方向からのマルチストロボ撮影により2枚のフィルム面上に運動状態を記録した。

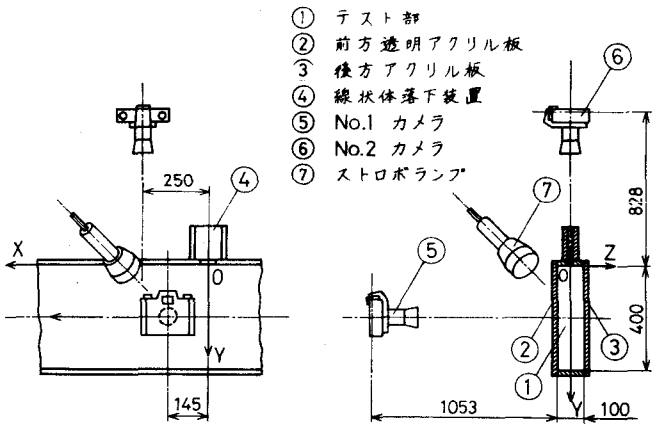


図4.11　線状体の撮影概要

また，矩形管底面の外側に落下点測定用グラフを取付け，線状体の最終落下点位置を調べた。なお，本実験装置の座標系は，流速分布測定の場合と異なり，初期位置での線状体の重心を通る流れに垂直な鉛直面と矩形管上面の内側の幅方向の中心線の交点を原点（0）とし，水平方向流れの向きにX軸，鉛直下向きにY軸，管路幅方向にZ軸を定めた。

撮影では，実験室全体を暗室とし，線状体の落下時間を考慮して，運動状態が十分わかるような写真間隔を得るため，実験条件によりストロボ発光数を$S = 300 \sim 1020$ (cpm) の範囲で変化させた。

線状体落下装置の概要を図4.12に示す。2枚の透明塩化ビニール板②の間には落下初期角度設定用円グラフ⑤が取付けられており，円グラフにより所要の初期角度αに線状体⑩を設定し，ピンセット⑦で塩化ビニール板上の固定する。ピンセット押上げ用ネジ③を回してピンセットを押上げると，線状体が落下し始め，スリット②を通過しテスト部内へ落下する。塩化ビニール板は落下装置上方へスライド式に取りはずすことができ，線状体の取付けを容易にしている。

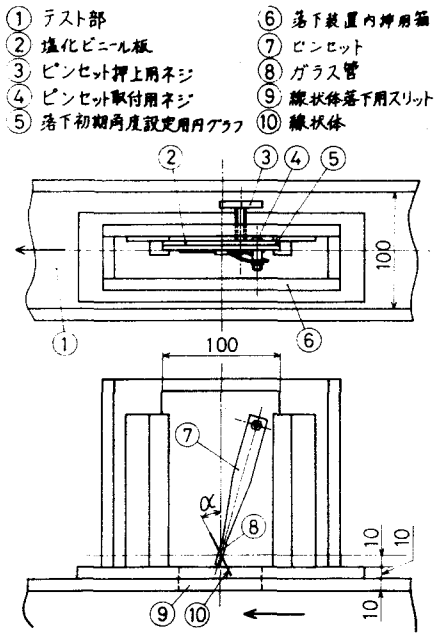


図4.12 線状体落下装置概要

実験には，比重量の影響を調べるため，鉛筆の芯（NO.1試料）とピアノ線（NO.2試料）の2種類の試料を用いた。それらの試料条件および実験条件を表4.1に示す。この実験では，平均流速U，線状体の比重量ρ_s，長さℓ，直径dおよび初期角度αがおよぼす影響について調べた。初期角度αとは初期位置での線状体の軸方向と鉛直線とのなす角度であり，図4.12に示したように流れの向きと逆向きである。これは，線状体の先端が流れ中に入る瞬間に，流れによりその姿勢を大きく変えられるため，流れの向

表4.1 試料および実験条件

試料番号	試料名	線状体直径 d(mm)	線状体長さ l(mm)	線状体比重量 γ_s(g/cm³)	落下初期角度 α(°)	平均流速 U(mm/s)
1	鉛筆芯	0.378	30 60	1.793	0	20
		0.569	15 30 45 60	1.627	2	40 60
		0.720	30 60	1.641	5	80
		0.912		1.562		
2	ピアノ線	0.217	30 60	7.098	0	20
		0.322	15 30 45 60		2	40 60
		0.428	30 60			80
		0.527				

きに初期角度を設定すると，鉛直に近い姿勢での運動状態がは握できなくなるからである。以上の実験は，図4.13に示すように，初期位置おける水平面内での線状体の軸方向と流れの方向のなす角度をβとすると，すべてβ=0°でおこなった。

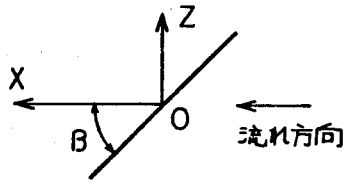


図4.13 水平面内での線状体の傾き

つぎに，初期位置において線状体が流れの方向に対して傾いている場合の運動状態を調べるため，$d=0.569$(mm)，$\ell=30,60$(mm)のNO.1試料と$d=0.322$(mm)，$\ell=30,60$(mm)のNO.2試料を用いて初期角度$\alpha=90°$，$\beta=45°$で実験をおこなった。

以上，2種類の実験では，線状体重心の初期位置は矩形管幅方向の中心（XY面上）である。

また，合わせて，$d=0.569$(mm)のNO.1試料と$d=0.322$(mm)のNO.2試料，いずれも$\ell=15,30,45,60$(mm)，を用いて$\alpha=0.5$で静止流体中での実験をおこない，流れ中での場合と比較した。

試料は，長さのバラツキを小さくする目的とその端面を軸に直角にする目的で端面を研磨布で仕上げた。また，長さ，直径，比重量はランダムに抽出した10本の試料に対して測定をし，その平均値をもってそれらの値とした。

実験では，各実験条件につき15本程度の線状体を落下させ，最終落下位置での線状体重心の水平方向移動距離の平均値を求め，その値に近い実験を2個ないし3個選び，それらの写真から線状体両端の座標を読取る。読取った座標は以下で述べる方法でX，Y座標に変換し，第2章の2.9.3項で述べた方法により落下特性を求め，それらを図示し，検討した後，その中の1つを実験データとして採用した。

4.4.2 写真面上から真の落下運動を求める方法

テスト部上方からの撮影により，線状体はほぼXY面内で運動することが確認できたので，静止流体中での場合のように被写体距離の変化に対する修正をおこなう必要はなかった。しかし，流れを乱すため，写真から線状体の運動を求めるために必要なX，Y座標を表わす目印をXY面内に設置することができない。そこで，図4.14に示すように，テスト部前面のアクリル板上に長方形ABCDの目印を設けた。この目印のうち，Aを原点（O′），ABとADをx′軸，y′軸とし，写真から線状体両端の座標（x'_{i1}，y'_{i1}），（x'_{i2}，y'_{i2}）を読取る。なお，図4.14において，（）内の数値は実際の長さである。

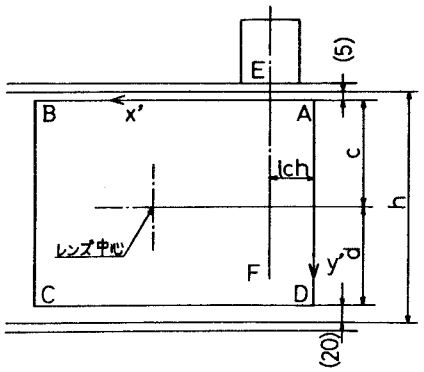


図4.14 写真上の基準位置

x′y′座標をXY座標に変換するためには，XY面とテスト部前面の被写体距離を考慮する必要がある。まず，写真面上でのx′，y′方向の補正値ℓ_{ch}，ℓ_{cv}について考える。XY面およびテスト部前面の被写体距離をL_1，L_2とすると，レンズ中心は矩形管高さ方向の中心（Y=200（mm））と一致しているので，鉛直方向補正値ℓ_{cv}は

$$\ell_{cv} = [195/375 - (200/375)(L_2/L_1)](C+\alpha) \quad (4.25)$$

となり，写真から$(C+\alpha)$を読取れば，ℓ_{cv}が求まる。

いっぽう，水平方向補正値ℓ_{ch}は，実験に際して，Y軸と一致させて設けた目印EFを$U=0$の状態で撮影しておき，その写真から読取る。

したがって，線状体両端の実際の座標は

$$A = 375 / [(L_2/L_1)(C+\alpha)] \tag{4.26}$$

とすると，

$$\left.\begin{aligned} X_{ij} &= A(x'_{ij} - \ell_{ch}) \\ Y_{ij} &= A(y'_{ij} - \ell_{cv}) \end{aligned}\right\} \tag{4.27}$$

となる。

そこで，この線状体両端の座標から，第２章の２．９．３項で述べた方法により落下特性を求めた。

以上，線状体の落下実験により，流速，線状体の比重量，長さ，直径および初期角度が重心の軌跡，速度および姿勢におよぼす影響を調べることができた。

以下ではその結果について報告する。その際，落下特性は第２章の静止流体中での場合と同じ表現方法とする。

① 軌跡は，重心の水平方向移動距離Ｘと鉛直方向移動距離Ｙの関係で示す。

② 速度は，回転角θと重心の水平方向速度$\dot{X}$および鉛直方向速度$\dot{Y}$の関係で示す。

③ 姿勢は，落下時間tと回転角θの関係で示す。

なお，表および図中の長さは公称長さで記載する。また，初期位置において線状体が流れの方向に対して傾いている場合（$\alpha=90°$，$\beta=45°$）の結果は，５．１１節でノズル内流れ中での結果と比較しながら報告する。

4.5 初期角度の影響

この節では，$\alpha = 0°, 2°, 5°$ 変化させたときの実験結果を基にして，初期角度が落下特性におよぼす影響について調べる。

4.5.1 線状体の落下軌跡

$d = 0.569$ (mm)，$\ell = 30$ (mm) の NO.1 試料を $U = 60$ (mm/s) の流れ中に，$\alpha = 0°, 2°, 5°$ で落下させたときの落下軌跡を図4.15に示す。この図において，線状体は $\alpha = 2°$ の場合のみ描かれており，その時間間隔は $\Delta t = 1/3$ (s) である。また，$\alpha = 0°, 5°$ の場合，線状体重心の落下軌跡のみを示している。

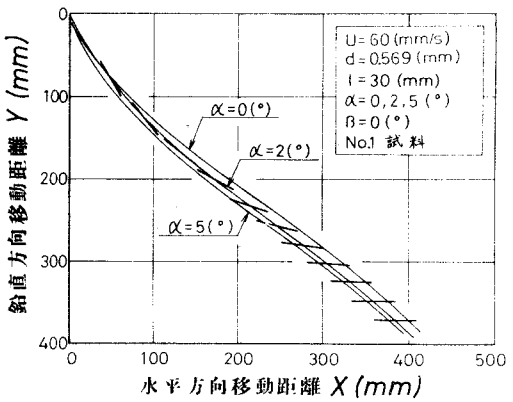


図4.15 落下軌跡におよぼす初期角度の影響

線状体の初期位置は $Y = 0$ の上方 30 (mm) である（図4.12参照）ので，落下装置から流れ中に入るとき，線状体の先端部が流れ中に入り，後端部が落下装置内に残る状態が瞬間的に発生する。そのとき，先端部が流体から抗力を受けるため，線状体は急激に流れの向きに回転する。したがって，$\alpha = 2°$ の場合，線状体がすべて流れ中に入ったときの鉛直方向に対する傾斜角（回転角 θ）は約 $20°$ となっている。その後，線状体は除々に水平方向に姿勢を回転させながら落下し，最終的にその姿勢は水平方向に漸近し，しかも，線状体は水平方向には流速とほぼ同一速度で移動し，鉛直方向には一定速度で落下する。また，重心の落下軌跡は $\theta = 70°$ 付近（$Y = 230$ (mm) 付近）で変曲点を

もつ曲線となる。その後，線状体の姿勢は水平方向に近づき，しかも矩形管内の流速は壁面近くの約40(mm)の領域（境界層内）を除いてほぼ一様であるため，重心の軌跡の接線勾配はほとんど変化しなくなる。やがて，線状体が境界層内へ入ると流速が低下するため，線状体の水平方向速度も減少し，軌跡の接線勾配は増大する。

つぎに，図4.15において，$\alpha=0°$, $2°$, $5°$の落下軌跡を比較すると，重心の軌跡の形は，落下直後の領域を除いてほとんど同じであり，X軸方向またはY軸方向に沿って平行移動すれば三者の曲線はほぼ重なることが分かる。また，重心の軌跡は，$\alpha=0°$の場合がもっとも上方に位置し，$\alpha=2°, 5°$の順番に下方に位置する。この原因について考える。初期角度が大きいほど線状体がすべて流れ中に入ったときの回転角は小さく，すなわち，その姿勢が鉛直方向に近いため，線状体の鉛直方向速度は大きく，水平方向速度は小さくなり，重心の軌跡は下方に位置する。ところが，本実験の場合，流れの発達はゆるやかであり，壁面近くの境界層内を除いて流速の場所的変化はわずかであるので，線状体が運動をおこなう位置が変っても，重心の軌跡の形はほとんど変わらないと考えられる。

以上のことから，初期角度は，落下直後の領域を除き軌跡の形には影響せず，線状体が運動する位置に影響を与える。

4.5.2 線状体重心の速度

$U=60$ (mm/s)，$\ell=0.569$ (mm)のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図4.16，4.17に示す。図には，$\ell=30, 60$ (mm)のデータをプロットしている。

$\dot{X}$は$40°<\theta<45°$で最大値をもつ上に凸の滑らかな曲線になる。すなわち，線状体は$\theta=40°\sim45°$まで水平方向に

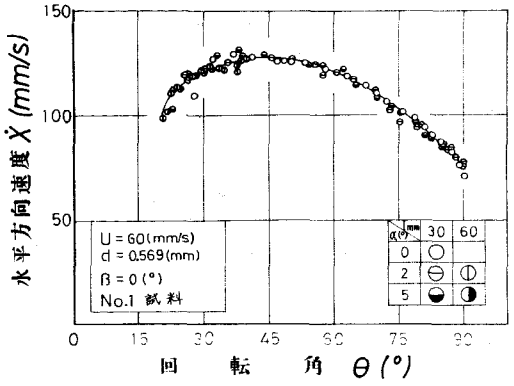


図4.16 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

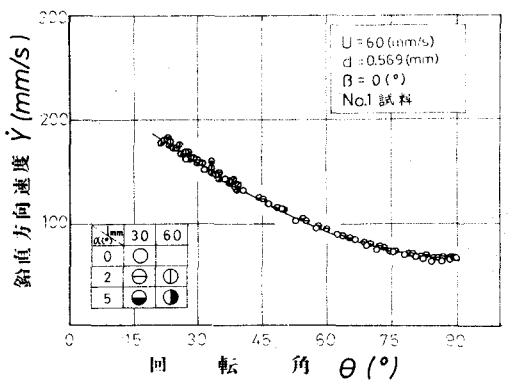


図4.17 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

加速されるが，その後は減速される。いっぽう，$\dot{Y}$ は θ の増加に伴ない単調に減少する。図4.17には，落下直後に線状体が鉛直方向に加速されているときのデータがないが，これは，線状体が流れ中に入った瞬間に，流体から抗力を受けて急激に流れの向きに回転するため，流れ中では線状体はつねに鉛直方向に減速されるからであると考えられる。

また，$\alpha = 0°, 2°, 5°$ の場合を比較すると，この実験条件の場合，$\ell = 30, 60$ (mm) ともに θ と $\dot{X}$ の関係および θ と $\dot{Y}$ の関係は，α にかかわらず同一曲線で表わされ，初期角度の影響は見られない。

ところが，図4.18，4.19に示す $\alpha = 0.912$ (mm) の No.1 試料に対する θ と重心の速度の関係を見ると，$\dot{X}$ に関しては，$\ell = 60$ (mm) の場合，$\theta < 30°$ の領域では α によって差が生じ，α が大きい方が同一回転角での $\dot{X}$ の値は大きい。また，$\dot{Y}$ に関しては，$\ell = 30, 60$ (mm) ともに $\theta < 35°$ の領域では α によって差が生じ，$\ell = 60$ (mm) の場合，α が大きい方が $\dot{Y}$ の最大値は大きく，そのときの θ の値は小さくなる。これは，α が大きい方が線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直方向に近いため，流体から水平方向に受ける抗

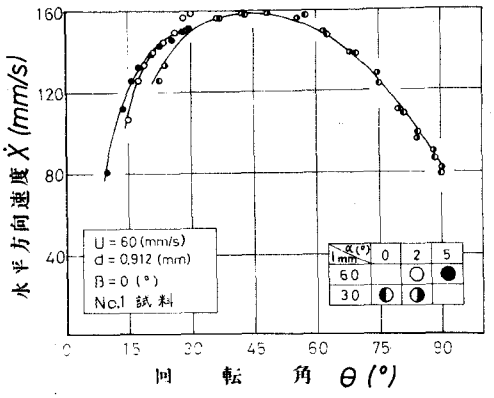


図4.18 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

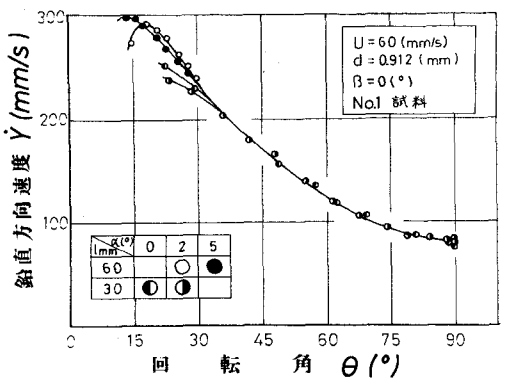


図4.19 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

力が大きくなり，水平方向により大きく加速されるためであり，また，流体から鉛直方向に受ける抗力は小さく，鉛直方向により大きく加速されるためであると考えられる。$\dot{X}$，$\dot{Y}$ が α の影響を受けるこの領域は，図4.23から，落下直後の線状体が急激に回転する領域とその後のわずかな θ の領域である。この結果から，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ は落下後のある θ の領域で α の影響を受けるが，θ の増加に伴ない α の影響は見られなくなり，α にかかわらず同一曲線で表わされる。

以上はNO.1試料に対する結果であるが，つぎに，d_0 が大きいNO.2試料に対する結果を図4.20，4.21に示す。

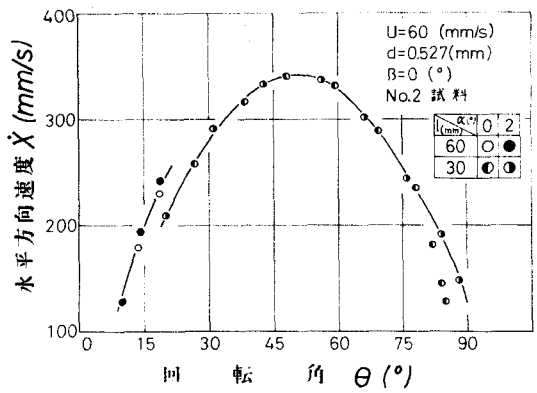


図4.20 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

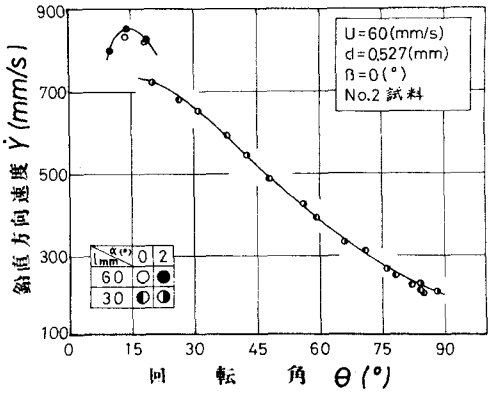


図4.21 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

これらの図において，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに落下直後の領域で，αの影響は受けず，もちろんθの大きい領域でもαの影響は見られない。これはつぎの原因による。他の試料および実験条件がほぼ同じであるNO.1試料に対する結果（図4.17）と図4.21を比較すれば分かるように，NO.1試料の場合と比べて，NO.2試料の場合に$\dot{Y}$がはるかに大きいため，線状体が流れ中に入った瞬間に流体から急激な回転を受けるが，その回転を受ける時間が少ないからである。さらに，I_0が大きいため重心回りの慣性モーメントが大きく，急激な回転を受けにくいということもあり，この程度の初期角度の差の影響が，実験では明確に現われなかったと考えられる。

したがって，初期角度の影響は，$d=0.569$(mm)のNO.1試料のように落下直後の領域で急激な回転を受け易い場合にも，また，$d=0.527$(mm)のNO.2試料のように急激な回転を受けにくい場合にも，現われにくく，$d=0.912$(mm)のNO.1試料のように，前述の2つの場合の中間程度の回転を受ける場合に現われ易い。

4.5.3 線状体の姿勢

$U=60$(mm/s)，$d=0.569$(mm)，$\ell=30$(mm)のNO.1試料のtとθの関係を図4.22に示す。すでに述べたように，線状体が流れに入った瞬間に流体から抗力を受けるため，線状体は流れの向きに急激に回転するが，その後は除々に回転し，$\theta=90°$に漸近し，もっとも

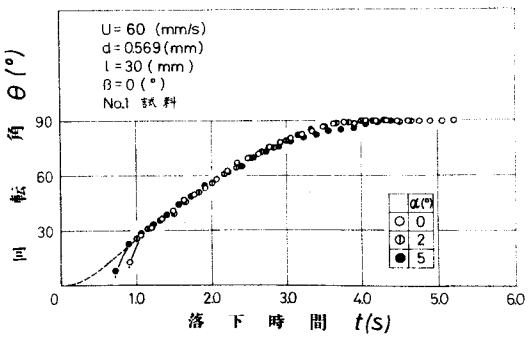


図4.22 姿勢におよぼす初期角度の影響

安定した姿勢になる。また，αが小さい場合の曲線を横軸（落下時間軸）に沿って平行移動すると，流れ中に入った瞬間の急激な回転の領域を除き，tとθの関係はαにかかわらず同一曲線で表わされることが分かる。図4.22は平行移動した後の図である。したがって，αの影響が現われるのは，落下直後の急激な回転の領域だけであり，αが小さいほど，この急激な回転は大きくなる。また，図中の破線部は，静止流体中での線状体の姿勢の変化を基にして外挿した曲線であり，後に，流速の影響を示す4.9.3項で述べるが，落下直後の急激な回転の領域を除き，流速に関係なく線状体の姿勢はこの破線に基づいて変化する。

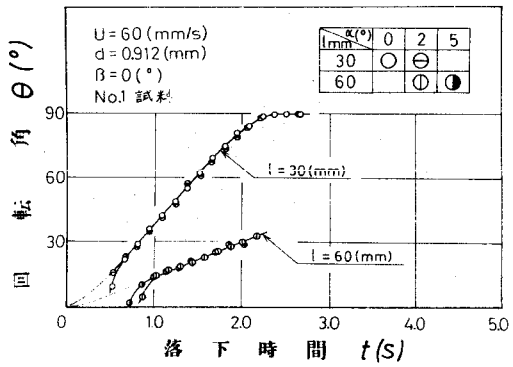


図4.23　姿勢におよぼす初期角度の影響

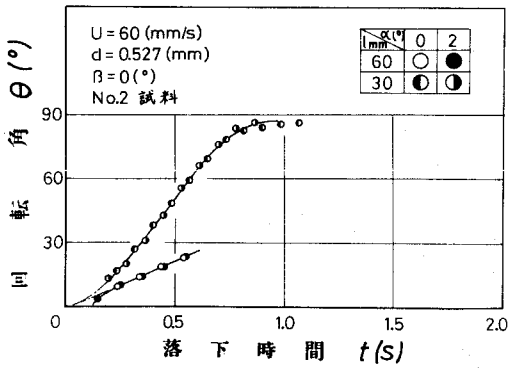


図4.24　姿勢におよぼす初期角度の影響

つぎに，線状体重心の速度が初期角度の影響を受けた $d=0.912$ (mm) のNO.1試料および d_b が大きい $d=0.527$ (mm) のNO.2試料の姿勢の変化を図4.23，4.24に示す。図4.23において，$d=0.912$ (mm) の場合にも，$d=0.569$ (mm) の場合と同様に，αの影響が現われるのは，落下直後の急激な回転の領域だけである。しかし，この急激な回転の領域は，$l=30$ (mm) の場合，$d=0.569$ (mm) では，$\theta=25\sim30°$ であ

り，$d=0.912$ (mm) では $\theta=15\sim20°$ となり，直径が大きい方が小さい。線状体が流れ中に入った瞬間に，流体から受ける軸に直角な方向の抗力は d のオーダーであり，いっぽう，重心の回りの慣性モーメントは d^2 のオーダーであるので，d が小さい方が急激な回転は大きくなる。さらに，θ と $\dot{Y}$ の関係を表わす図4.17と図4.19を比較すると，$d=2.912$ (mm) の方が $\dot{Y}$ の値は大きいので，急激な回転を受ける時間は少ない。したがって，上述のような結果になる。

また，図4.24において，d_0 が大きいNO.2試料の場合，落下直後の線状体の急激な回転は小さく，$\ell=30$ (mm) の場合でも $\theta<15°$ である。この原因については前項で述べた通りである。

4.6 線状体長さの影響

この節では，$\ell=15, 30, 45, 60$ (mm) 変化させたときの実験結果を基にして，線状体長さが落下特性におよぼす影響について調べる。

4.6.1 線状体の落下軌跡

$U=60$ (mm/s)，$d=0.569$ (mm)，$\ell=30$ と 60 (mm) のNO.1試料の落下軌跡を図4.25に示す。図中の線状体の時間間隔は $\ell=30, 60$ (mm) ともに $\Delta t=1/3$ (s) である。

$\ell=30$ (mm) の場合，落下直後の急激な回転の領域を過ぎると，線状体は除々に

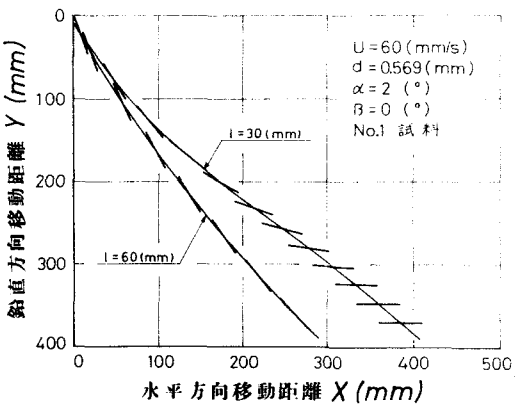


図4.25 落下軌跡におよぼす長さの影響

水平方向に姿勢を回転させながら落下し，水平な姿勢になって回転が止まり，このもっとも安定した姿勢を保ったまま運動し続け矩形管底面に到達する。また，重心の軌跡は変曲点をもつ曲線になる。いっぽう，$\ell = 60\,(mm)$の場合，$\ell = 30\,(mm)$の場合と比べて角速度が小さいため，θが約40°で矩形管底面に到達する。したがって，重心の軌跡の接線勾配dY/dXは減少し続けており，重心の軌跡には変曲点が見られない。

また，図4.25から，本実験の範囲内では，鉛直方向に同じ距離だけ移動した場合，ℓが小さい方がXの値は大きいことが分かる。さらに，線状体の状態を見れば，同一回転角に対するX，Yの値は，ℓが大きい方が大きいことが分かる。ℓが大きい方が角速度が小さく，姿勢の変化に要する時間が大きい。ところが，θと重心の速度の関係（図4.26，4.27）から，ある回転角θに対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は，ℓにかかわらずほぼ同じになる。したがって，速度は同じでも，その時間が，ℓが大きい方が大きいため，同一回転角に対するX，Yの値は大きくなると考えられる。

4.6.2 線状体重心の速度

$U = 60\,(mm/s)$，$\alpha = 0.569\,(mm)$のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図4.26，4.27に示す。

線状体は$\theta = 40° \sim 45°$まで水平方向に加速されるが，その後は減速される。なお，図4.26において，$\ell = 15\,(mm)$の場合，$\theta = 90°$の場合にも$\dot{X}$が減少する状態が見られるが，これは，線状体が水平な姿勢を保ったまま落下し続け矩形管底面に近づくが，壁面近傍では境界層の発達により流速が低下しているためである。

いっぽう，$\dot{Y}$はθの増加に伴ない単調に減少する。図4.27には，落下直後に線状体が鉛直方向に加速されていると

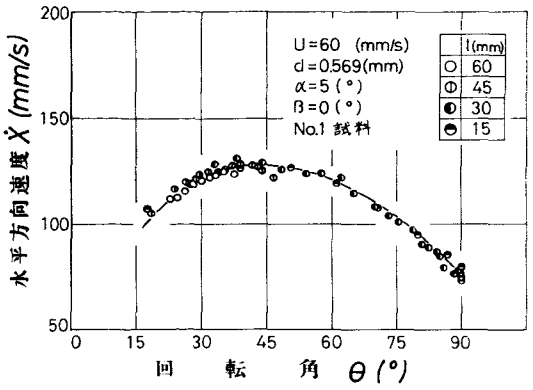


図4.26 水平方向速度におよぼす長さの影響

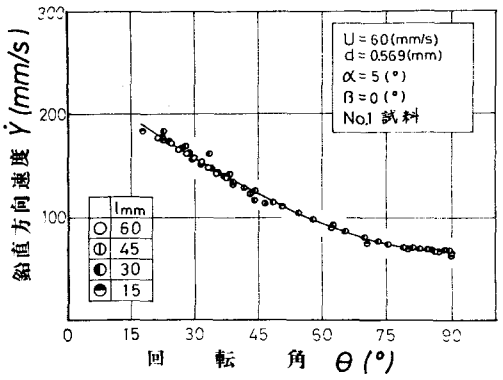


図4.27 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

きのデータがないが，これは，線状体が落下直後に急激に回転するため，流れ中ではつねに鉛直方向に減速されるからである。また，これらの図から，この実験条件の場合，lの影響は見られず，θと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係は，lにかかわらず同一曲線で表わされる。

ところが，図4.28，4.29に示す$U=20$(mm/s)，$d=0.912$(mm)のNO.1試料に対するθと重心の速度の関係を見ると，θが小さい領域でlの影響が現われ，lが大きい方が同

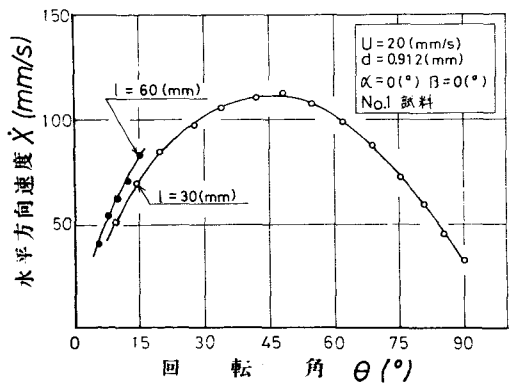


図4.28 水平方向速度におよぼす長さの影響

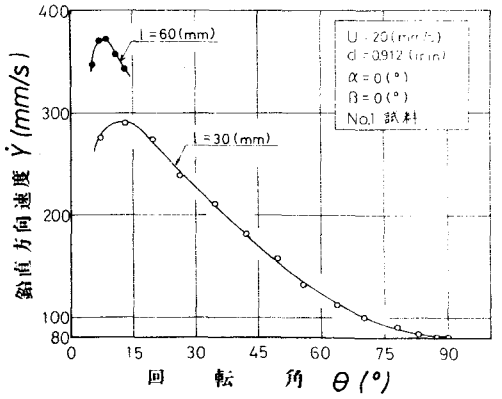


図4.29 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

一回転角に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は大きく，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は，$\ell=60(mm)$の場合，約8°，$\ell=30(mm)$の場合，約13°となり，ℓが大きい方が小さい。

$U=20(mm/s)$，$d=0.912(mm)$の場合，$U=60(mm/s)$，$d=0.569(mm)$の場合に比べて，流速は小さく，直径は大きいので，落下直後の線状体の急激な回転が小さく，ℓの影響が明確に現われたと考えられる。また，ℓが大きい方が，線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近く，流体から水平方向に受ける抗力は大きく，鉛直方向に受ける抗力は小さいため，水平方向および鉛直方向により大きく加速されるので，ℓが大きい方が$\dot{X}$，$\dot{Y}$は大きくなる。

図4.28，4.29において，$\ell=60(mm)$の場合，θが小さい間に線状体が矩形管の底面に到達するため，θの大きい領域でのℓの影響は分からない。

そこで，θの大きい領域でのℓの影響を調べるため，$U=60(mm/s)$，$d=0.322(mm)$のNo.2試料の結果を図4.30，4.31に示す。ℓの影響はθの小さい領域で現われ，ℓが大きいほど$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに大きくなる。しかし，θの増加に伴ないℓの影響は見られなくなり，θと$\dot{X}$の関係およびθと

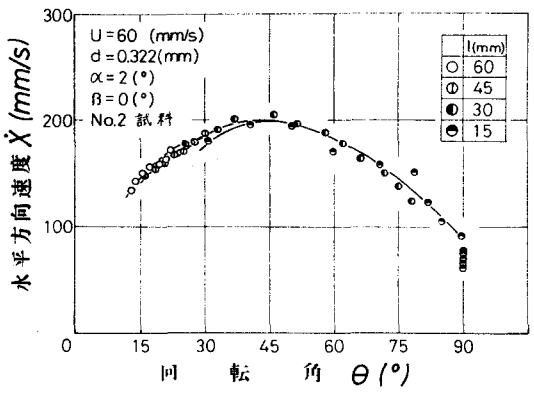


図4.30 水平方向速度におよぼす長さの影響

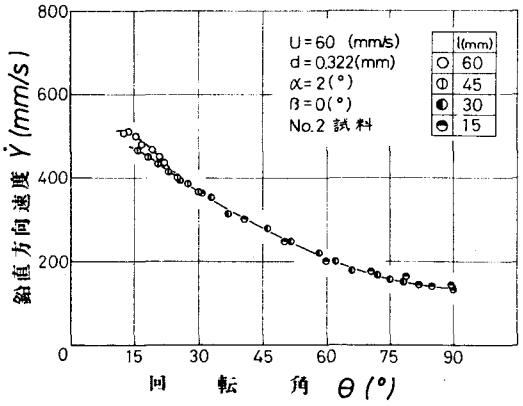


図4.31 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

$\dot{Y}$の関係は同一曲線で表わされる。

つぎに，直径，比重量および流速が異なる場合に，ℓが重心の速度におよぼす影響を調べる。直径の影響を示す4.7.2項に記載する図4.34，4.35を見ると，$U=60$(mm/s)の場合，$d=0.569$(mm)以下では$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにℓの影響は見られず，これより大きい直径の場合，ℓの影響が見られ，$d=0.722$(mm)の場合より$d=0.912$(mm)の場合の方が顕著に現われている。しかも，ℓの影響は前述した通りθが小さい領域($\theta<35°$)でのみ現われており，θが増加すると$\ell=60$(mm)の曲線が，$\ell=30$(mm)の曲線に漸近することも分かる。

以上のように，NO.1試料の場合，$d=0.569$(mm)以下でℓの影響は見られなかったが，同一流速のNO.2試料の場合には，$d=0.322$(mm)でもℓの影響が見られた(図4.30，4.31)ことから，γ_0が大きい方がℓの影響が現われ易いことが分かる。しかも，この場合，$\dot{X}$および$\dot{Y}$軸のスケールは，NO.1試料の場合より大きいことを考えるとℓの影響は，明確に現われたといってよい。

また，流速の影響を示す4.9.2項に記載する図4.44，4.45($d=0.569$(mm)の場合)および図4.46，4.47($d=0.912$(mm)の場合)を見ると，$d=0.569$(mm)の場合，$U=20$(mm/s)以下ではℓの影響がわづかに見られるが，これ以上の流速の場合，ℓの影響は見られない。しかし，$d=0.912$(mm)の場合，本実験の範囲内のどの流速の場合でも，ℓの影響が明確に現われている。しかも，Uが大きいほど$\ell=60$(mm)と$\ell=30$(mm)の$\dot{X}$の差は大きく，Uが小さいほど$\dot{Y}$の差は大きい。そして，θが増加すると$\ell=60$(mm)の曲線は，$\ell=30$(mm)の曲線に漸近する。Uが小さいほど$\dot{Y}$の差が大きくなるのは，つぎの原因による。落下直後に線状体は流れにより急激にその姿勢を変えるが，この急激な姿勢の変化

はUが小さいほど小さく，このため，$\dot{Y}$の最大値はUが小さいほど大きくなる。したがって，Uが小さいほど，$\ell=60(mm)$と$\ell=30(mm)$の$\dot{Y}$の差は大きくなると考えられる。

以上の結果をまとめると，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに，ℓの影響はθが小さい領域で現われ，この領域では同一回転角に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は，ℓが大きいほど大きい。しかも，ℓの影響は，線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化が小さいほど，すなわち，α，βが大きいほど，また，Uが小さいほど，明確に現われる。

4.6.3 線状体の姿勢

$U=60(mm/s)$，$\alpha=0.569(mm)$のNO.1試料のtとθの関係を図4.32に示す。

すでに述べたように，落下直後の急激な回転の領域を除き，αにかかわらずtとθの関係は同一曲線で表わされるので，この図には$\alpha=0°, 2°, 5°$の曲線が示されている。

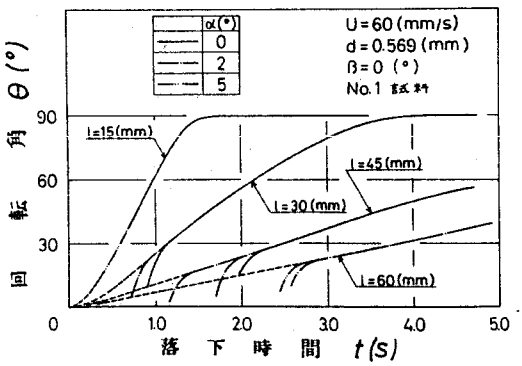


図4.32 姿勢におよぼす長さの影響

線状体は流れ中に入ったとき急激に回転するが，角速度の増大に伴ない回転を押える向きに作用する回転モーメントが増大するため，この急激な回転の領域を過ぎると除々に回転し$\theta=90°$に漸近する。tとθの関係を表わす曲線の接線勾配は角速度を表わすので，ℓが小さいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さくなる。また，落下直後の急激な姿勢の変化はℓが小さいほど大きいことが分かる。線状体が流れ中に入った瞬間に流体から受ける回転モーメント

は ℓ のオーダーであり，いっぽう，重心回りの慣性モーメントは ℓ^3 のオーダーであるので，ℓ が小さいほど急激な姿勢の変化は大きくなる。

以上述べた長さの影響は，直径，比重量および流速が異なる場合にも明確に現われる。

4.7 線状体直径の影響

この節では，No.1試料およびNo.2試料の直径を変化させたときの実験結果を基にして，線状体直径が落下特性におよぼす影響について調べる。

4.7.1 線状体の落下軌跡

$U=60\,(mm/s)$，$\ell=30\,(mm)$，$d=0.569\,(mm)$ と $d=0.912\,(mm)$ のNo.1試料の落下軌跡を図4.33に示す。図中の線状体の時間間隔は $d=0.569\,(mm)$ の場合，$\Delta t=1/3\,(s)$，$d=0.912\,(mm)$ の場合，$\Delta t=1/4\,(s)$ である。

この図において，もっとも原点に近い線状体の姿勢を比較すると，直径の小さい $d=0.569\,(mm)$ の方が，より水平に近い姿勢になっており，落下直後の急激な姿勢の変化は d が小さい方が大きいことが分かる。この急激な回転の領域を過ぎると，線状体は除々に姿勢を回転させながら，その重心が変曲点をもつような曲線を描いて運動する。

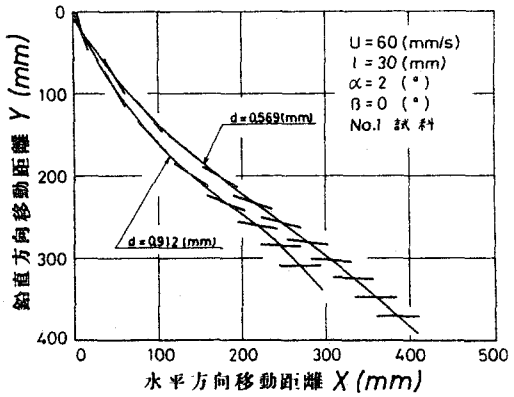


図4.33 落下軌跡におよぼす直径の影響

4.5.1項で述べたように，$d=0.569\,(mm)$ の軌跡は $\theta=70°$

付近（$Y=230(mm)$付近）で変曲点をもつが，$d=0.912(mm)$の軌跡は$\theta=65°$付近（$Y=230(mm)$付近）で変曲点をもつ。また，両者の重心の軌跡を比較すると，$d=0.912(mm)$の方が，軌跡の接線勾配の変化が大きいことが分かる。θと重心の速度の関係を表わす図4.34，4.35から，θの変化に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の変化は$d=0.912(mm)$の方が大きく，軌跡の接線勾配は$dY/dX=\dot{Y}/\dot{X}$となることから，dY/dXの変化は$d=0.912(mm)$の方が大きくなると考えられる。さらに，鉛直方向に同じ距離だけ移動した場合，dが小さい方がXの値は大きいことが分かる。したがって，同一長さの線状体を矩形管内流れ中で落下させれば，直径により矩形管底面に到達したときの水平方向移動距離に差が生ずるため，直径別に線状体を分類することができる。

4.7.2 線状体重心の速度

$U=60(mm/s)$のNO.1試料のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図4.34，4.35に示す。これらの図には，$l=30,60(mm)$の曲線が併記してある。

$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに，θの全領域でdが大きいほど大きくなる。また，$\dot{X}$は$\theta=40°\sim45°$まで加速されるが，$\dot{X}$が最大になるときのθの値は，dが大きいほど大きくなる傾向にある。

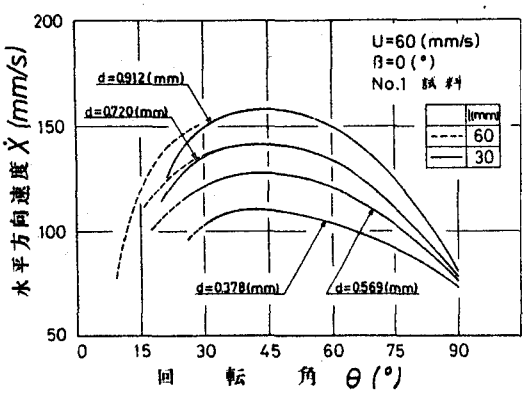


図4.34 水平方向速度におよぼす直径の影響

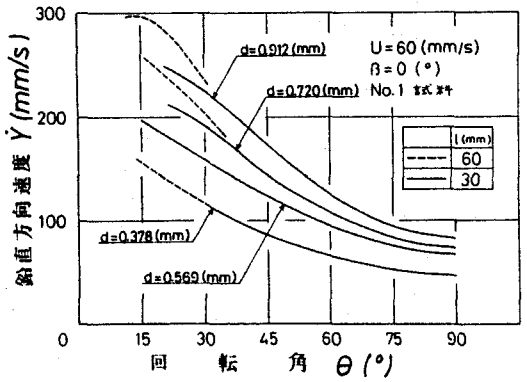


図4.35 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

さらに，$\ell=60(mm)$ と $\ell=30(mm)$ の速度の差は，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに α が大きいほど大きく，また，α が大きいほど θ のより広い領域で長さの影響を受ける。

以上述べた直径の影響は，比重量が大きいNO.2試料の場合の方が顕著に現われる。

NO.2試料の $U=60(mm/s)$ の結果を図4.36，4.37に示す。図4.36において，線状体が水平方向に加速される領域が，$\theta=40°\sim50°$ までとなり，直径が大きいほどより水平に近い姿勢になるまで加速されることが，NO.1試料の場合よりはるかに明確に現われる。また，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに直径が大きいほど，長さの影響を受け易いことも明確になる。さらに，図4.37において，落下直後の領域で線状体が鉛直方向に加速されている状態も見られ，$\ell=60(mm)$ の場合を見ると $\dot{Y}$ は α が大きいほど，より水平に近い姿勢になるまで加速される傾向にあることも分かる。

なお，直径の影響は，流速が小さい方が顕著に現われることも分かった。

したがって，直径の影響は，線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化が小さいほど，すなわち，比重量が

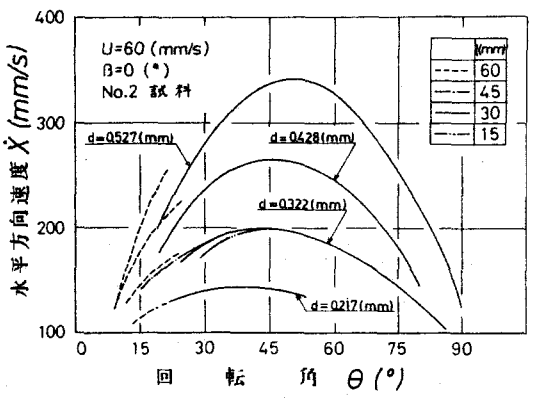


図4.36 水平方向速度におよぼす直径の影響

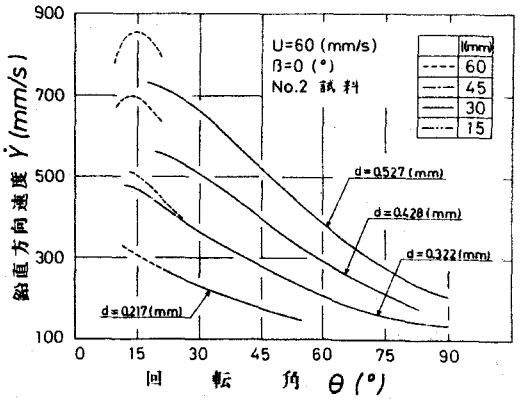


図4.37 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

大きいほど，また，流速が小さいほど，明確に現われる。

4.7.3 線状体の姿勢

$U=60(mm/s)$，$\ell=30(mm)$のNo.1試料のtとθの関係を図4.38に示す。落下直後の急激な回転の領域を除き，αにかかわらずtとθの関係は同一曲線で表わされるので，この図には$\alpha=0°, 2°, 5°$の曲線が併記されている。

落下直後の急激な回転の領域を過ぎると，回転を押える向きに作用する回転モーメントの増大により，線状体は除々に回転し$\theta=90°$に漸近する。また，αが大きいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さくなる。さらに，落下直後の急激な姿勢の変化はαが大きいほど小さいことが分かる。線状体が流れ中に入った瞬間に流体から受ける回転モーメントはαのオーダーであり，いっぽう，重心回りの慣性モーメントはα^2のオーダーであるので，αが大きいほど急激な姿勢の変化は小さくなる。さらに，θと$\dot{Y}$の関係を表わす図4.35から，αが大きいほど$\dot{Y}$の値は大きいので，急激な回転を受ける時間は少ない。したがって，αが大きいほど急激な姿勢の変化は小さくなる。

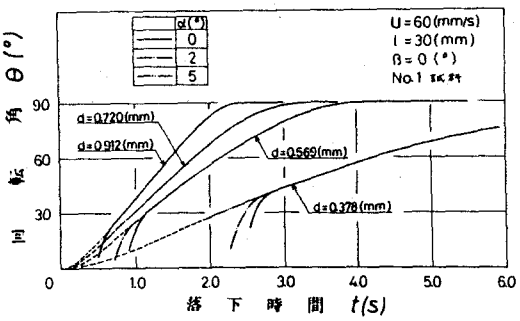


図4.38 姿勢におよぼす直径の影響

この直径の影響は，長さ，比重量および流速が異なる場合にも明確に現われる。

4.8 線状体比重量の影響

この節では，$d=0.569\,(mm)$のNO.1試料と$d=0.527\,(mm)$のNO.2試料に対する実験結果を基にして，線状体比重量が落下特性におよぼす影響について調べる。その際，NO.1試料とNO.2試料では直径が異なるため，4.7節で述べた直径の影響の結果も考慮する必要がある。

4.8.1 線状体の落下軌跡

$U=60\,(mm/s)$，$\ell=30\,(mm)$のNO.1試料とNO.2試料の落下軌跡を図4.39に示す。図中の線状体の時間間隔は，NO.1試料の場合，$\Delta t=1/3\,(s)$，NO.2試料の場合，$\Delta t=1/12\,(s)$である。

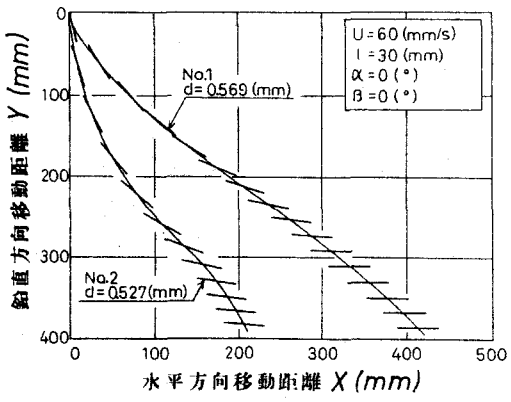


図4.39 落下軌跡におよぼす比重量の影響

両試料ともに落下直後の急激な回転の領域を過ぎると，除々に水平方向に姿勢を回転させながら落下し，その重心の軌跡は変曲点をもつような曲線を描く。NO.1試料の軌跡は$\theta=75°$付近（$Y=230\,(mm)$付近）で変曲点をもつが，NO.2試料の軌跡は$\theta=70°$付近（$Y=290\,(mm)$付近）で変曲点をもつ。また，両者の重心の軌跡を比較すると，NO.2試料の方が軌跡の接線勾配dY/dXの変化が大きいことが分かる。θと重心の速度の関係を表わす図4.40，4.41から，θの変化に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の変化はNO.2試料の方がはるかに大きく，$dY/dX=\dot{Y}/\dot{X}$となることから，dY/dXの変化はNO.2試料の方が大きくなると考えられる。さらに，鉛直方向に同じ距離だけ移動した場合，ρ_0が小さい方がXの値は大きいことが分かる。これはつぎの原因による。落下直後の急激な姿勢の変化はρ_0が小さい方が

大きいため，線状体がすべて流れ中に入ったときの姿勢はより水平に近い，さらに，$\dot{Y}$はd_0が小さい方がはるかに小さくなるので，線状体が鉛直方向へ移動する距離が小さい。すなわち，鉛直方向へ移動するのにより長い時間を要する。したがって，$\dot{X}$が小さいにもかかわらず，同一鉛直方向移動距離で比べるとd_0が小さいNO.1試料の方がXの値は大きくなる。

以上の結果から，矩形管内流れ中で比重量の異なる線状体を落下させれば，底面に到達したときの水平方向移動距離に差が生ずるので，比重量別に線状体を分類することができる。

4.8.2 線状体重心の速度

$U=60$(mm/s)のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図4.40，4.41に示す。図には，$\ell=30$，60(mm)のデータをプロットしている。

θの全領域で，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに，d_0が大きいNO.2試料の方が大きくなる。また，NO.2試料の方がより水平に近い姿勢になるまで水平方向に加速されることが分かる。ここ

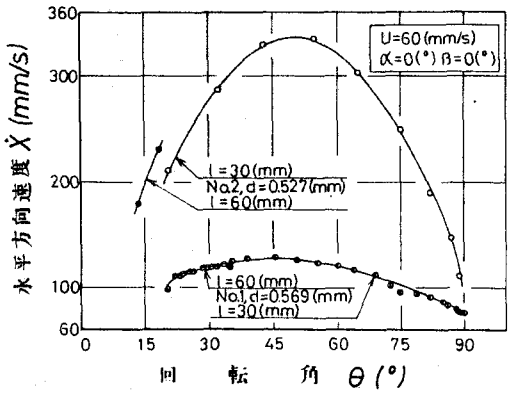


図4.40 水平方向速度におよぼす比重量の影響

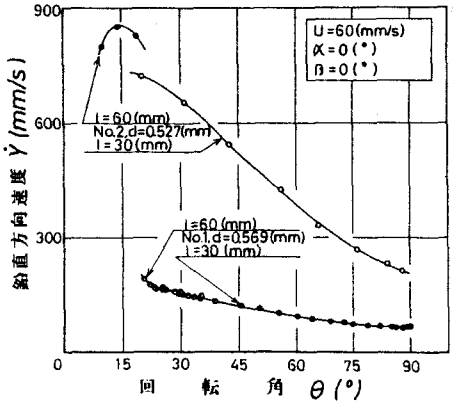


図4.41 鉛直方向速度におよぼす比重量の影響

で，直径が大きいほどより水平に近い姿勢になるまで加速されることを考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，重い方がより水平に近い姿勢になるまで水平方向に加速される。さらに，$\ell=60(mm)$ と $\ell=30(mm)$ の速度の差は，$\dot{X}$ $\dot{Y}$ ともに ρ_b が大きい方が大きく，また，ρ_b が大きい方が θ のより広い領域で長さの影響を受ける。

4.8.3 線状体の姿勢

$U=60(mm/s)$ の t と θ の関係を図4.42に示す。図には，$\ell=30$，$60(mm)$ と $\alpha=0°$，$2°$，$5°$ の曲線が併記されている。

ρ_b が大きいNO.2試料の方が角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間が小さくなる。ここで，直径が大きいほど角速度は大きいことを考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，角速度は重い方が大きくなる。これは，同一形状の場合，重い方が速度は大きく，線状体に対する流体の相対速度が大きくなり，したがって，線状体を回転させる向きに作用する回転モーメントが大きくなるためと考えられる。また，この図から，落下直後の急激な姿勢の変化は ρ_b が大きい方が小さいことが分かる。同一形状であれば，線状体が流れに入った瞬間に流体から受ける回転モーメントは同じである。いっぽう，重心回りの慣性モーメントは ρ_b が大きい方が大きい。さらに，θ と $\dot{Y}$ の関係を表わす図4.41から，ρ_b が大きい方が $\dot{Y}$ の値は大きいので，急激な回転を受ける時間は少ない。したがって，ρ_b が大きい方

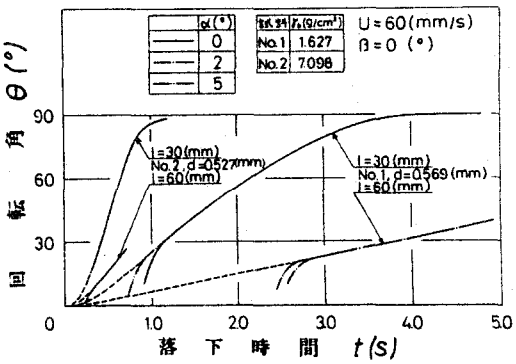


図4.42 姿勢におよぼす比重量の影響

が急激な姿勢の変化は小さい。

4.9 流速の影響

この節では，$U=0, 20, 40, 60, 80$ (mm/s) 変化させたときの実験結果を基にして，流速が落下特性におよぼす影響について調べる。

4.9.1 線状体の落下軌跡

$d=0.569$ (mm)，$l=30$ (mm)，$U=0\sim80$ (mm/s) の落下軌跡を図4.43に示す。初期角度および線状体の時間間隔は，$U=0\sim80$ (mm/s) の場合，それぞれ，$\alpha=0.5°, 0°, 2°, 2°, 5°$，$\Delta t=1/2, 2/5, 2/7, 1/3, 2/7$ (s) である。

この図において，原点にもっとも近い線状体の姿勢を比較すると，線状体が流れ中に入った瞬間に流体から受ける回転モーメントは，U が大きいほど大きく，急激な姿勢の変化は大きいため，U が大きいほどより水平に近い姿勢になることが分かる。この急激な回転の領域を過ぎると，線状体は除々に姿勢を変化させながら，その重心が変曲点をもつような曲線を描いて運動する。しかし，$U=0$（静止流体中）の場合，落下直後の急激な姿勢の変化が起らないため，θ が約40°で矩形管底面に到達し，その重心の軌跡には変曲点が見られない。また，$U=80$ (mm/s) の場合，$Y=300$ (mm) 付近で，姿勢はほとんど水平になり，しかも流速は壁面近

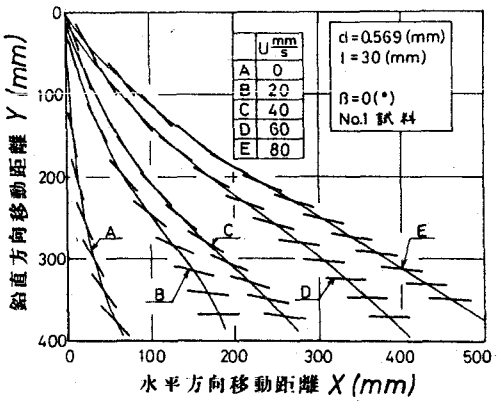


図4.43 落下軌跡におよぼす流速の影響

くの領域（境界層内）を除いてほぼ一様であるため，重心の軌跡はほぼ直線状になる。ここで，重心の軌跡を比較すると，Uは$\dot{Y}$にはほとんど影響をおよぼさないが，Uが大きいほど$\dot{X}$が大きくなるため，軌跡の接線勾配はUが大きいほど小さくなる。また，変曲点までの鉛直方向移動距離は，Uが大きいほど小さくなる。

4.9.2 線状体重心の速度

$d=0.569$(mm)のNO.1試料のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図4.44，4.45に示す。図には，$\ell=30$，60(mm)の曲線が併記してある。

$\dot{X}$はθの全領域でUが大きいほど大きくなる。また，線状体は，$\theta=40°\sim50°$まで加速されるが，Uが大きいほどより水平に近い姿勢になるまで水平方向に加速されることが分かる。これは，Uが大きいほど，落下直後の急激な姿勢の変化が大きくなることに起因すると考えられる。いっぽう，図4.45において，$\dot{Y}$はθの小さい領域でUの影響を受け，Uが小さい方が，$\dot{Y}$の最大値は大きく，そのときのθの値は小さい傾向にある。しかし，$d=0.569$(mm)の場合，

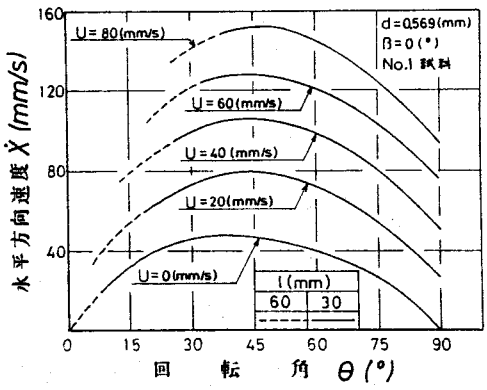


図4.44 水平方向速度におよぼす流速の影響

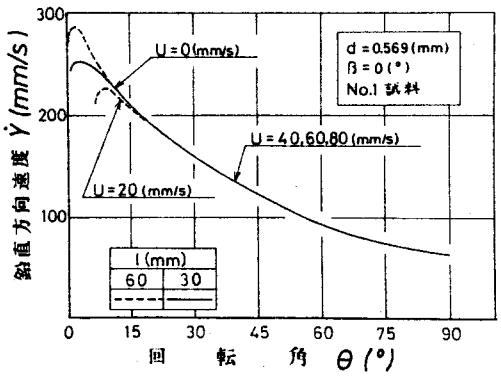


図4.45 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

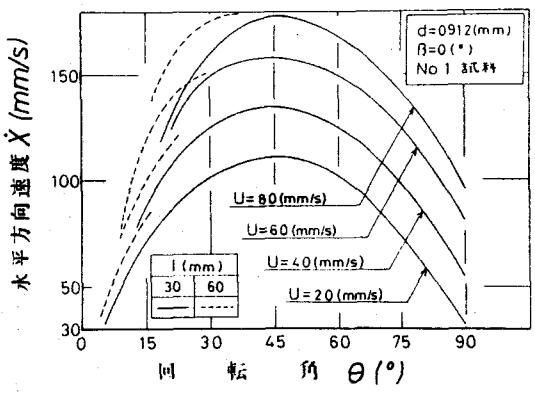


図4.46 水平方向速度におよぼす流速の影響

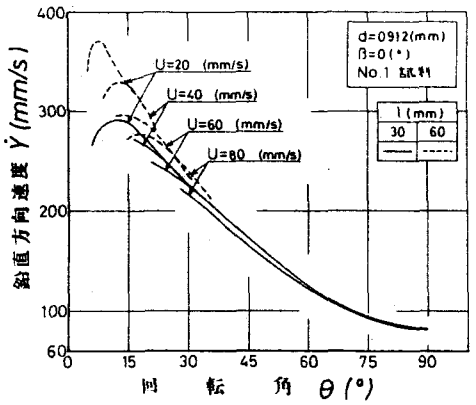


図4.47 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

落下直後の急激な姿勢の変化が大きいため，$U \geq 40$ (mm/s) の場合，U の影響は現われない。

そこで，$d = 0.569$ (mm) の場合に比べて落下直後の急激な姿勢の変化の小さい $d = 0.912$ (mm) の結果を図4.46，4.47に示す。

図4.47において，$\dot{Y}$ におよぼす U の影響が明確に現われ，U が小さいほど $\dot{Y}$ の最大値は大きく，そのときの θ の値は小さくなる。これは，U が小さいほど，線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直方向に近いため，流体から鉛直方向に受ける抗力は小さく，鉛直方向により大きく加速されるためであると考えられる。そして，θ が増加すると U の影響は見られなくなり，U にかかわらず θ と $\dot{Y}$ の関係は同一曲線で表わされる。これは，流速が水平方向成分しか持たないからである。また，$\ell = 60$ (mm) と $\ell = 30$ (mm) の $\dot{Y}$ の差は，U が小さいほど大きく，いっぽう，図4.46から，$\dot{X}$ の差は，U が大きいほど大きいことが分かる。さらに，$\dot{Y}$ におよぼす U の影響は，$\ell = 60$ (mm) の方がより顕著に現われる。

以上は，No.1試料に対する結果であるが，つぎに，γ_0

が大きいNO.2試料に対するθとẎの関係を図4.48に示す。

α=0.569(mm)のNO.1試料の場合，Uが大きくなるとẎにおよぼすUの影響は見られなかったが，図4.48から，NO.2試料の場合，α=0.322(mm)でもUの影響が顕著に現われている。

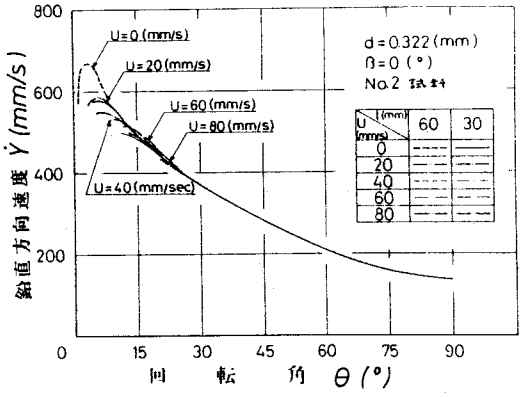


図4.48 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

両者の直径を比べるとα=0.569(mm)の方が1.8倍大きいが，比重量はα=0.322(mm)のNO.2試料の方が4.4倍大きく，したがって，落下直後の急激な姿勢の変化は，α=0.322(mm)のNO.2試料の方が小さくなり，Uの影響が顕著に現われたと考えられる。なお，α=0.322(mm)のNO.2試料の場合にも，ẊにおよぼすUの影響が明確に現われた。

図4.44～図4.48にはデータがプロットされていないため分からないが，長さの影響を示す4.6.2項に記載する図4.26，4.30のℓ=15(mm)の場合を見れば分かるように，θ=90°の場合にもẊが減少する現象が見られる。この現象は，他の実験条件の場合にも現われている。これは，線状体が水平な姿勢を保ったまま，低速で矩形管底面近傍の境界層内へ入るために生ずる現象であり，姿勢が水平でない場合には，鉛直方向速度が大きいため，この現象は見られない。

以上の結果から，鉛直方向速度におよぼす流速の影響は，線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化が小さいほど，すなわち，長さ，直径および比重量が大きいほど明確に現われる。また，水平方向速度に対する影響は，長

さ，直径および比重量に関係なく現われる。

4.9.3 線状体の姿勢

$d=0.569\,(mm)$，$\ell=30\,(mm)$ のNO.1試料の t と θ の関係を図4.49に示す。

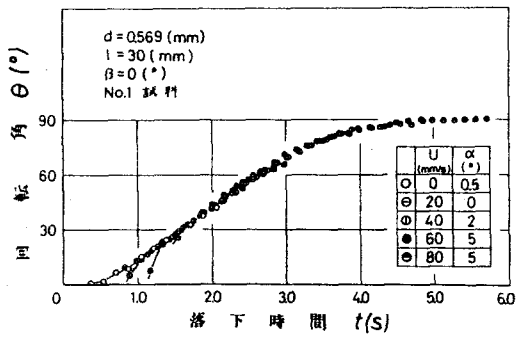


図4.49 姿勢におよぼす流速の影響

落下直後の急激な回転の領域を除き，線状体の姿勢の変化は，U に関係なく同一曲線で表わされる。本実験の場合，流れの発達はゆるやかであり，壁面近くの境界層内を除いて流速の場所的変化はわずかであるので，U は線状体の姿勢の変化にはほとんど影響をおよぼさない。したがって，姿勢の変化は静止流体中での場合とほぼ同じになる。さらに，この図において，落下直後の急激な姿勢の変化は，U が大きいほど α が大きいにもかかわらず大きくなることが分かる。また，$\ell=30\,(mm)$ の場合，矩形管底面に到達したときの姿勢はほとんど水平であるため，底面近くの境界層の影響も見られない。

そこで，矩形管底面に到達したときの線状体の姿勢が鉛直に近い場合，$d=0.569\,(mm)$，$\ell=60\,(mm)$ のNO.1試料の結果を図4.50に示す。

鉛直に近い姿勢で，底面に近づくと線状体の先端部が流速の小さい境界層内に入り，後端部は流速の大きいほぼ一様な流れ中に入っている状態が発生し，先端部付近と後端部付近の流速の差により，線状体はその姿勢を鉛直に向ける方向に回転させられる現象が生ずると考えられる。しか

し，図4.50を見ると，このような現象は現われていない。また，他の実験条件の場合にもほとんど見られなかった。$\ell=60$ (mm)の場合，先端部が境界層内，後端部がほぼ一様流れ中に入る状態が発生するが，底面近くでも$\dot{Y}$は大きく，この状態は短時間のうちに終了し，上述のような姿勢の変化が見られなかったと考えられる。したがって，流れがもっと発達した領域で，線状体が運動する場合には，上述の現象が見られる可能性がある。

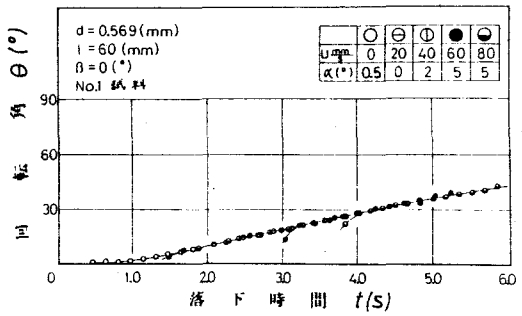


図4.50 姿勢におよぼす流速の影響

以上述べた流速の影響は，直径，比重量が異なる場合にも明確に現われる。

4.10 結言

本章では，直線の線状体が単一で，矩形管内流れ中を自由落下する場合について実験的研究をおこない，落下軌跡，速度および姿勢などの落下特性を把握し，同時に，初期角度，長さ，直径，比重量および流速が落下特性におよぼす影響を調べた。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 線状体は，流れ中に入ったとき急激に回転するが，その後は，除々に水平方向に姿勢を回転させながら，その重心が変曲点をもつような曲線を描いて運動する。また，最終的にその姿勢は水平方向に漸近し，しかも，線状

体は水平方向には流速とほぼ同一速度で，鉛直方向には一定速度で移動する。

(2) 線状体は，$\theta = 40° \sim 50°$まで水平方向に加速されるが，その後は減速される。また，落下直後に，急激に鉛直方向に加速されるが，その後はθの増加に伴ない単調に減速される。なお，落下直後の急激な姿勢の変化が大きい場合，流れ中で鉛直方向に加速される状態が見られない。

(3) 初期角度は，落下直後の領域を除き，軌跡の形には影響せず，線状体が運動する位置に影響を与える。いっぽう，長さ，直径，比重量および流速は軌跡の形に影響を与える。なお，初期角度，長さ，直径および比重量が小さいほど，また，流速が大きいほど，鉛直方向に同じ距離だけ移動したときの水平方向移動距離は大きくなる。

(4) 重心の速度におよぼす初期角度，長さの影響は，θの小さい領域で現われ，初期角度が大きいほど$\dot{X}$および$\dot{Y}$の最大値は大きくなり，長さが大きいほど$\dot{X}$，$\dot{Y}$は大きくなるが，θの増加に伴ないこれらの影響は見られなくなる。また，直径，比重量の影響は，θの全領域で現われ，直径，比重量が大きいほど$\dot{X}$，$\dot{Y}$は大きくなる。また，$\dot{X}$はθの全領域で，流速が大きいほど大きくなり，$\dot{Y}$はθの小さい領域で流速の影響を受け，流速が小さいほど大きくなるが，θの増加に伴ない流速の影響は見られなくなる。

以上述べた長さ，直径および流速の影響は，線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化が小さいほど明確に現われる。

(5) 落下直後の急激な姿勢の変化の領域を除き，初期角度，流速は，姿勢の変化に影響をおよぼさない。また，長さが小さいほど，直径，比重量が大きいほど，角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さくなる。なお，落下直後の急激な姿勢の変化は，初期角度，長さ，直径および比重量が大きいほど，また，流速が小さいほど小さい。

第5章　ノズル内流れ中における線状体の運動

5.1　緒言

繊維あるいは繊維集団を流体輸送する技術は，繊維工業の各種工程で広く応用されている。ここで研究対象としているノズル（縮小管）は，繊維の流体輸送工程のうち，とくに，繊維を流れの方向に配向させる目的，および流速の差を利用して繊維を引伸ばす目的で使用される場合が多い。たとえば，オープンエンド精紡機のコーミングローラとロータ入口間のダクトは縮小管で構成されている。

いっぽう，縮小管内での繊維の輸送を取扱った例としては，Edberg[4]の研究があり，縮小管内の高速気流により繊維を流れ方向に配列させることができるという結果を得ているが，この場合にも，流れ中での繊維の運動状態およびどのように姿勢が変化して流れ方向に繊維が配向するかなど，この現象の基本的事項についてはほとんど検討されていない。このように実際には広く利用されているにもかかわらず，縮小管内流れ中における繊維の基本的運動特性についてはほとんど明らかにされていないのが現状である。

本章では，繊維のもっとも簡単なモデルとして直線の線状体を考え，線状体が単一で低速のノズル内流れ中を自由落下する場合について実験的研究をおこない，この現象の基本事項を把握し，あわせて第4章の矩形管内流れ中での線状体の運動との比較をおこない，ノズル内流れ中での落下特性を明らかにする。生産工程では，繊維は気流中および液中で運動するが，線状体の運動の観察，実験は水中の方が容易であることから，水中で線状体の落下特性および諸要因の影響について調べることにした。

5.2 ノズル内流れ中における線状体の落下実験装置

実験装置は，テスト部以外はすべて図4.1に示した矩形管内流れ中での線状体の落下実験装置と同じである。したがって，テスト部の概要を図5.1に示す。この図において，水は右側から矢印の向きに整流部②からテスト部①に入り，流量調節用バルブ④を経て排出される。

テスト部のノズルは，底面は収縮しておらず，上面だけが傾き1/4（水平方向に対し14°）で収縮しており，流路幅は一定である。ノズル部の長さは800(mm)，入口部断面は400(mm)×100(mm)，出口部断面は200(mm)×100(mm)である。ノズル出口部には整流格子⑤があり，ノズルより下流の部分の影響が伝わらないようにしてある。このテスト部はすべて厚さ10(mm)の透明アクリル板で製作した。また，線状体の運動を調べるためにマルチストロボ撮影をおこなうので，撮影の背景となるテスト部後面にはストロボランプの光が反射して線状体の落下状態が不鮮明にならないよう，つや消し黒色塗装した。

線状体落下装置③はノズル入口部から100(mm)下流のノズル部上側に隣接しており，流路とは切り離されている。これは，流れを落下装置が乱さないようにするためである。線状体落下

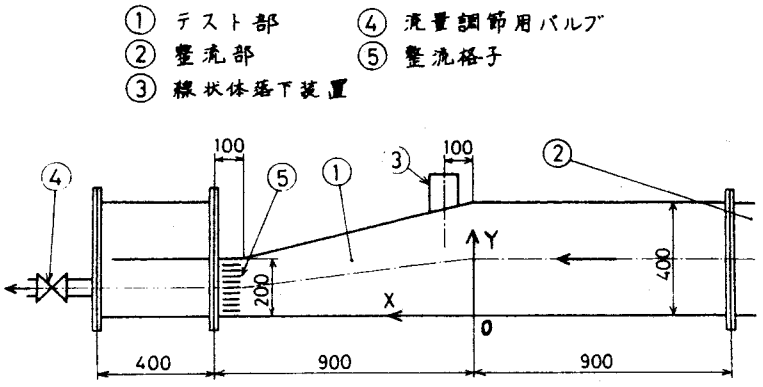


図5.1 ノズルテスト部概要

装置の底面とノズル部上面には，4×65（mm）のスリットが設けてあり，落下装置とノズル部は，このスリットでつながっているだけである。

5.3 ノズル内流れ特性

4.3節で述べたように，整流部を通過した流れはほぼ一様流れになっているので，テスト部の断面形状が変化しない領域（整流部からノズル入口部までの領域）では流れが発達している。ところが，線状体が運動するノズル内では加速する流れであるため，ふたたび一様流に近づくと考えられる。そこで，線状体の落下実験をおこなう前に，ノズル部での流速分布を調べる必要がある。

5.3.1 ノズル内流れの流速分布測定方法

ノズル入口部の平均流速は，最大60（mm/s）と低速であるため，矩形管内流れの場合と同様に，アルミ微粉末およびポリスチレンビーズを用いたトレーサ法により流速分布を測定した。

流速分布測定装置の概要を図5.2に示す。本実験装置の座標

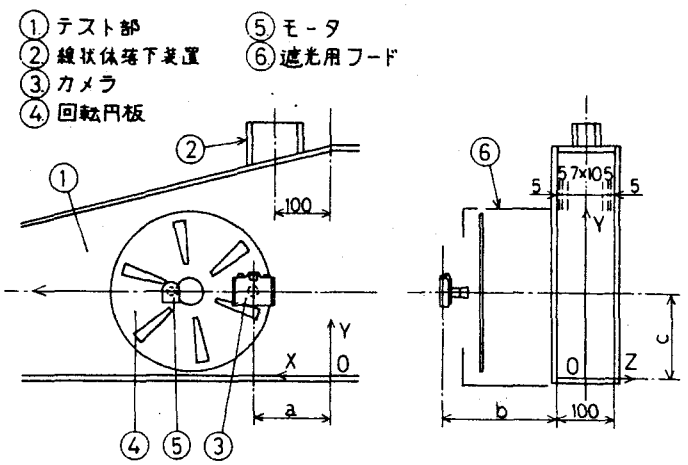


図5.2 ノズル内流速分布測定装置概要

系としては，ノズル入口部底面の幅方向中心を原点(O)とし，鉛直上向きにY軸，水平方向流れの向きにX軸，水平面内でX軸と直角方向にZ軸を定めた。トレーサ法では，トレーサ粒子がスリット光の平面内で運動することが必要であり，矩形管内流れの場合には，図4.2に示したXZ面およびXY面に平行な平面内でトレーサ粒子は運動するので，XZ面に平行にスリット光を当てて測定をおこなった。しかし，ノズル内流れの場合には，XZ面に平行な面は流れと角度をもっており，トレーサ粒子はこの平面内では運動しないので，トレーサ粒子が運動するXY面に平行な面を測定面に選んだ。すなわち，図5.2には光源部は描かれていないが，後述するように，スリット光をXY面に平行に投入する。撮影では，実験室全体を暗室とし，ノズル部側方からカメラ③により，スリット光の当たる平面内のトレーサ粒子の軌跡を撮影する。その際，穴あき回転円板④をモータ⑤により，カメラのレンズ直前で回転させ，トレーサ粒子の描く軌跡が点々で撮影されるようにする。なお，円板の穴は，中心角が15°で6個設けてある。矩形管内流れの場合には，光を断続的にしゃ断したが，本実験の場合には，カメラのレンズを断続的にしゃ断することになる。したがって，円板の回転数を決めると露出間隔が決まるので，トレーサ粒子の軌跡の間隔から流速を求めることができる。

つぎに，流速測定に用いた光源部および測定位置について述べる。図5.3に示すように，ノズル部を6個のブロックに分割して撮影をおこなった。1～4のブロックでは，図5.4にその概要を示す光源部を用いた。光源④の光は反射鏡③で鉛直上向きになり，幅1(mm)の2重スリット②を通っ

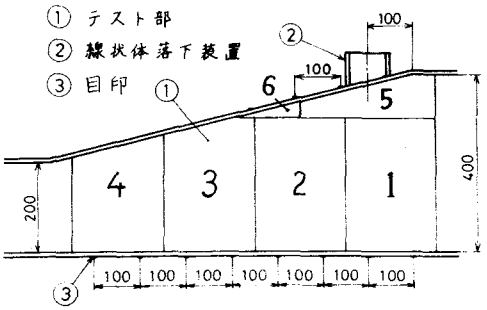


図5.3 流速分布撮影位置

て平行光線になり，ノズル部下方からXY面に平行に投入される。また，5と6のブロックでは，図5.5にその概要を示す光源部を用いた。光源③の光を幅1(mm)の2重スリット②により平行光線にし，ノズル部上方からXY面に平行に投入する。図5.4，5.5に示すように，光源部をノズル幅方向（Z方向）に移動させ，壁面近傍5(mm)間隔，中央部10(mm)間隔，計11箇所の各位置におけるトレーサ粒子の軌跡を撮影した。これによって，ノズル部の流速分布を3次元的に求めることができた。

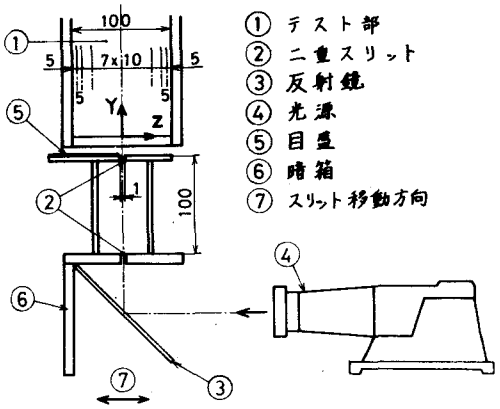


図5.4 光源部概要

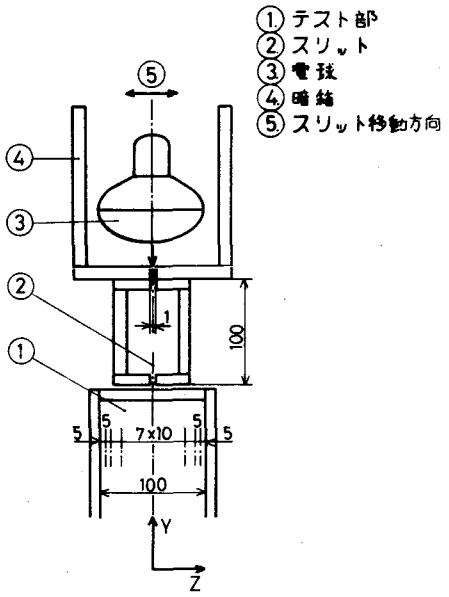


図5.5 光源部概要

線状体の落下実験は，ノズル入口部の平均流速$\bar{U}$=10，20，40，60(mm/s)でおこなうため，流速分布の測定も，これらすべての流速についておこなった。なお，円板の回転数は，$\bar{U}$=10，20，40，60(mm/s)の場合，それぞれN=20，30，60，60(rpm)である。

5.3.2 ノズル内流れの流速分布算出方法

ノズル内流れの流速分布測定は，ノズル部を6個のブロックに分割しておこなったが，図5.3に示したように，各ブロック

に目印を2個づつ100(mm)間隔で設けた。目印には，幅5(mm)のアルミ薄板を用い，これを図5.6に示すように，流れに直角にノズル部の底面あるいは上面の外側にはりつける。これにスリット光を当てると目印の所だけ光が通らず，写真面上で目印の位置および目印間の距離が分かる。したがって，この目印が，写真面上から流速分布を求める際に位置および長さの基準になる。

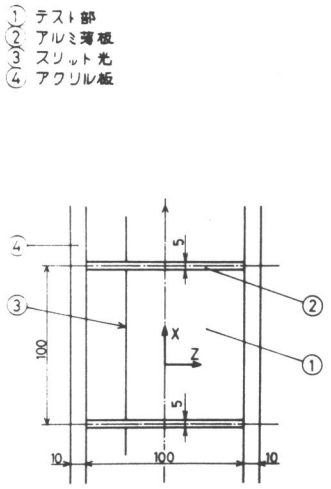
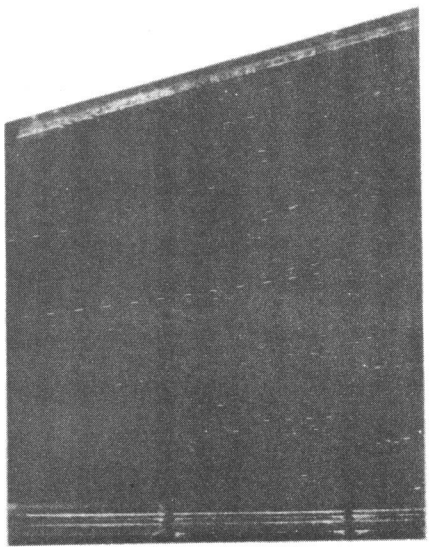


図5.6 目印の状態

図5.7に撮影されたトレーサ粒子の軌跡の一例を示す。この図は，U=20(mm/s)，ブロック番号4，Z=0（幅方向の中心）の位置の場合である。この図で，点々で写っているのがトレーサ粒子の描く軌跡であり，ノズル部の底面にはりつけた目印も撮影されている。


図5.7 ノズル内流速分布撮影例

つぎに，撮影されたトレーサ粒子の軌跡から流速を求める方法について述べる。図5.8にトレーサ粒子の軌跡の模式図を示す。

hは目印間の距離，lはトレーサ粒子の点と点の距離，sはノズル底面から，その点と点を結んだ線と直線ABとの交点Cまでの距離である。これらの値を写真面上で測定すれば，次式からsの実際の距離Y(mm)の位置における流速u(mm/s)が求められる。

$$Y=(100/k)\,\delta \qquad (5.1)$$

$$U=10\,\ell N/k \qquad (5.2)$$

ただし，Nは円板回転数(rpm)であり，k，ℓおよびδの単位はmmである。

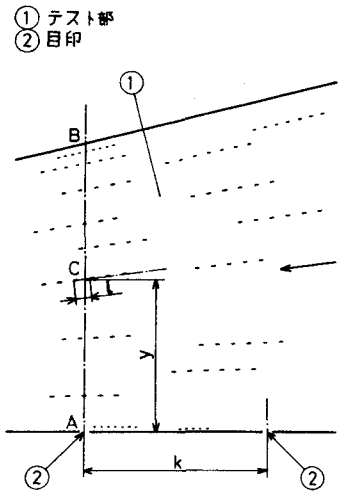


図5.8 トレーサ粒子軌跡の模式図

図5.8の直線AB上でYとUを数十点求めると，この直線上のY方向の流速分布が得られる。これを1～6のブロックにわたって求めるとノズル部全体のXY面に平行な面内での流速分布が求まる。そこで，図5.4，5.5に示した$-50\leqq Z\leqq 50$(mm)の範囲内の各測定位置で流速分布を求めると，ノズル内での流速分布が3次元的に得られる。また，流れの方向はトレーサ粒子の軌跡の方向から求まる。

5.3.3 ノズル内流れの流速分布測定結果

ノズル入口部平均流速$U=60$(mm/s)の場合の測定結果を図5.9，5.10に示す。なお，各位置での流速はノズル入口部平均流速Uで無次元化し，底面からの距離Yは，各位置におけるノズルの高さで無次元化し，Zは最大値($Z_{max}=50$(mm))で無次元化し，木の印を付けて表わす。

図5.9はノズル幅方向の中心$Z^*=0$，すなわちXY面内における流速分布である。この図では，流速分布は$Y^*=1$の長さをそろえた長方形の中で表わしており，$Y^*=1$の線をノズルの形状に合わせていない。これは，流れの方向を一方向に統一して，流速を読み易くするためである。

Z方向の各位置で流速分布が求まっているので，ノズル高さ方向の中心$Y^*=0.5$の位置の値だけ抜き出して，$Y^*=0.5$にお

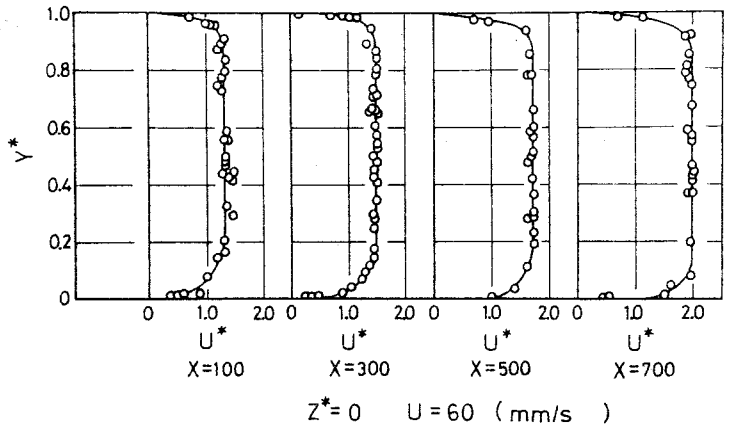


図5.9 ノズル高さ方向流速分布

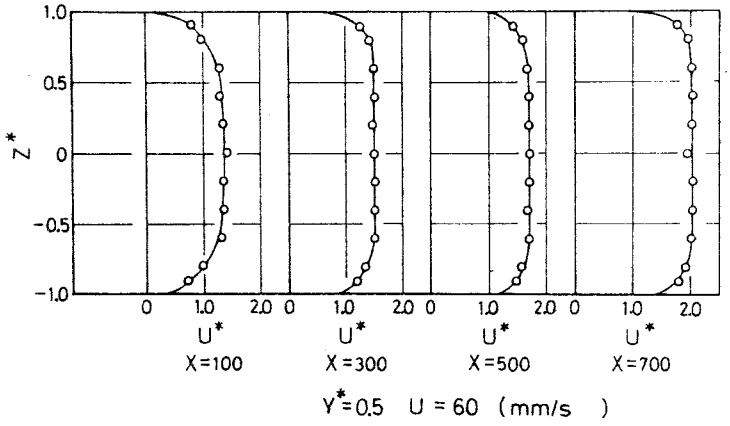


図5.10 ノズル幅方向流速分布

ける流速分布を作成した結果が図5.10である。

図5.9, 5.10 において，ノズル入口部にもっとも近い X=100 (mm) の位置では，流速は $0.2 < Y^* < 0.8$ および $-0.5 < Z^* < 0.5$ の範囲内でほぼ一様となり，X=700 (mm) の位置では，$0.1 < Y^* < 0.9$ および $-0.6 < Z^* < 0.6$ の範囲でほぼ一様になる。したがって，整流部を通過してほぼ一様になった流れはノズル入口部までの領域で発達し，ノズル内へ入る。ところが，ノズル内では流れが加速されるため，Xの増加に伴ない境界層の厚さ

は薄くなり，ふたたび一様流に近づく。また，各位置での流れの方向は，X Y面に平行で，ノズル部の底面と上面の交点（X＝1600（mm））とその位置を結ぶ線に一致する。

5.4 ノズル内流れ中における線状体の落下実験方法

線状体の落下特性として，重心の軌跡，速度および姿勢，角速度を考え，流速，線状体の比重量，長さ，直径および初期角度が落下特性におよぼす影響を調べた。

5.4.1 線状体の落下実験方法

すでに述べたように，実験装置は，テスト部以外はすべて矩形管内流れ中における場合と同じであり，したがって，線状体の落下実験方法も矩形管内流れ中における場合とまったく同じであるので，ここでは簡単に述べる。（詳細は4.4.1項参照のこと）

2個の流量調節用バルブおよびポンプ用バルブにより流量を調節し，流れが定常状態になった後，線状体を落下させ，運動状態をマルチストロボ撮影した。撮影は，ノズル部側方（NO.1カメラ）と上方（NO.2カメラ）の直角2方向からおこない，2枚のフィルム面上に運動状態を記録した。また，ノズル部底面の外側に落下点測定用グラフを取付け，線状体の最終落下点位置を調べた。なお，本実験装置の座標系は流速分布測定の場合と異なり，ノズル部入口から100（mm）下流（線状体重心の初期位置）のノズル部上面の内側の幅方向中心を原点（0）とし，水平方向流れの向きにX軸，鉛直下向きにY軸，幅方向にZ軸を定めた。

撮影では，実験室全体を暗室とし，運動状態が十分わかるような写真間隔を得るため，実験条件によりストロボ発光数をS＝480～1500（cpm）の範囲で変化させた。

線状体落下装置の概要を図5.11に示す。線状体を落下させる方法は矩形管流れ中での場合と同じで，ピンセット押上げ用ネジ③でピンセット⑦を押上げると，所要の初期角度αで固定されている線状体⑩が落下し始め，スリット⑪を通ってノズル内へ落下する。

実験には，比重量の影響を調べるため，鉛筆の芯（No.1試料）とピアノ線（No.2試料）の2種類の試料を用いた。そして，ノズル入口部平均流速は，$U=10, 20, 40, 60$ (mm/s) の4種類とした。それらの試料条件および実験条件を表5.1～表5.3に示す。

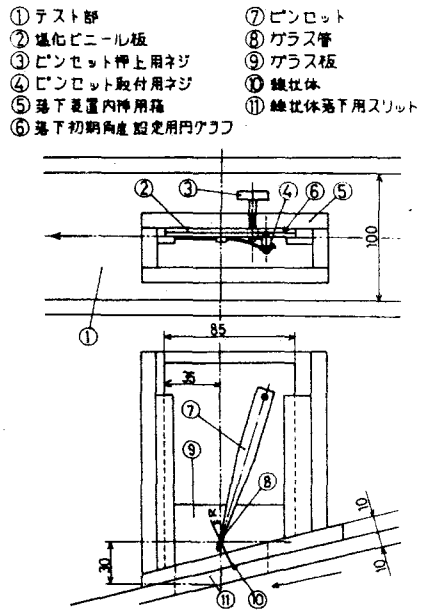


図5.11 線状体落下装置概要

表5.1 試料および実験条件 1

試料番号	試料名	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 γ_s (g/cm³)	落下初期角度 α(°)
1	鉛筆芯	0.378	30 60	1.793	0
		0.569	15 30 45 60	1.627	2
		0.720	30 60	1.641	5
		0.912		1.562	
2	ピアノ線	0.217	30 60	7.098	0
		0.322	15 30 45 60		2
		0.428	30 60		5
		0.527			

U = 60 (mm/s)

表5.1は $U=60$ (mm/s) の場合であり，表5.2は $U=20, 40$ (mm/s) の場合で，試料条件を必要最小限にとどめた。表5.3は $U=10$ (mm/s) の場合であり，矩形管内流れ中，ノズル内流れ中の場合を通じて，これだけが層流域である。したがって，$U=10$ (mm/s) の実験は乱流域と層流域で線状体の運動に相違があるかどうかを調べる目的も兼ねている。

なお，$U=10, 20, 40$ (mm/s) の場合，初期角度はすべて $\alpha=0°$ とした。

これらの実験では，流速U，線状体の比重量γ_b，長さℓ，直径dおよび初期角度αがおよぼす影響について調べた。

初期角度αとは，初期位置での線状体の軸方向と鉛直線のなす角度であり，図5.11に示したように流れの向きとは逆向きである。

以上の実験は，初期位置における水平面内での線状体の軸方向と流れの方向のなす角度$\beta=0°$でおこなった。(図4.13参照)

つぎに，矩形管内流れ中での場合と同様に，βの影響を調べるため，表5.4に示す試料条件および実験条件で，初期角度$\alpha=90°$，$\beta=45°$で実験をおこなった。以上，2種類の実験では，線状体重心の初期位置はノズル幅方向の中心（XY面上）である。

表5.2 試料および実験条件2

試料番号	試料名	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 γ_b(g/cm³)	平均流速 U(mm/s)
1	鉛筆芯	0.569	30 60	1.627	20
		0.912		1.562	40
2	ピアノ線	0.322	30 60	7.098	20
		0.527			40

表5.3 試料および実験条件3

試料番号	試料名	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 γ_b(g/cm³)
1	鉛筆芯	0.378	30	1.793
		0.569		1.627
		0.720	60	1.641
		0.912		1.562
2	ピアノ線	0.217	30	7.098
		0.322		
		0.428	60	
		0.527		

U=10 (mm/s)

表5.4 $\beta=45°$の試料および実験条件

試料番号	試料名	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 γ_b(g/cm³)	流速 U(mm/s)
1	鉛筆芯	0.569	15 30 45 60	1.627	10 20
		0.720	30 60	1.641	40
		0.912		1.562	60
2	ピアノ線	0.322	30 60	7.098	60
		0.527			

実験では，各実験条件につき15本程度の線状体を落下させ，最終落下位置での線状体重心の水平方向移動距離の平均値に近い実験を2個ないし3個選び，それらの写真から線状体両端の座標を読取る。この座標を以下で述べる方法でX，Y座標に変

換し，2.9.3項で述べた方法により落下特性を求め，それらを図示し，検討した後，その中の1つを実験データとして採用した。

5.4.2 写真面上から真の落下運動を求める方法

ノズル部上方からの撮影により，線状体はほぼXY面内で運動することが確認できたので，矩形管内流れ中での場合と同じ方法で，写真面上の座標をX，Y座標に変換することができた。図5.12に示すように，ノズル部前面のアクリル板上に，X，Y座標を表わす目印ABCDを設けた。ABおよびCDはノズル部内壁に沿った位置に設けてある。

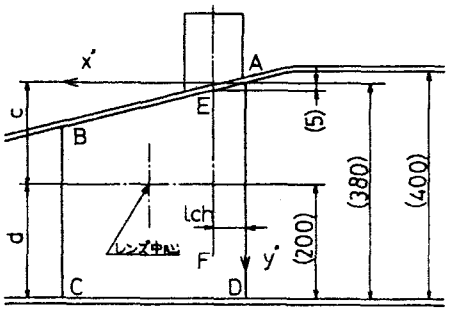


図5.12 写真上の基準位置

この目印のうち，Aを原点(O')，水平方向にx'軸，ADをy'軸とし，写真から線状体両端の座標(x'_{i1}, y'_{i1})，(x'_{i2}, y'_{i2})を読取る。なお，図5.12において，( )内の数値は実際の長さである。x', y'座標をX，Y座標に変換するためには，XY面とノズル前面の被写体距離L_1，L_2を考慮する必要がある。まず，写真面上でのx', y'方向の補正値ℓ_{ch}，ℓ_{cv}について考える。

レンズ中心はノズル底面から200(mm)の位置にあるので，鉛直方向補正ℓ_{cv}は

$$\ell_{cv} = [180/380 - (175/380)(L_2/L_1)](c+d) \qquad (5.3)$$

となり，写真から$(c+d)$を読取れば，ℓ_{cv}が求まる。

いっぽう，水平方向補正値ℓ_{ch}は，実験に際してY軸と一致させて設けた目印EFを$U=0$の状態で撮影しておき，その写

真から読取る。

したがって，線状体両端の実際の座標は

$$A = 380 / [(L_2/L_1)(C+\alpha)] \tag{5.4}$$

とすると，

$$\left.\begin{aligned} X_{ij} &= A(x'_{ij} - \ell_{ch}) \\ Y_{ij} &= A(y'_{ij} - \ell_{cv}) \end{aligned}\right\} \quad (j=1,2) \tag{5.5}$$

となる。

そこで，この線状体両端の座標から，2.9:3項で述べた方法により落下特性を求めた。

以上，線状体の落下実験により，流速，線状体の比重量，長さ，直径および初期角度が重心の軌跡，速度および姿勢，角速度におよぼす影響を調べることができた。

以下では，その結果について報告する。その際，落下特性は矩形管内流れ中での場合と同じ表現方法とする。

5.5 線状体の落下特性

この節では，以下で諸要因が落下特性におよぼす影響を述べる前に，線状体の落下特性の概要について説明する。

$U=60$ (mm/s)，$d=0.569$ (mm)，$\ell=30, 60$ (mm) と $d=0.912$ (mm)，$\ell=30$ (mm) の落下軌跡を図5.13に示す。

線状体の初期位置は，$Y=0$ の上方30 (mm) である（図5.11参照）

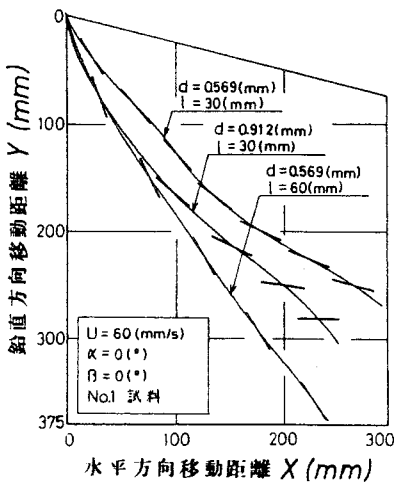


図5.13 線状体の落下軌跡

ので，線状体が落下装置から流れ中に入るとき，その先端部が流れ中に入り，後端部が落下装置内に残る状態が瞬間的に発生する。そのとき，先端部が流体から抗力を受けるため，線状体は急激に流れの向きに回転する。したがって，$d=0.569\,(mm)$，$\ell=30\,(mm)$の場合，線状体がすべて流れ中に入ったときの鉛直方向に対する線状体の傾斜角（回転角θ）は約25°となっている。その後，線状体は水平方向に姿勢を回転させながら落下し，最終的にその姿勢は水平方向に漸近する。しかし，姿勢の変化を示す図5.14を見れば分かるように，姿勢は矩形管内流れ中での場合のように滑らかに変化せず，曲線の接線勾配（これは角速度を表わしている。）が大きい所と小さい所が繰返し現われ，変動しながら水平方向に近づく。なお，この変動は減衰振動のように除々に小さくなる。

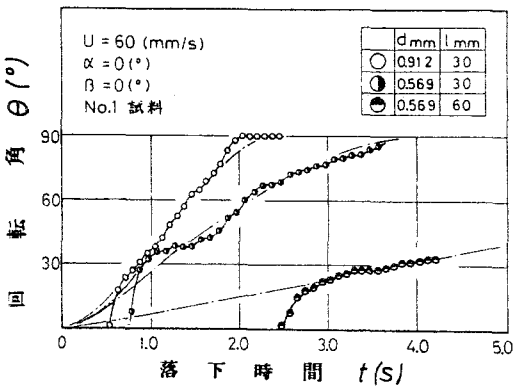


図5.14　線状体の姿勢の変化

また，重心の軌跡も，矩形管内流れ中での場合と異なり，いくつかの変曲点をもつ曲線となっている。とくに，$d=0.569\,(mm)$，$\ell=30\,(mm)$の場合，明確に現われ，$\theta=38°$（$Y=85\,(mm)$），$\theta=42°$（$Y=130\,(mm)$），$\theta=68°$（$Y=230\,(mm)$）付近の3点で，重心の軌跡は変曲点をもつ。$\theta=38°$，$68°$付近では，軌跡の接線勾配dY/dXは極小となり，$\theta=42°$付近では極大となる。図5.14から，dY/dXが極小になるときのθの値は，角速度が小さくなる（ほとんど0）ときのθの値とほぼ一致することが分かる。

つぎに，重心の速度の変化を調べるため，$d=0.569\,(mm)$，$\ell=30,60\,(mm)$のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図5.15，5.16に示す。図には，矩形管内流れ中での結果が一点鎖線で

併記されている。θの変化に対して，$\dot{X}$，$\dot{Y}$は矩形管内流れ中での場合のように滑らかに変化せず，加速と減速を繰返す現象が見られる。すなわち，角速度が急激に減速されている領域では，速度も減速され，ふたたび角速度が加速され始めると，速度もふたたび加速される状態が見られる。

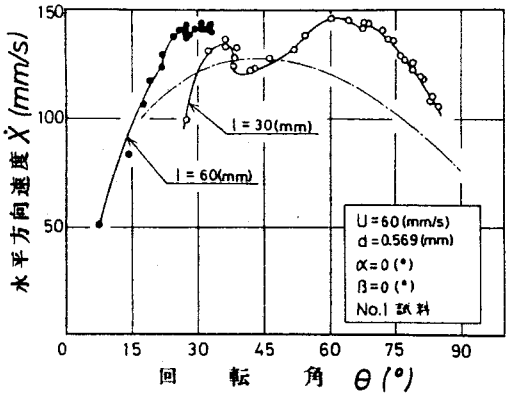


図5.15　水平方向速度の変化

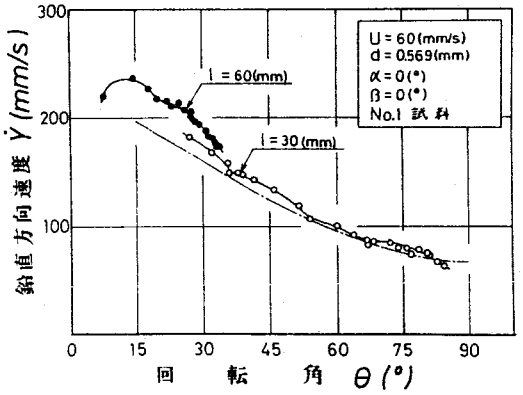


図5.16　鉛直方向速度の変化

また，図5.15において，ℓ=30(mm)の場合，θの小さい領域では，ノズル内流れ中での$\dot{X}$は矩形管内流れ中での$\dot{X}$の上下を変動しているが，θの大きい領域では，線状体は下流側の下方に位置し，しかもノズル内では流れが加速しているため，流速の水平方向成分は矩形管内流れ中での場合より大きくなり，したがって，ノズル内流れ中の方が$\dot{X}$は大きくなる。いっぽう，図5.16において，ノズル内では流速が鉛直方向成分を持っているため，$\dot{Y}$は矩形管内流れ中での場合より大きくなる。しかし，θの増加に伴ない線状体はノズルの下方に位置するため，流れの方向はほとんど水平になるので，ノズル内流れ中での場合と矩形管内流れ中での場合の差は減少する。

以上のように，線状体がノズル内流れ中で運動する場合，姿勢および重心の速度の変化には，矩形管内流れ中での運動では見られなかった細かい変動が現われる。以下では，この変動の

原因について考える。

ノズル内流れは加速しており，線状体の先端部付近の流速は，後端部付近の流速より大きく，角速度が小さいときには，線状体に対する流体の軸に直角な方向の相対速度は先端部付近の方が大きくなり，線状体の姿勢を水平にする向きに回転モーメントが作用するため，角速度は加速される。ところが，角速度が大きくなると，線状体が流体から軸に直角方向に受ける抗力に基づく回転モーメントは，角速度の向きと逆向きに作用し始めるため，角速度は減速される。そして，ふたたび角速度が小さくなると，上述の原因で角速度が加速されるという変動を繰返す。したがって，角速度の加速が大きいほど減速も大きくなると考えられる。すなわち，変動の振幅は大きくなる。しかし，角速度には除々に変動が見られなくなる。線状体は，その角速度を変動させながら運動し続け除々にノズル底面に近づくが，流れの方向は底面に近いほど水平になり，しかも，線状体の姿勢は水平に近づくため，軸に直角な方向の流体の相対速度は，線状体の先端部付近と後端部付近でほとんど差がなくなり，角速度には除々に変動が見られなくなると考えられる。

いっぽう，図5.15，5.16において，$\ell = 30\,(mm)$の場合，$\theta = 38°$と$68°$付近で$\dot{X}$は急激に減速され，$\dot{Y}$もわづかに減速される現象が見られる。流れ中に入った線状体は，流体から受ける抗力により水平方向に加速され，鉛直方向に減速されるが，線状体の運動に伴ない$\dot{X}$は増大し，姿勢は水平方向に回転するため，線状体に対する流体の相対速度は小さくなり，流体から受ける水平方向の抗力が減少するため，線状体の水平方向加速度は減少する。したがって，加速度の方向は反時計回りに回転し，$\dot{X}$が極大となる$\theta = 36°$付近で鉛直上向きとなる。すなわち，$\theta = 36°$付近まで水平方向に加速される。このとき，重心の水平方向移動距離は約$50\,(mm)$であるから，この断面での平均流速は約$66\,(mm/s)$である。ここで，一点鎖線で表わされている

矩形管内流れ中での$\dot{X}$の最大値と$\theta=36°$付近のノズル内流れ中での$\dot{X}$の極大値を比較すると，ノズル内流れ中での極大値の方が約6(mm/s)大きく，これは両者の流速の差と一致する。θが36°を越えると水平方向加速度は負となり，$\theta=38°$付近で重心の運動方向と加速度の方向が一致し，重心の軌跡は変曲点をもつ。また，水平方向加速度が負となるため，$\dot{X}$は減少する。いっぽう，線状体は約38°の姿勢を保ったまま下方に運動するが，ノズル底面に近いほど流れの方向は水平となり，流体の線状体に対する軸方向の相対速度が大きくなるため，軸方向に作用する抗力が増大し$\dot{Y}$は減少する。しかし，線状体が約38°の姿勢を保って下流方向へ運動し続けると，ノズル内流速は下流側ほど大きいため，ふたたび水平方向に加速され始める。そして，上述と同じ原因で$\theta=62°$付近で$\dot{X}$は極大になり，$\theta=68°$付近でふたたび減少する。なお，$\theta=62°$付近の方が，線状体は下流側に位置するため，$\dot{X}$の極大値は大きくなる。

以上述べた原因で，重心の速度は変動するため，姿勢の変化および線状体が運動する位置が異なると，速度の変動状態が変わる。

以上の結果をまとめると，重心の軌跡はいくつかの変曲点をもつ曲線となり，姿勢は減衰振動のように変動しながら水平方向に漸近し，重心の速度も変動する。このように，落下特性に変動が見られるのは，ノズル内流れが加速していることと，ノズル内では位置によって流れの方向が異なることが主な原因である。

5.6 初期角度の影響

この節では，$\alpha=0°, 5°$変化させたときの実験結果から，初期角度が落下特性におよぼす影響を調べる。

5.6.1 線状体の落下軌跡

$d=0.569\,(mm)$，$\ell=30\,(mm)$のNo.1試料を，ノズル入口平均流速$U=60\,(mm/s)$の流れ中に，$\alpha=0°, 5°$で落下させたときの落下軌跡を図5.17に示す。図中の線状体の時間間隔は$\Delta t=0.3\,(s)$である。

$\alpha=0°, 5°$ともに，重心の軌跡はいくつかの変曲点をもつ曲線となるが，矩形管内流れ中での場合と異なり，両者の軌跡の形は少し異なっている。すなわち，$\alpha=0°$の軌跡の方が曲線の変動が大きい。これは，ノズル内流れが加速していること，ノズル内では位置によって流れの方向が異なることなど，位置によって流れの状態が異なるため，その影響が現われたと考えられる。

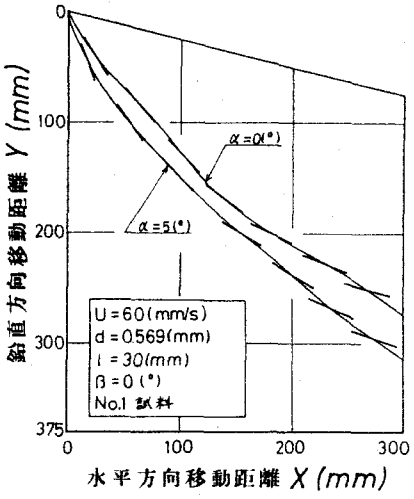


図5.17 落下軌跡におよぼす初期角度の影響

図5.17において，$\alpha=5°$の軌跡の方が下方に位置している。初期角度が大きい方が，線状体がすべて流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近いため，鉛直方向速度は大きく，水平方向速度は小さくなり，重心の軌跡は下方に位置する。

重心の軌跡が上方に位置すると，流れが加速している影響を受け易くなり，軌跡が大きく変動すると考えられる。

したがって，初期角度は，線状体が運動する位置に影響を与えるが，その結果，ノズル内の流れ特性により重心の軌跡の形も異なる。

5.6.2 線状体重心の速度

$U=60\,(mm/s)$，$d=0.569\,(mm)$のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図5.18，5.19に示す。図には，$\ell=30, 60\,(mm)$の曲線

を併記している。

$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに加速と減速を繰返す現象が見られる。ノズルの形状から，流速の水平方向成分の方が鉛直方向成分より大きいため，$\dot{X}$と$\dot{Y}$の変動を比較すると，$\dot{X}$の変動の方が大きい。また，姿勢の変化を表わす図5.22から，角速度が加速，減速されるときのθの値と，重心の速度が加速，減速されるときのθの値は一致することが分かる。

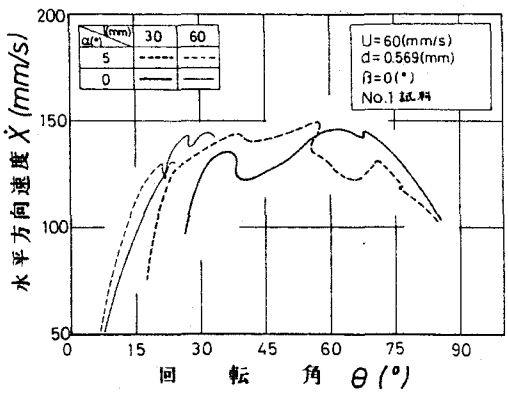


図5.18 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

図5.18において，同一回転角に対する$\dot{X}$の値はαが大きい方が大きくなる。ただし，$\ell=30(mm)$の場合，$\theta>55°$の領域ではこの傾向は見られなくなる。

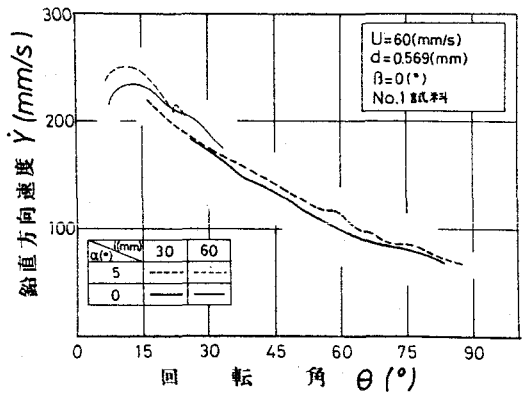


図5.19 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

これは，つぎの原因による。αが大きい方が，線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近いため，流体から水平方向に受ける抗力が大きくなり，水平方向へより大きく加速され，落下後の領域で$\dot{X}$は大きくなる。また，αが大きい方が重心の軌跡は下方に位置し，ノズル底面に近いほど，流速の水平方向成分が大きいためであると考えられる。ところが，θが大きい領域というのは，線状体がノズルの下の方まで落下している領域であり，この領域では流れはほとんど水平方向を向いており，流速の水平方向成分の差が小さいため，$\dot{X}$に対するαの影響が小さくなる。また，$\ell=$

60(mm)の場合，$\theta < 22°$の領域で$\alpha = 5°$の方が$\dot{X}$の値は大きくなる。これは，$\alpha = 5°$の方が，流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近いことと，さらに，同一回転角に対する線状体の位置が下流側の下方であるため，流速の水平方向成分が大きくなることに起因する。しかし，$\alpha = 5°$の場合，$X = 180$(mm)付近でノズル底面に到達するが，$\alpha = 0°$で落下した線状体は，さらに下流側へ運動し続ける（図5.13参照）ため，$\dot{X}$は加速され，$\theta > 22°$の領域では$\alpha = 0°$の方が大きくなる。

いっぽう，図5.19において，$\ell = 60$(mm)の場合，線状体が鉛直方向に加速されている状態が見られるが，$\ell = 30$(mm)の場合，この状態が見られない。これは，$\ell = 30$(mm)の方が，線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化が大きく，流れ中ではつねに鉛直方向に減速されるからである。また，$\alpha = 0°, 5°$の場合を比較すると，$\alpha = 5°$の方が同一回転角に対する$\dot{Y}$の値は大きく，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は小さい。すでに述べたように，αが大きい方が，線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近いため，流体から鉛直方向に受ける抗力は小さく，鉛直方向により大きく加速されるからである。また，θが大きくなるとαの影響が小さくなるのは，$\dot{X}$の場合と同じ原因による。

ここで，矩形管内流れ中での結果と比較する。矩形管内流れ中での$U = 60$(mm/s)，$d = 0.569$(mm)の場合，θと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係にはαの影響は見られなかった。（図4.16，4.17参照）いっぽう，ノズル内流れ中での場合，αの影響が明確に現われた。初期角度により線状体が運動する位置が異なることは，両者共通であるが，矩形管内流れの場合，流速の場所的変化はわずかであるのに対し，ノズル内流れでは，流速の場所的変化が大きいため，αの影響が異なったと考えられる。

つぎに，矩形管内流れ中での場合にも，αの影響がθの小さい領域で見られた$U = 60$(mm/s)，$d = 0.912$(mm)のNo.1試料

の結果を図5.20, 5.21に示す。

この場合にも，$\dot{X}$，$\dot{Y}$が加速と減速を繰返す現象が見られるが，$\alpha=0.569$(mm)の場合と比較して変動の大きさは小さい。

図5.20において，同一回転角に対する$\dot{X}$の値はαが大きいほど大きく，$\ell=30$(mm)の場合，θのほとんど全領域でこの傾向が見られ，αの影響のおよぶθの領域は，$\alpha=0.569$(mm)の場合より大きくなる。いっぽう，図5.21において，$\dot{Y}$におよぼすαの影響はθの小さい領域でのみ現われ，αが大きいほど同一回転角に対する$\dot{Y}$の値は大きく，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は小さい。しかし，θの増加に伴ない変動を除いた$\dot{Y}$の平均的な変化にはαの影響は見られなくなり，αにかかわらずほぼ同一曲線で表わされる。$\dot{X}$に関しては，αの影響がθのほとんど全領域で見られたのに対し，$\dot{Y}$に関しては，θの小さい領域でのみ現われたのは，ノズルの形状から，流速の鉛直方向成分は水平方向成分に比べて小さいことと，$\alpha=0.912$(mm)の場合，慣性が大きく流速の場所的変化の影響を受けにくいことに起因する。

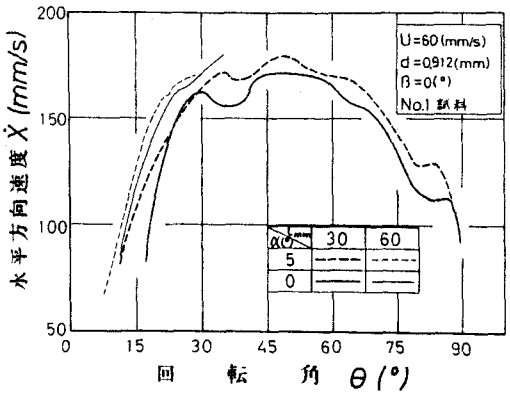


図5.20 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

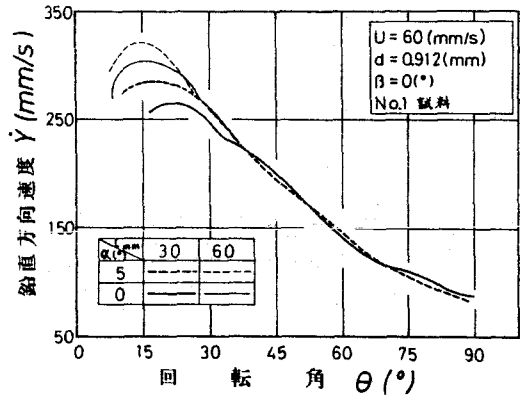


図5.21 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

ここで，$\alpha=0.569$(mm)の場合と$\alpha=0.912$(mm)の場合を比

較すると，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに直径の小さい$d=0.569(mm)$の方がαの影響を受け易いことが分かる。これは，直径が小さい方が慣性が小さく流れの影響を受け易いからである。なお，No.1試料の結果との比較から，ρ_sが大きいNo.2試料の場合，重心の速度はαの影響を受けにくいことが分かった。

以上の結果から，初期角度は，線状体が運動する位置に影響を与え，位置による流速および流れの方向の違いが$\dot{X}$，$\dot{Y}$に初期角度の影響となって現われる。また，初期角度の影響は，線状体の慣性が小さいほど，すなわち，長さ，直径，比重量が小さいほど現われ易い。

5.6.3 線状体の姿勢

$U=60(mm/s)$，$\alpha=0.569(mm)$のNo.1試料のtとθの関係を図5.22に示す。図には，$\ell=30$，$60(mm)$のデータをプロットしている。

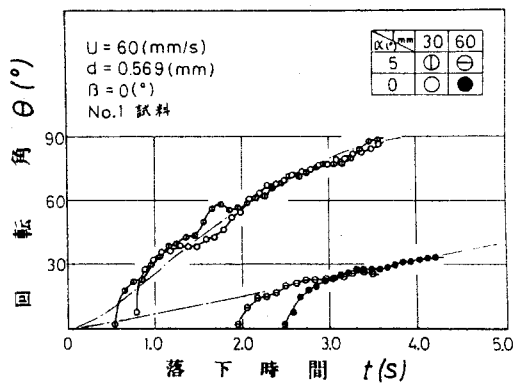


図5.22 姿勢におよぼす初期角度の影響

線状体は，流れ中に入った瞬間に流れの向きに急激に回転するが，その後は，角速度が加速される状態と減速される状態が交互に現われ，変動しながらその姿勢は水平方向に近づく。なお，この変動は減衰振動のように除々に小さくなる。また，αにより線状体が運動する位置が異なり，ノズル内流れでは流速の場所的変化が大きいため，姿勢の変動状態には差が生じ，$\alpha=5°$の方が変動が多く見られる。これは，$\alpha=0°$の場合と比較して，$\alpha=5°$で落下した線状体の方がノズルのより下方で運動するため，場所により流れの方向が異なる影響を受け易いこと

による。しかし，この変動を除いた平均的な姿勢の変化には，落下直後の急激な姿勢の変化の領域を除き，αの影響はほとんど見られない。なお，落下直後の急激な姿勢の変化はαが小さい方が大きくなる。また，図中の一点鎖線は，静止流体中での線状体の姿勢の変化を表わす曲線であり，矩形管内流れ中での場合，落下直後の急激な姿勢の変化の領域を除き，流速に関係なく姿勢はこの曲線に基づいて変化する（4.9節参照）ことから，この曲線は矩形管内流れ中での姿勢の変化を表わしている。したがって，長さの影響を示す5.7.3項に記載する図5.29，5.30から，ノズル内流れ中での変動を除いた平均的な姿勢の変化は，αにかかわらず矩形管内流れ中での姿勢の変化とほぼ一致することが分かる。

つぎに，$d=0.569$ (mm) の場合に比べて，重心の速度に対するαの影響が小さかった $d=0.912$ (mm) のNo.1試料の姿勢の変化を図5.23に示す。

$d=0.912$ (mm) の方が慣性モーメントが大きく，流速の場所的変化の影響を受けにくいため，姿勢の変動は $d=0.569$ (mm) の場合より小さい。したがって，姿勢の変動状態におよぼすαの影響はほとんど見られない。また，この変動を除いた平均的な姿勢の変化は，落下直後の急激な姿勢の変化の領域を除き，αにかかわらず同一曲線で表わされる。なお，d_b が大きいNo.2試料の場合，No.1試料に比べて姿勢の変動は小さく，変動におよぼすαの影響は現われなかった。

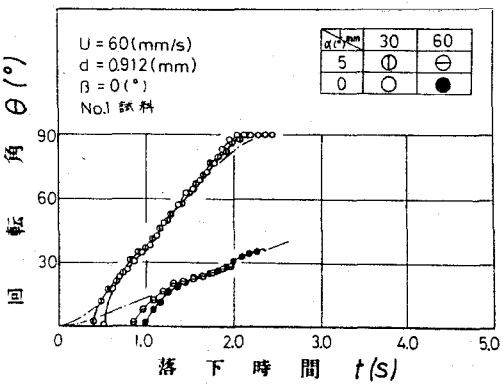


図5.23 姿勢におよぼす初期角度の影響

以上の結果から，初期角度は，線状体が運動する位置に影響

を与え，ノズル内の流れ特性が姿勢の変動に初期角度の影響となって現われる。しかし，平均的な姿勢の変化には，初期角度は影響をおよぼさない。また，初期角度の影響は線状体の慣性モーメントが小さいほど現われ易い。

5.7 線状体長さの影響

この節では，$\ell = 15, 30, 45, 60$ (mm) 変化させたときの実験結果から，線状体長さが落下特性におよぼす影響を調べる。

5.7.1 線状体の落下軌跡

$U = 60$ (mm/s)，$d = 0.569$ (mm)，$\ell = 15 \sim 60$ (mm) の No.1 試料の落下軌跡を図5.24に示す。線状体の時間間隔は，$\ell = 15 \sim 60$ (mm) の場合，$\Delta t = 0.3, 0.3, 1/3, 4/11$ (s) である。

重心の軌跡は，いくつかの変曲点をもつ曲線となり，ℓ が小さいほど曲線の変動が大きい。これは，位置により流速および流れの方向が異なることが主な原因である。図5.24において，長さが小さい線状体ほど，すべて流れ中に入ったときの姿勢がより水平に近いため，鉛直方向速度は小さく，水平方向速度は大きくなり，ノズルの上方で運動する。ノズル上方で運動する場合，流れが加速している影響を受け易くなり，また，ℓ が小さいほど慣性が小さく，流れの影響を大きく受けるため，ℓ が小さいほど軌跡が大きく変動すると考えられる。また，線状体の状態を見れば，同一回転角

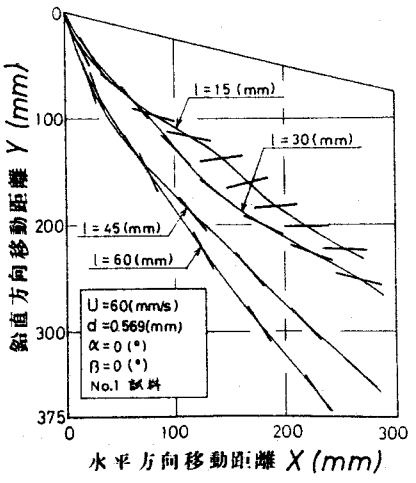


図5.24 落下軌跡におよぼす長さの影響

に対する水平方向と鉛直方向の移動距離は，ℓが大きいほど大きいことが分かる。ℓが大きいほど角速度は小さく，姿勢の変化に要する時間が大きい。さらに，θと重心の速度の関係（図5.25，5.26）から，ある回転角に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は，ℓが大きいほど大きくなる。したがって，同一回転角に対するX，Yの値は大きくなる。ここで，ノズル内流れ中での線状体の落下軌跡の特徴が顕著に現われている$\ell=15$(mm)の場合について説明する。矩形管内流れ中では，落下直後の急激な回転の領域を過ぎると，線状体は除々に水平方向に姿勢を回転させながら落下し，水平な姿勢になって回転が止まり，このもっとも安定な姿勢を保ったまま運動し続け矩形管底面に到達する。ところが，図5.24の$\ell=15$(mm)の場合，流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化が大きく，また，角速度も大きいため，$Y=130$(mm)付近で姿勢は水平になるが，$\theta=75°$付近から角速度は加速されており（図5.29参照），慣性モーメントが小さいことと，まだノズルの上方で運動しているので，流れの方向が水平方向に対して傾いているため，水平な姿勢になっても，角速度は減速されるが，回転は止まらず，$Y=160$(mm)付近でθは最大（約104°）となる。その後も流れが加速しているため，線状体にはその姿勢を水平方向にもどす向きの回転モーメントが作用し続け，姿勢は水平に近づくが，この場合もまた，$\theta=90°$で回転は止まらず，$Y=210$(mm)付近でθは極小（約88°）となる。以上のように，$\ell=15$(mm)の場合，その姿勢は$\theta=90°$を中心にして振動し始める。しかし，線状体が運動し続けノズル底面に近づくと，流れの方向はほとんど水平方向になるので，その振幅は小さくなり，線状体は水平な姿勢を保って底面に到達する。したがって，$\ell=15$(mm)の場合のように，その姿勢がノズル上方で水平に近づく場合，姿勢は水平方向を中心にして減衰振動する。

5.7.2 線状体重心の速度

$U=60$ (mm/s), $d=0.569$ (mm) の θ と $\dot{X}$ の関係および θ と $\dot{Y}$ の関係を図5.25, 5.26 に示す。

$\dot{X}$, $\dot{Y}$ ともに加速と減速を繰返す現象が見られ，その変動は $\dot{X}$ の方が大きい。また，同一回転角に対する $\dot{X}$ の値は，ℓ が大きいほど大きく，この傾向は θ のほとんど全領域で見られる。これは，ℓ が大きいほど，線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近いため，流体から水平方向に受ける抗力が大きくなり，水平方向により大きく加速されること，回転角が同じになる位置は，ℓ が大きいほどノズルの下流側の下方であるため，流速の水平方向成分が大きいことに起因する。

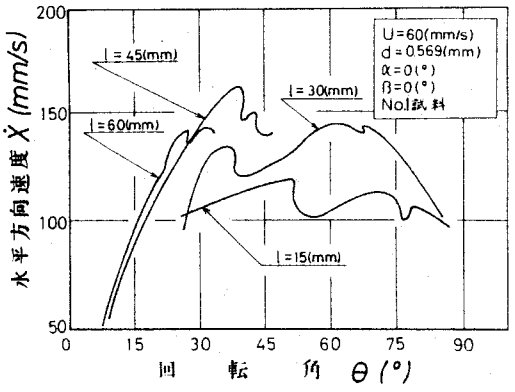


図5.25 水平方向速度におよぼす長さの影響

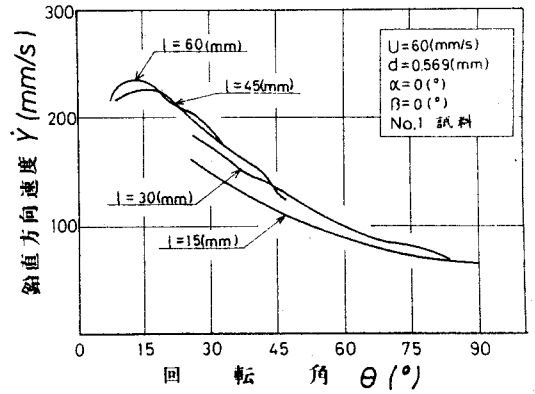


図5.26 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

いっぽう，図5.26において，ℓ が大きいほど，線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近いため，流体から鉛直方向に受ける抗力は小さく，鉛直方向により大きく加速されるため，$\dot{Y}$ の最大値は大きくそのときの θ の値は小さい。しかし，θ の増加に伴ない変動を除いた $\dot{Y}$ の平均的な変化には ℓ の影響が見られなくなり，θ と $\dot{Y}$ の関係を表わす曲線は漸近

し，ほぼ同一曲線で表わされる。また，$\dot{X}$，$\dot{Y}$の変動におよぼすℓの影響は，ℓが小さいほど慣性が小さく流れの影響を受け易いが，線状体の軸方向に沿った流速および流れ方向の変化は，逆にℓが大きいほど大きいため，さらに，ℓが異なれば線状体が運動する位置が異なるため，明確に現われない。

ここで，矩形管内流れ中での結果と比較する。$U=60(mm/s)$，$d=0.569(mm)$の場合，矩形管内流れ中ではℓの影響は見られなかった。(4.6節参照) いっぽう，ノズル内流れ中ではℓの影響が明確に現われた。これは，長さが大きいほど，線状体は管内の下方で運動することは両者共通であるが，矩形管内流れの場合，流速の場所的変化はわずかであるのに対し，ノズル内流れでは，流速の場所的変化が大きいためである。また，この実験条件の場合，矩形管内流れ中では，線状体が落下直後に鉛直方向に加速される状態が見られず，ノズル内流れ中で見られたのは，流れが鉛直方向成分を持つため，線状体が鉛直方向により大きく加速されるからである。

これまでは，$U=60(mm/s)$，$d=0.569(mm)$のNo.1試料について，長さがおよぼす影響を調べたが，以下では，直径，比重量および流速が異なる場合，長さが重心の速度にどのような影響をおよぼすかを調べる。

$U=60(mm/s)$，$d=0.912(mm)$の結果を図5.27，5.28に示す。この場合にも，同一回転角に対する$\dot{X}$の値は，ℓが大きいほど大きくなり，また，ℓが大きいほど$\dot{Y}$の最大値は大きくそのときのθの値は小さいが，θの増加に伴ない変動を除いた$\dot{Y}$の平均的な変化にはℓの影響が見られなくなり，θと$\dot{Y}$の関係はほぼ同一曲線で表わされる。なお，$d=0.569(mm)$の場合と比べて，$\dot{Y}$はθのより小さい領域でℓの影響を受ける。この結果は，矩形管内流れ中での場合，dが大きいほどθの広い領域でℓの影響が現われるという結果と逆になる。しかし，4.7節に記載した矩形管内流れ中での結果，図4.35と図5.28を比較す

ると分かるように，d=0.912 (mm)の場合，ℓ=60 (mm)の方が大きいθの領域は，ほぼ一致（約35°）することが分かる。したがって，直径が大きい場合，慣性が大きく流速の場所的変化の影響を受けにくいことが原因で，矩形管内流れ中での結果と逆の結果になったと考えられる。

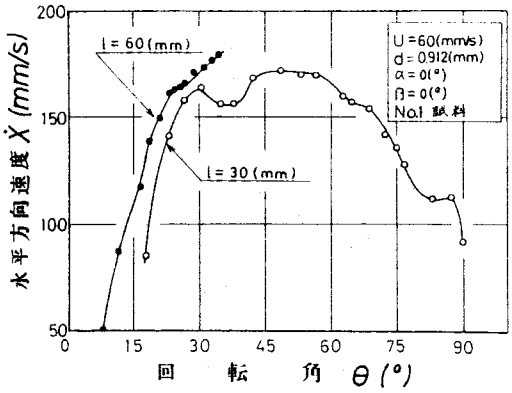


図5.27 水平方向速度におよぼす長さの影響

つぎに，比重量の影響を示す5.9.2項に記載する図5.42，5.43から，d_0が大きいNo.2試料の方が$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにその変動は小さくなり，ℓの影響が現われ易いことが分かる。すなわち，ℓ=60 (mm)とℓ=30 (mm)の$\dot{X}$および$\dot{Y}$の差は，d_0が大きい方が大きくなる。

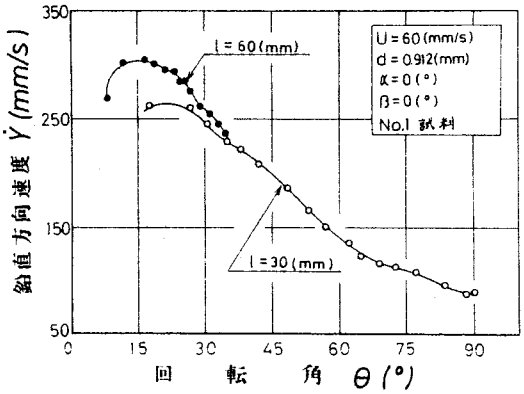


図5.28 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

また，流速の影響を示す5.10.2項に記載する図5.46，5.47を見ると，$\dot{X}$の変動はUが大きいほど大きく，しかも，Uが大きいほどℓ=60 (mm)とℓ=30 (mm)の$\dot{X}$の差は大きくなる。いっぽう，ℓ=60 (mm)とℓ=30 (mm)の$\dot{Y}$の差には，Uの影響が矩形管内流れ中での場合ほど顕著には現われていないが，Uが小さいほどℓの影響が現われ易い傾向にある。

以上の結果をまとめると，長さの影響は，$\dot{X}$に関してはθのほとんど全領域で現われ，$\dot{Y}$に関してはθの小さい領域で現わ

れ，同一回転角に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値はℓが大きいほど大きい。しかも，長さの影響は，線状体の慣性が大きいほど，また，$\dot{X}$に関してはUが大きいほど，$\dot{Y}$に関してはUが小さいほど明確に現われる。しかし，$\dot{X}$，$\dot{Y}$の変動には長さの影響が明確に現われない。

5.7.3 線状体の姿勢

$U=60$ (mm/s)，$d=0.569$ (mm)のNo.1試料のtとθの関係を図5.29に示す。落下直後の急激な姿勢の変化の領域を過ぎると，姿勢は減衰振動のように変動しながら水平方向に近づく。図中の一点鎖線は，矩形管内流れ中での姿勢の変化（ただし，落下直後の急激な姿勢の変化の領域は描かれていない。）であり，変動を除いた平均的な姿勢の変化は，矩形管内流れ中での姿勢の変とほぼ一致する。したがって，ノズル内流れ中での姿勢の変化は，矩形管内流れ中での姿勢の変化を中心にして減衰振動することが分かる。また，平均的な姿勢の変化を比較すると，ℓが小さいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さい。いっぽう，ℓが小さいほど慣性モーメントが小さく，しかもノズル上方で運動するため，流速の場所的変化の影響を受け易く，姿勢の変動は大きくなる傾向にある。また，ℓが小さいほど長時間にわたって姿勢が変動する。

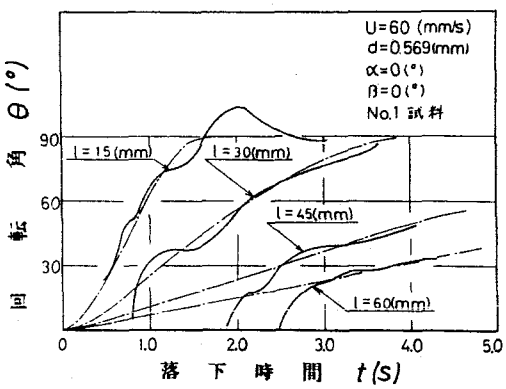


図5.29 姿勢におよぼす長さの影響

ここで，ノズル内流れ中での姿勢の変化が顕著に現われている$\ell=15$ (mm)の場合を見ると，姿勢が水平になっても回転が

止まらず，姿勢は水平方向を中心にして減衰振動することが分かる。これは，慣性モーメントが小さいことと，落下軌跡（図5.24）を見れば分かるように，姿勢が水平方向に近づいたときの線状体の位置がまだノズル上方であるため，流れの方向が水平方向に対して傾いていることに起因する。また，減衰振動するのは，線状体が運動し続けて，ノズル底面に近づくにつれて流れの方向が水平になるためである。図5.29は$\alpha=0°$の場合であったが，図5.30に示す$\alpha=5°$の場合にも，$\ell=15$(mm)の線状体の姿勢が水平方向を中心にして減衰振動する現象が見られる。ただし，αにより線状体が運動する位置が異なるため，振動状態は変わる。また，γ_bの大きい$d=0.322$(mm)，$\ell=15$(mm)のNo.2試料が$U=60$(mm/s)の流れ中で運動する場合，$Y=150$(mm)付近で姿勢は水平方向に近づくため，上述の減衰振動が見られた。

つぎに，$d=0.912$(mm)のNo.1試料の姿勢の変化を図5.31に示す。$d=0.912$(mm)の方が慣性モーメントが大きいため，姿勢の変動は$d=0.569$(mm)の場合より小さいが，姿勢の変化におよぼす長さの影響は$d=0.569$(mm)の場合と同じである。ところが，$\ell=30$(mm)の場合を見れば分かるように，水平な姿勢で回転が止まり，水平な姿勢を保ったまま運動し続ける。これ

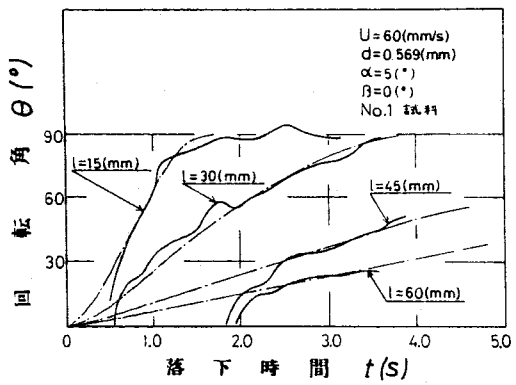


図5.30 姿勢におよぼす長さの影響

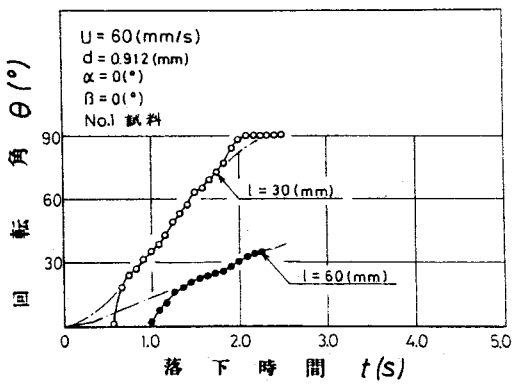


図5.31 姿勢におよぼす長さの影響

は，$d=0.912$ (mm)の場合，慣性モーメントが大きいことと，ノズルの下方（$Y=270$ (mm)付近）で水平な姿勢に近づくためであると考えられる。

したがって，その姿勢がノズルの下方で水平に近づく場合，姿勢は水平方向を中心にして減衰振動する。

5.8 線状体直径の影響

この節では，No.1試料とNo.2試料の直径を変化させたときの実験結果から，線状体直径が落下特性におよぼす影響を調べる。

5.8.1 線状体の落下軌跡

$U=60$ (mm/s)，$\ell=30$ (mm)，$d=0.569$, 0.720, 0.912 (mm)のNo.1試料の落下軌跡を図5.32に示す。図中の線状体の時間間隔は，$d=0.569$ (mm)の場合，$\Delta t=0.3$ (s)，$d=0.912$ (mm)の場合，$\Delta t=0.25$ (s)である。なお，$d=0.720$ (mm)の場合，重心の軌跡のみを示している。この図において，もっとも原点に近い線状体の姿勢を比較すると，直径が小さい$d=0.569$ (mm)の方がより水平に近く，落下直後の急激な姿勢の変化は，dが小さい方が大きいことが分かる。また，重心の軌跡はいくつかの変曲点をもつ曲線となり，dが小さいほど曲線の変動は大きい。dが小さい線状体ほど，すべて流れ中に入ったときの姿勢がより

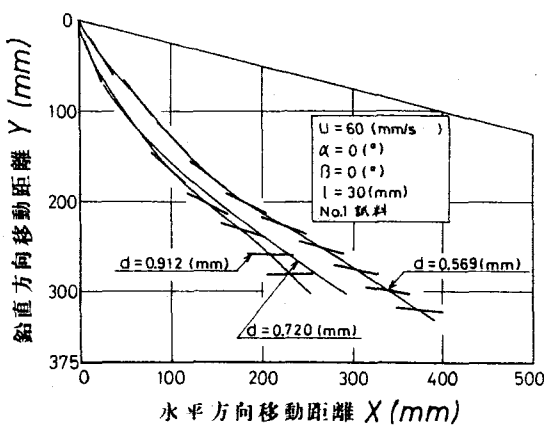


図5.32 落下軌跡におよぼす直径の影響

水平に近いため，鉛直方向速度は小さく，水平方向速度は大きくなり，ノズルの上方で運動する。ノズル上方で運動する場合，流れが加速している影響を受け易くなり，また，αが小さいほど慣性が小さく流れの影響を大きく受けるため，αが小さいほど軌跡が大きく変動すると考えられる。また，線状体の状態を見れば，θが小さいときの領域を除き，同一回転角に対する水平方向と鉛直方向の移動距離はαが小さいほど大きいことが分かる。ある回転角に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値はαが小さいほど小さい（図5.33，5.34参照）が，αが小さいほど姿勢が変化するのに要する時間が大きい（図5.39参照）ため，同一回転角に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は大きくなる。また，ノズル内流れ中でも，矩形管内流れ中での場合と同様に，直径により底面に到達したときの水平方向移動距離に差が生ずるため，直径別に線状体を分類することができる。なお，この差は，流れが加速しているので矩形管内流れ中での場合より大きい。

5.8.2 線状体重心の速度

$U=60$(mm/s)のNO.1試料のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図5.33，5.34に示す。図には，$\ell=30$，60(mm)のデータが

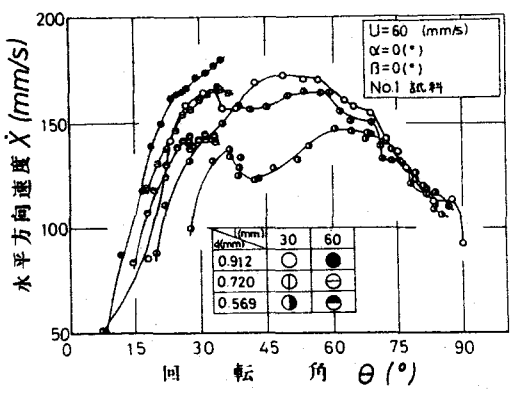


図5.33 水平方向速度におよぼす直径の影響

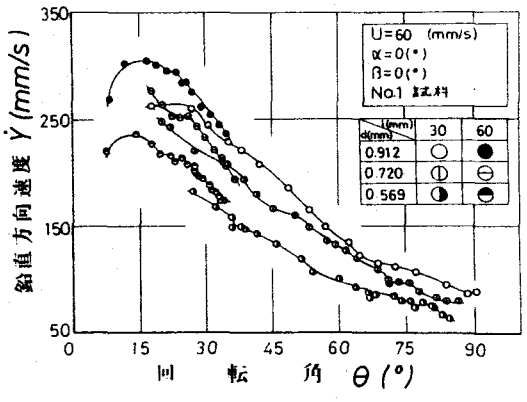


図5.34 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

プロットしてある。$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに加速と減速を繰返す現象が見られ，この変動はαが小さいほど大きくなる傾向にある。これは，αが小さいほど慣性が小さく流れの影響を受け易いことと，ノズルの上方で運動するため，流れが加速している影響を受け易いことに起因すると考えられる。また，これらの図から，同一回転角に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は，αが大きいほど大きく，$\dot{X}$に関しては$\theta < 70°$の領域で見られ，$\dot{Y}$に関してはθの全領域で見られる。矩形管内流れ中での場合，$\dot{X}$はθの全領域でαが大きいほど大きいのに対し，ノズル内流れ中では，θの大きい領域でこの傾向が見られないのはつぎの原因による。すでに述べたように，同一回転角に対する線状体の位置は，αが小さいほど下流側の下方であり，しかも，θの増加に伴ない線状体の位置の差は大きくなる。また，流速の水平方向成分は下流側の下方ほど大きいため，θが大きくなると，αが小さいほど$\dot{X}$は減速されにくくなり，直径の影響が見られなくなる。いっぽう，ノズル底面に近いほど流れの方向は水平方向となり，流速の鉛直方向成分は減少するため，姿勢が水平方向に近づいても$\dot{Y}$はαが大きいほど大きく，直径の影響はθの全領域で見られる。

以上述べた直径の影響は，比重量が大きいNO. 2試料の方が

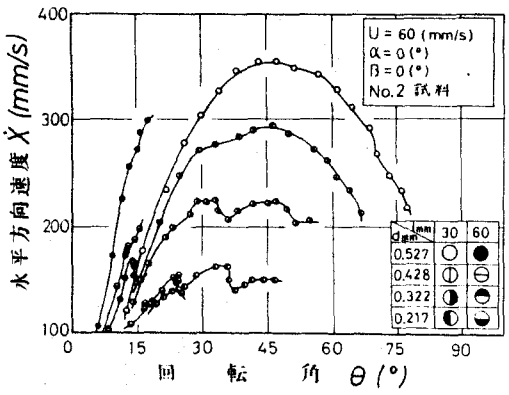


図 5.35 水平方向速度におよぼす直径の影響

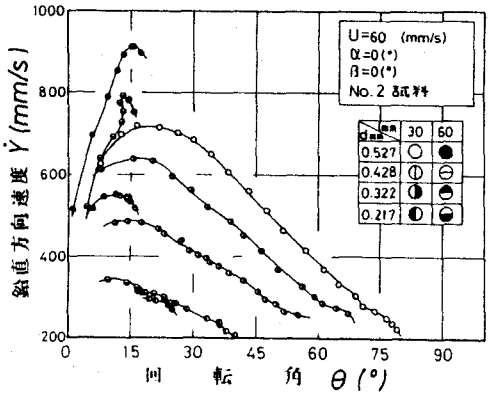


図 5.36 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

顕著に現われる。

No.2試料の $U=60$ (mm/s) の結果を図5.35，5.36に示す。No.1試料と比べて，No.2試料の方が重心の速度は大きく，しかも，慣性が大きいため，流れの影響を受けにくく，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ の変動は小さい。したがって，α が小さいほどこの変動が大きくなることが，No.1試料の場合よりはるかに明確に現われる。また，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに α が大きいほど大きい。ただし，θ が大きい領域でのデータがないため，この領域での結果は分からないが，上述した理由で，$\dot{X}$ の直径による差は小さくなると考えられる。さらに，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに $\ell=60$ (mm) と $\ell=30$ (mm) の差は α が大きいほど大きく，直径が大きいほど長さの影響を受け易いことが分かる。また，図5.36において，α が大きいほど線状体はより水平に近い姿勢になるまで鉛直方向に加速される傾向にあることも分かる。

つぎに，流速が異なる場合の直径の影響を調べるため，$U=10$ (mm/s) の結果を図5.37，5.38に示す。U が小さい方が位置による流速の差は小さく，しかも，線状体が水平方向に移動する

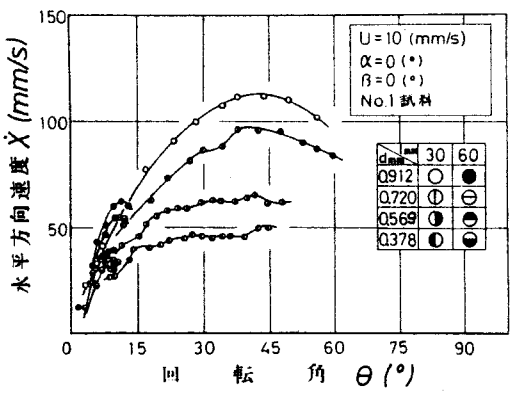


図5.37 水平方向速度におよぼす直径の影響

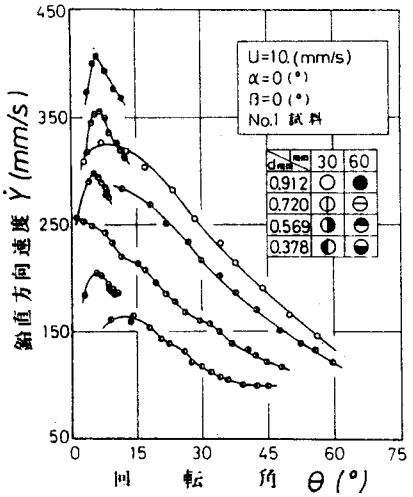


図5.38 鉛直方向速度におよぼす直径の影響

距離も小さくなり，線状体が受ける流速の場所的変化の影響は減少し，$\dot{X}$，$\dot{Y}$の変動は小さくなる。したがって，$U=60$(mm/s)の結果（図5.33，5.34）と比較すれば分かるように，αが小さいほどこの変動が大きくなることが，$U=60$(mm/s)の場合よりはるかに明確に現われる。また，その他の直径の影響も流速が小さい方が顕著に現われることが分かる。

以上の結果をまとめると，直径が大きいほど，$\dot{X}$，$\dot{Y}$は大きくその変動は小さい。しかし，姿勢が水平方向に近づくにつれて$\dot{X}$におよぼす直径の影響は現われにくくなる。なお，直径の影響は，比重量が大きいほど，また，流速が小さいほど，明確に現われる。

5.8.3 線状体の姿勢

$U=60$(mm/s)のNo.1試料のtとθの関係を図5.39に示す。図には，$\ell=30$，60(mm)のデータがプロットしてある。すでに述べたように，変動を除いた平均的な姿勢の変化は，矩形管内流れ中での姿勢の変化（図中の一点鎖線）とほぼ一致し，ノズル内流れ中での姿勢は，矩形管内流れ中での姿勢の変化を中心にして減衰振動しながら水平方向に近づく。また，平均的な姿勢の変化を比較すると，αが大きいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さくなる。いっぽう，αが大きいほど慣性モーメントが大きく，しかも，ノズルの下方で運動するため，流速の場所的変化の影響を受けにくく，姿勢の変動は小さく

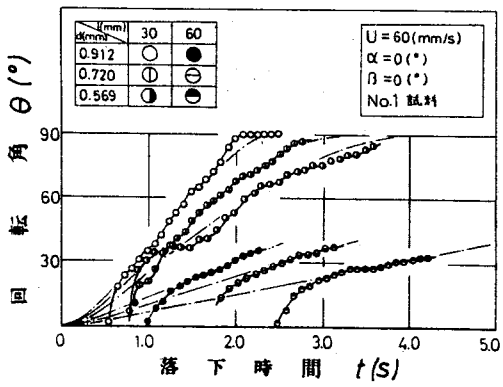


図5.39 姿勢の変化におよぼす直径の影響

なる傾向にある。

以上の結果は，比重量が大きいNO.2試料の場合にも見られ，図5.40から，NO.2試料の方が重心の速度は大きく，しかも，慣性モーメントが大きいため，流れの影響を受けにくく，姿勢の変動は小さくなり，ノズル内流れ中での姿勢の変化は，矩形管内流れ中での姿勢の変化を中心にして変動しながら水平方向に近づくことがいっそう明確になる。また，変動は直径が大きいほど小さいことも分かる。

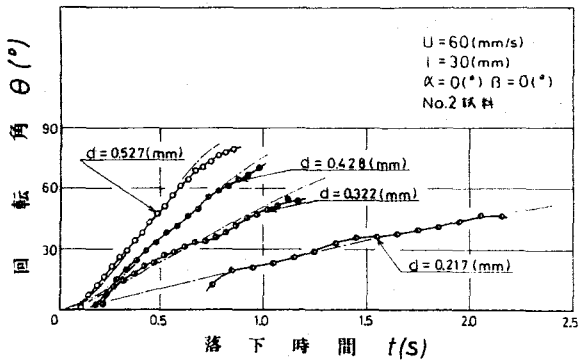


図5.40 姿勢におよぼす直径の影響

なお，直径の影響は，流速が異なる場合にも明確に現われる。

5.9 線状体比重量の影響

この節では，$d=0.569$(mm)のNO.1試料と$d=0.527$(mm)のNO.2試料に対する実験結果から，線状体比重量が落下特性におよぼす影響を調べる。その際，NO.1試料とNO.2試料では直径が異なるため，5.8節で述べた直径の影響も考慮する必要がある。

5.9.1 線状体の落下軌跡

$U=60$(mm/s)のNO.1試料とNO.2試料の落下軌跡を図5.41に示す。図中の$l=30$，60(mm)の線状体の時間間隔は，NO.1試料の場合，$\Delta t=0.3$，2/11(s)，NO.2試料の場合，$\Delta t=0.07$，0.05(s)である。

この図において，もっとも原点に近い線状体の姿勢を比較す

ると，ρ_bが小さいNO.1試料の方がより水平に近い姿勢であり，落下直後の急激な姿勢の変化は，ρ_bが小さい方が大きいことが分かる。また，重心の軌跡はいくつかの変曲点をもつ曲線となり，ρ_bが小さい方が曲線の変動は大きい。ρ_bが小さい線状体の方が，すべて流れ中に入ったときの姿勢がより水平に近く，さらに，$\dot{Y}$はρ_bが小さい方がはるかに小さくなるので，線状体が鉛直方向へ移動するのにより長い時間を要する。したがって，$\dot{X}$が小さいにもかかわらず，ρ_bが小さいNO.1試料の方がノズルの上方で運動する。ノズルの上方で運動する場合，流れが加速している影響を受け易くなり，また，ρ_bが小さい方が慣性が小さく流れの影響を大きく受けるため，軌跡が大きく変動すると考えられる。

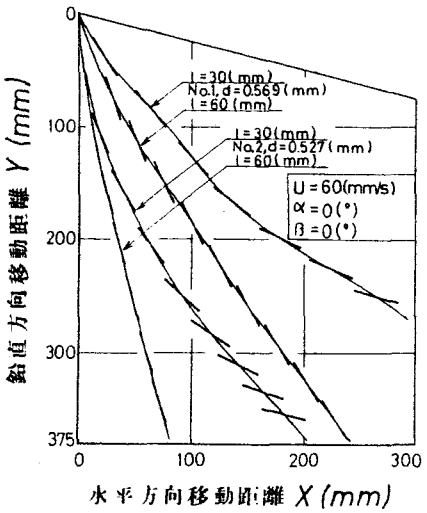


図5.41 落下軌跡におよぼす比重量の影響

ここで直径が小さいほど軌跡が大きく変動することを考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，軽い方が軌跡は大きく変動する。

また，ノズル内流れ中でも，矩形管内流れ中での場合と同様に，比重量により底面に到達したときの水平方向移動距離に差が生ずるので，比重量別に線状体を分類することができる。なお，この差は，流れが加速しているので矩形管内流れ中の場合より大きい。

5.9.2 線状体重心の速度

$U=60$ (mm/s) のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図5.42，5.43に示す。図には，$\ell=30$, 60 (mm) のデータをプロットし

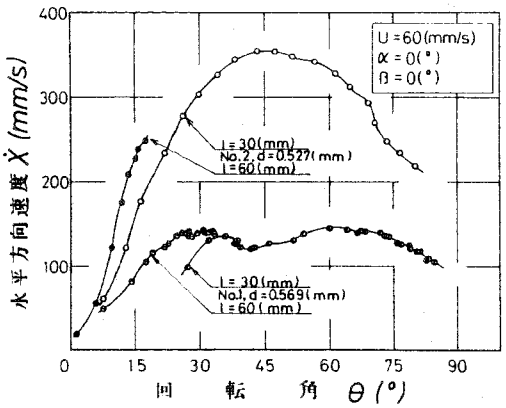


図5.42 水平方向速度におよぼす比重量の影響

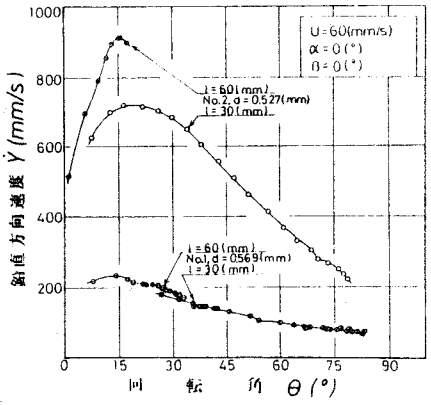


図5.43 鉛直方向速度におよぼす比重量の影響

ている。

γ_bが小さいNO.1試料の場合，慣性が小さく，また，ノズルの上方で運動するため，流れが加速している影響を受け易く，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに加速と減速を繰返す現象が明確に見られるが，NO.2試料の場合，この変動はわずかである。また，θの全領域で$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにγ_bが大きいNO.2試料の方が大きくなる。さらに，$\ell=60$(mm)と$\ell=30$(mm)の速度差も，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともにγ_bが大きい方が大きくなる。ここで直径の影響を考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，重い方が長さの影響が現われ易いことが分かる。

5.9.3 線状体の姿勢

$U=60$(mm/s)のtとθの関係を図5.44に示す。図には，$\ell=30$，60(mm)の曲線が併記されている。

ノズル内流れ中での姿勢の変化は，矩形管内流れ中での姿勢の変化を中心にして減衰振動しながら水平方向に近づく。また，変動を除いた平均的な姿勢の変化を比較すると，γ_bが大きいNO.2試料の方が角速度は大きく，線状体が回転するのに要す

る時間は小さい。ここで直径が大きいほど角速度は大きいことを考慮すると，同一直径で重さが異なる場合，重い方が角速度は大きくなる。また，ρ_0が大きい方が重心の速度は大きく，しかも，慣性モーメントが大きいため，流れの影響を受けにくく，姿勢の変動は小さくなる。

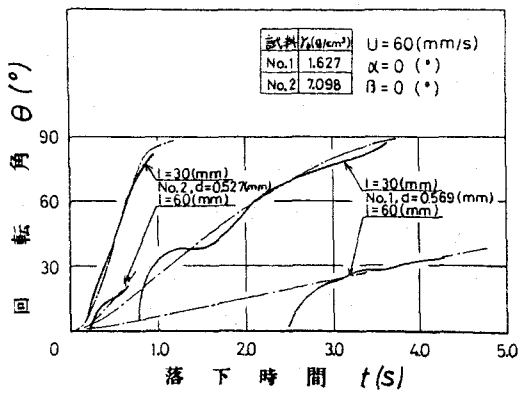


図5.44 姿勢におよぼす比重量の影響

5.10 流速の影響

この節では，$U=10$，20，40，60 (mm/s) 変化させたときの実験結果から，流速が落下特性におよぼす影響を調べる。

5.10.1 線状体の落下軌跡

$d=0.569$ (mm)，$\ell=30$ (mm) の NO.1 試料の $U=10\sim60$ (mm/s) の落下軌跡を図5.45に示す。図中の線状体の時間間隔は，$U=10\sim60$ (mm/s) の場合，$\Delta t=0.3$，1/3，0.3，0.3 (s) である。

$U=60$ (mm/s) の場合，重心の軌跡はいくつかの変曲点をもつことが明確に分かるが，Uが小さくなると軌跡の変動も小さくなり，この図では，軌跡が変動していることがほとんど分からない。しかし，5.10.2 項に記載するθと重

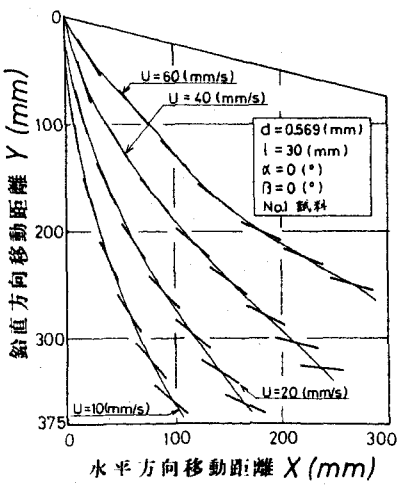


図5.45 落下軌跡におよぼす流速の影響

心の速度の関係（図5.46，5.47）から，姿勢の変化に対する重心の速度成分の変化は，Uが小さい場合でも，その変動の大きさは小さいが，加速と減速を繰返す現象が見られ，したがって，Uが小さい場合でも重心の軌跡は変動していることが分かる。Uが小さい場合，軌跡の変動が小さくなるのはつぎの原因による。

線状体が流れ中に入った瞬間に流体から受ける回転モーメントは，Uが小さいほど小さく，線状体がすべて流れ中に入ったときの姿勢はより鉛直に近いため，鉛直方向速度は大きく，水平方向速度は小さくなる。その後，θの増加に伴ない同一回転角に対する$\dot{Y}$の値はUにかかわらずほぼ同じになるが，$\dot{X}$の値はUが小さいほど小さくなる。したがって，Uが小さいほど線状体はノズルの下方で運動する。ノズル下方で運動する場合，流れが加速している影響を受けにくく，さらに，Uが小さいほど流速の場所的変化も小さいため，軌跡の変動は小さくなる。

5.10.2 線状体重心の速度

$d=0.569$ (mm)のNO.1試料のθと$\dot{X}$の関係およびθと$\dot{Y}$の関係を図5.46，5.47に示す。図には，$\ell=30$，60 (mm)の曲線

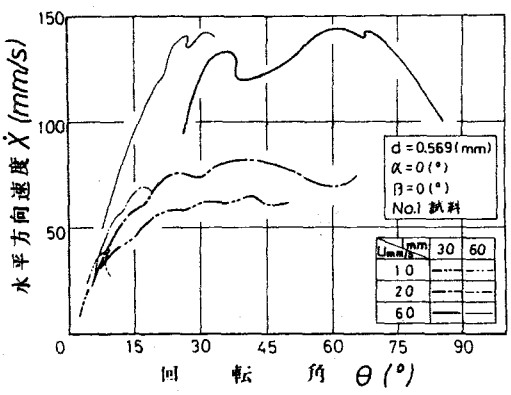


図5.46 水平方向速度におよぼす流速の影響

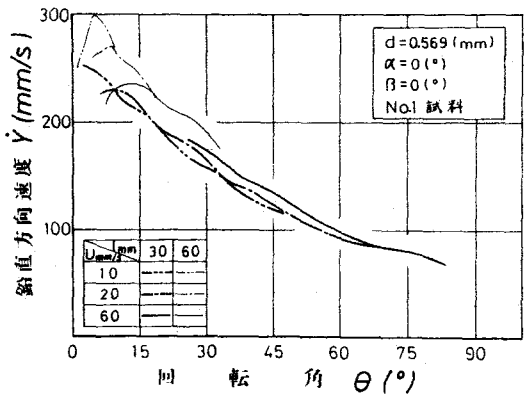


図5.47 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

が併記してある。

$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに加速と減速を繰返す現象が見られ，この変動はUが大きいほど大きくなる。この傾向は$\dot{X}$の方にとくに顕著に現われている。これは，Uが大きいほど，線状体はノズルの上方で運動するため，流れが加速している影響を受け易く，しかも，流速の場所的変化も大きいためである。また，ノズルの形状から，流速の鉛直方向成分は水平方向成分に比べて小さいため，$\dot{Y}$の変動におよぼす流速の影響が明確に現われなかったと考えられる。

さらに，これらの図から，$\dot{X}$はθの全領域でUが大きいほど大きくなり，$\ell=60(mm)$の場合を見ると分かるように，Uが小さいほど$\dot{Y}$の最大値は大きく，そのときのθの値は小さくなる。これは，Uが小さいほど，線状体が流れ中に入ったときの姿勢がより鉛直に近いため，流体から鉛直方向に受ける抗力は小さく，鉛直方向により大きく加速されるからである。しかし，Uが大きいほど，線状体はノズルの上方で運動するため，流速の鉛直方向成分は大きくなり，線状体は鉛直方向に減速されにくくなるので，θが増加すると同一回転角に対する$\dot{Y}$の値は，Uが大きいほど大きくなる。そして，姿勢が水平に近づくにつれて，線状体はノズルの下方に位置するため，流れの方向はほとんど水平方向になるので，$\dot{Y}$にはUの影響が見られなくなる。

また，図5.46，5.47において，唯一の層流域である$U=10(mm/S)$の場合にも，その大きさは小さいが重心の速度に変動が見られたことから，重心の軌跡，速度および姿勢が変動するのは，乱流の影響ではなくノズル内流れでは位置により流速および流れの方向が異なるためであるという結論が得られる。

つぎに，$\alpha=0.569(mm)$に比べて重心の速度の変動が小さい$\alpha=0.912(mm)$の結果を図5.48，5.49に示す。

$\alpha=0.912(mm)$の場合，慣性が大きく流れの影響を受けにく

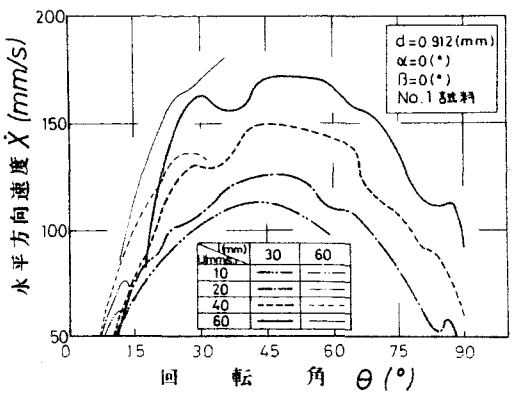


図5.48 水平方向速度におよぼす流速の影響

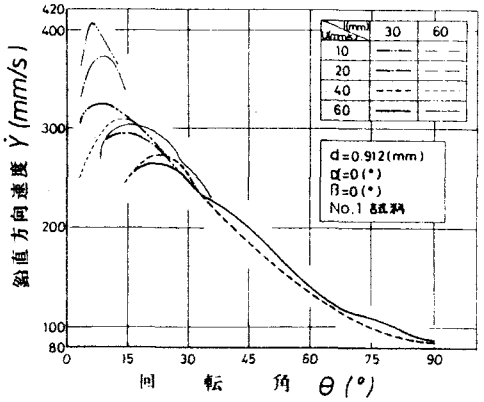


図5.49 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

いため，$U=10$ (mm/s) の $\dot{X}$ および $U \leqq 40$ (mm/s) の $\dot{Y}$ にはほとんど変動が見られず，$U \leqq 40$ (mm/s) の場合，$\theta > 35°$ の領域で $\dot{Y}$ はほぼ一致する。なお，上述した U の影響は，この場合にも明確に現われている。さらに，$\ell = 60$ (mm) と $\ell = 30$ (mm) の $\dot{X}$ の差は U が大きいほど大きく，また，$\dot{Y}$ の差は U が小さいほど大きくなり，$\alpha = 0.569$ (mm) の場合と比べて，$\dot{Y}$ は θ のより小さい領域で流速の影響を受ける。

以上述べた流速の影響は，α_0 が大きいNO.2試料の場合にも明確に現われる。ただし，α_0 が大きい方が，$\dot{Y}$ におよぼす流速の影響が現われる θ の領域は小さくなる。

以上の結果をまとめると，$\dot{X}$ は U が大きいほど大きく，U が小さいほど $\dot{Y}$ の最大値は大きく，そのときの θ の値は小さい。また，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに変動は U が大きいほど大きくなる。さらに，線状体の慣性が大きいほど，$\dot{Y}$ におよぼす流速の影響が現われる θ の領域は小さくなる。

5.10.3 線状体の姿勢

$\alpha = 0.569$ (mm) のNO.1試料の t と θ の関係を図5.50に示す。

図には，$\ell=30, 60$ (mm)のデータがプロットしてある。

ノズル内流れ中では，姿勢は減衰振動のように変動しながら水平方向に近づく。また，Uは変動を除いた平均的な姿勢の変化にはほとんど影響をおよぼさない。しかし，Uが大きいほど，線状体はノズルの上方で運動するため，流れが加速している影響を受け易く，しかも，流速の場所的変化も大きいため，姿勢の変動は大きくなる。

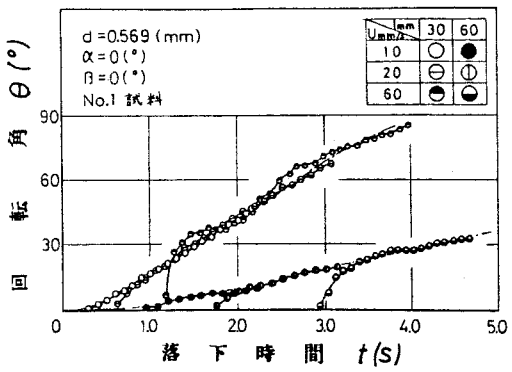


図5.50 姿勢におよぼす流速の影響

なお，水平方向に対してある角度をなしてノズル底面に近づくと，線状体の先端部が流速の小さい境界層内へ入り，後端部が流速の大きい領域に入っている状態が発生し，線状体はその姿勢を鉛直に向ける方向に回転させられる現象が生ずると考えられる。しかし，ノズル内流れ中でも，矩形管内流れ中での場合と同様に，このような現象は見られない。以上述べた流速の影響は，直径，比重量が異なる場合にも明確に現われる。

5.11 $\beta=45°$の場合の落下特性

5.5～5.10節では，初期位置における水平面内での線状体の軸方向と流れの方向のなす角度が$\beta=0°$である場合の結果について述べた。この節では，$\beta=45°$（ただし，$\alpha=90°$）でおこなった実験から得られた線状体の落下特性および諸要因の影響について述べる。なお，第4章で報告しなかった矩形管内流れ中での結果も合わせて報告し，ノズル内流れ中での場合と比較する。

図5.51に矩形管内流れ中での線状体の落下軌跡を示す。図

中の線状体の時間間隔は，$\Delta t = 0.25$ (s) である。この図は，管路上方から見た落下軌跡であり，側方から見た落下軌跡はここには記載しないが，線状体はほぼ水平な姿勢を保ったまま運動し続ける。流速分布の測定結果から，線状体が運動する領域では，矩形管幅方向（Z方向）の流速分布は一様であり，しかも，流れはゆっくり発達しているため，X方向の流速の変化はわずかである。また，線状体は落下直後に，矩形管壁面近傍に発達している境界層内で除々に加速され，その速度は流速とほぼ同じになるため，線状体を回転させるためのモーメントはほとんど作用しない。したがって，図5.52に示すように，水平面内での線状体の軸方向と流れの方向のなす角度をφとすると，図5.51から明らかなように，φはほとんど変化せず，線状体はほぼ一定の姿勢を保ったまま流速と同じ速度で運動し続ける。なお，この場合，最終落下位置（底面に落下したときの位置）でのφは約36°である。以上の結果は，試料条件および実験条件に関係なく得られる。

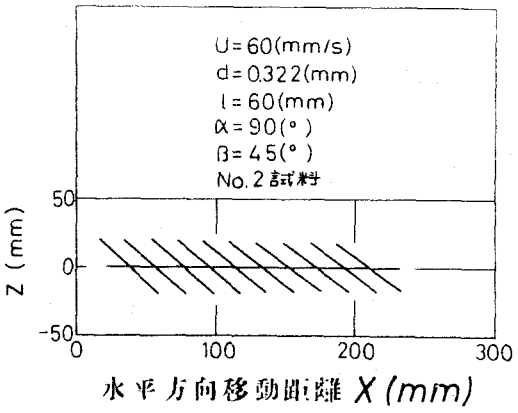


図5.51 矩形管内流れ中での落下軌跡

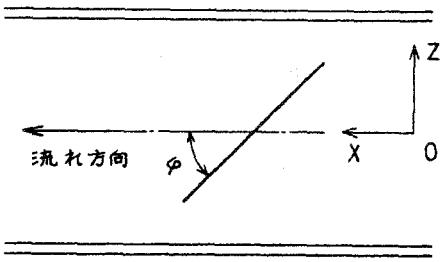


図5.52 φの定義

つぎに，$U = 60$ (mm/s) のノズル内流れ中での$\alpha = 0.569$ (mm)，$\ell = 45$ (mm) のNO.1試料の落下軌跡を図5.53に示す。(a)が管路上方から見た落下軌跡であり，(b)が管路側方から見た場合である。図中の線状体の時間間隔は，$\Delta t = 0.2$ (s) である。

矩形管内流れ中での場合と異なり，ノズル内流れ中では，φが減少する部分とφがほとんど変化しない部分が繰返し現われ，水平面内での線状体の姿勢は流れの方向に近づく。いっぽう，図5.53 (b) において，鉛直面内での姿勢はθ＝90°を中心にして振動している。

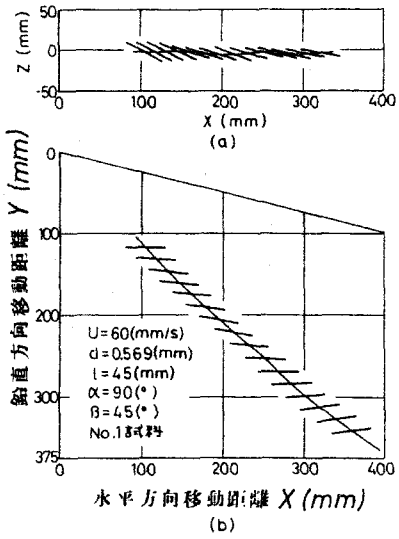


図5.53 ノズル内流れ中での落下軌跡

線状体は水平な姿勢で運動し始めるが，その位置はノズルの上方であるので，流れの方向が水平方向に対して傾いているため，線状体にはその姿勢を鉛直方向に向ける回転モーメントが作用し，姿勢は鉛直方向に回転するが，流れの方向を向いても回転は止まらず，θは減少する。しかし，θの減少に伴ない線状体にはその姿勢を水平方向にもどす向きの回転モーメントが作用するため，逆に姿勢は水平方向に回転し始める。そして，姿勢は水平に近づくが，この場合にも，θ＝90°で回転は止まらず，θは90°以上になり，ふたたび上述と同じ理由で姿勢は水平方向にもどされるという運動を繰返す。以上述べた線状体の姿勢の変化は図5.54を見ればいっそう明らかになる。この図には，θとφの変化が併記してある。θが減少している領域（t＝2.0～2.4 (s) および 2.8～3.3 (s) 程度の領域）では，φはほとんど変化しない状態が続き，θがほとんど変化

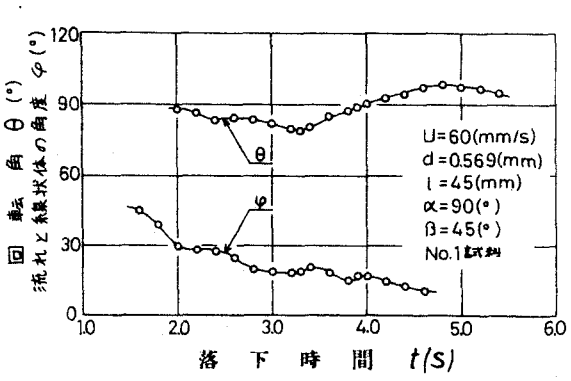


図5.54 線状体の姿勢の変化

しない領域（$t=2.4\sim2.8$ (S)程度の領域）およびθが増加している領域（$t=3.3\sim4.8$ (S)程度の領域）では，線状体は水平面内で流れの方向に回転する。また，θが極小の状態から増加し始めるとき（$t=3.3\sim3.4$ (S)）およびθが90°を越えるとき（$t=3.8\sim3.9$ (S)），φの値が衝撃的に増大する現象が見られる。ノズル内流れは加速しており，水平面内での線状体に対する流体の軸に直角な方向の相対速度は，先端部付近の方が大きくなり，線状体の姿勢を流れの方向に回転させる向きに回転モーメントが作用するため，角速度$d\varphi/dt$（<0）の絶対値は増大する。ところが，θが減少し始めると線状体の速度が増大し始めるため，線状体に対する流体の相対速度が小さくなり，さらに，角速度$d\varphi/dt$の絶対値が大きいため，回転モーメントは角速度の向きと逆向きに作用し始める。このため，角速度は減速され，φがほとんど変化しない状態が続く。そして，θの減少が終了すると，線状体は同じ姿勢を保ったまま下流方向へ運動し続けるが，ノズル内流速は下流側ほど大きいため，線状体に対する流体の相対速度は増大し始め，また，$d\varphi/dt$はほとんど0であるので，ふたたび，線状体の姿勢を流れ方向に回転させる向きの回転モーメントが作用し，φは減少する。したがって，θが減少あるいはほとんど変化しない領域では，θとφの減少が交互に現われる現象が見られる。

以上述べたように，ノズル内流れ中では，位置により流速および流れの方向が異なるため，その姿勢は3次元的に変化する。以下では，水平面内での姿勢の変化（φの変化）に注目して，直径，長さ，比重量および流速がおよぼす影響を調べるが，前述したようにφの変化は連続的ではなく，φが減少する部分とほとんど一定の部分があるため，最終落下位置でのφの値におよぼすα，ℓ，d_0，Uの影響について述べる。

表5.5にα，ℓおよびd_0の影響を示す。表中の値は10本の平均値である。この表から明らかなように，αの影響は見られず

，ℓが大きいほどφの値は小さくなる。

ℓが大きいほどφが小さくなるのは，ℓが大きいほど線状体の軸方向に沿った流速の変化は大きくなり，線状体を流れ方向に回転させる向きのモーメントが大きくなるためである。また，d_0が小さい方がφが小さいのは，慣性モーメントが小さいことと，$\dot{X}$はd_0にかかわらず同一であるのに対し，$\dot{Y}$はd_0が小さい方が小さくなり，線状体はノズルの上方で運動するため，流れが加速している影響を大きく受けることが原因である。

表5.5　φにおよぼすd，ℓ，d_0の影響（$U=60$(mm/s)）

試料番号	d(mm) \ ℓ(mm)	15	30	45	60
1	0.912	—	26.7	—	16.7
	0.720	—	22.4	—	17.8
	0.569	27.0	24.1	16.7	16.0
2	0.527	—	26.0	—	25.0

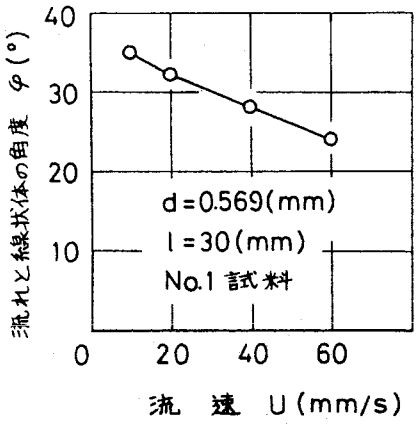


図5.55　φにおよぼす流速の影響

Uの影響を図5.55に示す。Uが大きいほど，線状体の軸方向に沿った流速の変化が大きいため，φは小さくなる。

したがって，$\beta=0°$および$\beta=45°$の結果から，ノズル内流れ中では，θの変化は矩形管内流れ中でのθの変化を中心にして変動し，φは減少とほぼ一定の状態を繰返しながら0に近づくため，ノズル内流れは，鉛直面内での姿勢の制御には有効ではないが，水平面内での姿勢を流れの方向に向けるには有効である。

5.12 結 言

本章では，直線の線状体が単一でノズル内流れ中を自由落下する場合について実験的研究をおこない，落下軌跡，速度および姿勢などの落下特性をは握し，同時に，線状体の初期角度，長さ，直径，比重量および流速が落下特性におよぼす影響を調べた。得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 線状体は，流れに入ったとき急激に回転するが，その後，姿勢は矩形管内流れ中での姿勢の変化を中心にして減衰振動しながら水平方向に近づき，その重心はいくつかの変曲点をもつ曲線を描いて運動する。また，線状体がノズル上方で水平な姿勢に近づく場合，姿勢は水平方向を中心にして減衰振動する。

(2) 重心の速度は，角速度が急激に減速される領域では減速され，ふたたび角速度が加速され始めると加速されるというように，加速と減速を繰返す。なお，その変動は水平方向速度の方が大きい。

(3) 初期角度，長さ，直径，比重量および流速は軌跡の形に影響を与え，初期角度，長さ，直径および比重量が小さいほど，また，流速が大きいほど，線状体はノズルのより上方で運動し，さらに軌跡の変動は大きくなる。

(4) 初期角度は，線状体が運動をおこなう位置に影響を与え，その結果ノズル内の流れ特性が，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ に初期角度の影響となって現われ，初期角度が大きいほど $\dot{X}$，$\dot{Y}$ は大きくなる。長さの影響は，$\dot{X}$ に関しては θ の全領域で，$\dot{Y}$ に関しては θ の小さい領域で現われ，長さが大きいほど大きくなる。また

，直径，比重量の影響は，θの全領域で現われ，直径，比重量が大きいほど$\dot{X}$，$\dot{Y}$は大きくなる。また，$\dot{X}$はθの全領域で，流速が大きいほど大きくなり，$\dot{Y}$はθの小さい領域で流速の影響を受け，流速が小さいほど大きくなる。なお，θの増加に伴ない初期角度，長さおよび流速の影響は見られなくなる。さらに，重心の速度の変動におよぼす初期角度，長さの影響は明確に現われないが，直径，比重量が小さいほど，また，流速が大きいほど，変動は大きくなる。

(5) 変動を除いた平均的な姿勢の変化には，初期角度，流速は影響をおよぼさない。いっぽう，長さが小さいほど，また，直径，比重量が大きいほど，平均的な角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さい。また，姿勢の変動は，初期角度，流速が大きいほど，慣性モーメントが小さいほど，大きくなる傾向にある。

(6) 水平面内で線状体を流れ方向に対して傾けて落下させると，その姿勢は，鉛直面内では水平方向を中心に振動し，水平面内では流れの方向に回転する現象とその姿勢を保ったまま運動する現象が繰返し現われ，除々に流れの方向に近づく。

(7) 落下特性に変動が見られるのは，ノズル内流れが加速していることと，ノズル内では位置により流れの方向が異なることが原因である。

第6章　管内流れ中における線状体の運動に関する理論解析

6.1　緒　言

繊維あるいは繊維集団を流体輸送する技術は，繊維工業の各種工程で広く応用されている基本技術の1つであり，また，生産性を向上させる目的および自動化，省力化を進めるためにも，有用な技術として応用されているものである。繊維が流体輸送される場合，繊維の速度および姿勢の変化などが製品の品質に影響をおよぼすので，ここでは，管内流れ中での繊維の運動特性を調べることにした。

管内流れ中での繊維の運動を取扱った研究[3)～6)]はあるが，それらはいずれも現象論にとどまり，繊維の運動状態に着目してその特性がどのようになるかなど，この現象の基本的事項を詳細に検討したものはほとんどない。このように，実際には広く利用されているにもかかわらず管内流れ中での繊維の基本的運動特性についてはほとんど解明されていないのが現状である。

本章では，実験的研究に引き続いて，直線の線状体が単一で矩形管内流れ中およびノズル内流れ中を自由落下する場合について理論解析をおこなう。

第2章で述べた物体の運動に関するLambの解析結果は，静止流体中での場合であり，これを本章に直接適用することはできないが，その考え方を流れ中における物体の運動に拡張することにより，管内流れ中での線状体の運動を解析することができる。そして，実験結果とあわせて，実験と解析の両面から線状体の基本的運動特性を明らかにする。

6.2 流れ中における線状体の運動に関する理論

線状体の運動を理論的に考えるため，静止流体中での場合と同じ仮定を設ける。

(1) 線状体は，長さと直径の比の大きいまっすぐな円柱物体とする。
(2) 線状体の軸の回りの回転運動は考えない。
(3) 線状体は，一平面内で運動する。

なお，初期位置が管路幅方向の中央で，しかも，初期位置における水平面内での線状体の軸方向と流れの方向のなす角度 β（図4.13参照）が0の場合，線状体はほぼ一平面内で運動することが実験で確かめられている。また，静止流体中で線状体が運動する場合，線状体は軸の回りの回転運動をしないことが，線状体回りの流れ特性を調べた結果分かっている（3.2.2項参照）ので，上述の初期条件で運動する場合，管内流れ中においても線状体は軸の回りの回転運動をおこなわないと考えられる。

仮定(1)から，線状体は3つの対称面をもつので，線状体が運動することによって増加するこの運動系の全運動エネルギは，(2.12)式のようにx，y，z方向の並進運動によるエネルギと各軸回りの回転エネルギの和の形で表わされる。

$$2T = Au^2 + Bv^2 + Cw^2 + Pp^2 + Qq^2 + Rr^2$$

ここで，図6.1に示すように座標系を定めると，仮定(2)から $q=0$，線状体が運動をおこなう平面をxy面と考えると仮定(3)から $w=0$，$p=0$ となるので，線状体の運動に伴なって増加するこの運動系の全運動エネルギ T は，(2.13)式のよう

にx，y方向の並進運動による
エネルギとz軸回りの回転エネ
ルギの和の形で表わされる。

$$2T = Au^2 + Bv^2 + Rr^2$$

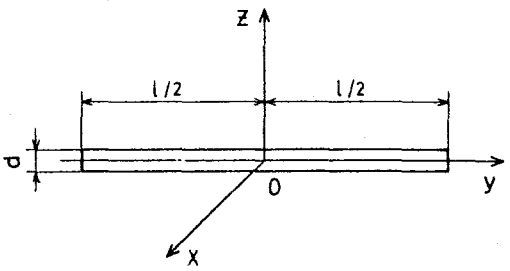


図6.1 線状体に固定した座標系

しかし，流れ中での場合，流体は速度をもっているため，Tは上式とまったく同じ式にはならない。すなわち，Tを線状体が流体に与える運動エネルギT_1と線状体の運動エネルギT_2に分けると，T_2は，静止流体中での場合と同様に，

$$2T_2 = A_2 u^2 + B_2 v^2 + R_2 r^2 \qquad (6.1)$$

$$\left.\begin{aligned} A_2 &= B_2 = \rho_b \pi a^2 l/4 \\ R_2 &= \frac{l^2}{12}(\rho_b \pi a^2 l/4) \end{aligned}\right\} \qquad (6.2)$$

となる。

つぎに，T_1をx，y方向の並進運動に関する項T_{1x}，T_{1y}とz軸回りの回転に関する項T_{1z}に分けて計算する。

(a) T_{1x}の計算

半径a，長さlの円柱が軸に垂直な方向に速度uで動くときの速度ポテンシャルは，

$$\phi = -(ua^2/r)\cos\theta \qquad (6.3)$$

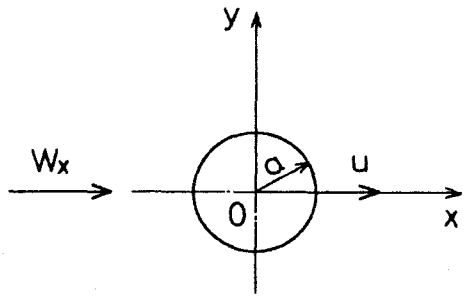


図6.2 流速Wxの流れ中を速度uで動く円柱

流速W_xで固定円柱をすぎる流れの速度ポテンシャルは，

$$\phi = W_x (r + a^2/r)\cos\theta \qquad (6.4)$$

となり，したがって，(6.3)式と(6.4)式を重ね合わせると，図6.2に示すような流速W_xの流れ中を速度uで動く円柱の回りの流れが，

$$\phi = W_x (r + a^2/r)\cos\theta - (ua^2/r)\cos\theta \qquad (6.5)$$

で表わされる。

この場合，流体に与えられる運動エネルギT_{1x}は，

$$\begin{aligned} 2T_{1x} &= -\rho \iint \phi \, \partial\phi/\partial n \, dS \\ &= -\rho a^2 \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \int_0^{2\pi} (2uW_x - u^2)\cos^2\theta \, d\theta \, dy \\ &= \rho\pi a^2 \ell \left\{ u^2 - (2u/\ell) \int_{-\ell/2}^{\ell/2} W_x \, dy \right\} \end{aligned} \qquad (6.6)$$

となり，ここで，静止流体中での場合のx方向の並進運動によるエネルギに関する係数A_1 ($= \rho\pi a^2 \ell$)を代入すると，

$$2T_{1x} = A_1 \left\{ u^2 - (2u/\ell) \int_{-\ell/2}^{\ell/2} W_x \, dy \right\} \qquad (6.7)$$

となる。

(b) T_{1y}の計算

両端面付近の流速がW_{y1}，W_{y2}である流れ中を円柱が軸方向に速度vで動くとき，流体に与えられるエネルギT_{1y}は，静止流体中での場合と同様に，半径aの円板が流速W_{y1}の流れ中を面

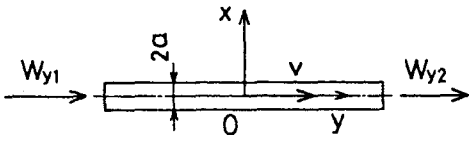


図6.3 流れ中を速度vで動く円柱

に垂直な方向に速度vで動く場合の片面に対するエネルギと流速W_{y2}の流れ中を動く場合の片面に対するエネルギの和で表わされ，

$$2T_{1y} = 4/3 \cdot \rho a^3 \{(v^2 - 2vW_{y1}) + (v^2 - 2vW_{y2})\}$$
$$= 8/3 \cdot \rho a^3 \{v^2 - v(W_{y1} + W_{y2})\} \qquad (6.8)$$

となり，ここで，静止流体中での場合のy方向の並進運動によるエネルギに関する係数B_1 ($= 8/3 \cdot \rho a^3$)を代入すると，

$$2T_{1y} = B_1 \{v^2 - v(W_{y1} + W_{y2})\} \qquad (6.9)$$

となる。

(C) T_{1z}の計算

流速W_xの流れ中で円柱がz軸回りを角速度rで回転するとき，流体に与えられる運動エネルギT_{1z}は，T_{1x}の結果を利用して

$$2T_{1z} = \rho\pi a^2 \int_{-l/2}^{l/2} (r^2 y^2 - 2ryW_x)\,dy$$
$$= \frac{l^2}{12}\rho\pi a^2 l r^2 - 2\rho\pi a^2 r \int_{-l/2}^{l/2} W_x y\,dy \qquad (6.10)$$

となり，ここで，静止流体中での場合のz軸回りの回転エネルギに関する係数R_1 ($= \frac{l^2}{12}\rho\pi a^2 l$)を代入すると，

$$2T_{1z} = R_1 r^2 - 2R_1 (12/l^3) r \int_{-l/2}^{l/2} W_x y\,dy \qquad (6.11)$$

となる。

したがって，線状体の比質量ρ_b，流体の比質量ρ，直径a，

長さ ℓ で決まる定数 A, B, R ((2.20)式) を考慮すると，(6.1)式，(6.7)式，(6.9)式，(6.11)式から，線状体の運動に伴なって増加するこの運動系の全運動エネルギは，

$$\begin{aligned} 2T = {} & Au^2 + Bv^2 + Rr^2 \\ & - 2(A_1/\ell)u\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x \, dz \\ & - B_1 v (w_{z1} + w_{z2}) \\ & - 2R_1 (12/\ell^3) r \int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x z \, dz \end{aligned} \qquad (6.12)$$

で表わされる。

いっぽう，運動方程式は，静止流体中での場合には (2.21) 式で表わされるが，流れ中での場合，角運動量の釣合いを表わす (2.21) 式の第3式で流体の角運動量に関する項は，u を $u - \frac{1}{\ell}\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x \, dz$，$v$ を $v - (w_{z1} + w_{z2})/2$ と置き換える必要がある。したがって，流れ中での場合，運動方程式は，

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\partial T/\partial u) &= r(\partial T/\partial v) - q(\partial T/\partial w) + X \\ \frac{d}{dt}(\partial T/\partial v) &= p(\partial T/\partial w) - r(\partial T/\partial u) + Y \\ \frac{d}{dt}(\partial T/\partial r) &= \{v - (w_{z1} + w_{z2})/2\}(\partial T_1/\partial u) \\ &\quad - (u - \tfrac{1}{\ell}\textstyle\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x \, dz)(\partial T_1/\partial v) \\ &\quad + v(\partial T_2/\partial u) - u(\partial T_2/\partial v) \\ &\quad + q(\partial T/\partial p) - p(\partial T/\partial q) + N \end{aligned}\right\} \qquad (6.13)$$

と書ける。

ここで，X，Y は線状体に作用するナカの x，y 方向成分であり，N は回転モーメントである。

(6.13) 式に (6.12) 式を代入すると，線状体の運動方程式

$$
\left.
\begin{aligned}
A\,du/dt &= \gamma B v - \gamma B_1 (w_{y1}+w_{y2})/2 \\
&\quad + (A_1/\ell)\frac{d}{dt}\left(\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x\,dy\right) + X \\
B\,dv/dt &= -\gamma A u + \gamma (A_1/\ell)\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x\,dy \\
&\quad + (B_1/2)\,d(w_{y1}+w_{y2})/dt + Y \\
R\,d\gamma/dt &= (A_1-B_1)\left(u-\frac{1}{\ell}\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x\,dy\right)\left\{v-(w_{y1}+w_{y2})/2\right\} \\
&\quad + R_1(12/\ell^3)\frac{d}{dt}\left(\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x\, y\,dy\right) + N
\end{aligned}
\right\} \qquad (6.14)
$$

が得られる。

ここで，次式のような置き換えをおこなうと，

$$
\left.
\begin{aligned}
U_1 &= \frac{1}{\ell}\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x\,dy \quad , \quad U_2 = (12/\ell^3)\int_{-\ell/2}^{\ell/2} w_x\, y\,dy \\
V &= (w_{y1}+w_{y2})/2
\end{aligned}
\right\} \qquad (6.15)
$$

(6.14)式は，

$$
\left.
\begin{aligned}
A\,du/dt &= \gamma B v - \gamma B_1 V + A_1\,dU_1/dt + X \\
B\,dv/dt &= -\gamma A u + \gamma A_1 U_1 + B_1\,dV/dt + Y \\
R\,d\gamma/dt &= (A_1-B_1)(u-U_1)(v-V) \\
&\quad + R_1\,dU_2/dt + N
\end{aligned}
\right\} \qquad (6.16)
$$

となる。

なお，U_1 は y 方向に沿って分布する流速の x 方向成分の平均値を表わし，U_2 の中の積分は，流速の x 方向成分の重心回りの一次モーメント，また，V は両端面での流速の y 方向成分の平均値を表わしている。

また，図6.4に示すように線状体とともに運動する座標軸 Ox，Oy の原点（線状体の重心）の座標を（X，Y）とし，x 軸と X 軸のなす角度を θ とすると，線状体重心の速度 $\dot{X}$，$\dot{Y}$

および加速度$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$は，(2.23)式，(2.24)式と同様に，

$$\left.\begin{aligned}\dot{X} &= u\cos\theta - v\sin\theta \\ \dot{Y} &= u\sin\theta + v\cos\theta\end{aligned}\right\} \quad (6.17)$$

$$\left.\begin{aligned}\ddot{X} &= (du/dt)\cos\theta - (dv/dt)\sin\theta \\ &\quad -(u\sin\theta + v\cos\theta)r \\ \ddot{Y} &= (du/dt)\sin\theta + (dv/dt)\cos\theta \\ &\quad +(u\cos\theta - v\sin\theta)r\end{aligned}\right\} \quad (6.18)$$

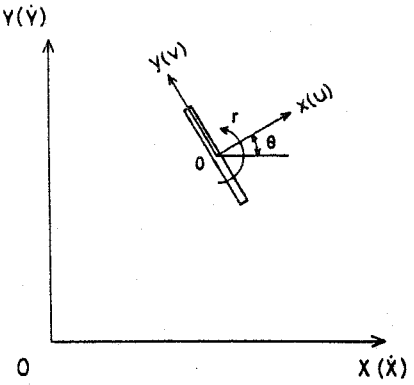


図6.4 座標系

となる。

6.3 管内流れ中における線状体の運動の数値計算

数値計算は，一様流れ中，矩形管内での十分に発達した流れ中，矩形管内での助走域およびノズル内流れ中の4種類の場合についておこなうが，この節では，その際必要となる線状体に作用する外力および回転モーメントを計算する。さらに，流速分布がある場合，線状体の運動に伴なって(6.15)式で表わされるU_1，U_2，Vは変化するので，管内における流速分布の計算，線状体の運動を数値計算する際の条件および方法について述べる。

6.3.1 線状体に作用する外力および回転モーメントの計算

外力および回転モーメントの計算は，静止流体中での場合に詳細に述べている(2.2.3項参照)ので，ここでは，静止流体中での場合と異なる点についてのみ詳細に述べ，その他の点については簡単に説明する。

まず，X軸，Y軸をそれぞれ水平方向，鉛直方向に定める。

線状体端面に直角に働く抗力をD_α，その端面以外の部分が流体から受ける抗力のx，y方向成分をD_x，D_y，また，重力と浮力の差による外力をF_Gとする。図6.5に示すように線状体重心の速度をUとすると，外力X，Yは次式で表わされる。

$$\left.\begin{aligned} X &= D_x - F_G \sin\theta \\ Y &= D_y + D_\alpha - F_G \cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6.19)$$

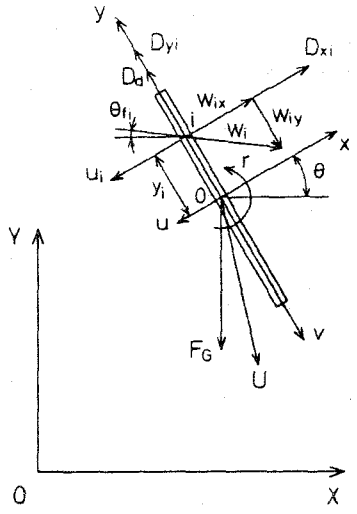


図6.5 線状体に作用する外力

なお，

$$F_G = (\rho_b - \rho)\, g \pi \alpha^2 \ell / 4 \qquad (6.20)$$

となる。

ここで，線状体をn個の微小要素に分け，その長さを$\Delta\ell$，i番目の要素の重心の位置をy_iとすると，この点でのx方向速度は，図中のuの向きは負であるから，$u_i = u - y_i r$となり，y_iにおける流速をW_i，水平方向に対する角度をθ_{fi}とすると，線状体に対する流体の相対速度のx方向成分U_{ri}は，

$$U_{ri} = W_i \cos(\theta + \theta_{fi}) - (u - y_i r) \qquad (6.21)$$

となる。

対象としている線状体は，長さと直径の比が非常に大きいので，軸方向とある角度で運動する線状体回りの流れに対して独立の原理が適用できると仮定する。したがって，D_xは，

$$D_x = \sum_{i=1}^{n} 1/2 \cdot \rho d \cdot \Delta\ell \cdot C_{di} \cdot U_{ri}^2 \qquad (6.22)$$

で表わされる。ただし，総和記号の中の各要素は，V_{ri}と同一の正負の符号をとる。

抗力係数C_αはV_{ri}を代表速度とするレイノルズ数

$$Re = |V_{ri}| \alpha / \nu \tag{6.23}$$

の関数であり，静止流体中での場合と同様に，ここでもReの範囲に応じて(2.30a)～(2.30d)式を用いる。

いっぽう，z_iの位置における線状体に対する流体の相対速度のy方向成分V_{ri}は，図6.5でのびの向きは負であるから，

$$V_{ri} = -W_i \sin(\theta + \theta_{fi}) - v \tag{6.24}$$

となり，また，D_yは摩擦抗力のみであり，その軸方向が流れに傾いて置かれている柱状体回りの軸方向の流れを表わす式は，流れに直角に置かれている同一形状の柱状体回りのプラントル数$Pr = 1$の強制対流熱移動を表わす式と相似となるので，

$$D_y = \sum_{i=1}^{n} \pi \rho \nu V_{ri} \cdot \Delta l \cdot Nu_i \tag{6.25}$$

で表わされる。

ヌッセルト数Nuは Reの関数であり，ここでも，静止流体中での場合と同様に空気に対する実験式(2.32)式を用いる。ただし，Reは(6.23)式から求める。

また，線状体の先端($y = -l/2$)および後端($y = l/2$)における線状体に対する流体の相対速度のy方向成分を$V_{e1,r}$，$V_{e2,r}$とする。したがって，各端面に働く抗力$D_{\alpha,e1}$，$D_{\alpha,e2}$は，抗力係数を1とした場合，

$$D_{d,e1} = \begin{cases} 1/2 \cdot \rho (\pi d^2/4) V_{e1,r}^2 & ; V_{e1,r} > 0 \\ 0 & ; V_{e1,r} \leqq 0 \end{cases} \quad (6.26)$$

$$D_{d,e2} = \begin{cases} -1/2 \cdot \rho (\pi d^2/4) V_{e2,r}^2 & ; V_{e2,r} < 0 \\ 0 & ; V_{e2,r} \geqq 0 \end{cases} \quad (6.27)$$

となるので，

$$D_d = D_{d,e1} + D_{d,e2} \quad (6.28)$$

で表わされる。

最後に，線状体に作用する回転モーメントNは，x方向の抗力にもとづくものであり，

$$N = -\sum_{i=1}^{n} 1/2 \cdot \rho d \cdot \Delta l \cdot C_{di} \cdot U_{ri}^2 \cdot y_i \quad (6.29)$$

となる。ただし，U_{ri}^2はU_{ri}と同一の正負の符号をとる。

6.3.2 流速分布の計算および数値計算の条件と方法

(1) 一様流れ中における場合

流れの方向が水平方向（X方向）である一様流れ中における線状体の運動について考える。流速をWとすると，水平方向に対する流れの角度θ_fは0であるので，(6.15)式から，

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= W\cos\theta \quad , \quad U_2 = 0 \\ V &= -W\sin\theta \end{aligned}\right\} \quad (6.30)$$

となり，dU_1/dt , dV/dtは，

$$\left.\begin{aligned} dU_1/dt &= -\gamma W \sin\theta \\ dV/dt &= -\gamma W \cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6.31)$$

であるから，一様流れ中における線状体の運動方程式は，(6.16)式から，

$$\left.\begin{aligned} A\,du/dt &= \gamma B v - \gamma(A_1 - B_1) W \sin\theta + X \\ B\,dv/dt &= -\gamma A u + \gamma(A_1 - B_1) W \cos\theta + Y \\ R\,d\gamma/dt &= (A_1 - B_1)(u - W\cos\theta)(v + W\sin\theta) + N \end{aligned}\right\} \qquad (6.32)$$

で表わされる。この式は，静止流体中における線状体の運動方程式 (2.22)式において，u, v の代りに流速に対する相対速度 $u - W\cos\theta$, $v + W\sin\theta$ を入れても求まる。

数値計算は，流体として水を考え，$\alpha = 0.569$ (mm) の No.1 試料（実験に用いた鉛筆の芯に相当し，比重量は $\gamma_0 = 1.627$ (g/cm³) である。）に対し，表 6.1 に示すように長さ ℓ および流速を変化させておこなった。なお，初期角度 α は実験の場合と異なり流れの向きにとり，計算はすべて $\alpha = 1°$ でおこなった。

また，あわせて $\alpha = 0.569$ (mm)，$\ell = 15, 30, 45, 60$ (mm) の No.1 試料に対し，表6.1 と同一初期条件で静止流体中において数値計算をおこない，流れ中での場合と比較することにした。

表6.1 試料条件および初期条件（一様流れ中）

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体比重量 γ_0 (g/cm³)	初期角度 α (°)	線状体長さ l (mm)	流速 W (mm/s)	初速度 u_0 (mm/s)	初速度 v_0 (mm/s)	初期角速度 r_0 (rad/s)
1	0.569	1.627	1	30	20 40 60 80	-1.0×10^{-2}	-1.0×10^{-2}	1.0×10^{-4}
				15 45 60	60			

(2) 矩形管内での十分に発達した流れ中における場合

(i) 流速分布の計算

線状体の運動を数値計算する際に必要となる矩形管内での十分に発達した流れの流速分布を計算する。この流速分布はすでに解析的に解かれており[22]，以下ではその方法について簡単に述べる。

図6.6に示すように，矩形管の高さを a，幅を b とし，流れの方向に x 軸をとると，流速ベクトルは $\vec{v}(u,0,0)$ で表わされる。

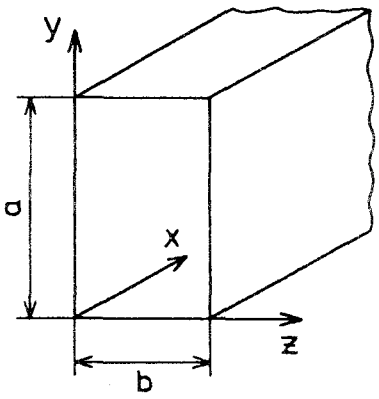


図6.6 座標系

いま考えているのは定常な流れであるので，ナビエーストークスの式は，

$$\left.\begin{aligned} u\cdot\partial u/\partial x &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\Delta u \\ \partial p/\partial y &= 0\ ,\ \partial p/\partial z = 0 \end{aligned}\right\} \tag{6.33}$$

となる。また，連続の式は，

$$\partial u/\partial x = 0 \tag{6.34}$$

となる。したがって，運動方程式は，

$$\partial^2 u/\partial y^2 + \partial^2 u/\partial z^2 = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dx} \tag{6.35}$$

で表わされる。

いっぽう，境界条件は，

$$\left.\begin{array}{l} y=0,\ y=a \\ z=0,\ z=b \end{array}\right\} \text{で}\quad u=0 \tag{6.36}$$

である。

ここで，

$$u=\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}(y-a)y+\sum_{m=1}^{\infty}\sin\frac{m\pi y}{a}\left(A_m\cosh\frac{m\pi z}{a}+B_m\sinh\frac{m\pi z}{a}\right) \tag{6.37}$$

ただし，mは整数である。

とおくと，(6.37)式は，運動方程式(6.35)式および$y=0$，$y=a$における境界条件を満足している。したがって，係数A_m，B_mは$z=0$，$z=b$における境界条件によって定められる。

$z=0$で$u=0$を満足するためには

$$\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}(y-a)y+\sum_{m=1}^{\infty}A_m\sin\frac{m\pi y}{a}=0 \tag{6.38}$$

であって，この関係から

$$\begin{aligned} A_m&=-\frac{1}{a\mu}\frac{dp}{dx}\int_0^a(y-a)y\sin\frac{m\pi y}{a}dy \\ &=-\frac{2a^2}{\mu m^3\pi^3}\frac{dp}{dx}(\cos m\pi-1) \end{aligned} \tag{6.39}$$

となる。

また，$z=b=na$で$u=0$なる境界条件によると

$$\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}(y-a)y+\sum_{m=1}^{\infty}\sin\frac{m\pi y}{a}\left(A_m\cosh mn\pi+B_m\sinh mn\pi\right)=0 \tag{6.40}$$

でなければならない。

したがって，(6.40)式と(6.38)式を比較すれば，

$$B_m = -A_m(\cosh m\pi - 1)/\sinh m\pi \qquad (6.41)$$

となる。

なお，流速分布は上下，左右対称になるから，$y = a/2$ で $\partial u/\partial y = 0$，$z = b/2$ で $\partial u/\partial z = 0$ にならなければならない。(6.38)式を考慮すると(6.37)式はこの条件を満していることが分かる。

ここで，(6.39)式，(6.41)式を(6.37)式へ代入すると，流速 u は，

$$u = -\frac{a^2}{2\mu}\frac{dp}{dx}\left[\left(1-\frac{y}{a}\right)\frac{y}{a} - \frac{8}{\pi^3}\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty}\frac{\sin\left(m\pi\frac{y}{a}\right)\cosh\frac{m\pi}{2}\left(1-\frac{2z}{na}\right)}{m^3\cosh\frac{mn\pi}{2}}\right] \qquad (6.42)$$

となり，平均流速 U は，

$$U = \int_0^a\int_0^{na} u\,dy\,dz \,/\, na^2 = -\frac{a^2}{12\mu}\frac{dp}{dx}\left(1 - \frac{192}{n\pi^5}\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty}\frac{\tanh\frac{mn\pi}{2}}{m^5}\right) \qquad (6.43)$$

となる。したがって，

$$y^* = y/a \ , \quad z^* = z/na$$

なる無次元化をおこなうと，(6.42)式，(6.43)式から，無次元流速 u^* は，

$$u^* = u/U$$

$$= 6\left[(1-y^*)y^* - \frac{8}{\pi^3}\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty} \frac{\sin(m\pi y^*)\cosh\frac{mn\pi}{2}(1-2z^*)}{m^3\cosh\frac{mn\pi}{2}}\right]$$

$$\Big/\left(1-\frac{192}{n\pi^5}\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty}\frac{\tanh\frac{mn\pi}{2}}{m^5}\right) \qquad (6.44)$$

で表わされる。

ここでは，線状体が矩形管の幅方向の中央（$z^*=0.5$）面内で運動する場合を取扱っているので，u^*に関しても$z^*=0.5$の位置でのy方向の分布のみ計算すればよい。

$z^*=0.5$のとき，$\cosh\{mn\pi(1-2z^*)/2\}=1$であるから，

$$u^* = \frac{6\left[(1-y^*)y^* - (8/\pi^3)\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty}\sin(m\pi y^*)/\left(m^3\cosh\frac{mn\pi}{2}\right)\right]}{1-(192/n\pi^5)\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty}\tanh\left(\frac{mn\pi}{2}\right)/m^5} \qquad (6.45)$$

となる。

また，数値計算は，実験に用いたものと同一形状（$a=400$ (mm)，$b=100$ (mm)）の矩形管に対しておこなうので，$n=b/a=0.25$となり，(6.45)式の分母の総和は$m=39$までの和でほとんど収束し，分母の値は5.2653×10^{-2}となる。したがって，(6.45)式は，

$$u^* = 1.13955\times10^2\left[(1-y^*)y^* - (8/\pi^3)\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty}\sin(m\pi y^*)/\left(m^3\cosh\frac{m\pi}{8}\right)\right] \qquad (6.46)$$

となる。

図6.7に(6.46)式から数値計算した（ただし，総和は$m=39$までの和とした。），$b/a=0.25$の矩形管内の十分に発達した流れの幅方向中心における高さ方向の流速分布を示す。最大流速は1.773になる。

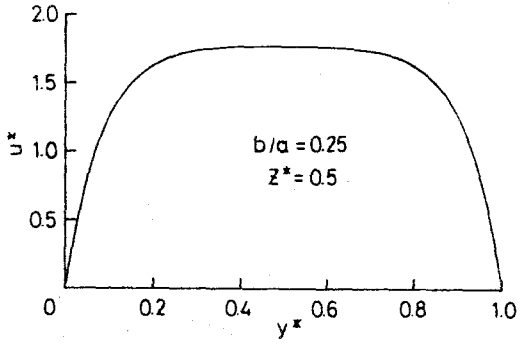


図6.7 幅方向中心における高さ方向の流速分布

(ii). 計算条件および方法

図6.8に示すように，初期位置Y_0を原点(O)として，線状体重心の座標をX，Yで表わし，矩形管内での位置をξ，ηで表わし，流れの方向を水平方向(ξ方向)にとる。

線状体の任意の位置iの高さ方向の座標を無次元化して表わすと，

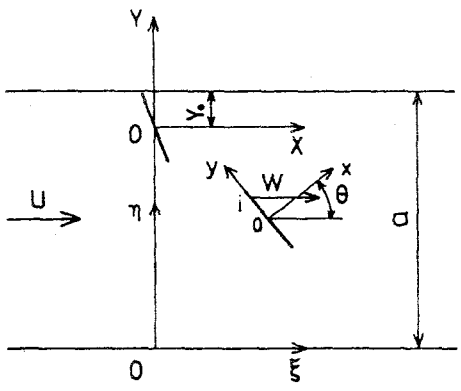


図6.8 座標系

$$\eta^* = \eta/a = 1 + (Y + y\cos\theta - Y_0)/a \qquad (6.47)$$

となるので，η^*を(6.46)式のy^*の所へ代入するとu^*が求まり，この位置での流速Wは，

$$W = U u^* \qquad (6.48)$$

から得られる。

また，水平方向に対する流れの角度は0であり，(6.15)式で

表わされるU_1，Vを計算するとき，前項で外力および回転モーメントを計算したときと同様に，線状体をn個の微小要素に分け，次式から求める。

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= \sum_{i=1}^{n} W_i \cos\theta \cdot \Delta l / l \\ V &= -(W_{e1} + W_{e2}) \sin\theta / 2 \end{aligned}\right\} \qquad (6.49)$$

ただし，W_{e1}，W_{e2}は$\zeta = -l/2$，$\zeta = l/2$における流速である。
つぎに，dU_1/dt，dU_2/dtおよびdV/dtを計算する。
(6.15)式から，

$$\left.\begin{aligned} dU_1/dt &= \int_{-l/2}^{l/2} d(W\cos\theta)/dt \; d\zeta / l \\ dU_2/dt &= (12/l^3) \int_{-l/2}^{l/2} d(W\cos\theta)/dt \cdot \zeta \, d\zeta \end{aligned}\right\} \qquad (6.50)$$

であり，$d(W\cos\theta)/dt$は(6.48)式および(6.47)式で表わされるη^*を(6.46)式のζ^*の所へ代入して得られるu^*の式から，

$$\begin{aligned} d(W\cos\theta)/dt &= U(du^*/dt \cdot \cos\theta - r u^* \sin\theta) \\ &= 1.13955 \times 10^2 U \left[(1-2\eta^*) d\eta^*/dt \cdot \cos\theta \right. \\ &\quad - (1-\eta^*)\eta^* r \sin\theta \\ &\quad \left. -(8/\pi^3) \sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty} \{ m\pi \cos(m\pi\eta^*)(d\eta^*/dt)\cos\theta \right. \\ &\quad \left. - r \sin(m\pi\eta^*) \sin\theta \} / (m^3 \cosh \tfrac{m\pi}{3}) \right] \end{aligned} \qquad (6.51)$$

となる。
ただし，$d\eta^*/dt$は，(6.47)式および(6.17)式から，

$$\begin{aligned} d\eta^*/dt &= (dY/dt - \zeta r \sin\theta)/a \\ &= (u\sin\theta + v\cos\theta - \zeta r \sin\theta)/a \end{aligned} \qquad (6.52)$$

である。

したがって，dU_1/dt および dU_2/dt は線状体を n 個の微小要素に分け，(6.51)式，(6.52)式を用いて次式から計算する。

$$\left.\begin{aligned} dU_1/dt &= \sum_{i=1}^{n} d(W_i\cos\theta)/dt \cdot \Delta\ell/\ell \\ dU_2/dt &= (12/\ell^3)\sum_{i=1}^{n} d(W_i\cos\theta)/dt \cdot y_i \cdot \Delta\ell \end{aligned}\right\} \quad (6.53)$$

同様にして，

$$\begin{aligned} d(W\sin\theta)/dt = 1.13955\times10^2 U\{&(1-2\eta^*)\,d\eta^*/dt\cdot\sin\theta \\ &+(1-\eta^*)\,\eta^*\gamma\cos\theta \\ &-(8/\pi^3)\sum_{m=1,3,5\cdots}^{\infty}\{m\pi\cos(m\pi\eta^*)\,d\eta^*/dt\cdot\sin\theta \\ &+\gamma\sin(m\pi\eta^*)\cos\theta\}/(m^3\cosh\tfrac{m\pi}{8})\} \end{aligned} \quad (6.54)$$

いっぽう，(6.49)式から，

$$dV/dt = -\{d(We_1\sin\theta)/dt + d(We_2\sin\theta)/dt\}/2 \quad (6.55)$$

であるので，dV/dt は(6.54)式を用いて計算できる。

以上のようにして，U_1，V および dU_1/dt，dU_2/dt，dV/dt を求め，運動方程式(6.16)式と重心の速度を表わす(6.17)式を連立させて数値計算し，線状体の運動状態を求めた。

また，計算条件は表6.1に示した一様流れ中での場合と同一とし，長さ ℓ および平均流速 U を変化させ，さらに，初期角度の影響を調べるため，$U=60$(mm/s)，$\ell=45$(mm)に対し $\alpha=10°$，$20°$で計算をおこなった。なお，初期位置 Y_0 は，$\ell=60$(mm)の場合にも線状体がすべて流れ中に入るようにするため，$Y_0=30$(mm)とした。

(3) 矩形管内での流れの助走域における場合

第4章で述べた矩形管内流れ中における線状体の落下実験は，流れが発達している領域，すなわち，流れの助走域でおこなった。ここでは，この流れの助走域における線状体の運動について考える。これは，前述した(1)一様流れ中における場合と(2)十分に発達した流れ中における場合の中間の領域における場合であり，この3種類の流れ中での線状体の運動を調べることにより，矩形管内でのすべての流れ状態における線状体の運動特性を把握することができる。

図6.9に示すように，初期位置Y_0を原点(O)とし，線状体重心の座標をX，Yで表わす。また，矩形管内での位置は，矩形管の入口部（境界層が発達し始める位置）の高さ方向および幅方向の中心を原点(O)とするξ，η座標で表わし，流れの方向は水平方向（ξ方向）にとる。さらに，矩形管の入口部から初期位置における線状体重心までの水平方向距離をξ_0とする。

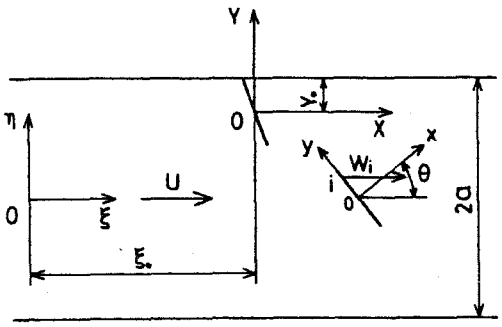


図6.9 座標系

4.2節で述べたように，整流部の下流側の整流用金網から流出した流れはほぼ一様となっているので，線状体の運動を数値計算する際にも，この位置を矩形管の入口部と考えて$\xi_0 = 700$ (mm)とした。(図4.1参照)

まず，矩形管内の助走域での流速分布の計算は，4.3.4項で述べたようにHanの方法で計算した結果と測定結果はほぼ一致することが確かめられたので，ここでは，このHanの方法によりおこなう。なお，線状体が矩形管の幅方向の中央面内で運動する場合を取扱っているので，流速分布に関しても，(4.23)

式で $\zeta=0$ として η 方向の分布のみを計算すればよい。図6.10に，平均流速 $U=60(mm/s)$ の場合の $650 \leqq \xi \leqq 1300(mm)$ の範囲内における $50(mm)$ ごとの各位置での高さ方向の流速分布を示す。この図において，流速および位置は無次元化し，$*$ の印を付けて表わしている。したがって，たとえば $\xi=1300(mm)$ の場合，$u^*=0$ は横軸の6.5の位置である。流れは除々に発達し，最大流速は，$\xi=650(mm)$ の場合，1.16，$\xi=1300(mm)$ で1.22となる。

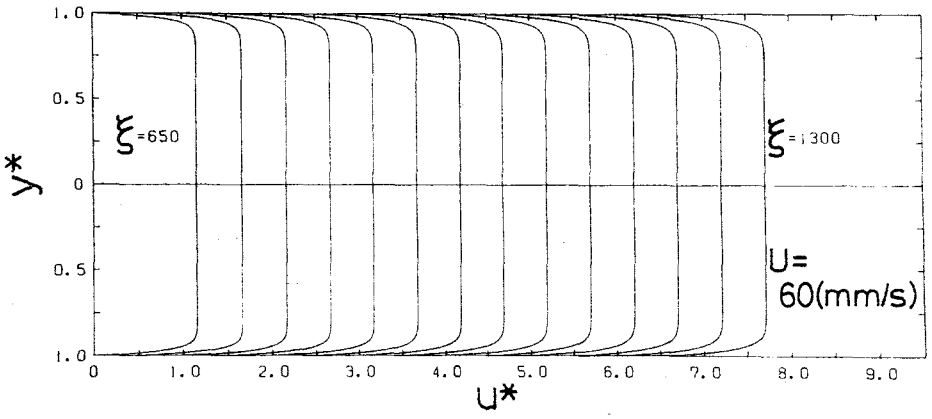


図6.10 助走域での矩形管高さ方向の流速分布

つぎに，線状体の運動を数値計算する方法について述べる。

図6.9に示したように，線状体の任意の位置 i における流れ方向の座標および無次元化した高さ方向の座標は，

$$\left.\begin{aligned} \xi &= X - \eta\sin\theta + \xi_0 \\ \eta^* &= \eta/a = 1 + (Y + \eta\cos\theta - Y_0)/a \end{aligned}\right\} \qquad (6.56)$$

となり，この点における流速 W_i が計算できる。しかし，線状体に作用する外力および回転モーメント，さらに，U_1，V および dU_1/dt，dU_2/dt，dV/dt を計算する際，線状体を n 個の微小要素に分け，各要素に対する値の総和でこれらの値を求め

るが，各要素の重心における流速を逐一Hanの方法で計算すると計算時間が非常に長くなる。そこで，線状体の運動を数値計算する前に，線状体が運動すると予想される矩形管の領域，たとえば，$U=60$(mm/s)の場合，$690 \leqq \xi \leqq 1210$(mm)，を直交格子で分割し，各格子点(ξ_j, η_k^*)での流速U_{jk}を1回だけ計算しておき，W_iはU_{jk}から内挿する。

内挿の方法はつぎの通りである。流速分布を計算した結果，ξ方向の流速の変化は，η方向の変化に比べて小さいので，図6.11に示すように，$\xi_{j-1} \leqq \xi_i \leqq \xi_j$および$\eta_{k-1}^* \leqq \eta_i^* \leqq \eta_k^*$を満足する$\xi$方向2列，$\eta$方向5列の計10箇所の格子点における流速$U_{jk}$の値から，$\eta$方向の流速を4次式近似することにより$(\xi_{j-1}, \eta_i^*)$，$(\xi_j, \eta_i^*)$での流速$U_{j-1,i}$，$U_{ji}$を求め，その後，比例配分により$W_i$を計算する。

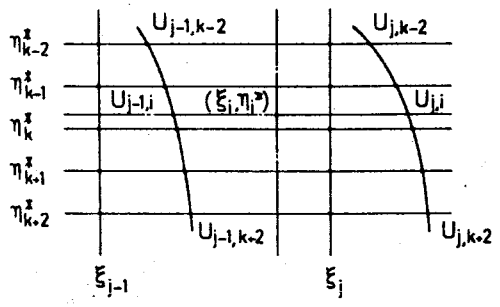


図6.11 W_iを内挿する方法

なお，格子の間隔は，ξ方向に対しては$U=20, 40$(mm/s)の場合，$\Delta\xi=10$(mm)，$U=60, 80$(mm/s)の場合，$\Delta\xi=20$(mm)とし，η方向に対しては，$|\eta^*| \leqq 0.7$の場合，$\Delta\eta^*=0.02$($\Delta\eta=4$(mm))，$0.7<|\eta^*| \leqq 1.0$の場合，$\Delta\eta^*=0.01$($\Delta\eta=2$(mm))とした。

以上のようにして，任意の位置での流速W_iが計算できるので，つぎに，U_1，VおよびdU_1/dt，dU_2/dt，dV/dtを計算する方法について説明する。

水平方向に対する流れの角度θ_fは0であるので，$m+1$番目の運動状態を計算する際必要となるm番目のU_1，Vは，(6.15)式を数値積分することにより次式から求める。

$$\left.\begin{aligned} U_{1m} &= \sum_{i=1}^{n} W_{i,m} \cos\theta_m \cdot \Delta\ell / \ell \\ V_m &= -(W_{e1,m} + W_{e2,m}) \sin\theta_m / 2 \end{aligned}\right\} \qquad (6.57)$$

また，(6.50)式から，

$$\left.\begin{aligned} dU_1/dt &= (\cos\theta \int_{-\ell/2}^{\ell/2} dw/dt \, d\jmath - \gamma \sin\theta \int_{-\ell/2}^{\ell/2} w \, d\jmath) / \ell \\ dU_2/dt &= (12/\ell^3)(\cos\theta \int_{-\ell/2}^{\ell/2} dw/dt \cdot \jmath \, d\jmath \\ &\qquad - \gamma \sin\theta \int_{-\ell/2}^{\ell/2} w \jmath \, d\jmath) \end{aligned}\right\} \qquad (6.58)$$

であり，m番目のdw/dtは，$m-1$番目とm番目の流速$W_{i,m-1}$，$W_{i,m}$を用いて，

$$(dw/dt)_{i,m} = (W_{i,m} - W_{i,m-1}) / \Delta t \qquad (6.59)$$

から求める。ただし，Δtは$m-1$番目からm番目までの時間である。したがって，m番目のdU_1/dt，dU_2/dtは，

$$\left.\begin{aligned} (dU_1/dt)_m &= [\sum_{i=1}^{n} (W_{i,m} - W_{i,m-1}) \cdot \Delta\ell / \Delta t] \cos\theta_m / \ell \\ &\qquad - \gamma_m \sin\theta_m \sum_{i=1}^{n} W_{i,m} \cdot \Delta\ell / \ell \\ (dU_2/dt)_m &= (12/\ell^3)[\sum_{i=1}^{n} (W_{i,m} - W_{i,m-1}) \cdot \jmath_i \cdot \Delta\ell / \Delta t] \cos\theta_m \\ &\qquad - (12/\ell^3) \gamma_m \sin\theta_m \sum_{i=1}^{n} W_{i,m} \cdot \jmath_i \cdot \Delta\ell \end{aligned}\right\} \qquad (6.60)$$

から計算する。

同様にして，m番目のdV/dtは，

$$\begin{aligned} (dV/dt)_m = &-[(W_{e1,m} + W_{e2,m}) - (W_{e1,m-1} + W_{e2,m-1})] \sin\theta_m / 2 \cdot \Delta t \\ &- \gamma_m \cos\theta_m (W_{e1,m} + W_{e2,m}) / 2 \end{aligned} \qquad (6.61)$$

から求める。

なお，初期状態から2番目の運動状態を計算する際には，(6.60)式，(6.61)式の第1項を0とした。

このようにして，U_1，V および dU_1/dt，dU_2/dt，dV/dt を求め，運動方程式(6.16)式と重心の速度を表わす(6.17)式を連立させて線状体の運動状態を数値計算した。

助走域での流れは，一様流れと十分に発達した流れの中間の領域における流れであるので，計算条件は表6.1に示した条件より少なくし，$\ell=30$(mm)に対して $U=20,40,60,80$(mm/s)，$\ell=60$(mm)に対して $U=60$(mm/s)の5種類とした。また，矩形管の形状は実験に用いたものと同一(高さ $2a=400$(mm)，幅 $2b=100$(mm))とし，初期位置は $Y_0=30$(mm)，初期条件は表6.1と同一である。

(4) ノズル内流れ中における場合

図6.12に示すように，上面だけが傾き γ $(=400/\overline{AB})$ で収縮しているノズルに対し，ノズル内での流速 W がノズルの交点(A)を中心とする円周上で一様であるような流れを考え，この流れ中における線状体の運動を取扱う。なお，ノズル入口部の高さは，第5章で述べた線状体の落下実験で用いたノズルの高さと同一，400(mm)とする。また，初期位置を原点(O)とし，線状体重心の座標を X，Y で表わし，ノズル内での位置は入口部の

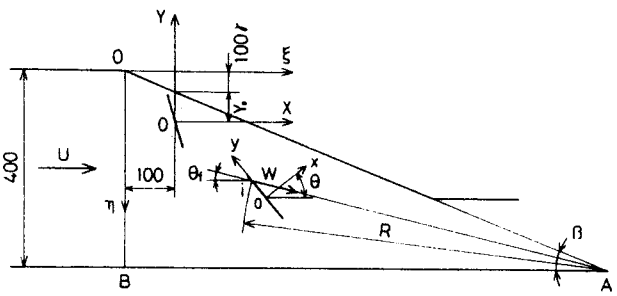


図6.12 座標系

上面を原点(O)とするξ，η座標で表わし，ξ方向は水平方向にとる。初期位置の水平方向座標は，実験の場合と一致させ，ξ=100(mm)とした。

したがって，ノズル上面と底面のなす角度βは，

$$\beta = \tan^{-1}\gamma \tag{6.62}$$

となり，流れの方向はA点を向いているので，線状体の任意の位置iにおける流速Wおよび流れの方向θ_fは，この位置とA点の距離をR，ノズル入口部の平均流速をUとすると，

$$\left.\begin{aligned} W &= 400U/\beta R \\ \theta_f &= \tan^{-1}\left[(400-\eta)/(400/\gamma-\xi)\right] \end{aligned}\right\} \tag{6.63}$$

となる。

いっぽう，任意の位置iの座標は，

$$\left.\begin{aligned} \xi &= X - J\sin\theta + 100 \\ \eta &= -(Y + J\cos\theta) + Y_0 + 100\gamma \end{aligned}\right\} \tag{6.64}$$

となり，Rは(6.64)式の関係を考慮すると，

$$R = \left[(400/\gamma - 100 - X + J\sin\theta)^2 + (400 - Y_0 - 100\gamma + Y + J\cos\theta)^2\right]^{1/2} \tag{6.65}$$

となる。

以上のようにして，任意の位置での流速Wが計算できるので，つぎに，U_1，VおよびdU_1/dt，dU_2/dt，dV/dtを計算する方法について述べる。

U_1，Vは，線状体をn個の微小要素に分け，(6.15)式を数値

積分することにより次式から求める。

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= \sum_{i=1}^{n} W_i \cos(\theta+\theta_{fi})\,\Delta\ell/\ell \\ V &= -\left[W_{e1}\sin(\theta+\theta_{fe1})+W_{e2}\sin(\theta+\theta_{fe2})\right]/2 \end{aligned}\right\} \tag{6.66}$$

ただし，θ_{fe1}，θ_{fe2} は，$\jmath=-\ell/2$，$\jmath=\ell/2$ における流れの方向である。

また，(6.15)式から，

$$\left.\begin{aligned} dU_1/dt &= \int_{-\ell/2}^{\ell/2}\left[dW/dt\cdot\cos(\theta+\theta_f) - (r+d\theta_f/dt)W\sin(\theta+\theta_f)\right]d\jmath/\ell \\ dU_2/dt &= (12/\ell^3)\int_{-\ell/2}^{\ell/2}\left[dW/dt\cdot\cos(\theta+\theta_f) - (r+d\theta_f/dt)W\sin(\theta+\theta_f)\right]\jmath\,d\jmath \end{aligned}\right\} \tag{6.67}$$

であり，(6.63)式，(6.65)式から

$$\left.\begin{aligned} dW_i/dt &= -400U(dR_i/dt)/3R_i^2 \\ d\theta_{fi}/dt &= \left[(u\sin\theta+v\cos\theta-r\jmath_i\sin\theta)(400/r-100-X+\jmath_i\sin\theta)\right. \\ &\quad \left.+(u\cos\theta-v\sin\theta-r\jmath_i\cos\theta)(400-Y_0-100r+Y+\jmath_i\cos\theta)\right] \\ &\quad \cdot\cos^2\theta_{fi}/(400/r-100-X+\jmath_i\sin\theta)^2 \\ dR_i/dt &= -\left[(u\cos\theta-v\sin\theta-r\jmath_i\cos\theta)(400/r-100-X+\jmath_i\sin\theta)\right. \\ &\quad \left.-(u\sin\theta+v\cos\theta-r\jmath_i\sin\theta)(400-Y_0-100r+Y+\jmath_i\cos\theta)\right] \\ &\quad /R_i \end{aligned}\right\} \tag{6.68}$$

となる。ただし，(6.68)式は(6.17)式の関係を用いて求めた。

したがって，(6.67)式で表わされる dU_1/dt，dU_2/dt は U_1，V を計算するときと同じく，線状体を n 個の微小要素に分け，次式から求める。

$$
\left.
\begin{aligned}
dU_1/dt &= \sum_{i=1}^{n} \left[dW_i/dt \cdot \cos(\theta+\theta_{fi}) \right. \\
&\qquad \left. -(r+d\theta_{fi}/dt) W_i \sin(\theta+\theta_{fi}) \right] \cdot \Delta l / l \\
dU_2/dt &= (12/l^3) \sum_{i=1}^{n} \left[dW_i/dt \cdot \cos(\theta+\theta_{fi}) \right. \\
&\qquad \left. -(r+d\theta_{fi}/dt) W_i \sin(\theta+\theta_{fi}) \right] \gamma_i \cdot \Delta l
\end{aligned}
\right\}
\tag{6.69}
$$

同様にして，dV/dt は，

$$
\begin{aligned}
dV/dt = -\big[& dW_{e1}/dt \cdot \sin(\theta+\theta_{fe1}) + dW_{e2}/dt \cdot \sin(\theta+\theta_{fe2}) \\
& + (r+d\theta_{fe1}/dt) W_{e1} \cdot \cos(\theta+\theta_{fe1}) \\
& + (r+d\theta_{fe2}/dt) W_{e2} \cdot \cos(\theta+\theta_{fe2}) \big] / 2
\end{aligned}
\tag{6.70}
$$

から求める。

このようにして，U_1，V および dU_1/dt，dU_2/dt，dV/dt を求め，運動方程式(6.16)式と重心の速度を表わす(6.17)式を連立させて線状体の運動状態を数値計算した。

計算条件を表6.2に示す。試料はすべて $d=0.569$ (mm) の NO. 1 試料とし，まず，ノズルの傾き $\gamma=1/3$，初期角度 $\alpha=1°$ で長さ l およびノズル入口部平均流速 U を変化させて計算をおこなった。つぎに，線状体の落下実験から，矩形管内流れ中での場合に比べて初期角度が運動特性に大きな影響をおよぼすという結果が得られているので，これを調べるため $U=60$ (mm/s)，

表6.2 試料条件および初期条件（ノズル内流れ中）

試料番号	線状体直径 d (mm)	線状体比重量 ρ_s (g/cm³)	線状体長さ l (mm)	流速 U (mm/s)	ノズルの傾き γ	初期角度 α (°)	初速度 u_s (mm/s)	初速度 v_s (mm/s)	初期角速度 r_s (rad/s)
1	0.569	1.627	30	20 40 60 80	1/3	1	-1.0×10^{-2}	-1.0×10^{-2}	1.0×10^{-4}
			15 45 60	60		90			
			30	60	1/3	10 20 30			
					1/4 1/2	1			

$\gamma=1/3$，$\ell=30(mm)$に対し，$\alpha=10°, 20°, 30°$で計算をおこない，また，矩形管内流れのように流れの方向が水平方向である場合，姿勢が水平になった後では，線状体は水平な姿勢を保ったまま運動を続けるが，ノズル内流れのように流れの方向が水平方向に対し傾いている場合，水平な姿勢を保つことができず姿勢は変化すると考えられるので，これを確かめるため，$U=60(mm/s)$，$\gamma=1/3$，$\ell=15, 30, 45, 60(mm)$に対し，$\alpha=90°$で計算をおこなった。

さらに，実験では調べることができなかったノズルの傾きの影響を調べるため，$U=60(mm/s)$，$\ell=30(mm)$に対し，$\gamma=1/4, 1/2$で計算し，$\gamma=1/3$の結果とあわせてノズル傾きの影響を考察する。ただし，この場合$\alpha=1°$である。なお，初期位置での線状体重心とノズル上面の鉛直方向距離は，$\ell=60(mm)$の場合にも線状体がすべて流れ中に入るように$Y_0=30(mm)$にした。

以上，6.3.1項で述べた方法でX，YおよびNを求め，本項の(1)～(4)の方法に従い，Runge-Kutta-Gillの方法で数値計算をおこない，4種類の流れ中における線状体の運動特性を調べることができた。なお，数値計算の際必要になる水の物性値は，実験時の平均水温18(℃)に対する値 $\rho=1.018\times10^{-7}(gs^2/mm^4)$，$\nu=1.058(mm^2/s)$を採用した。

以下では，計算結果について報告するが，その際，第4章，第5章の実験結果とあわせて考察をおこない，重心の軌跡，速度，加速度および姿勢，角速度などの運動特性を明らかにする。なお，数値計算ではY，$\dot{Y}$は負となるが，鉛直方向下向きを正の向きとして図示するので，図中では正の値になる。

6.4　一様流れ中における線状体の運動

この節では，流速 $W=60$ (mm/s)，長さ $\ell=15, 30, 45, 60$ (mm) および $\ell=30$ (mm)，$W=20, 40, 60, 80$ (mm/s) に対する計算結果について述べると同時に，静止流体中 ($W=0$) での計算結果と比較し，一様流れ中での線状体の運動特性を明らかにする。

6.4.1　線状体の落下軌跡

図6.13に $\ell=30$ (mm)，$W=0\sim80$ (mm/s) の落下軌跡を示す。図中の線状体の時間間隔は，$\Delta t=0.4$ (s) である。

静止流体中での場合，落下開始直後の領域では水平方向の加速は鉛直方向への加速に比べて非常に小さく，線状体はほとんど鉛直方向に運動し始めるが，姿勢が除々に水平方向に回転するにつれて，水平方向速度 $\dot{X}$ も除々に増大し始める。そして，重心の軌跡は変曲点をもつ ($X=83$ (mm)，$Y=353$ (mm) 付近) 曲線となり，最終的に，姿勢は水平方向に漸近し，しかも，線状体は水平方向にはほとんど移動しなくなり，鉛直方向に一定速度で落下する。

これに対し，一様流れ中での場合，線状体は運動を開始すると同時に水平方向にも流体から抗力を受けるため，水平方向にも急激に加速される。したがって，静止流体中での場合と異なり，鉛直方向に対してある角度をもって運動し始める。流速が大きいほど，水平方向の急激な加速は大きく，鉛直方向の急激な加速は小さいので，この角度は大きくなる。

重心の軌跡は，$d^2Y/dX^2=0$，すなわち，

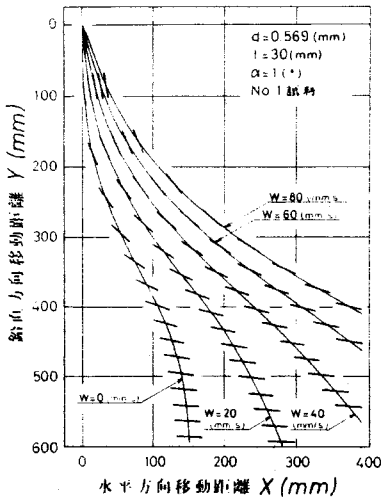


図6.13　落下軌跡におよぼす流速の影響

$$\dot{Y}/\dot{X} = \ddot{Y}/\ddot{X} \qquad (6.71)$$

が成立つとき変曲点をもつ。したがって，軌跡の変曲点は，重心の運動方向と加速度の方向が一致する点である。

一様流れ中での場合，線状体は鉛直方向に対してある角度をもって運動し始めるが，運動開始直後の領域では，水平方向加速度$\ddot{X}$の減少に比べて鉛直方向加速度$\ddot{Y}$の減少の方が小さいので，加速度の方向はいったん時計回りに回転し始め，運動方向の回転に比べて加速度の方向の回転の方が早いので運動方向も鉛直方向に近づく。しかし，$\ddot{Y}$は同程度の割合でしばらく減少するのに対し，運動開始後間もなく$\ddot{X}$の減少の割合は除々に低下する（図6.22，6.23参照）ので，加速度の方向は反時計回りに回転し，運動方向と一致する。この場合，方向のみならず両者の向きも一致するため，軌跡の接線勾配dY/dXは極大になる。

この変曲点の生ずる位置は，流速が大きいほど大きいが，$W=80(mm/s)$の場合でも$Y=30(mm)$付近である。

その後，$\ddot{X}$の減少の割合は急激に低下するので，加速度の方向は急激に反時計回りに回転し，dY/dXは減少する。さらに，$\ddot{Y}$は減少して負の値になるので，加速度の方向は反時計回りに回転し続け，dY/dXは減少し続けるが，やがて，$\ddot{X}$も減少して負の値になり，重心の運動方向と加速度の方向が一致する。ただし，この変曲点では，前回の場合と異なり両者の向きは逆になるので，dY/dXは最小になる。その後も，加速度の方向は回転し続け，線状体の姿勢が水平方向に漸近するにつれて，水平方向に近づく。また，加速度の値は0に近づく。したがって，最終的に，線状体は鉛直方向には静止流体中での場合と同一の一定速度で落下し，水平方向には流速と同一速度で移動する。

ここで，dY/dXの最小値およびそのときの姿勢θと位置X，Yにおよぼす流速と長さの影響を調べるため表6.3にこれらの値を示す。

静止流体中での場合，$\theta=60°$程度でdY/dXは最小になり，そのときのθの値およびdY/dXの値は，長さが小さいほど大きい傾向にあるが，その差はわずかである。θと$\dot{X}$の関係（図6.20）およびθと$\dot{Y}$の関係（図6.21）から，$\dot{X}$，$\dot{Y}$におよぼす長さの影響はθの増加に伴ない小さくなり，$\dot{X}$に関してはθが約65°以上の領域，$\dot{Y}$に関しては約60°以上の領域では長さの影響をほとんど受けないことが分かり，したがって，$\theta>60°$程度の領域では，姿勢が同じであれば長さにかかわらず重心の運動方向はほとんど一致することからも，dY/dXの最小値およびそのときのθの値におよぼす長さの影響がわずかであることが分かる。しかし，長さが大きいほど，線状体が回転するのに要する時間は長くなるので，変曲点をもつまでにX方向およびY方向に移動する距離は大きくなる。

表6.3 軌跡の変曲点における接線勾配，姿勢とその位置

線状体長さ l (mm)	流速 W (mm/s)	接線勾配 dX/dY	接線勾配 θ (°)	水平方向移動距離 X (mm)	鉛直方向移動距離 Y (mm)
15	0	1.934	61.6	20.4	101.8
	60	0.738	73.8	74.7	98.0
30	0	1.908	60.2	82.9	352.8
	20	1.288	65.6	143.5	358.4
	40	0.948	69.9	213.7	373.5
	60	0.739	73.3	291.7	388.2
	80	0.600	75.9	376.9	401.8
45	0	1.894	59.9	188.4	764.9
	60	0.739	73.1	650.5	874.9
60	0	1.885	59.9	337.4	1337.3
	60	0.739	73.1	1151.1	1558.2

d=0.569(mm)，No.1 試料

以上のことは，一様流れ中での場合（$W=60$(mm/s)）にも現われているが，静止流体中での場合に比べてdY/dXおよびθの値におよぼす長さの影響は，いっそう小さくなる。これは，変曲点をもつときのθの値が静止流体中での場合より大きいので，$\dot{X}$，$\dot{Y}$におよぼす長さの影響がいっそう小さくなることと，さらに，$\dot{X}$には長さが異なるとわずかな差が見られるが，この差は静止流体中での場合と同じであるが，$\dot{X}$の値は一様流れ中での場合の方が大きいため，この差の影響は小さいことの2つの原因によると考えられる。

いっぽう，流れの方向は水平方向であるので，$W=0$と$W=80$(mm/s)のときの$\dot{Y}$の変化を比較すると，θが約15°以下の領域

で差が見られるだけであり，これ以上の領域では流速の影響は見られない。(図6.17参照) ところが，$\dot{X}$はθの全領域で流速が大きいほど大きくなる。(図6.16参照) したがって，流速が大きいほど，同一姿勢に対する重心の運動方向はより水平に近くなる。さらに，θと$\ddot{X}$の関係 (図6.22) および θと$\ddot{Y}$の関係 (図6.23) から，$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$ともに流速の影響が見られるのはθが約15°以下の領域だけである (ただし，これらの図には流速の影響が見られる領域しか示していない。) ので，これ以上の領域では，同一姿勢に対する加速度の方向は流速にかかわらず一致することが分かる。また，前述したように，加速度の方向はθの増加に伴ない反時計回りに回転する。以上のことから，運動方向と加速度の方向が一致するときのθの値は，流速が大きいほど大きくなり，変曲点でのdY/dXの値は小さくなる。

また，図6.24から，姿勢の変化におよぼす流速の影響はわずかであるので，変曲点をもつときのθの値および重心の速度におよぼす流速の影響を考慮すると，変曲点をもつまでにX方向および Y方向に移動する距離は，流速が大きいほど大きく，さらに，流速による差はX方向の移動距離の方が大きくなることが分かる。

つぎに，図6.13において，線状体の姿勢と重心の運動方向に着目すると，静止流体中での場合，運動方向と鉛直線のなす角度は，つねにθより小さく，線状体に対する相対的な流れによりθを増加させる向きの回転モーメントが作用している。いっぽう，一様流れ中での場合，運動開始と同時に水平方向にも加速されるため，しばらくの間，運動方向と鉛直線のなす角度はθより大きくなる。また，この状態は流速が大きいほど長時間にわたって続く。しかし，この状態においても線状体に対する相対的な流れの方向と鉛直線のなす角度はθより小さく，線状体にはθを増大させる向きの回転モーメントが作用する。なお，運動方向が姿勢と一致するとき，すなわち，重心速度の線状体の

軸に直角な方向の成分uの値が正から負に変わるときのθの値は，$W=20,40,60,80$ (mm/s)に対し，$\theta=11.6°, 28.9°, 43.2°, 52.9°$である。

つぎに，姿勢の変化に対して重心の移動距離がどのように変化するかを調べるため，$\ell=30$ (mm)，$W=0\sim80$ (mm/s)のθとXの関係およびθとYの関係を図6.14，6.15に示す。

図6.14において，静止流体中での場合，線状体はほとんど鉛直方向に運動し始めるので，θとXの関係は下に凸の曲線で始まり，Xはθの増加に伴ない単調に増大する。そして，θが90°に近づくと$\dot{X}$および角速度γはともに0に近づき，しかも，0に近づく割合が同程度であるため，θとXの関係はほぼ直線となる。

これに対し，一様流れ中での場合，線状体は運動開始と同時にX方向へも急激に加速されるので，θとXの関係は上に凸の曲線で始まり，$\theta<10°$の領域で変曲点をもち，その後，下に凸の曲線になって，Xはθの増加に伴ない単調に増大する。なお，流速が大きいほど運動開始直後のX方向への加速が大きいため，変曲点をもつときのθの値は大きくなる。また，θが90°に

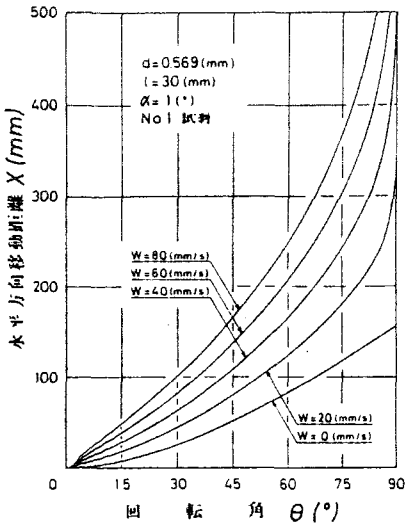


図6.14 水平方向移動距離におよぼす流速の影響

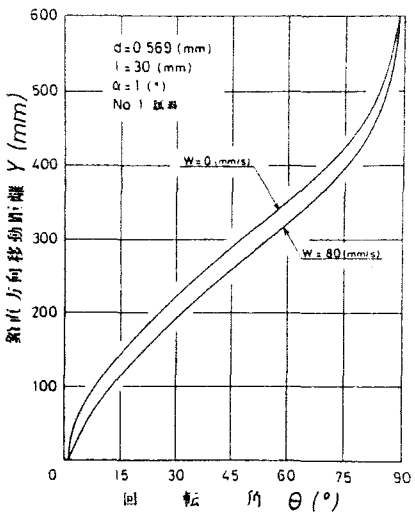


図6.15 鉛直方向移動距離におよぼす流速の影響

近づくとYは0に近づくが，$\dot{X}$は流速に近づくため，曲線の接線勾配$dX/d\theta$を表わす(6.72)式を考慮すると，Xは$\theta=90°$の線に漸近することが分かる。

いっぽう，図6.15において，静止流体中および一様流れ中にかかわらずθとYの関係は上に凸の曲線で始まり，$\theta=51°$程度で変曲点をもち，その後下に凸の曲線になり，θが90°に近づくとYは0に近づくが，$\dot{Y}$は一定値に近づくため，Yは$\theta=90°$の線に漸近する。なお，この図には$W=0$と$W=80$(mm/s)の曲線しか示していないが，$W=20, 40, 60$(mm/s)の曲線は，$W=0$と$W=80$(mm/s)の曲線の間に順番に並らぶ。

接線勾配$dX/d\theta$，$dY/d\theta$は，

$$\left.\begin{aligned} dX/d\theta &= \dot{X}/\gamma \\ dY/d\theta &= \dot{Y}/\gamma \end{aligned}\right\} \qquad (6.72)$$

となる。

$\dot{Y}$の変化を表わす図6.17および$\dot{Y}$の変化を表わす図6.25から，$\dot{Y}$および$\dot{Y}$に流速の影響が現われるのは$\theta<15°$程度の領域であり，これ以上の領域では，$\dot{Y}$および$\dot{Y}$の変化は流速にかかわらず同一曲線で表わされる。したがって，(6.72)式を考慮すると$dY/d\theta$が流速の影響を受けるのは$\theta<15°$の領域だけであることが分かる。すなわち，θとYの関係を表わす曲線を縦軸に沿って平行移動すると，$\theta>15°$程度の領域では，流速にかかわらず静止流体中での曲線に重なる。

また，図6.14，6.15から，線状体が回転するのに要する水平方向の移動距離は，流速が大きいほど大きく，鉛直方向の移動距離は逆に，流速が大きいほど小さいことが分かる。

6.4.2 線状体重心の速度および加速度

流速が重心の速度の変化におよぼす影響を表わす図6.16，6.17において，静止流体中での場合，線状体は運動開始後，水平方向に除々に加速され，この加速状態は$\theta=43°$程度まで続き，その後，減速されて姿勢が水平方向に近づくと線状体には水平方向の外力は作用しなくなり，$\theta=90°$で$\dot{X}$は0となる。

これに対し，一様流れ中での場合，運動開始と同時に線状体は水平方向にも流体から抗力を受けるため，水平方向にも急激に加速され，その後，除々に加速される状態が$\theta=43°$程度まで続く。そして，減速されて姿勢が水平方向に近づくと線状体には水平方向の外力は作用しなくなり，$\theta=90°$で$\dot{X}$はWと一致する。また，静止流体中での重心の水平方向速度を$\dot{X}_s$で表わすと，一様流れ中での水平方向速度は，$\theta>15°$程度の領域では，

$$\dot{X}=\dot{X}_s+W \tag{6.73}$$

で表わされることが分かる。

これは，$\ddot{X}$およびYの変化を表わす図6.22，6.25から，$\theta>15°$程度の領域では，θと$\ddot{X}$の関係およびθとYの関係は流速

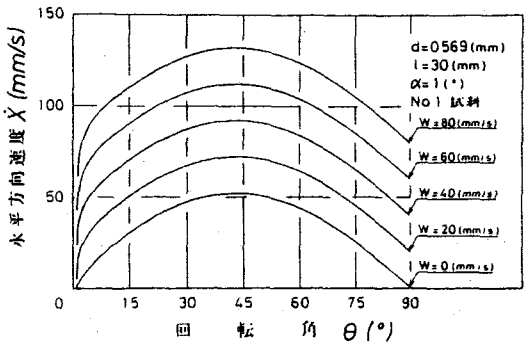


図6.16 水平方向速度におよぼす流速の影響

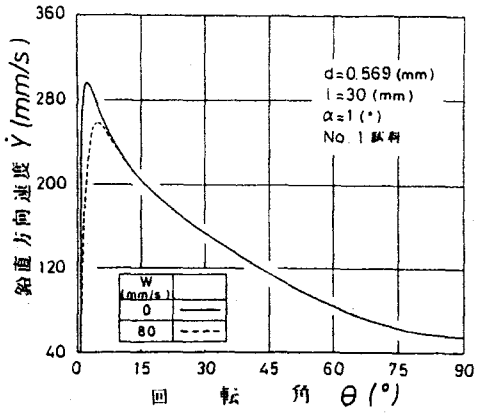


図6.17 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

にかかわらず同一曲線で表わされ，$d\dot{X}/d\theta = \ddot{X}/\gamma$ を考慮すると，一様流れ中での $\dot{X}$ に対し (6.73) 式が成立することが分かる。逆にいえば，一様流れ中で線状体が運動する場合，流体に対する線状体の水平方向の相対速度が，静止流体中での水平方向速度に等しくなるまでの領域では，(6.73) 式が成立しない。したがって，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ の最大値とそのときの θ の値を示す表6.4から，流速にかかわらず θ の値は一致し，$\dot{X}$ の最大値は (6.73) 式の関係で表わされることが分かる。

いっぽう，線状体は運動開始と同時に，重力と浮力の差による外力の作用を受けて鉛直方向に急激に加速される。図6.17に示す $\ell = 30$ (mm) の場合，$W \leqq 80$ (mm/s) の範囲内では，線状体が鉛直方向に加速される領域は $\theta < 5°$ 程度であり，その後，抗力が増大するため，θ の増加に伴ない $\dot{Y}$ は単調に減少する。そして，姿勢が水平方向に近づくと鉛直方向の外力は釣合うので，$\dot{Y}$ は一定値となる。なお，図6.17には $W = 0$ と $W = 80$ (mm/s) の曲線しか示していないが，この曲線の間に $W = 20, 40, 60$ (mm/s) の曲線は順番に並ぶ。

表6.4 重心速度の最大値とそのときの回転角の値

線状体長さ ℓ (mm)	流速 W (mm/s)	水平方向速度の最大値 $\dot{X}_{max}$ (mm/s)	θ (°)	鉛直方向速度の最大値 $\dot{Y}_{max}$ (mm/s)	θ (°)
15	0	49.49	44.9	242.3	3.32
	60	109.48	45.3	198.6	9.64
30	0	52.14	43.1	297.0	2.36
	20	72.14	42.9	272.1	3.62
	40	92.14	43.0	264.8	4.27
	60	112.14	43.0	261.0	4.51
	80	132.14	43.1	258.6	4.66
45	0	53.32	42.4	329.4	1.88
	60	113.32	42.2	301.0	3.06
60	0	53.99	41.9	351.6	1.67
	60	113.99	41.8	329.3	2.33

d = 0.569 (mm), No.1 試料

また，$\ddot{Y}$ の変化を表わす図6.23から，θ と $\ddot{Y}$ の関係は，$\theta < 15°$ 程度の領域では流速の影響を受けるが，これ以上の領域では流速にかかわらず同一曲線で表わされ，さらに，上述したように，θ と γ の関係にも同様のことがいえるので，$d\dot{Y}/d\theta = \ddot{Y}/\gamma$ を考慮すると，θ と $\ddot{Y}$ の関係に流速の影響が現われる領域は $\theta < 15°$ 程度であり，これ以上の領域では，流速にかかわらず θ と $\ddot{Y}$ の関係は同一曲線で表わされる。そして，流速の影響は，

流速が大きいほど $\dot{Y}$ の値は小さく，また，表6.4から姿勢がより水平に近い状態になるまで加速されるという点である。

ここで，流速の影響が現われる $\theta < 15°$ 程度の領域での線状体の運動について考える。

流速にかかわらず線状体の軸に直角な方向の速度 u および軸方向速度 v が同じである状態を考えると，(6.24)式で表わされる線状体に対する流体の相対速度の軸方向成分 U_r は，v の値が負であるので W が大きいほど小さい。いっぽう，(6.21)式で表わされる相対速度の軸に直角な方向成分 U_r は，W が大きいほど大きい。また，運動開始後の θ の小さい領域では，流速の軸方向成分 $W\sin\theta$ は軸に直角な方向成分 $W\cos\theta$ に比べて小さいので，流速が異なることによる U_r の差は，U_r の差に比べて小さくなる。したがって，流速が大きいほど，U_r を代表速度とする Re ((6.23)式) を用いて計算される Nu が大きく，さらに，流速による Nu の差は U_r の差より大きくなるので，U_r が小さいにもかかわらず (6.25)式で表わされる線状体の端面以外の部分が流体から軸方向に受ける抗力 D_y は大きくなる。D_y の向きは正であり，線状体の軸方向に作用する外力 $\dot{Y}$ ((6.19)式) は負であるので，流速が大きいほど軸方向の負の向きの加速度の絶対値は小さくなるため，同一時間経過後の v の絶対値は小さくなる。

いっぽう，流速が大きいほど U_r は大きく，線状体が流体から軸に直角な方向に受ける抗力 D_x は大きい。しかも，D_x は正の向きに作用するので，軸に直角な方向の加速度は流速が大きいほど大きくなるため，同一時間経過後の u の値は大きくなる。

したがって，流速が大きいほど u (>0) は大きく，v (<0) の絶対値は小さいので，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ を表わす(6.17)式を考慮すると，$\dot{X}$ (>0) は大きく，$\dot{Y}$ (<0) の絶対値は小さいことが分かる。

つぎに，長さが重心の速度におよぼす影響を表わす図6.18，6.19 (一様流れ中，$W = 60$ (mm/s)) と図6.20，6.21 (静止流体中) において，一様流れ中での場合にも，静止流体中での場

合にも，$\theta < 65°$程度の領域では$\dot{X}$は長さが大きいほど大きいが，これ以上の領域では長さが小さい方がわづかに大きくなる。しかし，長さの影響は，$\theta < 65°$程度の領域での場合と比較して無視しうるほど小さい。いっぽう，$\dot{Y}$は$\theta < 60°$程度の領域では長さが大きいほど大きいが，これ以上の領域では長さの影響を受けない。

また，表6.4から，長さが小さいほど，姿勢がより水平に近い状態になるまで線状体は水平方向および鉛直方向に加速されることが分かる。

ここで，静止流体中での場合と一様流れ中での場合を比較すると，表6.4から，両場合の$\dot{Y}$の最大値およびそのときのθの値の差は，長さが小さいほど大きいことが分かり，図6.18～図6.21から，$\dot{X}$に関しては(6.73)式の関係が成立つまでのθの領域，$\dot{Y}$に関しては流速の影響が現われるθの領域はともに長さが小さいほど広いことが分かる。すなわち，長さが小さいほど流速の影響を受け易い。

最後に，重心の加速度がどのように変化するかを調べる。流速の影響を表わす図6.22，6.23には，影響をより明確に表わすため，影響が現われる領域における$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の変化状態を示

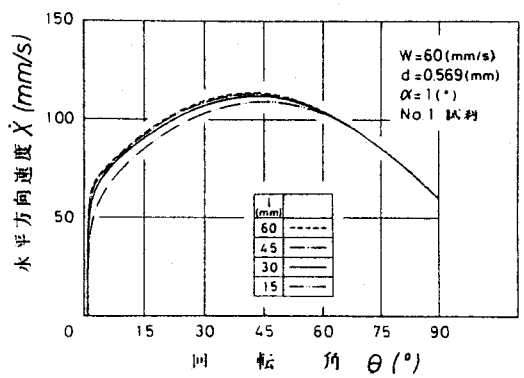


図6.18 水平方向速度におよぼす長さの影響

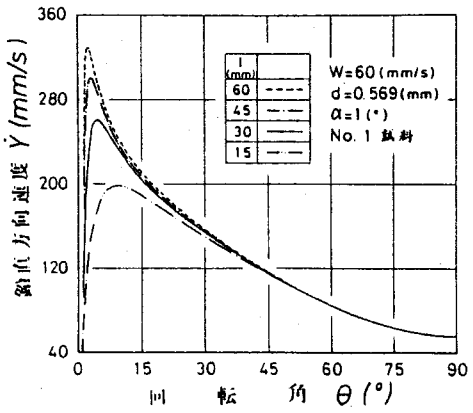


図6.19 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

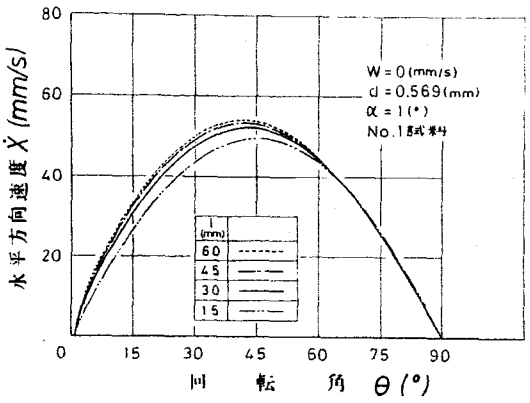


図6.20 水平方向速度におよぼす長さの影響

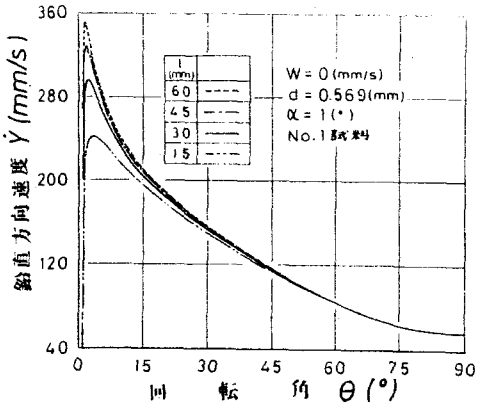


図6.21 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

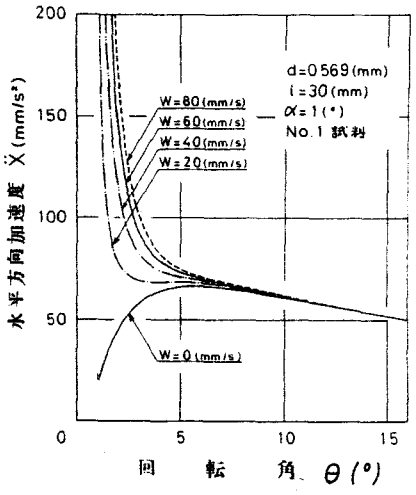


図6.22 水平方向加速度におよぼす流速の影響

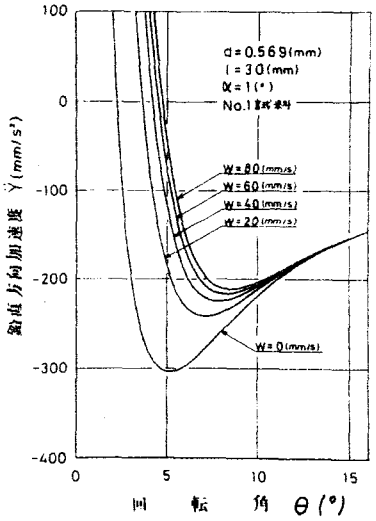


図6.23 鉛直方向加速度におよぼす流速の影響

している。

静止流体中での場合，線状体は鉛直方向に対して1°傾いているので，運動開始時に主に重力と浮力の差にもとづく外力により，水平方向に約23 (mm/s²) の加速度をもち，$\ddot{X}$ はいったん減少し，その後，増大して θ=6° 程度で最大となる。そして，ふたたび減少して θ=43° 程度で，$\ddot{X}$ は正の値から負の値へ移

り（$\ddot{X}=0$のときのθの値は，$\dot{X}$が最大になるときのθの値である。），$\theta=65°$程度で最小となり$\theta=90°$でふたたび0になる。

これに対し，一様流れ中での場合，運動開始と同時に線状体は水平方向にも流体から抗力を受けるため，水平方向にも急激に加速される。このため，相対速度の軸に直角な方向成分U_rは急激に小さくなり，軸に直角な方向の加速度du/dtは急激に減少する。また，軸方向の速度vの絶対値も急激に増大するため，軸方向の加速度dv/dt（<0）の絶対値も急激に減少する。したがって，加速度を表わす(6.18)式を考慮すると，$\ddot{X}$は運動開始時から急激に減少することが分かる。やがて，上述した値はゆっくり変化するようになるので，$\ddot{X}$も除々に減少して静止流体中での曲線に漸近し，$\theta>15°$程度の領域では，流速にかかわらず$\ddot{X}$の変化は同一曲線で表わされる。なお，$W\geq 40(mm/s)$の場合，$\ddot{X}$は運動開始時から減少し続けて静止流体中での曲線に近づくが，$W=20(mm/s)$の場合，急激に減少した後$\ddot{X}$はいったん極大値をもち，その後減少して$W=0$の曲線に近づく現象が見られる。

いっぽう，$\ddot{Y}$も，$\ddot{X}$に関して述べたと同じ原因により，運動開始時から急激に減少して，$\theta<5°$の領域で正の値から負の値へ移り（$\ddot{Y}=0$のときのθの値は，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値である。），最小値をもち，増大して$\theta=90°$でふたたび0になる。また，θの小さい領域では，$\ddot{Y}$の値は流速により異なるけれども，その変化の様子は流速にかかわらず同じになり，θが増加するにつれて一様流れ中での曲線は，静止流体中での曲線に漸近し，$\theta>15°$程度の領域では，流速にかかわらず$\ddot{Y}$の変化は同一曲線で表わされる。なお，図6.22，6.23から，流速が小さいほど，θのより小さい領域で$W=0$の曲線に近づくことが分かる。

ここで，表6.5に$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の最小値およびそのときのθの値を示す。

上述の結果からも分かるように，$\ddot{X}$の最小値およびそのときのθの値は，流速にかかわらず一致し，$\ddot{Y}$の最小値の絶対値は流速が大きいほど小さく，θの値は大きくなる。また，長さが小さいほど，$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の最小値の絶対値およびθの値は大きい。すなわち，長さが小さいほど加速および減速が大きい。

表6.5　重心加速度の最小値とそのときの回転角の値

線状体長さ l (mm)	流速 W (mm/s)	水平方向加速度の最小値 $\ddot{X}_{min}$ (mm/s²)	θ (°)	鉛直方向加速度の最小値 $\ddot{Y}_{min}$ (mm/s²)	θ (°)
15	0	-72.53	67.8	-525.2	11.74
	60	-72.24	67.9	-365.6	20.56
30	0	-19.05	65.5	-303.9	5.29
	20	-19.03	65.4	-241.3	6.94
	40	-19.03	65.5	-224.6	7.75
	60	-19.03	65.6	-216.1	8.02
	80	-19.03	65.5	-211.3	8.51
45	0	-8.71	64.8	-208.5	3.60
	60	-8.71	64.7	-163.2	5.04
60	0	-4.99	64.5	-153.5	2.61
	60	-4.99	64.6	-128.2	3.65

d=0.569(mm)，No.1 試料

6.4.3　線状体の姿勢および角速度

流速が線状体の姿勢の変化におよぼす影響を表わす図6.24，6.25において，一様流れ中での場合にも，静止流体中での場合にも，θの変化は，下に凸の曲線で始まり$\theta=16°$程度で変曲点をもち，$\theta=90°$に漸近するような曲線になる。すなわち，角速度γは，$\theta=16°$程度まで加速されるが，γの増大に伴ない線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントNが増大するため，これ以上の領域では減速され，最終的に，線状体の姿勢は

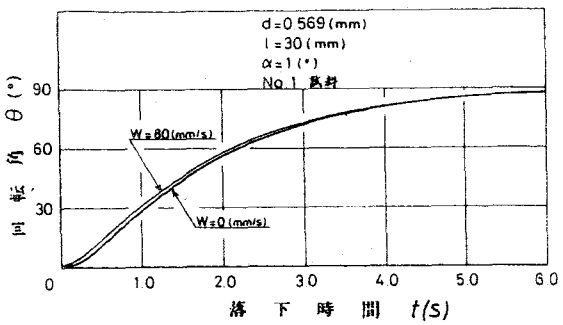


図6.24　姿勢におよぼす流速の影響

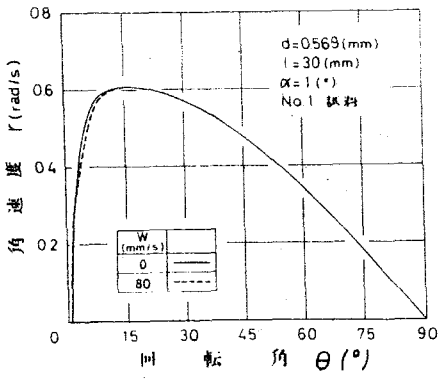


図6.25　角速度におよぼす流速の影響

水平方向に漸近する。姿勢が水平方向に近づくと線状体に作用する外力は釣合うようになり，流体に対する線状体の相対速度の軸方向成分 $v+W\sin\theta$ および回転モーメント N は 0 に近づくので，運動方程式 (6.32)式の第3式を考慮すると，線状体は回転運動しなくなり，もっとも安定した水平な姿勢を保ち続ける。なお，図6.24，6.25 には $W=0$ と $W=80$ (mm/s) の曲線しか示していないが，この曲線の間に $W=20, 40, 60$ (mm/s) の曲線は順番に並らぶ。

ここで，一様流れ中での場合と静止流体中での場合を比較すると，とくに運動開始直後の領域における γ の変化に差が現われている。図6.25において，静止流体中での場合，線状体の軸に直角な方向の速度 u (<0) の絶対値は除々に増大し続け，軸方向速度 v (<0) の絶対値は急激に増大するので，この領域では γ は単調に増大する。いっぽう，一様流れ中での場合，運動開始と同時に水平方向にも急激に加速され，$W=80$ (mm/s) のとき u (>0) は $\theta=2.5°$ 程度で最大となり，その後減少する。したがって，運動方程式 (6.32)式において，流体に対する線状体の相対速度の軸に直角な方向成分 $u-W\cos\theta$ (<0) の絶対値は，運動開始と同時に急激に減少して $\theta=2.5°$ 程度で最小となり，その後増大し，また，相対速度の軸方向成分 $v+W\sin\theta$ (<0) の絶対値は，静止流体中での場合と同様に，急激に増大するので，γ は単調に増大することなく，$\theta=2.5°$ 程度で変曲点をもつ。

運動開始時においては，$W=80$ (mm/s) での $u-W\cos\theta$ の絶対値は，$W=0$ での u の絶対値より大きいため，γ の値は $W=80$ (mm/s) の方が大きいが，上述したように $u-W\cos\theta$ の絶対値は急激に減少するので，角加速度 $d\gamma/dt$ は減少し，$\theta>2.5°$ 程度の領域では，$W=0$ の方が γ の値は大きくなる。しかし，その後 $u-W\cos\theta$ の絶対値は増大するので，$W=80$ (mm/s) の θ と γ の関係を表わす曲線は，$W=0$ の曲線に近づき，$\theta>15°$

程度の領域では，θ と Y の関係は同一曲線で表わされる。

$\theta > 15°$ 程度の領域における線状体の回転運動が流速にかかわらず同じになることについてはつぎのように考えればよい。

前項で述べたように，$\theta > 15°$ 程度の領域では，$\dot{X}$ に関しては (6.73) 式の関係が成立ち，$\dot{Y}$ は流速の影響を受けない。したがって，重心の速度を表わす (6.17) 式から，

$$\left.\begin{aligned} u &= (\dot{X}_s + W)\cos\theta + \dot{Y}_s \sin\theta \\ v &= -(\dot{X}_s + W)\sin\theta + \dot{Y}_s \cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6.74)$$

となり，したがって，

$$\left.\begin{aligned} u - W\cos\theta &= \dot{X}_s \cos\theta + \dot{Y}_s \sin\theta \\ v + W\sin\theta &= -\dot{X}_s \sin\theta + \dot{Y}_s \cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6.75)$$

となる。(6.75) 式の右辺はそれぞれ静止流体中での u, v である。また，(6.75) 式の第1式から，流体の線状体に対する相対速度の軸に直角な方向成分は，流速にかかわらず等しいので，線状体に作用する回転モーメント N も等しくなる。したがって，運動方程式 (6.32) 式を考慮すると，角加速度 dr/dt は流速にかかわらず等しいことが分かる。すなわち，流れに対する線状体の相対的な並進運動が流速にかかわらず同じになるので，線状体の回転運動も流速の影響を受けない。

以上のことから，図6.24において，同一落下時間での θ の値が $W = 80$ (mm/s) の方が大きくなるのは，運動開始直後の角速度の差によって生じたものであり，$W = 80$ (mm/s) の曲線を横軸（落下時間軸）に沿って平行移動すると，$\theta > 15°$ 程度の領域では $W = 0$ の曲線に重なる。

つぎに，長さが線状体の姿勢の変化におよぼす影響を表わす図6.26（一様流れ中，$W = 60$ (mm/s)）と図6.27（静止流

体中）において，一様流れ中での場合にも，静止流体中での場合にも，長さが小さいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。

また，静止流体中での場合と一様流れ中での場合を比較すると，同一落下時間における両場合のθの値の差は，長さが小さいほど大きく，角速度の変化に流速の影響が現われるθの領域は，長さが小さいほど広い。さらに，γの最大値とそのときのθの値を示す表6.6から，長さが小さいほど姿勢がより水平に近い状態になるまで，角速度は加速される傾向にあり，両場合のγの最大値およびθの値の差は大きいことが分かる。すなわち，長さが小さいほど，姿勢の変化は流速の影響を受け易い。

以上の結果をまとめると，線状体が一様流れ中で運動する場合，運動特性に流速の影響が現われるのはθ＜15°程度の領域（ただし，ℓ=30(mm)の場合）だけであり，これ以上の領域では流れに対する線状体の相対

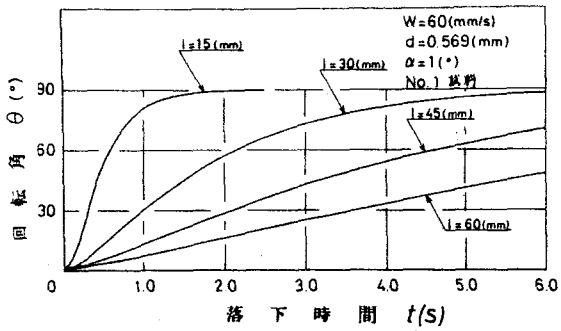


図6.26 姿勢におよぼす長さの影響

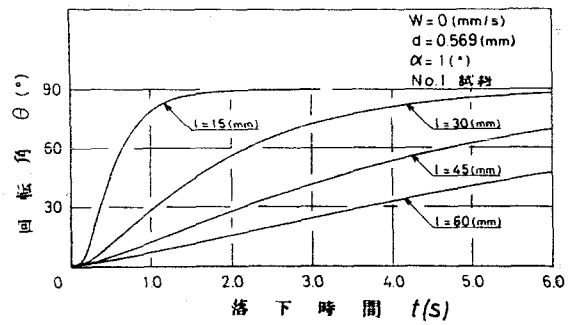


図6.27 姿勢におよぼす長さの影響

表6.6 角速度の最大値とそのときの回転角の値

線状体長さ l (mm)	流速 W(mm/s)	角速度の最大値 r (rad/s)	θ(°)
15	0	2.3887	19.7
	60	2.3151	23.2
30	0	0.6080	16.0
	20	0.6074	16.1
	40	0.6074	16.3
	60	0.6074	16.2
	80	0.6073	16.4
45	0	0.2745	16.1
	60	0.2744	16.0
60	0	0.1562	16.0
	60	0.1562	15.9

d=0.569(mm)，No.1試料

的な運動は，流速にかかわらず同じになる。このように，相対的な運動が流速の影響を受けないのは，流速が場所的に変化しないことが原因している。また，流速の影響は，長さが小さいほど顕著に現われる。

6.5 矩形管内での十分に発達した流れ中における線状体の運動

この節では，管内平均流速 $U=60$(mm/s) で長さ $\ell=15, 30, 45, 60$(mm)，$\ell=30$(mm) で $U=20, 40, 60, 80$(mm/s) および $U=60$(mm/s)，$\ell=45$(mm) で初期角度 $\alpha=1°, 10°, 20°$ に対する計算結果について述べると同時に，前節の一様流れ中での結果と比較し，流速が場所的に変化する（この場合，流速は鉛直方向に沿って変化する。）流れ中で線状体が運動する場合，その運動特性がどのようになるかを明らかにする。また，長さ，流速および初期角度が運動特性におよぼす影響を調べる。

6.5.1 線状体の落下軌跡

図6.28に $\ell=30$(mm)，$U=20\sim80$(mm/s) の落下軌跡を示す。図中の線状体の時間間隔は $\Delta t=0.2$(s) であり，線状体の軸方向に沿って流速が変化するので，線状体長さは X，Y 座標のスケールに従って縮小した寸法で表わしてある。なお，鉛直方向の座標は管路の上面を原点にとっているため，初期位置は $Y=30$(mm) である。また，この図には一点鎖線で流速分布が示してあり，流速の変化に伴なって線状体の運動が変化する様子をいっそう分かり易くした。

一様流れ中での場合と同様に，線状体は運動開始と同時に水平方向にも流体から抗力を受けるため，水平方向にも急激に加速され，鉛直方向に対してある角度をもって運動し始める。また，U が大きいほど，水平方向の加速は大きく，鉛直方向の加

速は小さいので，この角度は大きくなる。しかし，十分に発達した流れ中での場合，初期位置（$Y=30(mm)$）での流速は$U^*(=U/U)=1.06$であり，ほぼ平均流速に等しいが，軸方向に沿って流速が分布し先端部ほど大きいので，運動開始時に線状体に作用する回転モーメントNは，姿勢を水平方向に回転させる向きに働き（図6.50参照），姿勢の変化は一様流れ中での場合より大きい。このため，加速度の方向と運動方向およびそれらの向きが一致して軌跡の接線勾配dY/dXが極大になる点におけるdY/dXの値およびそれまでに重心が鉛直方向に移動する距離は，十分に発達した流れ中での場合の方が小さく，$U=80(mm/s)$の場合でも移動距離は約$8(mm)$である。

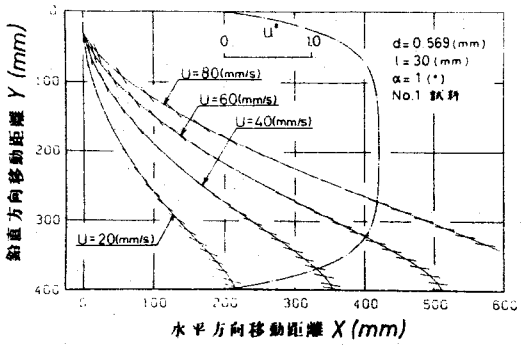


図6.28 落下軌跡におよぼす流速の影響

その後も，加速度の方向は反時計回りに回転し続けるため，運動方向も反時計回りに回転し，dY/dXは減少する。そして，$\ddot{Y}$に引続いて$\ddot{X}$も負の値になり，ふたたび，重心の運動方向と加速度の方向が一致する。この点では，両者の向きは逆になるのでdY/dXは最小になる。その後も，加速度の方向は回転し続け，線状体の姿勢が水平方向に近づくにつれて，線状体に作用する抗力の鉛直方向成分と，重力と浮力の差にもとづく外力が除々に釣合うようになるため，$\ddot{Y}$は0に近づく。一様流れ中での場合，姿勢が水平方向に漸近するにつれて，$\ddot{X}$も0に近づいたが，十分に発達した流れ中での場合，線状体が水平方向に回転しながら管路の底面に近づくと，流速は底面に近いほど小さいため，$\ddot{X}$（<0）の絶対値は急激に増大し，線状体は水平方向に急激に減速される。したがって，底面に近づくと線状体の運

動方向は急激に鉛直方向に近づく。

ここで，dY/dXの最小値およびそのときの姿勢θとそれまでに線状体が水平方向および鉛直方向に移動する距離X，Yを表6.7に示す。

流れの方向は水平方向であるので，$U=20\sim80$(mm/s)の$\ddot{Y}$の変化を比較すると，図6.33から，θが約35°以下の領域で差が見られるが，これ以上の領域では流速の影響は見られない。ところが，図6.31から，$\ddot{X}$はθの全領域で流速が大きいほど大きくなる。したがって，流速が大きいほど，同一姿勢に対する運動方向はより水平に近くなる。さらに，θと$\ddot{X}$の関係（図6.35）において，$\theta=50°$程度から線状体が管路底面に近づいて$\ddot{X}$が急激に減少し始めるまでの領域（この領域でdY/dXは最小になる。）では，流速が大きいほど$\ddot{X}$の絶対値は小さい。また，θと$\ddot{Y}$の関係（図6.36）から，$\theta>50°$程度の領域では$\ddot{Y}$の絶対値は流速が大きいほどわずかに大きくなる傾向が見られる。したがって，dY/dXが最小になる付近の領域では，同一姿勢に対する加速度の方向は流速が大きいほど鉛直に近いことが分かる。また，前述したように，加速度の方向はθの増加に伴ない反時計回りに回転する。以上のことから，一様流れ中での場合と同様に運動方向と加速度の方向が一致するときのθの値は，流速が大きいほど大きくなり，この点でのdY/dXの値は小さくなる。

ところが，一様流れ中での結果（表6.3）と比較すると，十分に発達した流れ中での場合の方が，dY/dXの値は小さく，そのときのθの値も小さい傾向にある。

表6.7 軌跡の変曲点における接線勾配，姿勢とその位置

初期角度 α(°)	線状体長さ l (mm)	流速 U(mm/s)	接線勾配 dX/dY	θ(°)	水平方向移動距離 X (mm)	鉛直方向移動距離 Y (mm)
1	15	60	0.488	79.6	103.3	82.6
	30	20	1.080	62.6	157.3	294.6
		40	0.696	68.4	249.3	278.3
		60	0.499	73.0	349.2	266.4
		80	0.383	76.3	449.7	254.0
	45	60	0.813	41.2	256.3	276.9
	60	60	1.038	29.4	202.3	256.4
10	45	60	0.652	52.8	324.3	276.7
20			0.554	62.7	384.2	270.7

d=0.569(mm)，No.1 高岸砂

両場合の$\dot{Y}$の変化（図6.17，6.33）を比較すると，流れの方向が水平方向であるため，θと$\dot{Y}$の関係は，$\theta > 35°$程度の領域では同一曲線で表わされる。これに対し，十分に発達した流れ中での最大流速は$u^* = 1.773$であるので，$\dot{X}$の変化（図6.16，6.31）を比較すると分かるように，$d\dot{Y}/d\dot{X}$が最小になる付近の領域での$\dot{X}$の値は十分に発達した流れ中での場合の方が大きい。したがって，$d\dot{Y}/d\dot{X}$の値は十分に発達した流れ中での場合の方が小さくなる。また，θの値が小さくなる傾向にあるのは，管路底面に近いほど流速が小さいため，線状体が底面に近づくと$\dot{X}$は急激に減速されるが，この現象が生ずる以前の領域で$d\dot{Y}/d\dot{X}$が最小になるからであると考えられる。さらに，十分に発達した流れ中での場合，一様流れ中での場合と異なり，姿勢の変化におよぼす流速の影響は大きく，流速が大きいほど線状体が回転するのに要する時間は短くなり（図6.47参照），また，図6.33から$\theta < 35°$程度の領域では，$\dot{Y}$は流速が大きいほど小さいため，$d\dot{Y}/d\dot{X}$が最小になるときのθの値が大きいにもかかわらず，それまでに$\dot{Y}$方向に移動する距離は流速が大きいほど小さく，一様流れ中での場合と逆の傾向を示す。いっぽう，$\dot{X}$方向に移動する距離は，一様流れ中での場合と同様に流速が大きいほど大きくなる。

つぎに，図6.28において，線状体の姿勢と運動方向に着目すると，運動開始後しばらくの間運動方向と鉛直線のなす角度はθより大きく，また，この状態は流速が大きいほど長時間続き，一様流れ中での場合と同じ傾向を示す。しかし，運動方向は十分に発達した流れ中での場合の方が水平方向に近いため，運動方向が姿勢と一致するときのθの値は，$U = 20, 40, 60, 80$ (mm/s)に対し，$\theta = 25.2°, 49.0°, 61.1°, 67.9°$と一様流れ中での場合より大きい。

以上の結果から，十分に発達した流れ中で線状体が運動する場合，管路中央部では流速の変化がわずかであるので，数値的

には異なるが，流速が線状体の落下軌跡におよぼす影響の傾向は一様流れ中での場合と一致するが，流速の変化が大きい壁面近くの領域，とくに底面近くの領域での落下軌跡は，一様流れ中での場合とはまったく異なるものになる。

この底面近くの領域での落下軌跡の違いは，長さが落下軌跡におよぼす影響を表わす図6.29において，ℓ=45(mm)および60(mm)の落下軌跡を見るといっそう明確に分かる。なお，図中の線状体の時間間隔は，ℓ=30～60(mm)の場合，Δt=0.2(s)，ℓ=15(mm)の場合，$t \leqq 2.0$(s)でΔt=0.2(s)，$t > 2.0$(s)でΔt=0.4(s)である。

流速が落下軌跡におよぼす影響を表わす図6.28の場合，ℓ=30(mm)であったため流速の変化が大きい底面近くの領域での姿勢はほとんど水平であり，軸方向に沿っての流速の変化はほとんどなく，運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象は見られたが，線状体が鉛直方向に回転する現象は見られなかった。これに対し，図6.29において，ℓ=45，60(mm)の落下軌跡を見ると，底面近くの領域では運動方向が鉛直方向に近づく現象と線状体が鉛直方向に回転する現象が現われている。

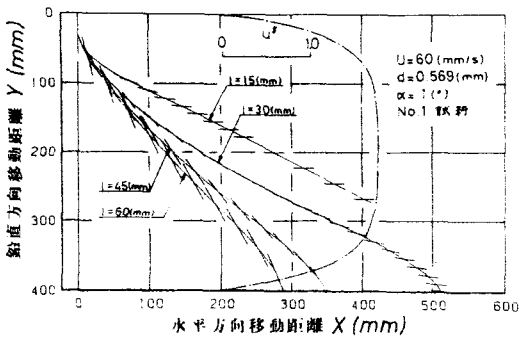


図6.29 落下軌跡におよぼす長さの影響

これは，長さが大きい場合，線状体が回転するのに要する時間が長くなるため，底面近くの領域でのθの値は小さく（ℓ=60(mm)の場合，θ=30°，ℓ=45(mm)の場合，θ=42°程度），軸方向に沿って流速が大きく変化し，しかも，先端部ほど小さいので，線状体に作用する回転モーメントMが姿勢を鉛直方向に回転させる向きに働くからである。したがって，ℓ=45，60(mm)の

場合，線状体が底面に到達するまで運動方向と鉛直線のなす角度がθより大きい状態が続く。

また，一様流れ中での場合，dY/dXの最小値およびそのときの姿勢には長さの影響がほとんど見られなかったが，表6.7から十分に発達した流れ中での場合，これらの値におよぼす長さの影響が明確に現われ，長さが大きいほど，重心の軌跡の変曲点における運動方向および姿勢はより鉛直に近いことが分かる。さらに，軌跡が変曲点をもつまでにX方向に移動する距離は，$\ell = 30$ (mm)の場合が最大になり，Y方向に移動する距離は，$\ell = 45$ (mm)の場合が最大になり，一様流れ中での場合と異なる傾向を示す。

以上のことは，長さが大きいほど短時間のうちに底面近くの流速の変化が大きい領域に到達し，しかも，そのときの姿勢がより鉛直に近いため，流速分布の影響を大きく受けることが原因していると考えられる。したがって，今より管路の高さを大きくして計算をおこなう場合，$\ell = 45$，60 (mm)のdY/dXの最小値は小さくなり，そのときのθの値は大きくなる。また，逆に$\ell = 15$ (mm)のdY/dXの最小値は大きくなり，θの値は小さくなるので，長さの影響が現われにくくなると考えられる。

つぎに，初期角度の影響を調べるため，図6.30に$\ell = 45$ (mm)，$\alpha = 1°, 10°, 20°$の落下軌跡を示す。線状体の時間間隔は$\Delta t = 0.2$ (S)である。

線状体は，運動開始と同時に水平方向にも鉛直方向にも急激に加速されるが，初期角度が大きいほど水平方向の加速は大きく，鉛直方向の加速は小さいので，運動方向はより水平に近くなる。その後，加速度の方向と運動方向およびそれらの向きが一致して軌跡の接線勾配dY/dXが極大になる点を経て，加速度の方向が反時計回りに回転しているため，運動方向は除々に水平方向に近づき，ふたたび，運動方向と加速度の方向が一致してdY/dXは最小になる。そして，運動方向は除々に鉛直方

向に近づきながら流速の変化が大きい底面近くの領域に到達する。

これまでの領域では，運動開始直後の流速の変化が大きい管路上面近くの領域を除き，線状体は除々に水平方向に回転し続ける。ところが，底面近くの領域では，流速分布の影響で運動方向および姿勢は急激に鉛直方向に近づく。また，初期角度が小さいほど，この領域での姿勢が鉛直に近いため，軸方向に沿って流速が大きく変化し，運動方向および姿勢が急激に鉛直方向に近づく現象が顕著に現われる。したがって，$\alpha=1°$の場合，線状体が底面に到達するまで運動方向と鉛直線のなす角度がθより大きい状態が続き，$\alpha=10°$の場合，底面近くのθが減少している領域で運動方向が姿勢と一致し，$\alpha=20°$の場合，θが増加している領域で両者が一致する。また，表6.7から，dY/dXが最小になる点での運動方向および姿勢は，初期角度が大きいほど水平方向に近くなることが分かる。

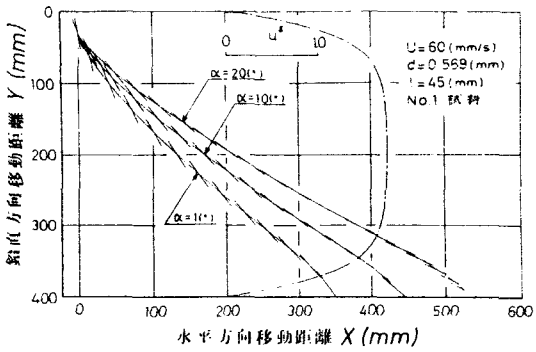


図6.30 落下軌跡におよぼす初期角度の影響

ここで，重心の軌跡の形におよぼす初期角度の影響について考える。

一様流れ中での場合，初期角度を変化させておこなった計算はないが，前節の結果から，$\theta>15°$程度の領域では，姿勢の変化および姿勢の変化に対する$\dot{Y}$の変化は流速の影響を受けず，さらに，流速に対する線状体の水平方向の相対速度，$\dot{X}-W$，の変化は静止流体中での水平方向速度の変化と一致した。また，静止流体中での場合，運動開始直後の急激な加速領域（θにして約5°の領域）を除き，重心の速度の変化および姿勢の変化は，初期角度の影響を受けず，軌跡をX，Y軸に沿ってθが等

しくなる位置まで平行移動すると，急激な加速の領域を除き，軌跡は初期角度にかかわらず一致するという結果が得られた。（2.5節参照）以上2つの結果から，一様流れ中での場合にも，X，Y軸に沿ってθが等しくなる位置まで平行移動すると，急激な加速の領域を除き，軌跡は初期角度にかかわらず一致すると考えられる。

ところが，十分に発達した流れ中での場合，図6.45から，流れの方向が水平方向であるので，運動開始後しばらくすると姿勢の変化に対する$\dot{Y}$の変化は，初期角度にかかわらず同一曲線で表わされるが，初期角度が異なると姿勢が同じになるときの線状体の位置が異なる（同一姿勢に対する位置は，αが小さいほど管路底面に近くなる。）ため，流速に差が生ずる。このため，姿勢の変化および姿勢の変化に対する$\dot{X}$の変化は，初期角度の影響を受ける。したがって，静止流体中あるいは一様流れ中での場合と異なり，軌跡をX，Y軸に沿ってθが等しくなる位置まで平行移動しても，初期角度にかかわらず一致することはなく，流速が場所的に変化するため，線状体が運動をおこなう位置のみならず，軌跡の形にも初期角度の影響が現われる。

6.5.2 線状体重心の速度および加速度

図6.7に示した流速分布を見れば分かるように，管路上面近くの領域では，上面から離れるに従い流速は急激に増大する。したがって，流速が$\dot{X}$の変化におよぼす影響を表わす図6.31において，線状体は上面近くの領域で運動を開始するため水平方向に急激に加速される。そして，線状体が上面から離れるにつれて流速が増大する割合も減少し，しかも，姿勢が水平方向に回転するため，水平方向への加速は除々に減少する。$\ell=30\,(mm)$の場合，水平方向への加速状態は$\theta=42°\sim47°$まで続き，$\dot{X}$が最大になる位置は管路中央部の流速の変化が小さい領域である。その後減速されて，線状体が管路底面に近づくと，底面近くの

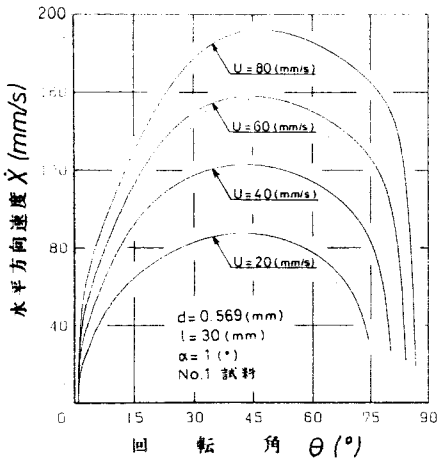


図6.31 水平方向速度におよぼす流速の影響

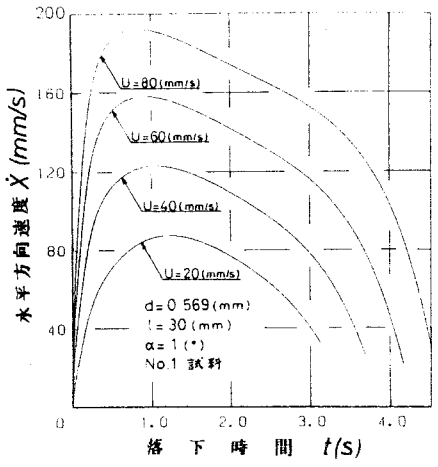


図6.32 水平方向速度におよぼす流速の影響

領域では流速の変化が大きく，しかも底面に近いほど流速が小さいため，$\dot{X}$は急激に減速される。図6.7から，$U^*=1.7$になる位置は$Y^*=0.25, 0.75$（$Y=100, 300$ (mm)）であり，$0 \leqq Y^* < 0.25$，$0.75 < Y^* \leqq 1.0$の領域では流速の変化が大きく，$0.25 < Y^* < 0.75$の領域では流速の変化はわずかである。また，$U=80$(mm/s)の場合，$Y=100$および300 (mm)の位置（鉛直方向移動距離が70および270 (mm)）における姿勢は$\theta=35°$および$79°$程度であり，$\theta<35°$および$\theta>79°$の領域で$\dot{X}$が急激に変化することが分かる。なお，$\theta>79°$の領域の方が曲線がより急激に変化するのは，$\theta<35°$の領域に比べて姿勢の変化が小さいからである。また，流速が小さいほど，$\dot{X}$が急激に減少し始めるときのθの値が小さくなるのは，$Y=300$ (mm)の位置におけるθの値が小さいからである。以上は，姿勢の変化に対する$\dot{X}$の変化を調べたが，つぎに，落下時間に伴なって$\dot{X}$がどのように変化するかを調べる。

図6.32において，運動開始と同時に線状体は急激に水平方向に加速され，$t=0.8\sim1.2$ (s)で$\dot{X}$は最大となり，その後，$\dot{X}$はほぼ直線的に減少し（水平方向加速度$\ddot{X}$がほぼ一定になる。），

線状体が管路底面に近づくと$\dot{X}$は急激に減速される。流速が大きいほど線状体が水平方向に加速される時間が短くなるのは，図6.47を見れば分かるように流速が大きいほど姿勢の変化が大きいからである。また，水平方向に減速され始めてから$\dot{X}$がほとんど変化しない状態は流速が大きいほど長時間続く。この現象は管路中央部の流速の変化が小さい領域で生じており（$U=80(mm/s)$の場合，$100<Y<300(mm)$の範囲に線状体が位置するのは，$0.45<t<2.85(s)$である。），流速が大きいほど$\dot{X}$が減速され始める位置が管路中央部のより上方であり，流速の変化が小さい領域で長時間運動するからである。なお，この現象は静止流体中での場合にも見られ（図3.19参照），この場合には$\dot{X}$が減速され始めてから$\ddot{X}$がほとんど変化しない状態が続いた後，姿勢が水平方向に漸近すると$\dot{X}$は0になるため，tと$\dot{X}$の関係は$\dot{X}=0$に漸近する曲線で表わされる。

表6.8に$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値およびそのときのθとtの値を示す。流速が大きいほど姿勢の変化が大きいため，線状体は姿勢がより水平に近い状態になるまで水平方向に加速される。しかし，加速される時間は短い。また，$\dot{X}$が最大になるときの線状体の位置は，流速の変化が小さい管路中央部であるので，$\dot{X}$の最大値$\dot{X}_{max}$に対し，そのときのθに対する静止流体中での水平方

表6.8　重心速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

初期角度	線状体長さ	流速	水平方向速度の最大値			鉛直方向速度の最大値		
α(°)	l(mm)	U(mm/s)	$\dot{X}_{max}$(mm/s)	θ(°)	t(s)	$\dot{Y}_{max}$(mm/s)	θ(°)	t(s)
1	15	60	145.06	51.7	0.38	168.6	14.90	0.12
	30	20	87.52	42.5	1.22	234.0	6.74	0.18
		40	123.08	43.0	1.05	209.6	10.20	0.17
		60	158.19	44.4	0.92	193.8	13.12	0.16
		80	192.44	46.8	0.83	181.6	15.67	0.15
	45	60	158.26	36.7	1.36	203.4	12.31	0.17
	60	60	154.29	28.2	1.27	208.6	12.42	0.18
10	45	60	159.71	42.5	1.19	174.6	20.41	0.16
20			158.21	47.5	0.97	149.7	28.94	0.15

d=0.569(mm)，No.1試料

向速度を$\dot{X}_s$，そのときの重心での流速をW_cとすると，

$$\dot{X}_{max} = \dot{X}_s + W_c \qquad (6.76)$$

なる関係がほぼ成立する。この式は(6.73)式と同じものであり，一様流れ中での場合，$\theta > 15°$程度の領域でこの関係が成立したが，十分に発達した流れ中での場合，流速が小さいほど流速の場所による差は小さいので，$\dot{X}$に対し(6.76)式の関係が成り立つθの領域は広くなる傾向にあるが，一様流れ中での場合に比べて狭く，$U = 20$ (mm/s)の場合，$\theta = 20° \sim 65°$，$U = 30$ (mm/s)の場合，$\theta = 45° \sim 75°$程度である。また，流速の変化が小さい領域に到達したときの姿勢は，流速が大きいほど水平方向に近いため，このθの領域は値の大きい方へづれる傾向にある。なお，流速の変化が大きい壁面近くの領域では，慣性のため，線状体が加速される場合（上面近くの領域），$\dot{X} < \dot{X}_s + W_c$であり，減速される場合（底面近くの領域），$\dot{X} > \dot{X}_s + W_c$となる。また，十分に発達した流れ中での流速は，壁面近くの約28(mm)の領域を除き，一様流れ中での場合より大きいので，図6.16と図6.31を比較すれば分かるように，壁面近くで$\dot{X}$が急激に加速あるいは減速される領域の一部を除き，θのほとんどの領域で$\dot{X}$は十分に発達した流れ中での場合の方が大きくなる。

いっぽう，流速が$\dot{Y}$の変化におよぼす影響を表わす図6.33において，一様流れ中での場合と同様に，線状体は運動開始と同時に重力と浮力の差にもとづく力の作用を受けて鉛直方向に急激に加速される。$\ell = 30$ (mm)の場合，$U \leq 80$ (mm/s)の範囲内では，線状体が鉛直方向に加速される領域は$\theta < 16°$程度であり，その後抗力が増大するため，θの増加に伴ない単調に減少する。そして，姿勢が水平方向に近づくと鉛直方向の力は除々に釣合うので，$\dot{Y}$は一定値となる。また，一様流れ中で

の場合のように流速が姿勢の変化におよぼす影響がわづかである場合にも，$\theta < 15°$程度の領域では流速が大きいほど$\dot{Y}$の値は小さくなった。(6.4.2項参照)十分に発達した流れ中での場合，流速が大きいほど姿勢の変化が大きく，同一落下時間における姿勢はより水平に近くなる。このため，線状体に作用する抗力の鉛直方向成分は大きく，いっそう鉛直方向に加速されにくくなるので，運動開始後しばらくの間流速が大きいほど$\dot{Y}$の値は小さくなる。しかし，θの増加に伴ない流速の影響は見られなくなり，$\theta > 35°$程度の領域ではθと$\dot{Y}$の関係は同一曲線で表わされる。

つぎに，落下時間に伴なって$\dot{Y}$が変化する状態を表わす図6.34において，線状体が鉛直方向に急激に加速される時間は0.2(s)以内であり，その後$\dot{Y}$は減速される。$\ell = 30$(mm)の場合，流速の変化が大きい底面近くの領域においても，姿勢が水平に近いため，線状体が鉛直方向に回転する現象は生じないので，$\dot{Y}$は落下時間に伴ない一定値(約56.5(mm/s))に漸近する。また，同一落下時間における姿勢は流速が大きいほど水平に近くなるので，上述のθと$\dot{Y}$の関係におよぼす流速の影響を考慮すると，流速が大きいほどつねに$\dot{Y}$は小さいことが分かる。

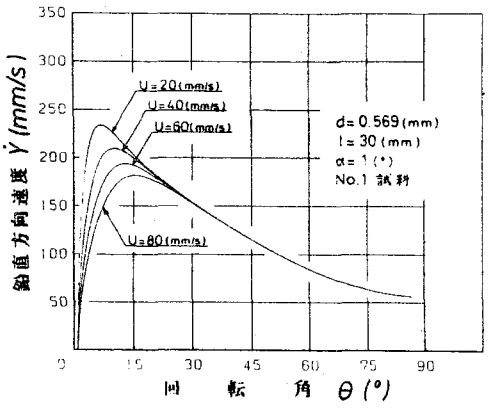


図6.33 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

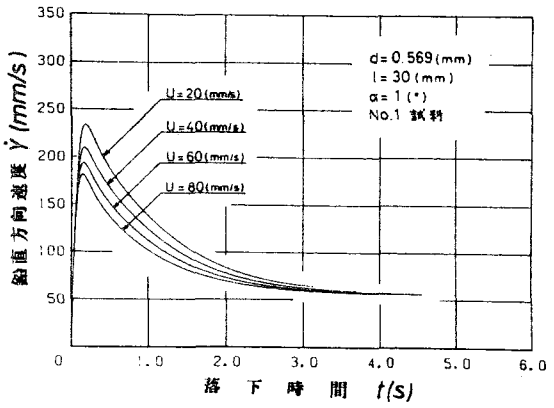


図6.34 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

表6.8から，線状体が鉛直方向に加速される時間は流速が大きいほど短くなる傾向にあり，これは一様流れ中での場合と異なるが，流速による差はわずかであり，姿勢の変化は流速が大きいほど大きいため，より水平に近い姿勢になるまで加速される。この流速の影響は一様流れ中での場合と一致するが，表6.4と表6.8を比較すれば分かるように，十分に発達した流れ中での場合，流速分布の影響で一様流れ中での場合より姿勢の変化が大きく，しかも，姿勢の変化は流速の影響を大きく受けるので，より水平に近い姿勢になるまで鉛直方向に加速され，流速による$\dot{Y}$の最大値の差は，たとえば，$U=20$(mm/s)と$U=80$(mm/s)の差は，一様流れ中での場合，13.5(mm/s)，十分に発達した流れ中での場合，52.4(mm/s)のように，大きくなる。しかし，図6.17と図6.33を比較すると，$\dot{Y}$は運動開始後しばらくの間，十分に発達した流れ中での場合の方が小さいが，やがてθの増加に伴ない流れ状態の影響は見られなくなり，θと$\dot{Y}$の関係は一様流れ中での曲線と一致する。このときのθの値は流速が大きいほど大きくなるが，$U=80$(mm/s)の場合でも約35°である。

つぎに，流速が重心の加速度におよぼす影響を調べる。

図6.35において，運動開始と同時に線状体は水平方向にも流体から抗力を受けるため水平方向にも急激に加速される。このため，線状体に対する流体の相対速度の軸に直角な方向成分U_rは小さくなるが，十分に発達した流れ中での場合，線状体が運動を開始して槽路上面から遠ざかるにつれて線状体回りの流速は増大するので，一様流れ中での場合に比べてU_rの減少は小さく，軸に直角な方向の加速度du/dtの急激な減少は押えられる。また，軸方向速度v(<0)の絶対値の急激な増大および加速度dv/dt(<0)の絶対値の急激な減少も小さくなる。したがって，加速度を表わす(6.18)式を考慮すると，$\ddot{X}$が運動開始時から急激に減少する割合は十分に発達した流れ中での場合の

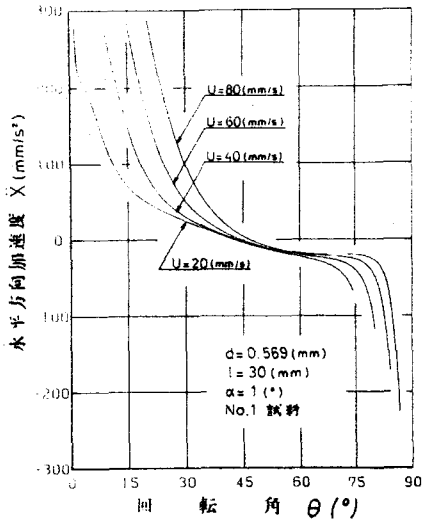


図6.35 水平方向加速度におよぼす流速の影響

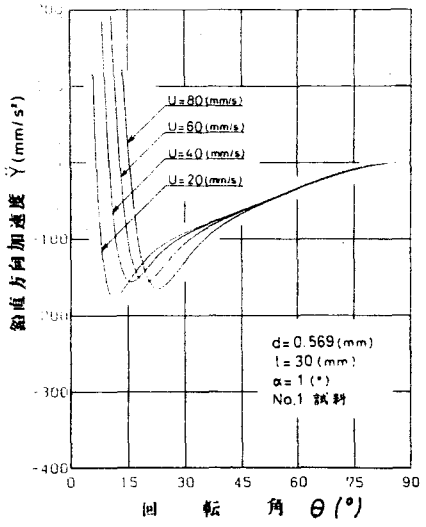


図6.36 鉛直方向加速度におよぼす流速の影響

方が小さくなることが分かる。その後線状体が流速の変化が小さい管路中央部で運動するようになると，流速の影響が除々に見られなくなり $U=20\sim80$ (mm/s) の曲線は漸近し，流速による差はわずかとなる。しかし，同じ姿勢における位置は流速により異なるため，曲線が一致することはない。やがて，流速の変化が大きい管路底面近くの領域に線状体が入ると $\ddot{X}$ は急激に減少する。この領域に入るときの姿勢は，流速が小さいほどより鉛直に近いため，流速が小さい順番にθの値の小さい領域で他の曲線から離れていく。また，流速が大きいほど流速の場所による差が大きいため，$\ddot{X}$ はより大きく減少する。したがって，静止流体中あるいは一様流れ中で見られた $\ddot{X}$ が最小になる現象は，十分に発達した流れ中での場合生じない。しかし，今より管路の高さを大きくして計算をおこなう場合，流速の変化が小さい領域が広くなるので，$\ddot{X}$ が極小になる現象が現われる可能性がある。

いっぽう，図6.36において，$\ddot{Y}$ も運動開始時から急激に減少するが，$\ddot{X}$ に関して述べたと同じ原因により，一様流れ中での

場合に比べて十分に発達した流れ中での場合の方が急激な減少は小さくなる。また，$\ddot{Y}$が減少して最小になるときのθの値は，一様流れ中での場合と同様に流速が大きいほど大きいが，$\ddot{Y}$の最小値は流速に対して一定の傾向を示さず，これは一様流れ中での結果と異なる。一様流れ中での場合，姿勢の変化におよぼす流速の影響はわずかであったのに対し，十分に発達した流れ中での場合，流速の影響は大きく同一落下時間における姿勢は流速が大きいほどより水平に近くなる。このため，流速が大きいほど一様流れ中での場合に比べて線状体に作用する抗力の鉛直方向成分が大きくなり，流速に対して$\ddot{Y}$の最小値に一定の傾向が現われないと考えられる。以上のように，$\ddot{Y}$の変化におよぼす流速の影響は一様流れ中での場合と異なるけれども，$\ell=30\,(mm)$の場合，底面近くの領域においても線状体が鉛直方向に回転する現象は生じないので，$\ddot{Y}$の変化の様子は一様流れ中での場合と同じになり，$\ddot{Y}$は最小になった後増大して姿勢が水平方向に近づくと0に近づく。また，$\ddot{Y}$が増大し始めた後，線状体が流速の変化が小さい領域で運動するようになると，流速の影響は除々に見られなくなり$U=20\sim80\,(mm/s)$の曲線は漸近し，流速による差はわずかとなる。やがて，線状体は流速の変化が大きい底面近くの領域に入るが，姿勢が水平に近いため流速の影響をほとんど受けない。

表6.9に$\ddot{Y}$の最小値およびそのときのθの値を示す。一様流れ中での結果（表6.5）と比較して，$\ddot{Y}$の最小値の絶対値は小さく，そのときのθの値は大きい。これは，流速分布の影響を受けて一様流れ中での場合に比べて姿勢が大きく変化することが主な原因であると考えられる。

表6.9 鉛直方向加速度の最小値とそのときの姿勢

初期角度 α (°)	線状体長さ ℓ (mm)	流速 U (mm/s)	鉛直方向加速度の最小値 $\ddot{Y}_{min}$ (mm/s²)	θ (°)
1	15	60	-338.1	29.76
	30	20	-177.4	11.30
		40	-156.7	15.68
		60	-157.1	19.32
		80	-165.5	22.40
	45	60	-107.9	16.74
	60	60	-92.8	15.81
10	45	60	-94.1	24.88
20			-83.5	33.61

d=0.569(mm)，No.1試料

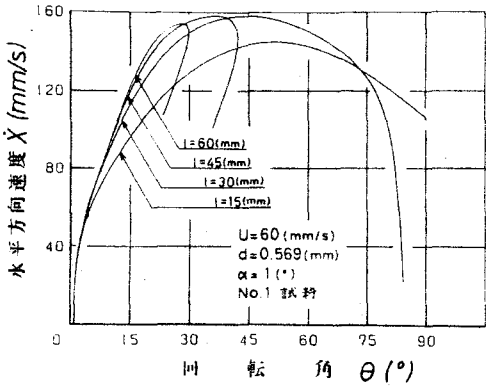


図6.37 水平方向速度におよぼす長さの影響

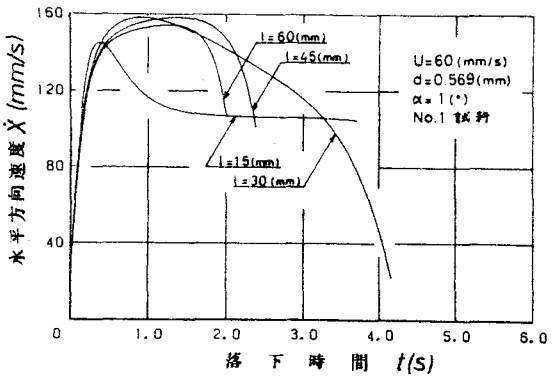


図6.38 水平方向速度におよぼす長さの影響

前項で述べたように，ℓ=45，60(mm)の場合，流速の変化が大きい底面近くの領域で線状体が鉛直方向に回転する現象が見られ，ℓ=15，30(mm)の場合，この現象は生じなかった。そこで，長さが異なると重心の速度の変化にどのような差が現われるかを調べる。

長さにより姿勢の変化状態は大きく異なり，長さが小さいほど線状体が回転するのに要する時間は短い。したがって，姿勢が同じでも線状体回りの流速は長さにより大きく異なる。このため，図6.37において，姿勢の変化に対する$\dot{X}$の変化には長さにより大きな差が現われている。ℓ=15(mm)の場合，姿勢がほとんど水平(θ=89°)になるまでに鉛直方向に移動する距離は約127(mm)(Y=157(mm))であり，流速の変化が小さい領域ですでに水平な姿勢になっている。したがって，水平な姿勢を保ったまま，底面近くの領域に入るので，$\dot{X}$はθ=90°の線に沿って0に近づく。また，ℓ=15(mm)の場合，水平方向に加速されている領域は管路上面近くのY≦79(mm)程度の領域であるため，ℓ=30～60(mm)の線状体が加速される領域での流速に比べて小さい。このため，加速領域での$\dot{X}$の値はℓ=30～60(mm)の$\dot{X}$の値に比べていっそう小さくなる。

これに対し，$\ell=45,60(mm)$の場合，角速度が小さくより鉛直に近い姿勢で線状体が底面近くの領域に入るため，じゅうぶんに水平方向に加速されないうちに急激に減速され，しかも，姿勢が鉛直方向に回転するので，図に示すような曲線になる。しかし，加速領域では一様流れ中での場合と同様に，$\dot{X}$は長さが大きいほど大きくなり，さらに，一様流れ中での結果（図6.18）と比較して，長さによる$\dot{X}$の差は十分に発達した流れ中での場合の方が大きいことが分かる。なお，$\dot{X}$におよぼす長さの影響を考察する場合，管路の高さを考慮する必要があり，今より高さを大きくして計算をおこなうと，$\ell=45,60(mm)$の場合でもじゅうぶんに水平方向に加速され，また，$\ell=15(mm)$の場合，今より流速の小さい領域で加速されることになるため$\dot{X}$はさらに小さくなり，長さの影響はより顕著に現われると考えられる。

つぎに，落下時間に伴なって$\dot{X}$が変化する様子を表わす図6.38において，運動開始と同時に線状体は急激に水平方向に加速され，この急激な加速領域では，同一落下時間における$\dot{X}$の値は長さが小さいほど大きくなる傾向が見られる。また，長さにより姿勢の変化状態は大きく異なるので，流速の変化が小さい管路中央部での$\dot{X}$の変化に長さによる違いが顕著に現われている。$\ell=15(mm)$の場合，管路中央部ではすでに姿勢はほとんど水平になっているため，$\dot{X}$はほとんど変化しない。また，$\ell=30(mm)$の場合，この領域では加速と減速の現象が生じており，静止流体中での場合にも見られた減速し始めてから$\dot{X}$がほとんど変化しない状態が見られる。これに対し，$\ell=45,60(mm)$の場合，管路中央部では線状体はまだ加速されているが，流速の変化が小さいため$\dot{X}$の増大は急激に低下している。このような長さによる$\dot{X}$の変化の違いは一様流れ中での場合現われなかったが，一様流れ中での場合と同様に線状体が水平方向に加速される時間は，長さが大きいほど長い。ただし，$\ell=45,60$

(mm)の場合，じゅうぶんに加速されないうちに底面近くの領域に入るため，$\ell=45$(mm)の方が加速時間が長くなっているが，$\ell=60$(mm)の場合でもじゅうぶんに加速されるように管路の高さを大きくして計算すると，$\ell=60$(mm)の方が加速時間は長くなる。

いっぽう，図6.39において，一様流れ中での場合と同様に，$\dot{Y}$は$\theta<60°$程度の領域では長さが大きいほど大きいが，これ以上の領域では長さの影響を受けない。また，表6.8から，長さが小さいほど姿勢がより水平に近い状態になるまで鉛直方向に加速されることが分かる。この傾向は一様流れ中での場合と一致するが，十分に発達した流れ中での場合，長さが大きいほど流速分布の影響を大きく受け，軸方向に沿っての流速の変化が大きいため，運動開始直後の領域での角速度を一様流れ中での場合と比較すると，長さが大きいほど十分に発達した流れ中での場合の方が大きくなることが分かる。したがって，表6.4と表6.8を比較すると分かるように，長さによる$\dot{Y}$の最大値およびそのときのθの値の差は，たとえば$\ell=15$(mm)と$\ell=60$(mm)の差は一様流れ中での場合，130.7(mm/s)，7.3°，十分に発達した流れ中での場合，40.0(mm/s)，2.5°のように，十分に発達した流れ中での場合の方が小さい。しかし，図6.19と図6.39を比較すると，$\dot{Y}$は運動開始後しばらくの間，十分に発達した流れ中での場合の方が小さいが，やがてθの増加に伴ない流れ状態の影響は見られなくなり，θと$\dot{Y}$の関係は一様流れ中での曲線と一致する。このときのθの値は，長さが小さいほどθの広い領域で流速分布の影響を受

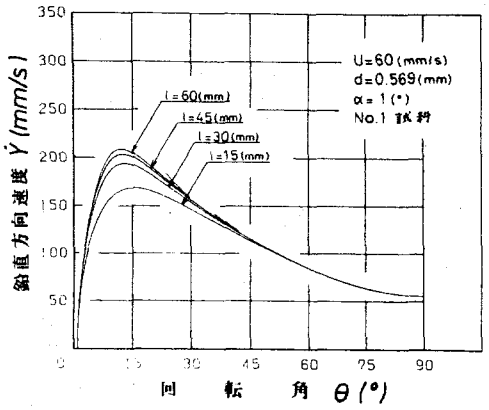


図6.39 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

けるため，大きくなる。

また，ℓ=45，60（mm）のように底面近くの領域で線状体が鉛直方向に回転する場合，この領域における流速は管路中央部の同一姿勢の位置における流速より小さく，線状体の軸に直角な方向の速度u（>0）および軸方向速度v（<0）の絶対値はともに底面近くの領域での方が小さいが，uの方が大きく減少するため，重心の速度を表わす(6.17)式から同一姿勢での$\dot{Y}$（<0）の絶対値はこの領域での方が大きくなる。したがって，図6.39に示すように線状体が鉛直方向に回転し始めてからの$\dot{Y}$の変化は，それまでの曲線の上方に位置する。

この領域での$\dot{Y}$の変化におよぼす長さの影響は，tと$\dot{Y}$の関係を表わす図6.40を見れば明瞭に分かる。長さが大きいほど流速分布の影響を大きく受けるため，$\dot{Y}$は急激に変化する。また，線状体が鉛直方向に加速される時間は，長さが大きいほど長くなる傾向にあるが差はわずかであり，加速状態もほとんど長さの影響を受けない。

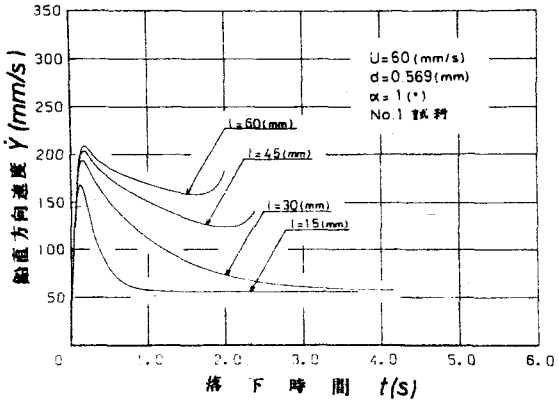


図6.40 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

つぎに，重心の加速度の変化を表わす図6.41，6.42において，姿勢の変化状態および姿勢が同じでも線状体回りの流速は長さにより大きく異なるため，姿勢の変化に対する$\ddot{X}$および$\ddot{Y}$の変化には大きな差が現われている。ℓ=15（mm）の場合，管路中央部ですでに水平な姿勢になるので，θ=90°でいったん$\ddot{X}$=0となり，水平な姿勢を保ったまま底面近くの領域に入るので，$\ddot{X}$はθ=90°の線に沿って減少する。また，$\ddot{Y}$も最小にな

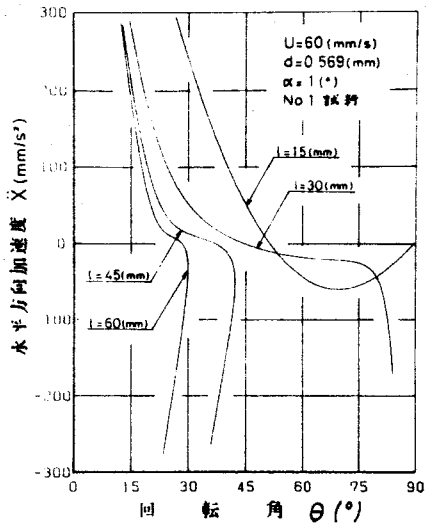


図6.41 水平方向加速度におよぼす長さの影響

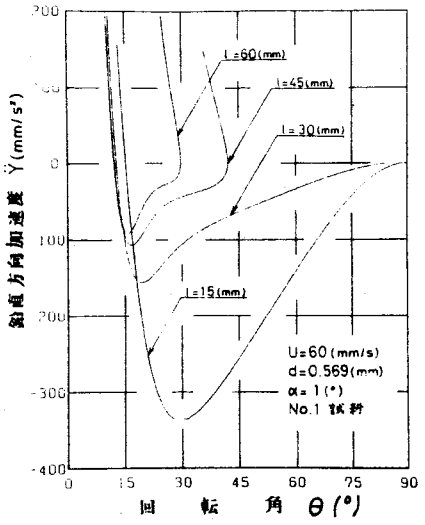


図6.42 鉛直方向加速度におよぼす長さの影響

た後増大して姿勢が水平方向に近づくにつれて0に近づき，$\theta = 90°$で0になる。

これに対し，$\ell = 45, 60$ (mm)の場合，$\ddot{X}$は急激に減少した後，姿勢は水平方向に回転し，しかも，流速の変化が小さい領域に入るので，$\ddot{X}$の減少割合はいったん低下するが，間もなく流速の変化が大きい底面近くの領域で運動し始めるため，$\ddot{X}$はふたたび急激に減少する。しかも，線状体は鉛直方向に回転するので，θと$\ddot{X}$の関係は図に示すような曲線で表わされる。また，$\ddot{Y}$は最小になった後増大し，線状体が管路中央部に入るようになると$\ddot{Y}$の増大割合も低下するが，間もなく底面近くの領域で運動し始めるため，$\ddot{Y}$は急激に増大する。しかし，表6.9から一様流れ中での場合と同様に，長さが小さいほど$\ddot{Y}$の最小値の絶対値およびそのときのθの値は大きくなる。

最後に，初期角度が重心の速度におよぼす影響を調べる。

一様流れ中での場合，初期角度を変化させておこなった計算はないが，前節の結果および静止流体中での初期角度の影響を調べた結果（2.5節参照）から，一様流れ中での場合，姿勢の変

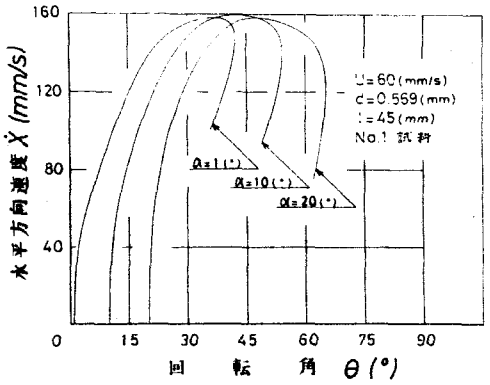


図6.43 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

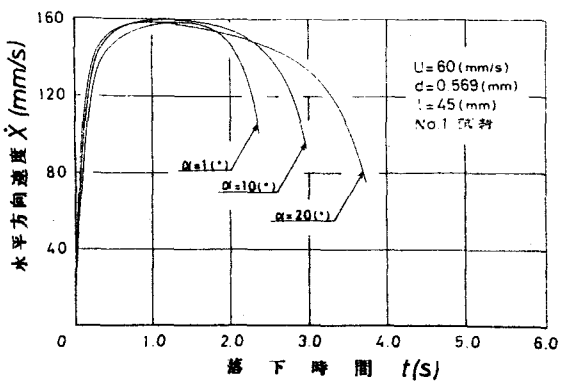


図6.44 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

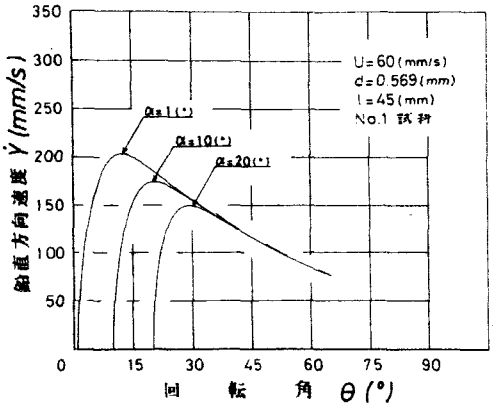


図6.45 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

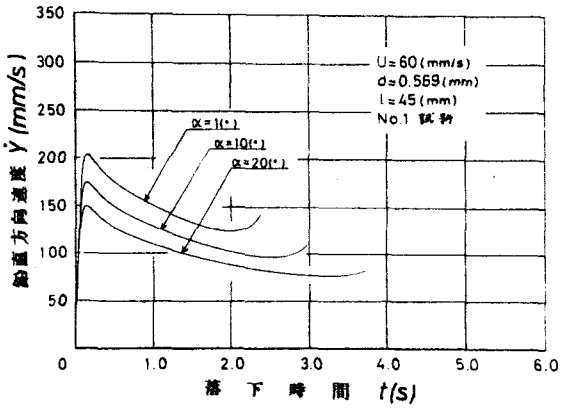


図6.46 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

化に対する速度の変化は，運動開始直後の急激な加速領域を除き，初期角度にかかわらず同一曲線で表わされると考えられる。

ところが，十分に発達した流れ中での場合，図6.45から，流れの方向が水平方向であるので，運動開始後しばらくすると，姿勢の変化に対する $\dot{Y}$ の変化は，初期角度にかかわらず同一曲線で表わされるが，初期角度が異なると姿勢が同じになるときの線状体の位置が異なるため，流速に差が生ずる。このため，図6.43において，姿勢の変化に対する $\dot{X}$ の変化は初期角度の影

響を受け，$\dot{Y}$の場合と異なり，運動開始後の領域と$\dot{X}$が急激に減少する領域を除いた領域でも$\dot{X}$の変化は初期角度にかかわらず同一曲線で表わされることはない。線状体が水平方向に加速されている間に鉛直方向に移動する距離は，$\alpha=1°, 10°, 20°$の場合，約221，169，121(mm)（管内での位置は，$Y=251, 199, 151$(mm)である。）であり，3者ともに流速の変化が小さい管路中央部で$\dot{X}$は最大になるが，$\alpha=10°$の場合，管路のほぼ中心で最大になるため，$\dot{X}$は他の場合と比べてわずかに大きい。なお，$\alpha=1°$と$20°$の場合，管路の中心に対しほぼ対象な位置で$\dot{X}$は最大になり，両者の最大値はほぼ一致する。

また，落下時間に伴なって変化する$\dot{X}$の状態を表わす図6.44において，運動開始直後の急激な加速領域では，同一落下時間における$\dot{X}$の値は，初期角度が大きいほど大きくなる傾向が見られる。また，水平方向に加速される時間は，初期角度が小さいほど長くなり，$\alpha=1°$の場合，管路中央部のほとんどの領域で線状体は加速されているため，つぎのような現象は見られないが，$\alpha=10°, 20°$の場合，線状体が水平方向に減速し始めてから$\ddot{X}$がわずかしか変化しない現象が生じており，$\alpha=20°$の方が$\dot{X}$が最大になるときの位置が管路の上方であるので，この現象は長時間にわたってより顕著に見られる。やがて，線状体が底面近くの領域に入ると，そのときの姿勢は初期角度が小さいほど鉛直に近く，しかも$\dot{X}$は大きいため，線状体は急激に減速される。

いっぽう，図6.46において，線状体が鉛直方向に加速される時間は，初期角度が小さいほど長くなる傾向にあるが，差はわずかである。また，初期角度が小さいほど，線状体が底面近くの領域に入るときの姿勢が鉛直に近く，流速分布の影響を受けて姿勢が大きく変化するため，この領域での急激な加速は大きくなる。

なお，初期角度が$\dot{X}$の変化におよぼす影響を考察する場合，

管路の高さを考慮する必要があり，今より高さを大きくして計算すると，θと$\dot{x}$の関係がほぼ同一曲線で表わされる領域が存在する可能性がある。

6.5.3 線状体の姿勢および角速度

線状体が運動を開始する管路上面近くの領域では，上面から離れるに従い流速は急激に増大する。このため，線状体の軸方向に沿って流速が分布し，しかも，先端部に近いほど大きいので，運動開始時に線状体に作用する回転モーメントMは姿勢を水平方向に回転させる向きに働き，さらに，軸方向に沿っての流速の差は流速が大きいほど大きいので，Mの値は大きくなる。（図6.50参照）また，(6.15)式で表わされる軸方向に沿って分布する流速の軸に直角な方向成分の平均値U_1 (>0) および重心回りの一次モーメントの時間的変化率dU_2/dt (>0)，両端面での流速の軸方向成分の平均値V (<0) の絶対値は増大するが，線状体の軸に直角な方向の速度u (>0) および軸方向速度v (<0) も運動開始と同時に急激に増大するため，線状体の相対速度$u-U_1$ (<0) の絶対値はいったん減少し始める。しかし，$v-V$ (<0) の絶対値が急激に増大するので，両者の積$(u-U_1)\cdot(v-V)$は運動開始と同時に増大する。さらに，$(u-U_1)\cdot(v-V)$およびdU_2/dtは流速が大きいほど大きくなる。したがって，運動方程式(6.16)式の第3式を考慮すると，流速が大きいほど運動開始直後の角速度γは大きく，姿勢は急激に変化することが分かる。

姿勢の変化におよぼす流速の影響を表わす図6.47, 6.48において，γは$\theta=8°$程度まで加速されるが，γの増大に伴ない線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントMが増大し，また，$(u-U_1)\cdot(v-V)$はしばらくの間（$U=80$(mm/s)の場合，$t\fallingdotseq 0.35$(s)）増大するが，dU_2/dtは減少するため，これ以上の領域では急激に減速される。そして，γが減少するので

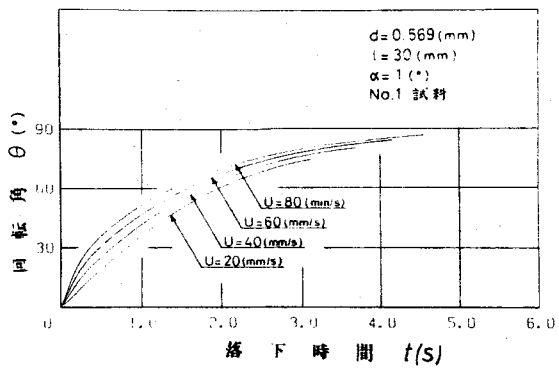


図6.47 姿勢におよぼす流速の影響

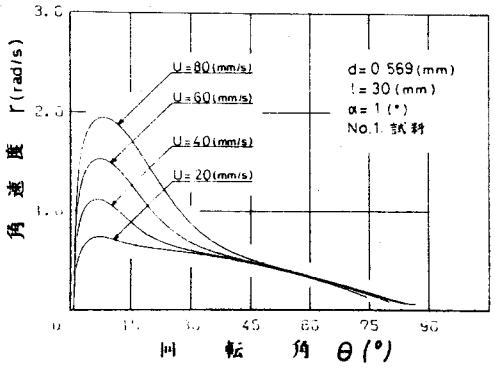


図6.48 角速度におよぼす流速の影響

線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントNも減少し，やがて流速の変化が小さい管路中央部に線状体が入るようになると，N，$(U-U_1)\cdot(v-V)$ および $\alpha U_2/\alpha t$ の変化は除々に低下する。$\ell=30(mm)$ の場合，流速の変化が大きい底面近くの領域での姿勢は水平に近いので，流速分布の影響を受けて鉛直方向に回転する現象は生じない。また，姿勢が水平方向に近づくと，回転モーメントN，相対速度の軸方向成分 $v-V$ および $\alpha U_2/\alpha t$ が0に近づくので，γは減少し姿勢は水平方向に漸近する。

角速度が急激に加速あるいは減速されている領域では，姿勢が同じ場合，流速が大きいほどγの値は大きいが，θの増加に伴なってγが減少し，しかも，線状体が流速の変化が小さい管路中央部で運動するようになると，流速の影響は除々に見られなくなり，$U=20\sim80(mm/S)$ の曲線は漸近し，流速による差はわづかとなる。しかし，流速が異なると姿勢が同じになるときの位置が異なるので，軸方向に沿っての流速の分布状態に差が生じ，曲線が一致することはない。やがて，線状体が底面近くの領域に入ると，流速分布の影響を受けてふたたび曲線が離れていく状態が見られる。なお，この領域に入るときの姿勢は，流速が小さいほど鉛直に近いため，流速が小さい順番にθ

の値の小さい領域で他の曲線から離れていく。しかし，$\ell = 30$ (mm) の場合，姿勢は水平に近いので，この領域での流速の影響はわずかである。

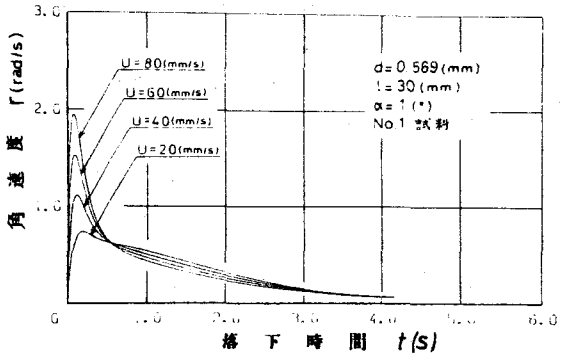


図6.49 角速度におよぼす流速の影響

つぎに，角速度 γ および回転モーメント N が落下時間に伴なって変化する様子を表わす図6.49，6.50において，運動開始と同時に γ は急激に加速され，N は急激に減少して負の値（線状体の回転を押える向きに作用する。）になる。$\ell = 30$ (mm)，$U = 20 \sim 80$ (mm/s) の場合，γ が加速される時間は0.2(s)以内であり，流速が大きいほど加速時間は短い。また，γ が減速されている領域で N は最小となり，流速が大きいほどそのときの γ の値が大きいため，その絶対値は大きくなる。その後，γ が急激に減速されて，線状体が管路中央部で運動するようになると，上述したように，$U = 20 \sim 80$ (mm/s) の θ と γ の関係を表わす曲線は漸近し，流速による差はわずかとなるが，同一落下時間における θ の値は流速が小さいほど小さく，また，θ の増加に伴ない γ は減少するので，この領域では同一落下時間における γ の値は，流速が小さいほど大きくなり，これに伴ない N の絶対値も大きくなる。そして，姿勢が水平方向に近づくにつれて γ，N はともに0に近づく。

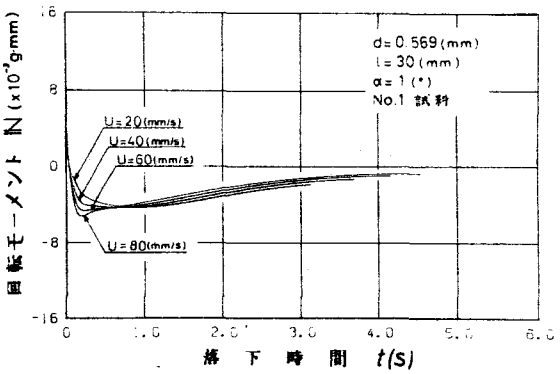


図6.50 回転モーメントにおよぼす流速の影響

ここで，一様流れ中での結果と比較する。表6.6と表6.10から，十分に発達した流れ中での場合，管路上面近くの領域で流速分布の影響を大きく受けるため，Yの最大値は一様流れ中での場合より大きく，また，両場合ともに，Yは流速が大きいほど姿勢がより水平に近い状態になるまで加速される傾向にあるが，流速による差はわずかである。しかし，一様流れ中での場合の方がより水平に近い姿勢になるまで加速され，しかも加速時間が長い。また，姿勢の変化に対する角速度の変化，図6.25と図6.48，を比較すると，十分に発達した流れ中での場合，線状体が管路中心付近の流速の変化が非常に小さい領域で運動しているときの角速度の変化は，一様流れ中での場合とほぼ一致することが分かる。この領域は，たとえば$U=80$ (mm/s) の場合，$55°<\theta<65°$ ($180<Y<220$ (mm)) 程度であり，この他の領域では流速分布の影響を受けるため，これより小さい領域では，十分に発達した流れ中での場合の方がYの値は大きく，これより大きい領域では逆に小さくなる。

表6.10 角速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

初期角度 α(°)	線状体長さ l (mm)	流速 U(mm/s)	角速度の最大値 r (rad/s)	θ(°)	t(s)
1	15	60	2.9408	19.9	0.15
	30	20	0.7369	7.2	0.19
		40	1.1131	7.2	0.12
		60	1.5264	7.2	0.09
		80	1.9479	8.3	0.08
	45	60	1.3596	6.0	0.08
	60	60	1.3234	5.8	0.08
10	45	60	1.3323	14.1	0.07
20			1.2213	23.8	0.07

d = 0.569 (mm), No.1 試料

これまでは$\ell=30$ (mm) と比較的長さが小さく，管路底面近くの領域に線状体が入るときの姿勢は水平に近いため，この領域で流速分布が姿勢の変化におよぼす影響はわずかに見られる程度であった。ところが，この領域での流速分布の影響は，長さが姿勢の変化におよぼす影響を表わす図6.51，6.52の$\ell=45$，60 (mm) の場合，顕著に現われている。

角速度は運動開始と同時に急激に加速されるが，Yの増加に伴い，線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントが増大することが主な原因となって，$\theta>6°$程度の領域では急

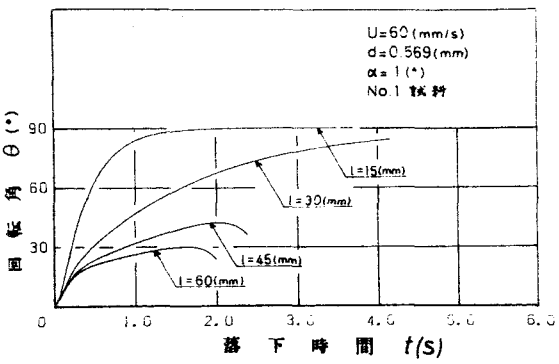


図6.51 姿勢におよぼす長さの影響

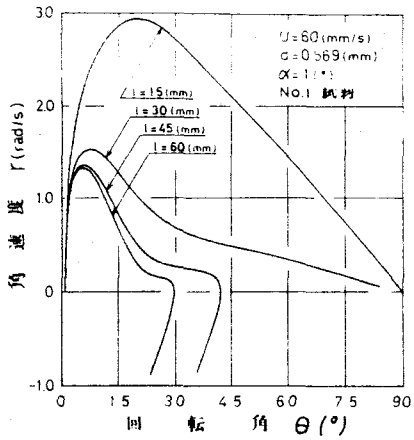


図6.52 角速度におよぼす長さの影響

激に減速される。やがて，流速の変化が小さい管路中央部に線状体が入るようになると，N，$(u-U_1)\cdot(v-V)$ および dU_2/dt の変化は除々に低下し，角加速度 dr/dt (<0) の絶対値が小さくなるので r はゆっくり減少する。そして，線状体の先端部が流速の変化が大きい管路底面近くの領域に入り始めると，姿勢がまだ鉛直に近いため，軸方向に沿って流速が大きく変化し，しかも先端部に近いほど小さいので，姿勢を鉛直方向に回転させる向きに作用する回転モーメント N は急激に増大し，また，$(u-U_1)\cdot(v-V)$ は除々に減少し続けているが，dU_2/dt は急激に増大する。しかし，N の値の方が大きいため，r は急激に減少して，$\ell=60$ (mm) の場合，$\theta=30°$ 程度，$\ell=45$ (mm) の場合，$\theta=42°$ 程度で負の値となり，線状体は鉛直方向に回転する。なお，$\ell=60$ (mm) の方が，長さが大きくしかも姿勢が鉛直に近いため，流速分布の影響を大きく受け，鉛直方向に急激に回転する。

これに対し，$\ell=15$ (mm) の場合，角速度が大きく管路中央部ですでに姿勢はほとんど水平になっているので，底面近くの領域でも，このもっとも安定した水平な姿勢を保って運動を続けると考えられる。

このような，長さが異なることによる角速度の変化の違いは，

γが落下時間に伴なって変化する様子を表わす図6.53を見るといっそう明確に分かる。ℓ=45, 60(mm)の場合，運動開始と同時にγは急激に加速され，そして急激に減速された後，角加速度$d\gamma/dt$の絶対値は小さくなり，γが除々に減少する状態がしばらく続くが，線状体が底面近くの領域で運動するようになるとγは急激に減少して，ℓ=60(mm)の場合，約1.6(s)，ℓ=45(mm)の場合，約2.0(s)で負の値になり，線状体は鉛直方向に回転し始める。これに対し，ℓ=15(mm)の場合，γは急激に減速された後，姿勢が水平方向に近づくにつれて$d\gamma/dt$は小さくなり，γは0に漸近する。

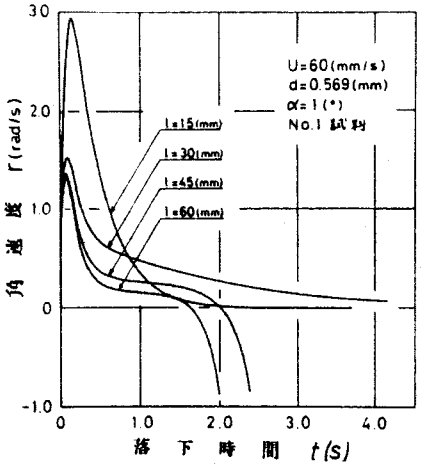


図6.53 角速度におよぼす長さの影響

また，表6.10から，長さが小さいほど，角速度はより水平に近い姿勢になるまで加速され，また，加速時間も長くなる。一様流れ中での場合（表6.6）にも，長さが小さいほどより水平に近い姿勢になるまで加速される傾向にあったが，加速時間は長さが大きいほど長くなるという結果が得られている。さらに，γの最大値を比較すると，ℓ=15, 30, 45, 60(mm)に対し十分に発達した流れ中での場合の方が，約0.63, 0.92, 1.09, 1.17(rad/s)大きいことが分かる。これは，運動開始直後の領域で長さが大きいほど，軸方向に沿って分布する流速の差が大きく，流速分布の影響を大きく受けるためである。なお，一様流れ中での場合と同様に，十分に発達した流れ中での場合にも長さが小さいほど線状体が回転するのに要する時間は短い。

以上のように，十分に発達した流れ中での場合，長さが大きいほど流速分布の影響を大きく受けて，姿勢の変化状態は一様流れ中での場合と大きく異なる。また，姿勢の変化におよぼす

長さの影響を考察する場合，管路の高さを考慮する必要があり，今より高さを大きくして計算をおこなう場合，$\ell=45$，60(mm)の場合でも底面近くの領域で線状体が鉛直方向に回転しない状態が生ずる可能性がある。

最後に，初期角度が姿勢の変化におよぼす影響を調べる。

一様流れ中での場合，初期角度を変化させておこなった計算はないが，前節の結果および静止流体中での初期角度の影響を調べた結果（2.5節参照）から，一様流れ中での場合，姿勢の変化に対する角速度の変化は，運動開始直後の急激な加速領域を除き，初期角度にかかわらず同一曲線で表わされると考えられる。したがって，tとθの関係を表わす曲線を落下時間軸に沿って平行移動すると，急激な加速領域を除き初期角度にかかわらず重なる。

ところが，十分に発達した流れ中での場合，初期角度が異なると姿勢が同じになるときの線状体の位置が異なるため，軸方向に沿って分布する流速の状態に差が生ずる。このため，図6.55において，姿勢の変化に対する角速度の変化の様子は，数値的には異なるが初期角度にかかわらず同じになり，θのどの領域においてもθとγの関係は同一曲線で表わされることはない。すなわち，初期角度にかかわらず，管路上面近くの領域で

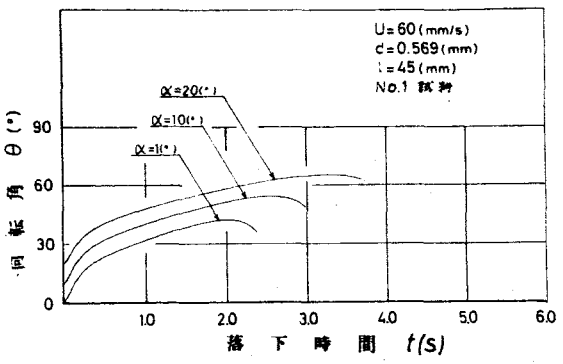


図6.54 姿勢におよぼす初期角度の影響

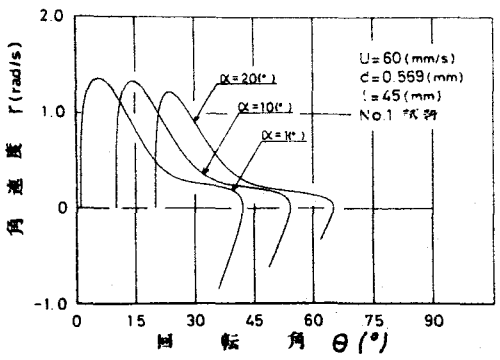


図6.55 角速度におよぼす初期角度の影響

γは急激に加速および減速され，中央部では除々に減少し，そして底面近くの領域でふたたび急激に減速されて負の値になる。したがって，図6.54において，曲線を落下時間軸に沿って平行移動しても，重なることはない。

また，落下時間に伴なって変化する角速度の様子を表わす図6.56において，初期角度が大きいほど，軸方向に沿って分布する流速の差は小さいので，運動開始直後の領域で姿勢を水平方向に回転させる向きに働く回転モーメントNは小さくなる。このため，γの最大値は初期角度が大きいほど小さい。なお，表6.10から，γが加速される時間は初期角度の影響をほとんど受けないが，加速されている間に線状体が回転する角度は，初期角度が小さいほど大きい。その後，γは急激に減速され，線状体が流速の変化が小さい管路中央部に入るようになると角加速度 $d\gamma/dt$ の絶対値は小さくなり，γはゆっくり減少し始める。そして，この領域では初期角度によるγの差はわずかとなる。また，γが除々に減少し始める時間は初期角度にかかわらずほぼ同じになるので，初期角度がγの変化におよぼす影響を考慮すると，初期角度が大きいほど，この位置は管路中央部の上方であることが分かり，流速の変化が小さい領域で長時間運動する。したがって，γが除々に減少する時間は初期角度が大きいほど長くなる。やがて，底面近くの領域に入ると，このときの姿勢は初期角度が小さいほど鉛直に近いため，流速分布の影響を大きく受けγは急激に減少して負の値になり，線状体は鉛直方向に回転し始める。なお，鉛直方向に回転し始めるときの姿勢および時間は，

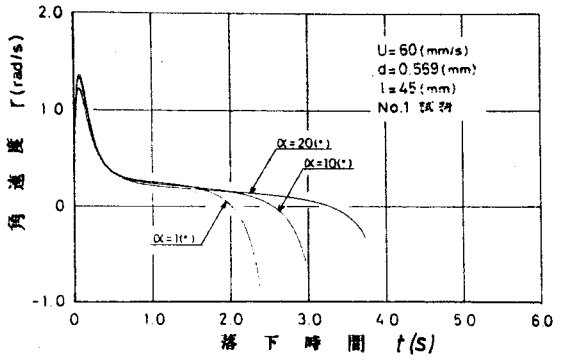


図6.56 角速度におよぼす初期角度の影響

$\alpha = 1°, 10°, 20°$ の場合，$\theta = 42°, 54°, 62°$，$t = 2.0, 2.55, 3.3$ (s) 程度である。

このように，姿勢の変化は初期角度の影響を受けるが，この影響を考察する場合，管路の高さを考慮する必要がある。今より高さを大きくして計算をおこなう場合，流速の変化が小さい領域で運動する時間が長くなるので，θ と t の関係を表わす曲線が初期角度にかかわらず同一曲線で表わされる領域が存在する可能性がある。

以上の結果をまとめると，線状体が十分に発達した流れ中で運動する場合，流速が大きく変化する壁面近くの領域における運動特性が一様流れ中での場合とはまったく異なるものになる。なお，流れ方向が水平方向であるため，運動特性の中でもとくに水平方向速度および姿勢の変化に大きな差が見られる。また，諸要因が運動特性におよぼす影響は，一様流れ中での場合と比べて顕著に現われるが，要因の影響を考察する場合，矩形管路の高さを考慮する必要がある。

6.6 矩形管内での助走域における線状体の運動

この節では，管内平均流速$U=60$(mm/s)，長さ$\ell=30,60$(mm)および$\ell=30$(mm)，$U=20,40,60,80$(mm/s)に対する計算結果について説明し，6.4節，6.5節の一様流れ中および十分に発達した流れ中での結果と比較して，流速が鉛直，水平両方向に沿って変化する流れ中で線状体が運動する場合，その運動特性がどのようになるかを明らかにする。なお，運動特性を調べるとき，第4章で述べた実験結果もあわせて実験と計算の両面から考察する。

6.6.1 線状体の落下軌跡

図6.57に$\ell=30$(mm)，$U=20\sim80$(mm/s)の落下軌跡を示す。図中の線状体の時間間隔は$\Delta t=0.2$(s)であり，軸方向に沿って流速が変化するので，線状体長さはX，Y座標のスケールに従って縮小した寸法で表わしてある。なお，鉛直方向の座標は管路の上面を原点にとっているため，初期位置は$Y=30$(mm)である。

他の流れ中での場合と同様に，線状体は運動開始すると同時に水平方向にも流体から抗力を受けるため，水平方向にも急激に加速され，鉛直方向に対してある角度をもって運動し始める。流速が大きいほど，水平方向の加速は大きく，鉛直方向の加速は小さいので，この角度は大きくなる。

助走域では，管内平均流速により流れが発達する速度が異なり，流速が小さい

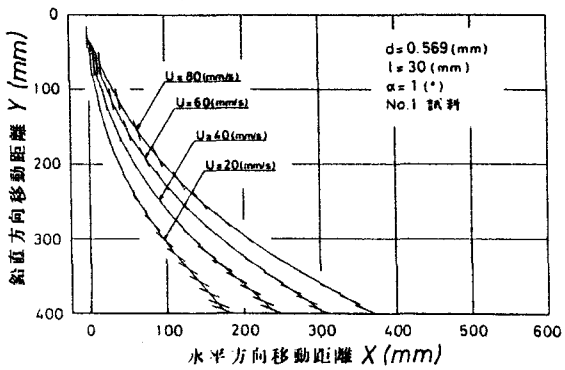


図6.57 落下軌跡におよぼす流速の影響

ほど発達が早いので，初期位置（$Y=30(mm)$）での流速は，$U=20\sim80(mm/S)$に対し$u^*(=u/U)=1.22\sim1.14$程度である。また，壁面近くの領域では流速が大きく分布しているので，軸方向に沿って流速が変化し，しかも先端部ほど大きいため，運動開始時に回転モーメントNは姿勢を水平方向に回転させる向きに作用する。（図6.74参照）しかし，壁面近くの領域での流速の変化は十分に発達した流れに比べて小さいので，運動開始時のNの値は助走域での場合の方が小さく，姿勢の変化は一様流れ中での場合よりわずかに大きいが，十分に発達した流れ中での場合よりはるかに小さい。このため，加速度の方向と運動方向およびそれらの向きが一致して軌跡の接線勾配dY/dXが極大になる点におけるdY/dXの値およびそのときの姿勢とそれまでに鉛直方向に移動した距離は，一様流れ中での値と十分に発達した流れ中での値の中間の前者に近い値になる。その後も，加速度の方向は反時計回りに回転し続け，dY/dXは減少する。そして，$\ddot{Y}$に引続いて$\ddot{X}$も負の値となり，ふたたび加速度の方向と運動方向が一致する。この点では，両者の向きは逆になるのでdY/dXは最小になる。その後も，加速度の方向は回転し続け，線状体の姿勢は除々に水平方向に近づく。

十分に発達した流れ中での場合，線状体が水平方向に回転しながら管路底面近くの領域に入ると，流速は底面に近いほど小さいため，水平方向には急激に減速されたが，この領域に入るときの姿勢は水平に近かったため，$\ddot{Y}$は流速分布の影響をほとんど受けず，水平な姿勢に近づくにつれて0に近づいた。ところが，助走域での場合，十分に発達した流れ中での場合に比べて，流速の場所的変化が小さいので，姿勢の変化が小さく，流速の変化が大きい底面近くの領域に入るときの姿勢はより鉛直に近い。たとえば，$U=80(mm/S)$の場合，$\ddot{X}$が急激に減少し始めるときの姿勢および位置は，十分に発達した流れ中での場合，$\theta=79°$，$Y=300(mm)$，助走域での場合，$\theta=65°$，$Y=365$

(mm)程度である。このため，十分に発達した流れ中でのℓ=45，60(mm)の場合見られたような，$\dot{Y}$が急激に増大する現象が助走域での場合，ℓ=30(mm)でも見られる。したがって，線状体の運動方向は急激に鉛直方向に近づく。さらに，$U \geq 40$(mm/s)の場合，線状体は鉛直方向に回転し始める。U=20(mm/s)の場合，鉛直方向に回転する現象が生じないのは，底面近くの領域に入るときの姿勢は流速が小さいほどわずかに鉛直に近いが，軸方向に沿って分布する流速の差が小さいからである。

ここで，助走域と十分に発達した流れ中での場合の底面近くの流速が大きく変化する領域における運動状態を比較する。

図6.28，6.57において，流速が大きく変化する領域は十分に発達した流れ中の方が広く，しかもその変化が大きいため，運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象が顕著に現われ，また，この現象は管路のより上方から始まる。さらに，十分に発達した流れ中での場合，流速が大きいほど，この現象が顕著に現われ，この現象が生ずる以前の領域での運動方向がより水平であったにもかかわらず，底面に到達するときの運動方向は鉛直に近くなる。これに対し，助走域での場合，この領域での線状体回りの流れは，流速が小さいほど入口部（初期位置の上流700(mm)の位置）からの距離は短いが，発達する速度が早いので，流速が小さいほど大きく発達している。いっぽう，流速が大きいほど$\dot{X}$は大きいため，この現象は現われ易い。しかし，十分に発達した流れに比べて，この領域は狭く，しかも流速の変化が小さいので，流速による差は明確に現われず，底面に到達するときの運動方向も，これ以前の領域での場合と同様に流速が小さいほど鉛直に近い。

表6.11にdY/dXの最小値およびそのときの姿勢とそれまでに線状体が水平方向および鉛直方向に移動する距離X，Yを示す。

流れ方向が水平方向であるので，U=20～80(mm/s)の$\dot{Y}$の変化を比較すると，図6.61から$\theta < 10°$程度の領域で差が見

られるが，これ以上の領域では流速の影響は見られない。ところが，図6.59から，$\dot{X}$はθの全領域で流速が大きいほど大きくなる。したがって，流速が大きいほど，姿勢が同じであるときの運動方向はより水平に近くなる。また，上述したように，助走域での場合，

表6.11 軌跡の変曲点における接線勾配，姿勢とその位置

線状体長さ l (mm)	流速 U(mm/s)	接線勾配 dX/dY	接線勾配 θ(°)	水平方向移動距離 X (mm)	鉛直方向移動距離 Y (mm)
30	20	1.190	63.2	146.8	334.2
	40	0.871	65.5	208.8	339.9
	60	0.687	66.5	269.9	343.0
	80	0.567	67.1	326.6	345.4
60	60	2.082	14.7	124.0	329.5

d=0.569(mm)，No.1 試料

線状体が流速の変化が大きい底面近くの領域に入ると，流速分布の影響を受けて$\ddot{X}$が急激に減少するばかりでなく，$\ddot{Y}$も急激に増大して負の値から正の値（鉛直下向き）へ移る現象が生ずる。したがって，加速度の方向は急激に回転し，水平方向でとどまらない。さらに，十分に発達した流れ中での場合に比べて姿勢の変化が小さく，底面近くの領域に入るときの姿勢はより鉛直に近い。このため，十分に発達した流れ中での場合と異なり，この領域に入るまでに運動方向と加速度の方向が一致することはなく，線状体が底面近くの領域に入り，加速度の方向が急激に回転し始めた直後に両者が一致する。$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の変化を表わす図6.63，6.64から，底面近くの領域では$\ddot{X}$の絶対値は流速が大きいほど小さく，$\ddot{Y}$の絶対値はわずかに大きくなる傾向が見られ，同一姿勢に対する加速度の方向は流速が大きいほど鉛直に近いことが分かる。また，加速度の方向は反時計回りに回転する。以上のことから，他の流れ中での場合と同様に，運動方向と加速度の方向が一致するときのθの値は，流速が大きいほど大きくなり，この点でのdY/dXの値は小さくなる。

ここで，他の流れ中での結果（表6.3，6.7）と比較すると，dY/dXの値は一様流れ中での値と十分に発達した流れ中での値の中間の前者に近い値になり，そのときのθの値は助走

域での場合がもっとも小さく，また，流速によるθの値の差も他の流れ中での場合より小さいことが分かる。3種類の流れ中での$\dot{Y}$の変化（図6.17，6.33，6.61）を比較すると，流れ方向が水平方向であるため，θと$\dot{Y}$の関係はθの増加に伴ない漸近し同一曲線で表わされる。いっぽう，ここで用いた計算条件のもとでは，助走域での流れはあまり発達しておらず，もっとも発達している$U=20$(mm/s)の場合でも最大流速は$u^*=1.3$程度であり，$\dot{X}$の変化（図6.16，6.31，6.59）を比較すると分かるようにdY/dXが最小になる付近では，$\dot{X}$の値は一様流れ中での値と十分に発達した流れ中での値の中間の前者に近い値になる。また，助走域での場合，線状体が底面近くの領域に入って加速度の方向が急激に回転し始めた直後にdY/dXは最小になる。すなわち，線状体がじゅうぶんに回転しないうちに底面近くの領域に入り，流速分布の影響でdY/dXが最小になる。このため，dY/dXが最小になるときのθの値は，助走域での場合がもっとも小さくなると考えられる。また，図6.71から姿勢の変化におよぼす流速の影響はほとんど見られず，さらに，図6.61から$\dot{Y}$は$\theta<10°$程度でわずかに流速による差が見られるだけである。したがって，dY/dXが最小になるまでに線状体が鉛直方向に移動する距離は，一様流れ中での場合と同様に流速が大きいほど大きくなる。しかし，流速による差は非常に小さい。いっぽう，水平方向に移動する距離も流速が大きいほど大きい。

つぎに，図6.57において，線状体の姿勢と運動方向に着目すると，運動開始後しばらくの間運動方向と鉛直線のなす角度はθより大きく，また，この状態は流速が大きいほど長時間続き，他の流れ中での場合と同じ傾向を示す。なお，助走域での場合，運動方向は一様流れ中での場合と十分に発達した流れ中での場合の中間にあるので，運動方向が姿勢と一致するときのθの値は，$U=20,40,60,80$(mm/s)に対し，$\theta=16.6°,35.6°$

，49.0°，57.6°と両者の中間の一様流れ中での値に近くなる。また，3種類の流れ中での落下軌跡（図6.13，6.28，6.57）を比較すると，十分に発達した流れ中，助走域，一様流れ中の順番に下流側に位置する。

以上の結果から，助走域での流れは一様流れと十分に発達した流れの中間の状態であるので，助走域で線状体が運動する場合，落下軌跡は一様流れ中と十分に発達した流れ中での落下軌跡を合わせたような形になる。また，流速が落下軌跡におよぼす影響も両場合の中間的なものになる。なお，助走域での場合，$\ell=30$（mm）でも底面近くの領域で$\ddot{Y}$が急激に増大し線状体が鉛直方向に回転する現象が見られたが，これは管路高さと関連があり，今より高さを大きくして計算をおこなう場合，この領域に到達するときの姿勢がより水平に近くなるため，この現象は生じないと考えられる。

助走域での場合と十分に発達した流れ中での場合の底面近くの領域における落下軌跡の違いは，図6.58に示す$U=60$（mm/s），$\ell=60$（mm）の場合にも見られる。この図には一点鎖線で発達している流れの流速分布が示してあり，流速の変化に伴なって線状体の運動が変化する様子をいっそう分かり易くした。

すでに述べたように，$\ell=30$（mm）の場合，底面近くの領域では運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象と線状体が鉛直方向に回転する現象が見られた。これに対し，$\ell=60$（mm）の場合，運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象はわづかに生じているが，線状体が鉛直方向に回転する現象は見られない。図6.67から，線状体がこの

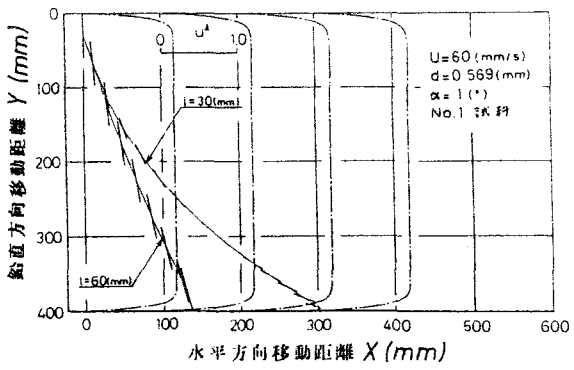


図6.58 落下軌跡におよぼす長さの影響

領域に入るときの$\dot{Y}$の値は，$\ell=60(mm)$の方が姿勢が鉛直に近いため，$\ell=60(mm)$の場合，約214(mm/s)，$\ell=30(mm)$の場合，約75(mm/s)と大きい。また，十分に発達した流れ中での場合（約163(mm/s)）と比べても大きいことが分かる。しかも，この領域に入るときの水平方向移動距離は$\ell=30(mm)$の場合より小さいので，流れの発達程度は小さく，この領域はいっそう狭く，流速の変化も小さい。したがって，$\ell=60(mm)$の場合，短時間のうちに底面に到達してしまい，図6.76を見れば分かるように角速度γは急激に減少し始めるが，負の値にはならない。また，運動方向が急激に鉛直方向に近づくことも，$\dot{X}$，$\dot{Y}$の変化を表わす図6.65および図6.67から，$\dot{X}$は急激に減少し，$\dot{Y}$が増大する傾向を示すことから推察できる程度であり，十分に発達した流れ中での場合のように明確には現われない。なお，$\ell=60(mm)$の場合，運動方向と鉛直線のなす角度がθより大きい状態が底面に到達するまで続く。さらに，表6.3，6.7，6.11の比較から，線状体がじゅうぶんに回転しないうちに底面近くの領域に入り，流速分布の影響で$\partial Y/\partial X$が最小になるため，そのときのθの値は助走域での場合がもっとも小さくなるばかりでなく，$\partial Y/\partial X$の最小値はもっとも大きくなり，$\ell=30(mm)$の場合と異なる傾向を示す。しかし，長さの影響を考察するとき，十分に発達した流れ中での場合と同様に，管路の高さを考慮する必要がある。

ここで，第4章の実験結果と比較する。

実験では，管内の流れを乱さないようにするため，落下装置を管路上面に隣接して取付けているので，線状体が落下装置から流れ中に入るとき，急激に流れの向きに回転する現象が生じ，すべて流れ中に入ったときの姿勢は，たとえば図4.25に示す$\ell=30(mm)$の場合約20°になる。したがって，計算の場合とは初期条件が異なることに注意する必要がある。このため図4.25と図6.58を比較すれば分かるように，鉛直方向に同じ

距離移動したときの姿勢は，実験結果の方が水平に近い状態になっており，また，そのときの水平方向移動距離も実験結果の方が大きくなる。しかし，同一鉛直方向移動距離に対するXの値は長さが小さい方が大きいことおよび同一姿勢に対するX，Yの値は長さが大きい方が大きいことなど，長さが落下軌跡におよぼす影響は実験結果と計算結果で一致する。

また，流速が落下軌跡におよぼす影響を表わす図4.43において，実験では，dY/dXが最小になるまでに鉛直方向に移動する距離は，流速が大きいほど小さいという結果が得られているが，計算では，流速による差は小さいけれども流速が大きいほどこの距離は大きくなった。これは，実験では，線状体が流れ中に入るとき流速が大きいほど急激に回転することが原因している。すなわち，計算の場合と初期条件が異なるからであり，線状体がすべて流れ中に入るように初期位置を設定し，しかも流れを乱さないようにして実験をおこなえば計算の場合と同じ結果が得られると考えられる。

図4.25，4.43では，底面近くの境界層内で，運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象および線状体が鉛直方向に回転する現象は見られない。この現象は，計算でも図6.57，6.58に示す程度しか現われておらず，実験で確かめることは非常に困難である。計算によると十分に発達した流れ中での場合の方がこの現象は顕著に現われており，したがって，実験的に確かめるには，もっと発達した流れ中で実験をおこなう必要がある。

6.6.2 線状体重心の速度および加速度

管路上面近くの領域では，上面から離れるに従い流速は急激に増大する。したがって，流速がXの変化におよぼす影響を表わす図6.59において，線状体は上面近くの領域で運動を開始するため水平方向に急激に加速される。図6.10（$U=60$(mm/s)の場合）に示した流速分布を見れば分かるように，上面から離

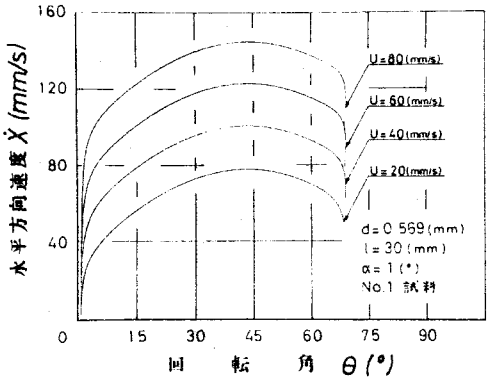


図6.59 水平方向速度におよぼす流速の影響

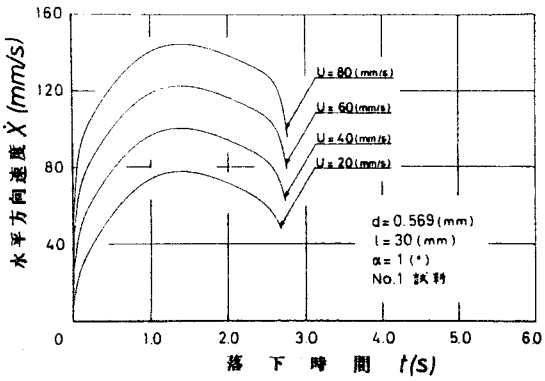


図6.60 水平方向速度におよぼす流速の影響

れるにつれて流速はほぼ一様になり，しかも，姿勢が水平方向に回転するため，水平方向への加速は除々に減少する。$\ell=30$ (mm) の場合，$\theta=43°$ 程度まで水平方向に加速され，$\dot{X}$ が最大になる位置は管路中央部の流速がほぼ一様な領域である。その後，減速されて，線状体が管路底面に近づくと，底面近くの境界層内では流速の変化が大きく，しかも底面に近いほど流速が小さいため，$\dot{X}$ は急激に減速される。なお，$U \geq 40$ (mm/s) の場合，この領域で線状体が鉛直方向に回転するので，姿勢の変化に対する $\dot{X}$ の変化は図に示すような曲線になる。

助走域では流れが発達しているので，線状体が運動をおこなう管路上面および底面近傍の流速の変化が大きい領域は，$U=60$ (mm/s) の場合，それぞれ約25，30 (mm) であり，$25<Y<370$ (mm) の領域では流速はほぼ一様である。したがって，ほぼ一様な流れの領域に線状体がすべて入るまでの時間は短く（約0.1 (s)），また，姿勢の変化は一様流れ中での場合とほとんど同じであるので，他の流れ中での結果（図6.16，6.31）と比較すると，数値的には異なるけれども，姿勢の変化に対する $\dot{X}$ の変化の様子は一様流れ中での場合とよく一致する。なお，$U=60$ (mm/s) の場合，$Y=370$ (mm) の位置（鉛直方向移動

距離が340(mm))における姿勢は$\theta=66°$程度であり，$\theta>66°$の領域で$\dot{X}$が急激に変化することが分かる。

つぎに，落下時間に伴なって変化する$\dot{X}$の様子を表わす図6.60において，運動開始と同時に線状体は急激に水平方向に加速され，$t=1.4$(S)程度で$\dot{X}$は最大となり，その後$\dot{X}$はほぼ直線的に減少し（水平方向加速度$\ddot{X}$がほぼ一定になる。），線状体が管路底面に近づくと$\dot{X}$は急激に減速される。図6.71から流速が姿勢の変化におよぼす影響はわずかであるので，線状体が水平方向に加速される時間および減速され始めてから$\ddot{X}$がほとんど変化しない時間は流速にかかわらずほぼ同じになる。また，$U=60$(mm/S)の場合，$t=2.4$(S)程度で線状体の重心が底面近傍の境界層内に入るため，$t>2.4$(S)で$\dot{X}$が急激に変化することが分かる。

表6.12に$\dot{X}$，$\dot{Y}$の最大値およびそのときのθとtの値を示す。流速が姿勢の変化におよぼす影響はわずかであるので，流速が大きいほど姿勢がより水平に近い状態になるまで水平方向に加速される傾向が見られるが，流速による差はわずかである。ここで，他の流れ中での結果（表6.4，6.8）と比較すると，助走域での場合，運動開始直後の領域を除き水平方向に加速されている領域では，ほぼ一様な流れ中で運動をおこなうため，$\dot{X}$が最大になるときの姿勢および加速時間は一様流れ中での結果に近い値となり，姿勢はわずかに水平に近く，加速時間はわず

表6.12 重心速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

線状体長さ l (mm)	流速 U(mm/s)	水平方向速度の最大値			鉛直方向速度の最大値		
		$\dot{X}_{max}$(mm/s)	θ(°)	t(s)	$\dot{Y}_{max}$(mm/s)	θ(°)	t(s)
30	20	77.88	43.0	1.39	259.5	4.75	0.21
	40	100.58	43.3	1.39	254.3	5.06	0.21
	60	122.76	43.4	1.39	252.4	5.41	0.22
	80	144.69	43.4	1.39	251.5	5.41	0.22
60	60	102.70	14.5	1.37	279.1	5.15	0.29

d=0.569(mm)，No.1 試料

かに短くなる。また，$\dot{X}$の最大値の一様流れ中での場合との差は，流速が大きいほど大きいが，流速が小さいほど流れの発達が早いため，平均流速に対する$\dot{X}$の最大値の増大割合は，$U=20$(mm/s)の場合，約29(%)，$U=80$(mm/s)の場合，約16(%)と大きくなる。

また，ここで用いた計算条件のもとでは助走域での流れはあまり発達しておらず，もっとも発達している$U=20$(mm/s)の場合でも最大流速は$u^*=1.3$程度であり，壁面近くの領域を除き助走域での流速は，一様流れと十分に発達した流れの中間の前者に近い値になるので，$\dot{X}$の変化（図6.16，6.31，6.59）を比較すれば分かるように，壁面近くで$\dot{X}$が急激に加速あるいは減速される領域の一部を除き，同一姿勢に対する$\dot{X}$の値は一様流れ中での値と十分に発達した流れ中での値の中間の前者に近い値になる。さらに，他の流れ中での場合と同様に，静止流体中での水平方向速度を$\dot{X}_s$，重心での流速をW_cとすると，助走域での水平方向速度が，

$$\dot{X} = \dot{X}_s + W_c \qquad (6.77)$$

なる関係で表わされるθの領域が存在する。この領域は15°<θ<65°程度であり，下限の値は一様流れ中での場合とほぼ一致し，線状体が底面近傍の境界層内に入るようになるまでの領域で(6.77)式の関係が成立する。また，流速が小さいほど，線状体の水平方向移動距離が小さいので，入口部からの距離は短いが，流れが発達する速度が早いので，線状体が境界層内に入り始める位置における境界層厚さは大きくなる。このため，θの上限値は流速が小さいほど小さくなる傾向が見られる。なお，慣性のため，線状体が急激に加速される場合，$\dot{X}<\dot{X}_s+W_c$であり，急激に減速される場合，$\dot{X}>\dot{X}_s+W_c$となる。

いっぽう，流速が$\dot{Y}$の変化におよぼす影響を表わす図6.61

において，他の流れ中での場合と同様に，線状体は運動開始と同時に重力と浮力の差にもとづく外力の作用を受けて鉛直方向に急激に加速される。$\ell = 30\,(mm)$ の場合，$U \leqq 80\,(mm/s)$ の範囲内では，線状体が鉛直方向に加速される領域は $\theta < 6°$ 程度であり，その後抗力が増大するため，θ の増加に伴ない $\dot{Y}$ は単調に減少する。そして，線状体が底面近傍の境界層内へ入るようになると，十分に発達した流れ中での場合に比べて姿勢が鉛直に近いため，助走域での場合，$\ell = 30\,(mm)$ でも線状体が鉛直方向に回転し（$U \geqq 40\,(mm/s)$ のとき），$\dot{Y}$ が増大する現象が見られる。この領域での流速は，管路中央部のほぼ一様な流れ中での同一姿勢の位置における流速より小さく，線状体の軸に直角な方向の速度 u（<0）の絶対値は境界層内での方が大きく，軸方向速度 v（<0）の絶対値は小さい。ところが，姿勢が水平に近いため重心の速度を表わす (6.17) 式を考慮すると，$\dot{Y}$ に寄与する割合は u の方が大きく，同一姿勢での $\dot{Y}$（<0）の絶対値は境界層内での方が大きくなる。したがって，図 6.61 に示すように線状体が鉛直方向に回転し始めてからの $\dot{Y}$ の変化はそれまでの曲線の上方に位置する。

また，一様流れ中での場合と比べて，姿勢の変化がわずかに

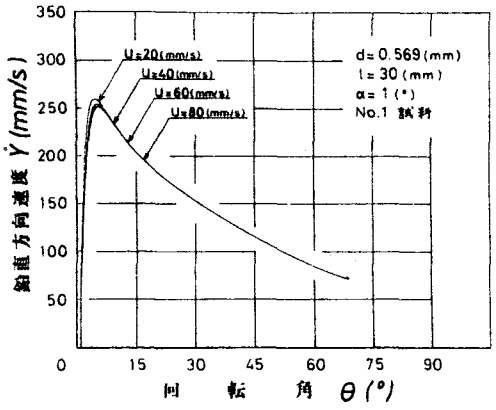


図 6.61 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

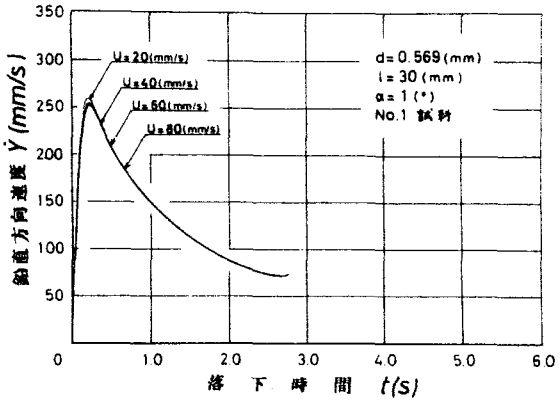


図 6.62 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

大きくなるため，線状体に作用する抗力の鉛直方向成分がわずかに大きく，鉛直方向に加速されにくくなるが，助走域での場合，流速により流れの発達程度が異なるため，表6.4と表6.12を比較すれば分かるように，一様流れ中での場合との$\dot{Y}$の最大値の差は流速が小さいほど大きくなる。すなわち，十分に発達した流れ中での場合，鉛直方向に加速されにくくなるという結果から考えて，流れの発達程度が大きい（流速が小さい）ほど鉛直方向に加速されにくくなり，助走域での場合，流速による$\dot{Y}$の最大値の差は，たとえば，$U=20$(mm/s)と$U=80$(mm/s)の差は，一様流れ中での場合，13.5(mm/s)，助走域での場合，8.0(mm/s)のように小さくなる。したがって，流速の影響が見られる領域は，$\theta<10°$程度と一様流れ中での場合より狭くなり，この領域では流速が大きいほど$\dot{Y}$の値は小さい。

つぎに，落下時間に伴なって$\dot{Y}$が変化する状態を表わす図6.62において，線状体が鉛直方向に加速される時間は0.2(s)程度であり，その後減速される。また，助走域での場合，十分に発達した流れ中での場合と異なり，流速が姿勢の変化におよぼす影響はわずかであるので，加速領域とその後の減速領域の一部を除き，tと$\dot{Y}$の関係は流速にかかわらずほぼ同一曲線で表わされる。なお，$\ell=30$(mm)の場合でも，底面近傍の境界層内で$\dot{Y}$がふたたび加速される現象がわずかな時間であるが見られる。また，表6.12から，流速が大きいほど加速時間は長くなる傾向にあり，より水平に近い姿勢になるまで加速される。この流速の影響は一様流れ中での場合と一致し，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は，助走域での場合の方が大きい。しかし，図6.17と図6.61を比較すると，$\theta<15°$程度の領域では，$\dot{Y}$は助走域での場合の方が小さいが，これ以上の領域では流れ状態の影響は見られなくなり，θと$\dot{Y}$の関係は一様流れ中での曲線と一致する。なお，このθの領域におよぼす流速の影響は明確には現われない。ここで，一様流れ中での場合と十分に発達した流れ

中での場合を比較した結果を考慮すると，助走域では$\dot{Y}$は両者の中間の一様流れ中での値に近い値になり，流れの発達程度がが大きいほど流速分布の影響を大きく受けて，運動開始後のθのより広い領域で$\dot{Y}$は一様流れ中での場合より小さくなることが分かる。しかし，θの増加に伴ない流れ状態の影響は見られなくなり，θと$\dot{Y}$の関係は一様流れ中での曲線と一致する。

つぎに，流速が重心の加速度の変化におよぼす影響を調べる。図6.63において，他の流れ中での場合と同様に，運動開始と同時に線状体は水平方向に加速される。このため，線状体に対する流体の相対速度の軸に直角な方向成分U_rは小さくなるが，助走域での場合，上面近傍の境界層の領域は狭いけれども，線状体が運動を開始して管路上面から遠ざかるにつれて流速は増大するので，一様流れ中での場合に比べてU_rの減少はわずかではあるが小さく，軸に直角な方向の加速度du/dtの急激な減少は押えられる。また，軸方向速度v（<0）の絶対値の急激な増大および加速度dv/dt（<0）の絶対値の急激な減少も小さくなる。したがって，加速度を表わす(6.18)式を考慮すると$\ddot{X}$が運

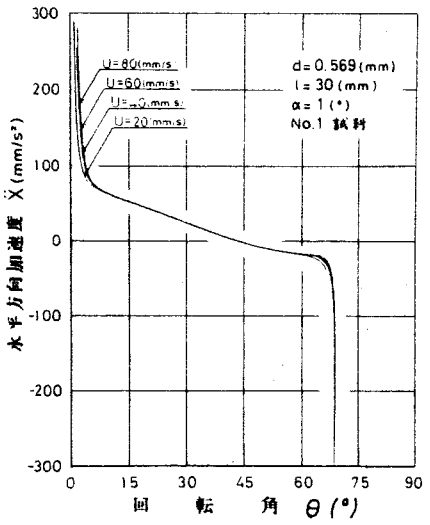


図6.63 水平方向加速度におよぼす流速の影響

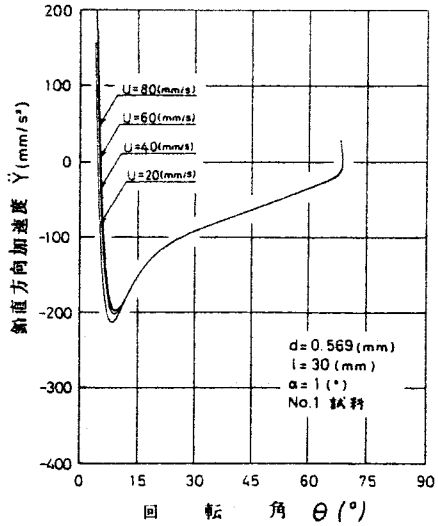


図6.64 鉛直方向加速度におよぼす流速の影響

動開始時から急激に減少する割合は助走域での場合の方がわずかに小さくなることが分かる。しかし，流速の変化が大きい管路上面近くの領域は，十分に発達した流れの場合の方が広く，また，この領域での流速の変化も大きいので，助走域での$\ddot{X}$の急激な減少は十分に発達した流れ中での場合より大きくなる。すなわち，図6.22，6.35，6.63を比較すれば分かるように，助走域での$\ddot{X}$の変化を表わす曲線は，一様流れ中での曲線と十分に発達した流れ中での曲線の間の前者に近い側に位置する。上面近傍の境界層の領域は狭く，しかも，初期位置が$Y=30(mm)$であるので，運動開始後短時間のうちに線状体は境界層内から抜け出し，ほぼ一様な流れ中で運動するようになるため，$\theta<10°$程度の領域では流速の影響が見られるが，これ以上の領域では$U=20\sim80(mm/s)$の曲線は一致する。やがて，底面近傍の境界層内へ線状体が入ると$\ddot{X}$は急激に減少する。姿勢の変化におよぼす流速の影響はわずかであるが，流速が小さいほど流れの発達が早く，境界層の領域が広くなるので，流速が小さい順番にθの値の小さい領域で他の曲線から離れていく。また，流速が大きいほど流速の場所による差が大きいため，$\ddot{X}$はより大きく減少する。したがって，十分に発達した流れ中での場合と同様に，助走域での場合にも，静止流体中あるいは一様流れ中で見られた$\ddot{X}$が最小になる現象は生じない。しかし，今より管路の高さを大きくして計算する場合，ほぼ一様な流れの領域が広くなるので，$\ddot{X}$が極小になる現象が現われる可能性がある。

ここで，他の流れ中での結果（図6.22，6.35）と比較すると，流れの発達程度が大きいほど，姿勢の変化は流速の影響を大きく受け同じ位置における姿勢は流速により異なる。さらに，流速の変化も流れの発達程度が大きいほど大きい。このため，流れの発達程度が大きくなるにつれて，$\ddot{X}$の変化に流速の影響が現われるθの領域は広くなり，一様流れ中での場合との差は

大きくなる。すなわち，助走域での場合，$\ddot{X}$の変化を表わす曲線は一様流れ中での曲線と十分に発達した流れ中での曲線の間に位置するが，流れの発達程度が大きくなるにつれて，十分に発達した流れ中での曲線に近づく。したがって，流速が小さいほど流れの発達程度が大きく，十分に発達した流れ中での曲線により一そう近づくので，運動開始直後の領域で流速の影響が現われるθの領域が，助走域での場合（$\theta<10°$程度）の方が一様流れ中での場合（$\theta<15°$程度）より小さくなったと考えられる。なお，この他にも，ここで用いた計算条件のもとでは助走域での流れの発達程度が比較的小さいことも原因として考えられる。

いっぽう，図6.64において，$\ddot{Y}$も運動開始時から急激に減少するが，$\ddot{X}$に関して述べたと同じ原因により，$\ddot{Y}$の急激な減少は一様流れ中での場合よりわずかに小さいが，十分に発達した流れ中での場合よりは大きくなる。すなわち，図6.23，6.36，6.64を比較すれば分かるように，助走域での$\ddot{Y}$の変化を表わす曲線は，$\ddot{X}$の場合と同様に，一様流れ中での曲線と十分に発達した流れ中での曲線の間の前者に近い側に位置する。また，上面近傍の境界層の領域は狭く，運動開始後短時間のうちに線状体は境界層内から抜け出し，ほぼ一様な流れ中で運動するようになることおよび流速が姿勢の変化におよぼす影響はわずかであるので，一様流れ中での場合と同様に，流速が大きいほど$\ddot{Y}$の最小値の絶対値は小さく，そのときのθの値は大きくなる。しかし，$\ddot{Y}$が増大し始めると$U=20\sim80$(mm/s)の曲線は漸近し，$\theta>15°$程度の領域では流速の影響は見られなくなり，曲線は一致する。そして，姿勢が水平方向に近づくにつれて$\ddot{Y}$は0に近づくが，やがて，底面近傍の境界層内へ線状体が入るようになると，そのときの姿勢が比較的鉛直に近いため，$\ell=30$(mm)の場合でも線状体が鉛直方向に回転する現象が生じ，$\ddot{Y}$は急激に増大する。なお，流速が小さいほど境界層の領域が広く

なるので，流速が小さい順番にθの値の小さい領域で他の曲線から離れていく。また，角速度の変化を表わす図6.72から，流速が大きいほどこの領域で姿勢が大きく変化するため，$\ddot{Y}$はより大きく増大する。

ここで，他の流れ中での結果（図6.23，6.36）と比較すると，$\ddot{X}$に関して述べたと同じ原因により，流れの発達程度が大きくなるにつれて，$\ddot{Y}$の変化に流速の影響が現われるθの領域は広くなり，一様流れ中での場合との差は大きくなる。ただし，流れの方向が水平方向であるので，このθの領域および一様流れ中での場合との差は$\ddot{X}$の場合より小さい。したがって，助走域での場合，$\ddot{Y}$の変化を表わす曲線は一様流れ中での曲線と十分に発達した流れ中での曲線の間に位置するが，流れの発達程度が大きくなるにつれて，十分に発達した流れ中での曲線に近づく。すなわち，流れの発達程度が大きくなるにつれて，$\ddot{Y}$の最小値の絶対値は小さく，そのときのθの値は大きくなる。ここで，助走域での場合，流速が小さいほど流れの発達程度が大きいことを考慮すると，流速が小さいほど，一様流れ中での場合より$\ddot{Y}$の最小値の絶対値はいっそう小さく，そのときのθの値はいっそう大きくなり，これらの値の流速による差は一様流れ中での場合より小さくなることが分かる。助走域での結果，表6.13と一様流れ中での結果，表6.5を比較すると，両者の$\ddot{Y}$の最小値の絶対値およびそのときのθの値の差は，たとえば，$U=20$(mm/s)の場合，27.6(mm/s²)，3.1°，$U=80$(mm/s)の場合，14.4(mm/s²)，0.9°のように流速が小さいほど大きくなり，これらの値の流速による差は助走域での場合の方が小さいことが明瞭に分かる。

表6.13 鉛直方向加速度の最小値とそのときの姿勢

線状体長さ l(mm)	流速 U(mm/s)	鉛直方向加速度の最小値 $\ddot{Y}_{min}$(mm/s²)	θ(°)
30	20	-213.7	8.35
	40	-202.6	9.00
	60	-198.6	9.07
	80	-196.9	9.41
60	60	-81.6	6.76

d=0.569(mm)，No.1試料

つぎに，長さが異なると重心の速度の変化にどのような差が現われるかを調べる。$\dot{X}$の変化を表わす図6.65，6.66において，線状体が運動を開始する上面近傍の境界層の領域は狭く（$U=60$ (mm/s)の場合，25 (mm)程度），$\ell=30$ (mm)の場合，$\theta=2.5°$，$t=0.1$ (s)程度で線状体がすべてほぼ一様な流れ中に入るが，$\ell=60$ (mm)の場合，$\theta=4.0°$，$t=0.16$ (s)程度でこの領域に入る。すなわち，長さが大きい方が流速の小さい領域で運動する時間が長くなる。このため運動開始直後の領域では，同一姿勢に対する$\dot{X}$の値は長さが大きい方が小さくなる。この現象は一様流れ中での場合（図6.18）見られなかったが，十分に発達した流れ中での場合（図6.37）現われており，この場合にも長さにかかわらず初期位置が同じであるので，軸方向に沿って分布する流速の平均値は長さが小さいほど大きいことも原因していると考えられる。その後，$\ell=60$ (mm)の線状体がほぼ一様な流れ中で運動するようになると，一様流れ中での場合と同様に同一姿勢における$\dot{X}$の値は長さが大きい方が大きくなる。また，線状体がすべてほぼ一様な流れ中に入った後$\dot{X}$の増大が急激に減少する様子は，長さが大きい方が姿勢の変化が小さいため顕著に現われる。やがて，線状体が底面近傍の境界層内へ

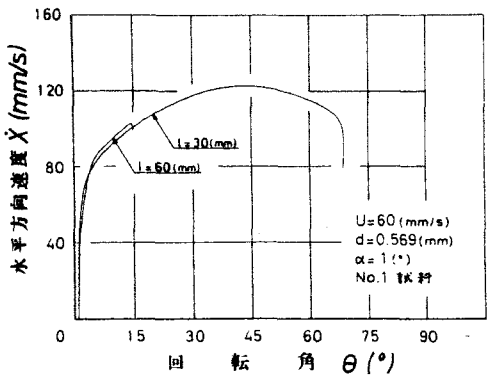


図6.65 水平方向速度におよぼす長さの影響

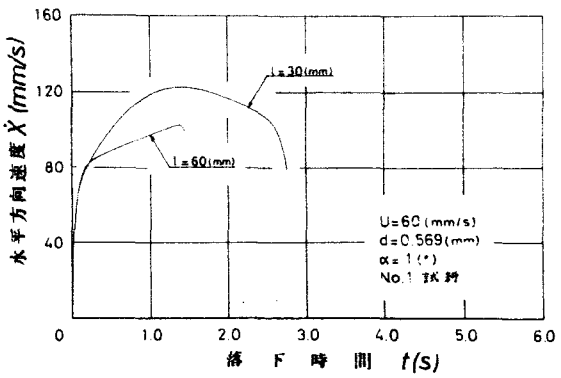


図6.66 水平方向速度におよぼす長さの影響

入り始めると $\dot{X}$ は急激に減速される。このときの姿勢は，長さが大きいほど姿勢の変化が小さいため，より鉛直に近く，図6.67から $\dot{Y}$ の値は，$\ell=60$(mm)の方が非常に大きく，しかも境界層内へ入るときの水平方向移動距離は $\ell=30$(mm)の場合より小さいのでこの領域はいっそう狭い。したがって，$\ell=60$(mm)の場合，$\dot{X}$ の急激な減少はわずかな時間見られるだけである。

いっぽう，$\dot{Y}$ の変化を表わす図6.67，6.68において，他の流れ中での場合と異なり，運動開始直後の θ の小さい領域（$\theta<3.5°$程度）で同一姿勢に対する $\dot{Y}$ の値は長さが小さい方が大きくなる。図6.68を見れば分かるように，線状体が鉛直方向に急激に加速されている領域では，同一落下時間における $\dot{Y}$ の値は長さが大きい方がわずかに大きいが，姿勢の変化を表わす図6.75から，運動開始直後の領域では長さが大きい方が線状体の軸方向に沿って分布する流速の差が大きいため，角速度が大きくなり，$\theta<4°$程度の領域では同一落下時間での θ の値は大きい。このため，θ の小さい領域で上述のような結果が生じたのである。これに対し，一様流れ中での場合にも，十分に発達した流れ中での場合にも，つねに同一落下時間における θ の値は長さが大きいほど小さいので，この現象は生じない。

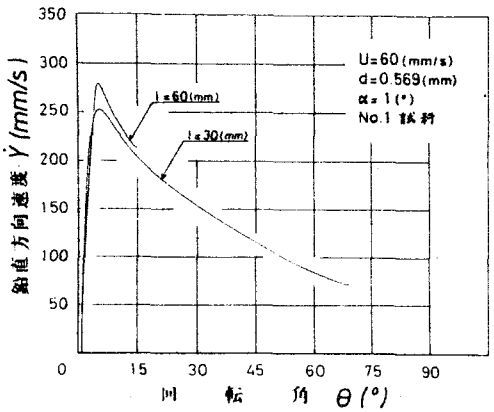


図6.67 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

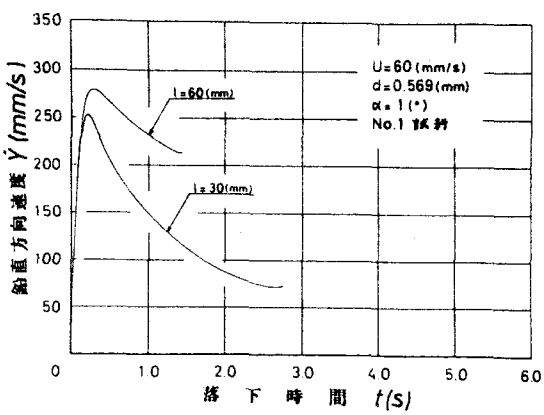


図6.68 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

また，$\theta < 4°$程度の領域で長さが大きい方が姿勢の変化が大きいことが，運動開始直後の領域で長さが大きい方が同一姿勢に対する$\dot{X}$の値が小さくなる原因の1つであると考えられる。

しかし，$\theta > 3.5°$程度の領域では，他の流れ中での場合と同様に長さが大きい方が$\dot{Y}$の値は大きくなる。その後，抗力が増大するため，θの増加に伴ない$\dot{Y}$は単調に減少し，線状体が底面近傍の境界層内へ入ると$\dot{Y}$は加速され始める。境界層内での$\dot{Y}$の変化は長さにより異なり，$\ell = 30$(mm)の場合，$\dot{Y}$は加速され続けるが，$\ell = 60$(mm)の場合，$\dot{Y}$はいったん加速されるがすぐに減速されて管路底面に到達する。この様子は$\dot{Y}$の変化を表わす図6.70を見ればいっそう明確に分かる。しかし，$\ell = 60$(mm)の場合，境界層内へ入るときの$\dot{Y}$の値は大きく（$\ell = 60$(mm)の場合，約214(mm/s)，$\ell = 30$(mm)の場合，約75(mm/s)），しかも境界層の領域は狭いため，この領域で運動する時間は非常に短い。

助走域での場合，姿勢の変化に対する$\dot{Y}$の変化は，一様流れ中での曲線と十分に発達した流れ中での曲線の間に位置する曲線で表わされることから，他の流れ中での場合と同様に$\theta > 60°$程度の領域では長さの影響を受けないと考えられる。

また，表6.4，6.8，6.12を比較すると，助走域での場合，運動開始直後の領域で長さが大きい方が姿勢の変化が大きいため，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値の長さによる差は，3者のうちでもっとも小さく，$\dot{Y}$の最大値の長さによる差は一様流れ中での場合がもっとも大きく，十分に発達した流れ中での場合がもっとも小さくなる。

つぎに，重心の加速度の変化を表わす図6.69，6.70において，$\ddot{X}$は運動開始時から急激に減少するが，$\theta < 4°$程度の領域では同一姿勢に対する$\ddot{X}$の値は長さが大きい方が大きくなる。これは，運動開始直後の領域では長さが大きい方が流速分布の影響を大きく受けるため，姿勢の変化が大きいことが主な原

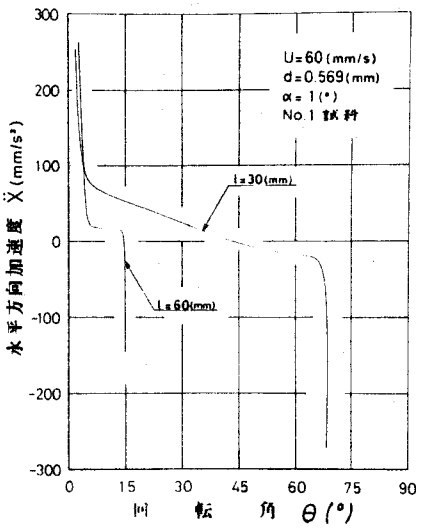


図6.69 水平方向加速度におよぼす長さの影響

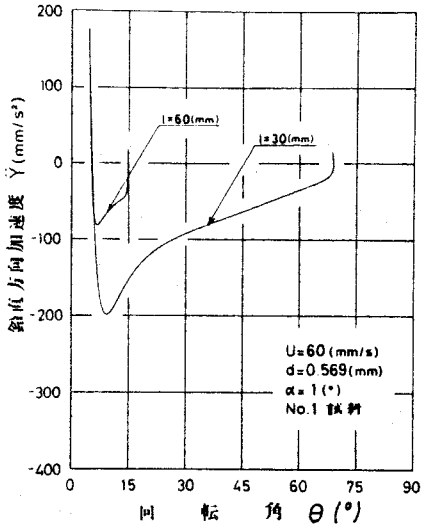


図6.70 鉛直方向加速度におよぼす長さの影響

因である。

助走域での場合，上面近傍の境界層の領域は狭く，短時間のうちに線状体はほぼ一様な流れ中に入り，$\ddot{X}$の減少割合は急激に低下する。この様子は長さが大きい方が姿勢の変化が小さいため顕著に現われる。なお，$\ell=60$(mm)の場合，$\ddot{X}$はほとんど一定となる。これは，図6.66に示すと$\dot{X}$の関係で$\dot{X}$がほぼ直線的に変化することからも分かる。やがて，線状体が底面近傍の境界層内へ入り始めると，この領域では底面に向って流速が急激に低下しているので，$\ddot{X}$は急激に減少する。また，$\ell=30$(mm)の場合，線状体が水平方向へ減速されている領域で$\ddot{X}$は急激に減少するが，$\ell=60$(mm)の場合，まだじゅうぶんに水平方向に加速されないうちに，急激に減速される。

いっぽう，$\ddot{Y}$の変化におよぼす長さの影響は，とくに底面近傍の境界層内で顕著に現われている。

線状体が底面近傍の境界層内へ入り始めると，境界層内では底面に向って流速が急激に低下しているので，軸に直角な方向の加速度du/dt(<0)の絶対値は急激に増大し，したがって，軸

に直角な方向の速度uは減少する。なお，落下軌跡を示す図6.58を見れば分かるように，$\ell=30(mm)$の場合，$u<0$であるが，$\ell=60(mm)$の場合，姿勢が鉛直に近く$u>0$，すなわち，運動方向と鉛直線のなす角度がθより大きい。いっぽう，軸方向正の向きに作用する抗力が減少するため，軸方向加速度dv/dt(>0)は減少し，軸方向速度v(<0)の絶対値の減少割合は低下する。したがって，重心の加速度を表わす(6.18)式を考慮すると，$\dot{Y}$(>0)が急激に減少し始め，$\ddot{Y}$(<0)の絶対値の減少割合は低下する。ただし，図6.70では，今までと同様に鉛直方向は下向きを正の向きとして$\ddot{Y}$の変化を示しているので，図の符号とここで述べている$\ddot{Y}$の符号は正負逆である。

その後もdv/dtの絶対値は増大し，uは減少し続けるが，流速が急激に低下しているため，線状体に対する流体の相対速度の軸方向成分V_r(>0)は増大し，軸方向に作用する抗力が増大する。したがって，dv/dtは増大し始め，vの絶対値の減少割合は増大する。$\ell=30(mm)$の場合，姿勢が比較的水平に近いため，(6.18)式から$\ddot{Y}$の変化に対してdv/dtの変化が支配的であるので，$\ddot{Y}$(>0)が減少して正の値から負の値へ移り，線状体は鉛直下向きに加速されて管路底面に到達する。これに対し，$\ell=60(mm)$の場合，姿勢が鉛直に近いため，$\ddot{Y}$の変化に対してdv/dtの変化が支配的になるので，$\ddot{Y}$が減少していったん正の値から負の値へ移った後ふたたび正の値へもどる。すなわち，線状体はいったん鉛直方向に加速され始めるがふたたび減速されて管路底面に到達する。以上のように，助走域での場合，境界層の領域が狭く，しかも姿勢の変化が小さいため，底面近くの領域における$\ddot{Y}$の変化の様子は，十分に発達した流れ中での場合と異なり，長さにより違ったものになる。しかし，表6.13から他の流れ中での場合と同様に，長さが小さい方が$\ddot{Y}$の最小値の絶対値およびそのときのθの値は大きくなる。

以上の結果をまとめると，助走域での流れ状態は，一様流れ

から十分に発達した流れへ移行する途中の段階であるので，重心の速度および加速度の変化状態も一様流れ中での場合と十分に発達した流れ中での場合の間に位置する。そして，流れの発達程度が大きくなるにつれて十分に発達した流れ中での場合に近づく。ここで用いた計算条件のもとでは流れの発達程度が比較的小さいため，一様流れ中での場合に近い側に位置する結果になった。また，平均流速により流れの発達程度が異なるため，この影響が流速の影響に含まれ，流速の影響は他の流れ中での場合より現われにくくなった。

最後に，第4章の実験結果と比較する。計算と同じ試料条件の結果，図4.26，4.27を見ると，実験では線状体が流れに入ったとき急激に回転する現象が生ずるため，$\dot{Y}$に長さの影響がもっとも顕著に現われる運動開始直後の領域（$\dot{Y}$が加速された後減速され始める領域）でのデータがないので，長さの影響が見られない。また，$\dot{X}$に関しては，計算結果（図6.65）を見れば分かるように，長さによる差は小さいので，実験では明確に現われなかったと考えられる。

しかし，比較的急激な回転が小さい場合の実験結果，図4.28～4.31において，長さの影響が明確に現われ，同一姿勢に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は長さが大きいほど大きく，また，長さが小さいほどより水平に近い姿勢になるまで鉛直方向に加速される。これらの傾向は計算結果と一致するが，図4.29において，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値には運動開始直後の急激な回転の影響，すなわち長さが小さい方がこの急激な回転は大きい，が含まれているため，長さによる差が大きくなっているが，線状体がすべて流れ中に入った状態から運動を開始する場合，この差はもっと小さくなると考えられる。さらに，姿勢が水平方向に近づくにつれて$\dot{X}$，$\dot{Y}$には長さの影響が除々に見られなくなることは，計算結果，図6.65，6.67，から直接には分かりにくいが，助走域での場合と一様流れ中での場合の比較から推察できる。

また，実験では，流速が小さいほど長さが$\dot{Y}$におよぼす影響が明確に現われるという結果が得られた。一様流れ中での結果（図6.19）と静止流体中での結果（図6.21）を比較すると，長さによる$\dot{Y}$の差は一様流れ中での方が大きくなり，助走域での結果（図6.67）と静止流体中での結果を比較すると，後者の方がこの差は大きくなることから，長さが大きいほど上面近傍の境界層内の流速分布の影響を大きく受けて，静止流体中での場合と比べて姿勢の変化がいっそう大きくなることが原因で，流速が大きい方が長さによる$\dot{Y}$の差が小さくなると考えられる。すなわち，運動開始直後の領域で姿勢の変化が大きいほどこの差は小さくなる。これは，十分に発達した流れ中での結果（図6.39）と助走域での結果を比較すればいっそう明確になる。したがって，実験の場合，流速が大きいほど線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化が大きいことが原因となって，長さによる$\dot{Y}$の差が小さくなったと考えられる。

また，流速が重心の速度におよぼす影響を表わす図4.44，4.45において，流速が大きいほど，より水平に近い姿勢になるまで水平方向に加速されるという結果が得られているが，これは4.9.2項で述べたように，実験では流速が大きいほど運動開始直後の急激な姿勢の変化が大きいことに起因すると考えられる。なお，この影響で計算結果（図6.59）に比べて実験では曲線がθの値の大きい側へ寄る傾向が見られる。さらに，$d=0.569$（mm）の場合，$\dot{Y}$には流速の影響が見られない。これは，急激に姿勢が変化することと，計算結果によると，流速の影響が現われるθの領域は$\theta<10°$程度であり，しかも流速による差はわずかであることが原因である。しかし，図4.47，4.48に示すように比較的急激な姿勢の変化が小さい場合，実験でも流速の影響が明確に現われ，流速が大きいほど$\dot{Y}$の値は小さいが，やがて，姿勢が水平方向に近づくにつれて流速の影響は見られなくなる。この傾向は計算結果と一致する。しかし，実験の場合，

$\dot{Y}$の変化は流速が大きいほど運動開始直後の急激な姿勢の変化が大きくなる影響を受けるので，流速による$\dot{Y}$の差は計算結果より大きい。流速が大きいほど$\dot{Y}$の値が小さくなるのは，運動開始直後の領域では，線状体に対する流体の相対速度の軸に直角な方向成分U_Yは流速が大きいほど大きく，軸方向および軸に直角方向に作用する抗力が大きいため，軸方向速度v(<0)の絶対値が小さく，軸に直角な方向速度u(>0)が大きくなるからである。ところが，実験の場合，これも1つの原因になるが，これより流速が大きいほど運動開始直後に姿勢が大きく変化することの方が支配的であると考えられる。

6.6.3 線状体の姿勢および角速度

管路上面近傍の境界層内では壁面から離れるにつれて流速は急激に増大する。このため，線状体の軸方向に沿って流速が分布し，しかも先端部に近いほど大きいので運動開始時に線状体に作用する回転モーメントNは姿勢を水平方向に回転させる向きに働く。助走域での場合，流速が小さいほど流れの発達が早いので，十分に発達した流れ中での場合と異なり，Nの値は流速が小さいほど大きくなる。しかし，境界層の領域は狭く，流速の変化も小さいので，Nの変化を表わす図6.50と図6.74を比較すれば分かるように，Nの値は十分に発達した流れ中での場合に比べて小さく，また，流速による差もわずかである。したがって，運動開始直後の領域では，角速度は十分に発達した流れ中での場合より小さいが，Nの値が正であることから，一様流れ中での場合より大きくなる。

いっぽう，運動開始直後の領域では，流体に対する線状体の相対速度の軸に直角な方向成分，$u-U_1$(<0)，と軸方向成分，$v-V$(<0)，の積は，流速が大きいほど$u-U_1$の絶対値が大きいため大きく，さらに，(6.15)式で表わされる流速の軸に直角な方向成分の重心回りの一次モーメントの時間的変化率dU_2/dt

(>0) も流速が大きいほど大きい。したがって，Nは小さいけれども $(u-U_1)\cdot(v-V)$ および dU_2/dt が大きいので，運動方程式(6.16)式の第3式を考慮すると，運動開始直後の領域では流速が大きいほど角速度γが大きいことが分かる。しかし，図6.73を見れば分かるように，流速によるγの差はわづかである。とくに，$U \geq 40$ (mm/s) では流速の影響はほとんど見られない。そして，γの増大に伴ない回転モーメントNは線状体の回転を押える向きに作用し始める。また，dU_2/dt が減少し始め，流れの発達程度が小さい場合（$U \geq 40$ (mm/s) の場合），$(u-U_1)\cdot(v-V)$ は運動開始時から減少し，$t=0.1$ (s) 程度で極小となりふたたび増大する。このため，$U \geq 40$ (mm/s) の場合，角加速度 $d\gamma/dt$ は $t=0.1$ (s) 程度で極小となる。これに対し，$U=20$ (mm/s) の場合，$(u-U_1)\cdot(v-V)$ は運動開始時からしばらくの間増大するため，$U \geq 40$ (mm/s) の場合ほど $d\gamma/dt$ は小さくならないが，やはり $t=0.1$ (s) 程度で極小となる。なお，$d\gamma/dt$ の極小値は流れの発達程度が小さいほど（流速が大きいほど）小さくなる。γが加速されている領域で，$d\gamma/dt$ が極小になる現象は一様流れ中での場合（図6.25）見られたが，十分に発達した流れ中での場合（図6.48）生じなかったことをあわせて考えると，流れの発達程度が小さいほど現われ易いことが分かる。したがって，図6.72，6.73において，γが加速されている領域でγの変化には変曲点が見られる。

その後，線状体がほぼ一様な流れ中で運動するようになると流速の影響は見られなくなり，γの変化は流速にかかわらず同一曲線で表わされる。前項で述べたように，$15° < \theta < 65°$ 程度の領域で $\dot{X}$ に対して(6.77)式の関係が成立することおよび $\theta > 10°$ 程度の領域では $\dot{Y}$ は流速にかかわらず同一曲線で表わされること，さらに，流れが発達しているのでほぼ一様な流れ中でも dU_2/dt は0にはならないが，小さい値であるため角加速度の変化にはほとんど寄与しないことから，$15° < \theta < 60°$ 程

度の領域では，一様流れ中での場合述べたように，流れに対する線状体の相対的な並進運動が流速にかかわらず同じになるので，線状体の回転運動も流速の影響をほとんど受けない。(6.4.3項参照)

これは，発達程度が比較的小さい流れ中で計算をおこなっているため成立つことであり，一様流れ中での結果と十分に発達した流れ中での結果を考慮すれば分かるように，流れの発達程度が大きくなるにつれて，姿勢の変化におよぼす流速の影響は大きくなる。

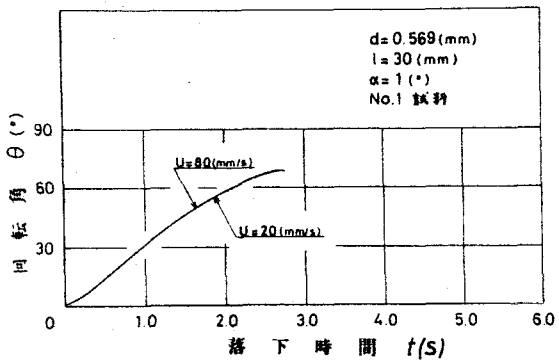


図6.71 姿勢におよぼす流速の影響

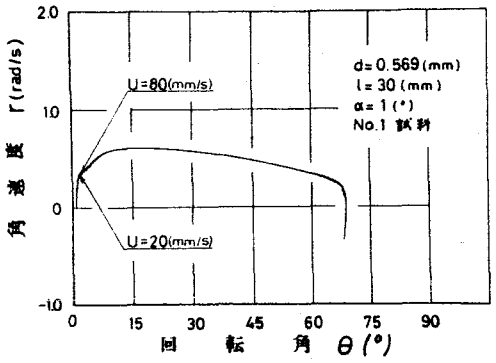


図6.72 角速度におよぼす流速の影響

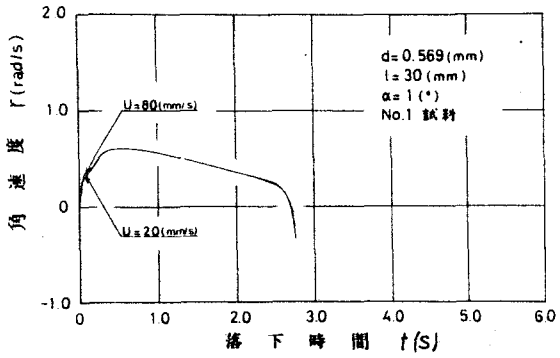


図6.73 角速度におよぼす流速の影響

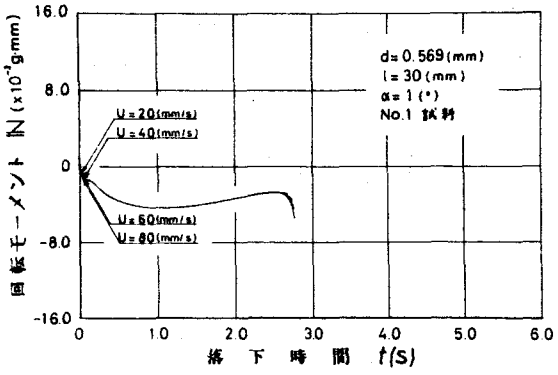


図6.74 回転モーメントにおよぼす流速の影響

やがて，線状体が底面近傍の境界層内へ入るようになると，この領域では壁面に向って流速が急激に減少しているので，姿勢を鉛直方向に回転させる向きに作用する回転モーメントNが急激に増大し，γは急激に減少する。なお，場所による流速の差は流速が大きいほど大きいので線状体に作用する回転モーメントNは大きくなり，γは流速が大きいほどいっそう急激に減少し，$U \geq 40$ (mm/s)の場合，γは負の値になる。すなわち，線状体は鉛直方向に回転し始める。また，流速が小さいほど境界層の領域は広いので，流速の小さい順番にθおよびtの値の小さい領域でこの現象が現われる。助走域での場合，姿勢の変化が小さく，境界層内へ入るときの姿勢が十分に発達した流れ中での場合に比べて鉛直に近いため，$\ell = 30$ (mm)の場合でも線状体が鉛直方向に回転する現象が見られたと考えられる。

以上のように，角速度の変化に流速の影響が見られるのは，運動開始直後の領域と底面近傍の境界層内で線状体が運動するときであり，前者の領域では流速によるγの差はわずかであるので，図6.71において，姿勢の変化におよぼす流速の影響はほとんど見られない。しかし，計算によると，運動開始直後の領域で流速が大きいほど角速度が大きくなるため，同一落下時間におけるθの値は大きいことが分かる。また，線状体がほぼ一様な流れ中に入った後しばらくの間γは加速されるので，表6.14を見れば分かるように，γの最大値およびそのときのθとtの値には流速はほとんど影響をおよぼさない。

ここで，他の流れ中での場合と比較する。表6.6，6.10，6.14から，流れの発達程度が大きい（十分に発達した流れ

表6.14　角速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

線状体長さ ℓ (mm)	流速 U(mm/s)	角速度の最大値 r(rad/s)	θ(°)	t(s)
30	20	0.6083	16.2	0.56
	40	0.6086	16.6	0.56
	60	0.6089	16.3	0.55
	80	0.6092	16.7	0.56
60	60	0.4597	2.0	0.05

d=0.569 (mm), No.1 試料

状態に近い）ほど，流速分布の影響を大きく受けて加速時間は短いけれどもγの最大値は大きくなる。また，一様流れ中での結果（図6.25）と図6.72を比較すると，助走域での場合，γの変化に流速の影響がほとんど見られない15°<θ<60°程度の領域での角速度の変化は，一様流れ中での場合と一致することが分かる。そして，この他の領域では，流速分布の影響を受けるため，これより小さい領域では助走域での方がγの値は大きく，これ以上の領域では逆に小さくなる。したがって，一様流れ中での場合と十分に発達した流れ中での場合を比較した結果を考慮すると，助走域での場合，線状体が底面近傍の領域に入りγが急激に減少する領域を除き，γの変化を表わす曲線は一様流れ中での曲線と十分に発達した流れ中での曲線の間に位置し，流れの発達程度が大きくなるにつれて，十分に発達した流れ中での曲線に近づく。また，流れの発達程度が大きくなるにつれてγの変化に流速の影響が現われるθの領域は広くなり，一様流れ中での場合との差は大きくなる。さらに，十分に発達した流れ中での結果から，発達程度が同じであれば流速が大きいほど一様流れ中での場合との差が大きいことが分かり，助走域での場合，流速により流れの発達程度が異なる影響で，角速度の変化におよぼす流速の影響がわづかしか現われなかったと考えられる。

これまでは，$\ell = 30$ (mm) と比較的長さが小さい場合であったが，十分に発達した流れ中での場合（図6.52），長さが大きいほど，運動開始直後の領域で流速分布の影響を大きく受けるため，一様流れ中での場合に比べて角速度はより大きく加速されるという結果が得られており，助走域での場合にもこの現象が現われると考えられる。

落下時間に伴なって変化する角速度の様子を表わす図6.77において，$\ell = 60$ (mm) の場合，γは急激に加速され $t = 0.05$ (s) で最大となり，その後急激に減速され，$t = 0.16$ (s) 程度で線

状体がすべてほぼ一様な流れ中に入る。運動開始直後の領域では，γは$\ell=30(mm)$の場合より大きくなる。これは，初期位置付近の境界層の領域が約25(mm)と狭いことと，初期位置が$Y=30(mm)$であるため，線状体の軸方向に沿って分布する流速の差は$\ell=60(mm)$の方が非常に大きく，図6.78を見れば分かるように姿勢を水平方向に回転させる向きに作用する回転モーメントNが大きくなり，しかも$\ell=60(mm)$と$\ell=30(mm)$のNの比は両者の慣性モーメントの比よりはるかに大きくなるからである。このようにγが大きくなるため，図6.75において

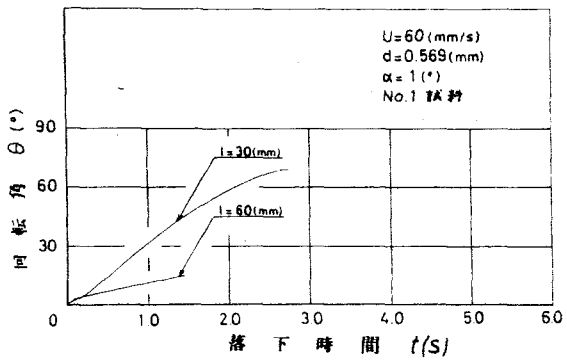


図6.75 姿勢におよぼす長さの影響

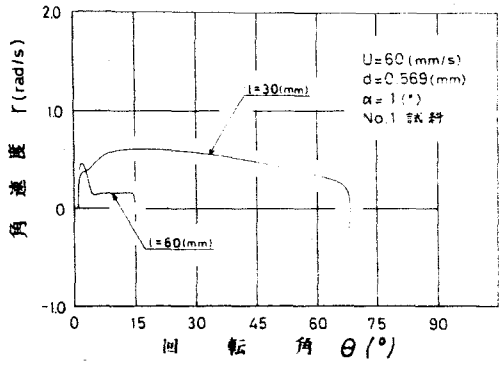


図6.76 角速度におよぼす長さの影響

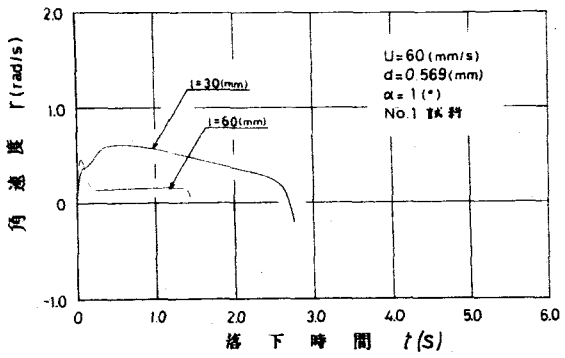


図6.77 角速度におよぼす長さの影響

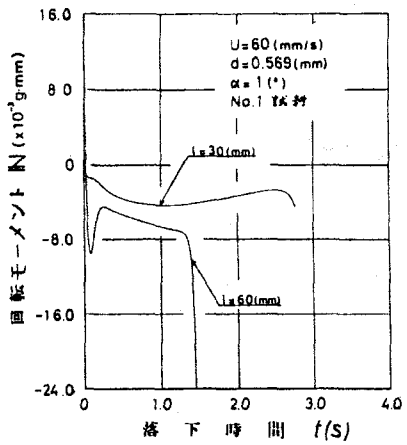


図6.78 回転モーメントにおよぼす長さの影響

$\theta < 4°$程度の領域では，$\ell = 60\,(mm)$の方が同一落下時間におけるθの値は大きくなる。この現象は他の流れ中での場合には見られなかったことから，この現象には境界層の領域の大きさ，初期位置および長さの3者が関係していると考えられる。すなわち，境界層の領域がもっと広い場合あるいは，$\ell = 30\,(mm)$と$\ell = 60\,(mm)$の線状体の後端の位置が同じになるように初期位置を変更する場合，この現象が現われない可能性がある。

$\ell = 60\,(mm)$の場合，線状体がほぼ一様な流れ中に入った後もγはしばらくの間減少し続けるが，γの減少に伴ない線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントNは減少し，$d\omega_2/dt$は小さい値になるので角加速度$d\gamma/dt$の変化にはほとんど寄与しなくなり，姿勢がまだ鉛直に近く流体に対する線状体の相対速度の積$(u-u_1)(v-v)$は増大し続けているため，$t = 0.27\,(S)$（$\theta = 5°$程度）でγは極小となり，その後除々に増大する。γが極小になった後ふたたび加速される現象は，$\ell = 30\,(mm)$の場合，γの変化に変曲点が現われることに対応する。この場合，$\ell = 60\,(mm)$の場合に比べて流速分布の影響が小さいため，運動開始直後の領域でγの急激な増大が小さく，変曲点が現われるにとどまったと考えられる。γがふたたび加速され始めてからしばらくするとγの変化は一様流れ中での場合とほぼ一致するようになる。なお，このときの時間および姿勢は約0.5 (S)，7°である。

やがて，線状体が底面近傍の境界層内へ入り始めると，流速分布の影響を受けてγは急激に減速されるが，$\ell = 60\,(mm)$の場合，短時間のうちに底面に到達するため，負の値にはならない。すなわち，線状体が鉛直方向に回転することはない。なお，運動開始後の領域を除き，他の流れ中での場合と同様に，長さが小さい方が角速度は大きく線状体が回転するのに要する時間は短い。

以上の結果をまとめると，助走域での場合，角速度の変化状

態も一様流れ中での場合と十分に発達した流れ中での場合の間に位置し，流れ状態が異なる影響が現われるのは壁面近傍の境界層の領域であり，線状体がほぼ一様な流れ中で運動しているときには，一様流れ中での場合とほぼ一致する。また，流速により流れの発達程度が異なるため，流速の影響はわずかしか現われない。さらに，ここで用いた計算条件のもとでは流れの発達程度が比較的小さいため，運動開始直後の領域で長さが大きい方が角速度が大きくなるという現象が見られた。

最後に，実験結果と比較する。図4.32において，実験では線状体が流れ中に入ったとき急激に流れの向きに回転させられるため，計算結果で見られた運動開始直後の領域で長さが大きい方が角速度が大きくなるという現象は現われない。また，この急激な姿勢の変化のため，長さが小さい場合，壁面近傍の境界層内に入るときの姿勢がほとんど水平であるので，線状体が鉛直方向に回転する現象は見られず，長さが大きい場合，姿勢は水平になっていないけれども，鉛直方向速度が大きく短時間のうちに底面に到達するため，この現象は見られない。計算によると，十分に発達した流れ中で長さの大きい線状体が運動する場合，この現象が顕著に現われたことから，もっと発達程度の大きい流れ中で実験をおこなえば，実験でもこの現象が見られると考えられる。なお，長さが大きいほど角速度が大きく，線状体が回転するのに要する時間が短いことは，実験でも計算でも確かめられた。

流速の影響を表わす図4.49，4.50から，流速は姿勢の変化にはほとんど影響をおよぼさず，静止流体中での場合とほぼ同じになるという結果が得られている。計算では，壁面近傍の境界層の領域で流速の影響が認められたが，その他の領域で線状体が運動する場合，流速の影響は見られず，これは実験結果と一致する。実験と計算では初期条件が異なるため，上面近傍の境界層の領域での姿勢の変化を直接比較することはできないが

，たとえ線状体がすべて流れ中に入るように初期位置を設定して実験をおこなったとしても，計算によると流速の影響はわずかであるので，確かめることは非常に困難である。流速の影響を実験的に確かめるにはもっと発達した流れ中で実験をおこなう必要があると考えられる。

6.7 ノズル内流れ中における線状体の運動

この節では，ノズル入口部平均流速 $U=20,40,60,80$ (mm/s)，長さ $\ell=15,30,45,60$ (mm)，初期角度 $\alpha=1°,10°,20°,30°,90°$ およびノズルの傾き $\gamma=1/4,1/3,1/2$ に対する計算結果について説明し，6.4～6.6節の一様流れ中および矩形管内流れ中での結果（計算は，流速がノズルの交点を中心とする円周上で一様であるような流れを考えておこなっているので，とくに一様流れ中での結果）と比較して，流速のみならず流れの方向が場所的に変化する流れ中で線状体が運動する場合，その運動特性がどのようになるか，また，運動特性に諸要因がいかなる影響をおよぼすかを明らかにする。なお，運動特性および要因の影響を調べるとき，第5章の実験結果もあわせて実験と計算の両面から考察する。

6.7.1 線状体の落下軌跡

図6.79に傾き $\gamma=1/3$ のノズル内流れ中における $\ell=30$ (mm)，$U=20\sim80$ (mm/s) の落下軌跡を示す。図中の線状体の時間間隔は $\Delta t=0.2$ (s) であり，線状体の軸方向に沿って流速および流れの方向が変化するので，線状体長さは X，Y 座標のスケールに従って縮小した寸法で表わしてある。なお，ノズル入口部上面を原点にとっているため，初期位置は $X=100$ (mm)，$Y=100\gamma+Y_0$ で，この場合 $Y=66.3$ (mm) である。また，この項に記載する落下軌跡はすべて，線状体の時間間隔，長さ

および初期位置に関しては図6.79と同一の表現方法で図示してある。

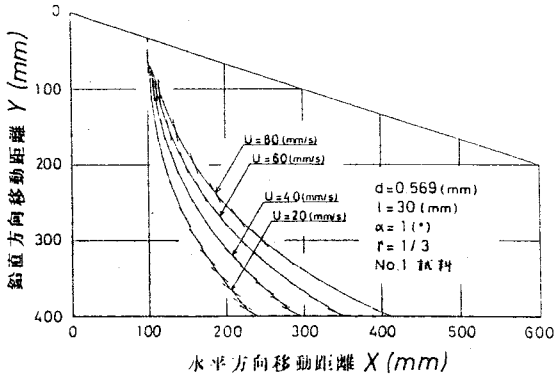


図6.79 落下軌跡におよぼす流速の影響

他の流れ中での場合と同様に，線状体は運動開始すると同時に水平方向にも流体から抗力を受けるため，水平方向にも急激に加速され，鉛直方向に対してある角度をもって運動し始める。ノズル内では流れ方向が水平方向に対して傾いているので，流速は鉛直方向成分をもっている。このため，他の流れ中での場合流速が大きいほど鉛直方向の加速は小さかったが，ノズル内流れ中での場合，流速による差はほとんど見られない。しかし，流速が大きいほど水平方向の加速は大きいので，運動方向は水平に近い。運動開始時における運動方向を一様流れ中での場合と比較すると，ノズル内流れでは，初期位置の流速は，水平方向成分が $U^*(=U/U)=1.03$，鉛直方向成分が $V^*(=V/U)=0.32$ 程度であり，水平方向あるいは鉛直方向の加速はノズル内流れ中での方が大きいが，水平方向の加速の増加割合の方が大きいため，運動方向はノズル内流れ中での場合の方が水平に近い。

しかし，ノズル内流れは鉛直方向成分をもち，しかも，この値は入口部平均流速にほぼ比例するので流速が大きいほど鉛直方向加速度 $\ddot{Y}$ の減少割合は一様流れ中での場合より小さく，加速度の方向と運動方向およびそれらの向きが一致して軌跡の接線勾配 dY/dX が極大になる点における dY/dX の値は，$U \geq 60$ (mm/S) の場合ノズル内流れ中での場合の方がわずかに大きくなる。その後も，加速度の方向は反時計回りに回転し続けるので dY/dX は減少する。そして，$\ddot{Y}$ に引続いて $\ddot{X}$ も負の値になり，

線状体の姿勢が水平方向に近づくにつれて，線状体に作用する抗力の鉛直方向成分と重力と浮力の差にもとづく外力が除々に釣合うようになるため，$\ddot{Y}$は0に近づく。一様流れ中での場合，姿勢が水平方向に漸近するにつれて，$\ddot{X}$も負の値を保ちながら0に近づいた。ノズル内流れ中での場合，流れが加速しているため，線状体が下流方向に運動するにつれて線状体回りの流速の水平方向成分は除々に増大する。このため，一様流れ中での場合に比べて水平方向の減速は小さく，図6.88を見れば分かるように$U=80$(mm/s)の場合，$\theta=58°$程度から水平方向に減速され始めるが，減速状態は$\theta=71°$程度で終了する。なお，流速が小さいほど線状体の水平方向移動距離は小さいので，水平方向に減速されるθの領域は広くなる。したがって，他の流れ中で見られたような加速度の方向と運動方向が一致し（両者の向きは逆），dY/dXが最小になる現象は見られず，運動方向はつねに水平方向に近づきながら線状体は管路底面に到達する。ただし，計算に用いた流れは壁面近傍の境界層の領域を考慮していないため，上述の結果になったのであり，実際の流れには流速が急激に低下する境界層が存在するので，他の流れ中での場合見られたようなdY/dXが最小になった後，運動方向が鉛直方向に近づく現象が現われると考えられる。

ここで，運動方向が水平方向に近づき始めた後の領域における落下軌跡を一様流れ中での結果（図6.13）と比較すると，流速が大きいほど水平方向移動距離は大きいので，流れが加速している影響を大きく受け，同一鉛直方向移動距離に対する水平方向移動距離はノズル内流れ中での場合の方が大きく，また，両者の差は流速が大きいほど大きい。さらに，運動方向と姿勢が一致するときのθの値は，ノズル内流れ中での場合$U=20,40,60,80$(mm/s)に対し$\theta=12.3°, 31.7°, 49.2°, 61.8°$となり，一様流れ中での場合との差は流速が大きいほど大きくなる。これも，流速が大きいほど流れが加速している影響を大

きく受けることが原因である。

$\ell = 30$ (mm) の場合，$U = 80$ (mm/s) のときでも底面に到達したときの姿勢は約69°であり，線状体が水平に近い姿勢になったときの落下軌跡を知ることができない。そこで，姿勢がさらに水平に近づいた場合，落下軌跡がどのようになるかを調べるために，長さの影響を表わす図6.80をつぎに示す。

この図において，$\ell \geq 30$ (mm) の場合，運動開始直後に運動方向が鉛直方向に近づき，dY/dX が極大になった後の領域では，運動方向をつねに水平方向に変えながら線状体は管路底面に到達する．すなわち，重心の軌跡には変曲点が1つ見られるだけである。これに対し，$\ell = 15$ (mm) の場合，比較的管路の上方で姿勢がほぼ水平になるため，その軌跡にはいくつかの変曲点が見られる。運動開始直後の領域，$Y = 76$ (mm)，$\theta = 4.8°$ で dY/dX は極大（約3.07）となり，運動方向が水平方向に近づき始める。そして，姿勢が水平に近づくにつれて水平方向に減速され始め，他の流れ中での場合と同様に加速度の方向と運動方向が一致し，両者の向きが逆であるので，$Y = 175$ (mm)，$\theta = 74.8°$ で dY/dX は極小（約0.83）となる。その後も，加速度の方向は除々に反時計回りに回転し続けるため，運動方向はゆっくり鉛直方向に近づく。ここまでの軌跡の変化の様子は他の流れ中での場合と同じであるが，ノズル内では流れが加速しているので，一様流れ中での場合に比べて水平方向の減速は小さく，$\ddot{X}$ (<0) の絶対値はより急激に減少し，加速度の方向は時計回りに回転して運動方向と一致する。この場合，両者の向きは逆であ

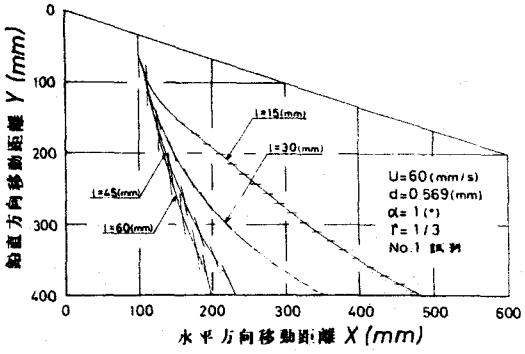


図6.80 落下軌跡におよぼす長さの影響

るが，加速度の方向が時計回りに回転して運動方向と一致するので，$Y=220\,(mm)$，$\theta=87.3°$でdY/dXは極大（約0.88）になる。線状体の位置はまだ管路中央部であり，その後も下流方向へ運動し続けるので，加速している流れの影響を受けて線状体はふたたび水平方向に加速され始める。そして，管路の下方に近づくにつれて，流れの方向が除々に水平方向になるので流速の鉛直方向成分が減少し，線状体に作用する抗力の鉛直方向成分が増大するため，線状体は鉛直方向によりいっそう減速される。したがって，管路底面に到達するまでの領域では運動方向はいっそう水平方向に近づく。

また，$\ell=15\sim60\,(mm)$の軌跡を比較すると，長さが小さいほど姿勢の変化が大きいので，水平方向には大きく加速されるが鉛直方向には加速されにくく，落下時間に伴なって重心の速度が変化する様子を表わす図6.91，6.93を見れば分かるように，運動開始後しばらくの間$\dot{X}$は大きく，$\dot{Y}$はつねに小さくなり，同一鉛直方向移動距離における運動方向は，長さが小さいほど水平に近い。さらに，長さが小さいほど線状体はノズルの上方で運動する。この長さの影響は他の流れ中での場合と同じである。

$\ell=15\,(mm)$の場合，姿勢がほぼ水平になり，その軌跡にはいくつかの変曲点が見られた。初期角度の影響を表わす図6.81において，$\alpha=30°$の場合，線状体は水平近くまで（底面到達時の姿勢は約87°である。）回転している。そこで，$\ell=15\,(mm)$，$\alpha=1°$の軌跡と$\ell=30\,(mm)$，$\alpha=30°$の軌跡を比較して，軌跡にいくつかの変曲点が現われる原因について考えてみる。

$\alpha=30°$の場合，他の初期角度の場合と同様に，その軌跡には運動開始直後の領域で変曲点（dY/dXが極大）が見られるだけであり，その後の領域では運動方向をつねに水平方向に変えながら線状体は管路底面に到達する。ここで，両者の姿勢の変化に対する水平方向移動距離を比べると，$\ell=15\,(mm)$の場合

，姿勢が1°から87°まで変化する間に線状体が水平方向に移動する距離は約133(mm)であり，これに対しα=30°の場合，θ=30°~87°変化する間の移動距離は約430(mm)である。したがって，α=30°の場合の方が流れが加速している影響を大きく受けることになり，線状体が水平方向に減速される領域は，50°<θ<80°程度とℓ=15(mm)の場合，47°<θ<88°程度，に比べて狭い。さらに，水平方向への減速は，一様流れ中での場合にも長さが大きいほど小さく，ℓ=15(mm)とℓ=30(mm)の水平方向加速度の最小値$\ddot{X}_{min}$の絶対値の差は53.2(mm/s²)（一様流れ中での場合，$\ddot{X}$の変化は運動開始直後に急激に減少する領域を除き，初期角度の影響を受けないので，表6.5に示したα=1°の値で比較した。）であり，ノズル内流れ中での場合54.6(mm/s²)となり，両者の差はわずかに大きくなる。すなわち，α=30°の場合の方が，流れが加速している影響を大きく受けて水平方向に減速されにくくなる。このため，加速度の方向は反時計回りに回転するが，運動方向と一致するまで回転することはなくふたたび時計回りに回転し始めるので，運動方向は水平方向に変化し続ける。

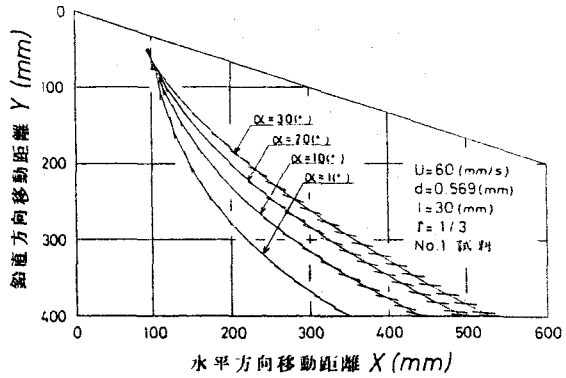


図6.81 落下軌跡におよぼす初期角度の影響

以上のことから，流れが加速している影響を大きく受けないうちに，姿勢が水平方向に近づきその後加速している影響を大きく受ける場合，すなわち姿勢が水平方向に近くなるまでに線状体が水平方向および鉛直方向に移動する距離が小さい場合，その軌跡にはいくつかの変曲点が現われる。なお，上述の説明では鉛直方向移動距離に関しては述べなかったが，鉛

直方向速度が非常に大きい場合，水平方向にあまり移動しないうちに底面に到達し流れが加速している影響を受けにくくなるので，鉛直方向移動距離が小さいという条件も付け加えた。したがって，長さが小さいほどこの条件に適合し，変曲点が顕著に現われると考えられる。

ここで，重心の軌跡におよぼす初期角度の影響を調べる。6.5.1項で述べたように，一様流れ中での場合，X，Y軸に沿って姿勢が同じになる位置まで平行移動すると，運動開始直後の急激な加速の領域を除き軌跡は初期角度にかかわらず一致する。

ところが，ノズル内流れ中での場合，流速のみならず流れの方向も場所的に変化するので，同一姿勢の線状体回りの流速および流れの方向は初期角度により異なる。このため，姿勢の変化に対する重心速度の変化は初期角度の影響を受ける。（図6.96，6.97参照）すなわち，同一姿勢に対する線状体の位置は初期角度が小さいほど下流側の下方であるため，$\dot{X}$は大きく$\dot{Y}$は小さくなる。したがって，運動方向は初期角度が小さいほど水平に近く，軌跡をX，Y軸に沿って姿勢が同じになる位置まで平行移動しても，初期角度にかかわらず一致することはない。ここで，矩形管内の十分に発達した流れ中での結果とあわせて考えると，場所的に変化する流れ中で線状体が運動する場合，位置のみならず軌跡の形にも初期角度の影響が現われることが分かる。

つぎに，ノズルの傾きが落下軌跡におよぼす影響を調べるために，$\gamma = 1/4, 1/3, 1/2$の落下軌跡を図6.82に示す。この図のノズル形状は$\gamma = 1/3$の場合であり，初期位置の鉛直方向座標はノズルの傾きにより異なり，$\gamma = 1/4, 1/3, 1/2$に対して$Y = 55, 63.3, 80$ (mm)である。

流れの方向はノズルの傾きが大きいほど鉛直方向に近いので，初期位置における流速の水平方向成分は傾きが大きいほど小

さく，鉛直方向成分は大きい。このため，水平方向の加速は小さく，鉛直方向の加速は大きくなり，運動開始時における運動方向はノズルの傾きが大きいほど鉛直に近くなる。そして，傾きが大きいほどノズルの断面積が小さく，ノズル上面と底面の交点からの距離が同一の位置での流速は大きくなるので，加速度の方向と運動方向およびそれらの向きが一致して軌跡の接線勾配 $\alpha Y/\alpha X$ が極小になる直前に $\dot{X}$，$\dot{Y}$ ともに傾きが大きいほど大きくなる。しかし，$\alpha Y/\alpha X$ が極小になる点では，傾きによる差は $\dot{Y}$ の方が大きいため，運動方向はまだ傾きが大きいほど鉛直に近い。

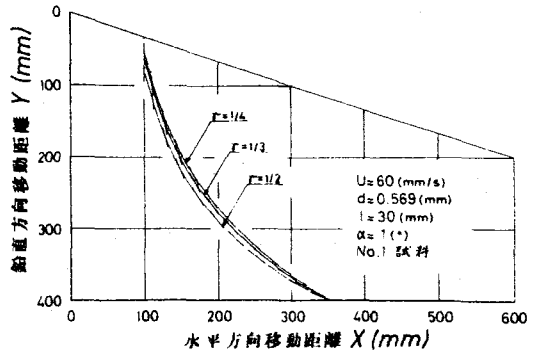


図6.82 落下軌跡におよぼすノズルの傾きの影響

その後もこの状態がしばらく続くが，線状体が下流側の下方へ運動し続けるにつれて，傾きが大きいほど流れが大きく加速する影響を受けて，傾きによる $\dot{X}$ の差は除々に増大し，$\dot{Y}$ の差は流れの方向が水平方向に近づくため減少する。このため，運動方向はノズルの傾きが大きいほど大きく変化して水平に近くなる。$\gamma=1/4$ と $1/2$ の運動方向を比較すると，$Y>310$ (mm) 程度の領域で $\gamma=1/2$ の方が水平に近い状態になる。

このように，ノズルの傾きが大きいほど，運動開始直後の領域では，流速の鉛直方向成分が大きい影響を受け，やがて，線状体が下流側の下方に位置するようになると流れが大きく加速している影響を強く受けて，運動方向がより大きく変化する。なお，線状体が運動する位置はノズルの傾きにより異なるが，底面に到達したときの水平方向移動距離は傾きにかかわらずほぼ同一になる。

つぎに，線状体が水平な姿勢から運動を開始する場合，軌跡

がどのように変化するかを調べるために，$\ell = 60\,(mm)$ の落下軌跡を図6.83に示す。運動開始直後に線状体は急激に加速されるが，その後下流側の下方へ運動し続けるにつれて，流れが加速している影響を受け水平方向には除々に加速される。しかし，流れの方向が水平方向に近づくため，鉛直方向にはわずかずつ減速される。したがって，運動方向は除々に水平方向に近づき，その軌跡には変曲点は見られない。なお，姿勢は流れが水平方向に対して傾いている影響を受け，運動開始時からゆっくり鉛直方向に回転し始めるが，線状体がノズル内の下方で運動するようになるにつれて，流れの方向が水平方向に近づくので，姿勢もふたたび水平方向に回転し始める。また，落下時間に伴なって変化する重心の速度を表わす図6.104，6.105から，$\dot{Y}$ は長さの影響を受けないが，$\dot{X}$ にはわずかに長さの影響が見られ，運動開始直後の領域を除き長さが大きいほど $\dot{X}$ は大きいことが分かる。これは，長さにかかわらず姿勢がほぼ水平であるので，長さが大きいほど流れが加速している影響を大きく受けるからである。したがって，同一鉛直方向移動距離における運動方向は長さが大きいほど水平に近い。しかし，その差はわずかである。

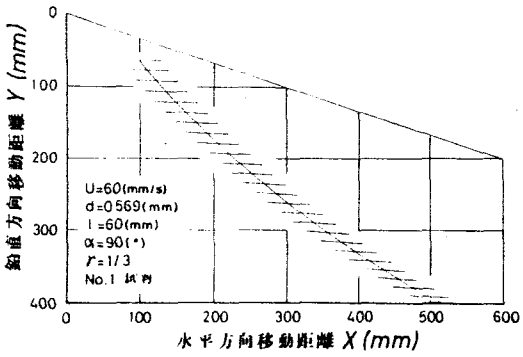


図6.83 $\alpha = 90°$ の場合の落下軌跡

以上の結果をまとめると，線状体がノズル内流れ中で運動する場合，運動開始直後に運動方向がいったん鉛直方向に近づくが，その後の領域では，流れが加速している影響を受けて底面に到達するまで運動方向は水平方向に近づく。しかし，姿勢が水平方向に近くなるまでに線状体が水平方向および鉛直方向に移動する距離が小さい場合，その軌跡にはいくつかの変

曲点が現われる。この現象は長さが小さいほど顕著に現われ，長さにより軌跡の様子が異なる。また，流れが加速しているため流速の影響は一様流れ中での場合より顕著に現われ，さらに，流れの方向も場所的に変化するので，初期角度およびノズルの傾きも落下軌跡に影響をおよぼす。なお，$\alpha=90°$の場合，長さが軌跡におよぼす影響はわずかである。

ここで，第5章の実験結果と比較する。実験では，管内の流れを乱さないようにするため，落下装置を管路上面に隣接して取付けているので，線状体が落下装置から流れ中に入るとき，急激に流れの向きに回転する現象が生じ，すべて流れ中に入ったときの姿勢は，たとえば図5.24に示す$\ell=30$(mm)の場合約25°になる。また，そのときの角速度は非常に大きく，さらに，線状体はある速度をもっている。したがって，計算の場合とは初期条件が異なる。また，計算では，管路壁面近傍に存在する流速変化が大きい境界層の領域を考慮していないことおよびノズルの傾きが実験の場合$\gamma=1/4$であるのに対し，計算では$\gamma=1/3$で諸要因の影響を調べたことなど，実験と計算では条件が異なることに注意する必要がある。

流速の影響を表わす図5.25と図6.79を比較すると，実験結果と計算結果の違いは，実験では軌跡に変動が見られるのに対し，計算では軌跡に変動が現われず，運動開始直後の領域を除き，運動方向は水平方向に近づくという点である。

軌跡が変動する現象は矩形管内流れ中での実験では現われず，ノズル内流れ中での実験で現われたことおよび唯一の層流域である$U=10$(mm/s)の場合にも，その大きさは小さいがこの現象が見られたことから，軌跡が変動するのは乱流の影響ではなく，ノズル内流れは加速しており，しかも流れの方向が場所的に変化するためであるという結果が得られた。

実験と同じように，初期位置が静止流体中にあり，この状態から線状体が運動を開始して除々に流れ中へ入るという条件

のもとで計算をおこなえば，線状体が流れ中に入り始めると角速度は急激に増大し，したがって回転を押える向きに作用する回転モーメントが増大するため，角速度が減少し始め，角速度が小さくなると流れが加速している影響を受けてふたたび増大し始めるという現象がノズルの上方で現われ，この姿勢の変動に伴なって軌跡が変動すると考えられる。また，底面近傍の境界層の領域を考慮すれば，他の流れ中での場合見られたような dY/dX が極小になった後運動方向が鉛直方向に近づく現象が現われると考えられる。しかし，実験で見られたような管路中央部で軌跡が変動する現象が上述の条件のもとでここで用いた計算方法により確かめられるかどうか分からない。

したがって，軌跡の変動におよぼす流速の影響について実験結果と計算結果を比較することはできないので，ここでは変動を除いた軌跡に対し両者の結果を比較する。

実験，計算ともに流速が大きいほど，同一鉛直方向移動距離における運動方向は水平に近く，線状体はノズルの上方で運動するという結果が得られた。ただし，実験では流速が大きいほど線状体が流れ中に入ったときの急激な回転が大きいことが原因となって，流速の影響が計算結果より顕著に現われている。また，実験結果でも運動開始してしばらくの間，運動方向は姿勢より水平に近いが，やがて一致し，その後姿勢の方が水平に近くなる現象が見られ，両者が一致するときの姿勢は流速が大きいほど水平に近く，この傾向は計算結果と一致する。

つぎに，長さの影響を表わす図5.24において，実験では長さが小さいほど軌跡の変動が大きくなった。実験結果と比較して変曲点の数は少なく，変動の大きさも小さいけれども，この結果は計算でも得られた。したがって，姿勢が水平に近くなるまでに線状体が水平方向および鉛直方向に移動する距離が小さい場合，軌跡の変動が大きくなることが実験と計算の両面から確かめられた。さらに，同一鉛直方向移動距離における運動

方向は長さが小さいほど水平に近く，線状体はノズル内の上方で運動することおよび同一姿勢に対する水平方向および鉛直方向移動距離は長さが大きいほど大きいことも，実験結果と計算結果で一致する。ただし，後者の結果は，長さが小さいほど急激な回転が大きいため実験の場合の方が顕著に現われる。

最後に，初期角度の影響を比較する。図5.17において，実験では初期角度が大きい（初期角度は流れの向きと逆向きに設定しているため，計算の場合と向きが異なる。）方が，線状体がすべて流れ中に入ったときの姿勢が鉛直に近いため，$\dot{Y}$は大きく，$\dot{X}$は小さくなり，軌跡はノズル内の下方に位置する。これは計算結果と一致する。さらに，初期角度は，線状体が運動する位置に影響を与えるが，その結果ノズル内の流れ特性により軌跡の形も異なることが，実験と計算の両面から確かめられた。

6.7.2 線状体重心の速度および加速度

流速が水平方向速度におよぼす影響を表わす図6.84，6.85において，他の流れ中での場合と同様に運動開始と同時に線状体は水平方向にも抗力を受けるため，水平方向にも急激に加速され，$\dot{X}$の増大に伴ない線状体に作用する抗力の水平方向成分が減少するため，その後$\dot{X}$の増大は除々に低下する。しかし，ノズル内流れは加速しているので，線状体が下流方向へ運動を続けるにつれて線状体回りの流速は増大する。したがって，図6.85と助走域での結果，図6.60，を比較すれば分かるように，水平方向加速度はノズル内流れ中での場合の方が大きい。また，図6.79から，同一姿勢，同一落下時間における水平方向移動距離は流速が大きいほど大きいことが分かり，このため流速が大きいほど流れが加速している影響を大きく受ける。したがって，$U \leqq 80$ (mm/s) の場合，加速状態は $\theta = 44° \sim 58°$，$t = 1.4 \sim 1.7$ (s) 程度まで続くが，流速が大きいほど加速時

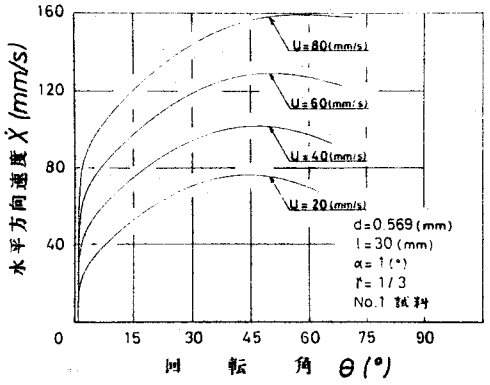


図6.84 水平方向速度におよぼす流速の影響

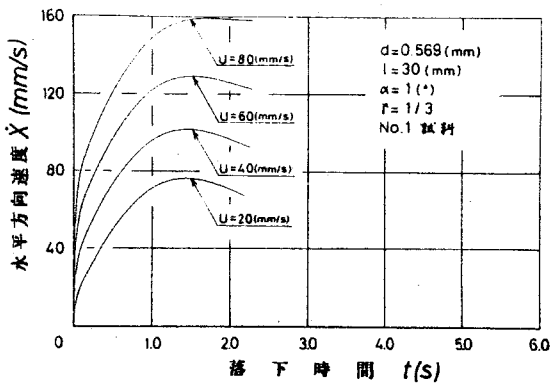


図6.85 水平方向速度におよぼす流速の影響

間は長く，より水平に近い姿勢になるまで加速される。さらに，流速による水平方向移動距離の差は落下時間に伴なって除々に増大するため，流速による$\dot{X}$の差は除々に広がる。これは，流れが加速していることが原因しており，一様流れ中での場合，$\theta > 15°$程度の領域で(6.73)式の関係が成立し，流速による$\dot{X}$の差は流速に等しいという結果が得られた。

やがて，線状体は水平方向に減速され始め，$U \leqq 60$ (mm/s)の場合，そのまま底面に到達する。ところが，$U = 80$ (mm/s)の場合，$\dot{X}$が減少し始めるときの位置はノズルのより下流側であるため，他の場合に比べて線状体回りの流速はいっそう大きく，いったん水平方向に減速され始めるが，減速は小さく，ふたたび加速される傾向にあることが分かる。このように，ノズル内流れ中での$\dot{X}$の変化の特徴は，いったん減少し始めるが，ノズル内の流れ特性によりふたたび加速されることであり，この現象は他の流れ中での場合には見られなかった。

ここで，ノズル内流れ中での結果，表6.15，と一様流れ中での結果，表6.4，を比較すると，一様流れ中での場合，$\dot{X}$が最大になるときの姿勢および加速時間は流速の影響を受けないのに対し，ノズル内流れ中での場合，流速の影響が明瞭に現

われている。また，一様流れ中での場合との$\dot{X}$の最大値の差は，$U=20$ (mm/s)の場合，4.2 (mm/s)，$U=80$ (mm/s)の場合，27.2 (mm/s)のように，流速が大きいほど大きいことが分かる。この結果は，最大値のみならずθの全領域で成立つことが，図6.16と図6.84の比較から分かる。これらはすべてノズル内の流れが加速していることに起因する。

表6.15　重心速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

線状体さ	流速	水平方向速度の最大値			鉛直方向速度の最大値		
l (mm)	U (mm/s)	$\dot{X}_{max}$ (mm/s)	θ (°)	t (s)	$\dot{Y}_{max}$ (mm/s)	θ (°)	t (s)
15	60	115.40	46.8	0.45	217.1	9.16	0.15
30	20	76.29	44.2	1.43	275.8	3.73	0.21
	40	101.84	46.6	1.45	272.9	4.21	0.21
	60	129.19	50.4	1.52	273.6	4.51	0.21
	80	159.27	57.6	1.71	275.7	5.03	0.22
45	60	——	—	—	306.8	3.31	0.26
60	60	——	—	—	328.3	2.70	0.29

d=0.569(mm), α=1(°), r=1/3, No.1 試料

つぎに，他の流れ中での場合と同様に，ノズル内流れ中での場合にも，水平方向速度が静止流体中での水平方向速度と重心での流速の水平方向成分W_{cx}の和（(6.77)式）で表わされる領域が存在するかどうかを調べる。

流速が小さい場合，線状体が水平方向に移動する距離は小さいので，流速の変化は小さく，$U=20$ (mm/s)の場合，$\theta>10°$程度の領域で(6.77)式の関係がほぼ成立するが，流速が大きくなるにつれて，線状体はより下流側で運動するようになるので，流速の変化が大きく，$U=80$ (mm/s)の場合，θの全領域で$\dot{X}<\dot{X}_s+W_{cx}$となる。矩形管内の助走域あるいは十分に発達した流れ中での場合にも，流速の変化が大きい上面近くの領域で急激に加速されるとき，慣性のため$\dot{X}<\dot{X}_s+W_c$であったこともあわせて考えると，流速の水平方向成分の増大が急激なほど，慣性のため$\dot{X}_s+W_{cx}$と$\dot{X}$の差は大きくなることが分かる。

いっぽう，線状体は運動開始と同時に，重力と浮力の差にもとづく外力の作用を受けて鉛直方向に急激に加速される。図6.86，6.87において，鉛直方向に加速される領域は$\theta<5°$程度であり，加速時間は約0.2 (s)である。その後抗力が増大するため，姿勢が水平方向に近づくにつれて$\dot{Y}$は単調に減少する。

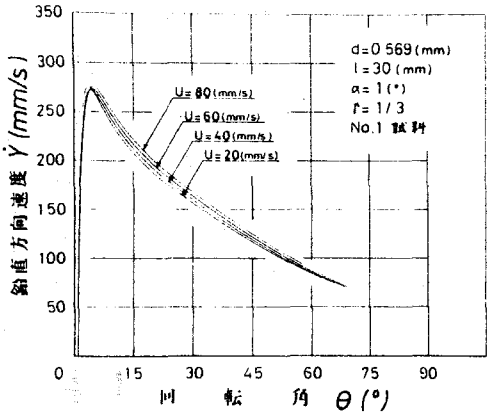


図6.86 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

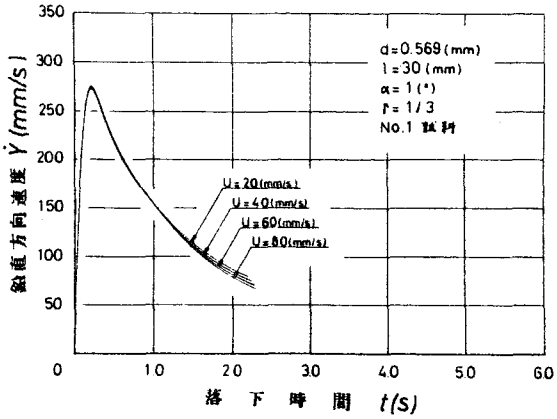


図6.87 鉛直方向速度におよぼす流速の影響

このように，$\dot{Y}$の変化の様子は他の流れ中での場合と同じになる。しかし，ノズル内流れは水平方向に対して傾いているため，流速は鉛直方向成分をもち，流れの方向が水平である他の流れ中での場合と流速が$\dot{Y}$におよぼす影響が異なる。すなわち，他の流れ中での場合，姿勢の変化に対する$\dot{Y}$の変化には運動開始後しばらくの間流速の影響が見られ，流速が小さいほど$\dot{Y}$は大きいが，やがて，流速にかかわらず同一曲線で表わされる。ところが，ノズル内流れ中での場合，減速領域では流速が大きいほど$\dot{Y}$は大きくなり，線状体が底面に近づくにつれて，流速の鉛直方向成分が0に近づくため，曲線は漸近するけれども一致することはない。

ここで，このような現象が生ずる原因について考えてみる。まず，運動開始直後の急激な加速領域では，姿勢の変化を表わす図6.107を見れば分かるように流速が大きいほど姿勢の変化は大きいが，その差はわずかである。これに対し，流速の鉛直方向成分は，流速による水平方向移動距離の差がまだ比較的小さいので，ほぼ流速に比例すると考えてよい。したがって，姿勢の変化の差より流速の鉛直方向成分の差の方が鉛直方向への加速に対して大きく寄与する。その結果，流れの方向が水平で

ある一様流れ中での場合に比べて，流速が大きいほど加速は大きくなり，表6.4と表6.15を比較すると両者の$\dot{Y}$の最大値の差は流速が大きいほど大きく，ノズル内流れ中での場合，$\dot{Y}$の最大値は流速に対して一定の傾向を示さず，流速による差も小さくなる。

そして，運動開始時からノズル入口部平均流速Uによる水平方向移動距離および姿勢の差は除々に広がるが，上述のように鉛直方向に加速されている領域では，Uによる$\dot{Y}$の差はわずかであるので，同一落下時間における鉛直方向移動距離にはほとんど差がない。したがって，鉛直方向に減速される領域では，同一落下時間における線状体回りの流速Wは，流れが加速しているため，Uが大きいほどいっそう大きくなり，UによるWの差は運動に伴なって除々に増大する。また，流れの方向θ_f（図6.5参照）もUが大きいほど鉛直に近く，姿勢は水平に近い。したがって，線状体に対する流体の相対速度の軸方向成分V_rは小さくなる。いっぽう，相対速度の軸に直角な方向成分U_rはUが大きいほどわずかに大きくなるため，U_rを代表速度とするRe（(6.23)式）を用いて計算されるNuが大きくなる。しかし，UによるV_rの差の方がNuの差より大きいので，(6.25)式で表わされる軸方向に作用する摩擦抗力D_yは，Uが大きいほど小さい。このように，抗力が小さくなることが主な原因で軸方向速度v（<0）の絶対値はUが大きいほど大きくなる。いっぽう，軸に直角な方向速度u（>0）はUが大きいほど大きい。また，同一落下時間におけるθの値はUが大きいほど大きい。したがって，重心の速度を表わす(6.17)式を考慮すると，θの値の小さい領域ではvの方が$\dot{Y}$に大きく寄与するため，Uが大きいほど同一落下時間における$\dot{Y}$（<0）の絶対値は大きくなる。しかし，uおよびθの値もUが大きいほど大きいので，Uによる$\dot{Y}$の差はわずかである。

ところが，姿勢が水平方向に回転するにつれて，重力と浮力

の差にもとづく外力の軸に直角な方向成分が増大するのでuは減少し，正の値から負の値へ移る。Uが小さいほど軸に直角な方向の加速が小さかったため，u>0の状態は短時間のうちに終了する。たとえば，U=20(mm/s)の場合，約0.5(s)，U=80(mm/s)の場合，約1.9(s)である。なお，θの増加に伴ないv̇(<0)の絶対値も減少するが，引続きUが大きいほどこの値は大きい。したがって，(6.17)式を考慮すると，θの値が大きくなるにつれてuの方がv̇に大きく寄与するため，u<0の状態になった後しばらくするとUが小さいほど同一落下時間におけるv̇(<0)の絶対値は大きくなる。

これまでは，落下時間に伴なってv̇が変化する状態について述べたが，つぎに，姿勢の変化に対するv̇の変化について考える。姿勢の変化はUが大きいほど大きく，同じ姿勢になるまでに要する時間はUが大きいほど短い。また，Uによる差は運動に伴ない除々に増大する。したがって，Uが大きいほど同一落下時間におけるv̇の値が小さい領域でも，同一姿勢で比較するとUが大きいほど大きくなる。すなわち，図6.86に示すように線状体が鉛直方向に減速される全領域で同一姿勢に対するv̇の値はUが大きいほど大きくなる。

以上述べたv̇の変化におよぼす流速の影響を現象論的に説明するとつぎのようになる。

姿勢が水平に近いほど鉛直方向の抗力は大きい。いっぽう，流れの方向が水平方向に対して傾いているために存在する流速の鉛直方向成分の向きが下向きであるので，これが大きいほど鉛直方向の抗力は小さくなる。また，Uが大きいほど，姿勢の変化は大きく，線状体回りの流速の鉛直方向成分は大きい。したがって，姿勢による抗力の増大と流速の鉛直方向成分による抗力の減少の大小関係にUがいかなる影響をおよぼすかを調べればよい。

減速され始めてからしばらくの領域では，Uによる姿勢の差

は比較的小さいのに対し，流速の鉛直方向成分の差は大きいので，Uが大きいほど抗力は小さくなる。したがって，鉛直方向への減速は小さく，この領域では$\dot{Y}$の値は大きい。ところが，線状体がノズルの下流側の下方へ移動するにつれて，線状体回りの流速は増大するけれども，流れの方向が水平方向に近づくため，流速の鉛直方向成分は除々に減少する。このため，Uによる差は除々に小さくなる。いっぽう，姿勢は水平方向に近づき，しかもUによる差は増大する。したがって，姿勢による抗力の増大の方が支配的になり，Uが大きいほど抗力は大きくなるので，鉛直方向に大きく減速されやがて$\dot{Y}$の値は小さくなる。そして，Uによる$\dot{Y}$の差は，線状体が底面に近づくにつれて除々に増大する。

また，同一姿勢に対する線状体の位置は，Uが大きいほど下流側の上方であるので，流速の鉛直方向成分は大きい。したがって，θの値の小さい領域では，流速の鉛直方向成分による抗力の減少の方が支配的であるため，$\dot{Y}$が減少し始める直後から同一姿勢に対する$\dot{Y}$の値はUが大きいほど大きくなる。いっぽう，$\ddot{Y}$の変化を表わす図6.89から，$\theta > 10°$程度の領域ではUが大きいほど$\ddot{Y}$(<0)の絶対値は大きくなる。ところが，角速度$\dot{Y}$の変化を表わす図6.108から，同一姿勢に対する$\dot{Y}$の値はUが大きいほど大きいので，θがある値からある値になるまでの時間は短い。このため，θと$\dot{Y}$の関係を表わす曲線において，$\dot{Y}$の減少割合はUにかかわらずほぼ同程度になり，Uが大きいほど同一姿勢に対する$\dot{Y}$の値が大きい状態が続く。

つぎに，一様流れ中での結果，図6.17，と比較すると，ノズル内流れは鉛直方向成分をもつため，θの全領域でノズル内流れ中での場合の方が$\dot{Y}$は大きい。また，Uが大きいほど流速の鉛直方向成分が大きいため，一様流れ中での場合との差は大きくなる。線状体が底面に近づくにつれて，流れの方向が水平に近づくので，両者の差は除々に減少する。

ここで，流速の鉛直方向成分の影響を調べるため水平方向速度に対しておこなったように，静止流体中での鉛直方向速度を $\dot{Y}_s$，重心での流速の鉛直方向成分を W_{cY} とするとき，ノズル内流れ中での鉛直方向速度が

$$\dot{Y} = \dot{Y}_s + W_{cY} \qquad (6.78)$$

なる関係で表わされるθの領域が存在するかどうかを調べた。その結果，W_{cY} は運動開始時から除々に減少することおよび U が大きいほど大きいこと，さらに，$U \leqq 80$ (mm/s) の範囲では W_{cY} は最大約26 (mm/s) であり，$\dot{Y}$ に比べて小さいので，$U = 20$ (mm/s) の場合，$\theta > 10°$ 程度の領域，$U = 80$ (mm/s) の場合，$\theta > 15°$ 程度の領域で (6.78) 式で表わされる関係が成立し，U が大きいほどこの関係が成立しないθの領域が広くなることが分かった。一様流れ中での場合，$\theta > 15°$ 程度の領域で流速の影響が見られなくなり，θと $\dot{Y}$ の関係が静止流体中での曲線と一致することから，(6.78) 式の関係が成立しないθの領域はノズル内流れ中での場合の方が狭くなる傾向にあることが分かる。なお，(6.78) 式の関係が成立しない領域では $\dot{Y} < \dot{Y}_s + W_{cY}$ となる。

以上のように，重心の速度の変化におよぼす流速の影響は他の流れ中での場合とはかなり異なるものになった。そこで，重心の加速度の変化におよぼす流速の影響を調べる。

図6.88，6.89において，他の流れ中での場合と大きく異なる点は，$\ddot{X}$ に関しては，運動開始直後に急激に減少した後，$\ddot{X}$ の減少が低下する領域では，たとえば助走域での場合（図6.63），$\theta > 10°$ 程度では流速の影響が見られなくなりθと $\ddot{X}$ の関係は同一曲線で表わされたのに対し，ノズル内流れ中での場合，θの全領域で流速が大きいほど $\ddot{X}$ の値は大きくなる。また，$\ddot{Y}$ に関しても，同じような現象が見られ，他の流れ中での場合，

$\ddot{Y}$が増大し始めると（助走域での場合，図6.64，$\theta > 15°$程度の領域），流速の影響が除々に見られなくなるのに対し，ノズル内流れ中での場合，この領域では（$\theta > 10°$程度の領域）流速が大きいほど$\ddot{Y}$（< 0）の絶対値は大きくなる。

同じ姿勢になるまでに線状体が水平方向に移動する距離は，Uが大きいほど大きく，しかも流れが加速しているため，同一姿勢に対する線状体回りの流速はUの差以上に大きくなる。たとえば，$\theta = 40°$程度のとき重心での流速の水平方向成分W_{cx}は，$U = 20$ (mm/s) の場合，約24 (mm/s)，$U = 80$ (mm/s) の場合，約102 (mm/s) である。すなわち，ノズル内流れ中での場合，入口部平均流速が大きいほど流速がより大きく増大する流れ中で線状体が運動することになる。矩形管内の十分に発達した流れ中での結果，図6.35，から管路上面近くの領域で線状体が運動する場合，$\ddot{X}$には平均流速の影響が見られ同一姿勢における$\ddot{X}$の値はUが大きいほど大きくなり，やがて，管路中央部の比較的流速の変化が小さい領域へ入るようになると，除々に平均流速の影響は見られなくなる。いっぽう，図6.36から，$\ddot{Y}$

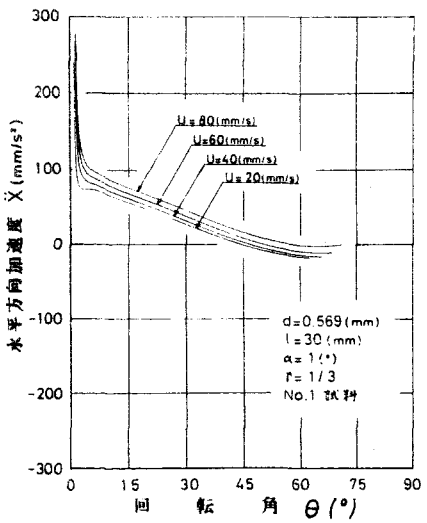


図6.88 水平方向加速度におよぼす流速の影響

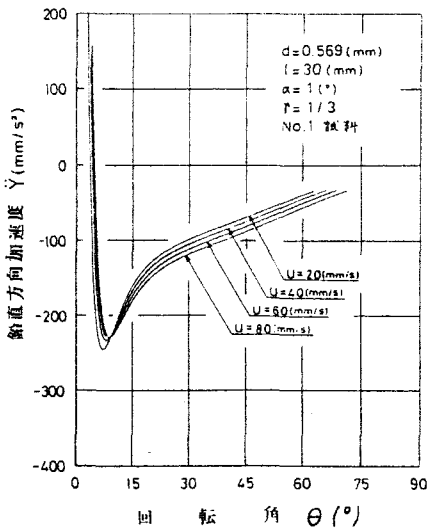


図6.89 鉛直方向加速度におよぼす流速の影響

が増大し始めてから後の領域では，同一姿勢における$\ddot{Y}$の値はUが大きいほど小さくなり，$\ddot{X}$の場合と同様に管路中央部へ入るようになると，除々に平均流速の影響が見られなくなる。この上面近くの領域では壁面から遠ざかるにつれて流速は増大している。また，Uが大きいほど場所による流速の差が大きい。したがって，流速がより大きく増大する流れ中で線状体が運動をおこなう場合ほど，同一姿勢における$\ddot{X}$の値は大きく，$\ddot{Y}$の値は小さいという結果が得られる。

この結果を考慮すると，ノズル内流れ中での場合，上述の結果になることが分かる。さらに，$U=80$(mm/s)の場合，流れが加速している影響を大きく受けるため，$\ddot{X}$は$\theta=58°$程度で負になるが水平方向への減速は$\theta=71°$程度で終了し，ふたたび加速される傾向にあることが分かる。また，線状体が水平方向に減速されるθの領域は，Uが大きいほど狭くなる。

一様流れ中での場合，いったん水平方向へ減速され始めると水平な姿勢になるまで$\ddot{X}<0$の状態が続き，$\theta=90°$で0になった。したがって，ノズル内流れ中での場合，いったん水平方向に減速され始めるが，水平な姿勢になる前にふたたび加速され始めることが特徴である。いっぽう，流速の鉛直方向成分は底面に近づくにつれて除々に0に近づくため，一様流れ中での場合と同様に$\ddot{Y}$はθの増加に伴なって増大し，θが90°に近づくにつれて0に近づく傾向にあることが分かる。

ここで，助走域での結果（図6.63，6.64）と比較すると，$\ddot{X}$の減少が低下する領域および$\ddot{Y}$が増大し始めてからの領域（これらの領域では助走域での$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の変化は一様流れ中での場合とほぼ一致する。）において，流れが加速しているため，$\ddot{X}$はノズル内流れ中での方が大きくなり，$\ddot{Y}$は小さくなる。なお，両者の差は$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$ともにUが大きいほど大きい。また，ノズル内流れ中での結果，表6.16，と一様流れ中での結果，表6.5を比較すると，$\ddot{Y}$の最小値の絶対値およびそのときのθの値

はノズル内流れ中での場合の方が大きく，両者の$\ddot{Y}$の最小値の差はUが大きいほど大きいことが分かる。流れの方向が水平である他の流れ中での結果の比較から，姿勢の変化が大きいほど，すなわち平均流速が同じ場合流れの発達程度が大きい（十分に発達した流れ状態に近い）流れ中での場合ほど$\ddot{Y}$の最小値の絶対値は小さいという結果が得られている。したがって，ノズル内流れ中での場合の方が一様流れ中での場合より姿勢の変化が大きいにもかかわらず$\ddot{Y}$の最小値の絶対値が大きくなる原因としては，流れが鉛直方向成分をもつため，姿勢の変化が大きいにもかかわらず鉛直方向へより大きく加速され（表6.4，6.15参照），その結果抗力の鉛直方向成分が一様流れ中での場合より大きくなるからである。また，Uが大きいほど両者の差が大きくなることも，線状体回りの流速の鉛直方向成分が大きいことに起因すると考えられる。

表6.16 鉛直方向加速度の最小値とそのときの姿勢

線状体長さ l (mm)	流速 U (mm/s)	鉛直方向加速度の最小値 $\ddot{Y}_{min}$ (mm/s²)	θ (°)
15	60	-380.3	21.61
30	20	-245.2	7.18
	40	-233.4	8.21
	60	-229.8	8.68
	80	-228.9	9.06
45	60	-179.4	5.54
60	60	-149.2	4.31

d=0.569(mm), α=1(°), β=1/3, No.1 試料

以上のように，流速の変化が大きい矩形管内での十分に発達した流れ中およびノズル内流れ中での場合と流速が変化しないあるいは変化が比較的小さい一様流れ中および助走域での場合を比較して，流れの加速の程度が大きいほど，$\ddot{X}$の減少が低下する領域では同一姿勢における$\ddot{X}$の値は大きく，また$\ddot{Y}$が増大し始めてから後の領域では$\ddot{Y}$の値は小さい（鉛直方向の減速が大きい）という結果が得られた。そこで，この原因について考えてみる。

まず，考え易くするために，各断面における流速が一様で水平方向に加速している流れ中での場合と一様流れ中での場合を比較する。重心での流速をWとすると，運動方程式（6.16）式

から，

$$\left.\begin{aligned} A\,du/dt &= rBv - r(A_1-B_1)W\sin\theta + A_1\,dW/dt\cos\theta + \ddot{X} \\ B\,dv/dt &= -rAu + r(A_1-B_1)W\cos\theta - B_1\,dW/dt\sin\theta + \ddot{Y} \end{aligned}\right\} \quad (6.79)$$

となり，一様流れ中での運動方程式（6.32)式と比較すると分かるように，流れが加速している影響は，$A_1\,dW/dt\cos\theta$と$-B_1\cdot dW/dt\sin\theta$の項で表わされる。したがって，加速している流れ中での場合の方が重心の軸に直角な方向の加速度du/dtは大きく，軸方向の加速度dv/dtは小さいことが分かる。いっぽう，$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$は（6.17)式を（6.18)式に代入して，

$$\left.\begin{aligned} \ddot{X} &= du/dt\cos\theta - dv/dt\sin\theta - r\dot{Y} \\ \ddot{Y} &= du/dt\sin\theta + dv/dt\cos\theta + r\dot{X} \end{aligned}\right\} \quad (6.80)$$

となる。

また，加速している流れ中での場合の方が，同一姿勢における$\dot{X}$の値は大きく，$\dot{Y}$（<0）の絶対値は小さいが，ここで考えているθの領域ではθの増加に伴ない一様流れ中での場合との差は除々に小さくなる。したがって，加速している流れ中での場合の方が，同一姿勢における$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の値は大きいことが分かる。ただし，(6.80)式では鉛直方向は上向きを正の向きとして計算しており，線状体は鉛直方向には下向きの運動するので，$\ddot{Y}$の値が大きいということは減速が大きいことを意味する。

つぎに，ノズル内流れのように流れが加速しており，しかもその方向が水平方向に対して傾いている場合（ただし，流速の水平方向成分の方が大きい場合），その角度をθ_fとすると流れが加速している影響を表わす各項は$A_1\,dW/dt\cos(\theta+\theta_f)$，$-B_1\cdot dW/dt\sin(\theta+\theta_f)$となるので，流れの方向が水平である場合に

比べて du/dt，dv/dt は小さくなる。したがって，流れが加速し，しかもその方向が水平方向に対して傾いている場合，流れが加速していることによる $\ddot{Y}$ の増大は，流れが傾いていることによって軽減されるが，流れが傾いている場合 $\ddot{Y}$ (<0) の絶対値は大きくなるので，$\ddot{X}$ に関しては軽減されるかどうか分からない。たとえ軽減されるにしても，その大きさは $\ddot{Y}$ に比べて小さい。図 6.89 において，U が大きいほど流速の鉛直方向成分は大きいため，$\ddot{Y}$ (<0) の絶対値の増大はよりいっそう軽減されており，この場合の加速と同程度でしかもその方向が水平であるような流れ中での場合，U による $\ddot{Y}$ の差はさらに大きくなると考えられる。

ノズル内流れ中での $\dot{X}$ の変化の特徴として，いったん減速され始めるが流れが加速している影響を受けて，水平な姿勢になる前にふたたび加速され始めるということをすでに述べた。この現象は，長さが $\dot{X}$ の変化におよぼす影響を表わす図 6.90, 6.91 において，$\ell=15$ (mm) の場合明確に現われている。

$\ell=15$ (mm) の場合，長さが小さいので姿勢の変化が大きく，水平に近い姿勢になるまでに水平方向に移動する距離は小さい。このため，流れが加速している影響を受けにくく，水平方向に比較的大きく減速された後，$\theta=88°$, $t=1.6$ (s) 程度（水平方向移動距離は，約 145 (mm)）からふたたび加速され始める。線状体が水平方向に加速され始めると，軸に直角な方向の加速度 du/dt および軸方向の加速度 dv/dt (<0) の絶対値は増大する。したがって，(6.80) 式を考慮すると，θ がほぼ 90° に近いため dv/dt は $\ddot{Y}$ の変化には寄与しないで，du/dt および $\dot{X}$ が増大することから $\ddot{Y}$ は増大することが分かる。すなわち，線状体は鉛直方向により大きく減速される。この現象は $\dot{Y}$ の変化を表わす図 6.92, 6.93 に明確に現われている。一様流れ中での場合，$\dot{Y}$ は姿勢が水平方向に近づくにつれて一定値に近づいたことから考えて，ノズル内流れ中での重心速度の変化の特徴は

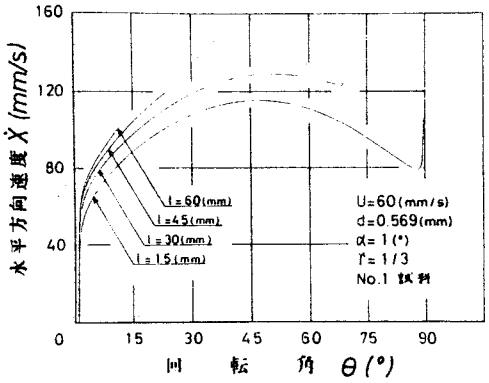


図6.90 水平方向速度におよぼす長さの影響

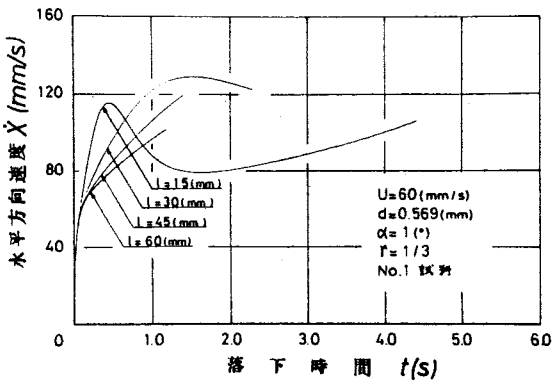


図6.91 水平方向速度におよぼす長さの影響

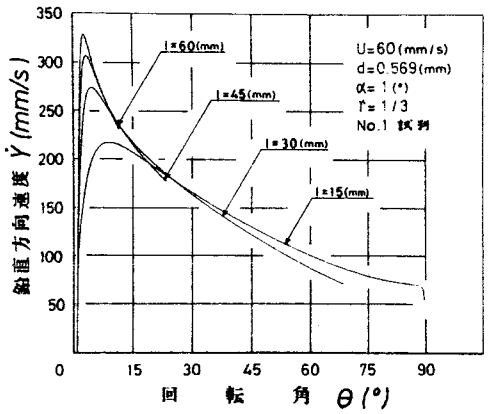


図6.92 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

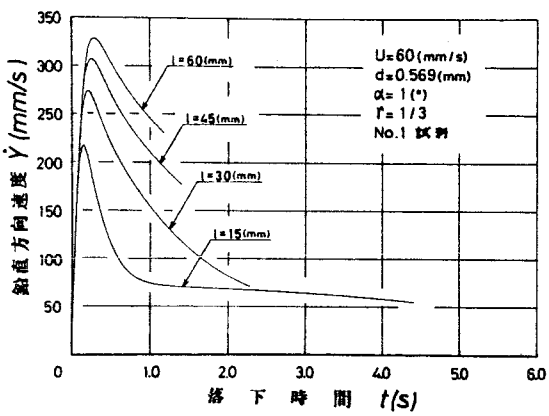


図6.93 鉛直方向速度におよぼす長さの影響

，水平方向にいったん減速され始めるがふたたび加速されることおよび鉛直方向の減速がふたたび増大することである。

ここで，長さが重心の速度の変化におよぼす影響を調べる。他の流れ中での場合と同様に，長さが小さいほど線状体が回転するのに要する時間は短い。したがって，姿勢が同じでも線状体回りの流速は長さにより大きく異なる。同一姿勢に対する水平方向および鉛直方向移動距離は長さが大きいほど大きいので，姿勢が同一のとき，線状体回りの流速は長さが大きい

ほど大きくなる。このため，他の流れ中での場合と同様に同一姿勢に対する$\dot{X}$の値は長さが大きいほど大きくなるが，流速が変化しないあるいは変化が比較的小さい一様流れ中および助走域での場合（図6.18，6.65）と比較して，長さによる$\dot{X}$の差はノズル内流れ中での場合の方が大きいことが分かる。また，一様流れ中での場合，$\theta < 65°$程度の領域でこの現象が見られたのに対し，ノズル内流れ中での場合，θの全領域でこの現象が現われ，しかも，同一姿勢に対する線状体の移動距離の差はθの増加に伴なって大きくなるため，長さによる$\dot{X}$の差もθの増加に伴ない除々に広がる傾向にある。さらに，表6.15から，長さが大きい方がより水平に近い姿勢になるまで水平方向に加速され，この結果は他の流れ中での場合と異なる。これは，流れが加速し続けているためである。したがって，十分に発達した流れ中での結果とあわせて考えると，流れが水平方向に加速される程度が大きいほど，姿勢の変化に対する$\dot{X}$の変化に長さの影響がより顕著に現われることが分かる。

つぎに，同一落下時間における$\dot{X}$の値を比較すると，他の流れ中での場合と同様に，加速領域では長さが小さいほど大きくなり，加速時間は長さが大きい方が姿勢の変化が小さいため大きくなることが分かる。ここで，十分に発達した流れ中での結果，図6.38，と比較すると，両者ともに同一落下時間における水平方向移動距離は長さが大きいほど小さく，鉛直方向移動距離は大きいが，十分に発達した流れは鉛直方向に流速が分布しているのに対し，ノズル内流れは水平方向に加速しているため，同一落下時間における線状体回りの流速は，前者の場合，長さが大きいほど大きいが，後者の場合，長さが大きいほどわずかに小さくなる。したがって，ノズル内流れ中での場合の方が長さによる$\dot{X}$の差は大きい。

いっぽう，姿勢の変化に対する$\dot{Y}$の変化におよぼす長さの影響は他の流れ中での場合と異なる。他の流れ中での場合，θの増

加に伴ない長さの影響は除々に見られなくなり，$\theta < 60°$程度の領域では$\dot{Y}$は長さが大きいほど大きいが，これ以上の領域では長さの影響を受けない。これに対し，ノズル内流れ中での場合，$\dot{Y}$が長さの影響を受けないθの領域は存在しない。あるθの領域までは長さが大きい方が$\dot{Y}$の値は大きいが，線状体が管路底面に近づくと逆に小さくなる。他の流れの場合，流れの方向は水平方向であるのに対し，ノズル内流れは水平方向に対して傾いているので，流速は鉛直方向成分をもつが，流れ方向は底面に近づくにつれて水平方向に近づくため，流速の鉛直方向成分は0に近づく。また，同一姿勢における線状体の鉛直方向移動距離は長さが大きいほど大きいので，線状体回りの流速の鉛直方向成分が小さくなり，このため，線状体が底面に近づくと長さが大きい方が$\dot{Y}$の値が小さくなる現象が生ずる。すなわち，一様流れ中での結果，図6.19，と比較すれば分かるように，同一姿勢での$\dot{Y}$の値はノズル内流れ中での場合の方が大きいが，線状体が底面に近づくにつれてノズル内流れ中での曲線は一様流れ中での曲線に近づく。そして，底面に近づくときの姿勢は長さが大きいほど鉛直に近いので上述の現象が生ずる。なお，$\ell = 15$ (mm)の場合，ほぼ水平な姿勢になる位置は管路中央部である（たとえば，θが約88°になる位置は$Y = 230$ (mm)程度である。）ので，線状体が底面に近づくにつれて$\dot{Y}$が減少する状態が他の長さの場合より顕著に現われている。

また，一様流れ中での結果，表6.4と表6.15を比較すると，$\dot{Y}$の最大値は，ノズル内流れ中での場合の方がほぼ等しいかあるいは大きくなり，長さが小さいほど両者の差は大きいことが分かる。ノズル内流れは加速しているので，ノズル内流れ中での場合の方が姿勢の変化は大きく，角速度の増大する割合は長さが大きいほど大きい。このため，一様流れ中での場合に比べて長さが大きいほど鉛直方向に加速されにくくなる。いっぽう，同一姿勢における流速の鉛直方向成分は，長さが大きいほど

小さいので，一様流れ中での場合に比べて鉛直方向速度が増大する割合は小さくなる。したがって，上述の結果になり，長さによる$\ddot{Y}$の最大値の差はノズル内流れ中での場合の方が小さい。また，ノズル内流れ中での場合にも，加速時間は長さが大きいほど長くなる傾向にあり，$\ddot{Y}$が最大になるときの姿勢は鉛直に近い。

つぎに，重心の加速度の変化を表わす図6.94，6.95において，姿勢の変化は長さが小さいほど大きく，また，姿勢が同じでも線状体回りの流速は長さにより異なるため，姿勢の変化に対する$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$の変化には長さの影響が大きく現われている。この長さの影響は数値的には異なるけれども，その概要は他の流れ中，たとえば十分に発達した流れ中での結果，図6.41，6.42（ただし，底面近くの領域で$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$が急激に変化する領域は除く），と同じである。また，$\ell=15$(mm)の場合，ノズル内流れ中での重心加速度の変化の特徴を表わす，$\ddot{X}$がいったん負の値になるが水平な姿勢になる前にふたたび正の値へ移ることおよびこれに伴ない増大していた$\ddot{Y}$がふたたび減少するという現象

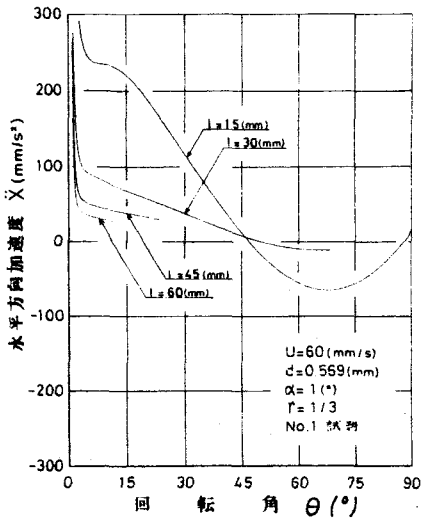


図6.94 水平方向加速度におよぼす長さの影響

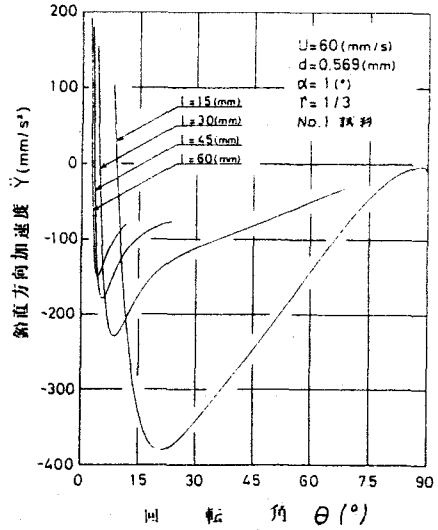


図6.95 鉛直方向加速度におよぼす長さの影響

が現われている。

すでに述べたように，$\ddot{X}$の減少が低下する領域および$\ddot{Y}$が増大し始めてからの領域では，流れの加速程度が大きいほど同一姿勢における$\ddot{X}$の値は大きく，$\ddot{Y}$の値は小さい。したがって，十分に発達した流れ中および助走域での結果（図6.69，6.70）と比較すれば分かるように，長さにかかわらずノズル内流れ中での曲線は両者の中間に位置する。ただし，途中から$\ddot{X}$に関しては，ノズル内流れ中での場合がもっとも大きくなり，$\ddot{Y}$に関してはもっとも小さくなるのは，ノズル内の流れは加速し続けているのに対し，十分に発達した流れの場合，上面近くの領域では流れは急激に加速し，その加速程度はノズル内流れの場合より大きいが，管路中央部に移るにつれて流れの加速は減少しノズル内流れより小さくなるからである。

また，一様流れ中での結果，表6.5と表6.16を比較すると，$\ddot{Y}$の最小値の絶対値およびそのときのθの値はノズル内流れ中での場合の方が大きいことが分かる。これは，流速の影響の所で述べたように，流れが鉛直方向成分をもつため，姿勢の変化が大きいにもかかわらず鉛直方向へより大きく加速され，その結果抗力の鉛直方向成分が一様流れ中での場合より大きくなるからである。なお，両者の差は，流速に対しては一定の傾向を示したが，長さに対し一定の傾向を示さないのは，運動開始直後に鉛直方向に急激に加速されるとき，長さが大きいほど流速の鉛直方向成分の影響が小さいからである。

ノズル内流れ中での重心速度の変化の特徴，水平方向にいったん減速されるがふたたび加速されることおよびこれに伴ない鉛直方向の減速が増大する現象は，初期角度が重心の速度の変化におよぼす影響を表わす図6.96，6.97において，$\alpha=20°$，$30°$の場合にも見られる。$\dot{X}$がふたたび増大し始めるときの姿勢は約$80°$であり，その位置（X，Y）は$\alpha=20°$の場合，（410，355），$\alpha=30°$の場合，（380，315）程度と後者の方がノズ

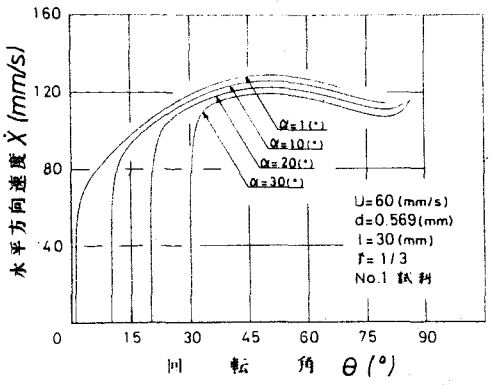


図6.96 水平方向速度におよぼす初期角度の影響

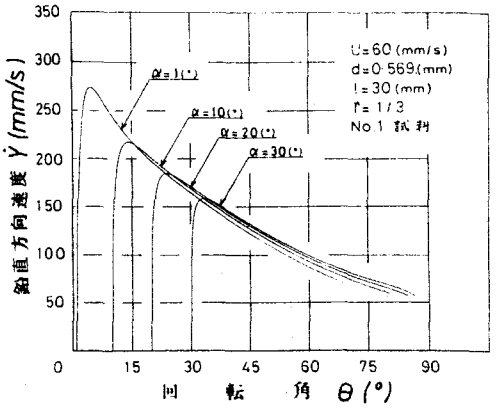


図6.97 鉛直方向速度におよぼす初期角度の影響

ルのより上方であるので，$\dot{X}$が増大する現象が顕著に現われる。また，鉛直方向の減速が増大する現象は，$\dot{X}$が増大し始めた後しばらくして（この場合約84°）生ずる。

一様流れ中での場合，水平な姿勢に近づくにつれて，軸に直角な方向の加速度du/dtは負の値を保ちながら0に近づき，軸方向の加速度dv/dtは正の値を保って0に近づく。すなわち，線状体は軸に直角な方向には加速され，軸方向には減速されながら，水平な姿勢に近づき一定速度になる。これに対し，ノズル内流れ中での場合，流れが加速しているので，$\dot{X}$が減少し始めると，一様流れ中での場合より短時間のうちにdu/dt, dv/dtは0に近づく。とくに姿勢が水平に近いためdv/dtの方が早く0に近づく。したがって，(6.80)式を考慮すると$\ddot{X}$の方が短時間のうちに正の値になり，$\dot{X}$が増大し始めることが分かる。その後，dv/dtは負の値になり（軸方向に加速され始める。），しばらくして$\ddot{Y}$の絶対値が増大し始め（鉛直方向の減速が増大し始める。），やがてdu/dtの値は正になる。

ここで，初期角度の影響を調べる。一様流れ中での場合，姿勢の変化に対する速度の変化は，運動開始直後の急激な加速領域を除き，初期角度にかかわらず同一曲線で表わされる。いっ

ぽう，十分に発達した流れ中での場合，運動開始後しばらくすると，姿勢の変化に対する$\dot{Y}$の変化は初期角度にかかわらず同一曲線で表わされるが，$\dot{X}$の変化は初期角度の影響を受け同一曲線で表わされることはない。ところが，ノズル内流れ中での場合，$\dot{X}$，$\dot{Y}$ともに初期角度の影響を受け，同一姿勢に対する$\dot{X}$の値は初期角度が小さいほど大きく，運動開始直後の急激な加速領域を過ぎると$\dot{Y}$の値は初期角度が大きいほど大きくなる。これはつぎの原因による。同一姿勢における水平方向および鉛直方向移動距離は初期角度が小さいほど大きく，また，流れは加速しておりしかも水平方向に対して傾いている。このため，姿勢が同一のとき線状体回りの流速の水平方向成分は，初期角度が小さいほど大きく，鉛直方向成分は小さくなるからである。

また，運動開始直後の急激な加速領域を過ぎると，姿勢がある角度からある角度まで変化する間に線状体が水平方向に移動する距離は初期角度が小さいほど大きく，逆に鉛直方向に移動する距離は小さい。したがって，θの増加に伴ない初期角度による水平方向移動距離の差は増大し，鉛直方向移動距離の差は減少する。このため，初期角度が小さいほど線状体回りの流速の増大割合は大きく，流れ方向θ_fの減少割合は小さく，初期角度による重心での流速の水平方向成分W_{cx}（$=W_c\cos\theta_f$）の差はθに関係なくほぼ一定になる。ところが，流速の鉛直方向成分W_{cY}（$=W_c\sin\theta_f$）の差はθの増加に伴ない増大する。すでに述べたように，入口部平均流速Uが小さい場合，静止流体中での水平方向速度を$\dot{X}_s$とすると，$\dot{X}=\dot{X}_s+W_{cx}$の関係がほぼ成立する（たとえば$U=20$(mm/s)の場合，$\theta>10°$程度の領域）が，Uが大きくなるにつれて$\dot{X}<\dot{X}_s+W_{cx}$となる。しかし，運動開始後の小さい領域を除き，$\dot{X}_s+W_{cx}$と$\dot{X}$の差はほぼ一定になる。また，$\dot{Y}$に関しても，$\dot{Y}=\dot{Y}_s+W_{cY}$の関係が成立する。ただし，Uが大きくなるにつれてこの関係が成立しないθ

の領域は広がる傾向にある。以上の関係は初期角度に関係なく成立すると考えられるので，上述の結果を考慮すると，運動開始直後の急激な加速領域を過ぎてしばらくすると，初期角度による$\dot{X}$の差はθに関係なくほぼ一定となり，$\dot{Y}$の差はθの増加に伴ない増大することが分かる。

これは，図6.96，6.97および表6.17に明確に現われており，$\dot{X}$が最大になるときのθの値は初期角度の影響をほとんど受けず，$\alpha=1°$と$\alpha=30°$の$\dot{X}$の最大値の差は約10(mm/s)である。一様流れ中での場合には初期角度にかかわらずθと$\dot{X}$の関係は同一曲線で表わされたが，ノズル内流れ中での場合，初期角度による差がθに関係なくほぼ一定になることが特徴である。すなわち，同一姿勢における曲線の接線勾配$d\dot{X}/d\theta$は初期角度にかかわらずほぼ同一になる。これに対し，θと$\dot{Y}$の関係を表わす曲線の接線勾配$d\dot{Y}/d\theta$(<0)の絶対値は初期角度が小さいほど大きいことが分かる。

表6.17 重心速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

初期角度	水平方向速度の最大値			鉛直方向速度の最大値		
α (°)	$\dot{X}_{max}$(mm/s)	θ (°)	t (s)	$\dot{Y}_{max}$(mm/s)	θ (°)	t (s)
1	129.19	50.4	1.52	273.6	4.51	0.21
10	126.02	50.4	1.24	217.2	14.01	0.19
20	122.71	50.3	0.97	184.3	23.91	0.18
30	119.43	49.9	0.69	158.4	33.42	0.17

d=0.569(mm)，l=30(mm)，U=60(mm/s)，γ=1/3，No.1 試料

いっぽう，角速度γの変化を表わす図6.116から，運動開始直後の急激な加速領域を過ぎると同一姿勢におけるγの値は初期角度にかかわらずほぼ同一になるが，θの増加に伴ない初期角度による差は広がる傾向にある。しかし，その差はわずかである。

重心の加速度$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$は

$$\left.\begin{aligned}\ddot{X}&=\gamma\, d\dot{X}/d\theta\\ \ddot{Y}&=\gamma\, d\dot{Y}/d\theta\end{aligned}\right\} \qquad (6.81)$$

となる。したがって，運動開始直後の急激な加速領域を過

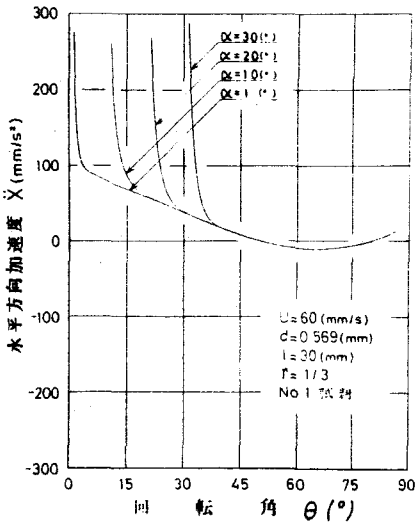


図6.98 水平方向加速度におよぼす初期角度の影響

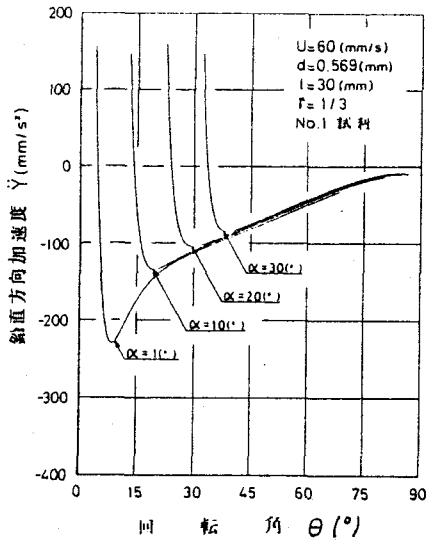


図6.99 鉛直方向加速度におよぼす初期角度の影響

ぎてしばらくすると，θとẌの関係は初期角度にかかわらずほぼ同一曲線で表わされ，同一姿勢における$\ddot{Y}$（<0）の絶対値は初期角度が小さいほど大きくなる。

姿勢の変化に対するẌ，$\ddot{Y}$の変化の様子は図6.98，6.99を見ればいっそう明確に分かる。α=10°～30°のẌの曲線は運動開始時から急激に減少してα=1°の曲線に近づき一致するが，$\ddot{Y}$の曲線はα=1°の曲線に近づくけれども一致しない。したがって，表6.18に示すように，Ẍの最小値およびそのときのθの値はほとんど初期角度の影響を受けない。なお，θが増加するとẌに初期角度による差がわづかに現われ始めるのは，θの増加に伴ない初期角度によるYの差が広がる傾向を示すからである。

これまでは，ノズルの傾きγが1/3の場合であったが，つぎに，ノズルの傾きが重心の速度の変化におよぼす影響を調べる。

表6.18 重心加速度の最小値とそのときの姿勢

初期角度	水平方向加速度の最小値		鉛直方向加速度の最小値	
α (°)	$\ddot{X}_{min}$(mm/s²)	θ (°)	$\ddot{Y}_{min}$(mm/s²)	θ (°)
1	——	——	-229.8	8.68
10	-10.54	65.6	-134.2	19.54
20	-10.33	65.4	-100.4	29.72
30	-10.49	65.0	-84.9	38.47

d=0.569(mm), l=30(mm), U=60(mm/s), r=1/3, No.1 試料

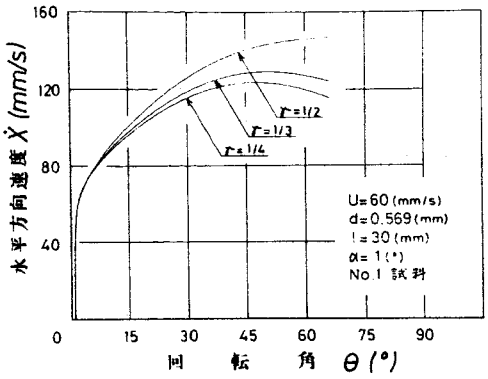


図6.100 水平方向速度におよぼすノズル傾きの影響

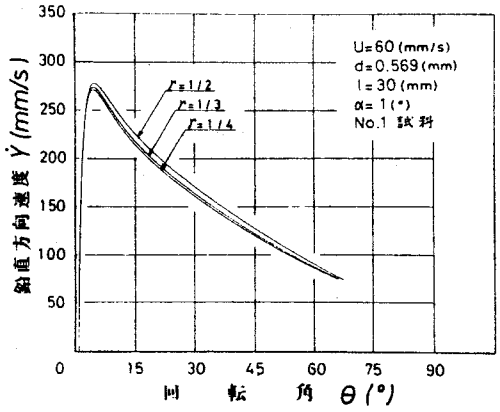


図6.101 鉛直方向速度におよぼすノズル傾きの影響

$\gamma=1/3$ の場合，水平方向にふたたび加速される以前の領域でいったん減速される現象が見られたが，図6.100において，$\gamma=1/2$ の場合を見ると，水平方向にいったん減速されることなく $\theta=64°$ 程度から $\dot{X}$ の増大割合が大きくなることが分かる。この様子は，$\ddot{X}$ の変化を表わす図6.102において，$\ddot{X}$ は θ の増加に伴ない減少するが，$\gamma=1/2$ の場合，負の値にはならず $\theta=64°$ 程度で最小，約4 (mm/s²)，となりふたたび増大し始めることからいっそう明確になる。

姿勢の変化を表わす図6.117から，ノズルの傾きが大きいほど姿勢の変化が大きいので，同じ姿勢になるまでに線状体が水平方向および鉛直方向に移動する距離は小さいけれども，初期位置がノズル内のより下方であるため，同一姿勢における Y の値は大きい。ところが，ノズルの傾きが大きいほど流れの加速程度および水平方向に対する流れの傾きは大きいので，姿勢が同一のとき線状体回りの流速の水平方向成分および鉛直方向成分は大きくなる。このため，同一姿勢における $\dot{X}$，$\dot{Y}$ の値はノズルの傾きが大きいほど大きい。

また，ノズルの傾きが重心の加速度の変化におよぼす影響を表わす図6.102，6.103において，ノズルの傾きが大きいほど，

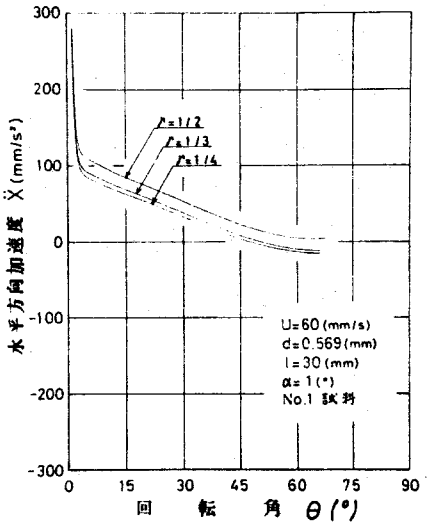


図6.102 水平方向加速度におよぼすノズル傾きの影響

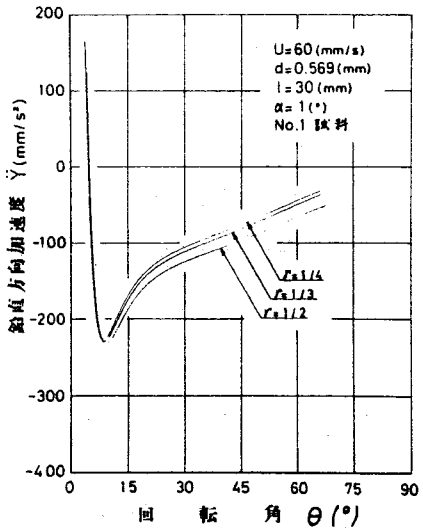


図6.103 鉛直方向加速度におよぼすノズル傾きの影響

$\ddot{X}$の減少が低下する領域では同一姿勢における$\ddot{X}$の値は大きく，また，$\ddot{Y}$が増大し始めてから後の領域では$\ddot{Y}$(<0)の絶対値も大きい。これは，ノズルの傾きが大きいほど流れの加速程度が大きいことから考えて，これまでの結果と一致する。さらに，ノズルの傾きが大きいほど流速の鉛直方向成分は大きいので，$\ddot{Y}$(<0)の絶対値の増大はよりいっそう軽減されており，$\gamma = 1/4 \sim 1/2$と同程度加速し，しかもその方向が水平であるような流れ中での場合，加速の程度の違いによる$\ddot{Y}$の差はさらに大きくなる。なお，$\gamma = 1/2$の場合，$\ddot{Y}$の絶対値がふたたび増大する現象が見られないのは，他のγの場合に比べて短時間のうちにdu/dtおよびdv/dtは0に近づき$\ddot{X}$はふたたび増大し始めるが，その位置は$Y = 385$(mm)程度でありdv/dtが負になる前に線状体が底面に到達するからである。

最後に，線状体が水平な姿勢から運動を始める場合，重心の速度がどのように変化するかを調べる。図6.104，6.105において，運動開始直後に線状体は急激に加速されるが，その後下流側の下方へ運動し続けるにつれて流れが加速している影響を

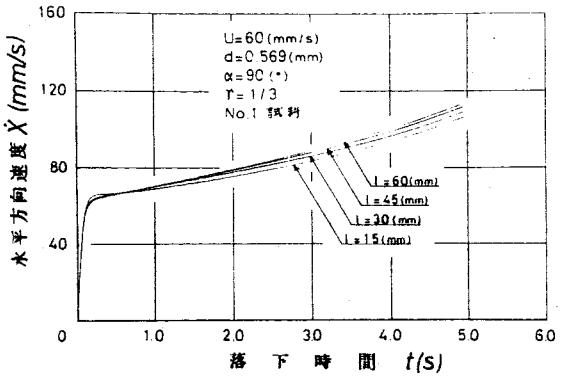


図6.104 $\alpha=90°$の場合の水平方向速度の変化

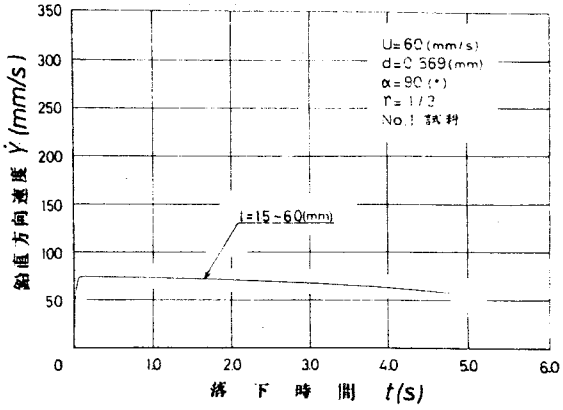


図6.105 $\alpha=90°$の場合の鉛直方向速度の変化

受けて，水平方向には除々に加速されるが，流速の鉛直方向成分は除々に減少しているので，鉛直方向にはわずかずつ減速される。また，$\dot{Y}$は長さの影響を受けないが，$\dot{X}$は長さの影響を受ける。姿勢の変化を表わす図6.120から，流れが水平方向に対して傾いている影響を受け，$\ell=15$(mm)の場合，運動開始後短時間のうちに鉛直方向にわずかに($\theta=88°$程度)傾きふたたび水平方向に除々に近づくが，$\ell=30\sim60$(mm)の場合，ゆっくり鉛直方向に回転する。なお，長さが大きいほど流れが傾いている影響を大きく受けるため，運動開始後間もなく同一落下時間におけるθの値は長さが大きいほど小さくなる。したがって，運動開始直後の水平方向加速度は$\ell=15$(mm)の場合がもっとも大きく，$\ell=30\sim60$(mm)ではほとんど差が見られない。やがて，長さが大きいほどθの値が小さくなり，しかも流れが加速している影響をより大きく受けるため，水平方向加速度は大きくなり，同一落下時間における$\dot{X}$の値が大きい状態が底面に到達するまで続く。

以上の結果をまとめると，ノズル内流れ中での重心速度の変化の特徴は，水平方向にいったん減速されるが水平な姿勢になる前にふたたび加速されることおよびこの現象に伴ない鉛直方

向の減速がふたたび増大することである。なお，流れの加速程度が大きい場合，水平方向にいったん減速されることなく水平方向加速度が増大し始める現象が生ずる。また，4種類の流れ中での結果を総合して，流れの加速程度が大きいほど，$\ddot{X}$の減少が低下する領域では同一姿勢における$\ddot{X}$の値は大きく，$\ddot{Y}$が増大し始めてから後の領域では$\ddot{Y}$の値は小さい。さらに，ノズル内では流れが加速し続けていることおよびその方向が水平方向に対して傾いているため，重心の速度および加速度の変化におよぼす流速，長さ，初期角度の影響が他の流れ中での場合より顕著に現われる。

ここで，第5章の実験結果と比較する。前項で述べたように，実験結果と計算結果の違いは，実験では軌跡に変動が見られたのに対し，計算では$\ell=15$(mm)の場合わずかに変動が見られるだけであり，しかも変曲点の数は少なく変動の大きさも小さい。したがって，姿勢の変化に対する重心速度の変化にもこの違いが現われており，たとえば実験結果，図5.15，5.16，において，$\dot{X}$，$\dot{Y}$は矩形管内流れ中での場合のように滑らかに変化せず，加速と減速を繰返す現象が見られるのに対し，計算では水平方向にいったん減速されるがふたたび加速される現象およびこれに伴ない鉛直方向の減速が増大する現象が見られるだけである。なお，前項で述べたように，実験と同じ初期条件（静止流体中から運動を始めて流れ中へ入る。）のもとで計算をおこなえば，ノズルの上方で姿勢が変動するため，これに伴ない重心の速度が変動する現象が現われる可能性があり，また，底面近傍の境界層を考慮すれば，水平方向にふたたび加速された後この領域へ入って急激に減速される現象が見られると考えられる。しかし，実験で見られたような管路中央部で運動する際重心の速度が変動する現象が，ここで用いた計算方法により確かめられるかどうか分からない。

しかし，実験，計算ともに，同一姿勢における$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は

矩形管内の助走域での場合より大きく（ただし，実験では速度が変動するため，$\dot{X}$に関しては一部の領域で助走域での場合の方が大きくなる。），また，線状体が底面に近づくにつれて（θの増加に伴なって），流れの方向が水平方向に近づくので，両者の$\dot{Y}$の差は減少するという結果が得られた。

実験では，角速度が急激に減速されてほとんど0となり，ふたたび加速され始めるという現象が見られ，この角速度の変動に伴ない重心の速度も加速と減速を繰返した。そこで，ここで用いた理論式により重心の速度が変動する状態を調べる。

図6.106に$U=60$(mm/s)，$\alpha=0.569$(mm)，$\ell=30$(mm)のNo.1試料に対する実験結果を示す。この図は落下時間に伴なってθ，$\dot{X}$および$\dot{Y}$が変化する様子を表わしており，姿勢の変動に伴ない$\dot{X}$，$\dot{Y}$が変動する状態が明確に分かるように3者を併記した。なお，この場合の姿勢の変化に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の変化は図5.15，5.16に示してある。

図6.106において，角速度（θの変化を表わす曲線の接線勾配）が，急激に減速され始めると，水平方向加速度は減少して$\dot{X}$は最大となり，その後水平方向に減速され始める。この減速状態はθがほとんど一定（約38°）の状態を経て角速度がふたたび加速され始める直後まで続き，やがて水平方向にふたたび加速される。これに対し，角速度が急激に減速され始めても鉛直方向加速度（<0）は除々に増大し（減速が除々に小さくなる。），θがほとんど一定の状態に近づくと急激に増大してほぼ0となる。そして，姿勢が変化しない間，鉛直方向加速度が0の状態が続き，角速度が加速さ

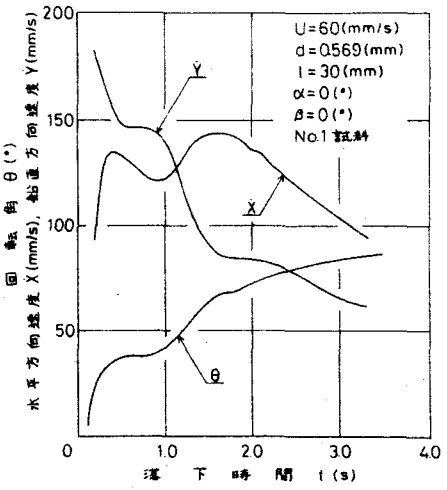


図6.106 姿勢および重心速度の変動状態

れ始めると鉛直方向にふたたび減速される。なお，角速度が急激に減速されている領域で$\dot{Y}$の変化を表わす曲線が下に凸になるのに対し，図5.16において，この領域で姿勢の変化に対する$\dot{Y}$の変化を表わす曲線が上に凸になるのは，θの値が小さい領域ほど線状体が回転するのに要する時間が短いからである。

運動方程式（6.79）式から，軸に直角な方向速度uおよび軸方向速度vが負であるので，rが急激に減少すると，加速度du/dt（<0）は増大しdv/dt（>0）は減少する。また，重心の加速度を表わす（6.80）式において，$\dot{X}$は正，$\dot{Y}$は負（計算では，鉛直方向は上向きを正の向きに定めているので$\dot{Y}<0$となる。）であるので，上述の結果を考慮すると，rの急激な減少に伴ない$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$はともに減少する。$\ddot{Y}$が減少するということは鉛直方向の減速が減少することを意味している。ところが，du/dtは増大し，dv/dtは減少するけれども，以前として$du/dt<0$，$dv/dt>0$の状態を保っているので，$\ddot{Y}$に比べて$\ddot{X}$の減少の方が大きく$\ddot{X}$はrが0になる前に負の値になるのに対し，$\ddot{Y}$はrがほぼ0になるとき高々0になるだけであり，負にはならない。すなわち，鉛直方向にふたたび加速されることはない。そして，rが増大し始めると同時に$\ddot{X}$，$\ddot{Y}$も増大し始める。しかし，$\ddot{Y}$の最小値は高々0であるのに対し$\ddot{X}$の最小値は負の値であることから，$\dot{Y}$はすぐに減速され始めるが，$\dot{X}$はrが増大し始めてしばらくして加速され始める。以上のように，角速度の変動に伴ない重心の速度が変動する状態を理論式を用いて調べた結果，その変動状態は実験結果と一致した。

しかし，ここで用いた計算方法では姿勢が変動する現象は見られず，したがって，重心の速度が変動する現象もほとんど見られないので，以下では諸要因が変動を除いた重心の速度の変化におよぼす影響について実験結果と計算結果を比較する。

まず，流速の影響を比較する。実験結果，図5.46，計算結果，図6.84，ともに$\dot{X}$はθの全領域で流速が大きいほど大き

い。いっぽう，実験結果，図5.47では，$\dot{Y}$の最大値およびそのときのθの値に流速の影響が顕著に現われ，流速が大きいほど$\dot{Y}$の最大値は小さくそのときのθの値は大きい。これに対し，計算結果，図6.86では，$\dot{Y}$が最大になるときのθの値は流速が大きいほど大きくなる傾向を示すが実験ほど明確ではなく，$\dot{Y}$の最大値は流速に対して一定の傾向を示さない。この違いは両者の初期条件が異なることによる。すなわち，実験では，流速が大きいほど線状体が流れ中に入ったときの急激な回転が大きいことおよびこのため，線状体がすべて流れ中に入ったとき鉛直方向に受ける抗力が大きくなることの2つの原因による。しかし，$\dot{Y}$が減少し始める直後から同一姿勢に対する$\dot{Y}$の値は流速が大きいほど大きくなり，線状体が底面に近づくにつれて流速の鉛直方向成分が減少するため，流速による差は除々に減少するという結果は実験，計算の両面から確かめられた。なお，この原因はすでに述べたように，線状体が鉛直方向に減速される割合および姿勢の変化はともに流速が大きいほど大きいので，θと$\dot{Y}$の関係を表わす曲線において$\dot{Y}$が減少する割合が流速にかかわらず同程度になるからである。

つぎに，長さの影響を表わす図5.25において，実験では同一姿勢に対する$\dot{X}$の値は長さが大きいほど大きく，しかもこの現象はθの全領域で見られた。この結果は計算でも得られており（図6.90），さらに，計算では長さによる$\dot{X}$の差はθの増加に伴ない除々に広がる傾向を示した。ただし，実験では線状体が流れ中に入ったときの急激な回転は長さの影響を受けるので，同一姿勢に対する線状体回りの流速の長さによる差は計算の場合より大きくなると考えられる。したがって，$\dot{X}$におよぼす長さの影響は実験の場合の方が顕著に現われる。

いっぽう，実験では，長さが大きいほど$\dot{Y}$の最大値は大きく，そのときのθの値は小さいことおよびθの増加に伴ない変動を除いた$\dot{Y}$の平均的な変化には長さの影響が見られなくなり，

ほぼ同一曲線で表わされるという結果が得られた。(図5.26参照) これに対し，計算では，$\dot{Y}$の最大値およびそのときのθの値に対する長さの影響は実験結果と一致するが，線状体が底面に近づくにつれて流速の鉛直方向成分は0に近づくことおよびそのときの姿勢は長さが大きいほど鉛直に近いため，あるθの領域までは長さが大きい方が$\dot{Y}$の値は大きいが，これ以上の領域では逆に小さくなり$\dot{Y}$が長さの影響を受けない領域は存在しない。(図6.92参照) 実験でもこの現象は見られないことはないが重心の速度が変動しているので計算結果ほど明確には分からない。

最後に初期角度の影響を比較する。図5.18，5.19において，実験では初期角度が大きい(初期角度は流れの向きと逆向きに設定しているので，計算の場合と向きが異なる。)方が同一姿勢に対する$\dot{X}$，$\dot{Y}$の値は大きくなる。これに対し，計算結果，図6.96，6.97，から，同一姿勢に対する$\dot{X}$の値は初期角度が小さいほど大きく，この結果は実験結果と一致するが，運動開始直後の急激な加速領域を過ぎると$\dot{Y}$の値は初期角度が大きいほど大きくなり，この結果は実験結果と逆である。実験でも線状体がすべて流れ中に入ったときの姿勢が鉛直に近い方が同一姿勢における水平方向および鉛直方向移動距離は大きいという結果が得られており，姿勢が同一のとき線状体回りの流速の鉛直方向成分は初期角度が大きい方が小さいので，$\dot{Y}$の値は小さくなると考えられる。しかし，結果は逆になっており，この原因は分からない。なお，初期角度は，線状体が運動をする位置に影響を与え，位置による流速および流れ方向の違いが$\dot{X}$，$\dot{Y}$に初期角度の影響となって現われることが，実験と計算の両面から確かめられた。

また，実験と計算よりノズル内流れ中での結果と矩形管内助走域での結果を比較して，重心の速度の変化におよぼす流速，長さ，初期角度の影響は，ノズル内流れ中での場合の方が顕著

に現われることが分かった。

6.7.3 線状体の姿勢および角速度

線状体の軸方向に沿って分布する流速は先端部に近いほど大きく，しかも，流れの方向は先端部に近いほど水平方向に近いので運動開始時に線状体に作用する回転モーメントNは，姿勢を水平方向に回転させる向きに働く。さらに，軸方向に沿って分布する流速の差はUが大きいほど大きいので，十分に発達した流れ中での場合と同様にUが大きいほどNの値は大きくなる。いっぽう，助走域での場合，流速が小さいほど流れの発達が早いので，Nの値は流速が小さいほど大きくなった。また，ノズル内流れでは壁面近傍の境界層の領域を考慮していないため，$U=80$ (mm/s) の場合，Nの値は助走域での場合より大きいが，$U \leqq 60$ (mm/s) の場合，逆に小さくなり，さらに (6.15) 式で表わされる流速の軸に直角な方向成分の重心回りの一次モーメントの時間的変化率 dU_2/dt (>0) は，助走域での場合より非常に小さく（一様流れ中での場合，$dU_2/dt=0$であることから，ノズル内流れ中でのdU_2/dtの値が非常に小さくなることが推察できる。），角加速度dr/dtの変化にはほとんど寄与しない。いっぽう，流体に対する線状体の相対速度の軸に直角な方向成分，$u-U_1$ (<0) と軸方向成分，$v-V$ (<0) の積は助走域での場合の方がわずかに大きい。

したがって，助走域での結果，図6.73とノズル内での結果，図6.109を比較すれば分かるように，運動開始後しばらくの間同一落下時間における角速度rの値は，助走域での場合の方が大きくなる。しかし，rの増加に伴い線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントNは，ノズル内流れ中での場合流れが加速し続けているので助走域での場合より小さい。したがって，$U=80$ (mm/s) の場合，$t=0.14$ (s) 程度からノズル内流れ中での場合の方がrの値は大きくなる。そして，rの値が

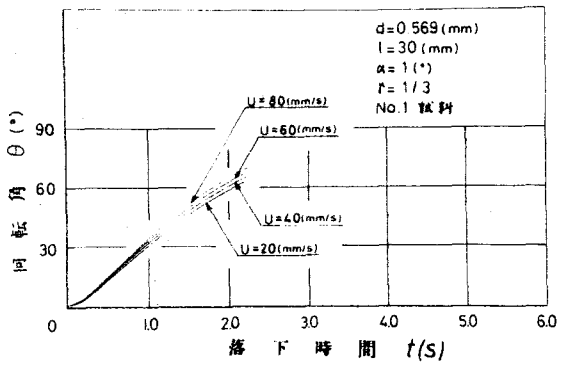


図6.107 姿勢におよぼす流速の影響

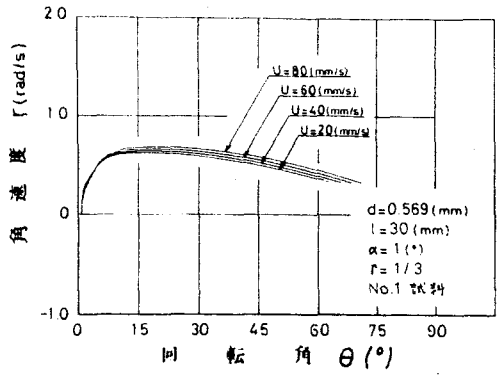


図6.108 角速度におよぼす流速の影響

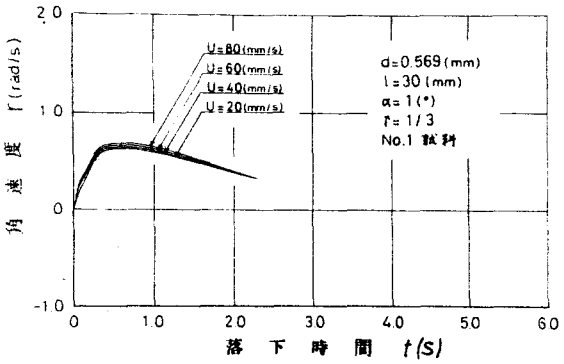


図6.109 角速度におよぼす流速の影響

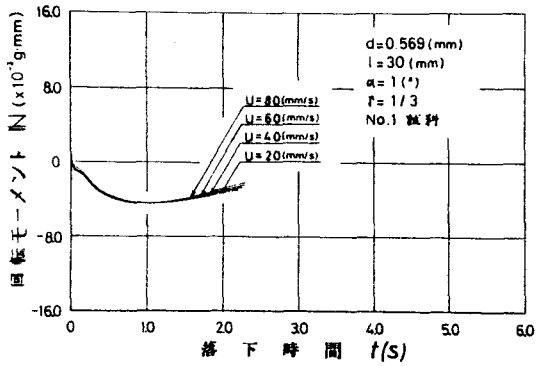


図6.110 回転モーメントにおよぼす流速の影響

大きくなるため，間もなくノズル内流れ中での場合の方がNの値は大きくなるが，この状態になる直前から$(U-U_1)(v-V)$の値は助走域での場合より大きくなるため，$t \geq 0.14$(s)程度の領域ではノズル内流れ中での場合の方が同一落下時間におけるNの値が大きい状態が続く。なお，流速が小さいほど長い時間にわたって助走域での場合の方がNの値が大きい状態が続く。また，ノズル内流れにおいても壁面近傍の境界層を考慮する場合には，運動開始時からNの値はノズル内流れ中での場合の方が大きくなると考えられる。

さて，ノズル内流れ中での場合，図6.109，6.110において，運動開始時に線状体に作用する回転モーメントNは流速が大きいほど大きく，しかも$u-U_1$の絶対値が大きいので$(u-U_1)\cdot(v-V)$も大きくなる。したがって，運動方程式(6.16)式の第3式を考慮すると，運動開始直後の領域で流速が大きいほどγが大きいことが分かる。そして，γの増大に伴ない線状体の回転を押える向きに作用する回転モーメントNは流速が大きいほど大きくなる。また，$U=80$(mm/s)の場合，$(u-U_1)(v-V)$は運動開始後短時間のうちに減少し始めて$t=0.1$(s)程度で極小となりふたたび増大する。このため，角加速度$d\gamma/dt$は$t=0.1$(s)程度で極小になる。これに対し，$U\leqq 60$(mm/s)の場合，$(u-U_1)(v-V)$は運動開始時からしばらく増大するため，$U=80$(mm/s)の場合ほど$d\gamma/dt$は小さくならないが，やはり$t=0.1$(s)程度で極小になる。なお，$d\gamma/dt$の極小値は流速が大きいほど小さくなる。γが加速されている領域で$d\gamma/dt$が極小になる現象は，一様流れ中での場合（図6.25）および助走域での場合（図6.73）にも見られ，両者ともに流速が大きいほど$d\gamma/dt$の極小値は小さく，ノズル内流れ中での場合と一致する。したがって，γの変化を表わす曲線には変曲点が見られ，しかも流速が大きいほど顕著である。

その後，γは$t=0.6$(s)程度から減速され始めるが，γはつねに流速が大きいほど大きいため，図6.107を見れば分かるように，流速によるθの値の差は落下時間に伴ない除々に増大し続ける。また，同一落下時間における線状体の鉛直方向移動距離はほとんど流速の影響を受けないが，水平方向移動距離は流速が大きいほど大きく，しかも落下時間に伴ないその差は広がる。したがって，軸方向に沿って分布する流速の軸に直角な方向成分の差はUが大きいほど大きくなるので，やがてγが大きいにもかかわらず回転を押える向きに作用する回転モーメントNはUが大きいほど小さくなる。しかし，軸方向の相対速度

$v-V$ (<0) の絶対値は U が大きいほど小さくなるため，$(u-U)\cdot(v-V)$ は小さくなる。結局，角加速度 $d\gamma/dt$ (<0) の絶対値は U が大きいほど大きくなるので，線状体が底面に近づくにつれて γ の変化には流速の影響が見られなくなり，$U=20\sim80$ (mm/s) のもと γ の関係を表わす曲線は漸近する。

以上は，落下時間に伴なって角速度が変化する様子について述べたが，姿勢の変化を表わす図6.107から，同一落下時間における θ の値は U が大きいほど大きく，しかもその差は除々に広がることを考慮すると，図6.108に示すように，姿勢の変化に対する角速度の変化を表わす曲線は，線状体が底面に近づいても漸近することはなく，流速の影響が明瞭に現われることが分かる。

すでに述べたように，運動開始直後の領域を除き，同一落下時間あるいは同一姿勢における γ の値は助走域での場合より大きくなり，また，十分に発達した流れ中での場合（図6.48，6.49），流速の変化が大きい上面近くの領域で角速度が急激に変化し，線状体が流速の変化が小さい管路中央部で運動するようになると角速度の変化は一様流れ中での場合とほぼ一致する。したがって，角速度が急激に減少した後の領域では，ノズル内流れ中での場合の方が角速度は大きくなる。さらに，表6.19に示す γ の最大値とそのときの θ ともの値を他の流れ中での結果（表6.6，6.10，6.14）と比較すると，ノズル内流れ中での場合，加速時間がもっとも長くしかもより水平に近い姿勢になるまで加速されることが分かる。

以上の結果から，ノズル内では流れが加速していることおよびその方向が場所的に変化することが原因になって，他の流れ中での場合と異なり角速度の変

表6.19 角速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

線状体長さ l (mm)	流速 U (mm/s)	角速度の最大値 r (rad/s)	θ (°)	t (s)
15	60	2.377	23.0	0.26
30	20	0.6249	17.0	0.61
	40	0.6435	17.6	0.60
	60	0.6633	18.8	0.61
	80	0.6843	19.9	0.62

$d=0.569$ (mm)，$\alpha=1$ (°)，$\gamma=1/3$，No.1試料

化におよぼす流速の影響がθの全領域で現われたと考えられる。

これまでは，ℓ=30(mm)と比較的長さが小さい場合であったが，十分に発達した流れ中での場合（図6.53）および助走域での場合（図6.77），長さが大きいほど運動開始直後の領域で流速分布の影響を大きく受けるため，一様流れ中での場合に比べて角速度がより大きく加速されるという結果が得られている。とくに，助走域での場合境界層の領域が狭いこともあって，この領域で長さが大きい方が角速度は大きくなった。

ところが，ノズル内流れ中での場合，図6.113を見れば分か

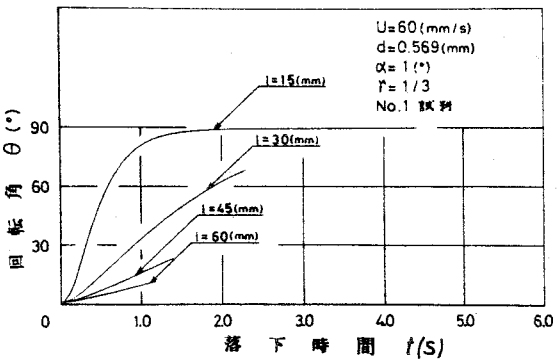


図6.111 姿勢におよぼす長さの影響

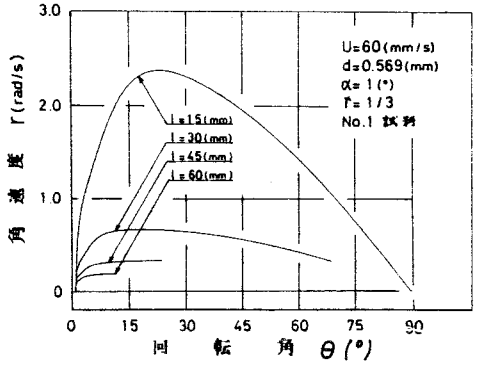


図6.112 角速度におよぼす長さの影響

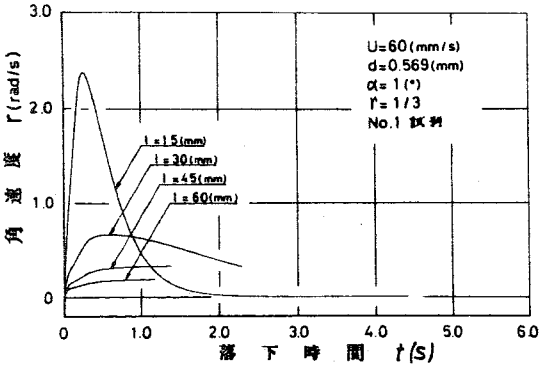


図6.113 角速度におよぼす長さの影響

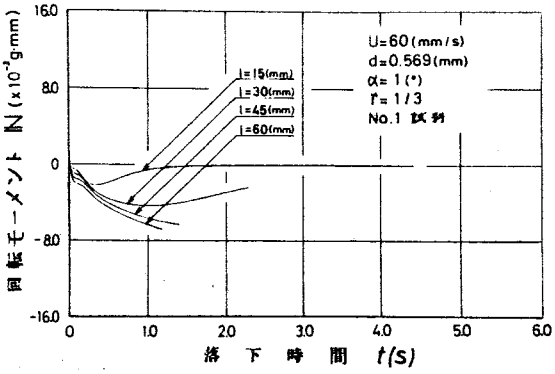


図6.114 回転モーメントにおよぼす長さの影響

ろように，このような現象は生じない。これは，表6.19と一様流れ中での結果，表6.6を比較すると両者のYの最大値の差は$\ell=15$(mm)の方がわずかに大きいことからも分かる。図6.114から，他の流れ中での場合と同様に，運動開始時に姿勢を水平方向に回転させる向きに作用する回転モーメントNは，長さが大きいほど大きいが，たとえば助走域での結果（図6.78）と比較して長さによるNの差は非常に小さく，各長さの慣性モーメントの比率と同程度である。いっぽう，$(u-U_1)(v-V)$の値は長さにかかわらずほぼ同じであり，dU_2/dtは角加速度dr/dtの変化にはほとんど寄与しないほど小さい。したがって，角加速度を表わす(6.16)式の第3式を考慮すると，長さが小さいほどdr/dtは大きいことが分かる。以上のように他の流れ中での結果と異なるのは，ノズル内流れでは壁面近傍の境界層を考慮していないことが原因であると考えられ，この領域を考慮する場合，他の流れ中での場合と同様な結果が得られるはずである。

前項で述べたように，$\ell=15$(mm)の場合，水平方向にいったん減速された後ふたたび加速される現象およびこれに伴ない鉛直方向の減速が増大する現象が生ずる。そこで，この現象に伴なって角速度がどのように変化するかを調べる。

$\dot{X}$がふたたび加速され始めた後，軸方向速度vは加速され始める。そして，しばらくして$\dot{Y}$の減速が増大し始め，軸に直角な方向速度uが減少し始める。いっぽう，$\ell=15$(mm)の場合，姿勢の変化が大きく，ほぼ水平な姿勢になる位置は管路中央部である（たとえば，θが約88°になる位置は$Y=230$(mm)程度である。）ので，流速の軸に直角な方向成分の向きはuの向きと同じであり（$\theta+\theta_f>90°$），その値は減少しており，しかも減少割合はuの場合より大きいので$u-U_1$(<0)の絶対値は増大している。また，流速の軸方向成分の向きもvの向きと同じであり，vの場合より大きい割合で増大しているので，$v-V$(<0)の絶対値は減少している。なお，$u-U_1$の絶対値の増大割合よ

りv−V の絶対値の減少割合の方が大きいので $(u-U_1)(v-V)$ は減少する。ところが，ノズル内流れは加速しているのでv−V の絶対値の減少割合は一様流れ中での場合より小さくなり，$(u-U_1)(v-V)$ の減少割合はノズル内流れ中での場合の方が小さい。このため，一様流れ中での場合，回転を押える向きに作用する回転モーメントNの減少は $(u-U_1)(v-V)$ の減少と同程度の割合であるのに対し，ノズル内流れ中での場合，Nの減少割合の方がわずかに大きくなる。なお，$d\omega_z/dt$ の値は非常に小さく角速度の変化には寄与しない。したがって，$\dot{X}$ がふたたび加速され始めてから（$\theta=88°$, $t=1.6$(s)程度）長い時間を経た後，$\theta=89.5°$, $t=3.1$(s)程度から角速度はふたたび加速され始め，この状態は線状体が底面に到達するまで続く。

一様流れ中での場合，水平な姿勢に近づくにつれて角速度が0に近づいたことから考えて，ノズル内流れ中での場合，水平な姿勢になる前に角速度がふたたび加速され始める現象が現われることが特徴である。しかし，角加速度の値は非常に小さいので，図6.112，6.113において，この現象は明確には分からない。

ここで，十分に発達した流れ中での結果（図6.52）と比較すると，$\ell=30$(mm)の場合すでに述べた，角速度が急激に減少した後の領域ではノズル内流れ中での場合の方が角速度は大きいという結果は，長さにかかわらず成立つことが分かる。また，助走域での場合（図6.76），θの値の小さい領域で $\ell=60$(mm)の角速度の変化に極小になった後ふたたび加速される現象が見られたが，ノズル内流れでは壁面近傍の境界層を考慮していないため，この現象は見られず，長さが大きい場合にも角速度の変化に変曲点が現われるにとどまったと考えられる。なお，図6.111，6.112から他の流れ中での場合と同様に，長さが小さいほど角速度は大きく線状体が回転するのに要する時間は短い。

ノズル内流れ中での重心速度の変化の特徴，水平方向にいったん減速され始めるがふたたび加速される現象およびこれに伴ない鉛直方向の減速がふたたび増大する現象は，$\ell=30$(mm)，$\alpha=20°, 30°$の場合にも見られることを前項で述べたが，この場合，$\dot{X}$がふたたび加速され始める位置が$\alpha=30°$の場合でも$Y=3.5$(mm)程度と上述の$\ell=15$(mm)の場合に比べてノズルの下方であり，しかもこの現象が生じ始めてから長い時間を経た後でないと角速度がふたたび加速され始める現象は生じないので，$\alpha=20°, 30°$の場合，図6.116を見れば分かるように，角速度がふたたび加速され始める前に線状体が底面に到達する。

一様流れ中での場合，姿勢の変化に対する角速度の変化は，運動開始直後の急激な加速の領域を除き初期角度にかかわらず同一曲線で表わされる。いっぽう，十分に発達した流れ中での場合，θのどの領域においてもθとγの関係は同一曲線で表わされることはない。

図6.116において，ノズル内流れ中での場合，運動開始直後の急激な加速領域を過ぎると姿勢の変化に対する角速度の変化は，初期角度にかかわらずほぼ同一曲線で表わされ，線状体が底面に近づくにつれて他の曲線から離れていく傾向にある。

これはつぎのように説明できる。前項で述べたように，ノズ

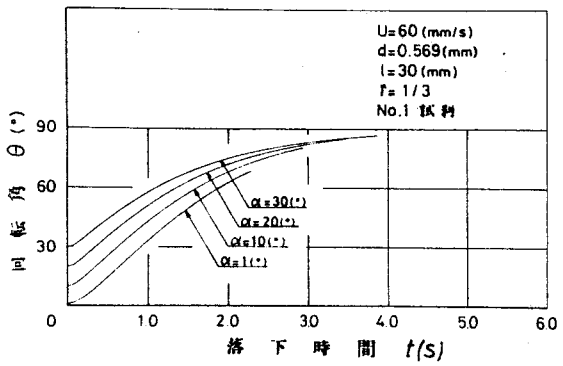


図6.115 姿勢におよぼす初期角度の影響

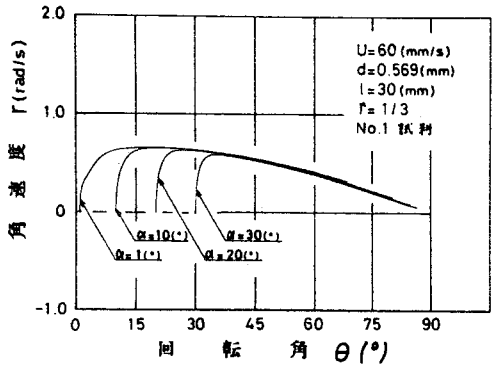


図6.116 角速度におよぼす初期角度の影響

ル内流れは加速し続けているので，θの全領域で$\dot{X} < \dot{X}_S + W_{cx}$となるが，この差$\Delta\dot{X}$は運動開始後の小さい領域を除き初期角度に関係なくほぼ一定になる。いっぽう，$\dot{Y}$に関しては運動開始後の小さい領域を除き初期角度に関係なく$\dot{Y} = \dot{Y}_S + W_{cY}$が成立する。したがって，重心の速度を表わす(6.17)式から

$$\left.\begin{aligned} u &= (\dot{X}_S + W_{cx} - \Delta\dot{X})\cos\theta + (\dot{Y}_S + W_{cY})\sin\theta \\ v &= -(\dot{X}_S + W_{cx} - \Delta\dot{X})\sin\theta + (\dot{Y}_S + W_{cY})\cos\theta \end{aligned}\right\} \quad (6.82)$$

となり，(6.15)式で表わされるU_1，Vは，重心での流速の水平方向成分W_{cx}および鉛直方向成分W_{cY}を用いてほぼ次式で表わされる。

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= W_{cx}\cos\theta + W_{cY}\sin\theta \\ V &= -W_{cx}\sin\theta + W_{cY}\cos\theta \end{aligned}\right\} \quad (6.83)$$

したがって，(6.82)式，(6.83)式から

$$\left.\begin{aligned} u - U_1 &= (\dot{X}_S - \Delta\dot{X})\cos\theta + \dot{Y}_S\sin\theta \\ v - V &= -(\dot{X}_S - \Delta\dot{X})\sin\theta + \dot{Y}_S\cos\theta \end{aligned}\right\} \quad (6.84)$$

となり，姿勢が同じであれば初期角度にかかわらず$u - U_1$，$v - V$は同一である。また，(6.84)式の第1式から，流体の線状体に対する相対速度の軸に直角な方向成分は初期角度にかかわらず等しいので線状体に作用する回転モーメントNも等しくなる。なお，dU_2/dtは小さく角加速度dr/dtの変化にはほとんど寄与しない。したがって，角加速度を表わす(6.16)式の第3式を考慮すると，同一姿勢におけるdr/dtの値は初期角度に関係なく等しいことが分かり，運動開始直後に急激に加速されて，いったんrの値が一致した後の領域では，θとrの

関係は同一曲線で表わされる。

すなわち，一様流れ中での場合と同様に，流れに対する線状体の相対的な並進運動が初期角度にかかわらず同じになるので，線状体の回転運動も初期角度の影響を受けない。ただし，初期角度による差がわずかに見られるのは，流速が軸方向に沿って分布し，しかも流れの方向が異なるため，(6.83)式の関係が完全には成立しないからであると考えられる。

回転運動が初期角度の影響をほとんど受けないという結果から，図6.115においてtとθの関係を表わす曲線を落下時間軸に沿って平行移動すると，運動開始直後の急激な加速領域を除き初期角度にかかわらずほぼ重なることが分かる。

これまでは，ノズルの傾きが$\gamma=1/3$の場合であったが，つぎに，ノズルの傾きが姿勢の変化におよぼす影響を調べる。

図6.119において，ノズルの傾きが大きいほど初期位置での流速の鉛直方向成分が大きいため，$v-V$ (<0)の絶対値は小さくなる。したがって，$(u-U_1)(v-V)$の値は小さいが，流れの加速程度はノズルの傾きが大きいほど大きいので，運動開始時に姿勢を水平方向に回転させる向きに働く回転モーメントNは大きくなり，運動開始直後の領域でγは大きくなる。$\gamma=1/4$の場合，$(u-U_1)(v-V)$は運動開始後短時間のうちに減少し

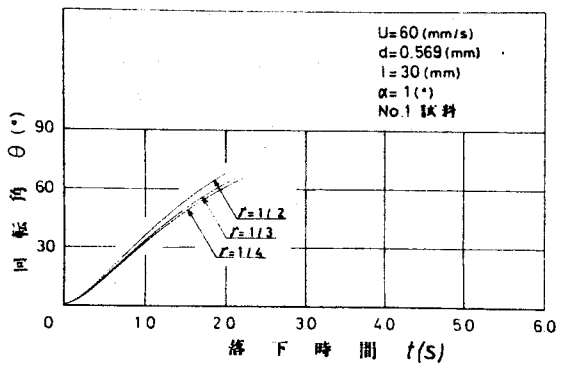


図6.117 姿勢におよぼすノズル傾きの影響

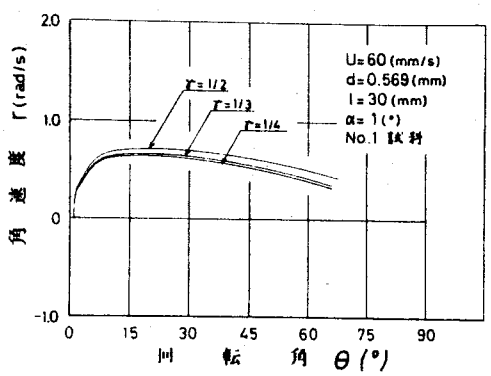


図6.118 角速度におよぼすノズル傾きの影響

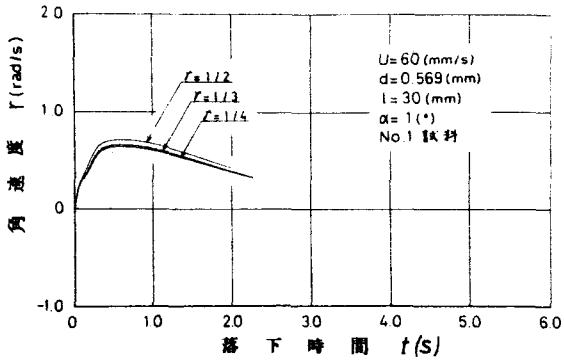


図6.119 角速度におよぼすノズル傾きの影響

始めて $t=0.1$ (s) 程度で極小となりふたたび増大する。このため，角加速度 $d\gamma/dt$ は $t=0.1$ (s) 程度で極小になる。これに対し $\gamma=1/3$，$1/2$ の場合，$(u-U_1)(v-V)$ は運動開始時からしばらく増大するため，$\gamma=1/4$ の場合ほど $d\gamma/dt$ は小さくならないが，やはり $t=0.1$ (s) 程度で極小になる。したがって，γ の変化を表わす曲線には変曲点が見られ，しかもノズルの傾きが小さいほど顕著である。この結果から，一様流れ中での場合（図6.25）の方が変曲点がより顕著に現われると考えられる。

γ の増大に伴ない回転を押える向きに作用する回転モーメント N はノズルの傾きが大きいほど大きくなるが，この状態が生ずる直前から，軸方向速度 v の増大に伴ない $(u-U_1)(v-V)$ はノズルの傾きが大きいほど大きくなるので，$d\gamma/dt$ が大きい状態が $t=0.25$ (s) 程度まで続き，その後の領域ではノズルの傾きが小さいほど $d\gamma/dt$ は大きくなる。そして，γ は $t=0.6$ (s) 程度から減速され始め，線状体が底面に近づくにつれてノズルの傾きによる差は除々に小さくなり，$\gamma=1/4\sim1/2$ の t と γ の関係を表わす曲線は漸近する。

ノズルの傾きは，流れの加速程度に影響を与えるので，ノズルの傾きが姿勢の変化におよぼす影響は流速の影響と同じになる。すなわち，ノズルの傾きが大きいことは流速が大きいことに対応し，同一落下時間における γ の値はノズルの傾きが大きいほど大きくなる。したがって，図6.117から線状体が回転するのに要する時間は小さく，しかもノズルの傾きによる姿勢の差は落下時間に伴ない広がる。以上の結果を考慮すると，

図6.118において姿勢の変化に対する角速度の変化を表わす曲線は，線状体が底面に近づいても漸近することはなく，ノズルの傾きの影響が明瞭に現われることが分かる。また，表6.20からγが加速される時間はノズルの傾きにかかわらず同じであり，傾きが大きいほどより水平に近い姿勢になるまで加速されることが分かる。

表6.20 角速度の最大値とそのときの姿勢，落下時間

ノズルの傾き γ	角速度の最大値		
	r (rad/s)	θ (°)	t (s)
1/2	0.7136	20.3	0.61
1/3	0.6633	18.8	0.61
1/4	0.6438	18.2	0.61

d=0.569(mm), l=30(mm),
U=60(mm/s), α=1(°), No.1 試料

最後に，線状体が水平な姿勢から運動を始める場合，姿勢がどのように変化するかを調べる。流れ方向が水平である場合，線状体は水平な姿勢を保ったまま運動し続けると考えられるが，ノズル内流れのようにその方向が水平方向に対して傾いている場合，図6.120，6.121に示すように姿勢および角速度は変化する。

線状体の軸方向に沿って分布する流速の軸に直角な方向成分は先端部（下流側）ほど大きく，しかもその向きは運動方向と同じであるので，運動開始時に線状体に作用する回転モーメントMは姿勢を鉛直方向に回転させる向きに働く。さら

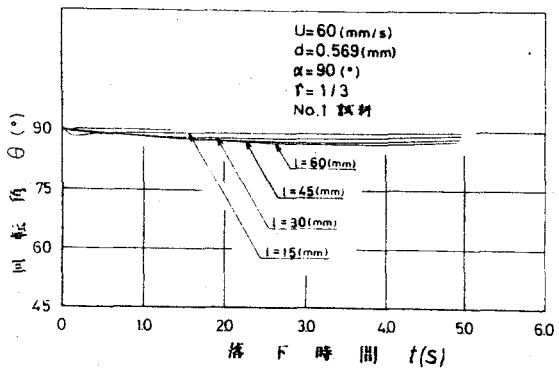


図6.120 α=90°の場合の姿勢の変化

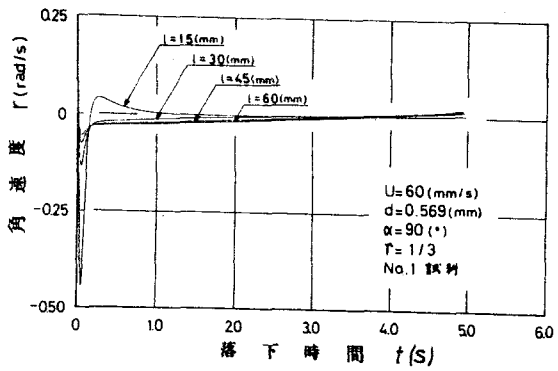


図6.121 α=90°の場合の角速度の変化

に，軸方向に沿って分布する流速の差は長さが大きいほど大きいので，Nの値は大きくなるが，このNの比率は各長さの慣性モーメントの比率より小さい。いっぽう，$(u-U_1)(v-V)$の値は負となり，長さにかかわらずほぼ同じであり，dU_2/dtはdr/dtの変化にはほとんど寄与しないので，dr/dt (<0)の絶対値は長さが小さいほど大きく，γは急激に減少し線状体はわずかに鉛直方向に傾く。そして，長さが小さいほど慣性が小さいので軸方向に急激に加速されて$v-V$が負になるので$(u-U_1)(v-V)$は正の値になり，$\ell=15$(mm)の場合，γは急激に増大して，$t=0.16$(s)程度で正の値になる。$\ell\geq 30$(mm)の場合，γが急激に増大しても正の値にはならず，その後dr/dtが急激に減少してγは除々に増大する。γが正の値（姿勢が水平方向に回転し始める。）になるまでに要する時間は長さが大きいほど長く，このため線状体はより鉛直方向に傾く。その後線状体は水平方向にゆっくり回転し始める。そして，長さが大きいほどθの値は小さく，しかも流れが加速している影響をより大きく受けるため，同一落下時間におけるγの値は大きくなり，この状態が底面に到達するまで続く。

以上の結果をまとめると，$\ell=15$(mm)の場合のように水平な姿勢になる前に$\dot{X}$がふたたび加速され始める位置がノズルの上方である場合，水平な姿勢になる前に角速度がふたたび加速され始める現象が現われることがノズル内流れ中での特徴である。また，流速の影響とノズルの傾きの影響は同じになり，角速度の変化におよぼす影響はθの全領域で現われる。さらに，運動開始直後の急激な加速領域を過ぎると，姿勢の変化に対する角速度の変化は初期角度の影響をほとんど受けない。なお，水平な姿勢から運動を開始する場合，線状体はわずかに鉛直方向に傾きやがて水平方向に漸近する現象が見られる。

ここで，第5章の実験結果と比較する。実験では，角速度が急激に減速されてほとんど0となり，ふたたび加速され始め

るというように，加速と減速が繰返し現われ，姿勢は変動しながら水平方向に近づく。これに対し，計算では $\ell = 15\,(mm)$ の場合，水平な姿勢になる前にふたたび角速度が加速される現象が見られるだけであり，しかもその加速は非常に小さい。なお，実験と同じ初期条件（静止流体中から運動を始めて流れ中へ入る。）のもとで計算をおこなえば，線状体が流れ中に入ったとき急激に回転させられるため，ノズルの上方で姿勢が変動する現象が現われると考えられる。しかし，管路中央部で運動する際，実験で見られたような姿勢が変動する現象が，ここで用いた計算方法で確かめられるかどうか分からない。

したがって，以下では諸要因が変動を除いた平均的な姿勢の変化におよぼす影響について実験結果と計算結果を比較する。なお，実験ではノズル内流れ中での姿勢の変化は，矩形管内の助走域での姿勢の変化を中心にして減衰振動するという結果が得られている。

まず，流速の影響を比較する。計算結果，図6.107，では流速が大きいほど姿勢の変化は大きくなるのに対し，実験結果，図5.50，では流速が大きいほど姿勢の変動は大きいが，平均的な姿勢の変化は流速の影響をほとんど受けない。実験はノズルの傾き $\gamma = 1/4$ でおこない，計算は $\gamma = 1/3$ でおこなった。計算からノズルの傾きが大きいほど姿勢の変化は大きくなるという結果が得られており，ノズルの傾きが小さいほど流速の影響は現われにくくなる。さらに，実験では姿勢が変動するので流速による姿勢の変化の差を明確には把握することができなかった。図6.107から，流速による姿勢の変化の差は小さい。したがって，流速の影響を実験的に確かめるにはもっと傾きの大きいノズルを用いて実験をおこなう必要があり，ノズルの傾きが大きい場合，平均的な姿勢の変化は計算結果と同様に，矩形管内の助走域での場合より大きくなると考えられる。

つぎに，長さの影響として，実験結果，図5.29，計算結果，

図6.111，ともに長さが小さいほど角速度は大きく線状体が回転するのに要する時間は短いという結果が得られた。また，実験では $\ell=15$ (mm) の場合，姿勢が水平方向に近づいたときの線状体の位置がまだノズルの上方であるため，姿勢は水平方向を中心にして減衰振動するのに対し，計算では水平な姿勢になる前にふたたび角速度が加速され始めるが，角加速度は小さく姿勢が水平方向に漸近する現象が見られるだけである。

最後に，初期角度の影響を比較する。図5.22において，実験では初期角度が大きい方が変動が多く見られるが，線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化の領域を除き，平均的な姿勢の変化には初期角度の影響はほとんど見られない。この結果は計算でも確かめられており，図6.115において姿勢の変化を表わす曲線を落下時間軸に沿って平行移動すると，運動開始直後の急激な加速領域を除き初期角度にかかわらずほぼ重なる。初期角度は，線状体が運動する位置に影響を与え，位置による流速および流れ方向の違いが重心の速度に初期角度の影響となって現われるが，流れに対する線状体の相対的な並進運動が初期角度にかかわらずほぼ同じになるので，線状体の回転運動も初期角度の影響をほとんど受けない。

6.8 結 言

本章では，直線の線状体が単一で流れ中を自由落下する場合について理論解析をおこなった。そして，一様流れ中，矩形管内での十分に発達した流れ中，矩形管内での助走域およびノズル内流れ中の4種類の場合に対して数値計算をおこない，実験結果とあわせて，実験と計算の両面から線状体の基本的運動特性を明らかにした。また，同時に流速，線状体長さ，初期角度およびノズルの傾きなどの要因が運動特性におよぼす影響を調べた。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 一様流れ中での場合

(i) 線状体は，鉛直方向に対してある角度をもって運動し始め，すぐに重心の軌跡の接線勾配は極大になる。その後，運動方向は除々に水平方向に近づくが，やがて，軌跡はふたたび変曲点をもち，運動方向は鉛直方向に回転し始める。そして，最終的に姿勢は水平方向に漸近し，線状体はもっとも安定な水平姿勢を保ったまま鉛直方向には静止流体中での場合と同一の一定速度で落下し，水平方向には流速と同一速度で移動する。

(ii) 運動特性に流速の影響が現われるのは，運動開始後のθの小さい領域（$\ell=30$(mm)の場合，$\theta<15°$程度の領域）だけであり，これ以上の領域では流れに対する線状体の相対的な並進運動は流速にかかわらず同じになる。このため，線状体の回転運動も流速の影響を受けない。これは，流速が場所的に変化しないことが原因している。また，流速の影響は長さが小さいほど顕著に現われる。

(2) 矩形管内の十分に発達した流れ中での場合

(i) 管路中央部では流速の変化がわずかであるので，落下軌跡の変化状態は一様流れ中での場合と一致するが，流速の変化が大きい壁面近くの領域，とくに底面近くの領域では運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象が見られる。さらに，長さが大きい場合，線状体は鉛直方向に回転する。また，初期角度は，線状体が運動をおこなう位置のみならず軌跡の形にも影響をおよぼす。

(ii) 線状体が壁面近くの領域で運動するとき，その運動特性，その中でもとくに水平方向速度および姿勢の変化は，一様流れ中での場合と異なる。また，諸要因の影響は一様流れ中での場合より顕著に現われるが，要因の影響を考察する場合，管路の高さを考慮する必要がある。

(3) 矩形管内の助走域での場合

(i) 助走域での流れ状態は，一様流れから十分に発達した流れへ移行する途中の段階であるので，落下軌跡は両者の落下軌跡を合わせたような形になる。また，流速の影響も両場合の中間的なものになる。なお，底面近くの領域で線状体が鉛直方向に回転する現象が，$\ell = 30\,(mm)$ の場合見られ，$\ell = 60\,(mm)$ の場合現われず，十分に発達した流れ中での結果と逆になったが，これは管路高さとの関連によるものである。

(ii) 重心の速度および姿勢の変化状態も，一様流れ中での場合と十分に発達した流れ中での場合の間に位置する。そして，流れの発達程度が大きくなるにつれて十分に発達した流れ中での場合に近づく。また，平均流速により流れの発達程度が異なり，その影響が流速の影響に含まれるため，他の流れ中での場合より流速の影響が現われにくい。ここで用いた計算条件のも

とでは流れの発達程度が比較的小さいため，運動開始直後の領域で長さが大きい方が角速度が大きくなる現象が見られる。

(iii) 実験と計算では初期条件が異なるので，この違いを考慮すると，助走域での運動特性および流速，長さの影響は，実験結果と計算結果で一致する。

(4) ノズル内流れ中での場合

(i) 運動開始直後に運動方向がいったん鉛直方向に近づくが，その後の領域では流れが加速している影響を受け，底面に到達するまで運動方向は水平方向に近づく。しかし，線状体が水平な姿勢になるまでに移動する距離が小さい場合，その軌跡にはいくつかの変曲点が現われる。この現象は長さが小さいほど現われ易い。また，流速の影響は一様流れ中での場合より顕著に現われ，初期角度およびノズルの傾きも落下軌跡に影響をおよぼす。

(ii) 重心速度の変化の特徴は，水平方向にいったん減速されるが水平な姿勢になる前にふたたび加速されることおよびこの現象に伴ない鉛直方向の減速がふたたび増大することである。また，流速，長さ，初期角度の影響は他の流れ中での場合より顕著に現われ，ノズルの傾きも影響をおよぼす。さらに，4種類の流れ中での結果を総合して，流れの加速程度が大きいほど，$\ddot{X}$の減少が低下する領域では同一姿勢における$\ddot{X}$の値は大きく，$\ddot{Y}$が増大し始めてから後の領域では$\ddot{Y}$の値は小さい。

(iii) ノズルの上方で線状体が水平方向にふたたび加速される場合，水平な姿勢になる前に角速度がふたたび加速されることがノズル内流れ中での特徴である。また，流速の影響とノズルの傾きの影響は同じであり，θの全領域で現われる。さら

に，流れに対する線状体の相対的な並進運動が初期角度にかかわらずほぼ同じになるので，姿勢の変化に対する角速度の変化は初期角度の影響をほとんど受けない。

(iv) 線状体が水平に近くなるまでに移動する距離が小さい場合，軌跡の変動が大きくなることおよび重心の速度の変化におよぼす流速，長さ，初期角度の影響は，矩形管内の助走域での場合より顕著に現われることが実験，計算の両面から確かめられた。また，角速度の変動に伴ない重心の速度が変動する状態を理論式を用いて調べた結果，実験結果と一致した。さらに，変動を除いた平均的な運動特性におよぼす諸要因の影響は実験結果と計算結果で一致する。両者の違いは，実験では，重心の軌跡，速度および姿勢に変動が見られるのに対し，計算では，これらの変化にほとんど変動が現われないことである。

(v) ノズル内流れ中での運動特性が他の流れ中での場合と異なるのは，流れが加速していることおよびその方向が場所的に変化することに起因する。

第7章　回転流体中における線状体の運動

7.1　緒　言

繊維あるいは繊維集団は，回転する流体中を遠心力の作用を受けながら運動することがある。この場合，繊維が直管内流れ中で運動する場合と比較して繊維の各部分に作用する外力が異なり，繊維の軌跡および姿勢の変化に大きな影響をおよぼすと考えられる。

繊維が回転流体中で運動するもっとも典型的な例としては，ロータ方式オープンエンド精紡機のロータ内における繊維の運動がある。この場合，コーミングローラにより1本1本に分繊された繊維は高速で回転するロータ内に入り，飛走してロータ内面の滑壁上に達するが，この間回転流体中で運動をおこなう。そして，繊維の運動状態が糸質に大きな影響をおよぼす。

いっぽう，回転流体中における繊維の運動を取扱った研究は少なく，強制渦流内における線状体の2次元運動を理論解析し，曲管内を空気輸送される線状体の運動状態を実験により求め，両者を比較した塩見[7]の研究および繊維を非常に軽い粒子と考えて，吸い込みのある渦流や，分岐管中での繊維の軌跡を求めたFeldman[8]の研究が見られる程度である。しかし，前者は重力および浮力の影響を無視し2次元的に運動を取扱っており，後者の場合，粒子と繊維は本質的に形態が異なるので，得られた結果の妥当性について問題が残る。

そこで，本章では，繊維のもっとも簡単なモデルとして直線の線状体を考え，線状体が単一で水をみたした低速回転する円筒中を自由落下する場合について実験的研究をおこない，静止流体中での単一の線状体の運動と比較して，回転流体中で線状体が運動する場合の基本的運動特性を明らかにする。

7.2 回転流体中における線状体の落下実験装置

実験装置の概要を図7.1に示す。回転円筒⑦は外径200(mm)，内径190(mm)，高さ450(mm)の透明アクリル製であり，時計回りに回転する。線状体の落下実験は円筒回転数$N=30\sim120$(rpm)の範囲でおこなうため，誘導電動機①の回転数を下げる必要があり，Vプーリ③，かさ歯車④および平歯車⑤で大きく減速した。そして，無段変速機②を用いて円筒の回転数を所要の値にした。回転数の設定は2種類の方法でおこなった。まず，円筒の上端面に目印を1個設け，所要の回転数の2倍の発光数でストロボランプを発光させ，この目印が2個静止して見えるように無段変速機を調節して円筒の回転数を設定した。さらに，回転数が小さい場合には，かさ歯車と平歯車の減速比が合計6であるから，タコメータとストップウォッチを使ってVプーリの回転数が円筒の所要回転数の6倍になるように無段変速機で調節した。

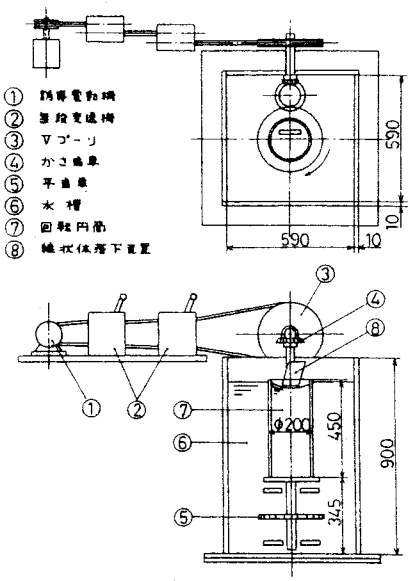


図7.1 実験装置概要

なお，回転容器が円筒であるため，円筒に水を入れて空気中から直接見ると歪が生ずる。したがって，空気中から直接線状体の運動状態を撮影すると，後でこの写真から落下特性を求める際に，この歪の修正をおこなう必要がある。そこで，この歪を無くする目的で，第2章の静止流体中での線状体の落下実験に用いた水槽⑥の中に回転円筒を入れ，円筒内および円筒周辺に水をみたした。その結果，上述の歪は見られなくなり，歪の修正をおこなう必要はなくなった。

7.3 回転円筒中の流れ特性

回転円筒中での線状体の運動を論ずる場合，回転円筒中の流れ特性を知らなければならない。そこで，線状体の落下実験をおこなう前に，流れ特性を実験により調べた。

本実験の場合，流速は最大1194 (mm/s)であり，第4章，第5章の矩形管内流れおよびノズル内流れの場合と比較してかなり大きいが，円筒の中心に向うにつれて流速は減少するため，ピトー管等による測定は困難となる。そこで，矩形管内流れおよびノズル内流れの場合と同様に，ポリスチレンビーズを用いたトレーサ法により流速分布を測定した。

回転円筒中でトレーサ粒子が運動する場合，トレーサ粒子には遠心力が作用し，粒子は円筒の半径方向にも運動するため，ある半径における粒子の円周方向速度を求めることが困難になる。そこで，トレーサ粒子を回転流体の自由表面に浮かべて，遠心力と重力と浮力の差にもとづく外力の，自由表面方向の成分が釣合った状態，すなわち，トレーサ粒子が半径方向に移動しない状態のもとで実験をおこなった。

実験では，実験室全体を暗室とし，回転円筒上方からトレーサ粒子の運動状態をマルチストロボ撮影した。撮影は円筒の回転数$N=30, 60, 90, 120$ (rpm)についておこない，つぎに述べる方法によりそれぞれの半径における流速を求めた。

図7.2に示すように，撮影された半径R (mm)の位置にあるトレーサ粒子1と2のなす中心角を$\Delta\theta$ (rad)，ストロボ発光数をS (cpm)とすると，定常状態ではトレーサ粒子の速度と流速は一致しているので，半径Rの位置における円周方向の流速v (mm/s)は，

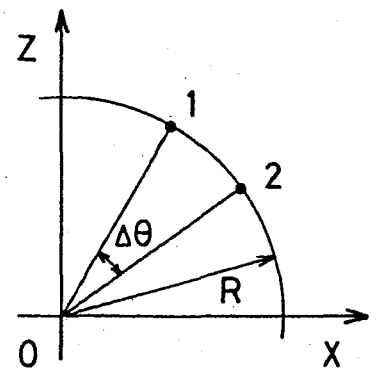


図7.2 トレーサ粒子軌跡の模式図

$$v = R \cdot \Delta\theta \cdot S / 60 \qquad (7.1)$$

となる。

図7.3に回転数$N=60$(rpm)，ストロボ発光数$S=600$(cpm)の場合のトレーサ粒子の運動状態を示す。また，この図から(7.1)式により求めた半径方向距離Rと円周方向の流速vの関係を図7.4に示す。なお，図7.4では，半径方向距離は円筒の内側半径(95(mm))で無次元化し，円周方向流速は円筒内面の周速(597(mm/s))で無次元化し，×の印を付けて表わしている。

R^*とv^*の関係は原点を通る直線で表わされる。すなわち，回転円筒中の流れは一様渦度をもつ流れであることが分かる。また，トレーサ粒子の運動状態を示す図7.3を見れば分かるように，回転円筒と流体が相対的静止状態にある場合と比較して，流体の角速度はわずかに(1.5(%)程度)小さくなっているが，これは実験誤差として無視できる程度のものである。したがって，流体の角速度と円筒の角速度は一致していると考えて，線状体の落下特性は円筒の回転数で整理する。

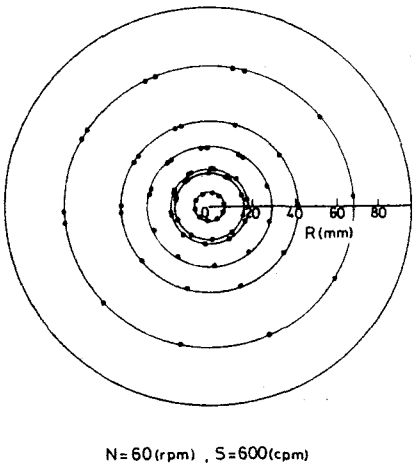


図7.3 トレーサ粒子の運動状態

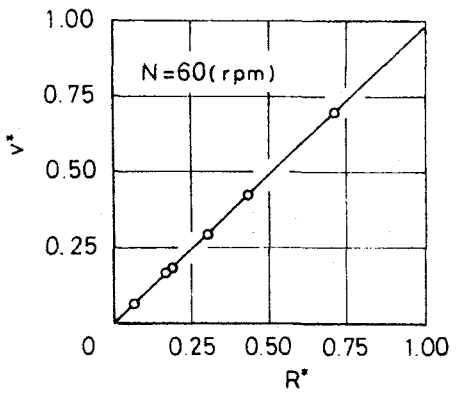


図7.4 円周方向流速測定結果

7.4 回転流体中における線状体の落下実験方法

線状体の落下特性として，重心の軌跡，重心の角速度，運動中の姿勢および線状体の配向を考え，線状体の比重量，長さ，直径，初期角度，初期位置および円筒の回転数が落下特性におよぼす影響を調べた。

7.4.1 線状体の落下実験方法

無段変速機を調節して円筒の回転数を所要の値に設定し，流れが定常になった後，線状体を落下させ，運動状態をマルチストロボ撮影した。図7.5に撮影概要を示す。第2章で述べたように，静止流体中での線状体の運動状態の撮影も水槽の正面と側面の直角2方向からおこなったが，この場合，側面から撮影した目的は，線状体がほぼ一平面内で運動しているかどうかを確かめるためであったが，本実験では，線状体は3次元運動をおこなうので，少なくとも2方向から撮影することが必要である。そこで，静止流体中での場合と同様に，透明アクリル板で製作してある水槽⑥の2面を利用して，直角2方向からNo.1カメラ③とNo.2カメラ④の2枚のフィルム面上に運動状態を記録した。なお，本実験装置の座標系としては，初期位置での線状体重心と同一高さ（円筒底面から428(mm)）の円筒中心軸上の点を原点（O）とし，水平面内No.2カメラの向きにX軸，No.1カメラの向きにZ軸，鉛直下向き（円筒中心軸方向）にY軸を定めた。

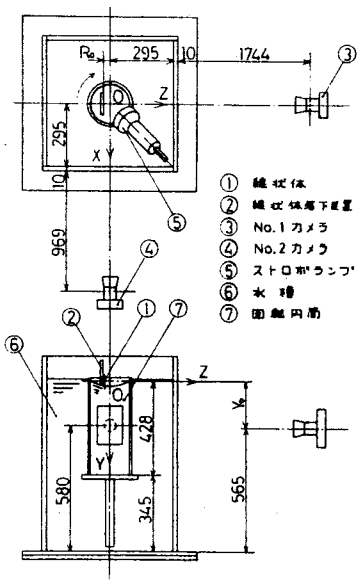


図7.5 線状体撮影概要

撮影では，実験室全体を暗室とし，

線状体のカメラ側の面が良く光るようにストロボランプ⑤を円筒の斜め上方に固定し，運動状態が十分わかるような写真間隔を得るため，実験条件によりストロボ発光数をS=400~1200 (cpm) の範囲で変化させた。

本実験に用いた線状体落下装置の概要を図7.6に示す。ストロボランプを円筒の斜め上方に固定したため，落下装置全体を傾斜させ，線状体を取付ける際に，落下装置を枠からスライド式に取りはずすことができるようにしてある。その他の部分は，静止流体中での線状体の落下実験に用いたものとまったく同じであり，2枚の塩化ビニール板⑥の間に取付けられている初期角度設定用円グラフ③により，所要の初期角度αに線状体⑦を設定し，ピンセット④で設定面⑤上に固定する。つぎに，ピンセット押上げ用ネジ②を回し，ピンセットを押上げて線状体を落下させた。

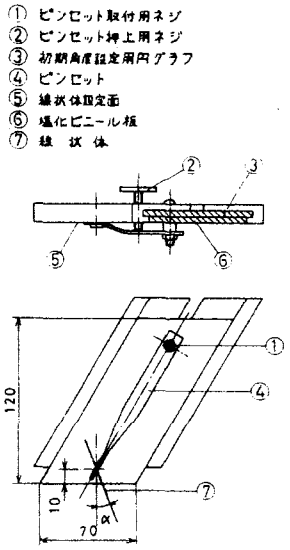


図7.6 線状体落下装置概要

なお，落下装置が流れ中へ入ると流れを乱すので，流れ中に入らないように注意し，回転数により円筒内の水の自由表面の形状が異なるため，水の量を調節して，線状体の先端部が流れに入るようにし，その状態から線状体を落下させた。しかし，長さが小さい線状体の場合および回転数が大きい場合には，先端部が流れ中に入らないことがある。そのときには，落下装置が流れ中に入らない程度にできるだけ円筒内に水を入れ，空気中から回転流体中へ線状体を落下させた。

実験には，比重量の影響を調べるため，鉛筆の芯（No.1試料）とピアノ線（No.2試料）を用いた。それらの試料条件および実験条件を表7.1に示す。なお，本実験の場合，直角2方向か

ら撮影したが，両方向ともに鮮明な写真を得る必要があるため，ストロボランプの光を良く反射するように線状体に薄く白色塗装した。このため，直径が第2章の静止流体中での場合より少し大きくなっている。

表7.1 試料条件および実験条件

試料番号	試料名	初期位置 R_0 (mm)	線状体直径 d (mm)	線状体長さ l (mm)	線状体比重量 γ_b (gf/cm³)	初期角度 α (°)	円筒回転数 N (rpm)
1	鉛筆芯	0	0.425	60	1.624	0	30
			0.608	30	1.692		60
				45			75
				60			90
			0.745	60	1.657		105
			0.938	60	1.988		120
		25	0.608	30	1.692	0	30 60
				60			90 120
2	ピアノ線	0	0.653	15 30	7.506	0	30 60
				45 60			75 90
							105 120
		25		30		90	30 60
		50		60			90 120

表7.1に示す実験では，線状体の比重量 γ_b，長さ ℓ，直径 α，初期角度 α，初期位置 R_0 および円筒回転数 N がおよぼす影響について調べた。初期角度 α とは，初期位置での線状体の軸方向と鉛直線のなす角度である。また，初期位置 R_0 とは，図7.5に示すように，線状体設定面がつねにX軸に平行で，しかも線状体重心がZ軸上に位置するように落下装置をZ軸の負の方向へ移動させたときの座標の原点と線状体重心の距離であり，$R_0 = 5, 25, 50$ (mm) の3種類変化させた。

また，同時に，$\alpha = 0.745$ (mm)，$\ell = 60$ (mm) のNo.1試料を用いて，$\alpha = 0.5°$ で静止流体中での実験をおこない，回転流体中での結果と比較した。

試料は，長さのばらつきを小さくする目的とその端面を軸に直角にする目的で端面を研磨布で仕上げた。また，長さ，直径，比重量はランダムに抽出した10本の試料に対して測定し，その平均値をもってそれらの値とした。

実験では，各実験条件につき15本程度の線状体を落下させた。そして，マルチストロボ撮影した写真を参考にして，その実験条件を代表すると考えられる実験を2個ないし3個選び，それらの写真から線状体両端の座標を読取り，以下で述べる方法で撮写体距離の変化に対する修正をおこなった後の両端の座標から落下特性を求め，それらを図示し，検討した後その

中の1つを実験データとして採用した。以下では，被写体距離の変化に対する修正の方法および落下特性を求める方法について述べる。

7.4.2 写真面上から真の落下運動を求める方法

回転流体中では，線状体は3次元運動するのでつねに被写体距離が変化している。したがって，写真を真の運動の正射影と考えることはできず，被写体距離の変化に対する修正をおこなう必要がある。

そこで，図7.7に示すように，No.1カメラで撮影された写真を(a)，No.2カメラで撮影された写真を(b)とし，No.1カメラのレンズ中心（円筒の中心軸上，底面から実際の距離220(mm)の点）を原点(O')とする座標系(x', y', z')を定め，線状体両端の座標を読取る。その際，x'とy'の値は写真(a)から，z'の値は写真(b)から読取り，それぞれx'_{ij}，y'_{ij}，z'_{ij} $(j=1,2)$とする。そして，線状体両端の真の位置をXとYに関してはXY面上に，Zに関してはYZ面上に引き直して求める。

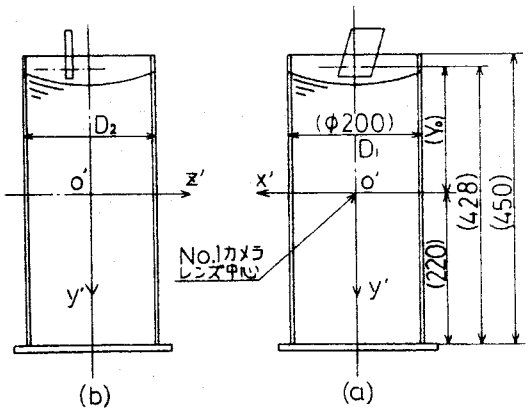


図7.7 写真面上の基準位置

被写体距離が異なるとフィルム面上の像の大きさに差が生ずる。すなわち，基準面（XY面あるいはYZ面）および線状体の端の被写体距離をL_1，Lとすると，同一高さHのフィルム面上での像の高さはそれぞれh_1，hとなり，つぎの関係で表わされる。

$$h_1/h = L/L_1 \qquad (7.2)$$

いっぽう，x'_{ij}，y'_{ij}，z'_{ij} は写真面上での座標であり，写真(a)，(b)上での円筒外径をそれぞれ D_1，D_2 (mm) とすると，写真の倍率は $D_1/200$ および $D_2/200$ となるので，この倍率を考慮すると，被写体距離の変化に対する修正をおこなう前の両端の座標 $(X'_{ij}, Y'_{ij}, Z'_{ij})$ は，

$$\left.\begin{aligned} X'_{ij} &= (200/D_1)\, x'_{ij} \\ Y'_{ij} &= (200/D_1)\, y'_{ij} \\ Z'_{ij} &= (200/D_2)\, z'_{ij} \end{aligned}\right\} \qquad (7.3)$$

となる。

したがって，水の空気に対する屈折率 n を考慮したYZ面およびXY面の被写体距離を L_{1x}，L_{1z} とすると，(7.2)式から被写体距離の変化に対する修正をおこなった後の線状体両端のX，Z座標は，

$$\left.\begin{aligned} X_{ij} &= \frac{L_{1x}\cdot L_{1z} - (L_{1x}/n)\, Z'_{ij}}{L_{1x}\cdot L_{1z} - X'_{ij}\, Z'_{ij}/n^2}\, X'_{ij} \\ Z_{ij} &= \frac{L_{1x}\cdot L_{1z} - (L_{1z}/n)\, X'_{ij}}{L_{1x}\cdot L_{1z} - X'_{ij}\, Z'_{ij}/n^2}\, Z'_{ij} \end{aligned}\right\} \qquad (7.4)$$

$(j=1, 2)$

で表わされる。

また，初期位置とNo.1カメラのレンズ中心の鉛直方向距離を Y_0 (= 208 (mm)) とすると，(7.2)式から線状体両端のY座標は，

$$Y_{ij} = Y_0 + (L_{1z} - Z_{ij}/n)\, Y'_{ij}/L_{1z} \qquad (7.5)$$

$(j=1, 2)$

となる。

7.4.3 線状体の落下特性を求める方法

前項で述べた方法により，被写体距離の変化に対する修正をおこなった後の線状体両端の座標 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) $(j=1,2)$ から，線状体の落下特性を求めた。

(1) 線状体重心の座標

重心の座標 (X_i, Y_i, Z_i) は，重心の軌跡，重心の半径方向移動距離，重心の回転角を知る上で必要であり，次式から求まる。

$$\left.\begin{aligned} X_i &= (X_{i1}+X_{i2})/2 \\ Y_i &= (Y_{i1}+Y_{i2})/2 \\ Z_i &= (Z_{i1}+Z_{i2})/2 \end{aligned}\right\} \qquad (7.6)$$

なお，線状体の落下軌跡は，XZ面，XY面への正射影で表わす。すなわち，回転円筒上方から見た落下軌跡を (X, Z) 座標で，また，NO.1カメラに正対して見た落下軌跡を (X, Y) 座標で示し，直角2方向からの図により落下軌跡を3次元で表現する。

(2) 重心の半径方向移動距離

半径方向移動距離R（円筒の中心軸と重心の距離）は，

$$R_i = (X_i^2 + Z_i^2)^{1/2} \qquad (7.7)$$

で求まり，Rと鉛直方向移動距離Yの関係および落下時間tとRの関係で表現する。

(3) 重心の回転角

線状体は円筒の中心軸回りで回転運動するので，その状態を調べるため，図7.8に示すように，Y軸を含み1番目にマルチストロボ撮影された線状体重心を通る平面から時計回りに測った，i番目の線状体重心を通るY軸を含む面までの角度を φ_i

とし，落下時間 t と重心の回転角 φ の関係で表現する。

なお，φ は次式から求まる。

$$\varphi_i = Tan^{-1}(Z_1/X_1) - Tan^{-1}(Z_i/X_i) \qquad (7.8)$$

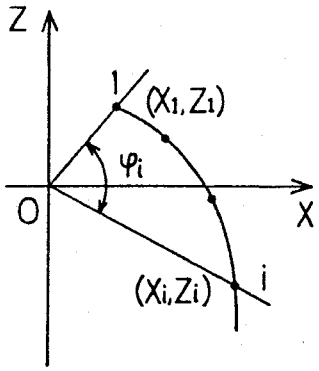


図 7.8　重心の回転角 φ

(4)　線状体の姿勢

3次元運動している線状体の姿勢を表わすためには，少なくとも2方向から見た姿勢で表現しなければならない。そこで，図 7.9 (a)に示すように，線状体の軸方向と鉛直線のなす角度を第1回転角 θ_1 とし，また，(b)に示すように，1番目に撮影された線状体を含む鉛直面から時計回りに測った，i 番目に撮影された線状体を含む鉛直面までの角度を第2回転角 θ_2 とする。

θ_{1i}，θ_{2i} は，それぞれ

$$\theta_{1i} = Tan^{-1}\left[\left\{(X_{i1}-X_{i2})^2+(Z_{i1}-Z_{i2})^2\right\}^{1/2} / (Y_{i2}-Y_{i1})\right]$$

$$\theta_{2i} = Tan^{-1}\left[(Z_{11}-Z_{12})/(X_{11}-X_{12})\right] - Tan^{-1}\left[(Z_{i1}-Z_{i2})/(X_{i1}-X_{i2})\right] \qquad (7.9)$$

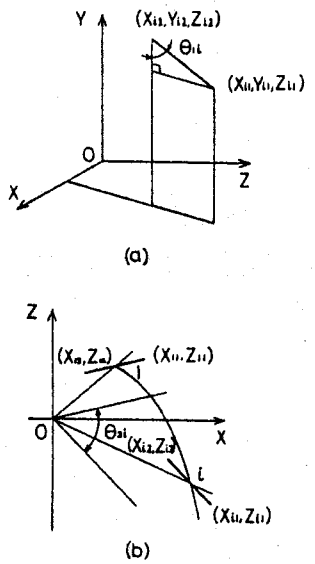


図 7.9　第1回転角 θ_1 と第2回転角 θ_2

で求まり，落下時間 t と第1回転角 θ_1 の関係および t と第2回転角 θ_2 の関係で姿勢の変化を表わす。

(5) 線状体の配向

図7.10に示すように，回転流体中における線状体の配向には，大別して円周方向に配向する場合（線状体A）と半径方向に配向する場合（線状体B）の2通りが考えられる。

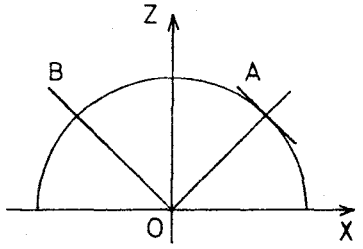


図7.10 線状体の配向

オープンエンド精紡機のロータ内の回転気流中においてもっとも望ましい状態は，繊維が円周方向に配向し，しかも，その姿勢が水平（$\theta_i = 90°$）になることである。そこで，円周方向に配向している場合を配向度1，半径方向に配向している場合を配向度0とする。

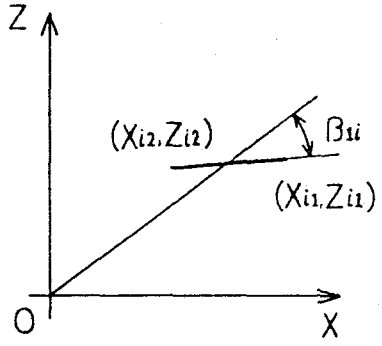


図7.11 線状体の配向角

図7.11に示すように，Y軸を含み線状体重心を通る平面から時計回りに測った，線状体を含む鉛直面までの角度を配向角β_iとすると，

$$\beta_{1i} = Tan^{-1}[(Z_{i1}+Z_{i2})/(X_{i1}+X_{i2})] - Tan^{-1}[(Z_{i1}-Z_{i2})/(X_{i1}-X_{i2})] \qquad (7.10)$$

となり，線状体の配向度βは次式で表わされる。

$$\beta_i = 2\beta_{1i}/\pi \qquad (7.11)$$

なお，配向度の変化は，落下時間tと配向度βの関係で表現する。

以上，線状体の落下実験により，諸要因が落下特性におよぼす影響を調べることができた。以下ではその結果について報告

する。なお，表および図中の長さは公称長さで記載する。また，線状体の一端あるいは両端が円筒側面に到達する場合，図中に二点鎖線を描いてその位置および時間を明示する。

7.5 線状体長さの影響

この節では，$\alpha=0.608$ (mm)，$\ell=30, 45, 60$ (mm) のNO.1試料および $\alpha=0.653$ (mm)，$\ell=15, 30, 45, 60$ (mm) のNO.2試料を用いて，$\alpha=0°$，$R_0=5$ (mm) でおこなった実験結果から，線状体長さが落下特性におよぼす影響を調べる。

7.5.1 線状体の落下軌跡

$N=90$ (rpm)，$\ell=15$ (mm) と $\ell=60$ (mm) のNO.2試料の落下軌跡を図7.12，7.13に示す。図中の線状体の時間間隔は，$\ell=15$，60 (mm) ともに $\Delta t=0.12$ (s) である。

回転流体の中心付近に落下した線状体は，流体から抗力を受けるため流線に沿って運動を開始するが，重心の自由度が

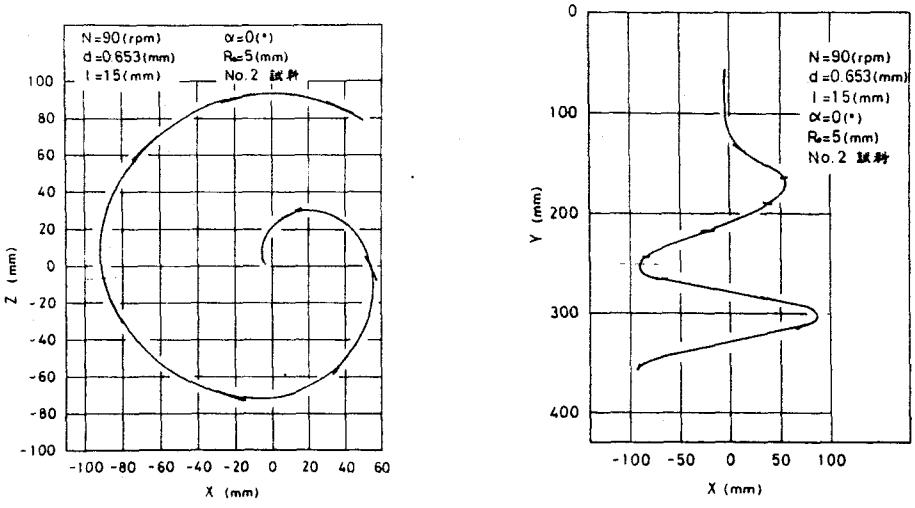
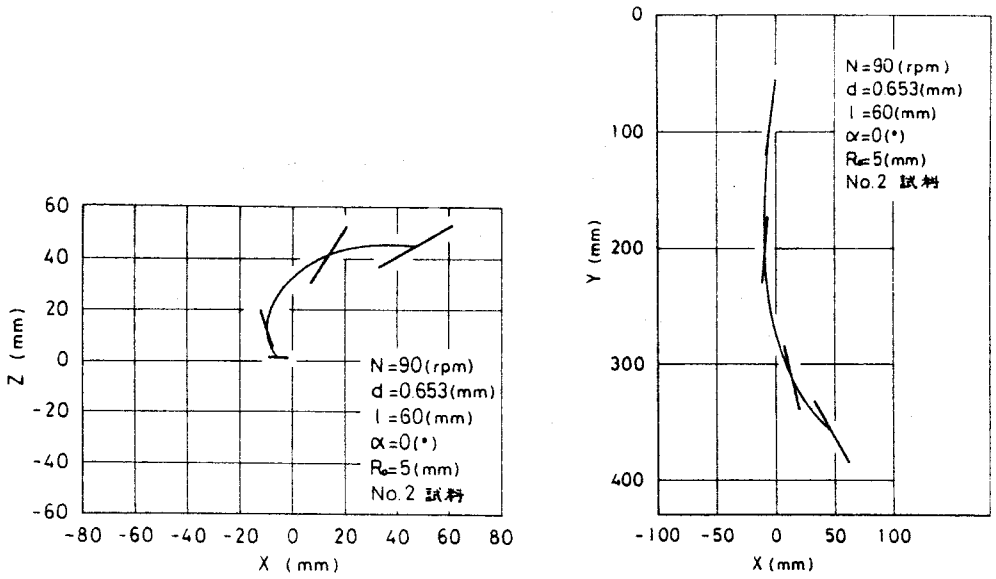


図7.12 線状体の落下軌跡



(a) (b)

図 7.13 線状体の落下軌跡

加速されるにつれて線状体に作用する遠心力が除々に増大するため，回転流体の半径方向へも運動し始める。すなわち，線状体は，回転流体の中心軸回りの回転運動と半径方向への運動をおこないながら落下し，円筒側面あるいは底面に到達する。また，運動中の鉛直面内での線状体の姿勢（第1回転角θ_1）は，静止流体中での場合と同様に水平方向に近づく。これは，円筒上方から見た落下軌跡図(a)において，線状体のXZ面への正射影長さが除々に増大していることから分かる。

いっぽう，図7.12と図7.13を比較すると，ℓが小さい方が同一落下時間での回転流体の中心軸回りの線状体重心の回転は大きく，しかも，半径方向移動距離も大きい傾向にあることが分かる。

そこで，長さが半径方向移動距離におよぼす影響を調べるために，tとRの関係を図7.14，7.15に示す。tとRの関係を表わす曲線は，接線勾配がほとんど0で始まり，すなわち，この曲線の接線勾配は重心の半径方向速度を表わすので，線状体

は落下開始直後の領域では，回転流体の中心軸回りの回転運動のみをおこない，その後，鉛直面内での姿勢が水平方向に回転し始めると，静止流体中での場合と同様に流体から受ける抗力により線状体は水平方向にも運動し始めるので半径方向速度も除々に増大する。さらに，回転流体の中心軸回りの回転運動に伴ない線状体には遠心力が作用するため，半径方向速度はいっそう加速される。

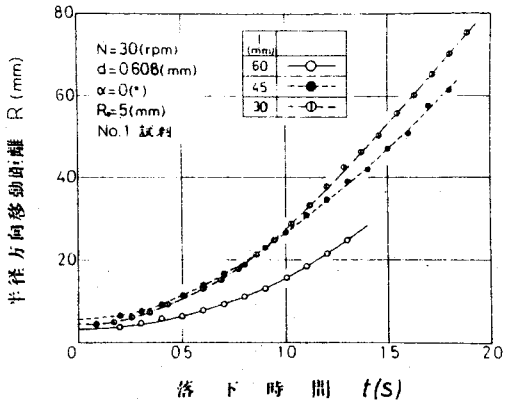


図7.14 半径方向移動距離におよぼす長さの影響

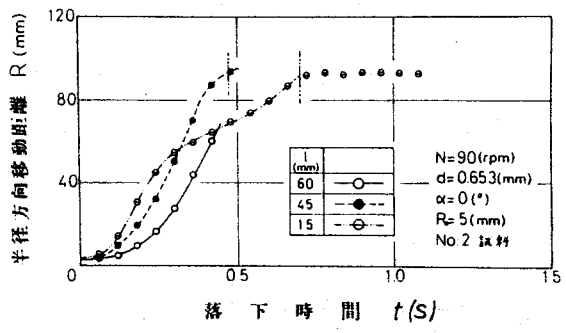


図7.15 半径方向移動距離におよぼす長さの影響

$N=30$(rpm)の$NO.1$試料の結果（図7.14）から，同一落下時間で比較すると，ℓが小さいほどRおよび半径方向速度$\dot{R}$は大きいことが分かる。ところが，$N=90$(rpm)の$NO.2$試料の結果（図7.15）を見ると，Rの値は，落下開始後しばらくの間，長さの小さい$\ell=15$(mm)がもっとも大きくなるが，$t>0.3$(s)程度の領域では，$\ell=45$(mm)の方が大きくなり，さらに，落下開始から約0.45(s)経過すると，$\ell=60$(mm)の方が大きくなることが分かる。また，$\ell=15$(mm)の場合，線状体は，$t=0.15$(s)程度まで半径方向に加速されるが，その後減速され，$t=0.5$(s)程度からふたたび加速される現象が見られる。ただし，$t>0.5$(s)の領域での加速は，$t<0.15$(s)の領域での加速に比べて小さい。

これは，つぎの原因による。7.5.2項に記載するtとθ_1の関

係（図 7.20）から，鉛直面内での線状体の姿勢θ_1は，$t=0.15$(s)程度で約50°となり，$t=0.5$(s)程度で90°，すなわち，水平な姿勢になる。第2章で述べたように，静止流体中では，線状体は鉛直方向に対する線状体の軸方向の傾斜角θ（本章のθ_1に相当する角度）が40°から50°の範囲までは水平方向に加速されるが，その後減速される。回転流体中での線状体の運動は，静止流体中での運動に遠心力にもとづく運動が加わった形になるため，線状体を含む鉛直面内での水平方向速度の変化に伴ない半径方向速度に加速および減速の現象が現われたと考えられる。

また，静止流体中での場合，線状体が水平方向に加速されている領域では，同一回転角に対する$\dot{X}$はℓが大きいほど大きくなるが，その差はわづかであり，姿勢の変化はℓが小さいほど大きく，同一落下時間でのθの値は大きくなる。（2.10.2，2.10.3項参照）したがって，同一落下時間で比較すると，この加速領域ではℓが小さいほど$\dot{X}$の値は大きくなる。いっぽう，回転流体中での場合にも，図7.20から，鉛直面内での姿勢の変化は，ℓが小さいほど大きく，同一落下時間でのθ_1の値は大きくなる。したがって，落下開始後しばらくの間，鉛直面内での水平方向速度は，ℓが小さいほど大きくなるため，この水平方向速度の半径方向成分も大きくなる。さらに，線状体がすべて流れ中に入るまでの時間は，ℓが小さいほど短いので，回転流体の中心軸回りの重心の角速度$d\varphi/dt$は，落下開始直後の領域ではℓが小さいほど大きい。このため，線状体に作用する単位長さ当りの遠心力は大きくなる。以上2つの原因により，落下開始後の領域で，ℓが小さいほど半径方向速度$\dot{r}$は大きくなると考えられる。すなわち，この領域では，長さにより姿勢および重心の角速度が異なるため，半径方向速度に差が生ずる。

ところが，回転流体の中心軸回りの重心の回転状態を表わすtとφの関係，図7.16から，この曲線の接線勾配で表わされ

る重心の角速度 $d\varphi/dt$ は，落下開始直後の領域を除き，ℓ にかかわらず回転流体の角速度（この場合，540(°/s)）にほぼ等しくなる。いっぽう，ℓ が小さいほど鉛直面内で線状体が回転するのに要する時間は小さく，短時間のうちに水平方向に近づくため，χ は減少し，やがて，同一落下時間での χ の値は，ℓ が大きい方が大きくなる。

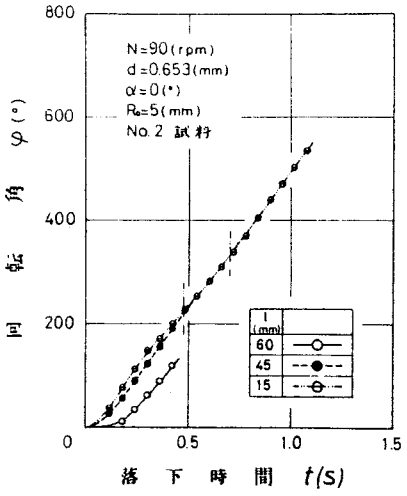


図7.16 重心の回転角におよぼす長さの影響

以上のように，重心の半径方向移動距離におよぼす長さの影響を考察する場合，重心の角速度の変化のみならず，線状体の姿勢の変化を考慮する必要があり，$N=90$(rpm) の No.2 試料の結果（図7.15）から，長さが大きい線状体の姿勢が水平になるのに十分な領域で運動をおこなう場合を考えると，最終的には長さが大きいほど半径方向移動距離は大きくなる。χ は，静止流体中での水平方向移動距離 X に対応する値であり，回転流体中での結果と静止流体中での結果は一致する。（2.10.1項参照）

つぎに，長さが χ と Y の関係におよぼす影響を調べるため，図7.14，7.15と同一条件の χ と Y の関係を図7.17，7.18に示す。

図7.18において，$\ell=15$(mm) の場合を見ると分かるように，χ と Y の関係は，$Y=135$(mm) および 220(mm) 程度の2箇所で変曲点をもつ曲線になる。なお，変曲点をもつときの θ_1 の値は約65°，90°である。$\theta_1=65°$ 程度で変曲点をもつ現象は，静止流体中での重心の軌跡にも見られたが，回転流体中での場合，水平な姿勢になった後，遠心力の作用により線状体はふたたび半径方向に加速される。

回転流体中で線状体が運動する場合，遠心力が作用するため，

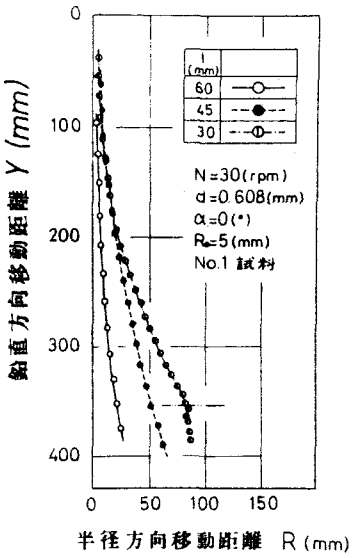


図 7.17 半径方向移動距離におよぼす長さの影響

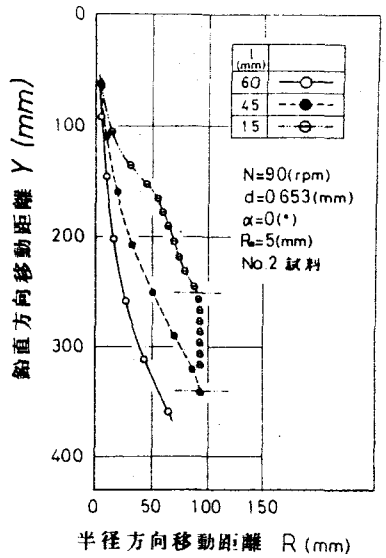


図 7.18 半径方向移動距離におよぼす長さの影響

線状体を含む鉛直面内での水平方向速度の値は，静止流体中での場合と異なるので，鉛直方向速度 $\dot{Y}$ の値も両場合で差が生ずるが，長さが $\dot{Y}$ と θ_1 の関係におよぼす影響の傾向は変わらないことから，長さが $\dot{Y}$ におよぼす影響も，回転流体中と静止流体中では変わらないと考えられる。2.10.2項の静止流体中での結果から，$\dot{Y}$ は落下開始直後の領域では急激に加速されるが，その後 θ の増加に伴ない単調に減少し，θ が約50°以下の領域では，長さが大きいほど大きいが，これ以上の領域では長さの影響を受けない。また，回転流体中での場合にも，ℓ が小さいほど鉛直面内で線状体が回転するのに要する時間は短い。したがって，同一落下時間で比較すると，ℓ が小さいほど $\dot{Y}$ の値は小さくなる。いっぽう，前述したように，同一落下時間での $\dot{R}$ の値は，線状体の姿勢によって異なるけれども，傾向としては ℓ が小さいほど大きいので，同一鉛直方向移動距離における $\dot{R}$ の値は，ℓ が小さいほど大きくなる。これは，本実験の範囲内でいえることであり，θ_1 が90°に近づくにつれて $\dot{R}$ は減少

することから，長さの大きい線状体の姿勢が水平になるのに十分な領域で運動する場合，同一鉛直方向移動距離における尺の値は，ℓが大きいほど大きくなる領域が存在すると考えられる。したがって，長さの小さい線状体の姿勢が水平になるまでの範囲内では，長さが小さいほど半径方向移動距離は大きくなる。

7.5.2 線状体の姿勢

$N=30$ (rpm) の No.1 試料および $N=90$ (rpm) の No.2 試料に対する t と θ_1 の関係を図 7.19，7.20 に示す。

比重量の小さい No.1 試料の結果，図 7.19 において，線状体の先端部が流れ中に入った瞬間に流体から抗力を受けるため，θ_1 を増大させる向きの回転モーメントが作用し，線状体は水平方向に回転する。このため，落下開始直後の領域での θ_1 の値は 0 にならないのである。しかし，初期位置が回転流体の中心近くであり，しかも，回転数が小さいので，急激な姿勢の変化はわずかである。なお，No.2 試料の場合，比重量が大きく，したがって，慣性モーメントが大きいため，この急激な姿勢の変化はほとんど見られない。

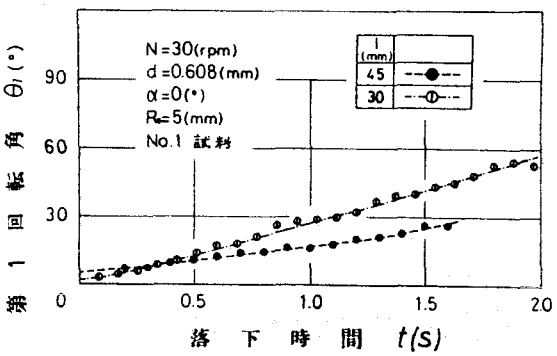


図 7.19 姿勢におよぼす長さの影響

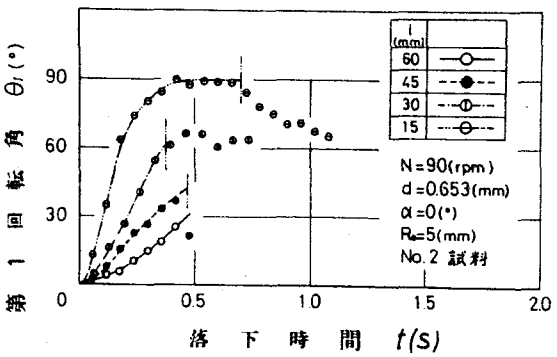


図 7.20 姿勢におよぼす長さの影響

線状体がすべて流れ中に入った後の領域では，静止流体中で

の場合と同様に線状体は除々に水平方向に回転する。回転流体中では線状体に遠心力が作用するが，その姿勢から考えて先端部に作用する遠心力の方が大きいため，遠心力によるθ_1を増大させる向きの回転モーメントも作用するので，静止流体中での場合より角速度$d\theta_1/dt$は大きくなると考えられる。$d\theta_1/dt$の増大に伴ない流体から受ける抗力にもとづく線状体の回転を押える向きの回転モーメントが増大するため，$d\theta_1/dt$は減速され，最終的に姿勢は水平方向に漸近し，もっとも安定した姿勢になる。また，これらの図から，lが小さいほど$d\theta_1/dt$は大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さくなる。第1回転角θ_1は，静止流体中での回転角θに相当する値であり，鉛直面内での姿勢の変化におよぼす長さの影響は，静止流体中での場合と一致する。

つぎに，線状体を含む鉛直面の変化を表わすものとθ_2の関係を図7.21に示す。

θ_2は，その定義から，i番目に撮影された線状体の配向角β_{1i}と1番目に撮影された線状体の配向角β_{11}の差と重心の回転角φの和で表わされる。すなわち，

$$\theta_2 = \varphi + \beta_{1i} - \beta_{11} \qquad (7.12)$$

となる。

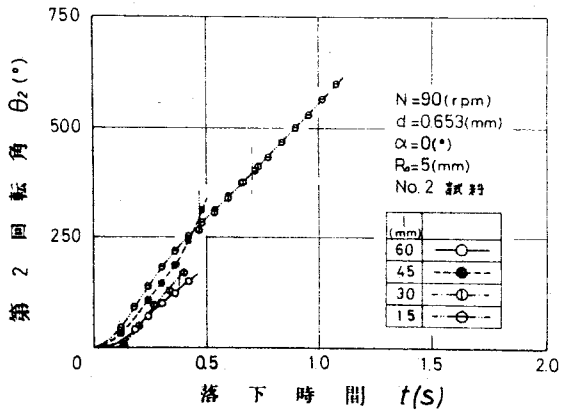


図7.21 姿勢におよぼす長さの影響

鉛直面内で線状体が水平方向に回転し始めると，静止流体中での場合と同様に流体から受ける抗力により水平方向にも運動する。いっぽう，線状体を含む鉛直面は，円周方向とある角度をなしているので，この水平方向速度の円周方向成分が回転流体の抗力にもとづく円周方

向速度に加わり，図7.16の$\ell=15$(mm)の場合を見れば分かるように，落下開始後の小さい領域で$d\varphi/dt$の値は，流体の角速度より大きくなる。しかし，姿勢が水平に近づくにつれてこの水平方向速度は減少し，線状体に作用する$d\varphi/dt$を減少させる向きの抗力が増大するため，$d\varphi/dt$は減少し，回転流体の角速度にほぼ等しくなる。したがって，tとφの関係は，$d\varphi/dt$が流体の角速度に等しくなるまでの領域で上に凸の曲線になる。このため，図7.21において，$\ell=15$(mm)のtとθ_2の関係を表わす曲線は，前述の領域で上に凸の曲線になる。ただし，この場合，線状体の配向の変化を表わす図7.22から，配向角β_1は増大しているので，この影響が加わり曲線が凸になる度合は，tとφの関係を表わす曲線の場合より強調される。しかし，この領域を過ぎると，β_1は90°($\beta=1$に相当)に漸近するので，$d\theta_2/dt$も除々に$d\varphi/dt$の値に近づき，線状体が円筒側面に到達する($t=0.7$(s)程度)直前には回転流体の角速度(540(°/s))にほぼ等しくなる。

いっぽう，$\ell=45$(mm)および60(mm)の場合，鉛直面内での姿勢の変化は$\ell=15$(mm)の場合に比べて小さいため，図7.16から，$d\varphi/dt$は除々に増大して回転流体の角速度に近づく。しかし，図7.22から，$\ell=45$(mm)の場合，配向角β_1は増大し，急激に90°に近づくため，θ_2は急激に増大する。また，$\ell=60$(mm)の場合，β_1は負の状態から急激に増大し，その後減少してほぼ一定となるため，tとθ_2の関係を表わす曲線は下に凸になる。

以上のように，線状体重心の角速度は，落下開始直後の領域を除き長さにかかわらず回転流体の角速度にほぼ等しくなるが，長さが異なると線状体が回転流体から軸に直角な方向に受ける抗力の軸方向の分布状態が異なるため，配向角の変化に差が生じ，線状体を含む鉛直面の変化におよぼす長さの影響は明確に現われない。

7.5.3 線状体の配向

$N=90$ (rpm) における No.2 試料の配向の変化を図 7.22 に示す。

$\ell=60$ (mm) の場合，円筒上方から見た落下軌跡，図 7.13 (a) を見れば分かるように，1番目に撮影された線状体の配向角 β_1 は負となっている。すなわち，線状体の先端部が，Y軸を含み重心を通る鉛直面から反時計回りの方向に位置している。落下開始直後の領域であるので，重心の角速度 $d\varphi/dt$ は回転流体の角速度より小さく，したがって，線状体が流体から軸に直角な方向に受ける抗力は先端部の方が大きくなり，線状体は β_1 を増大させる向きに急激に回転し，配向度 β は最大（約 0.2）となる。その後わずかに減少してほぼ一定値，約 0.15 になる。

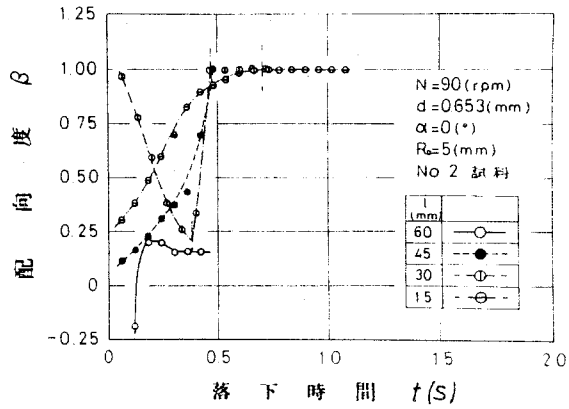


図 7.22 配向におよぼす長さの影響

図 7.16 から，β がほぼ一定になっているときの $d\varphi/dt$ の値は回転流体の角速度とほぼ等しい。しかも，β_1 は変化しないので，線状体全体が回転流体と同じ角速度で回転しており，線状体には軸に直角な方向の抗力は作用しない。したがって，このとき，線状体に作用する遠心力の軸に直角な方向成分の分布状態は一様であり，線状体には β_1 を変化させる回転モーメントが作用しないと考えられる。これを確かめるために，線状体の両端に作用する遠心力の軸に直角な方向成分を計算する。

図 7.23 に示すように，両端に作用する遠心力を F_{c1}，F_{c2}，半径方向の距離を r_1，r_2，線状体の軸方向と回転流体の半径方向のなす角度を β_{c1}，β_{c2} とすると，

$$\left.\begin{aligned} F_{c1} &= M_b R_1 \omega_b^2 \\ F_{c2} &= M_b R_2 \omega_b^2 \end{aligned}\right\} \qquad (7.13)$$

ただし，M_b；単位長さ当りの線状体の質量

ω_b；線状体の角速度

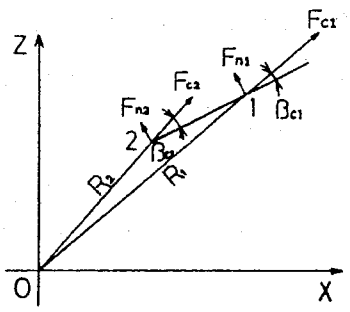


図 7.23 線状体に作用する遠心力

となり，遠心力の軸に直角な方向の成分 F_{n1}，F_{n2} は，

$$F_{n1} = F_{c1} \sin\beta_{c1} \quad , \quad F_{n2} = F_{c2} \sin\beta_{c2} \qquad (7.14)$$

であるから，F_{n1}/F_{n2} は，

$$F_{n1}/F_{n2} = (R_1/R_2)(\sin\beta_{c1}/\sin\beta_{c2}) \qquad (7.15)$$

となる。

ここで，線状体の両端 1，2 および座標の原点（O）によって作られる三角形について正弦公式を適用すると，

$$R_1/R_2 = \sin\beta_{c2}/\sin\beta_{c1} \qquad (7.16)$$

となるので，(7.15)式から，$F_{n1}/F_{n2} = 1$ であることが分かる。

以上のように，$d\varphi/dt$ が回転流体の角速度と等しく，しかも，重心の半径方向速度 $\dot{r}$ および鉛直面内での姿勢の変化が比較的小さい場合には，一定の配向角を保ったまま線状体が運動をおこなう場合がある。

また，$\ell = 15$ (mm) および 45 (mm) の場合，1 番目に撮影された線状体の配向角は，それぞれ約 27°（$\beta = 0.3$ 程度），約 10°（$\beta = 0.11$ 程度）であり，落下開始直後の領域では，$d\varphi/dt$ は

回転流体の角速度より小さく，線状体が流体から軸に直角な方向に受ける抗力は先端部の方が大きくなり，線状体はβ_1を増大させる向きに急激に回転し，$\ell=45$(mm)の場合，βが1に近づくにつれて線状体に作用する遠心力の軸に直角な方向の分布は，一様状態に近づくが，抗力の分布は長さが大きいため先端部の方が大きく，角速度$d\beta_1/dt$は減速することなく，βが1を少し越えた状態で円筒側面に到達する。これに対し，$\ell=15$(mm)の場合，長さが小さくβが1に近づくにつれて遠心力，抗力ともにβ_1の増大を押える向きに作用し始めるため，$d\beta_1/dt$は減速し，βは1に漸近し，円筒側面に線状体の両端がほとんど同時に到達する。

いっぽう，$\ell=30$(mm)の場合，1番目に撮影された線状体の配向角は，約87°($\beta=0.97$程度)であり，線状体はほぼ円周方向に配向している。しかし，先端部の方が回転流体の中心からの距離がわずかに大きいため，遠心力により線状体はβ_1を減少させる向きに回転し始める。β_1の減少に伴ない回転流体の中心からの距離は，先端部の方が除々に大きくなるため，遠心力にもとづくβ_1を減少させる向きの回転モーメントは増大し，β_1は急激に減少して$\beta=0.2$付近で円筒側面に到達する。その後，後端が側面に到達するまで，βは1に向って急激に増大する。

以上のように，落下開始直後の配向角の状態および長さにより，その後の配向角の変化の様子は異なる。オープンエンド精紡機のロータ内では，繊維の姿勢が水平で，しかも，両端が同時に滑壁に到達するのがもっとも望ましい状態であり，上述の$\ell=15\sim60$(mm)の結果から，$\ell=15$(mm)の場合，線状体は理想的な状態で円筒側面に到達している。

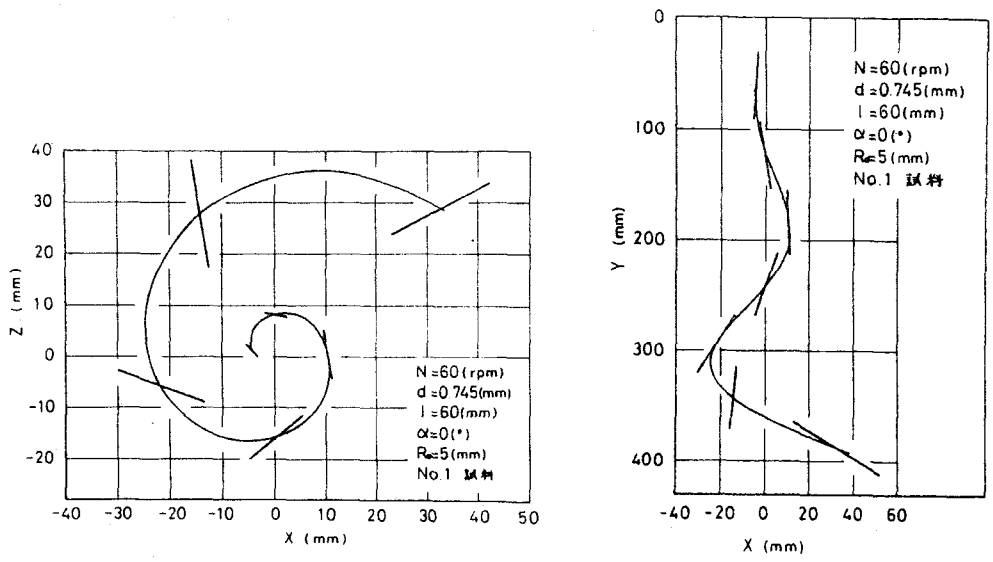
7.6 線状体直径の影響

この節では，$\ell = 60\,(mm)$，$d = 0.425$，0.608，0.745，$0.938\,(mm)$ のNo.1試料を用いて，$\alpha = 0°$，$R_0 = 5\,(mm)$でおこなった実験結果から，線状体直径が落下特性におよぼす影響を調べる。

7.6.1 線状体の落下軌跡

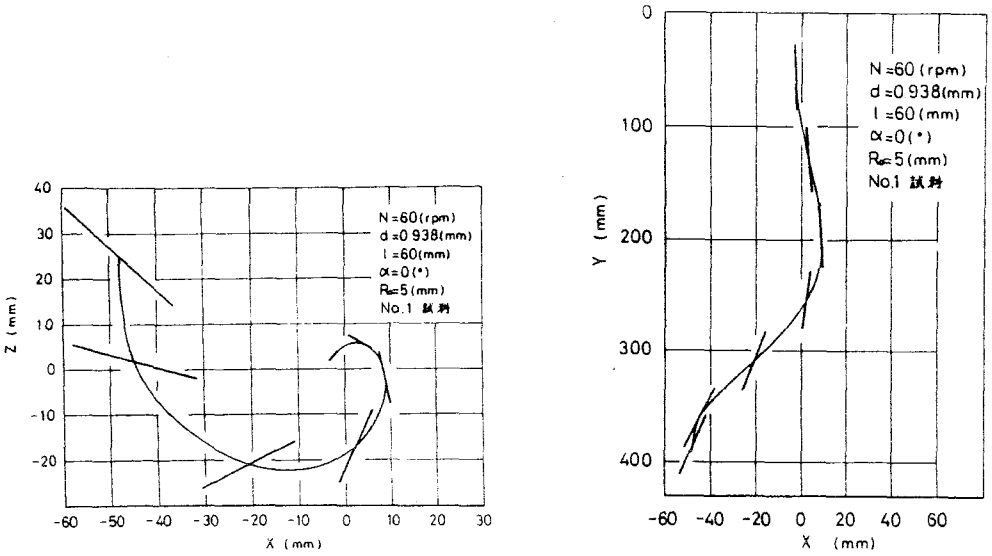
$N = 60\,(rpm)$，$d = 0.745\,(mm)$ と $d = 0.938\,(mm)$ の落下軌跡を図7.24，7.25に示す。図中の線状体の時間間隔は，$d = 0.745\,(mm)$ の場合，$\Delta t = 0.2\,(s)$，$d = 0.938\,(mm)$ の場合，$\Delta t = 4/30\,(s)$である。

流れ中に入った線状体は，流体から抗力を受け回転流体の中心軸回りの回転運動を始めるが，重心の角速度が加速されるにつれて，線状体に作用する遠心力が増大するため，回転流体の半径方向へも運動し始める。また，線状体を含む鉛直面内において，その姿勢は除々に水平方向に近づく。すなわち，線状体



(a) (b)

図7.24 線状体の落下軌跡



(a) (b)

図 7.25 線状体の落下軌跡

は姿勢を除々に変化させ，半径方向へ運動しながら，その重心がら旋状の曲線を描いて落下する。ここで，図 7.24 と図 7.25 を比較すると，直径が大きい方が，同一落下時間での回転流体の中心軸回りの線状体重心の回転は大きく，しかも，半径方向移動距離も大きい傾向にあることが分かる。

これは，$N=60(rpm)$ のときの t と r の関係，図 7.26，および t と φ の関係，図 7.28 を見ると明確に分かる。また，図 7.27 および図 7.29 に $N=90(rpm)$ の結果を示す。

これらの図から，円筒回転数にかかわらず，同一落下時間で比較すると，直径が大きいほど r および半径方向速度 $\dot{r}$ さらに φ は大きいことが分かる。なお，落下開始直後の小さい領域で α が小さいほど r が大きくなるのはつぎの原因による。線状体が流れに入った瞬間に流体から受ける抗力にもとづく回転モーメントは α のオーダーであり，いっぽう，重心回りの慣性モーメントは α^2 のオーダーであるので，α が小さいほど，落下開始直後の鉛直面内での急激な姿勢の変化は大きくなる。さらに，静止流

体中での場合と同様に重心の鉛直方向速度 $\dot{Y}$ は α が小さいほど小さく，急激な回転を受ける時間は長い。したがって，α が小さいほど急激な姿勢の変化は大きくなる。このため，Z軸上で落下を開始した線状体は，α が小さいほど，落下開始直後の領域でX軸にほぼ平行に移動する距離が大きくなり，したがって，R の値が大きくなると考えられる。

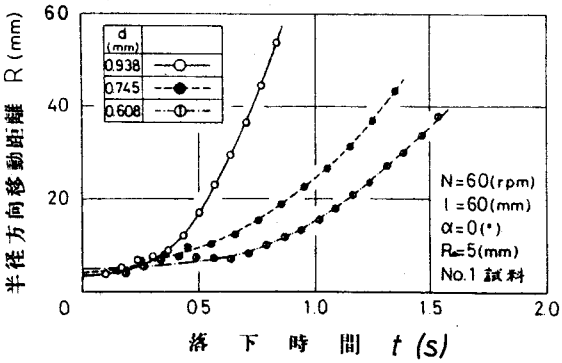


図 7.26 半径方向移動距離におよぼす直径の影響

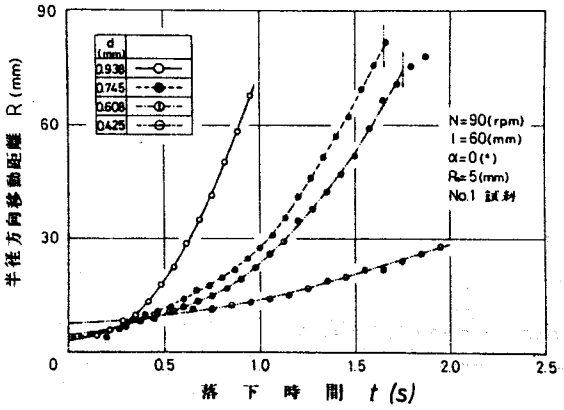


図 7.27 半径方向移動距離におよぼす直径の影響

上述したように，α が大きいほど，線状体がすべて流れ中に入るまでの時間は短いので，短時間のうちに線状体全体が流体から抗力を受けるようになる。また，鉛直面内で線状体が水平方向に回転し始めると，水平方向速度が除々に増大し始める。静止流体中での場合と同様に，鉛直面内での同一姿勢に対する水平方向速度は，α が大きいほど大きく（2.11.2項参照），したがって，この水平方向速度の円周方向成分は α が大きいほど大きくなる。以上2つの原因により，落下開始後しばらくの間，α が大きいほど重心の角速度 $d\varphi/dt$ は大きくなる。しかし，やがて，α が小さい線状体の $d\varphi/dt$ も加速され，α にかかわらず $d\varphi/dt$ は回転流体の角速度にほぼ等しくなる。なお，直径の大きい $\alpha=0.938$ (mm) の場合，鉛直面内での姿勢の変化が大きいため，7.5.2項で述べた $\ell=15$ (mm) の場合と同じ原因により，$d\varphi/dt$ が回転流体の角速度に等しく

なるまでの領域で，tとφの関係は上に凸の曲線になる。

落下開始直後の領域では，αが小さいほど急激な姿勢の変化が大きく，その影響で$\dot{r}$の値は大きいが，$d\varphi/dt$はαが大きいほど大きく，したがって，線状体に作用する単位質量当りの遠心力が大きくなるため，$\dot{r}$はより大きく加速され，落下開始直後の領域を過ぎるとαが大きいほど，同一落下時間でのrおよび$\dot{r}$の値は大きくなる。また，$\dot{r}$が大きくなると遠心力がいっそう大きくなるので，直径によるrおよび$\dot{r}$の差は除々に増大する。なお，$\dot{r}$が大きくなるのは，この他に，鉛直面内での水平方向速度はαが大きいほど大きく，その半径方向成分が大きいことも原因になっている。

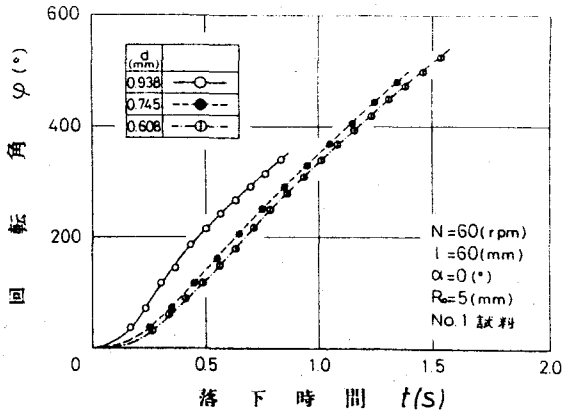


図7.28 重心の回転角におよぼす直径の影響

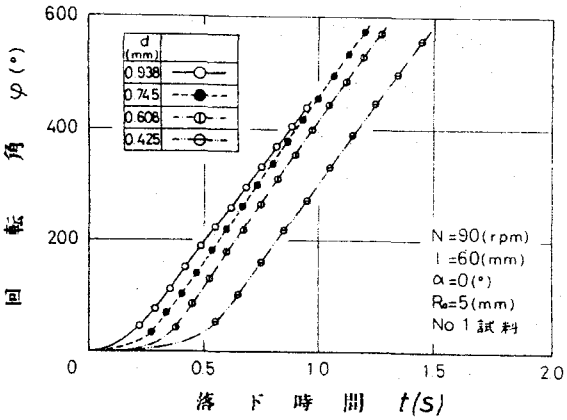


図7.29 重心の回転角におよぼす直径の影響

しかし，鉛直面内での姿勢の変化を表わすtとθの関係（図7.32）から，この実験の範囲内では，θは高々42°程度であり，鉛直面内での水平方向速度は加速状態にあるので，どの直径の場合にも，図7.15の$\ell=15$(mm)の場合見られたような$\dot{r}$の減速状態は現われない。

以上は，重心の角速度に差がある領域での場合を考えたが，

つぎに，$d\Phi/dt$が回転流体の角速度にほぼ等しくなった後の領域で線状体の運動を考える。

まず，重心の位置R，速度$\dot{R}$および姿勢θ_1とβ_1（θ_2の代りに配向角β_1を考える。）が，直径にかかわらず同一である瞬間を考えると，線状体に作用する遠心力はα^2のみに比例し，いっぽう，$\dot{R}$を減速させる向きに作用する抗力はαのみに比例する。したがって，単位質量当りに作用する遠心力は，αにかかわらず等しいが，抗力は$1/\alpha$のオーダーになり，αが小さいほど大きい。このため，半径方向加速度$\ddot{R}$はαが大きいほど大きくなる。このように，直径による$\ddot{R}$の差が最小になる条件のもとで線状体の運動を考える場合でも，$\ddot{R}$はαが大きいほど大きくなる。したがって，Rおよび鉛直面内での水平方向速度の影響が加わった場合，同一落下時間における$\dot{R}$の値は，直径が大きいほどいっそう大きくなる。

つぎに，直径がRとYの関係におよぼす影響を調べるため，$N=60$，90 (rpm) の結果を図7.30，7.31に示す。

鉛直方向速度$\dot{Y}$は，落下開始直後の加速領域を過ぎると，鉛直面内での姿勢が水平方向に近づくにつれて単調に減少し，$\dot{R}$は，この実験の範囲内では加速され続けるので，RとYの関係を表わす曲線の接線勾配dY/dR $(=\dot{Y}/\dot{R})$は単調に減少する。

図7.30，7.31において，RとYの関係は直径に対して一定の傾向を示さない。回転流体中で線状体が運動する場合，鉛直面内での水平方向速度の値は，静止流体中での場合と異なるため，$\dot{Y}$の値も両場合で異なるが，直径が$\dot{Y}$におよぼす影響，すな

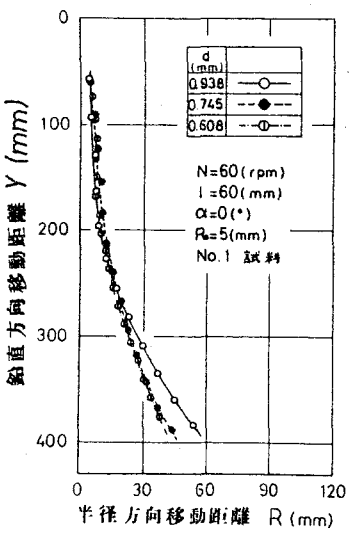


図7.30 半径方向移動距離におよぼす直径の影響

わち，同一姿勢における$\dot{Y}$の値は直径が大きいほど大きい，は変わらないと考えられる。

とθ₁の関係を表わす図7.32から，θ₁の値は高々42°程度であり，それ程大きくないので，この実験の範囲内では，同一落下時間におけるYおよび$\dot{Y}$はαが大きいほど大きい。また，前述したように，Rおよび$\dot{R}$もαが大きいほど大きくなり，したがって，RとYの関係におよぼす直径の影響は，直径が姿勢の変化および$\dot{Y}/\dot{R}$におよぼす影響により変わるため，一定の傾向を示さないのであると考えられる。

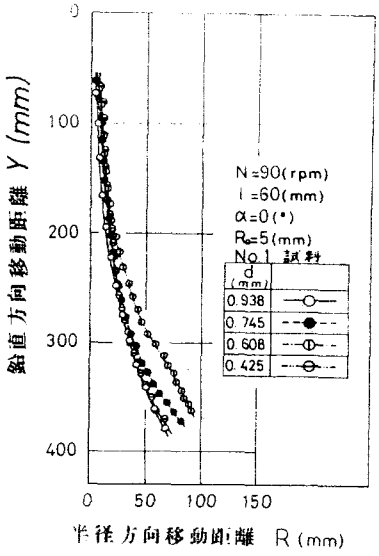


図 7.31 半径方向移動距離におよぼす直径の影響

しかし，直径の小さい線状体の姿勢が水平になるのに十分な領域で運動する場合，αが大きいほど短時間のうちに姿勢は水平に近づくので，$\dot{Y}$および$\dot{R}$は短時間のうちに減速される。したがって，同一鉛直方向移動距離における$\dot{R}$の値は，直径が小さいほど大きい領域が存在すると考えられる。

7.6.2 線状体の姿勢

$N=90$(rpm)における鉛直面内での姿勢の変化を図7.32に示す。

前項で述べたように，線状体が流れに入った瞬間に流体から受ける抗力により，水平方向に回転するが，この姿勢の変化はαが小さいほど大き

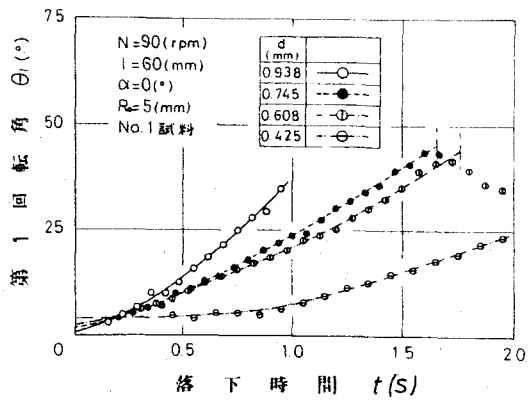


図 7.32 姿勢におよぼす直径の影響

い。しかし，初期位置が回転流体の中心近くであり，しかも，長さが大きいので，姿勢の変化はわずかである。

線状体がすべて流れ中に入った後の領域では，線状体は除々に水平方向に回転するが，dが大きいほど$d\theta_1/dt$は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。したがって，鉛直面内での姿勢の変化におよぼす直径の影響は，静止流体中での場合と一致する。ただし，回転流体中では，線状体に遠心力が作用し，その姿勢から考えて先端部に近いほど大きいため，θ_1を増大させる向きの回転モーメントが作用し，静止流体中での場合より$d\theta_1/dt$は大きくなると考えられる。

つぎに，線状体を含む鉛直面の変化を表わすtとθ_2の関係を図7.33に示す。θ_2はその定義から，(7.12)式で表わされる。この式の両辺をtで微分すると

$$d\theta_2/dt = d\varphi/dt + d(\beta_{1i} - \beta_{11})/dt \qquad (7.17)$$

となる。

ここで，$d=0.745$(mm)の場合について考える。線状体重心の回転状態を表わす図7.29において，鉛直面内で線状体が水平方向に回転し始めると，線状体は水平方向速度をもつようになり，この水平方向速度の円周方向成分の影響で，落下開始後しばらくすると$d\varphi/dt$は回転流体の角速度よりわずかに大きくなり，やがて，流体から受ける抗力により$d\varphi/dt$は減速され回転流体の角速度にほぼ等しくなる。ところが，線状体の配向度の変化を表わす図7.34から，$d=0.745$(mm)

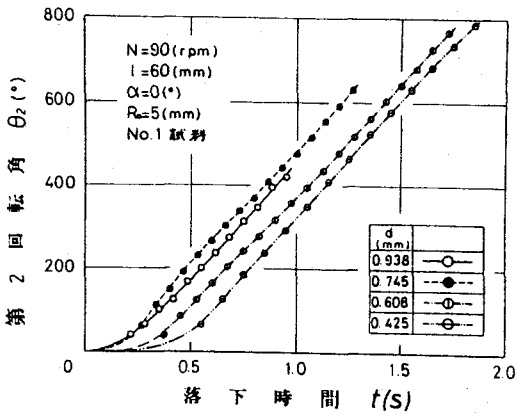


図7.33 姿勢におよぼす直径の影響

の場合，配向角β_1は落下開始後増大し（半径方向から円周方向に配向するようになる。），$t=0.45$(s)程度で最大となり，その後減少する。したがって，(7.17)式を考慮すれば，$d\theta_2/dt$は落下直後の領域を過ぎると急激に増大し，$t=0.45$(s)程度で最大となり，その後減少することが明らかとなる。すなわち，tとθ_2の関係を表わす曲線には上に凸の領域が存在する。このため，同一落下時間におけるθ_2の値は，$d=0.725$(mm)の方が$d=0.938$(mm)の場合より大きくなる。しかし，時間が経過するにつれて$d\varphi/dt$は回転流体の角速度にほぼ等しくなり，配向角β_1の変化は，落下開始直後の領域での場合より小さくなるため，$d\theta_2/dt$は回転流体の角速度にほぼ等しくなる傾向にある。

また，重心の角速度$d\varphi/dt$は直径にかかわらず回転流体の角速度に等しくなるが，直径が異なると，線状体の位置および鉛直面内での姿勢の変化に差が生じ，配向角β_1を変化させる原因となる線状体の軸に直角な方向に作用する抗力の分布状態が異なるため，線状体を含む鉛直面の変化におよぼす直径の影響は明確に現われない。しかし，同一落下時間におけるφの値は，直径が大きいほど大きく，φの変化に比べてβ_1の変化が小さいため，傾向としては，同一落下時間におけるθ_2の値は直径が大きいほど大きい。

7.6.3 線状体の配向

$N=90$(rpm)における配向の変化を図7.34に示す。どの直径の場合にも，落下開始直後の領域では，$d\varphi/dt$は回転流体の角速度より小さく，線状体が軸に直角な方向に受ける抗力は先端部の方が大きいため，線状体はβ_1を増大させる向きに回転する。しかし，鉛直面内で線状体は水平方向速度をもつようになり，この影響で落下開始後しばらくすると，$d\varphi/dt$は回転流体の角速度よりわずかに大きくなる。したがって，流体から受ける抗力は，流体の回転方向と逆向きに作用し始める。しかも，そ

の姿勢から考えて先端部に近いほど，線状体の軸に直角な方向に作用する抗力が大きいため，β_1を減少させる向きに回転モーメントが作用し，角速度$d\beta_1/dt$は除々に減速され，βは最大となる。その後も，$d\varphi/dt$が回転流体の角速度に等しくなるまでβは減少する。すなわち，線状体はいったん円周方向に配向し始めるが，ふたたび半径方向へ配向し始める。なお，βの最大値は，αが大きいほど小さい傾向にある。

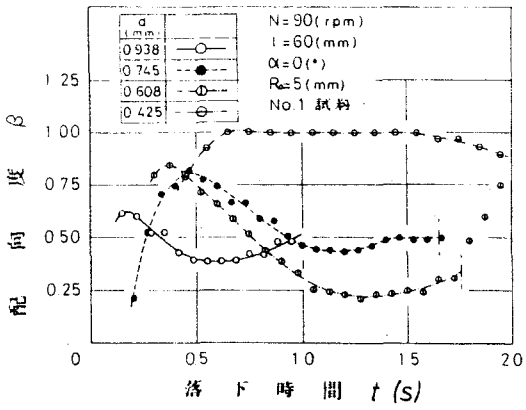


図7.34 配向におよぼす直径の影響

これは，$d\varphi/dt$が回転流体の角速度より大きい領域において，両者の差はαが大きいほど大きく，しかも，鉛直面内での姿勢がより水平に近いため，β_1を減少させる向きに作用する回転モーメントが大きいことが原因していると考えられる。

$\alpha=0.425$(mm)の場合，$\beta=1$の状態（円周方向に配向している状態）をしばらく保っているが，やがて除々に減少していく。$\alpha=0.608$(mm)の場合，最大値は約0.8で，βは減少してほぼ一定値，約0.22，となり，ゆっくり増大して$\beta=0.27$程度で線状体の先端が円筒側面に到達する。$\alpha=0.745$(mm)の場合，最大値は約0.8で，βは減少してほぼ一定値，約0.44，となり，除々に増大して$\beta=0.5$程度で先端が円筒側面に到達する。$\alpha=0.938$(mm)の場合も同様に，約0.6から減少してほぼ一定値，約0.39，となり，その後増大し始める。なお，線状体が一定の配向角を保ったまま運動し続ける時間は，αが小さいほど長いことが分かる。

線状体を含む鉛直面は，回転流体の半径方向に対して一定の角度を保っているが，この鉛直面は半径方向に移動しており，

また，この面内で線状体は水平方向に回転している。したがって，$d\varphi/dt$ が回転流体の角速度に等しくなった後の領域では，その姿勢から考えて半径方向への移動速度は，線状体の先端部に近いほど大きいので，線状体に対する流体の円周方向の相対速度は，先端部に近いほど大きくなる。このため，流体から受ける抗力にもとづく回転モーメントは，β_1 を増大させる向きに作用し，β_1 はふたたび増大する。また，半径方向速度 $\dot{r}$ および鉛直面内での姿勢の変化は，α が小さいほど小さいので，一定の配向角を保ったまま線状体が運動し続ける時間が長くなると考えられる。

以上のように，直径が異なると，重心の角速度，半径方向速度および鉛直面内での姿勢の変化に差が生じ，これが配向角の変化におよぼす直径の影響となって現われる。上述の $\alpha=0.425\sim0.938$ (mm) の結果から，$\alpha=0.425$ (mm) の場合を除いて，$\beta<1$ であるため，つねに線状体の先端が先に円筒側面に到達し，繊維がオープンエンド精紡機のロータ内の滑壁に到達するときの状態としては望ましくない。したがって，配向としては，直径が小さい方がより望ましい状態で円筒側面に到達する。

7.7 線状体比重量の影響

この節では，$d=0.745$ (mm)，$\ell=60$ (mm) の NO.1 試料および $d=0.653$ (mm)，$\ell=60$ (mm) の NO.2 試料に対する $\alpha=0°$，$R_0=5$ (mm) の実験結果から，線状体の比重量が落下特性におよぼす影響を調べる。なお，NO.1 試料と NO.2 試料では直径も異なるため，前節で述べた直径の影響の結果も考慮する必要がある。

7.7.1 線状体の落下軌跡

$N=90$ (rpm) における重心の半径方向移動距離 R および回転角 φ の変化を図 7.35，7.36 に示す。これらの図から，同一落下時間で比較すると，φ の値はほとんど同じであるが，R および半径方向速度 $\dot{R}$ は，d_0 の大きい NO.2 試料の方が大きいことが分かる。

静止流体中での場合と同様に，鉛直方向速度 $\dot{Y}$ は d_0 が大きい方が大きく，線状体がすべて流れ中に入るまでの時間は短い。したがって，d_0 が大きい方が短時間のうちに線状体全体が流体から抗力を受けるようになる。さらに，線状体を含む鉛直面内での同一姿勢に対する水平方向速度は，d_0 が大きい方が大きく

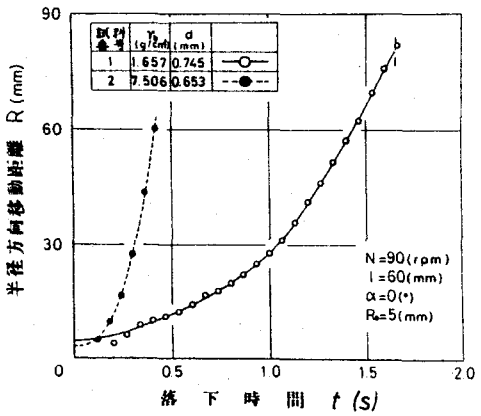


図 7.35 半径方向移動距離におよぼす比重量の影響

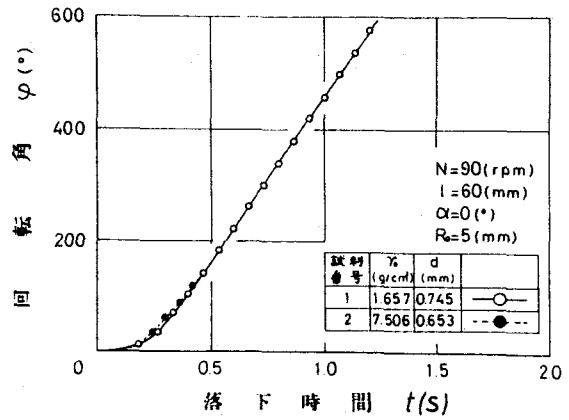


図 7.36 重心の回転角におよぼす比重量の影響

(2.13.2項参照)，この水平方向速度の円周方向成分はρ_0が大きい方が大きくなる。いっぽう，線状体の形状および姿勢が同じであれば，線状体を回転流体の中心軸の回りに回転させる向きに作用する抗力は同じになるが，ρ_0が大きい方が慣性が大きいため，角加速度$d^2\varphi/dt^2$は小さくなる。したがって，これら3つの原因に，さらに，本実験の場合，NO.1試料とNO.2試料では形状が異なる(NO.2試料の方が直径が小さい)影響が加わるため，φの変化におよぼすρ_0の影響が明確に現われなかったと考えられる。ここで，直径の影響を考慮すると，同一形状で重さが異なる場合，重い方が落下開始直後の領域において，$d\varphi/dt$はより大きく加速されるので，同一落下時間でのφの値は大きくなる。ただし，これはNO.2試料とNO.1試料程度の比重量の差を有する線状体に対していえることであり，比重量の差がもっと大きい場合にはどのようになるか分からない。

つぎに，ρ_0が大きい方が$\dot{r}$およびrが大きくなる原因について考える。落下開始直後の領域では，ρ_0が小さい方が鉛直面内での急激な姿勢の変化が大きく，このため，線状体がX軸にほぼ平行に移動する距離は大きくなり，したがって，$\dot{r}$の値は大きいが，この領域を過ぎるとρ_0が大きい方が$\dot{r}$の値は大きくなる。まず，重心の位置r，速度$\dot{r}$および姿勢が同一である瞬間を考えると，本実験の場合，重心の角速度は試料にかかわらずほぼ等しいので，線状体に作用する単位質量当りの遠心力はρ_0にかかわらず等しいが，$\dot{r}$を減速させる向きに作用する抗力は，線状体が同一形状であれば等しいため，単位質量当りの抗力はρ_0が大きい方が小さい。したがって，半径方向加速度$\ddot{r}$はρ_0が大きい方が大きくなる。このように，ρ_0による$\ddot{r}$の差が最小になる条件のもとで線状体の運動を考える場合でも，$\ddot{r}$はρ_0が大きい方が大きくなり，これに鉛直面内での水平方向速度の影響が加わった場合，$\ddot{r}$の値はρ_0が大きい方がいっそう大きくなる。

ここで，直径の影響を考慮すると，同一形状で重さが異なる場合，同一落下時間で比較すると，重い方がRおよび$\dot{R}$の値は大きくなる。

つぎに，ρ_0がRとYの関係におよぼす影響を調べるため，$N=90$(rpm)の結果を図7.37に示す。

同一鉛直方向移動距離に対するRの値はほとんど同じになる。鉛直方向速度$\dot{Y}$の値は，回転流体中と静止流体中で異なるが，ρ_0が$\dot{Y}$におよぼす影響，すなわち，同一姿勢における$\dot{Y}$の値はρ_0が大きい方が大きい，は回転流体中で線状体が運動する場合にも変わらないと考えられる。これは，図7.37において，プロットした点と点の時間間隔は，No.1試料の場合，$\Delta t=2/3$(s)，No.2試料の場合，$\Delta t=0.6$(s)であり，点と点の鉛直方向移動距離Yの差は，No.2試料の方が大きいことからも明らかである。

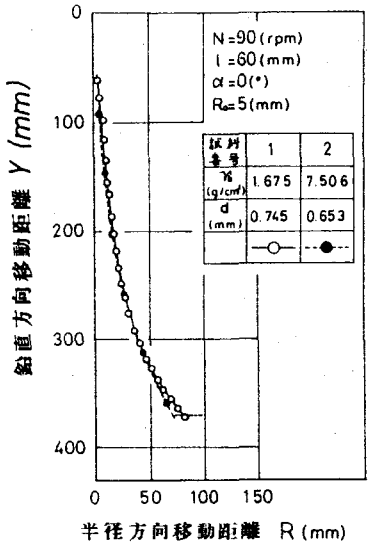


図7.37 半径方向移動距離におよぼす比重量の影響

鉛直面内での姿勢の変化を表わす図7.38から，No.2試料の場合，θ_1の値は高々25°程度であり，この実験の範囲内では，同一落下時間におけるYおよび$\dot{Y}$は，ρ_0が大きい方が大きい。また，前述したように，Rおよび$\dot{R}$もρ_0が大きい方が大きくなり，したがって，RとYの関係におよぼす比重量の影響は，比重量が線状体の姿勢および$\dot{Y}/\dot{R}$におよぼす影響により変わるため明確に現われない。また，円筒回転数が異なると，姿勢の変化および$\dot{Y}$，$\dot{R}$の値が異なるため，同一鉛直方向移動距離に対するRの値は，$N=30$，120(rpm)の場合，No.1試料の方が大きく，$N=60$(rpm)の場合，No.2試料の方が大きいというように，回転数Nにより比重量の影響が異なることも分

かった。

7.7.2 線状体の姿勢

$N=90$ (rpm) における鉛直面内での姿勢の変化を図7.38に示す。

線状体が流れに入った瞬間に流体から受ける抗力により，線状体は水平方向に回転するが，ρ_0 が大きい方が鉛直方向速度 $\dot{Y}$ は大きく，急激な回転を受ける時間は短く，さらに，重心回りの慣性モーメントが大きいため，この姿勢の変化は小さい。また，線状体がすべて流れ中に入った後の領域では，線状体は除々に水平方向に回転するが，ρ_0 が大きい方が $d\theta_1/dt$ は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。

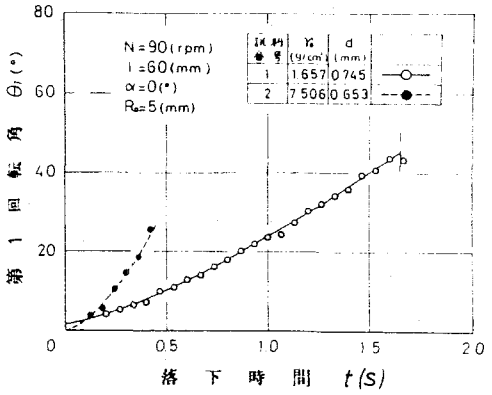


図7.38 姿勢におよぼす比重量の影響

ここで，直径が大きいほど $d\theta_1/dt$ が大きいことを考慮すると，同一形状で重さが異なる場合，重い方が $d\theta_1/dt$ は大きくなる。これは，重い方が速度が大きく，線状体に対する流体の相対速度が大きくなり，したがって，線状体を水平方向に回転させる向きに作用するモーメントが大きいためであると考えられる。以上のように，鉛直面内での姿勢の変化におよぼす比重量の影響は，静止流体中での場合と一致する。ただし，回転流体中では，線状体に遠心力が作用するので角速度は静止流体中での場合より大きい。

つぎに，線状体を含む鉛直面の変化を表わすと θ_2 の関係を図7.39に示す。

前項で述べたように，Φ の変化はNO.1試料とNO.2試料でほとんど差がないが，ρ_0 が異なると，線状体の位置および鉛直

面内での姿勢の変化に差が生じ，配向角β_1を変化させる原因となる線状体の軸に直角な方向に作用する抗力の分布状態が異なる。このため，線状体の配向度の変化を表わす図7.40において，両試料ともに落下開始後βは増大し，最大値をもち，その後減少するが，βの値は両試料で異なる。

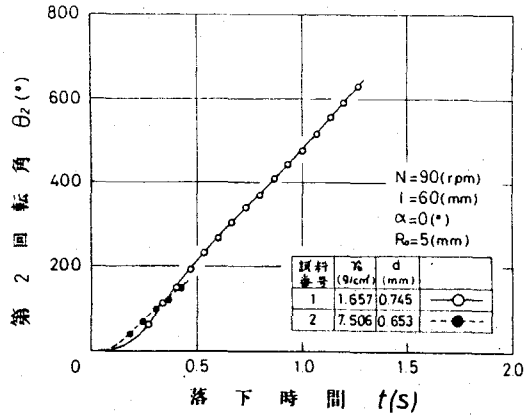


図7.39 姿勢におよぼす比重量の影響

したがって，(7.17)式を考慮すれば，$d\theta_2/dt$は，γ_0の大きいNO.2試料の方が短時間のうちに最大となることが分かる。

ここで，直径が大きいほど同一落下時間におけるθ_2の値は大きくなる傾向にあることを考慮すると，同一形状で重さが異なる場合，重い方がθ_2の値は大きくなる。

7.7.3 線状体の配向

$N=90$(rpm)における配向の変化を図7.40に示す。落下開始直後の領域では，$d\varphi/dt$は回転流体の角速度より小さく，流体から受ける抗力により線状体は配向角β_1を増大させる向きに回転するが，鉛直面内で線状体が水平方向速度をもつようになるため，しばらくすると$d\varphi/dt$は回転流体の角速度よりわずかに大きくなる。したがって，抗力は流体の回転方向と逆向きに作用し始める。しかも，抗力は先端部に近いほど大きく，抗力にもとづく回転モ

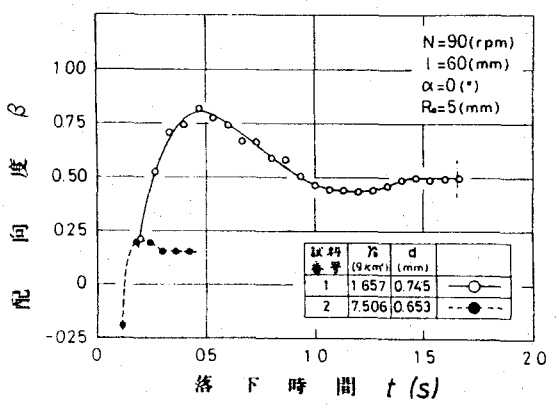


図7.40 配向におよぼす比重量の影響

ーメントはβ_1を減少させる向きに作用するため，角速度$d\beta_1/dt$は除々に減速され，βは最大となる。$d\varphi/dt$が回転流体の角速度より大きい領域において，両者の差はα_0が大きい方がわずかに大きく，しかも，鉛直面内での姿勢がより水平に近いため，β_1を減少させる向きに作用する回転モーメントが大きくなる。このため，βの最大値はα_0が大きい方が小さくなると考えられる。

βが最大になった後も，$d\varphi/dt$が回転流体の角速度に等しくなるまでβは減少し，やがて，ほぼ一定となり，この状態を保ったまま運動を続ける。線状体を含む鉛直面は，回転流体の半径方向に対して一定の角度を保っているが，この鉛直面は半径方向へ移動しており，また，この面内で線状体は回転している。このため，先端部に近いほど半径方向への移動速度は大きいので，線状体に対する流体の円周方向の相対速度は大きくなり，流体が受ける抗力にもとづく回転モーメントはβ_1を増大させる向きに作用し，β_1はふたたび増大する。すでに述べたように，半径方向速度$\dot{r}$および鉛直面内での姿勢の変化は，α_0が大きいほど大きいので，一定の配向角を保ったまま線状体が運動し続ける時間は短いと考えられる。

また，図7.40において，βの値はα_0が大きい方がつねに小さく，円筒側面に到達するときの配向角はより鋭角であるため，繊維がオープンエンド精紡機のロータ内の滑壁に到達するときの状態としては望ましくない。

したがって，7.5.3項，7.6.3項およびこの項で得られた結果から，オープンエンド精紡機では，比重量，直径および長さが小さい繊維，すなわち，繊度および長さが小さい繊維ほど理想に近い状態でロータ内の滑壁に到達すると考えられる。

7.8 初期角度の影響

この節では，$d=0.653$ (mm) のNO.2試料を用いて，$R_0=5$ (mm) でおこなった実験から得られた $\alpha=0°$ の結果と $\alpha=90°$ の結果を比較し，初期角度が落下特性におよぼす影響を調べる。

7.8.1 線状体の落下軌跡

$N=60$ (rpm)，$\ell=45$ (mm)，$\alpha=90°$ の落下軌跡を図7.41に示す。図中の線状体の時間間隔は，$\Delta t=4/30$ (s) である。

流れに入った線状体は，流体から抗力を受け回転流体の中心軸回りの回転運動を始めるが，重心の角速度の加速に伴ない線状体に作用する遠心力が増大するため，回転流体の半径方向へも運動し始める。また，図(b)から，線状体は水平な姿勢を保ったままほぼ一定速度で鉛直方向へ運動し続け，円筒側面に到達することが分かる。

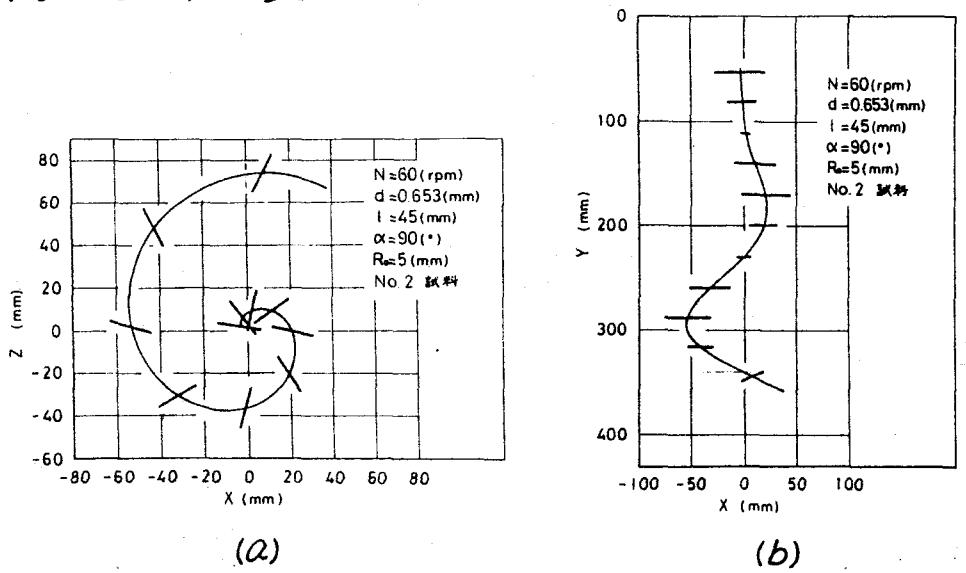


図 7.41 線状体の落下軌跡

ここで，重心の半径方向移動距離 R および回転角 φ の変化を図7.42，7.43に示す。図には，$\ell=30$ (mm) と 45 (mm) のデータを

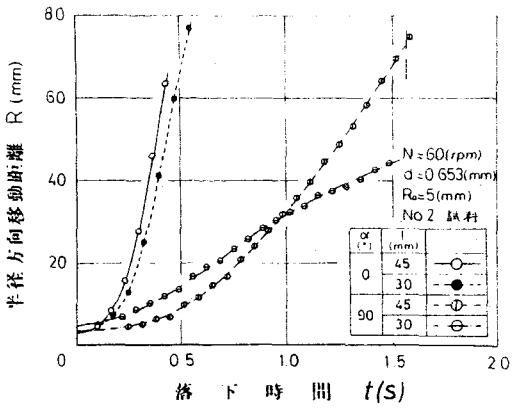


図 7.42 半径方向移動距離におよぼす初期角度の影響

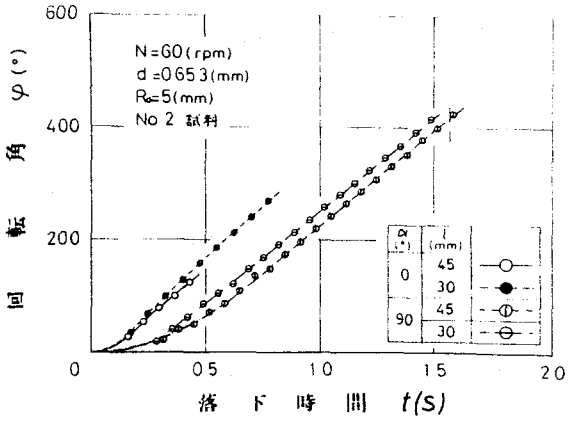


図 7.43 重心の回転角におよぼす初期角度の影響

プロットしている。これらの図から，同一落下時間で比較すると，R および半径方向速度 $\dot{R}$ さらに φ は，$\alpha=0°$ の方が大きいことが分かる。

鉛直方向速度 $\dot{Y}$ は，鉛直面内での姿勢が水平方向に近づくにつれて単調に減少するので，線状体がすべて流れ中に入るまでの時間は，$\alpha=0°$ の方が短い。したがって，$\alpha=0°$ の方が短時間のうちに線状体全体が流体から抗力を受けるようになる。また，$\alpha=90°$ の場合，線状体は回転流体の円周方向に向いた状態から運動を始めるため，落下開始直後の領域では，線状体が流体から受ける抗力は $\alpha=0°$ の方が大きい。さらに，$\alpha=0°$ の場合，鉛直面内で線状体が水平方向に回転し始めると，線状体は水平方向速度をもつようになり，この水平方向速度の円周方向成分が流体から受ける抗力にもとづく円周方向速度に加わる。しかし，$\alpha=90°$ の場合，この水平方向速度は0である。以上述べた原因により，落下開始後しばらくの間，重心の角速度 $d\varphi/dt$ は $\alpha=0°$ の方が大きくなると考えられる。

また，$\alpha=0°$ の場合，鉛直面内で線状体が水平方向速度をもつため，t と φ の関係を表わす曲線には上に凸の領域，すなわち，$d\varphi/dt$ がいったん回転流体の角速度より大きくなり，その

後減速されて回転流体の角速度とほぼ等しくなる領域，が存在するが，$\alpha=90°$の場合，この現象は見られず，$d\varphi/dt$は除々に加速されて回転流体の角速度に近づく。

以上のように，落下開始後しばらくの間，$d\varphi/dt$は$\alpha=0°$の方が大きいので，線状体に作用する単位質量当りの遠心力が大きくなり，$\dot{r}$は$\alpha=0°$の方がより大きく加速され，同一落下時間におけるrおよび$\dot{r}$の値は大きくなる。$\dot{r}$が大きくなるのは，この他に，$\alpha=0°$の場合，鉛直面内で線状体が水平方向速度をもち，その半径方向成分が遠心力にもとづく半径方向速度に加わることも原因になっている。この水平方向速度は，鉛直面内での姿勢が40°から50°の範囲になるまで加速され，その後減速されて水平な姿勢で0となる。このため，図7.15の$\ell=15(mm)$の場合見られたように，水平な姿勢に近づくにつれて$\dot{r}$は除々に減速した。$\alpha=90°$の場合，水平な姿勢を保ったまま運動するので，この水平方向速度の影響が加わらず遠心力のみによって半径方向に加速されるため，$\dot{r}$は$\alpha=0°$の場合より小さくなる。また，図7.42には$\ell=15(mm)$と$60(mm)$のデータがプロットされていないが，$\ell=15\sim60(mm)$の結果から，$\alpha=90°$の場合，図7.15（$\alpha=0°$の場合）で見られた，落下開始後しばらくの間，長さが小さいほど$\dot{r}$は大きくなるが，時間が経過するにつれて長さが大きいほど$\dot{r}$は大きくなるという現象は現われないことが分かった。この現象は，7.5.1項ですでに説明したように，鉛直面内で線状体が水平方向速度をもつことと，この面内での姿勢の変化状態が長さにより異なることが主な原因である。$\alpha=90°$の場合，この水平方向速度をもたないため，この現象は現われず，ℓが大きいほど$\dot{r}$は大きくなる。ただし，図7.42において，落下開始直後の領域で$\ell=30(mm)$の方が$\dot{r}$が大きいのは，図7.43を見れば分かるように，この領域では$d\varphi/dt$が大きいからである。

つぎに，初期角度がrと$\dot{r}$の関係におよぼす影響を調べるた

めに，ℓ=30，45 (mm) の結果を図 7.44，7.45 に示す。ℓ=30 (mm) の場合，Y < 240 (mm) 程度の領域では，同一鉛直方向移動距離における R の値は，α=90° の方が大きいが，この領域を過ぎると α=0° の方が大きくなる。いっぽう，ℓ=45 (mm) の場合，つねに α=90° の方が大きくなる。

Y は，鉛直面内での姿勢が水平方向に近づくにつれて単調に減少するので，水平な姿勢のとき最小になる。なお，そのときの値は長さにかかわらず一定である。α=90° の場合，水平な姿勢を保ったまま運動を続けるので，同一落下時間における Y の値は α=0° の場合より小さく，また，長さにかかわらず同じになる。前述したように，α=90° の場合，R は ℓ が大きいほど大きく，同一鉛直方向移動距離における R の値は ℓ が大きいほど大きくなる。いっぽう，α=0° の場合，本実験の範囲内では，同一鉛直方向移動距離における R の値は ℓ が大きいほど小さくなる。したがって，長さが異なると初期角度が R と Y の関係におよぼす影響が異なり，同一鉛直方向移動距離で比較すると，R の値は長さが大きいほど α=90° の方が大きくなる。

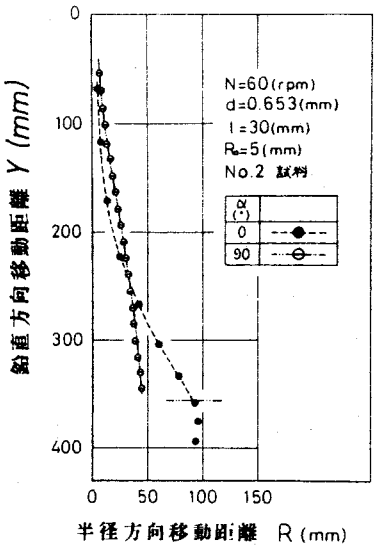


図 7.44 半径方向移動距離におよぼす初期角度の影響

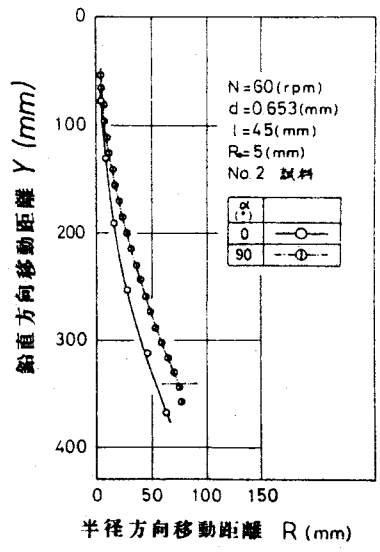


図 7.45 半径方向移動距離におよぼす初期角度の影響

7.8.2 線状体の姿勢

$\alpha = 90°$で線状体を落下させた場合，線状体はほぼ水平な姿勢を保ったまま運動を続ける。いっぽう，線状体を含む鉛直面の変化を調べると，$\alpha = 90°$の場合，重心の角速度$d\varphi/dt$は除々に加速され回転流体の角速度に近づき，また，線状体の配向度の変化を表わす図7.46から，配向角β_1は負の値から増大してほぼ一定値になる。したがって，(7.17)式を考慮すれば，$d\theta_2/dt$は落下開始直後に急激に増大し，回転流体の角速度に近づくことが分かる。

7.8.3 線状体の配向

$\ell = 45(mm)$，$\alpha = 90°$の配向の変化を図7.46に示す。

線状体は，回転流体の円周方向を向いた状態から運動を始めるため，落下開始直後の領域では，軸に直角方向に受ける抗力はわずかであり，ほとんどχ軸に平行な姿勢を保ったまま回転流体の中心軸回りの回転運動をおこなうため，1番目に撮影された線状体の配向角は負になる。

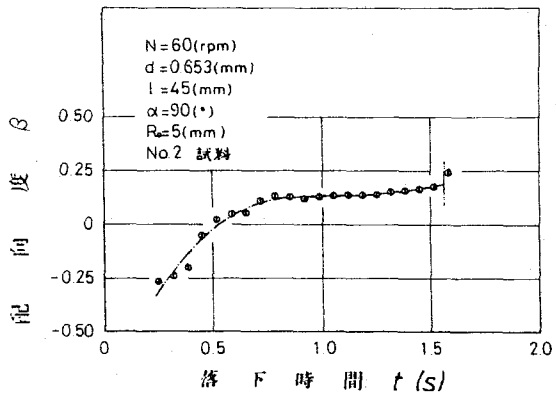


図7.46 配向におよぼす初期角度の影響

$d\varphi/dt$は回転流体の角速度より小さく，やがて，軸に直角な方向に作用する抗力により，線状体はβ_1を増大させる向きに回転する。$\alpha = 90°$の場合，$d\varphi/dt$は回転流体の角速度より大きくなることはなく，除々にこの値に近づくため，β_1はゆっくり増大してほぼ一定となり，しばらくこの状態が続く。すなわち，線状体全体が回転流体の角速度とほぼ等しい角速度で運動する。この状態においても線状体は回転流体の半径方向に移

動しているが，$\alpha=0°$の場合に比べてその速度は小さく，また，水平な姿勢を保っているので，流体から受ける抗力にもとづくβ_1を増大させる向きに作用する回転モーメントは小さく，一定の配向角を保ったまま運動を続けた後，わずかづつβ_1は増大し始める。

7.9 初期位置の影響

この節では，$\alpha=0.653$(mm)のNo.2試料を用いて，$\alpha=0°$で$R_0=5$，25，50(mm)変化させておこなった実験結果から，初期位置が落下特性におよぼす影響を調べる。

7.9.1 線状体の落下軌跡

重心の半径方向移動距離Rおよび回転角φの変化を図7.47，7.48に示す。これらの図には，$N=30$(rpm)，$\ell=60$(mm)のデータと$N=60$(rpm)，$\ell=30$(mm)のデータがプロットされている。

図7.48において，$N=60$(rpm)，$\ell=30$(mm)の場合，同一落下時間で比較すると，φの値は$R_0=25$(mm)の場合がもっとも大きく，$R_0=50$(mm)の場合がもっとも小さい。この場合，長さが30

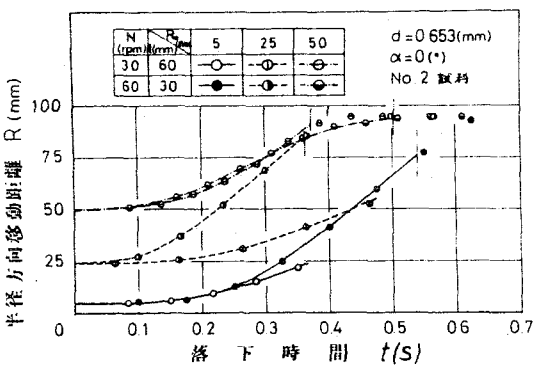


図7.47 半径方向移動距離におよぼす初期位置の影響

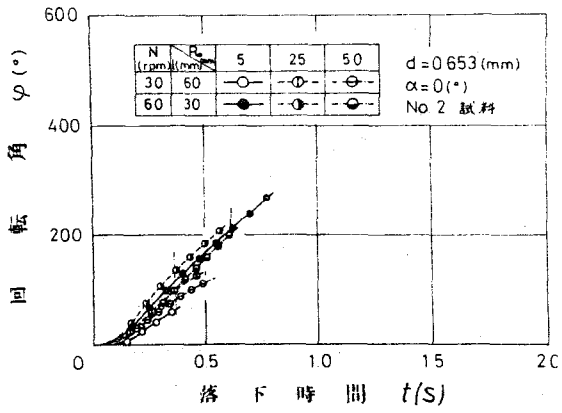


図7.48 重心の回転角におよぼす初期位置の影響

(mm)と比較的小さいため，線状体が流れ中に入ったときの急激な姿勢の変化は大きく，図7.51を見れば分かるように，線状体がすべて流れ中に入ったときの姿勢は，$R_0=50$(mm)の場合，約58°，$R_0=25$(mm)の場合，約34°になる。鉛直面内で線状体が傾いている場合，線状体は水平方向速度をもつが，この水平方向速度は$\theta_1=40°\sim50°$で最大となる。このため，$R_0=50$(mm)の場合，水平方向速度はつねに減速状態にあり，$R_0=25$(mm)の場合，加速され短時間のうちに水平方向速度は最大となる。したがって，この水平方向速度の円周方向成分は，$R_0=25$(mm)の場合もっとも大きくなるため，落下開始後しばらくの間，重心の角速度$d\varphi/dt$は$R_0=25$(mm)の場合が最大となる。しかし，やがて，流体から受ける抗力により，$d\varphi/dt$は減速され，R_0にかかわらず回転流体の角速度に等しくなる。

いっぽう，図7.47において，上述した落下開始直後の急激な姿勢の変化の影響が，$N=60$(rpm)，$\ell=30$(mm)の場合の$\dot{r}$の変化状態にも現われている。$R_0=50$(mm)の場合，落下開始後しばらくの間，$d\varphi/dt$は$R_0=25$(mm)の場合に比べて小さいが，回転流体の中心からの距離は大きいので，遠心力が角速度の2乗および距離に比例することを考慮すると，両者の場合同程度の遠心力が作用していると考えられる。ところが，$\dot{r}$は，$R_0=25$(mm)の方がより大きく加速され，同一落下時間における$\dot{r}$の値は大きいことが分かる。これは，上述したように，鉛直面内での水平方向速度は，$R_0=50$(mm)の方が小さく，その半径方向成分が小さいことが原因している。また，$R_0=50$(mm)の場合，$t=0.3$(s)程度(θ_1が約65°)から$\dot{r}$は減速される状態が見られるが，その他のR_0の場合，θ_1がこれ程大きくならないため，$\dot{r}$の減速は見られない。

これまでは，$N=60$(rpm)，$\ell=30$(mm)の場合であったが，$N=30$(rpm)，$\ell=60$(mm)の場合，円筒回転数が小さく，長さが大きいので，落下開始直後の急激な姿勢の変化は小さく，$R_0=$

50(mm)の場合でも，この実験の範囲内ではθ₁は高々30°程度しかならず，同一落下時間における R の値は，R₀=50(mm)の場合最大になり，R₀=5(mm)と25(mm)の場合ほぼ同じになる。

以上のように，初期位置 R₀は，線状体が流れに入った瞬間における急激な姿勢の変化に影響をおよぼし，この姿勢の変化がその後の線状体の運動状態に影響するため，円筒回転数，長さなどにより，初期位置の影響が異なるものと考えられる。したがって，線状体全体が流れに入った状態から運動し始める場合を考えると，R₀が大きいほど，線状体に対する流体の相対速度が大きく，運動開始直後の領域で dφ/dt はより大きく加速され，しかも，回転流体の中心からの距離が大きいので，同一落下時間における R の値は大きくなる。

つぎに，初期位置が R と Y の関係におよぼす影響を図7.49，7.50に示す。

鉛直方向速度 Ẏ は，姿勢が水平に近づくにつれて単調に減少するので，R₀が大きいほど，線状体が鉛直方向に移動するのに

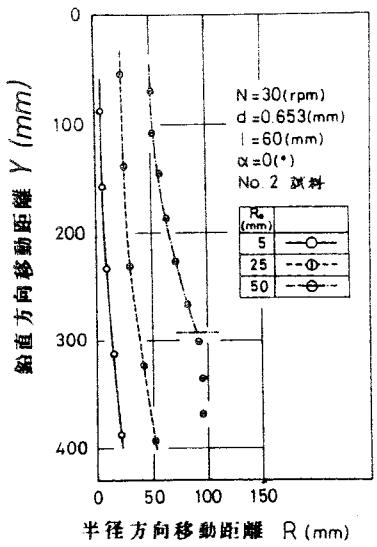


図7.49 半径方向移動距離におよぼす初期位置の影響

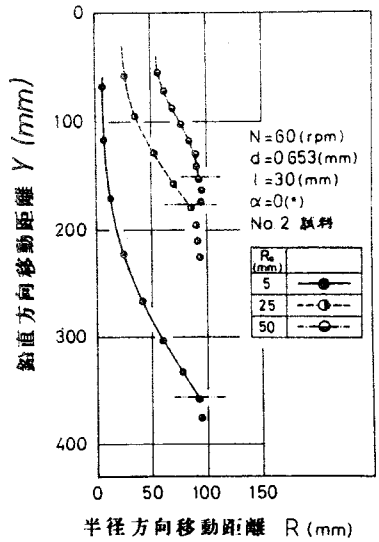


図7.50 半径方向移動距離におよぼす初期位置の影響

要する時間は長くなり，同一落下時間でのYおよび$\dot{Y}$の値は小さい。また，$N=30$(rpm)，$\ell=60$(mm)の場合，この実験の範囲内では$\dot{R}$は増大し続け，しかも，同一落下時間での$\dot{R}$の値はR_0が大きいほど大きい。したがって，同一鉛直方向移動距離における接線勾配dY/dR $(=\dot{Y}/\dot{R})$はR_0が大きいほど小さくなる。すなわち，線状体の重心が初期位置から回転流体の半径方向へ移動する距離，$R-R_0$を同一鉛直方向移動距離で比較するとR_0が大きいほど大きくなる。ところが，$N=60$(rpm)，$\ell=30$(mm)の場合，同一落下時間での$\dot{R}$の値は，R_0が大きいほど大きくはならないため，上述の結果は得られない。

7.9.2 線状体の姿勢

鉛直面内での姿勢の変化を表わす図7.51において，線状体が流れ中に入った瞬間に流体から受ける抗力は，R_0が大きいほど線状体に対する流体の相対速度が大きいため大きくなる。したがって，落下開始直後の急激な姿勢の変化は，R_0が大きいほど大きい。

線状体がすべて流れ中に入った後の領域では，線状体は除々に水平方向に回転する。回転流体中で線状体が運動する場合，遠心力が作用し，その姿勢から考えて先端部に近いほど大きいため，線状体にはθ_1を増大させる向きの回転モーメントが働く。この回転モーメントに寄与する遠心力の成分は，線状体を含む鉛直面内の軸に直角な方向の成分であるから，線状体重心の角速度および回転流体の中心からの距離が同じであっても，配向角β_1および鉛直

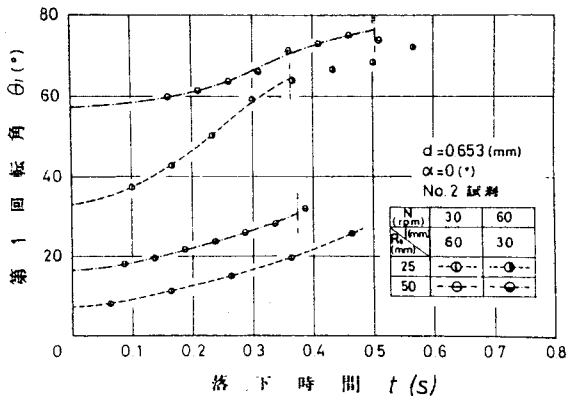


図7.51 姿勢におよぼす初期位置の影響

面内での姿勢θ_1により差が生じる。したがって，R_0がθ_1の変化におよぼす影響を調べるためには，$d\varphi/dt$，Rの変化のみならずβ_1の変化状態をも考慮する必要がある。

7.10 円筒回転数の影響

この節では，$\alpha=0.745$(mm)，$\ell=60$(mm)のNo.1試料を用いて，$\alpha=0°$，$R_0=5$(mm)で，$N=30\sim120$(rpm)の範囲で円筒回転数を変化させておこなった実験結果から，円筒回転数が落下特性におよぼす影響を調べる。さらに，回転流体中での実験と同時におこなった静止流体中での実験から得られた結果と比較し，重心の半径方向移動距離R(静止流体中での場合，水平方向移動距離Xに相当する。)の変化，RとYの関係(XとYの関係)および鉛直面内での姿勢θ_1(回転角θ)の変化が，両者の場合どのように異なるかを明らかにする。

7.10.1 線状体の落下軌跡

重心の半径方向移動距離Rおよび回転角φの変化を図7.52，7.53に示す。

鉛直面内で線状体が水平方向に回転し始めると，線状体は水平方向速度をもつようになり，この水平方向速度の円周方向成分が原因となって，落下開始後短時間のうちに，重心の角速度$d\varphi/dt$は回転流体の角速度より大きくなり，やがて，流体から受ける抗力により$d\varphi/dt$は減速して回転流体の角速度に等しくなる。本実験の場合，試料条件は同一であるので，鉛直面内での姿勢が同一であれば，水平方向速度は等しくなる。姿勢の変化を示す図7.55から，同一落下時間におけるθ_1の値は，Nが大きいほど大きく，実験の範囲内では$N=120$(rpm)の場合でもθ_1は高々50°であり，水平方向速度は加速状態にあり，同一落下時間における水平方向速度は，Nが大きいほど大きいが，

その差はNの違いによる回転流体の円周方向速度の差に比べて小さい。この水平方向速度の最大値は，静止流体中での場合，80～100 (mm/s) 程度であり，回転流体の円周方向速度は，たとえば，R=10 (mm) の位置ではN=120 (rpm) の場合，約126 (mm/s)，N=30 (rpm) の場合，約37 (mm/s) であるので，Nが小さいほど $d\varphi/dt$ は水平方向速度の影響を受け易いことが分かる。また，Nが小さいほどRは小さく，同一落下時間におけるRの値は小さいため，長時間にわたって水平方向速度の影響を受ける。以上述べたことは，図7.53において，Nが小さいほどもとφの関係を表わす曲線に，上に凸の領域が広く，しかも，より顕著に現われていることからも分かる。

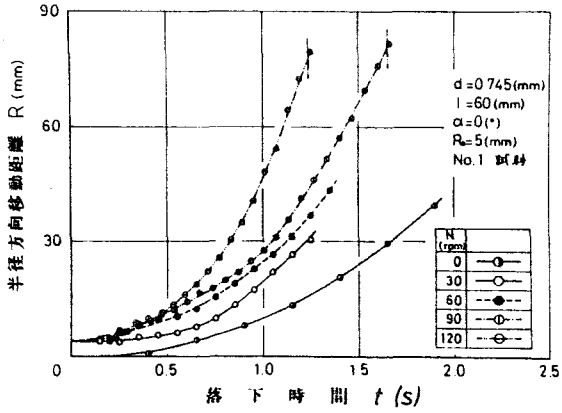


図7.52 半径方向移動距離におよぼす円筒回転数の影響

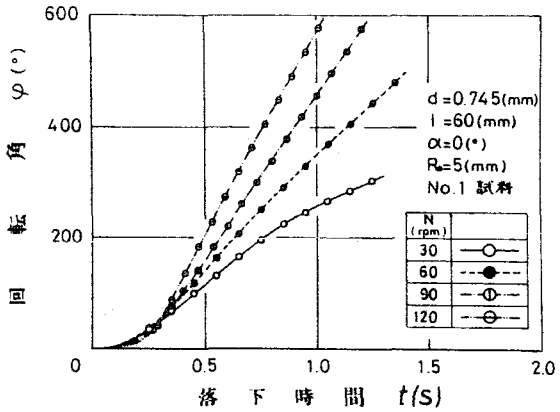


図7.53 重心の回転角におよぼす円筒回転数の影響

いっぽう，図7.52において，同一落下時間におけるRおよび $\dot{R}$ の値は，Nが大きいほど大きくなる。これは，Nが大きいほど $d\varphi/dt$ は大きく，線状体に作用する遠心力が大きくなるためである。また，鉛直面内での姿勢は高々50°程度であるので，$\dot{R}$ は加速状態にあり，遠心力はRに比例するので，時間が経過するにつれてNによる $\dot{R}$ の差は除々に増大する。

なお，この図には，静止流体中での結果（$N=0$）がプロットされている。静止流体中では，線状体には重力と浮力の差にもとづく外力および流体から受ける抗力のみが作用し，遠心力は働かないので，重心の水平方向速度（回転流体中では$\dot{R}$に相当する。）は，姿勢が除々に水平方向に回転しているため，ゆっくり加速されるが，回転流体中での場合と比較して非常に小さい。

つぎに，円筒回転数が$\dot{R}$と$\dot{Y}$の関係におよぼす影響を示す図7.54において，同一鉛直方向移動距離における$\dot{R}$の値は，Nが大きいほど大きくなることが分かる。図7.55から，同一落下時間におけるθ_1は，Nが大きいほど大きく，ここで，鉛直方向速度$\dot{Y}$は落下開始直後の加速領域を除き，θ_1が90°に近づくにつれて単調に減少することを考慮すると，Nが大きいほど線状体が鉛直方向に移動するのに要する時間は長くなる。いっぽう，同一落下時間における$\dot{R}$の値は，Nが大きいほど大きい。したがって，上述の結果になる。

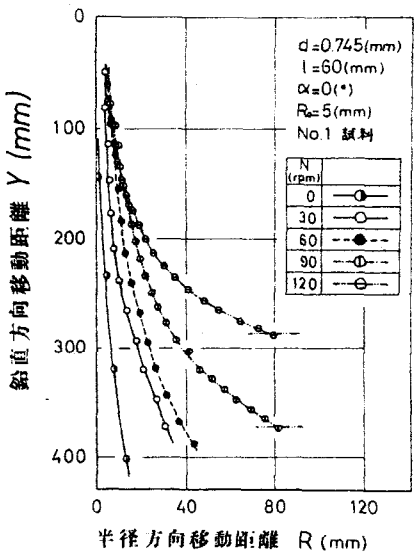


図7.54 半径方向移動距離におよぼす円筒回転数の影響

また，静止流体中での場合，回転流体中で見られるような落下開始直後の急激な姿勢の変化はなく，姿勢は除々に水平方向に回転するため，鉛直方向により大きく加速され，$\dot{Y}$は大きくなる。しかも，水平方向速度は小さいので，この曲線の接線勾配$\alpha Y/\alpha R$は，回転流体中での場合と比較して非常に大きい。

7.10.2 線状体の姿勢

鉛直面内での姿勢の変化を表わす図7.55において，線状体が

流れ中に入った瞬間に流体から受ける抗力は，Nが大きいほど線状体に対する流体の相対速度が大きいため大きくなる。したがって，落下開始直後の急激な姿勢の変化は，Nが大きいほど大きい。また，線状体がすべて流れ中に入った後の領域では，角速度$d\theta_1/dt$はNが大きいほど大きく，線状体が回転するのに要する時間は小さい。回転流体中では，線状体に遠心力にもとづくθ_1を増大させる向きの回転モーメントが働く。この回転モーメントに寄与する遠心力の成分は，遠心力の大きさが同じであっても，配向角β_1および姿勢θ_1により異なるため，遠心力が大きいからといって，かならずしも回転モーメントが大きいとは限らない。しかし，Nが大きいほど，線状体の重心の角速度および回転流体の中心からの距離が大きいので，円筒回転数の違いによる遠心力の差は非常に大きく，β_1の違いがこの回転モーメントにおよぼす影響より大きくなり，その結果$d\theta_1/dt$は，Nが大きいほど大きくなったと考えられる。

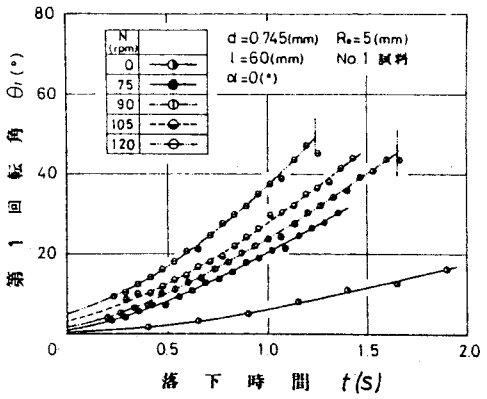


図7.55 姿勢におよぼす円筒回転数の影響

7.11 結 言

本章では，直線の線状体が単一で，回転流体中を自由落下する場合について実験的研究をおこない，落下軌跡，姿勢および配向の変化などの基本的運動特性を明らかにし，同時に，線状体の比重量，長さ，直径，初期角度，初期位置および円筒回転数が運動特性におよぼす影響を調べた。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 線状体は，流線に沿って運動を開始するが，その後，回転流体の半径方向へも運動し始める。したがって，線状体は，回転流体の中心軸回りの回転運動と半径方向への運動をおこないながら落下する。また，鉛直面内での姿勢は除々に水平方向に近づく。

(2) 重心の半径方向速度は，落下開始後しばらくの間加速されるが，鉛直面内での姿勢が水平方向に近づくにつれて減速される。そして，水平な姿勢を保ったまま運動を続ける場合，ふたたび加速されるが，加速度は，θ_1が小さい領域での場合より小さい。

(3) 重心の角速度は，$\alpha=0°$の場合，落下開始後短時間のうちに回転流体の角速度より大きくなり，やがて，減速して回転流体の角速度とほぼ等しくなる。いっぽう，$\alpha=90°$の場合，除々に加速されて回転流体の角速度に近づく。

(4) 重心の半径方向移動距離Rおよび半径方向速度$\dot{R}$は，同一落下時間で比較すると，直径，比重量および円筒回転数が大きいほど大きくなる。また，$\alpha=0°$と$\alpha=90°$の場合を比べると，$\alpha=0°$の方が大きい。いっぽう，長さの影響を考察する場

合，鉛直面内での姿勢の変化におよぼす長さの影響を考慮する必要があるが，傾向としては，長さの小さい線状体の姿勢が水平になるまでの領域では，長さが小さいほど尺は大きくなり，長さの小さい線状体が半径方向に加速されている領域では，長さが小さいほど $\dot{尺}$ は大きくなる。また，初期位置が異なると，落下開始直後の急激な姿勢の変化に差が生ずるため，円筒回転数，長さなどにより，尺におよぼす初期位置の影響が異なる。

(5) 重心の角速度 $d\varphi/dt$ は，落下開始後しばらくの間，長さが小さいほど，また，直径が大きいほど大きくなる。いっぽう，比重量の影響はほとんど見られず，初期位置の影響は，円筒回転数，長さなどにより異なる。また，円筒回転数が大きいほど，$d\varphi/dt$ は大きいが，$d\varphi/dt$ が回転流体の角速度より大きい領域において，両者の差は，円筒回転数が小さいほど大きく，しかも，より長い時間にわたってこの状態が続く。

(6) 同一鉛直方向移動距離における尺の値は，円筒回転数が大きいほど大きく，また，長さが小さい線状体の姿勢が水平になるまでの領域では，長さが小さいほど大きくなる。いっぽう，$\alpha=0°$ と $\alpha=90°$ の場合を比較すると，長さにより初期角度の影響が異なり，$\alpha=90°$ の方が尺の値が大きくなる領域は，長さが大きくなるにつれて増大する。また，初期位置の影響は，円筒回転数，長さなどにより異なり，円筒回転数が小さく，しかも，長さが大きい場合には，初期位置が大きいほど尺−尺$_0$ の値は大きい。なお，直径および比重量の影響は明確に現われない。

(7) 鉛直面内での姿勢の変化には，初期位置の影響は明確に現われない。いっぽう，長さが小さいほど，直径，比重量およ

び円筒回転数が大きいほど，角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短い。

(8) 線状体は，落下開始後円周方向に配向し始めるが，$d\varphi/dt$ が回転流体の角速度より大きくなるため，角速度 $d\beta_1/dt$ は除々に減速され，配向角 β_1 は最大となる。その後も，$d\varphi/dt$ が回転流体の角速度に等しくなるまで β_1 は減少し，一定の配向角を保ったまま線状体はしばらく運動を続ける。そして，ふたたび円周方向へ配向し始める。ただし，$\alpha = 90°$ の場合，β_1 の減少は見られない。なお，線状体がいったん円周方向に配向した場合には，長時間にわたってこの状態が続く。線状体が一定の配向角を保ったまま運動を続ける時間は，直径，比重量が小さいほど長い。また，長さ，直径および比重量が小さいほど線状体は円周方向に配向し易い。

したがって，オープンエンド精紡機では，繊度および長さが小さい繊維ほど理想に近い状態でロータ内の滑壁に到達すると考えられる。

(9) 回転流体中で線状体が運動する場合，重心の半径方向速度および鉛直面内での姿勢の変化は，静止流体中での場合より大きい。

第8章　結　論

本論文は，繊維状のように細長比の大きい線状体の流体中における運動を理論的および実験的に明らかにし，線状体の流体力学的処理に対する指針を得るためにおこなった研究である。

本論文では，(1) 静止流体中，一様流れ中，矩形管内での十分に発達した流れ中，矩形管内での助走域，ノズル内流れ中および回転流体中を線状体が単一で運動する場合，(2) 静止流体中を線状体が複数あるいは集団で相互に干渉し合いながら運動する場合に対して，線状体の軌跡，速度および姿勢の変化などの基本的運動特性を明らかにし，あわせて諸要因の影響を調べた。

つぎに，本研究によって得られた結果を要約すると，

(1) 静止流体中を線状体が単一で落下する場合，水中では，線状体はほとんど鉛直方向に運動し始めるが，姿勢が除々に水平方向に回転するにつれて，水平方向にも運動し始める。そして，鉛直方向に対する傾斜角が40°から50°の範囲内まで水平方向に加速され，その後，減速される。いっぽう，落下開始直後急激に鉛直方向に加速されるが，姿勢が水平方向に回転するにつれて減速される。このため，重心の軌跡は，鉛直方向に対する傾斜角が60°から65°の範囲内で変曲点をもつ曲線となり，最終的に姿勢は水平方向に漸近し，しかも，線状体は水平方向にはほとんど移動しなくなり，もっとも安定な水平姿勢を保ったまま鉛直方向に一定速度で落下する。なお，角速度は，鉛直方向に対する傾斜角が10°から20°の範囲内まで加速される。

線状体の比重量，長さ，直径および流体の温度は，軌跡の形，重心の速度および姿勢の変化に影響をおよぼし，初期角度の影響は，落下開始直後の急激な加速領域で見られるだけであ

り，その後の領域では，姿勢が同じであれば初期角度に関係なく運動状態は同一になる。

重心の速度におよぼす長さの影響は，鉛直方向に対する傾斜角が約65°以下の領域で現われ，水平方向速度，鉛直方向速度ともに長さが大きいほど大きく，比重量，直径および流体の温度の影響は，全領域で現われ，これらの値が大きいほど速度は大きくなる。さらに，長さが小さいほど，比重量，直径および流体の温度が大きいほど角速度は大きく，線状体が回転するのに要する時間は短いことが分かった。

線状体が空気中で運動する場合，姿勢が水平方向を中心にして減衰振動するので，水平方向の運動の向きが変わり，水平方向速度は0を中心にして減衰振動する。いっぽう，鉛直方向速度も変動しながら一定値に漸近する。したがって，重心の軌跡が減衰振動する。また，初期角度は，姿勢および重心の速度の変動周期には影響をおよぼさず，振幅に影響を与え，長さおよび直径は，周期と振幅の両方に影響をおよぼす。なお，空気中での場合，その比重量が小さいため，線状体に作用する抗力が小さいことが原因でこの現象が生じたと考えられる。すなわち，水中での場合，姿勢の変化は，減衰振動の中で抵抗力が大きい場合に相当し，空気中での場合，抵抗力が小さい場合に相当する。したがって，両者の姿勢の変化状態は異なり，水中では，振動することなくもっとも安定な水平姿勢に漸近するのに対し，空気中では，水平な姿勢を中心に振動しながら漸近する。

また，直線の線状体は，静止流体中では一平面内で運動すると考えて差支えなく，計算で得られた落下特性の傾向および諸要因の影響は実験結果とかなり一致した。

(2) 線状体が単一で静止流体中を運動するとき，背後には軸方向に沿って発達する境界層と伴流が重なり合った流れの領域が発生し，さらに，後端から一対の自由渦が生ずる。また，重

心速度の軸に直角な方向成分を代表速度，直径を代表長さとするレイノルズ数が50程度を越えると，伴流は双子渦からカルマン渦へ変化し，流れ状態が大きく変わる。

線状体が複数で静止流体中を運動する場合，前方の線状体の運動に伴なって発生する流れの影響を受けて，後方の線状体が姿勢および速度を大きく変えながら近づき，衝突し，追い抜くというように相対位置を時々刻々変化させ，相互に干渉し合いながら運動を続ける。また，初期角度が大きいほど，線状体が相互に影響をおよぼし合う度合が強く，しかも，長時間続き，初期位置での相対距離が大きい方が，落下開始直後の領域で後方の線状体が受ける前方の線状体の流れの影響が小さいため，最初の衝突までの時間は長く，前方の線状体のより先端に近い位置に衝突する傾向がある。この傾向は，初期位置で線状体の後端部が流れに入る場合にも見られる。また，直径が大きい方が，後方の線状体の角速度および速度が急激に変化し，衝突から衝突までの時間は短い。これは，直径が大きい場合発生するカルマン渦の影響によるものである。線状体本数3の場合，初期位置でもっとも後方に位置する線状体は，2本の線状体の後方に発生している流れの影響を同時に受けるときがあり，その運動はいっそう複雑になる。さらに，複数で運動する場合，流れの影響を受けて姿勢が鉛直方向に回転している領域では，水平方向速度は単一で運動する場合より小さく，逆に姿勢が水平方向に回転している領域では大きくなる。いっぽう，鉛直方向速度は，流れの影響を受けている領域ではつねに大きいことが分かった。

線状体が100本程度集団で連続的に自由落下する場合，線状体は線状体群の後方に発生している流れの影響を受けるため，その平均的な運動状態は，単一で運動する場合と一致しない。また，初期角度が大きくなるにつれて，最終落下位置での線状体の配向は良くなる。

(3) 線状体が単一で一様流れ中を運動する場合，線状体は，鉛直方向に対してある角度をもって運動し始め，すぐに重心の軌跡は極大になる。その後，運動方向は除々に水平方向に近づくが，やがて，軌跡はふたたび変曲点をもち，運動方向は鉛直方向に回転し始める。そして，最終的に姿勢は水平方向に漸近し，線状体はもっとも安定な水平姿勢を保ったまま，鉛直方向には静止流体中での場合と同一の一定速度で落下し，水平方向には流速と同一速度で移動する。

また，運動特性に流速の影響が現われるのは，運動開始直後の鉛直方向に対する傾斜角の小さい領域（長さ30(mm)の場合，15°以下の領域）だけであり，これ以上の領域では，流れに対する線状体の相対的な並進運動は流速に関係なく同じになる。このため，線状体の回転運動も流速の影響を受けない。これは，流速が場所的に変化しないことが原因している。さらに，流速の影響は長さが小さいほど顕著に現われる。

(4) 線状体が単一で矩形管内での十分に発達した流れ中を運動する場合，管路中央部では流速の変化がわずかであるので，落下軌跡の変化状態は一様流れ中での場合と一致するが，流速の変化が大きい壁面近くの領域，とくに底面近くの領域では運動方向が急激に鉛直方向に近づく現象が見られる。さらに，長さが大きい場合，線状体は鉛直方向に回転する。また，初期角度は，線状体が運動をおこなう位置のみならず軌跡の形にも影響をおよぼす。

線状体が壁面近くの領域で運動するとき，その運動特性，とくに水平方向速度および姿勢の変化は，一様流れ中での場合と異なる。諸要因の影響は，一様流れ中での場合より顕著に現われるが，管路の高さが異なると流速の変化が大きい底面近くの領域に到達したときの線状体の姿勢が異なるので，要因の影響を考察する場合，管路の高さを考慮する必要がある。

(5) 線状体が単一で矩形管内での助走域を運動する場合，助走域での流れ状態は，一様流れから十分に発達した流れへ移行する途中の段階であるので，落下軌跡は両者の落下軌跡を合わせたような形になる。また，流速の影響も両者の中間的なものになる。なお，底面近くの領域で線状体が鉛直方向に回転する現象が，長さ30(mm)の場合見られ，60(mm)の場合現われず，十分に発達した流れ中での結果と逆になったが，これは管路高さとの関連によるものである。

また，重心の速度および姿勢の変化状態も，一様流れ中での場合と十分に発達した流れ中での場合の間に位置し，流れの発達程度が大きくなるにつれて十分に発達した流れ中での場合に近づく。さらに，平均流速により流れの発達程度が異なり，その影響が流速の影響に含まれるため，他の流れ中での場合より流速の影響が現われにくい。なお，ここで用いた計算条件のもとでは，流れの発達程度が比較的小さいため，運動開始直後の領域で長さが大きい方が角速度が大きくなる現象が見られた。

実験では，管内の流れを乱さないようにするため，落下装置を管路上面に隣接して取付けているので，線状体が落下装置から流れ中に入るとき，急激に流れの向きに回転する。これに対し，計算では，線状体がすべて流れ中に入る位置に初期位置を設定した。したがって，実験と計算で初期条件が異なることを考慮すると，助走域での運動特性および諸要因の影響は実験結果と計算結果で一致した。

(6) 線状体が単一でノズル内流れ中を運動する場合，運動開始直後に運動方向がいったん鉛直方向に近づくが，その後の領域では流れが加速している影響を受け，底面に到達するまで運動方向は水平方向に近づく。しかし，線状体が水平な姿勢に近くなるまでに移動する距離が小さい場合，その軌跡にはいくつかの変曲点が現われる。この現象は長さが小さいほど現われ易

い。また，流速の影響は一様流れ中での場合より顕著に現われ，初期角度およびノズルの傾きも落下軌跡に影響をおよぼす。

ノズル内流れ中での重心速度の変化の特徴は，水平方向にいったん減速されるが水平な姿勢になる前にふたたび加速されることおよびこの現象に伴ない鉛直方向の減速がふたたび増大することであり，流速，長さ，初期角度の影響は他の流れ中での場合より顕著に現われ，ノズルの傾きも影響をおよぼす。さらに，4種類の流れ中での結果を総合して，流れの加速程度が大きいほど，水平方向加速度の減少が低下する領域では同一姿勢における水平方向加速度の値は大きく，鉛直方向加速度が増大し始めてから後の領域ではこの値は小さいことが分かった。

ノズルの上方で線状体が水平方向にふたたび加速される場合，水平になる前に角速度がふたたび加速されることがノズル内流れ中での特徴である。ノズルの傾きは流れの加速程度に影響を与えるので，これが姿勢の変化におよぼす影響は流速の影響と同じになる。また，流れに対する線状体の相対的な並進運動が初期角度にかかわらずほぼ同じになるので，線状体の回転運動も初期角度の影響をほとんど受けない。

線状体が水平な姿勢に近くなるまでに移動する距離が小さい場合，軌跡の変動が大きくなることおよび重心の速度におよぼす流速，長さ，初期角度の影響は，矩形管内の助走域での場合より顕著に現われることが実験と計算の両面から確かめられた。また，角速度の変動に伴ない重心の速度が変動する状態を理論式を用いて調べた結果，その変動状態は実験結果と一致した。さらに，変動を除いた平均的な運動特性におよぼす諸要因の影響は両者で一致した。実験結果と計算結果の違いは，実験では，姿勢は矩形管内流れ中での姿勢の変化を中心にして，減衰振動しながら水平方向に近づき，また，姿勢の変化に応じて重心の速度も変動するため，軌跡にはいくつかの変曲点が見られ，さらに，ノズル上方で線状体が水平な姿勢に近づく場合，姿

勢は水平方向を中心にして減衰振動するのに対し，計算では，これらの変化にほとんど変動が現われないことである。なお，実験で，線状体を流れの方向に対して傾け水平な姿勢で落下させた場合，その姿勢は，鉛直面内では水平方向を中心に振動し，水平面内では流れの方向へ回転する現象と一定の姿勢を保ったまま運動する現象が交互に現われ，除々に流れの方向へ近づくことが分かった。

以上のように，ノズル内流れ中での運動特性が他の流れ中での場合と異なるのは，流れが加速し続けていることおよびその方向が場所的に変化することに起因する。

(7) 線状体が単一で回転流体中を運動する場合，線状体は，流線に沿って運動を開始するが，その後，回転流体の半径方向へも運動し始める。そして，姿勢を除々に水平方向に変化させ，回転流体の中心軸回りの回転運動と半径方向への運動をおこないながら，その重心はら旋状の曲線を描いて落下する。また，重心の半径方向速度は運動開始後しばらくの間加速されるが，姿勢が水平方向に近づくにつれて減速され，水平な姿勢を保ったまま運動を続ける場合，ふたたび加速される。しかし，加速度は，鉛直方向に対する傾斜角が小さい領域での場合より小さい。いっぽう，重心の角速度は，初期角度が0°の場合，運動開始後短時間のうちに回転流体の角速度より大きくなり，やがて，減速して回転流体の角速度にほぼ等しくなる。これに対し，初期角度が90°の場合，除々に加速され回転流体の角速度に近づくことが分かった。

重心の半径方向移動距離および半径方向速度は，同一落下時間で比較すると，直径，比重量および円筒回転数が大きいほど大きく，初期角度0°の方が90°の場合より大きい。いっぽう，長さの小さい線状体の姿勢が水平になるまでの領域では，長さが小さいほど半径方向移動距離は大きくなり，半径方向に加速

されている領域では，長さが小さいほど半径方向速度は大きくなる。重心の角速度は，運動開始後しばらくの間，長さが小さいほど，直径が大きいほど大きくなり，比重量の影響はほとんど見られない。いっぽう，重心の角速度が回転流体の角速度より大きい領域において，両者の差は円筒回転数が小さいほど大きく，しかも，より長い時間この状態が続く。さらに，長さが小さいほど，直径，比重量および円筒回転数が大きいほど鉛直面内での姿勢の変化は大きくなる。運動特性におよぼす初期位置の影響は明確に現われない。

線状体は，運動開始後円周方向に配向し始めるが，重心の角速度が回転流体の角速度より大きくなるため，配向の速度は減速され，やがて，半径方向へ配向し始める。この状態は，重心の角速度が回転流体の角速度に等しくなるまで続き，その後，一定の配向角を保ったまま線状体はしばらく運動を続け，ふたたび円周方向へ配向し始める。線状体がいったん円周方向へ配向した場合，長時間この状態が続く。また，長さ，直径および比重量が小さいほど線状体は円周方向に配向し易い。

回転流体中で線状体が運動する場合，線状体には遠心力が作用するので，重心の半径方向速度および鉛直面内での姿勢の変化は，静止流体中での場合より大きい。

参　考　文　献

1. 宇野，塩見，柳川，繊維機械学会論文集，18，T591 (1965)
2. 宇野，塩見，柳川，繊維機械学会論文集，18，T596 (1965)
3. J. Ripka，海外繊維技術文献集，19，448 (1969)
4. B. Edberg，"Studies in Modern Yarn Production"，P96，Textile Institute (1968)
5. L. Bangert，P. Sagdeo，Textil. Res. J.，__，773 (1977)
6. 宇野，塩見，繊維機械学会第29回年次大会講演論文集，P3 (昭51)
7. 塩見，博士論文，"気流による線状体の分離・輸送に関する研究"，P119 (昭51)
8. L. Feldman，Textil. Res. J.，36，809 (1966)
9. 福田，繊維工学，20，P856 (1967)
10. 黒崎，近田，伊藤，繊維学会誌，25，P133 (1969)
11. 美馬，中村，日本複合材料学会誌，2，80 (1976)
12. 鈴木，小林，繊維機械学会論文集，21，T1 (1968)
13. H. Lamb，Hydrodynamics，6th ed.，P160，Cambridge University Press (1932)
14. H. Lamb，Hydrodynamics，6th ed.，P614，Cambridge University Press，(1932)
15. 今井，斜学，28，P110 (1958)
16. S. Goldstein，Modern Developments in Fluid Dynamics，Vol. II，P425 (1965)
17. Y. Choo，M. Caserella，J. Hydronautics，5，126 (1971)
18. H. Squire，Modern Developments in Fluid Dynamics，High Speed Flow，Vol. II，P795，Oxford University Press，(1953)
19. 今井，流体力学（前編），P2，裳華房
20. L. Han，J. Appl. Mech.，27，403 (1960)

21. E. Sparrow , J. Basic Engng. , 89 , 116 (1967)
22. H. Rouse , Advanced Mechanics of Fluids , P211 (1959)

記　号

A ： x 方向の並進運動に関する全エネルギの係数
A_1 ： x 方向の並進運動に関する流体のエネルギの係数
A_2 ： x 方向の並進運動に関する物体自身のエネルギの係数
a ： 渦の間隔，円柱の半径
B ： y 方向の並進運動に関する全エネルギの係数
B_1 ： y 方向の並進運動に関する流体のエネルギの係数
B_2 ： y 方向の並進運動に関する物体自身のエネルギの係数
b ： 渦の幅
C_d ： 抗力係数
D_d ： 線状体端面に作用する抗力
$D_{d,e1}$ ： 線状体先端面に作用する抗力
$D_{d,e2}$ ： 線状体後端面に作用する抗力
d ： 線状体の直径
F_G ： 重力と浮力の差による外力
g ： 重力加速度
H_0 ： 長さの基準になる目印の間隔
i ： ストロボ撮影された線状体の順番，要素に付けた番号
j ： 線状体の両端を表わす添字
L ： 線状体端点の被写体距離，線状体の後端部から渦方向に沿って測った距離
L_0 ： 初期位置での相対距離
L_1 ： 初期平面の被写体距離
l ： 線状体の長さ
l_1 ： 物体の表面における外向き法線の x 方向の方向余弦
l_{ch} ： 写真面上での x' 方向補正値
l_{cv} ： 写真面上での y' 方向補正値
m ： 物体の質量
m_1 ： 物体の表面における外向き法線の y 方向の方向余弦
N ： 円筒回転数
M ： 線状体に作用する回転モーメント

Nu : ヌッセルト数

n : 物体の表面における外向き法線，流体の空気に対する屈折率

n_1 : 物体の表面における外向き法線のZ方向の方向余弦

Pr : プラントル数

p : X軸回りの角速度

q : Y軸回りの角速度

R : Z軸回りの回転運動に関する全エネルギの係数，線状体の任意の位置とノズル交点の距離，重心の半径方向移動距離

$\dot{R}$: 重心の半径方向速度

R_0 : 回転流体中における初期位置

R_1 : Z軸回りの回転運動に関する流体のエネルギの係数

R_2 : Z軸回りの回転運動に関する物体自身のエネルギの係数

Re : レイノルズ数

Ren : 線状体の軸に直角な方向のレイノルズ数

Ret : 線状体の軸方向のレイノルズ数

r : Z軸回りの角速度

S : ストロボ発光数

T : 全運動エネルギ

T_1 : 流体の運動エネルギ

T_2 : 物体自身の運動エネルギ

T_{1x} : 線状体がX方向に運動することにより流体に与える運動エネルギ

T_{1y} : 線状体がY方向に運動することにより流体に与える運動エネルギ

T_{1z} : 線状体がZ軸回りに回転運動することにより流体に与える運動エネルギ

Tw : 水温

t : 落下時間

U ： 重心の速度 ， 管内平均流速

U_1 ： 軸方向に沿って分布する流速の軸に直角な方向成分の平均値

U_2 ： 流速の軸に直角な方向成分の重心回りの一次モーメント

U_r ： 線状体に対する流体の相対速度の軸に直角な方向成分

u ： 座標系原点の並進速度のx方向成分 ， 管内流速

u_i ： i番目の要素の重心の軸に直角な方向速度

V ： 両端面での流速の軸方向成分の平均値

V_r ： 線状体に対する流体の相対速度の軸方向成分

v ： 座標系原点の並進速度のy方向成分 ， 回転円筒中での円周方向の流速

W ： 線状体の任意の位置での流速 ， 一様流れの流速

w ： 座標系原点の並進速度のz方向成分

X ： 重心の水平方向移動距離

$\dot{X}$ ： 重心の水平方向速度

$\ddot{X}$ ： 重心の水平方向加速度

X ： 線状体に作用するx方向成分

$\bar{X}$ ： 重心の水平方向移動距離の平均値

x ： 物体に固定した運動座標系 ， 実験装置に設定した座標系

x_{co} ： 最終落下位置での重心の座標

Y ： 重心の鉛直方向移動距離

$\dot{Y}$ ： 重心の鉛直方向速度

$\ddot{Y}$ ： 重心の鉛直方向加速度

Y ： 線状体に作用するy方向成分

Y_0 ： 管内流れ中における初期位置

y ： 物体に固定した運動座標系 ， 実験装置に設定した座標系

y_i ： i番目の要素の重心位置

Z ： 管路幅方向の座標

z ： 物体に固定した運動座標系 ， 実験装置に設定した座標系

z_{co} ： 最終落下位置での重心の位置

D_x ： 軸に直角な方向に作用する抗力
D_y ： 軸方向に作用する摩擦抗力
x' ： 写真面上の読取り座標系
y' ： 写真面上の読取り座標系
α ： 初期角度
β ： 配向角，線状体の運動方向，初期位置における水平面内での線状体の軸方向と流れ方向のなす角度，ノズル上面と底面のなす角度，配向度
$\bar{\beta}$ ： 配向角の平均値
β_1 ： 配向角
β_f ： 自由渦の方向
γ ： 矩形管の縦横比，ノズルの傾き
γ_b ： 線状体の比重量
Δl ： 微小要素の長さ
Δt ： 落下軌跡における線状体の時間間隔
η ： 管内での鉛直方向の位置を表わす座標
θ ： 回転角
θ_1 ： 第1回転角
θ_2 ： 第2回転角
θ_f ： 流れ方向の水平方向に対する角度
ξ ： 管内での水平方向の位置を表わす座標
ρ ： 流体の比質量
ρ_b ： 線状体の比質量
ν ： 動粘性係数
σ_x ： 重心の水平方向移動距離の標準偏差
σ_β ： 配向角の標準偏差
Φ ： 速度ポテンシャル
φ ： 水平面内での線状体の軸方向と流れ方向のなす角度，回転流体中心軸回りの重心の回転角

謝　　辞

本研究は，大阪大学工学部機械工学教室においておこなわれたものである。

本研究を遂行するにあたり，終始御懇篤なる御指導と御鞭撻を賜わった大阪大学　堀川　明教授，ならびに御校閲いただいた大阪大学　村田　暹教授，森川敬信教授に厚く御礼申し上げます。

また，しばしば有益な御助言を賜わりました大阪大学　中村喜代次助手，山田国広助手，矢井田修助手をはじめとする堀川研究室一同の方々に深く感謝いたします。

さらに，本研究をおこなうにあたり協力くださった当時大阪大学工学部の学生であった，景山隆義，飯塚勉，柴田豊，山路克彦，西谷憲三，高見昌夫，高田直人，高橋直樹，藤下政克ならびに東洋紡の研究生であった，上島徹の諸氏に感謝いたします。