The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	短繊維を分散した流体のスリット内流れにおける繊維挙動に関する研究
Author(s)	寺岡, 文雄
Citation	大阪大学, 1984, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/699
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

短繊維を分散した流体のスリット内流れにおける繊維挙動に関する研究

昭和58年11月

寺　岡　文　雄

目　　次

第１章　緒　　論……1

第２章　繊維配向角分布の測定法……9

2.1　緒　　言……9

2.2　フラウンホーファ回折強度の計算式……10

2.2.1　１本の矩形開口によるフラウンホーファ回折像の計算式……10

2.2.2　矩形開口の集合体によるフラウンホーファ回折像の計算式……12

2.3　矩形開口集合体のフラウンホーファ回折強度と配向角分布との関係……14

2.3.1　矩形開口集合体の配向角分布が正規分布の場合……14

2.3.2　矩形開口集合体の配向角分布が一様分布の場合……17

2.4　繊維配向角分布の測定法……19

2.4.1　繊維集合体モデルおよび試料の作成……20

2.4.2　フラウンホーファ回折装置および強度分布測定装置……21

2.4.3　繊維モデルの配列状態がフラウンホーファ回折像の強度に及ぼす影響……22

2.4.4　繊維集合体モデルおよび射出成形品の繊維配向角分布の測定法……26

2.5　結　　言……30

第３章　平行平板スリット内流れにおける繊維配向……35

3.1　緒　　言……35

3.2　繊維挙動撮影装置および実験方法……36

3.3　繊維配向角分布測定法および評価法……37

3.4　高分子水溶液の流動特性……38

3.5　平行平板スリット内流れにおける繊維配向……39

3.5.1　流線模様……39
3.5.2　スリット内での繊維配向……40
3.6　結　言……46

第4章　拡大および縮小スリット内流れにおける繊維配向……49
4.1　緒　言……49
4.2　実験装置および実験方法……49
4.3　拡大および縮小流れにおける繊維配向……50
4.3.1　流線模様……50
4.3.2　スリット内各部での繊維配向……52
4.3.3　拡大部および縮小部での繊維挙動……57
4.4　結　言……64

第5章　直交ベンドおよび直交エルボスリット内流れ
における繊維配向……69
5.1　緒　言……69
5.2　実験装置および実験方法……69
5.3　直交ベンドスリット内流れにおける繊維配向……70
5.3.1　流線模様……70
5.3.2　スリット内各部での繊維配向……72
5.3.3　ベンド部での繊維挙動……75
5.4　直交エルボスリット内流れにおける繊維配向……77
5.4.1　流線模様……77
5.4.2　スリット内各部での繊維配向……78
5.4.3　直交部での繊維挙動……80
5.5　結　言……82

第６章　Ｔ形およびＹ形スリット内流れにおける繊維配向……８５
6.1　緒　言……８５
6.2　実験装置および実験方法……８５
6.3.　Ｔ形スリット内流れにおける繊維挙動……８７
6.3.1　合流流れでの繊維挙動……８７
（ａ）流線模様……８７
（ｂ）合流部での繊維挙動……８９
6.3.2　分岐流れでの繊維挙動……９２
（ａ）流線模様……９２
（ｂ）分岐部での繊維挙動……９４
6.4　Ｙ形スリット内流れにおける繊維挙動……９６
6.4.1　流線模様……９６
6.4.2　スリット内流れでの繊維挙動……９８
6.5　結　言……１００

第７章　盲管を有するスリット内流れにおける繊維挙動……１０３
7.1　緒　言……１０３
7.2　実験装置および実験方法……１０３
7.3　盲管を有するＴ形スリット内流れにおける繊維挙動……１０５
7.3.1　流線模様……１０５
7.3.2　盲管を有するＴ形スリット内流れでの繊維挙動……１０８
7.4　盲管を有するＹ形スリット内流れにおける繊維挙動……１１５
7.4.1　流線模様……１１５
7.4.2　盲管を有するＹ形スリット内流れでの繊維挙動……１１７
7.5　盲管内での繊維挙動……１１７
7.5.1　盲管部での流体の挙動……１１８
7.5.2　盲管部でのアルミニュウム粉末の挙動……１２１
7.5.3　盲管部での繊維の挙動……１２５

7.6　結　言……131

第8章　結　論……135

謝　辞……140

第1章　緒　　論

単一材料をいくつか複合することにより，互いの弱点を補いさらに新しい性質が得られることなどから，単一材料を2種以上複合して，効果的に利用することは古くから考えられ，多方面で実用化されてきている。最近では，高性能を有する母材や強化材などが研究され，複合材料は新しい材料の開発に応用され，多種多様化し，使用範囲も広がっている反面，かなり厳しい性能を要求されるに至っている。

複合材料の一つである繊維強化プラスチックは，１９５０年代にガラス繊維強化プラスチック（ＦＲＰ）として実用化された。その後，母材に熱可塑性樹脂を用いたＦＲＴＰも開発され，繊維強化プラスチックは金属材料が主体となっていた分野へも利用され，応用範囲は広がってきている。

強化材である繊維は連続したままで使用した方が補強効果は大きいが，成形方法は限られ複雑な3次元の成形品には不向きである。不連続繊維を用いた場合には，繊維長が臨界繊維長より長ければ，連続繊維に匹敵する補強効果があることが実証されている。

短繊維強化プラスチックの成形方法には，射出成形，圧縮成形，トランスファ成形，押出成形などがある。これらの流動成形方法では，短繊維含有樹脂が溶液または融液状態で金型内を流れるとき，速度勾配などにより繊維は金型内で種々の方向に配列する。金型内での繊維の配向は，流路や金型の形状，繊維含有樹脂の剪断速度，繊維の形状や繊維の含有率などによって影響を受ける。

短繊維強化プラスチックの成形では，間隙の小さいスリット状の流路や金型が比較的多く用いられているが，スリット状流路内での繊維の流れを定量的に扱った研究は少ない。本論文では，まず，短繊維が分散した樹脂内での繊維配向を求める方法を提案した。つぎにこの測定方法を用いて，間隙の小さい平行平板スリット内での繊維挙動を定量化した。さらに，スリット内での急激な拡大・縮小流れ，直交ベンド・エルボ内流れ，分岐・合流流れおよび盲管を有するスリット内流れでの繊維挙動を検討し，金型内での繊維挙動の基礎的研究を行うこととした。

従来の研究の概要

短繊維強化プラスチックの成形過程における金型内での樹脂圧力や樹脂混合物の流れに関しては，繊維を含まない高分子流体の金型内での挙動が基礎になっている。

溶融高分子の射出成形における金型内での樹脂圧力挙動や成形品の成形収縮に関する研究は，Paulson[1]，Staub[2]および天野ら[3)〜6)]他多くの研究者[7)]によって行われている。また，溶融高分子の細管入口部での循環流れの有無や流れの様子などは，Tordella[8]，Giesekus[9]，Schummer[10]，Bagley[11]，Ballenger[12]らにより研究されている。スリット内での流れについては，流動複屈折法などを用いて，Han[13]，Drexler[14]，荒井[15)〜17)]，堀川や中村[18)〜22)]らにより，理論的にも実験的にも解析されている。

短繊維を分散した複合材料に関しては，長谷川ら[23)〜24)]はＢＭＣの射出成形における金型内での樹脂挙動やガラス繊維の破損状態について検討している。また，ＳＭＣの流動挙動については，Silva－Nieto[25]や柴田ら[26]により研究されている。

静止流体中における単一または複数の線状体の軌跡，速度および姿勢の変化などは，千葉ら[27)〜30)]により実験的および理論的に研究されている。また，平行流れや回転流れ中での線状体の運動については，塩見ら[31)〜32)]が流体中にモデル線状体を運動させ，挙動を観察するとともに，数値計算の結果と比較し検討している。

Kacir[33)〜34)]やMurtyら[35]はグリセリン液中に分散した短繊維のスリット形縮小流路内での繊維配向を，着色したトレーサ繊維により検討している。また，Calow[36]や中村ら[37]は，タンクとスリット形管路からなる装置内での繊維の運動について報告している。その他，縮小管内などでの繊維配向に関する報告は多い[38)〜42)]が，いずれの研究においても，流体中での繊維配向を定量的に扱っていない。また，流路の形状は円形断面や長方形断面の場合が多く，間隙の小さいスリット内での繊維挙動に関する研究は少ない。

McNally[43]やBrightら[44]は，短繊維強化プラスチック射出形成品を流動方向および種々の方向で切断し，コンタクト　マイクロラジオグラフィを用いて，繊維

の流れ状態を観察しているが，繊維の配向状態を定量的に扱った研究は少ない[45)〜50)]。短繊維を分散した液体の流動中の繊維配向は，着色した繊維や異種の繊維をトレーサ繊維として混合し，トレーサ繊維の配向から繊維全体の配向を求めているのが現状である。

本研究の目的と論文の構成

短繊維強化プラスチックの成形過程では，種々の形状をした流路および金型内を，繊維含有高分子が流動するため，流路および金型内での繊維の配向状態は異なる。金型内での繊維配向の違いは，成形品の諸性質に影響を与えるため，繊維含有高分子流体の金型内流れでの繊維挙動を解明することは重要である。しかし，高分子流体に短繊維が分散した場合，流動中での繊維挙動は複雑である。そこで本研究では，短繊維が分散した高分子流体の流路および金型内流れの基礎的研究として，短繊維が分散している高分子の繊維配向角分布を求める方法を明らかにし，繊維含有高分子水溶液のスリット内流れ中での繊維挙動を実験的に解明することとした。

流路や金型の形状は，間隙の小さい平行平板スリットを基本に，拡大・縮小管，ベンド・エルボ管，分岐・合流管などが種々組み合わさった複雑な形状をしている。ここでは，短繊維が分散した高分子水溶液を用いて，間隙の小さい平行平板スリット内流れでの繊維配向角分布を求め，急激な拡大・縮小流れ，直交ベンド・エルボ内流れ，分岐・合流流れおよび盲管を有するスリット内流れでの繊維挙動を，ニュートン流体の場合と比較して明らかにすることとした。

本論文は８章より成り，その概要はつぎの通りである。

第１章では，短繊維強化プラスチックおよび短繊維を分散した流体の繊維挙動に関する従来の研究を紹介し，本研究の目的および役割を述べ，論文の構成を示した。

第２章では，種々の配向角分布を与えた短繊維集合体モデルをあらかじめ作成し，レーザ光線によるモデルのフラウンホーファ回折像から，短繊維が分散した高分子内での繊維配向角分布の測定法を提案した。

第３章では，平行平板スリット内での繊維配向を測定し，スリット間隙が小さい

スリットの定常流れでは，高分子流体とニュートン流体の場合に繊維配向角分布は，壁面での剪断速度の関数として表わされることを示した。

第4章では，急激な拡大および縮小流れでの繊維挙動を検討し，高分子流体では，流体が拡大する所で短繊維は流れ方向と流れ方向に垂直な方向に配向する現象と，ニュートン流体では，拡大および縮小流れでスリットの角部に短繊維が存在しない現象を明らかにした。

第5章では，直交ベンド・エルボスリット内での繊維挙動を観察し，ベンド部および直交部の内側と外側では流線模様の間隔が異なり，流線模様が拡大・縮小スリット内流れの流線模様と同様の形状をしている場合には，繊維の配向状態も良く似ていることを明らかにした。

第6章では，T形およびY形スリット内での分岐流れ，合流流れでの繊維挙動を検討した。分岐流れと合流流れでは流線模様はほぼ同じ形状をしているが，高分子流体の場合には繊維の配向状態は異なり，拡大・縮小スリットおよび直交ベンド・エルボスリット内流れと同様の繊維挙動を示すことを明らかにした。

第7章では，盲管を有するT形およびY形スリット内流れにおける繊維の挙動について検討し，流体の種類や繊維の長さの違いにより短繊維が盲管内に進入する距離が異なり，盲管内での繊維の移動や分布状態を明らかにした。

第8章では，各章において得られた実験結果を総括し，結論を述べた。

参　考　文　献

1）D.C.Paulson ; Mod. Plastics, **45**, 2, 119 (1967)

2）R.B.Staub ; SPE Journal. **16**, 4, 429 (1960)

3）天野　修；高分子化学，**28**, 314, 482 (1971)

4）天野　修；高分子化学，**28**, 314, 493 (1971)

5）天野　修；高分子化学，28，319, 856（1971）
6）天野　修；高分子化学，28,319, 860（1971）
7）山口章三郎；工学院大学研究報告，22, 48（1967）
8）J. Jordella；J. Appl. Phys., 27,454（1956）
9）H. Giesekus；Rheol. Acta., 7, 127（1968）
10）P. Schummer；Rheol. Acta., 6, 192（1967）
11）E. B. Bagley and A. M. Birks；J. Appl. Phys., 31, 556（1960）
12）T. F. Ballenger and J. L. White；J. Appl. Poly. Sci., 15, 1949（1971）
13）C. D. Han；Rheol. Acta., 14, 173（1975）
14）L. H. Drexler and C. D. Han；J. Appl. Poly. Sci., 17, 2355（1973）
15）荒井定吉，浅野秀樹；高分子化学，29，327，510（1972）
16）荒井定吉，浅野秀樹，石川広高，水谷　純，村井真之；高分子化学，29，330,743（1972）
17）荒井定吉，石川広高；高分子化学，31，8，500（1974）
18）堀川　明，中村喜代次，梅垣静雄；繊維機械学会論文集，29，5，63（1976）
19）中村喜代次，堀川　明；繊維機械学会論文集，29，7，92（1976）
20）中村喜代次，山本康博，中村富士夫，堀川　明；繊維機械学会論文集，29，11，157（1976）
21）中村喜代次，石崎光一，山本康博，雨堤武彦，堀川　明；繊維機械学会論文集，30，6，104（1977）
22）中村喜代次，東　卓司，堀川　明；繊維機械学会論文集；31，2，28（1978）
23）長谷川嘉雄，花崎伸作，藤原順介；日本複合材料学会誌，3，4，133（1977）
24）長谷川嘉雄，花崎伸作，藤原順介；日本複合材料学会誌，6，1，31（1980）
25）R. J. Silva-Nieto, B. C. Fisher and A. W. Birley；35 th. Annual Tech. Conf.,Reinf. Plast/Comp. Institute, 1980, Section 2-E.
26）柴田憲彦，渡辺武美；強化プラスチック，26，3，91（1979）
27）堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，33，10，

118 (1980)
28) 堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，34，6，109 (1981)
29) 堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，34，11，219 (1981)
30) 堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，34，12，(1981)
31) 塩見　昭，木瀬　洋，宇野　稔；繊維機械学会論文集，35，8，105 (1982)
32) 塩見　昭，松本龍守，宇野　稔；繊維機械学会論文集，35，10，135 (1982)
33) L.Kacir, M.Narkis and O.Ishai ; Poly. Eng. Sci., 15, 7, 525 (1975)
34) L.Kacir, M.Narkis and O.Ishai ; Poly. Eng. Sci., 15, 7, 532 (1975)
35) K.N.Murty and G.F.Modlen ; Poly. Eng. Sci., 17,12,848 (1977)
36) C.A.Calow and R.J.Wakelin ; J.Inst. Metals, 96, 147 (1968)
37) 中村克孝，美馬源太郎；日本複合材料学会誌，2，2，80 (1976)
38) J.P.Bell ; J.Comp. Mat., 3, 244 (1969)
39) G.E.G.Bagg, M.E.N.Evans and A.W.H.Pryde ; Composites, 1 (1969)
40) G.F.Modlen ; J.Mat.Sci., 4, 283 (1969)
41) R.M.Anderson and R.E.Lavengood ; SPE Journal, 24, 20 (1968)
42) W.K.Lee and H.H.George ; Poly. Eng. Sci., 18, 2, 146 (1978)
43) D.McNally ; Polym－Plast. Technol. Eng., 8, 2, 101 (1977)
44) P.F.Bright, R.J.Crowson and M.J.Folkes ; J.Mat.Sci., 13, 2497 (1978)
45) M. J. Owen, D.H. Thomas and M.S.Found ; Reinf. Plast. Congr., 18, 137 (1978)
46) M.W.Darlington and P.L.McGinley ; J.Mat. Sci., 10, 906 (1975)
47) M.W.Darliogton, P.L.McGinley and G.R.Smith ; J.Mat. Sci., 11, 877

(1976)

48) B.F.Blumentritt, B.T.Vu and S.L.Cooper ; Composites, 6, 105 (1975)

49) 吉田邦夫, グナルソ・ブティマン, 岡山芳道, 北尾敏男 ; 繊維学会誌, 31, 8, 335 (1975)

50) R.E.Prud'Homme, N.V.Hien, J.Noah and R.H.Marchessault ; J.App. Polym.Sci., 19, 2609 (1975)

第２章　繊維配向角分布の測定法

2．1 緒　　言

短繊維を分散した樹脂を射出成形機，押出成形機や圧縮成形機などを用いて成形する場合，短繊維を設計通りの方向に整然と配列させることは困難である。短繊維強化プラスチック中の繊維の配列状態や分散状態のばらつきは，成形品の成形収縮や機械的，熱的性質などの諸性質に影響を与える。そのため，成形過程での短繊維の配列状態や成形品中の繊維配向を求めることは，品質管理の面においても重要である。

Darlington ら[1]は，ミクロトーム等で射出成形品を射出方向と種々の角度で切断し，コンタクト　マイクロラジオグラフィを用いて繊維を間接的に観察し，繊維の流れ状態を定性的に研究している。Wu[2]は押出成形時の壁面での剪断速度を変え，成形品の表面および内部の繊維の配列状態を観察している。この他，成形品中の繊維の配向状態を定性的に検討した研究は多い[3)〜5)]。

Darlington[6]や吉田ら[7]は，アスベスト繊維やグラファイト繊維など，配向結晶性の繊維を用いて，広角X線回折像の強度から短繊維強化プラスチック中の繊維配向を定量的に求めている。しかし，X線回折法では，繊維は配向結晶性で，母材は非晶性の必要があるため応用範囲は狭い。

縮小流路などを用いて短繊維マットを作成する研究では，着色したトレーサ繊維などを用いて，流量や分散媒などの粘度と繊維配向との関係を検討している[8)〜11)]。このように，短繊維が分散した流体での繊維は，直接または間接的に観察できるが，繊維の配向角分布を定量的に評価する方法が少ないのが現状である[12)]。

本章では，短繊維が分散した強化プラスチックや流体中の繊維配向を，レーザ光線によるフラウンホーファ回折像から求める方法を，理論を基に実験的に明らかにする。

レーザ光線は熱源としてはもちろん，単色性，干渉性や平行度などが優れているため，長さの測定[13]欠陥部の検出，糸切れの検出[14]およびホログラフィなどの

光源として広く使用されている[15)～18)]。また，馬越ら[19)～21)]はレーザ光線による織物のフラウンホーファ回折像から，織物の特徴や織むらなどを検討している。

ここでは，短繊維をアスペクト比の大きい矩形と仮定し，１本の矩形開口のフラウンホーファ回折強度から，矩形開口が２次元に種々の角度で分布した集合体のフラウンホーファ回折強度を数値計算から求め，矩形開口集合体の配向角分布との関係を明らかにした。しかし，計算では矩形開口が交わりのない配向状態についてフラウンホーファ回折強度を求めているため，繊維モデルが交わった繊維集合体モデルを作成し，繊維の配向状態がフラウンホーファ回折像や回折強度に及ぼす影響を実験的に検討した。さらに，フラウンホーファ回折像から測定した射出成形品中の繊維配向角分布を，目視により実測した繊維配向角分布と比較検討し，フラウンホーファ回折像による繊維配向角分布の測定法を明らかにした。

２．２　フラウンホーファ回折強度の計算式

短繊維をアスペクト比の大きい矩形と仮定し，１本の矩形開口および矩形開口が一軸方向に正規分布や一様分布した集合体のフラウンホーファ回折像の強度分布を計算により求める。

２．２．１　１本の矩形開口によるフラウンホーファ回折像の計算式

矩形開口の中心を座標の原点Ｏとし，矩形の長軸方向をζ軸，短軸方向をη軸とすると，縦と横がそれぞれｂ，ａの矩形開口によるフラウンホーファ回折像は，レーザ光線などの単色でコヒレントな平行光線とレンズを用いて，図２.１に示すように無限遠にある観測面（ｘｙ平面）

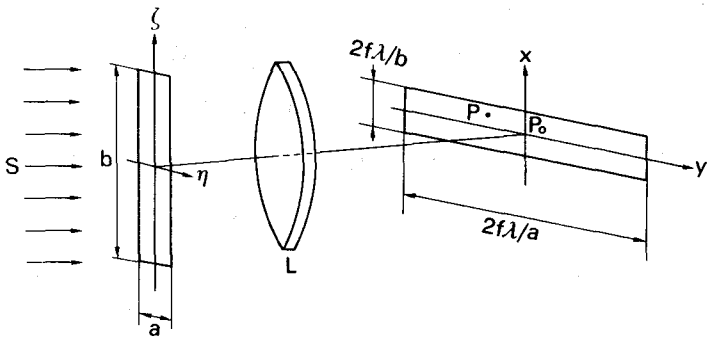


図２.１　フラウンホーファ回折像

$$I_p = I_o \left\{ \frac{\sin\left(\frac{a\pi}{f\lambda}x\right)}{\frac{a\pi}{f\lambda}x} \right\}^2 \left\{ \frac{\sin\left(\frac{b\pi}{f\lambda}y\right)}{\frac{b\pi}{f\lambda}y} \right\}^2 \qquad (2.1)$$

上に得られる。フラウンホーファ回折像の中心をｘｙ平面の原点とすると，フラウンホーファ回折像内の任意の点Ｐでの強度 I_p は（2.1）式で表わされる[22]。

ここで，λ は使用する光線の波長，ｆはレンズの焦点距離，I_o は原点 P_o での強度である。

点Ｐの座標を図2.2に示すように，フラウンホーファ回折像の中心から点Ｐまでの距離ｒと，ｙ軸と線分ＯＰとのなす角 θ を用いて（ｒ，θ）で表わすと，回折像の原点から半径ｒの点での強度は θ の関数として次式で表わされる。

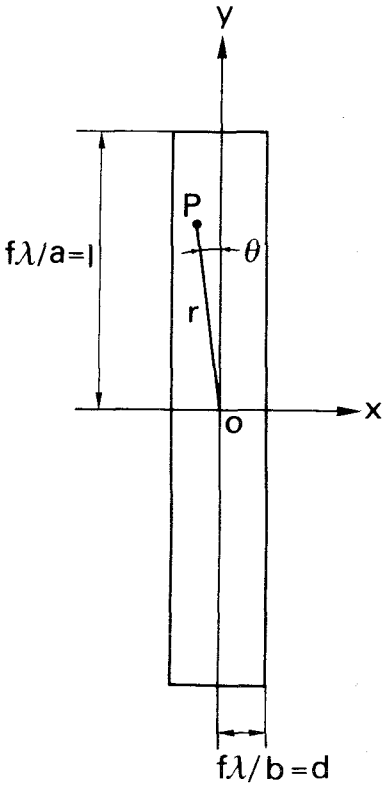


図2.2　フラウンホーファ回折像の座標

$$I_r(\theta) = I_o \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\pi r}{d}\sin\theta\right)}{\frac{\pi r}{d}\sin\theta} \right\}^2 \times \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\pi r}{l}\cos\theta\right)}{\frac{\pi r}{l}\cos\theta} \right\}^2 \qquad (2.2)$$

ここで，$d = f\lambda/b$，$l = f\lambda/a$ である。

観測面上での矩形開口のフラウンホーファ回折像は，縦横の長さがそれぞれ $2f\lambda/b$，$2f\lambda/a$ で，$\zeta\eta$ 平面の矩形開口のそれぞれの長さに反比例し，矩形開口が90°回転した矩形となる。

2．2．2 矩形開口の集合体によるフラウンホーファ回折像の計算式

同一の形で同じ大きさをした重なりのない多数（ n 個）の開口が，２次元で同一方向に，位置は不規則に存在する場合，そのフラウンホーファ回折像の形は１個の開口によるものと同じであるが，その強度 I_n は n 倍になる[23]（（2.3）式）。

$$I_n = n \cdot I_p = n \cdot I_r\ (\theta) \qquad (2.3)$$

矩形開口の集合体が一軸方向に対して正規分布や一様分布などの配向角分布をしている場合に，ある一方向に向いて n_i 本の矩形開口が位置は不規則に存在していれば，その方向に対応するフラウンホーファ回折像の強度は n_i 倍，すなわち，$n_i \cdot I_p$ になる。しかし，回折像は幅を持っているため，ある一方向の回折強度はそれと近い角度に存在する回折像の影響を受けることになる。

そこで，縦および横の長さがそれぞれ b，a の矩形開口が $\zeta\eta$ 平面上の ζ 軸に対して，位置はランダムに n 本，配向角が標準偏差 σ，平均値（ $\mu = 0$ ）の正規分布をしている矩形開口の集合体から得られるフラウンホーファ回折像内の任意の点での強度を，回折像の重なりの影響を考慮して求める。矩形開口の集合体から得られるフラウンホーファ回折像の模式図を図 2.3 に示す。回折像内の任意の点Qに影響を与える範囲内に存在する回折像の中心軸と y 軸とのなす角度を β とすると，β は次式で表わされる。

$$\theta - \sin^{-1}(d/r) \leqq \beta \leqq \theta + \sin^{-1}(d/r) \qquad (2.4)$$

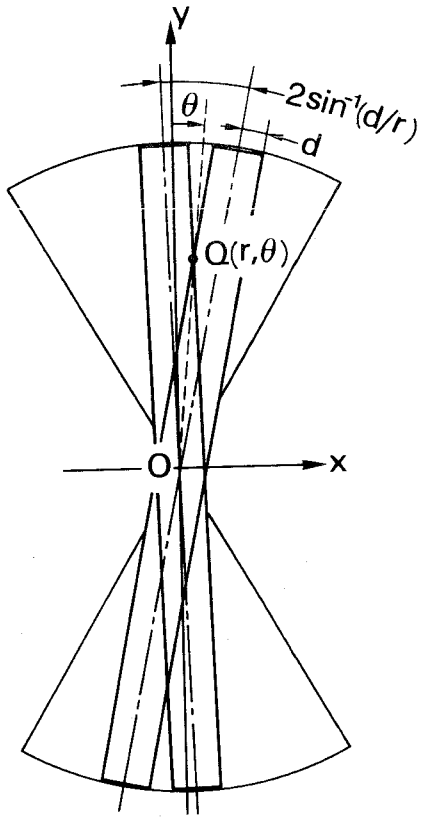


図 2.3　矩形開口集合体から得られるフラウンホーファ回折像の模式図

点Qに影響を与える範囲内で，y 軸とのなす角度が β_i の方向に存在する矩形開口の本数 n_i

は（2.5）式で表わされ，β_i 方向の1本の矩形開口の強度 I_i は（2.2）式から

$$n_i = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{\beta_i^2}{2\sigma^2}} \qquad (2.5)$$

（2.6）式と表わされ，β_i 方向に存在する回折像が点Qに及ぼす強度は（2.5）式と（2.6）式の積となる。点Qは（2.4）式の範囲内に存在するすべての回折像

$$I_i = I_o \left\{ \frac{\sin\{\frac{\pi r}{d}\sin(\beta_i-\theta)\}}{\frac{\pi r}{d}\sin(\beta_i-\theta)} \right\}^2 \left\{ \frac{\sin\{\frac{\pi r}{l}\cos(\beta_i-\theta)\}}{\frac{\pi r}{l}\cos(\beta_i-\theta)} \right\}^2 \qquad (2.6)$$

の影響を受けるため，点Qの強度 I_Q は

$$I_Q = I_o \int_{\theta-\sin^{-1}(d/r)}^{\theta+\sin^{-1}(d/r)} \frac{n}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{\beta^2}{2\sigma^2}} \left\{ \frac{\sin\{\frac{\pi r}{d}\sin(\beta-\theta)\}}{\frac{\pi r}{d}\sin(\beta-\theta)} \right\}^2 \times \left\{ \frac{\sin\{\frac{\pi r}{l}\cos(\beta-\theta)\}}{\frac{\pi r}{l}\cos(\beta-\theta)} \right\}^2 d\beta \qquad (2.7)$$

となる。

（2.7）式をより一般的に表わすため，矩形開口およびフラウンホーファ回折像のアスペクト比をK（$=b/a=l/d$）とし，回折像の原点OからQまでの距離 r と回折像の長軸 l との比を無次元の半径 τ（$=r/l$）とすると，矩形開口が正規分布をした集合体のフラウンホーファ回折像の無次元半径 τ 上での強度は，y軸とのなす回転角 θ の関数として次式で表わされる。

$$I_\tau^N(\theta) = I_o \int_{\theta-\sin^{-1}(1/K\tau)}^{\theta+\sin^{-1}(1/K\tau)} \frac{n}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{\beta^2}{2\sigma^2}} \times \left\{ \frac{\sin\{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)\}}{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)} \right\}^2 \left\{ \frac{\sin\{\tau\pi\cos(\beta-\theta)\}}{\tau\pi\cos(\beta-\theta)} \right\}^2 d\beta \qquad (2.8)$$

$\zeta\eta$平面上のζ軸に対称に矩形開口が$-\alpha$から$+\alpha$の間にn本一様に分布している集合体のフラウンホーファ回折像の強度は，正規分布の場合と同じように考えると次式で表わされる。

$$I_{\tau}^{U}(\theta)=I_{0}\int_{\theta-\sin^{-1}(1/K\tau)}^{\theta+\sin^{-1}(1/K\tau)}\frac{n}{2\alpha}\left[\frac{\sin\{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)\}}{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)}\right]^{2}$$

$$\times\left[\frac{\sin\{\tau\pi\cos(\beta-\theta)\}}{\tau\pi\cos(\beta-\theta)}\right]^{2}d\beta \qquad (2.9)$$

2．3 矩形開口集合体のフラウンホーファ回折強度と配向角分布との関係

矩形開口が正規分布や一様分布した集合体のフラウンホーファ回折強度を，矩形開口のアスペクト比Kを2.5から１０００まで，無次元の半径τを0.０５から１まで，正規分布の標準偏差σを１°から３０°まで，一様分布の分布幅αを１°から９０°まで変えて，（2.8）および（2.9）式から求め，回折強度と矩形開口の配向角分布との関係を明らかにする。

2．3．1 矩形開口集合体の配向角分布が正規分布の場合

アスペクト比Kの矩形開口の配向角が標準偏差σ，平均値（$\mu=0$）の正規分布をしている集合体の，フラウンホーファ回折像の無次元半径τ上での強度を（2.8）式から求める。

得られるフラウンホーファ回折像の中心を図2.3に示したように，xy軸の原点とし，y軸およびx軸上での強度をそれぞれ$I_{K,\sigma,\tau}^{N}(0)$，$I_{K,\sigma,\tau}^{N}(90)$とする。$\theta$が0のときの強度$I_{K,\sigma,\tau}^{N}(0)$に対する任意の角度$\theta$での強度の比を相対強度$T_{K,\sigma,\tau}^{N}(\theta)$（$=I_{K,\sigma,\tau}^{N}(\theta)/I_{K,\sigma,\tau}^{N}(0)$）とし，（2.8）式の$\beta$を$\Sigma$に置き換えて数値積分により，回折強度$I_{K,\sigma,\tau}^{N}(\theta)$および相対強度$T_{K,\sigma,\tau}^{N}(\theta)$を求める。

矩形開口の配向角分布の標準偏差σが１０°と２０°のときの計算結果の一例を表2.1および表2.2に示す。各表においてKとτの積が５０以上のときに，標準偏

差σが１０°および２０°の場合とも相対強度$T^{N}_{K,\sigma,\tau}(\theta)$の値は，$\exp(-\theta^2/2\sigma^2)$の値とほぼ一致していることがわかる。標準偏差$\sigma$が１０°および２０°以外の場合にも，回折強度$I^{N}_{K,\sigma,\tau}(\theta)$の値はそれぞれ異なっていたが，相対強度$T^{N}_{K,\sigma,\tau}(\theta)$の値は$\exp(-\theta^2/2\sigma^2)$の値とほぼ一致していた。このことから，Kと$\tau$の積（K$\tau$）が５０以上になるとフラウンホーファ回折像間の重なりの影響はほとんどなくなり，回折像の相対強度曲線は，矩形開口集合体の配向角分布が正規分布の場合には，回折像の相対強度は$\exp(-\theta^2/2\sigma^2)$となり，$\exp(-1/2)$の値に対応する回転角が配向角分布の標準偏差$\sigma$になる。

理論的には矩形開口のアスペクト比Kや無次元半径τは任意の値を取り得るが，短繊維強化プラスチックや強度分布測定装置を使用する上において，Kとτの値は制約を受ける。すなわち，短繊維強化プラスチックでは，短繊維による補強効果を得るためには，短繊維は臨界長さ以上でなければなら

表 2.1　配向角分布の標準偏差σが１０°のときの計算結果

K	τ	Kτ	$T^{N}_{K\tau}(\theta)$			
			θ=5°	10°	20°	30°
	0.05	50	0.88266	0.60698	0.13573	0.01118
1000	0.1	100	0.88254	0.60664	0.13544	0.01113
	0.2	200	0.88251	0.60656	0.13536	0.01111
	0.1	50	0.88266	0.60698	0.13573	0.01118
500	0.2	100	0.88254	0.60664	0.13544	0.01113
	0.5	250	0.88251	0.60655	0.13535	0.01111
	0.05	10	0.88646	0.61750	0.14535	0.01303
200	0.1	20	0.88351	0.60931	0.13783	0.01157
	0.5	100	0.88254	0.60664	0.13543	0.01113
	0.1	10	0.88646	0.61750	0.14535	0.01303
100	0.2	20	0.88351	0.60931	0.13783	0.01157
	0.5	50	0.88266	0.60698	0.13573	0.01118
	0.1	2	0.94225	0.78734	0.37731	0.10444
20	0.2	4	0.90444	0.66888	0.19885	0.02582
	0.5	10	0.88647	0.61751	0.14537	0.01303

表 2.2　配向角分布の標準偏差σが20°のときの計算結果

K	τ	Kτ	$T^{N}_{K\tau}(\theta)$			
			θ=10°	20°	40°	60°
	0.05	50	0.88254	0.60664	0.13543	0.01113
1000	0.1	100	0.88251	0.60656	0.13536	0.01111
	0.2	200	0.88250	0.60654	0.13534	0.01111
	0.1	50	0.88254	0.60664	0.13543	0.01113
500	0.2	100	0.88251	0.60656	0.13536	0.01111
	0.5	250	0.88250	0.60654	0.13534	0.01111
	0.05	10	0.88351	0.60932	0.13783	0.01158
200	0.1	20	0.88275	0.60723	0.13596	0.01122
	0.5	100	0.88251	0.60656	0.13536	0.01111
	0.1	10	0.88351	0.60932	0.13783	0.01158
100	0.2	20	0.88275	0.60723	0.13596	0.01122
	0.5	50	0.88254	0.60664	0.13544	0.01113
	0.1	2	0.90507	0.67073	0.20111	0.02650
20	0.2	4	0.88867	0.62366	0.15118	0.01422
	0.5	10	0.88351	0.60932	0.13784	0.01158

ず，補強効果を連続繊維の９５％以上にするには，繊維長さの１０倍以上にしなければならない。短繊維強化プラスチックに使用される繊維は，太さが１０μm前後で，長さが数mmのものが多いため，アスペクト比Kは一般に１００以上となる。

いっぽう，無次元半径τは0から1までの値を計算上では任意に取り得るが，0付近での測定は入射光の影響が大きいことや，装置上の面で問題があり困難である。また，無次元半径τはフラウンホーファ回折像の長軸と同じ長さ，すなわち1まで近づけられるが，1になると回折強度は0となるため強度測定は不可能である。そのため，フラウンホーファ回折強度，入射光の影響や装置上の問題を考慮すると，τの値は0.4～0.6が適している。以上のことから，短繊維強化プラスチックなど短繊維が分散した系に関しては，一般にKとτの積は５０以上になると考えられるため，フラウンホーファ回折像の相対強度は $\exp(-\theta^2/2\sigma^2)$ となり，$\exp(-1/2)$ (=0.6065) の値に対応する回転角が，矩形開口集合体の配向角分布の標準偏差σと計算上では一致することになる。

フラウンホーファ回折像による配向角の測定法を繊維強化プラスチックの場合だけでなく，アスペクト比の小さい矩形が分布している場合にも応用するため，アスペクト比Kと無次元半径τの積が５０以下の場合について検討した。表2.1と表2.2において，正規分布の標準偏差σが等しく，Kとτの積が等しい組み合せ，すなわち$K_1\tau_1=K_2\tau_2$ ならば，そのときの $T^N_{K_1,\sigma,\tau_1}$ と $T^N_{K_2,\sigma,\tau_2}$ の値はほぼ一致していることがわかる。このことから，任意の$K\tau$の値に対して，σの値を種々変化させて得られる曲線を $G^N_{K\tau}(\sigma)$ 曲線とすると，$G^N_{K\tau}(\sigma)$ 曲線は任意の$K\tau$の値に対して一本求められる。いま，アスペクト比K（K＜１００）の矩形開口の配向角分布が平均値（$\mu=0$）で2次元に正規分布している集合体の，フラウンホーファ回折像の相対強度曲線を $T^N_{K\tau}(\theta)$ とすると，正規分布の標準偏差σは図2.4に示すように，$T^N_{K\tau}(\theta)$ 曲線と $G^N_{K\tau}(\theta)$ 曲線の交点から求められる。すなわち，$G^N_{K\tau}(\sigma)$ 曲線は，矩形開口のアスペクト比Kと，強度を測定するときの無次元半径τにより決まる$K\tau$の値において，種々のσに対応する値をプロットした曲線であるから，$G^N_{K\tau}(\sigma)$ 曲線と測定値 $T^N_{K\tau}(\theta)$ 曲線の交点の回転角 θ_s は，求める標準偏差σと一致することになる。矩形開口集合体の配向角分布の主軸方向が試料

の主方向に対して傾いている場合などには，配向角分布の主軸方向を原点とし，図 2.4 で示した方法で配向角分布の標準偏差 σ を求めることができる。

K τ が 5, 10, 20, 50 のときの $G_{K\tau}(\sigma)$ 曲線を図 2.5 に示す。このように，フラウンホーファ回折像を用いて配向角分布を測定する手法は，アスペクト比の大きい繊維を分散した系だけでなく，アスペクト比の小さい矩形状の物質が分散した系においても計算上では利用できることがわかった。

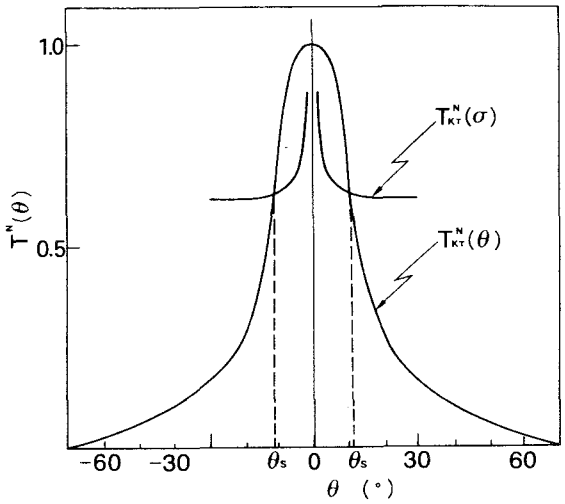


図 2.4　配向角分布が正規分布をしている場合の標準偏差 σ の求め方

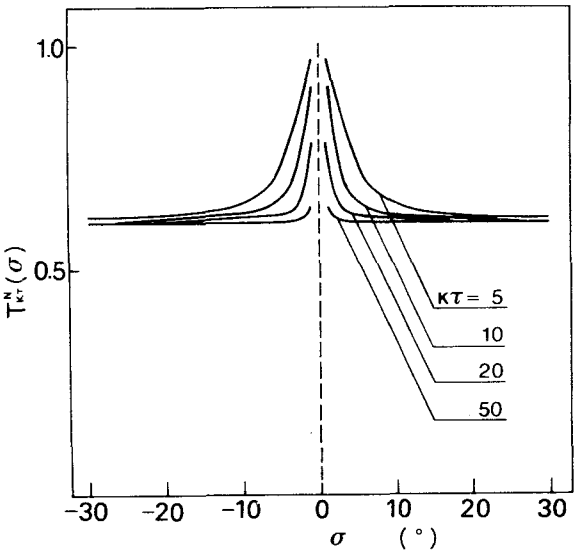


図 2.5　Kτ が 5, 10, 20 および 50 のときの $G^N_{K\tau}(\sigma)$ 曲線

2．3．2 矩形開口集合体の配向角分布が一様分布の場合

アスペクト比Kの矩形開口が試料の主軸に対して，左右対称に $-\alpha°$ から $+\alpha°$ の間に一様に分布している集合体から得られるフラウンホーファ回折像の，原点から任意の無次元半径 τ 上の強度を（2.9）式から求める。計算方法および矩形開口のアスペクト比Kと無次元半径 τ に関しては，正規分布の場合と同じであるが，分布幅 α を 1°から 90° まで変化させて，そのときの回折強度 $I^U_{K,\alpha,\tau}(\theta)$ と相対強度 $T^U_{K,\alpha,\tau}(\theta)$ を求めて，矩形開口の配向角分布と比較した。

矩形開口集合体の配向角分布の分布幅αが２０°と６０°のときの計算結果の一例を表2.3および表2.4に示す。矩形のアスペクト比Kと無次元半径τの積が3以上のときに，相対強度$T^{U}_{K,20,\tau}$（20）および$T^{U}_{K,60,\tau}$（60）の値はKτの値には無関係にほぼ0.５３０と一定になっている。分布幅αが２０°および６０°以外の場合にも，回折強度$I^{U}_{K,\alpha,\tau}(\theta)$の値はそれぞれ異なっているが，相対強度$T^{U}_{K,\alpha,\tau}(\alpha)$の値はほぼ0.５３０と一定であった。

表2.3　配向角分布の分布幅αが20°のときの計算結果

K	τ	Kτ	$T^{U}_{K\tau}(\theta)$ θ=10°	20°	30°
	0.05	2	0.85999	0.53991	0.15781
40	0.2	8	1.00000	0.52958	0.00000
	0.5	20	1.00000	0.52954	0.00000
	0.1	2	0.85986	0.53992	0.15798
20	0.2	4	0.98545	0.52972	0.01455
	0.4	8	1.00000	0.52956	0.00000
	0.2	2	0.85936	0.53994	0.15870
10	0.3	3	0.93296	0.52980	0.06704
	0.8	8	1.00000	0.52935	0.00000

表2.4　配向角分布の分布幅αが60°のときの計算結果

K	τ	Kτ	$T^{U}_{K\tau}(\theta)$ θ=50°	60°	70°
	0.05	2	0.84495	0.53047	0.15505
40	0.2	8	1.00000	0.52958	0.00000
	0.5	20	1.00000	0.52951	0.00000
	0.1	2	0.84479	0.53045	0.15521
20	0.2	4	0.98545	0.52972	0.01455
	0.4	8	1.00000	0.52955	0.00000
	0.2	2	0.84411	0.53036	0.15589
10	0.3	3	0.93296	0.52980	0.06704
	0.8	8	1.00000	0.52935	0.00000

矩形のアスペクト比Kが40，無次元半径τが0.５で，矩形の配向角の分布幅αが２０°および６０°のときの，相対強度曲線$T^{U}_{K,\alpha,\tau}(\theta)$を図2.６に示す。各相対強度曲線の分布幅（２０°および６０°）付近の形状は，矩形開口集合体の分布幅には関係なくほとんど同じであることがわかる。このことは，一様分布の場合

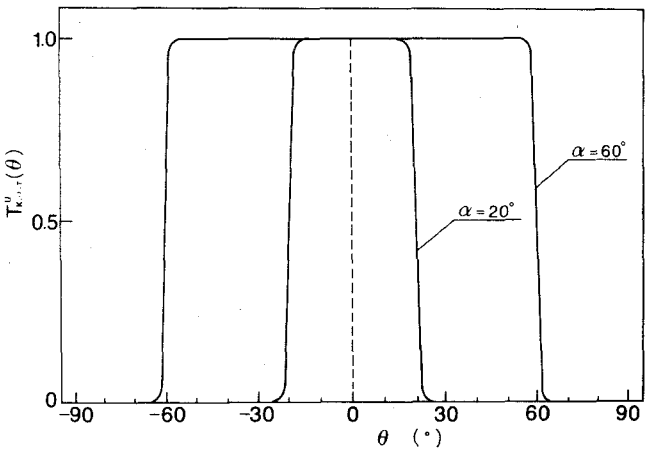


図2.6　配向角分布の分布幅αが20°,と60°のときの相対強度曲線

には正規分布の場合とは異なり，分布幅αより角度が大きいところでは矩形開口が存在せず，分布幅付近の回折像に及ぼす影響がほぼ同じになるためであると考えられる。ただし，一様分布の分布幅が±９０°の場合には，矩形開口の分布は０°から３６０°の範囲内で連続するため，$T^{U}_{K,90,\tau}(\theta)$曲線は定数（1.0）になる。

矩形開口の配向角が一様分布の場合には，分布幅±αのところで配向角の分布が不連続になるため，フラウンホーファ回折像の形状は$K\tau$が大きくなっても矩形にならないが，図2.7に示すように正規分布の場合に得られるフラウンホーファ回折像の$T^{N}_{K,\sigma,\tau}(\theta)$曲線とは区別ができる。これらのことから，矩形が試料の主軸に対して左右対称に２次元に，一様に分布している集合体では，$K\tau$の値が３以上になると，ある$K\tau$の値において，種々のαに対応する値をプロットした$G^{U}_{K\tau}(\alpha)$曲線は，$K\tau$の値に関係なくほぼ0.530と一定になることから，測定値$T^{U}_{K\tau}(\theta)$曲線の0.530に対応する回転角θ_Sは分布幅αと計算上一致することになる。

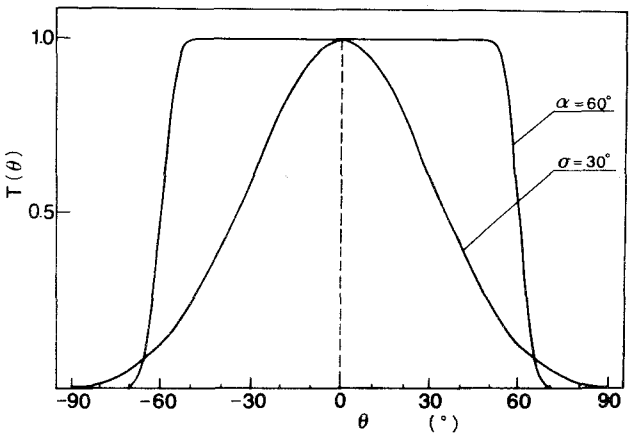


図2.7　矩形開口の配向角が正規分布（σ=30°）と一様分布（σ=60°）のときの相対強度曲線

２．４　繊維配向角分布の測定法

2.3節では，矩形開口の交わりがない配列状態で，配向角が正規分布や一様分布のフラウンホーファ回折強度を計算により求め，配向角分布と比較し検討した。しかし，実際の短繊維強化プラスチックなどでは，各繊維は交わり，複雑な配列状態をしている。そこで，配列状態の異なる種々の繊維集合体モデルを作成し，繊維の配列状態がフラウンホーファ回折像や回折強度に及ぼす影響を実験的に検討する。さらに，フラウンホーファ回折像による測定方法で射出成形品の繊維配向角分布を

測定し，目視により実測した値と比較して，短繊維が分散した系での繊維配向角分布のフラウンホーファ回折像による測定法の可能性を明らかにする。

2．4．1 繊維集合体モデルおよび試料の作成

短繊維が２次元に分布した薄い短繊維強化プラスチックや，繊維が３次元に分布した短繊維強化プラスチックなどを２次元に投影して得られる試料の短繊維集合体モデルでは，母材をトレース用紙で，短繊維を黒線で表わす。繊維集合体モデルは，図2.8に示すように，トレース用紙に等間隔に番地を付け，乱数表を用いて繊維（黒線）の中心位置をトレース用紙上にランダムに選び，繊維の配向角分布が正規分布や一様分布になるように，黒線を配列して作成する。繊維配向角分布の主軸方向をζ軸，それに垂直方向をη軸とする。

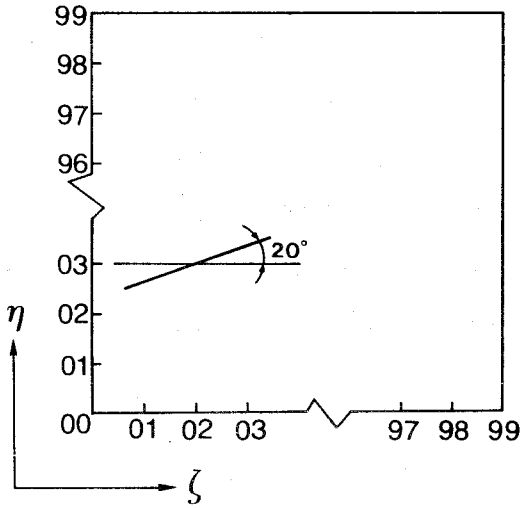


図2.8　繊維集合体モデルの作成
（（η，ζ）＝（03，02）点での繊維配向角が20°のときの一例）

繊維モデルのアスペクト比は５０から３００まで，本数を１００本から１０００本まで変えて，繊維の配向角分布が正規分布の場合には，標準偏差σを5°から３０°まで変え，一様分布の場合には分布幅αを5°から９０°まで変えて種々の短繊維集合体モデルを作成した。図2.9に短繊維集合体モデルの一例を示す。

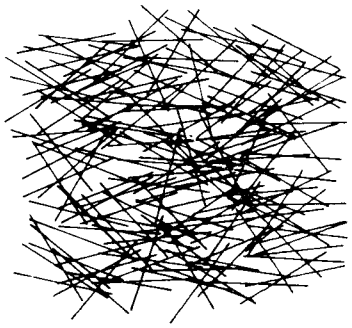


図2.9　繊維集合体モデル
（標準偏差σ＝30°，繊維本数200本）

このようにして作成した繊維集合体モデルを接写し，得られたネガフイルムをスライド用マウントに取り付け，

フラウンホーファ回折像撮影用の試料とした。繊維集合体モデルを接写するフイルムは，レーザ光線によるフラウンホーファ回折像を得るため透明であり，母材と繊維のコントラストを強調するため，ミニコピーフイルムを用いた。

2．4．2 フラウンホーファ回折装置および強度分布測定装置

フラウンホーファ回折装置を図 2.10 に示す。1は波長が6 328 Åの He−Ne ガスレーザ発生装置で，レーザビームを2のビームエキスパンダで拡大し，スライド用マウントに取り付けたネガフイルム3に照射する。4は焦点距離が100～600 mm のズームレンズで，試料中の繊維モデルの大きさにより可変して，フラウンホーファ回折像の長軸の長さが20～30 mm になるように調節して，5のカメラでフラウンホーファ回折像を撮影する。

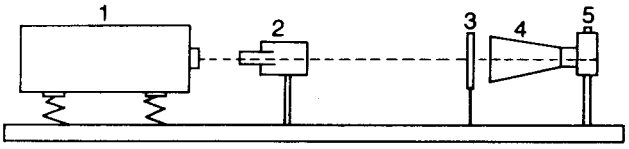


図 2.10　フラウンホーファ回折装置
1；レーザ発生装置　2；ビーム　エキスパンダ
3；試料（ネガフイルム）4；ズームレンズ
5；カメラ

6はスリットで雑音の少ない回折像を得るため，数個使用している。

フラウンホーファ回折像の強度分布測定は図 2.11 に示す強度分布測定装置を用い，図 2.12 に示すように原点から無次元半径 τ の位置で行う。(1)は平行光線発生装置で，(2)のスリットを介して平行光線をフラウンホーファ回折像(3)に照射する。(4)は回転装置の付いたホトメータで，試料(3)を一定速度で回転させ，無次元半径 τ におけるフラウンホーファ回折像の強度曲線を(5)のレコーダを用いて記録する。フラウンホーファ回折強度曲線はホトメータの受光部の径が大きい場合には，最高強度は低くなり曲線もブロードになるが，受光部の径が小さい場合には雑音による影響が強く現われるため，実験から受光部の径を 0.1 5 mm とした。

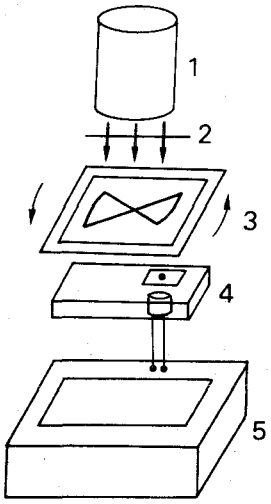


図 2.11　強度分布測定装置
1；光源　2；スリット
3；試料　4；ホトメータ
5；レコーダ

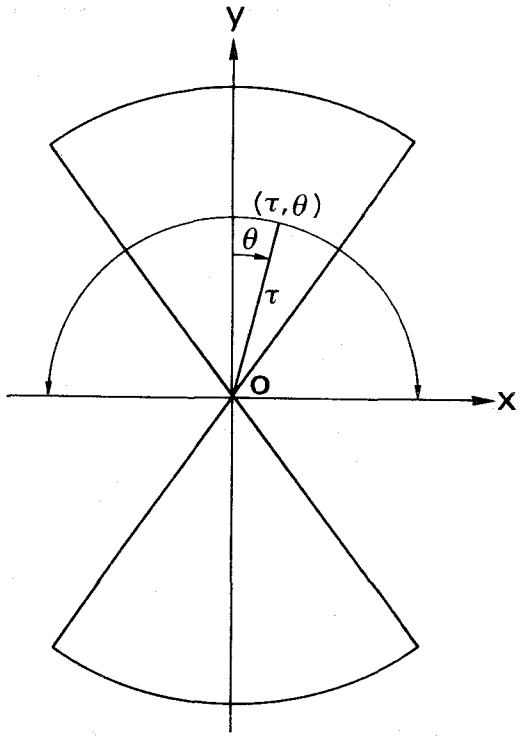


図 2.12　フラウンホーファ回折像の強度分布測定

2．4。3 繊維モデルの配列状態がフラウンホーファ回折像の強度に及ぼす影響

繊維モデルが同一方向に規則正しく配列した図 2.13 に示す短繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像は図 2.14 に示すように回折格子となり，繊維配向の規則性が現われている。

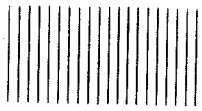


図 2.13　繊維が規則正しく配列した繊維集合体モデル

しかし，図 2.15（a）に示すように繊維モデルが同一方向に位置がランダムに配向している短繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像は，図 2.15（b）に示すように 90° 回転した方向に 1 本の繊維モデルによる回折像とほとんど同じ形の回折像が得られ，2.2.2.項の計算による結果と一致している。

図 2.16（a）に示すように，互いに 30° の角度を有する m，n の 2 軸方向に

位置はランダムに，繊維モデルが交わることなしに配列した繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像は，図2.16（b)に示すように集合体モデルのそれぞれの軸を90°回転させた方向に正確に30°の角度をなして得られる。また，繊維モデルが互いに直角な2軸方向に位置

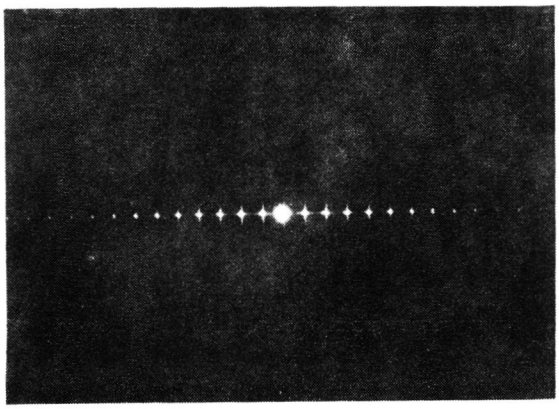
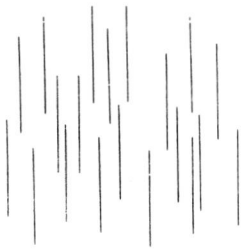
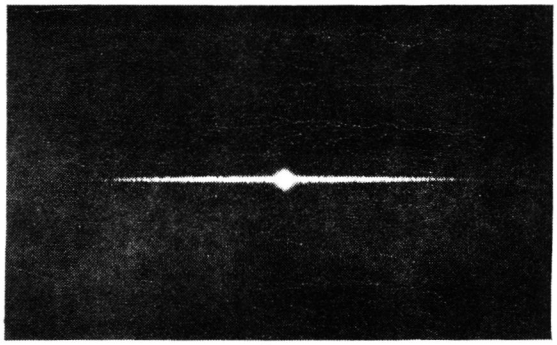


図2.14　規則正しく配列した繊維集合体モデルから得られるフラウンホーファ回折像

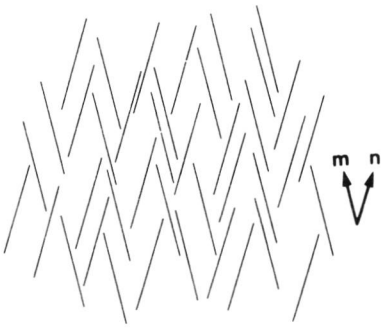


(a)

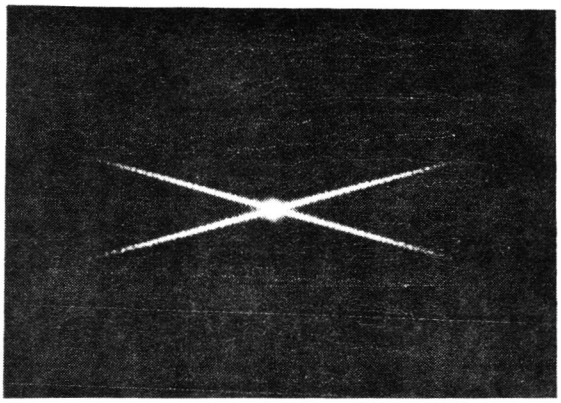


(b)

図2.15　同一方向に位置がランダムに配向した短繊維集合体モデル（a）とそのフラウンホーファ回折像（b）



(a)



(b)

図2.16　2軸方向に位置はランダムに繊維モデルが交わりなく配列した短繊維集合体モデル（a)とそのフラウンホーファ回折像（b）

はランダムに配向したフラウンホーファ回折像は図2.17に示すように互いに直角に交差して得られる。図2.16(b)に示したフラウンホーファ回折像の原点から無次元半径が0.6での強度を図2.18に示すが，各ピークの強度はほとんど同じであり，繊維本数と回折像の強度は比例している。

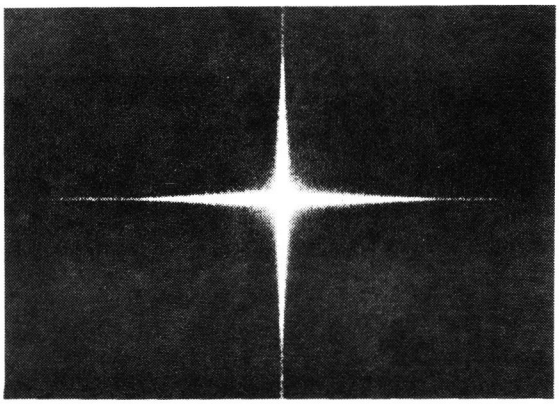


図2.17　直角方向に分布した繊維集合体モデルから得られたフラウンホーファ回折像

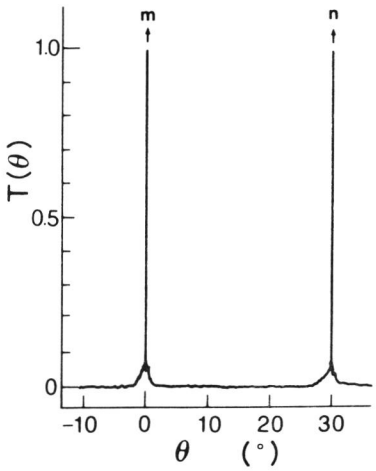
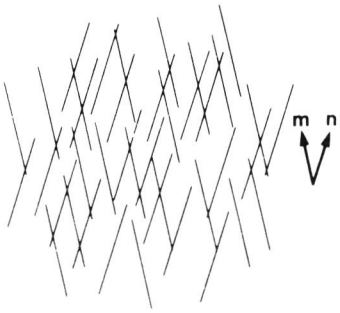
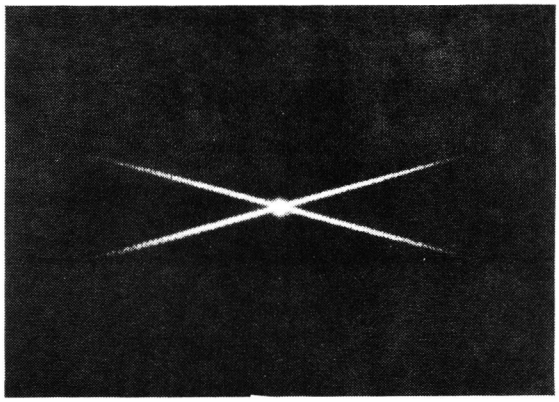


図2.18　2軸方向に分布した交わりのない繊維集合体モデルから得られたフラウンホーファ回折像の強度分布曲線

図2.19(a)に示す繊維集合体モデルは，図2.16(a)の繊維集合体モデルと繊維の配向方向は同じであるが，繊維モデルが互いに交わっている集合体モデルである。繊維モデルに交わりのある繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像と強度



(a)



(b)

図2.19　2軸方向に配列した繊維モデルが互いに交わっている繊維集合体モデル(a)とそのフラウンホーファ回折像(b)

分布曲線を，それぞれ図2.19（b)と図2.20に示すが，繊維モデルが交わっていない集合体モデルの場合とフラウンホーファ回折像と強度曲線はほぼ同じであり，繊維モデルの交わりによる影響はほとんど見られない。

図2.21（a)および図2.21（b)にmとn方向の繊維モデルの本数割合が2：1の繊維集合体モデルとそのフラウンホーファ回折像を示す。繊維モデルの本数割合が異なる繊維集合体モデルから得られるフラウンホーファ回折像の強度分布曲線を図2.22に示すが，mとn方向に対応する強度はほぼ2：1で繊維モデルの本数に比例している。

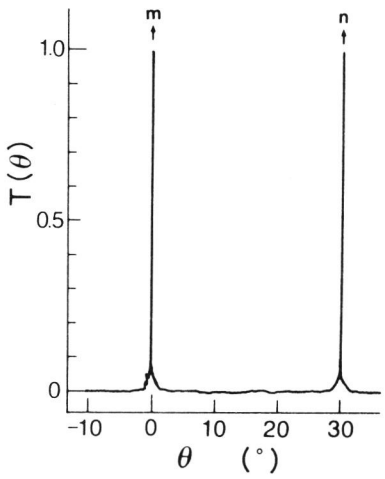
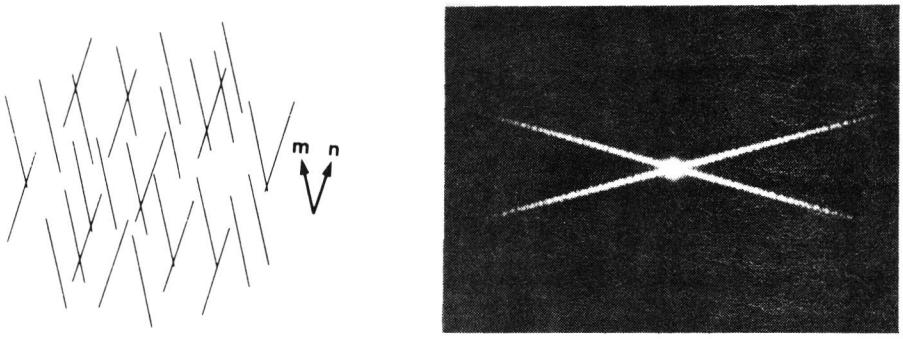


図2.20　2軸方告に分布した交わりのある繊維集合体モデルから得られるフラウンホーファ回折像の強度分布曲線

この他にも繊維モデルのアスペクト比や本数および繊維の配列状態などを変えて，フラウンホーファ回折像や回折強度を検討したが，繊維モデルの配列に規則性がなければ，フラウンホーファ回折像は繊維モデルの交わりの影響をほとんど受けず，回折強度はその方向に対応する繊維モデルの本数に比例することがわかった。



(a)　　(b)

図2.21　2軸方向に分布した繊維モデルの本数割合が異なる繊維集合体モデル（a)とそのフラウンホーファ回折像（b)

2．4．4 繊維集合体モデルおよび射出成形品の繊維配向角分布の測定法

2.4.3項で繊維モデルが2軸方向に分布した繊維集合体モデルにおいて，繊維モデルの交わりや配向状態などがフラウンホーファ回折像に及ぼす影響について検討したが，ここでは繊維モデルが正規分布や一様分布した繊維集合モデルや実際の繊維が分布した系のフラウンホーファ回折像について検討する。

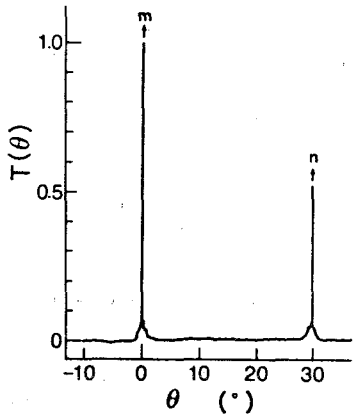


図 2.22　繊維モデルの本数割合が異なる繊維集合体モデルから得られるフラウンホーファ回折像の強度分布曲線

繊維モデルが正規分布や一様分布した種々の繊維集合体モデルから得られるフラウンホーファ回折像の強度分布曲線を求め，2.3節で明らかにした計算による標準偏差σや分布幅αを求める方法で，それぞれの標準偏差および分布幅を測定した結果を表2.5と表2.6に示す。繊維モデルの配向角が正規分布をした繊維集合体モデルでは，繊維モデルのアスペクト比Kと無次元半径

表 2.5　繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像から求めた標準偏差

σ	Kτ	σ^*
	30	10.5
10	60	10.5
	100	10.2
	30	21.0
20	60	20.5
	100	20.5
	30	31.5
30	60	31.0
	100	30.5

σ^*；測定値

表 2.6　繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像から求めた分布幅

α	Kτ	α^*
	10	21.0
20	20	20.5
	30	20.5
	10	41.5
40	20	41.5
	30	41.0
	10	62.0
60	20	61.5
	30	61.0

σ^*；測定値

τ の積が５０以下の場合には，測定した相対強度曲線と $G^{N}_{K\tau}(\sigma)$ 曲線の交点の回転角を標準偏差 σ として求めた。また，$K\tau$ が５０以上の場合には測定した相対強度曲線の exp（−1／2）の点での回転角を標準偏差 σ として求めているが，いずれの場合も繊維集合体モデルの標準偏差 σ とほぼ一致している。一様分布の場合には相対強度が 0.530 の点での回転角を分布幅として求めているが，一様分布の場合も繊維集合体モデルの分布幅とほぼ一致している。

繊維集合体モデルによる配向角分布の測定では繊維モデルの交わりによる影響などもほとんどなく，2.3節で求めた計算結果と良く一致し，フラウンホーファ回折像の相対強度曲線を得ることにより繊維集合体モデルの配向角分布が求められることがわかった。

つぎに，フラウンホーファ回折による方法が実際の短繊維強化プラスチックなど短繊維が分散した系での繊維配向角の測定に適用できるかについて検討した。炭素繊維（太さ１０ μm，長さ１ mm ）を分散した低密度ポリエチレンの射出成形品の繊維配向角を，フラウンホーファ回折像による測定法で求めた値と，成形品を万能投影機を用いて拡大しフラウンホーファ回折像を測定した同じ場所での繊維配向を直接読み取った値とを比較した。短繊維の配向角は流体の流れ方向を0°として測定し，5°間隔の配向角の相対度数分布を図2.23 に示す。また，同じ場所でのフラウンホーファ回折像の相対強度分布曲線を図2.24 に示すが，両者はほとんど一致

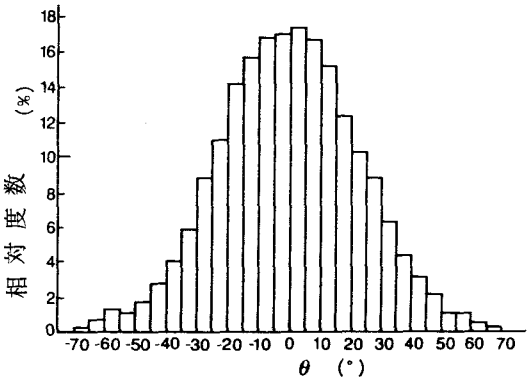


図 2.23　射出成形品の繊維配向角の相対度数分布

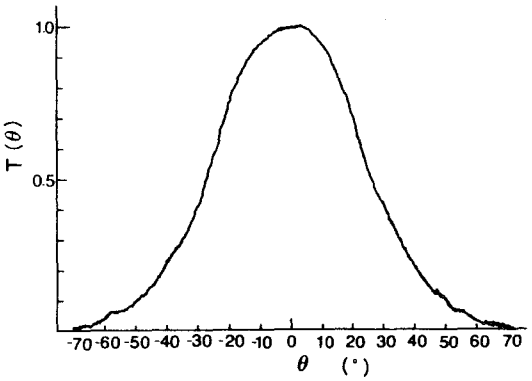


図 2.24　射出成形品のフラウンホーファ回折像の相対強度分布曲線

している。図2.25 および図2.26 には，繊維が2軸方向に分かれて分布した射出成形品の繊維配向角の相対度数分布とフラウンホーファ回折像の相対強度分布曲線をそれぞれ示す。図2.25 の各分布内の繊維本数の比は約4対1で，フラウンホーファ回折像の強度分布曲線のそれぞれのピークの面積比はほぼ4対1であり，強度分布曲線のピークの面積は繊維本数と比例していることがわかる。この他，種々の射出成形品について繊維配向を測定し検討したが，自念ら[24]が報告しているように射出成形品の繊維配向はほぼ正規分布であり，フラウンホーファ回折像により求めた正規分布の標準偏差 σ は実測した値と良く一致し，回折像の相対強度分布曲線のピークの面積は繊維本数と比例していた。これらのことから，繊維が分散した系での繊維の配向角はフラウンホーファ回折像による方法で測定できることがわかった。

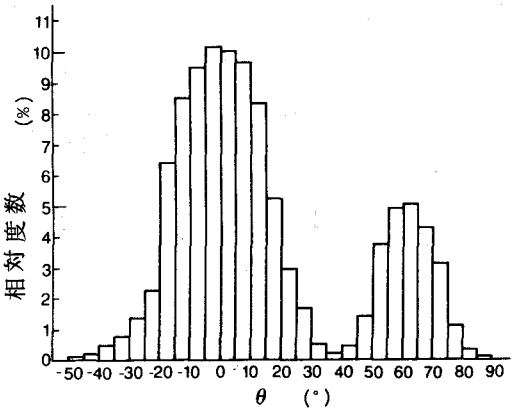


図2.25　射出成形品の繊維配向角の相対度数分布

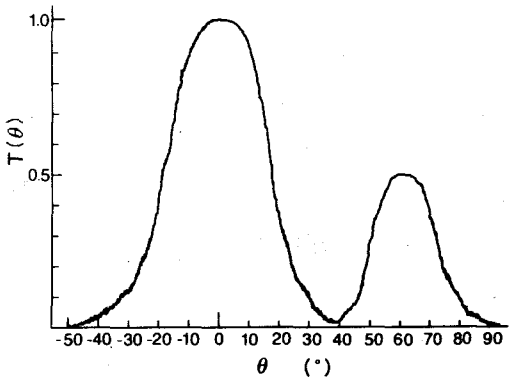


図2.26　射出成形品のフラウンホーファ回折像の相対強度分布曲線

しかし，フラウンホーファ回折装置の軸調整などが不十分なときは，ゴーストやノイズなどが入り正確な強度分布曲線が得られないため，フラウンホーファ回折像および強度分布曲線を正確に測定する方法について検討する。レーザ光線の光軸調整のときには，回折格子や図2.27 に示す小さい円形の開口を用いてゴーストやノイズがない状態に調整する。光軸がずれている場合には図2.28 に示すように円形の開口や繊維モデルのフラウンホーファ回折像はリングが切れたり，非対称になり，繊維配向角分布の測定は不正確になる。

(a)　　(b)

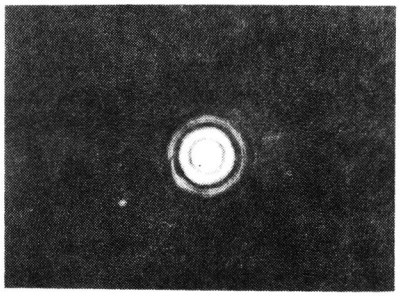
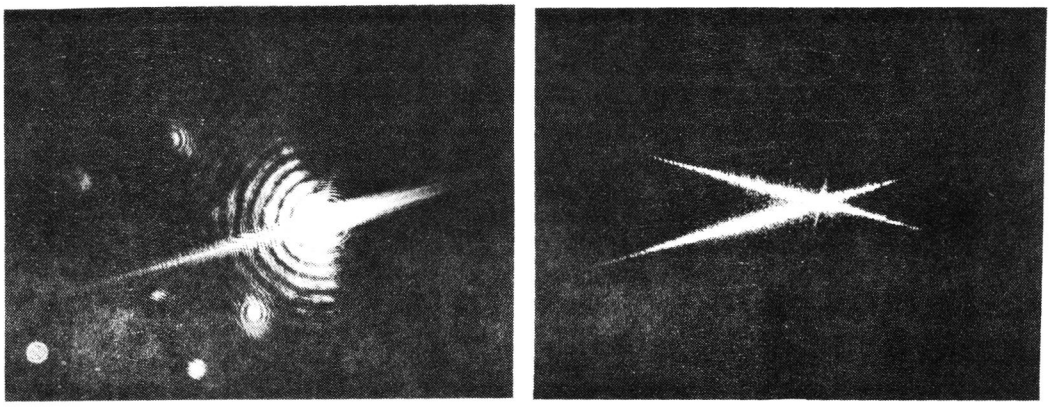


図 2.27　円形の開口（a）とそのフラウンホーファ回折像（b）



(a)　　(b)

図 2.28　光軸がずれた場合の円形開口によるフラウンホーファ回折像
（a）と繊維集合体によるフラウンホーファ回折像（b）

短繊維が分散した樹脂や流体の繊維配向角分布の標準偏差を正確に求めるには，繊維モデルが任意の既知の分布をした基準となる短繊維集合体モデルを用いて，まずモデルの配向角分布と回折強度分布を比較する。もし，既知の繊維配向角分布を有する試料から得られるフラウンホーファ回折強度分布曲線から求めた標準偏差が繊維配向角分布の標準偏差より大きい場合には，回折装置や強度分布測定装置の軸調整やスリットの調整および受光部の径を変えることにより調整する。しかし，これらの方法によっても短繊維集合体モデルの配向角分布が正確に求められない場合には，X線反射プロフィルの形や幅を正確に検討するときに，装置の影響のない純粋な回折像のプロフィルを求めている[25]ように，フーリェ解析により正確な回折

像の強度分布曲線を計算で求める必要がある。その概要を次に示す。

実際に測定される回折像の広がりをh(x), 純粋な求める回折像の広がりをf(x), 装置固有の広がりをg(x)とすると, h(x)はf(x)とg(x)のコンボリューションで一般に次式で表わされる[25]。そのため, 実際に測定される回折像の広がりh

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(y)\,f(x-y)\,dy = \widehat{g(x)\,f(x)} \qquad (2.10)$$

(x)は, 純粋な回折像の広がりf(x)よりも大きくなって現われる。(2.10)式で, h(x), g(x), f(x)のうち2つが正規分布であれば, 他の1つは計算により正規分布として得られる。しかし, 一般にはこれらは種々の分布をしているため簡単には求められない。そのためStokes[26]はフーリェ解析により, 実測回折強度曲線h(x)から装置固有の広がりg(x)を除き, 純粋な回折曲線f(x)を算出しているが, その計算方法はここでは省略する。

2.5 結　　言

短繊維強化プラスチックや短繊維を分散した流体中の繊維配向角分布の測定法を, レーザ光線による短繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像の強度分布曲線から検討する方法を明らかにした。

まず, アスペクト比の大きい矩形開口を繊維モデルとし, 1本の繊維モデルから繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像の強度分布を求め, 回折像の中心から任意の半径での強度分布を数値計算し, 繊維集合体モデルの配向角分布との関係を求めた。つぎに, 繊維の配向角分布が正規分布や一様分布の繊維集合体モデルを作成し, これらのフラウンホーファ回折像の強度分布曲線を測定し, 繊維集合体モデルの配向角分布と比較し検討した。さらに, フラウンホーファ回折像による方法で求めた実際の射出成形品中の繊維配向角分布と, 目視により測定した繊維配向角分布とを比較し, フラウンホーファ回折像による繊維配向角分布の測定法の可能性を明らかにした。

得られた結果を要約すると, つぎの通りである。

(1) アスペクト比Kの繊維モデルの配向角が標準偏差σ，平均値（$\mu=0$）の正規分布をしている集合体の，フラウンホーファ回折像の原点から無次元半径τ上の強度$I_{\tau}^{N}(\theta)$は

$$I_{\tau}^{N}(\theta)=I_{0}\int_{\theta-\sin^{-1}(1/K\tau)}^{\theta+\sin^{-1}(1/K\tau)}\frac{n}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}e^{-\frac{\beta^{2}}{2\sigma^{2}}}\left[\frac{\sin\{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)\}}{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)}\right]^{2}\times\left[\frac{\sin\{\tau\pi\cos(\beta-\theta)\}}{\tau\pi\cos(\beta-\theta)}\right]^{2}$$

で表わされる。

(2) 繊維モデルの配向角が$-\alpha$から$+\alpha$の間で一様に分布している集合体の，フラウンホーファ回折像の原点から無次元半径τの強度$I_{\tau}^{U}(\theta)$は

$$I_{\tau}^{U}(\theta)=I_{0}\int_{\theta-\sin^{-1}(1/K\tau)}^{\theta+\sin^{-1}(1/K\tau)}\frac{n}{2\alpha}\left[\frac{\sin\{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)\}}{K\tau\pi\sin(\beta-\theta)}\right]^{2}\times\left[\frac{\sin\{\tau\pi\cos(\beta-\theta)\}}{\tau\pi\cos(\beta-\theta)}\right]^{2}d\beta$$

で表わされる。

(3) 繊維モデルが正規分布している集合体において，繊維モデルのアスペクト比Kとフラウンホーファ回折像の原点から強度測定点までの無次元半径τとの積が50以上の場合には，回折像の相対強度$T_{K,\sigma,\tau}^{N}(\theta)$曲線は$\exp(-\theta^{2}/2\sigma^{2})$の曲線と計算上一致した。そのため，繊維配向角分布の標準偏差σは$\exp(-1/2)$の値に対応する回転角として求められる。Kとτの積が50以下の場合には，あるKτの値に対してσの値を種々変化させて得られる曲線$G_{K\tau}^{N}(\sigma)$を求めておけば，フラウンホーファ回折像の相対強度曲線$T_{K,\sigma,\tau}^{N}(\theta)$との交点の値から繊維配向角分布の標準偏差$\sigma$が求められる。

(4) 繊維モデルの配向角が一様分布の場合には，Kとτの積が3以上のときに，相

対強度が0.530の点での回転角が一様分布の分布幅αとして計算上求められる。

(5) 繊維モデルが正規分布や一様分布した繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像の相対強度曲線は，計算で求めた回折像の相対強度曲線とほとんど一致していた。

(6) 繊維モデルが規則正しく同一方向に配列している場合には，フラウンホーファ回折像に規則性が現われる。しかし，位置がランダムに同一方向に配列している場合には，フラウンホーファ回折像の形は1本の繊維モデルの場合と同じになり，回折強度は繊維本数とほぼ比例することが実験によりわかった。

(7) 繊維モデルが互いに交わって分布している繊維集合体モデルのフラウンホーファ回折像は，交わりのない集合体モデルの回折像とほぼ同じであり，繊維の配列がランダムであれば回折像は交わりなどの影響はほとんど受けない。

(8) 炭素繊維を分散した低密度ポリエチレン射出成形品の繊維配向角分布はほとんど正規分布であり，フラウンホーファ回折像と目視によって求めた標準偏差を比較したが，それらの値はほとんど一致し，フラウンホーファ回折像により短繊維が分散した系での繊維配向角分布を求めることが可能であることがわかった。また，フラウンホーファ回折像にピークがいくつか存在する場合には，各ピークの面積は繊維本数と比例する。

(9) ゴーストやノイズなどの少ないフラウンホーファ回折像を得るためには，小さい円形の開口などを用いて光軸の調整をすると良い。また，正確なフラウンホーファ回折像の強度分布曲線を得るには，既知の繊維配向角分布をした基準となる繊維集合体モデルを用いて軸調整や受光部の径などを調整する。この方法でも正確な回折像の強度分布曲線が得られないときは，フーリェ解析により正確な回折像の強度分布曲線を計算により求める必要がある。

参　考　文　献

1) M. W. Darlington and P. L. McGinley ; J. Mat. Sci., 10, 906(1975)

2) S. Wu ; Poly. Eng. Sci., 19, 9, 638(1979)

3) P. F. Bright, R. J. Crowson and M. J. Folkes ; J. Mat. Sci., 13, 2497(1978)

4) D. McNally ; Polym. - Plast. Technol. Eng., 8, 2, 101(1977)

5) M. J. Owen, D. H. Thomas and M. S. Found ; Reinf. Plast. Congr., 18, 137(1978)

6) M. W. Darlington and P. L. McGinley ; Department of Materials Report, March (1974)

7) 吉田邦夫, グナルソ・ブティマン, 岡山芳道, 北尾敏男 ; 繊維学会誌, 31, 8, 335(1975)

8) L. Kacir, M. Narkis and O. Ishai ; Poly. Eng. Sci., 15, 7, 525(1975)

9) K. N. Murty and G. F. Modlen ; Poly. Eng. Sci., 17, 12, 848(1977)

10) J. P. Bell ; J. Comp. Mat., 3, 244(1969)

11) G. F. Modlen ; J. Mat. Sci., 4, 283(1969)

12) R. E. Prud'Homme, N. V. Hien, J. Noah and R. H. Marchessault ; J. App. Polym. Sci., 19, 2609(1975)

13) 宇野　稔 ; 繊維機械学会誌, 28, 12, 678(1975)

14) 丸谷洋二, 田中恒久 ; 繊維機械学会誌, 28, 12, 27(1975)

15) T. Amano ; Kollid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere. Band 206・Heft 2 (1965)

16) A. J. Perry, B. Ineicen and B. Eliasson ; J. Mat. Sci., 9, 1376(1974)

17）鳥羽栄治，松倉　晋；繊維学会誌，３３，９，４３３（１９７７）
18）秋山隆一，久世栄一；繊維学会誌，３３，９，４４０（１９７７）
19）馬越芳子，石川欣造；繊維学会誌，３１，１０，４６４（１９７５）
20）馬越芳子，石川欣造；繊維学会誌，３２，３，１０８（１９７６）
21）馬越芳子，石川欣造；繊維学会誌，３３，９，４２７（１９７７）
22）中井祥夫，福田国彌，加藤利三共訳；ロッシ光学（上），Ｐ．２３０，
吉岡書店（１９６７）
23）草川　徹，横田英嗣訳；光学の原理Ⅱ，Ｐ．６０７，東海大学出版会（１９７５）
24）自念栄一，鈴木　恵，永田雅一，中村　信；高分子化学，２７，３０６，
６８９（１９７０）
25）桜田一郎監訳；高分子のＸ線回折（下），Ｐ．４４０，化学同人（１９７３）
26）A. R. Stokes ; Proc. Phys. Soc. (London) A６１，３８２（１９４８）

第3章　平行平板スリット内流れにおける繊維配向

3．1 緒　　言

短繊維を強化材として充てんした溶融高分子の射出成形や押出成形では，繊維は流路や金型内で配向し，成形品は繊維の配向により諸性質に方向性を持つ[1)〜3)]。また，熱硬化性樹脂を用いたＢＭＣの射出成形においても，短繊維の配向により成形品は成形収縮率や機械的強度などの性質に方向性を持ち，不均質な成形品が得られることが報告されている[4)〜5)]。成形品の繊維配向の測定や，繊維配向と成形品の機械的性質については多くの研究が行われている[6)〜8)]。射出成形のような流動成形過程では，短繊維は流路や金型の形状，繊維含有高分子流体の剪断速度，繊維の形状や繊維含有率などにより影響を受け，複雑な挙動をする。

短繊維を分散した高分子液体（溶液や融液）の粘度や流動特性は，粒子を分散した液体[9)〜11)]に比べると複雑であるが，工業的な重要性から多くの研究が行われている[12)〜14)]。短繊維を分散した高分子液体の一般的な傾向としては，球状粒子分散液体と比べると，粘度は繊維の体積分率の増加にともなって急激に増加し，アスペクト比が大きくなるとその傾向が増す。また，非ニュートン性は，短繊維の体積分率やアスペクト比が大きくなると著しくなる。

流体中に短繊維を分散し，流路内を流動させ，流れ方向に短繊維を配向させて，一定方向に配列した繊維マットを作る流体力学的方法がある。短繊維を流体中で配列する方法に関する研究として，Kacir[15)〜16)]や Murtyら[17)]はグリセリン液中に短繊維を分散させ，繊維長，体積分率および分散媒の粘度がスリット形縮小路内での繊維配列に及ぼす影響を，着色したトレーサ繊維を用いて検討している。また，Calow[18)]や中村ら[19)]は，タンクとスリット形管路からなる装置内での短繊維の運動について報告しているが，いずれも使用している流体はニュートン流体である。エポキシ樹脂に短繊維を分散した流体を用いて，Bell[20)]はレオメータの縮小部の前後でプラグ流れが生じることを指摘し，また，Lee[21)]は円錐形縮小管内の伸張流動が繊維の配向に大きな役割を果たすことを報告している。しかし，いずれの研究に

おいても繊維配向の評価は定性的であり，定量的には短繊維を個々に直接観察するか，あるいはトレーサ繊維を用いて評価しているだけで，各流路内での繊維配向を定量的に扱った研究は少ない。

本章では，射出成形や押出成形の流路や金型で，最も基本的な形状である間隙の小さい平行平板スリット内での繊維配向を，短繊維が分散した高分子水溶液を用いて明らかにし，金型内流れでの繊維配向の基礎的研究を行うこととした。

3．2 繊維挙動撮影装置および実験方法

スリット内での繊維挙動を撮影する装置を図 3.1 に示す。短繊維を分散した流体は，4のマイクロチューブ定量ポンプから送り出され，5のトラップでさらに脈流をなくしたあと，1のスリットへ送られる。スリットは透明のポリ塩化ビニル樹脂を使用し，3の光源からの光はスリットの間隙方向に平行に照射され，流量を種々変えたときの繊維挙動を，2のカメラを用いて等倍で撮影している。6はスターラでトラップ中の短繊維を均一に分散させている。溶液の流量は定量ポンプで，0.05 cc/sec. から 0.50 cc/sec. まで可変した。また，スリット内での流体の流線模様は，直径が約40 μm のアルミニュウム粉末を流体に分散させ，図 3.1 の装置を用いて撮影した。繊維挙動を撮影する場合には，ASA32

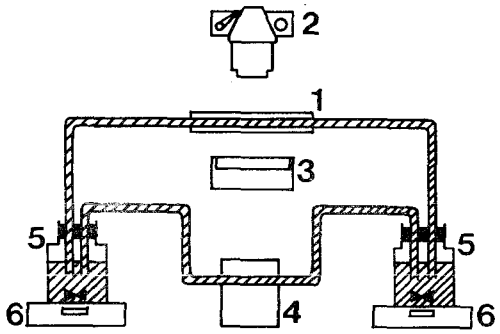


図 3.1　繊維挙動撮影装置

1；スリット　，　2；カメラ
3；光　源　，　4；定量ポンプ
5；トラップ　，　6；スターラ

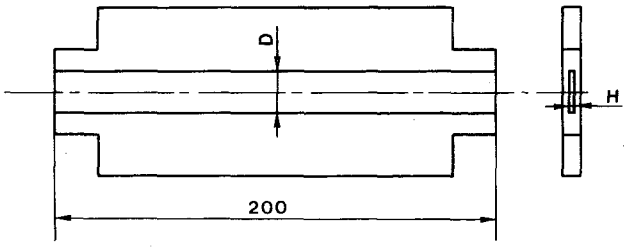


図 3.2　平行平板スリット

のミニコピーフィルムを用い，流線模様を撮影するときにはASA400のフィルムを使用した。

高分子流体は，水溶性熱可塑性樹脂であるポリエチレンオキサイド（平均分子量100万）の2wt%と4wt%の水溶液を使用し，ニュートン流体は粘度が約8ポアズの水アメを溶かした水溶液を用いた。

短繊維は，直径が10μmで，カット長1mmの炭素繊維を使用し，水溶液と繊維は体積比で100：0.1の割合で混合した。実験はすべて25℃にて行っている。

表3.1　平行平板スリットの種類

スリット幅 D (mm)	スリット間隙 H (mm)
5, 10, 20, 30	0.5, 1

平行平板スリットの形状と種類を図3.2と表3.1に示す。平行平板スリットは，スリット間隙（H）と幅（D）を変えて8種類作成した。

3．3　繊維配向角分布測定法および評価法

スリット各部での繊維配向角分布の測定は，図3.1の実験装置を用いて撮影したネガフィルムのフラウンホーファ回折像の強度分布曲線から行った。フラウンホーファ回折装置，強度分布測定装置およびそれらの測定方法に関しては，第2章で詳細に報告しているため省略する。ここでは，得られた繊維配向角分布曲線から，スリット各部での繊維配向角を評価する方法について記す。

スリット各部でのフラウンホーファ回折像から得られる繊維配向角分布曲線は正規分布曲線と良く一致していたため，繊維配向角分布曲線の標準偏差σを求めて，スリット各部での繊維配向を評価した。しかし，スリットの場所によっては，繊維配向角分布曲線のピークは1つとは限らず，

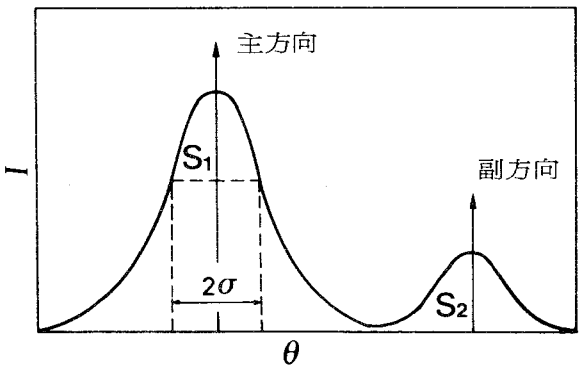


図3.3　フラウンホーファ回折像の強度分布曲線

2つ以上存在する場合や，短繊維がピーク以外の場所にちらばって分布している場合もあった。そのため，例えば，図3.3に示すように，繊維本数がより多く存在している分布の主軸方向を主方向，それ以外の分布の軸方向を副方向とし，2.4.3項で報告したように，強度分布曲線の各ピークの面積（S_1，S_2）は繊維本数と比例関係にあるため，全繊維本数に対する主方向の分布内に存在する繊維本数の比を繊維本数割合 W_f として，W_f を（3.1）式から分布曲線の面積比として求めた。

$$W_f = S_1 / (S_1 + S_2) \qquad (3.1)$$

繊維本数割合 W_f は，流体の流れ方向と異なる方向に分布している短繊維の割合を評価するのに役立ち，標準偏差 σ とともに，繊維配向の評価に用いた。

3．4 高分子水溶液の流動特性

円錐平板粘度計を用いて，25℃にて測定した高分子水溶液の流動特性を図3.4に

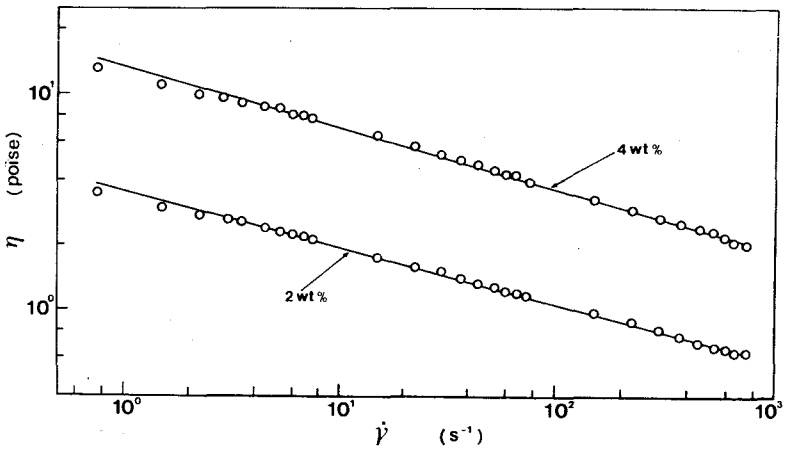


図3.4　高分子水溶液の流動特性

示す。剪断速度（$\dot{\gamma}$）が小さい所を除けば，各濃度の液体とも指数則流体とみなすことができる。図3.4から求めた2wt％と4wt％の高分子水溶液の実験式を各各（3.2），（3.3）式に示す。

$$\eta_2 = 3.60\,\dot{\gamma}^{-0.2773} \qquad (3.2)$$

$$n = 0.7226$$

$$\eta_4 = 10.35\,\dot{\gamma}^{-0.2867} \qquad (3.3)$$

$$n = 0.7133$$

高分子水溶液が指数則流体として近似できることから，各スリットの壁面での剪断速度（$\dot{\gamma}_W$）は（3.4）式から算出した。

$$\dot{\gamma}_W = \left(\frac{3n+1}{4n}\right)\frac{6Q}{D \cdot H^2} \qquad (3.4)$$

ここで，Qは単位時間当たりの流量，Dはスリット幅，Hはスリット間隙である。

3．5 平行平板スリット内流れにおける繊維配向

平行平板スリット内流れは種々の形状をしたスリット内流れの基礎である。短繊維を分散した高分子水溶液のスリット間隙や幅の異なる平行平板スリット内流れでの繊維配向を，ニュートン流体を用いた場合と比較して明らかにする。

3．5．1 流線模様

スリット幅が10 mmでスリット間隙が0.5 mm の平行平板スリットの中心付近の流線模様を図3.5に示す。流線模様は壁面と平行で，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんど見られなかった。スリットの種類，水溶液の濃度や流量を変えても，流線模様は壁面と平行でほとんど変化はなかった。図中の矢印は流体の流れ方向を示す。

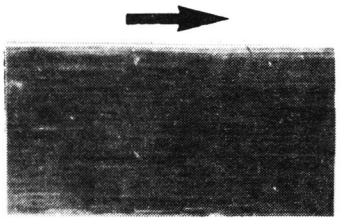


図3.5　流線模様

3．5．2 スリット内での繊維配向

平行平板スリットでは，図3.6に示すように流体の流れ方向をx，スリットの幅をy，間隙方向をzとする。各スリットのxy平面での繊維配向角分布の測定装置と測定範囲を図3.7に示す。スリット内の正方形の枠は測定位置と測定範囲を示している。測定部の正方形の一辺の長さは，5 mm 幅のスリットでは5 mm で，その他のスリットでは9 mm とした。繊維配向角分布の測定は，流体の流れ方向（x軸方向）に10 mm 間隔で行うが，スリット幅が20 mm と30 mm のスリットでは，幅方向（y軸方向）にも測定した。各スリットのxy平面の繊維配向を，スリット間隙（H），水溶液の種類や濃度および流量を変えて測定した。

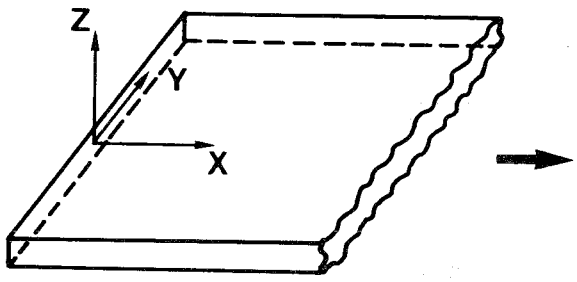


図3.6　平行平板スリット内での座標軸

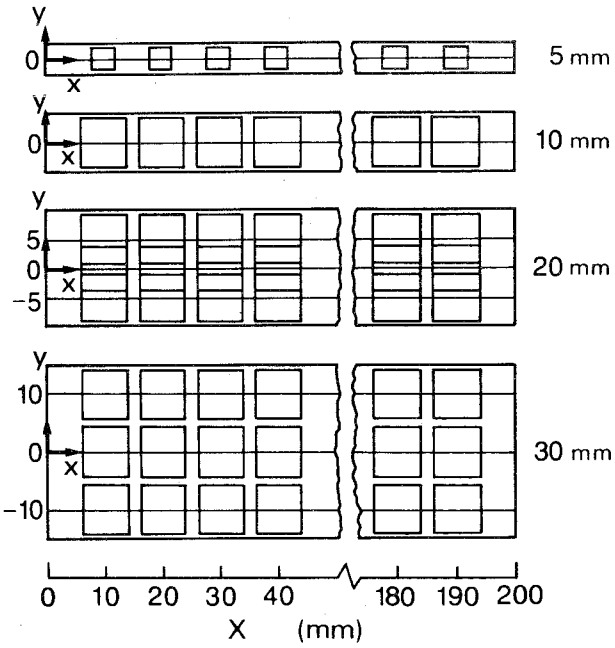


図3.7　繊維配向角分布の測定位置と測定範囲

短繊維が分散した高分子水溶液の，平行平板スリット内各部での繊維配向角分布の標準偏差σと繊維本数割合W_fを図3.8と図3.9に示す。スリットは間隙が0.5 mm で

幅が１０mm の平行平板スリットで，２wt％の高分子水溶液を用い，流量は0.１５cc/sec.である。繊維配向角分布は同一場所でそれぞれ５回測定しているが，xが０mm から４０mm の流入部付近と，１６０mm から２００mm の流出部付近では，流体の流入および流出の影響により繊維の配向は乱れ，ばらつきも大きい。しかし，xが４０mm から１６０mmの間では，標準偏差σや繊維本数割合 W_f は安定で，ほぼ一定値を示している。以後，標準偏差や繊維本数割合が安定している領域を安定域と呼ぶ。

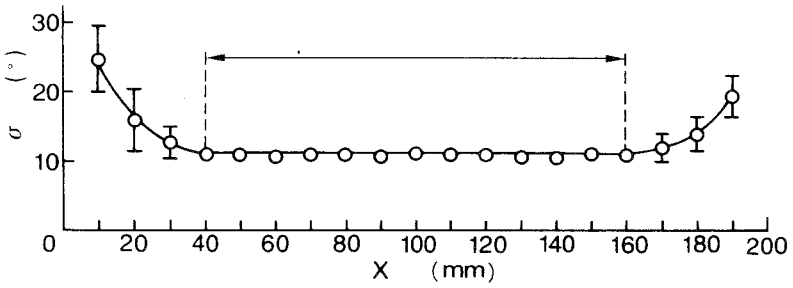


図 3.8　スリット各部での繊維配向角分布の標準偏差
（スリット幅 10mm，スリット間隙 0.5mm のスリット）

安定域での繊維配向角分布の標準偏差σと繊維本数割合 W_f の値は，スリットの種類や流量により異なるが，繊維の配向はxが５０mm から１５０mm の間で安定

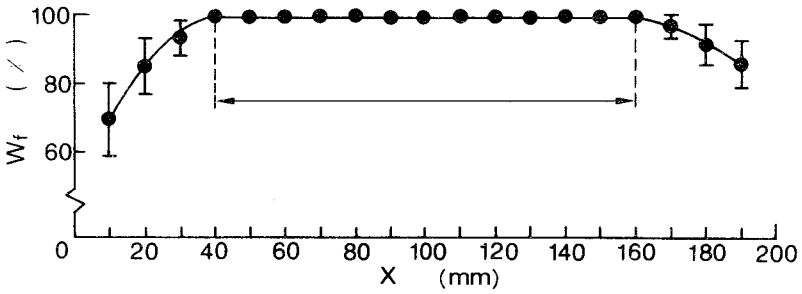


図 3.9　スリット各部での繊維本数割合
（スリット幅 10mm，スリット間隙 0.5mm のスリット）

であった。また，スリット幅が２０mm と３０mm のスリットでは，幅方向（ｙ軸方向）にも繊維配向を測定している。スリットの流入部（ｘ＝０～５０mm ）と流出部（ ｘ＝１５０～２００mm)付近では，スリットの幅方向での繊維配向の乱れは大きいが，ｘが５０mm から１５０mm の領域では，幅方向の繊維配向の乱れやばらつきはほとんどなく，幅方向における繊維配向角分布の違いは見られなかった。このことから，平行平板スリットの繊維配向角分布の評価は，スリット中央部の測定点（ｘ，ｙ）＝（１００，０）での値を用いて行うこととした。

スリット間隙が等しく，スリット幅の異なる種々の平行平板スリットを用い，流量を調節して各スリットの壁面での剪断速度を等しくしたときの，各スリットの（１００，０）点での繊維配向分布の標準偏差σと繊維本数割合 W_f をそれぞれ図 3.10 と図 3.11 に示す。

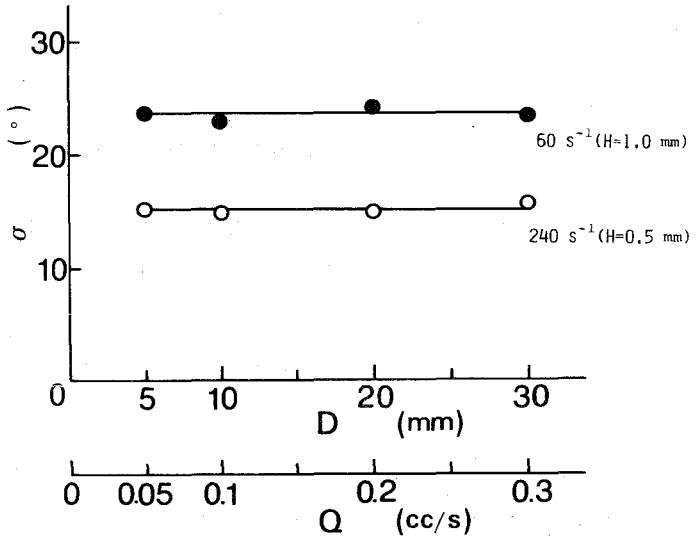


図 3.10 壁面での剪断速度が等しいときの繊維配向角分布の標準偏差

図中の白丸（○）はスリット間隙が 0.5 mm で，黒丸（●）はスリット間隙が 1 mm のスリットを使用したときの値であり，壁面での剪断速度はそれぞれ２４０sec.$^{-1}$ と６０sec.$^{-1}$ である。スリット間隙が等しく，幅の異なるスリットでは，壁面での剪断速度が等しければ，スリット幅に影響されず（１００，０）点での繊維配向分布はほとんど同じになることがわかる。

種々の平行平板スリットを用い，流量を変えて壁面での剪断速度を種々変化させたときの各スリットの（１００，０）点での繊維配向角分布の標準偏差σと繊維本数割合 W_f を図 3.12 と図 3.13 に示す。図中の白丸（○）はスリット間隙が 0.5

mm で，黒丸（●）は 1 mm のときの値である。標準偏差 σ は壁面での剪断速度の増加とともに小さくなり，繊維配向は良くなっている。スリット間隙が 0.5 mm と 1 mm の平行平板スリットにおいて，標準偏差 σ は多少のばらつきはあるが，壁面での剪断速度の関数として（3.5）式に示す実験式で表わされる。

$$\sigma = -14 \log(\dot{\gamma}_W) + 48 \qquad (3.5)$$

繊維本数割合 W_f は壁面での剪断速度とともに増加し，種々の方向に配列していた短繊維は

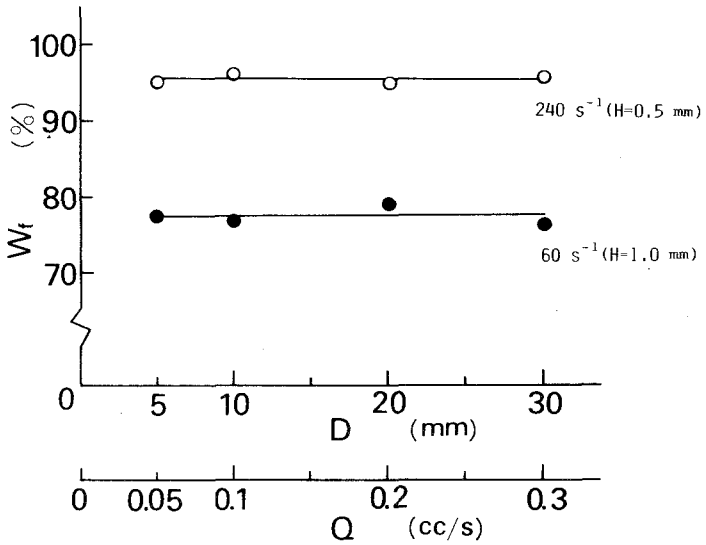


図 3.11 壁面での剪断速度が等しいときの繊維本数割合

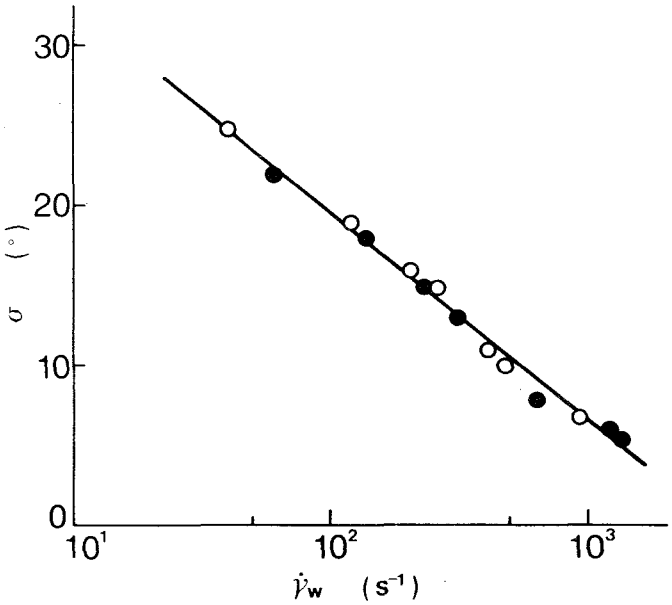


図 3.12 壁面での剪断速度と繊維配向角分布の標準偏差との関係

主軸方向に配列してくるが，約400 sec.$^{-1}$でほとんどすべての繊維は主軸方向の分布内に配列してくる。壁面での剪断速度が400 sec.$^{-1}$までの繊維本数割合W_fは，スリット間隙が0.5 mmと1 mmの平行平板スリットとも壁面での剪断速度の関数として，次に示す実験式で表わされる。

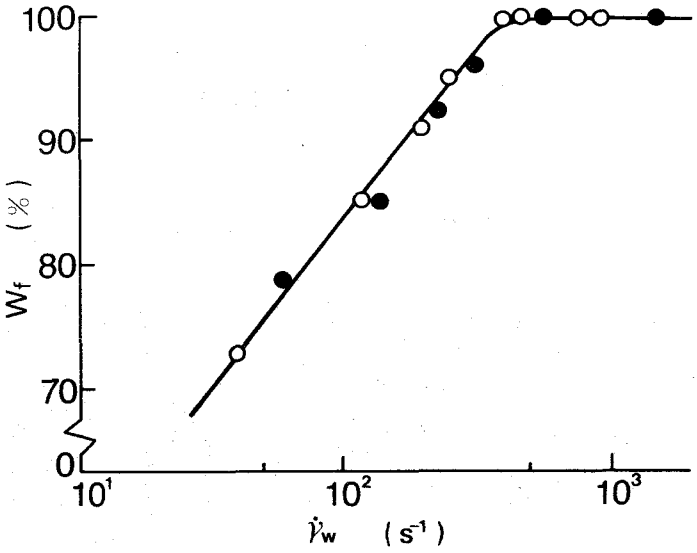


図3.13 壁面での剪断速度と繊維本数割合との関係

$$W_f = 27 \log(\dot{\gamma}_w) + 30 \qquad (3.6)$$

ただし，　$\dot{\gamma}_w < 400$

濃度が4 wt%の高分子水溶液を用いた場合も，平行平板スリット内流れでの繊維配向角分布の標準偏差σと繊維本数割合W_fは，壁面での剪断速度（$\dot{\gamma}_w$）の関数として，濃度が2 wt%の場合と同様にそれぞれ（3.5）と（3.6）の実験式で表わされた。これらのことから，間隙の小さい平行平板スリット内流れにおいて，高分子水溶液に分散した繊維の配向は流れが安定した定常流れでは，壁面での剪断速度の関数として表わされることが実験からわかった。

短繊維を分散したニュートン流体の平行平板スリット内流れでの繊維配向は図3.14と図3.15に示すフラウンホーファ回折像からもわかるように，高分子流体の場合とほぼ一致している。各フラウンホーファ回折像はスリット間隙が0.5 mmで

スリット幅が１０mm の平行平板スリットを用い，壁面での剪断速度がそれぞれ５００ sec.$^{-1}$ と等しいときの回折像である。ニュートン流体を使用した場合も，間隙の小さい平行平板スリット内での繊維配向角分布の標準偏差 σ と繊維本数割合 W_f は，壁面での剪断速度の関数として，多少のばらつきはあるが実験式（3.5)と(3.6)で表わされた。このように,間隙の小さい平行平板スリット内流れで，流れが安定した定常流れでの繊維配向は，高分子流体とニュートン流体による差はほとんど見られず，繊維配向角分布の標準偏差 σ や繊維本数割合 W_f は壁面での剪断速度 $\dot{\gamma}_W$ の関数として表わされることがわかった。

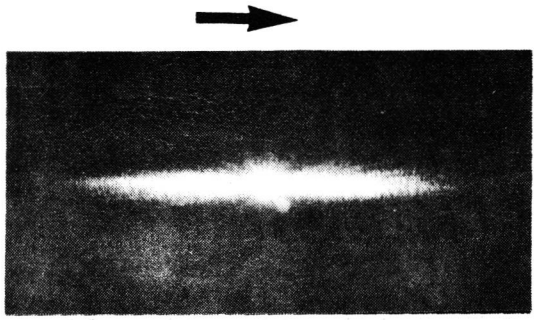


図 3.14 高分子流体中に分散した繊維のスリット内におけるフラウンホーファ回折像
（$\dot{\gamma}_W = 500 \mathrm{sec}^{-1}$）

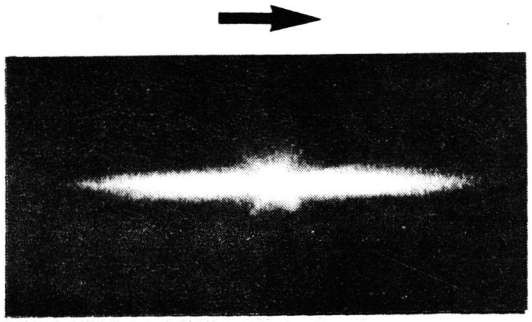


図 3.15 ニュートン流体中に分散した繊維のスリット内流れにおけるフラウンホーファ回折像
（$\dot{\gamma}_W = 500 \mathrm{sec}^{-1}$）

しかし，静止流体中を線状体が落下するときの線状体の最終の姿勢は，高分子流体の場合には垂直に，ニュートン流体の場合には水平になり，流体による線状体の落下姿勢が異なることが知られている[22)〜23)]。これは，線状体が静止流体中を落下する場合には，線状体が静止流体を乱しながら落下するため，静止した高分子流体では糸まり状の分子鎖が変形し，線状体まわりの流体に非ニュートン性が現われ，線状体に影響を及ぼすと考えられる。しかし，短繊維を分散した高分子流体の平行平板スリットの定常流れでは，流体中の分子鎖のからみ合いは時時刻刻と変化しているが，分子の網目構造[24)〜26)] の形態はほとんど変化せず，しかも短繊維は流体に保持された状態で流体とともに流れていると考えられる。それゆえ，短繊維の流

動により分子の網目構造はほとんど影響されず，流体の非ニュートン性が増減しないため，定常流れではニュートン流体と同じような繊維配向で流動すると考えられる。そのため，高分子流体に保持された状態で流動していた繊維が外力を受けて流動方向を変える場合や，高分子流体の流速や流れ方向が変わり，流体自体が変化を受ける場合には，短繊維のまわりの分子鎖のからみ合いによる網目構造が変化し，流体の非ニュートン性が増減するため，ニュートン流体と違った繊維挙動をすると考えられる。

3.6 結　言

短繊維を分散した高分子水溶液の平行平板スリット流れにおける繊維配向を，スリット間隙やスリット幅，高分子水溶液の濃度および流量を変え，ニュートン流体の場合と比較して明らかにした。

得られた結果を要約するとつぎの通りである。

(1) 平行平板スリット内流れでは，流線模様は高分子流体とニュートン流体ともにほとんど同じであり，壁面に平行であった。

(2) 平行平板スリット内での繊維配向は，スリット流入部および流出部で乱れるが，スリット中央部では安定であり，繊維配向が安定な領域では，スリットの幅方向の繊維配向はほとんど同じであった。

(3) 繊維配向が安定な領域での繊維配向分布の標準偏差σは，スリット幅やスリット間隙および流体の濃度にはほとんど影響されず，壁面での剪断速度（$\dot{\gamma}_W$）の関数として，次に示す実験式で表わされた。

$$\sigma = -14 \log (\dot{\gamma}_W) + 48$$

壁面での剪断速度が大きくなると，繊維配向は良くなり，標準偏差σは小さくなった。

(4) 繊維本数割合 W_f も標準偏差の場合と同様に壁面での剪断速度（$\dot{\gamma}_W$）の関数

となり，壁面での剪断速度が400 sec^{-1} までは，次の実験式で表わされた。

$$W_f = 27 \log(\dot{\gamma}_W) + 30$$

壁面での剪断速度が400 sec^{-1} 以上になると，ほとんどすべての繊維は主方向の繊維配向角分布内に存在することがわかった。

(5) ニュートン流体の場合は，平行平板スリット内の流れが安定している領域での繊維配向は，高分子流体の場合とほとんど同じであった。繊維配向角分布の標準偏差 σ や繊維本数割合 W_f は壁面での剪断速度の関数として，高分子流体で得られた各実験式で表わされ，平行平板スリット内の定常流れでの繊維配向は，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんどないことがわかった。

参　考　文　献

1) M.W.Darlington, P.L. McGinley and G.R.Smith ; J.Mat. Sci., 11, 877 (1976)

2) D.McNally ; Polym−Plast. Technol. Eng., 8, 2, 101 (1977)

3) M.J.Owen, D.H.Thomas and M.S.Found ; Reinf. Plast. Congr., 18, 137 (1978)

4) S.H.Bauer ; 29 th. Annual Tech. Conf., Reinf. Plast/Comp. Institute, 1974, Section 15−B

5) S.H.Bauer ; 31 th. Annual Tech. Conf., Reinf. Plast/Comp. Institute, 1976, Section 13−A

6) G.W.Weidmann and R.M.Ogorkiewicz ; J.Mat.Sci., 9, 193 (1974)

7) J.K.Lee ; Poly. Eng. Sci., 8, 3, 195 (1968)

8) 鈴木　恵，自念栄一，岩本正治；高分子論文集，31，5，314 (1974)

9) T.B.Lewis and L.E.Nielsen ; Trans. Soc. Rheol., 12:3, 421 (1968)
10) M.Mooney ; J.Colloid Sci., 6, 162 (1951)
11) 藤本徳栄, 川崎健次, 冨川昌美；高分子論文集, 34, 6, 441 (1977)
12) R.J.Crowson, M.J. Folkes and P.F.Bright ; Poly. Eng. Sci., 20, 14, 925 (1980)
13) A.Attansis, U.Bernini, P.Galloppo and G.Segre ; Trans.Soc. Reol., 16:1, 147 (1972)
14) M.A.Nawab, and S.G.Mason ; J.Phys. Chem., 62, 1248 (1958)
15) L.Kacir, M.Narkis and O.Ishai ; Poly. Eng. Sci., 15, 7, 525 (1975)
16) L.Kacir, M.Narkis and O.Ishai ; Poly.Eng.Sci., 15, 7, 532 (1975)
17) K.N.Murty and G.F.Modlen ; Poly.Eng. Sci., 17, 12, 848 (1977)
18) C.A.Calow and R.J.Wakelin ; J.Inst.Metals. 96, 147, (1968)
19) 中村克孝, 美馬源太郎；日本複合材料学会誌, 2, 2, 80 (1976)
20) J.P.Bell ; J.Comp. Mat., 3, 244 (1969)
21) W.K.Lee and H.H.George ; Poly.Eng. Sci., 18, 2, 146 (1978)
22) 堀川　明, 千葉訓司, 西谷憲三, 上島　徹；繊維機械学会論文集, 34, 6, 109 (1981)
23) 堀川　明, 千葉訓司；未発表
24) 土井正男；高分子, 27, 9, 646 (1978)
25) 高野　庸；高分子, 29, 10, 770 (1980)
26) 尾崎邦宏；高分子, 31, 10, 947 (1982)

第4章　拡大および縮小スリット内流れにおける繊維配向

4．1 緒　　言

短繊維を分散した熱可塑性樹脂の射出成形や，ＢＭＣの成形では，かなり複雑な形状の短繊維強化プラスチックが作られている。そのため，射出成形で用いる流路や金型は，スリット形の平行平板を基本に，拡大や縮小などが種々組み合わされた複雑な形状を呈している。

縮小流れでの繊維配向は，円錐形縮小管やスリット形縮小管を用いて短繊維が一定方向に配列した繊維マットの作成に利用され，縮小流れでの繊維挙動は定性的には良く知られている[1)〜3)]。しかし，拡大流れに関する研究は，Taggart ら[4)]が流れ方向と９０°に向いた繊維配向が生じることを報告しているが，拡大流れでの繊維挙動に関する研究は少ない。

短繊維を含まない高分子流体の縮小スリット内流れについては，中村ら[5)〜6)]はポリエチレン融液のスリット流入部で，不規則な不安定流れの発生を報告している。その他，スリット流入域における高分子液体の流れに関する研究は多い[7)〜8)]。

静止流体中や流動流体中の線状体の運動については，千葉[9)〜12)]や塩見ら[13)〜14)]により理論的にも実験的にも明らかにされているが，いずれの場合も流体はニュートン流体である。短繊維を分散した高分子流体の拡大や縮小流れでは，流体の流れ自体が不安定となるため，短繊維の運動は安定な流れ中の場合と比べると複雑になり，繊維挙動を理論的に解析することは困難である。

本研究では，短繊維を分散した高分子水溶液の急激な拡大および縮小流れでの繊維配向を，ニュートン流体の場合と比較して，実験的に明らかにすることとした。

4．2 実験装置および実験方法

短繊維を分散した流体やスリット内での繊維挙動を撮影する装置は，第３章で使用したものと同じであり，3.2節に示している。

拡大・縮小スリットの形状と種類を図4.1と表4.1に示す。拡大・縮小スリット

では幅の広いスリット管を３０mm と一定にして，幅の狭いスリット管（Ｄ）の幅を変えて，スリット比が５：３０，１０：３０，２０：３０（以下，それぞれ５／３０，１０／３０，２０／３０スリットと表示する）のスリットを作成した。また，スリット間隙（Ｈ）は，平行平板スリットの場合と同様に，0.5 mm と 1 mm とした。

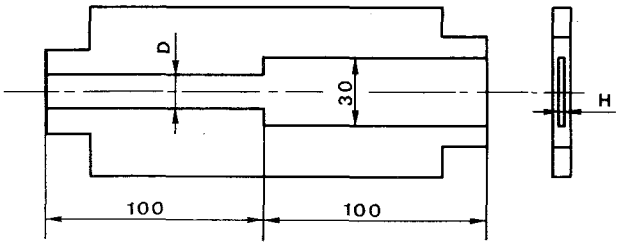


図 4.1　拡大・縮小スリット

拡大・縮小スリット内での拡大流れと縮小流れは同一のスリットを用いて，第３章の図 3.1 に示したマイクロチューブ定量ポンプを逆転させて得ている。

表 4.1　拡大・縮小スリットの種類

スリット幅 D（mm）	スリット間隙 H（mm）
5，１０，２０	0.5，1

繊維配向角分布の測定法および評価法は，第３章の 3.3 節と同じであるため，ここでは省略する。

４．３　拡大および縮小流れにおける繊維配向

短繊維を分散した流体が拡大・縮小スリット内を流れる場合，短繊維は拡大部および縮小部付近で姿勢を変えて流れる。短繊維を分散した高分子水溶液の拡大および縮小流れでの繊維挙動を，スリット比や流量などを変え，ニュートン流体を用いた場合と比較して明らかにする。拡大･縮小スリットではスリット各部での繊維配向角分布を検討するとともに，拡大部および縮小部では個々の繊維挙動についても明らかにしている。

４．３．１　流線模様

スリット間隙が 0.5 mm である１０／３０スリットの拡大流れおよび縮小流れでの流線模様をそれぞれ図 4.2 と図 4.3 に示す。拡大流れおよび縮小流れにおいて，高分子流体とニュートン流体の流線模様はほとんど同じであり，流れはスリットの角

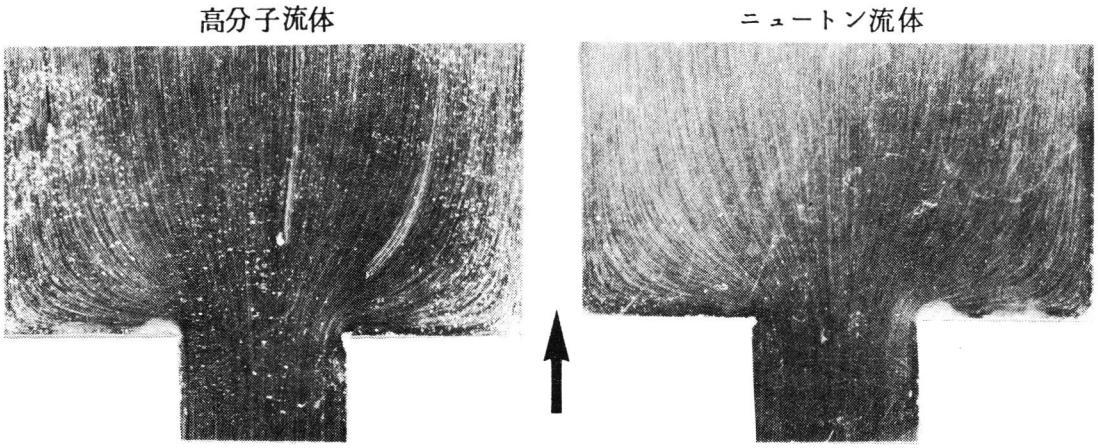


図 4.2　拡大流れでの流線模様

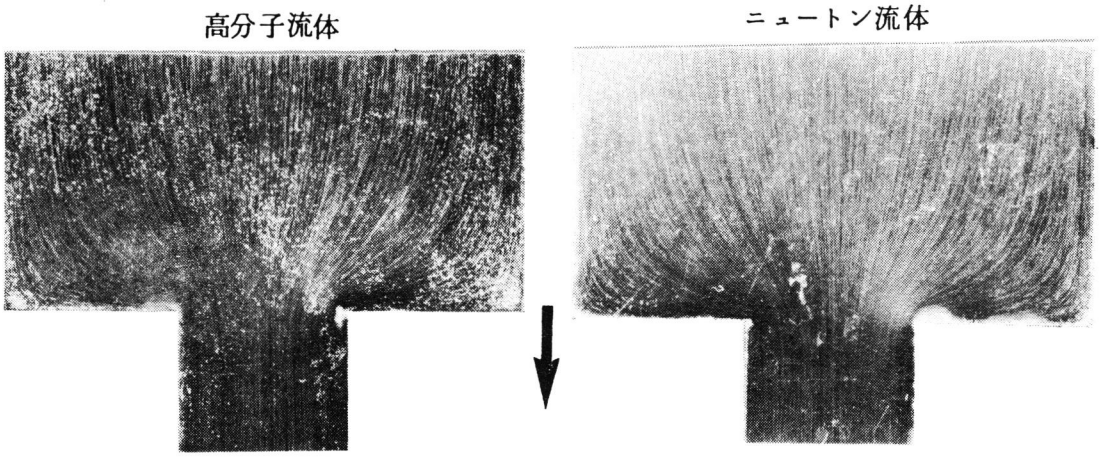


図 4.3　縮小流れでの流線模様

部まで及んでいる。図 4.4 に高分子流体の拡大流れと縮小流れの流線模様の模式図を示す。拡大流れでは拡大部で流線模様は広がり拡大され，縮小部では縮小されているが，拡大流れと縮小流れで流線模様の違いはほとんどなく，循環流れや不安定な流れも観察されていない。

スリット比を変えた場合には拡大または縮小の割合が異なるため，流線模様の形状は変化するが，5／30スリットや20／30スリットでも10／30スリットの場合と同様に，高分子流体やニュートン流体および拡大流れや縮小流れによる流線模様の違いはほとんど見られなかった。これらのことから，間隙が小さい拡大・縮小スリット内流

れの流線模様は，拡大および縮小流れによる違いはほとんどなく，また高分子流体とニュートン流体による差もほとんどないことがわかった。

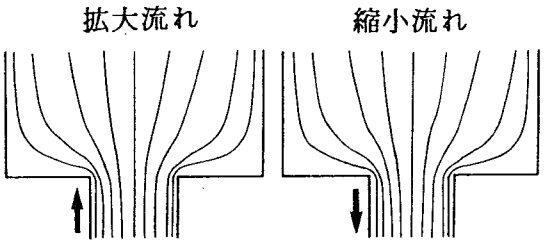


図 4.4　高分子流体の流線模様

4．3．2 スリット内各部での繊維配向

拡大・縮小スリットの繊維配向測定位置と，繊維配向角分布の標準偏差 σ および繊維本数割合 W_f との関係を図 4.5 に示す。スリットの拡大部または縮小部の中心を原点 0 とし，平行平板スリットの場合と同様にスリットの中心軸を x 軸とする。拡大流れおよび縮小流れの方向に関係なく，スリット幅の広い方向を正，狭い方向を負とする。グラフの横軸はスリットの x 軸とし，正方形の枠は測定範囲を示し，測定部の中心を測定点とする。5／30 スリットの 5 mm 幅のスリット内では，測定部の正方形の一辺の長さは 5 mm で，それ以外のスリットでは測定部の正方形の一辺の長さは 9 mm とした。破線で示した枠内でも測定を行っているが，x が 0 mm から 40 mm の場所以外では，破線で示した測定場所の繊維配向角分布は，平行平板スリットの場合と同様に x 軸上での繊維配向角分布とほとんど同じであった。ここでは，スリット各部での繊維配向角分布の測定は x 軸上の位置で行い，拡大部または縮小部付近（x ＝−20～40 mm）での繊維挙動については，4.3.3 項で検討する。x 軸上の各測定点での繊維配向角分布の

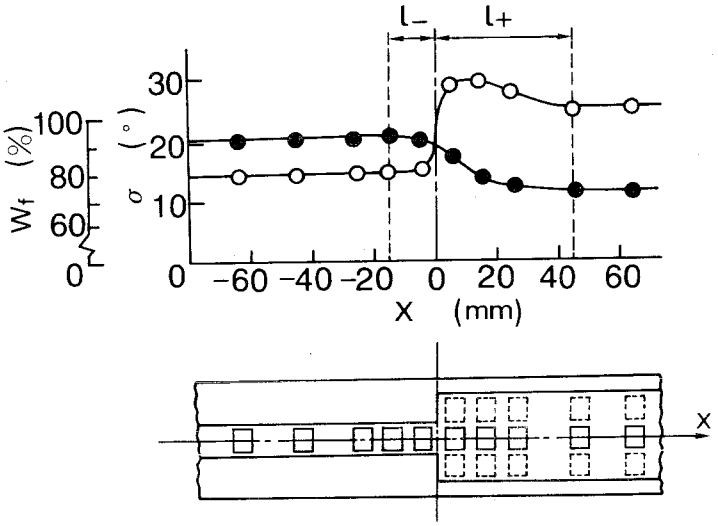


図 4.5　繊維配向角分布の測定位置と標準偏差および繊維本数割合の関係

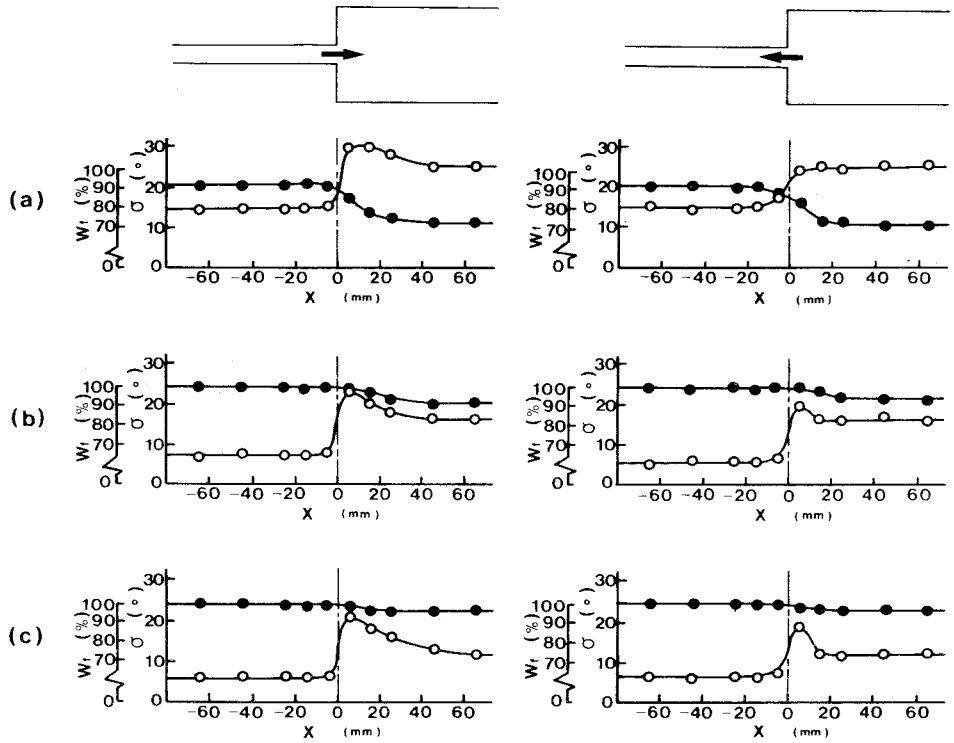


図 4.6　5/30スリット内流れでの繊維配向
a). 0.05cc/sec.,　b). 0.23cc/sec.,　c). 0.43cc/sec.
○；標準偏差σ，●；繊維本数割合W_f

標準偏差σは図中で白丸（○），繊維本数割合 W_f は黒丸（●）で示した。

拡大および縮小流れにおける5／30，10／30および20／30スリット内での繊維配向分布の標準偏差σと繊維本数割合 W_f をそれぞれ図4.6，図4.7および図4.8に示す。各スリットのスリット間隙は0.5 mm で，濃度が2 wt%の高分子水溶液を用いている。各スリットとも流量を5種類変えて実験を行っているが，ここではそのうちの3種類を示す。図中の（a），（b），（c）はそれぞれ流量が0.05 cc/sec.，0.23 cc/sec.，0.43 cc/sec. である。拡大流れでは，各スリットとも拡大部前まで繊維配向の乱れはほとんどなく，繊維配向は安定している。しかし，拡大部を過ぎた所で繊維配向は変動し，下流ではふたたび安定になる。縮小流れでは，各スリットとも縮小部手前から繊維配向は乱れ，繊維配向の変動は縮小部

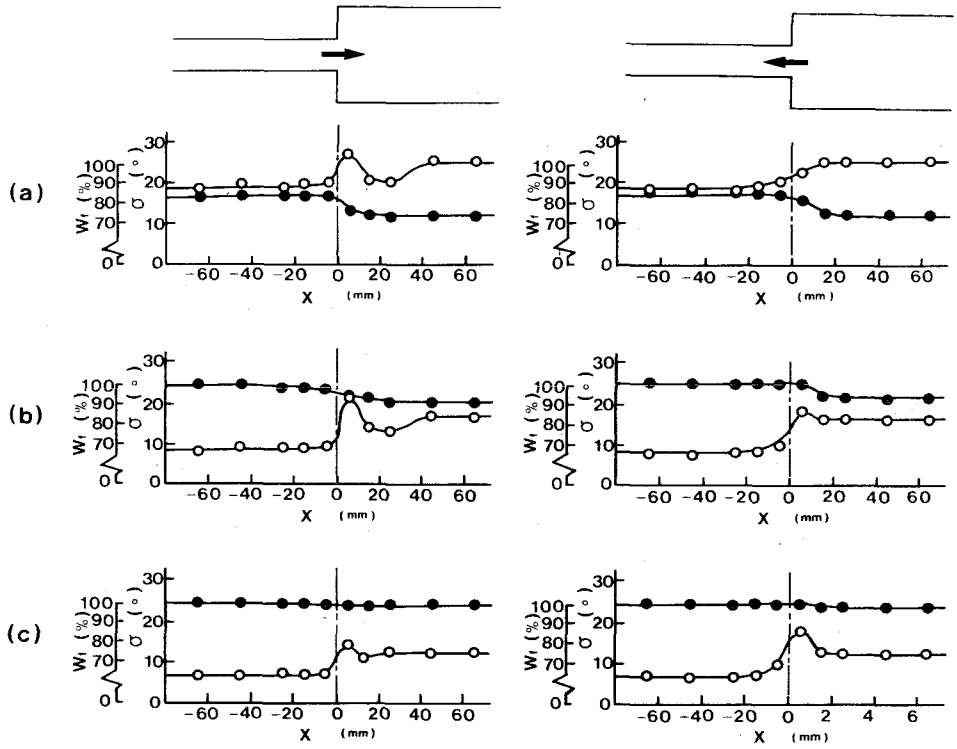


図 4.7　10/30スリット内流れでの繊維配向
a). 0.05 cc/sec., b). 0.23 cc/sec., c). 0.43 cc/sec.
○; σ,　●; W_f

を越えた幅の狭いスリット内まで及んでいる。スリット比が大きい場合や流量が多い場合には，拡大および縮小流れとも安定域と不安定域での繊維配向の差は大きくなる傾向を示している。しかし，各スリットとも安定域での繊維配向角分布の標準偏差 σ と繊維本数割合 W_f の値は，第3章の平行平板スリット内流れで求めた各壁面での剪断速度に対応するそれぞれの値とほぼ一致していた。

壁面での剪断速度の差が最も小さい20/30スリットの拡大流れで，繊維本数割合 W_f は，xが 5～40 mm 付近で極端に悪くなり，約3～4割の繊維が分布の主方向以外に向く現象が見られた。拡大部を過ぎた20/30スリットの，xが15 mm 付近のフラウンホーファ回折像を図4.9に示すが，流体の流れ方向(矢印)とそれにほぼ垂直に配向して分布している短繊維が存在していることがわかる。図4.9のフラウンホーファ回折像を測定した同じ場所での，縮小流れのフラウンホーファ

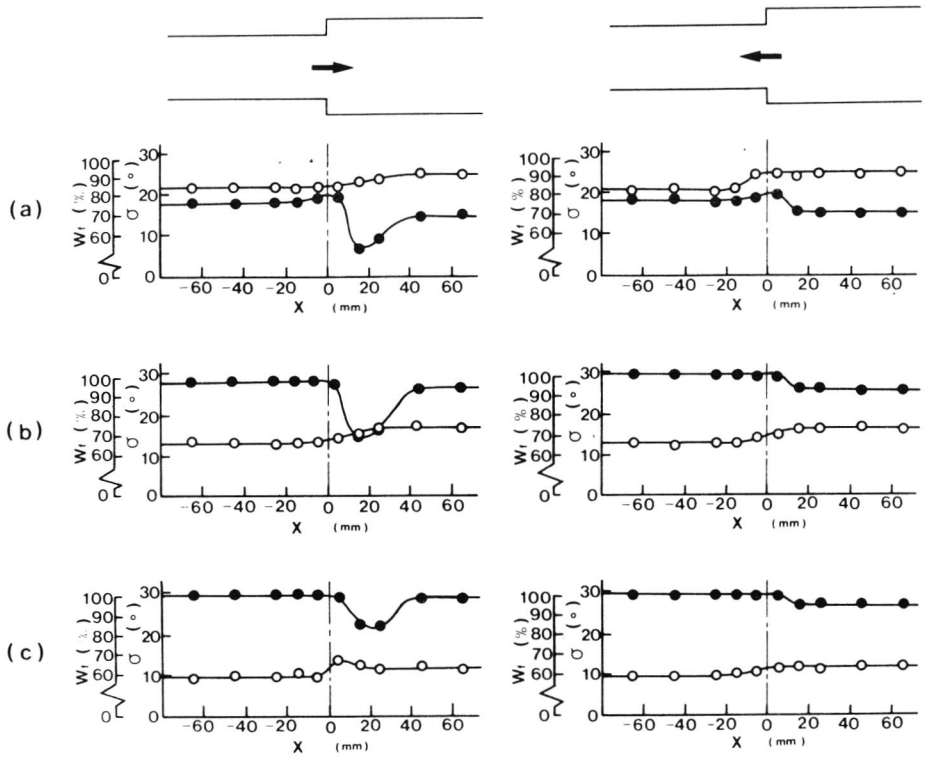


図 4.8　20/30 スリット内流れでの繊維配向
a). 0.05 cc/sec.,　b). 0.23 cc/sec.　c). 0.43 cc/sec.
○; σ,　●; W_f

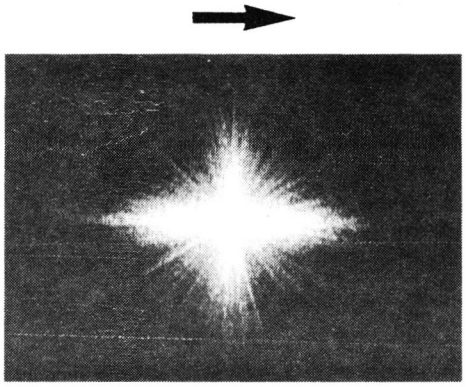


図 4.9　拡大流れの拡大部
(x＝15)付近のフラウンホーファ回折像

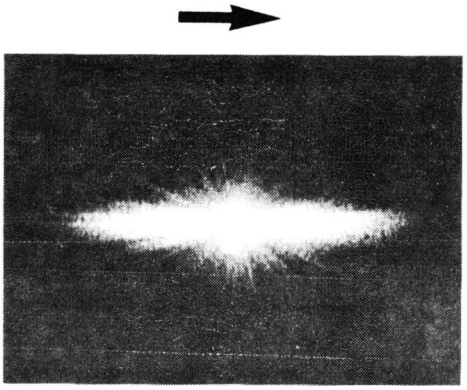


図 4.10　縮小流れの縮小部
(x＝15)付近のフラウンホーファ回折像

回折像を図4.10に示すが，縮小流れでは，流れ方向とそれにほぼ垂直に配向して分布している短繊維はほとんど見られない。このことから，拡大流れと縮小流れでは，繊維の挙動が異なることがわかる。拡大流れと縮小流れの流線模様は図4.2から図4.4に示したようにほとんど等しいが，流線模様はアルミニウム粉末の流れであるから，高分子流体に分散した物質の形状により，拡大流れと縮小流れで分散した物質の挙動が異なることがわかる。

拡大部および縮小部での個々の繊維挙動に関しては，ニュートン流体の場合と比較して4.3.3項で報告する。

拡大および縮小流れにおいて繊維配向は，安定状態から変動しふたたび安定状態に戻るが，繊維配向の変動の領域は金型設計上重要な因子となる。繊維配向が変動する領域は，図4.5に示したように変動域として原点0からの距離 l_- と l_+ を求め表4.2に示した。拡大流れではスリット比や流量に関係なく，拡大前の変動域 l_+ は45 mm と一定であった。急激な拡大管を流体が流れる場合，断面積の大きい管における速度が比較的一様になるまでに，出口管径の約8倍の長さを必要とすることが報告されている[15]。拡大・縮小スリットのスリット管路を相当直径で表わ

表4.2　拡大・縮小スリット内流れにおける繊維配向の変動域

流量 (cc/sec.)	5/30 スリット				10/30 スリット				20/30 スリット			
	拡大		縮小		拡大		縮小		拡大		縮小	
	$l-$	$l+$	$l-$	$l+$	$l-$	$l+$	$l-$	$l+$	$l-$	$l+$	$l-$	$l+$
0.05	0	45	15	21	0	45	25	21	0	45	26	15
0.14	0	45	10	21	0	45	20	21	0	45	20	15
0.23	0	45	5	15	0	45	15	15	0	45	14	15
0.31	0	45	5	15	0	45	15	15	0	45	14	15
0.43	0	45	5	15	0	45	10	15	0	45	10	15

した場合，流線模様は相当直径の約10倍の距離でほぼ壁面に平行になり，流体はほぼ安定に流れる。ところが，拡大流れにおいて繊維配向が安定になるまでの距離は，相当直径の約45～50倍であった。

縮小流れでは，縮小部手前での変動域 l_+ は，各スリットとも１５～２０ mmで流量による影響は少ない。しかし，縮小後の変動域 l_- は流量による影響が大きく，流量が多くなると変動域 l_- は短くなる傾向が見られた。縮小後の流線模様はすぐに壁面と平行になり，流れは安定していると考えられるが，縮小後の変動域の距離は大きい場合には相当直径の約２５倍にも達していた。このように，拡大流れや縮小流れにおいて，流体は相当直径の１０倍以内ですでに安定になっているのに対し，繊維の場合には安定な姿勢になるまでの距離が相当直径の数十倍にも達しているのは，繊維の慣性が主な原因であると考えられる。

４．３．３ 拡大部および縮小部での繊維挙動

拡大・縮小スリットの拡大部および縮小部での繊維の流れ状態を図 4. 11 に示す。各スリットともスリット間隙は 0.5 mm で，高分子水溶液の濃度は２wt%を使用し，流量は 0.２３ cc /sec.である。拡大流れでは図4.２や図 4.４に示した流線模様に沿って繊維は放射状に流出しているが，その後流線模様に沿って流れる繊維と，流れ方向と垂直に扇状に配列した繊維が観察される。縮小流れでは，繊維はほぼ流線模様に沿って流れ，スリット比が大さいほど縮小部での絞り効果が大きいため，ワイングラス状の形は顕著であった。

短繊維を分散した高分子流体とニュートン流体の １０／３０スリット内流れでの繊維挙動を図 4.１２に示す。ニュートン流体の場合には，拡大部で短繊維は放射状に流出するが，その後すぐに繊維配向は乱れ，流線模様に沿う方向に分散して流れるが，高分子流体の場合のように特異的な繊維挙動は見られない。図 4.２から図 4.４で示したように流線模様は，高分子流体とニュートン流体による違いは見られず，流れは拡大および縮小部の角部まで及んでいる。ところが，短繊維を含有したニュートン流体の拡大流れや縮小流れのスリット角部では，繊維がほとんど存在していない現象が見られた。縮小流れでは，高分子流体とニュートン流体による繊維の配列状態の違いは，拡大流れの場合ほど顕著ではなく，繊維が存在しない部分の範囲も拡大流れの場合と比べると少ない。

繊維の流れ状態と流体模様の模式図を図 4.１３ に示す。図中の斜線部分は繊維が

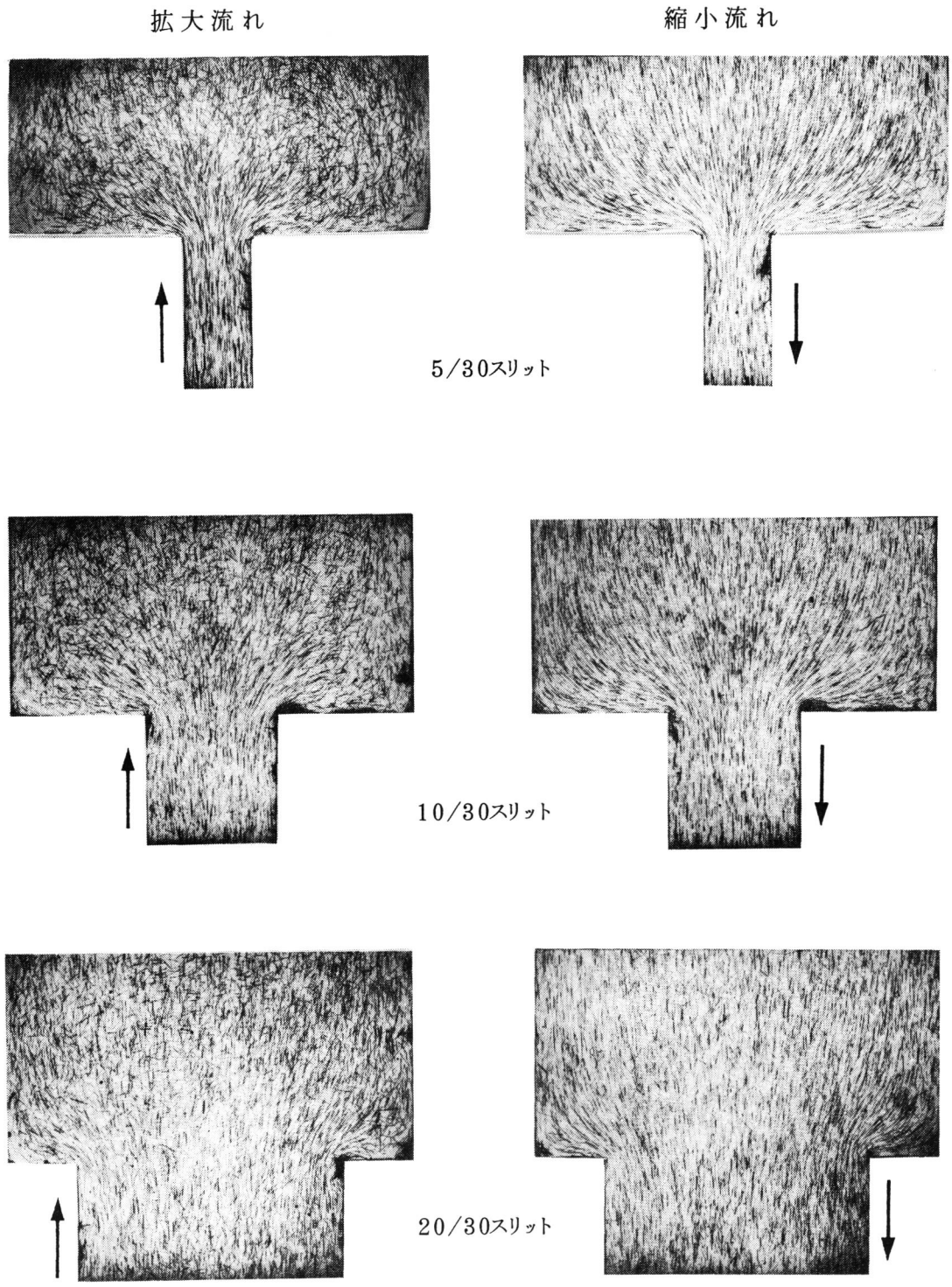


図 4.11 拡大・縮小スリットの拡大部および縮小部での繊維挙動
（高分子水溶液）

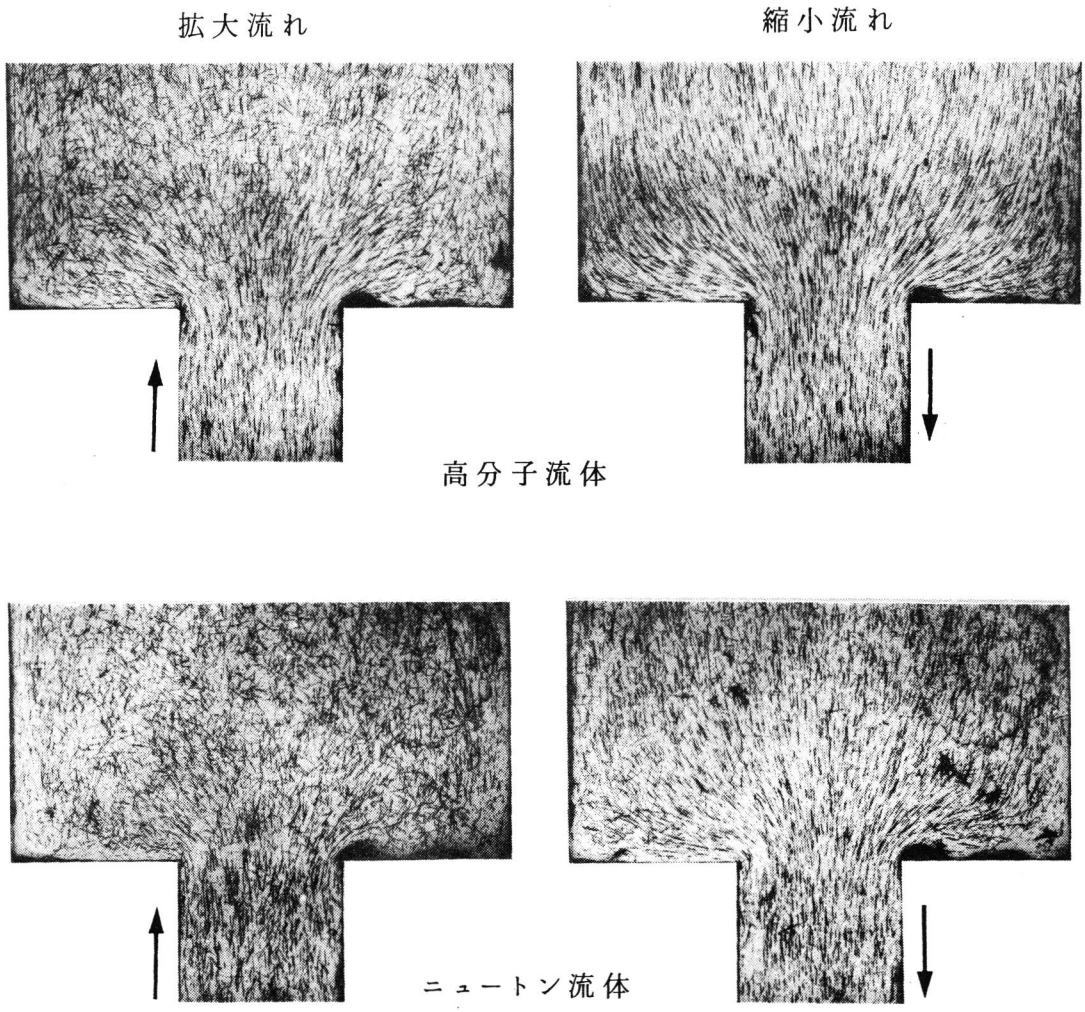


図 4.12　10/30 スリット内流れでの繊維挙動

ほとんど存在していない範囲を示す。高分子流体の拡大流れで，繊維が流れ方向とそれにほぼ垂直に分かれて流れる現象と，ニュートン流体の拡大および縮小流れで，スリット角部に繊維がほとんど存在しない現象は，流体以外の条件，すなわちスリットの形状や流量などが一定で，また流線模様がほとんど同じであることから，高分子流体とニュートン流体の性質の違いによって現われたものと考えられる。これらの現象は，スリット内での各流体の流速分布の違いにも多少影響されるとも考えられるが，高分子流体とニュートン流体中の分子の形状の違いが主な原因であると

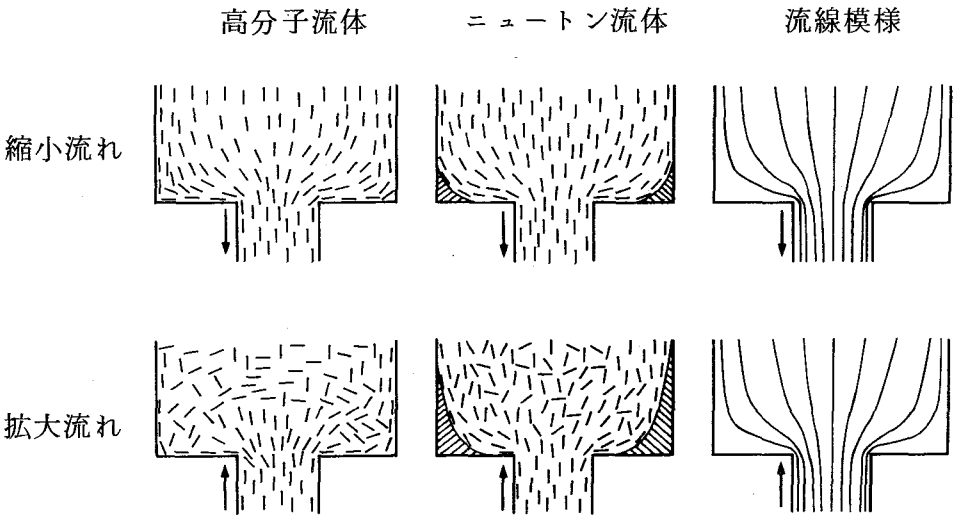


図 4.13　拡大・縮小スリット内流れでの繊維の流れ状態と流線模様の模式図

考えられる。

本実験で使用した平均分子量１００万のポリエチレンオキサイドの分子鎖長は，ポリエチレンオキサイドの結晶中の分子はらせん状である[16]ことから，液体中で分子が伸びた状態の分子はらせん状であるとして算出すると約５～６ μmになる。いっぽう，ニュートン流体として用いた水アメの主成分はブドウ糖であり，分子の大きさは十Å程度で，ポリエチレンオキサイドの分子から比べると約数千分の一である。短繊維の直径は １０ μm で，伸びたポリエチレンオキサイド分子鎖長の２倍程度であるが，高分子水溶液では分子鎖はからみ合いによる網目構造を形成し，その中に短繊維が保持された状態で流れていると考えられるため，短繊維は網目構造の変化の影響を敏感に受けると考えられる。

拡大および縮小流れでの流線模様や分子鎖のからみ合いによる網目構造を単純化し，高分子流体やニュートン流体での繊維挙動に現われた特異な現象を検討することとした。流線模様は図 4.14 のように，拡大後の流線模様の間隔が３倍に拡大されたとする。また，流体は拡大前後で体積の増減はなく，拡大流れで流線模様間の

流体は図 4. 15 のように変化すると単純化する。拡大前に短繊維は$\overline{AC}$上に存在していたとすると，1.5倍の拡大では短繊維は$\overline{A'C'}$上に，3倍の拡大では$\overline{A''C''}$上に移動する方向に高分子流体の場合もニュートン流体の場合も力が作用すると考えられる。しかし，高分子流体の場合には，高分子相互のからみ合いによる網目構造上に短繊維が保持され，網目構造は流れの拡大により流れ方向に縮み，流れ方向と垂直方向に引き伸ばされると考えられる。そのため短繊維は$\overline{A'C'}$や$\overline{A''C''}$上に移動する方向にニュートン流体の場合より強く力を受けると考えられる。拡大流れにおいて流線模様が図 4. 15 のように変化し，$\overline{AC}$上の短繊維が$\overline{A'C'}$や$\overline{A''C''}$上

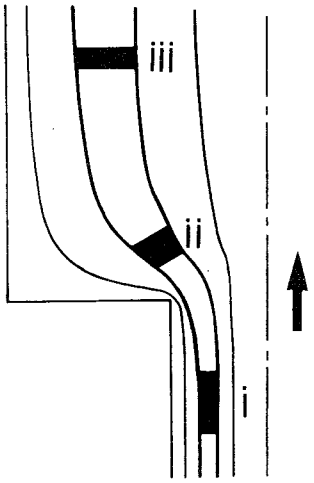


図 4. 14　拡大流れにおける流線模様の拡大

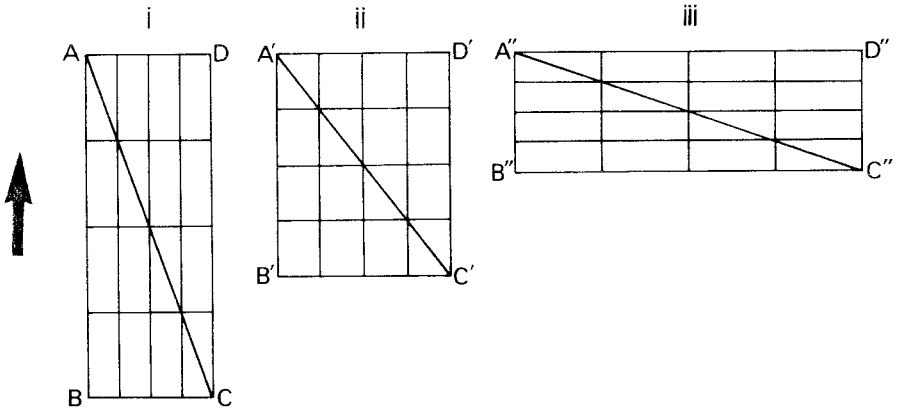


図 4. 15　拡大流れにおける流線模様の模式図
（ i ；拡大前，ii ；1.5倍拡大，iii ；3倍拡大 ）

に単純に移動したとすると，拡大前の繊維の配向角（以下，初期角度と称する）は拡大により表 4. 3 に示すように変化する。初期角度は∠BACの値で，拡大後の配向角は∠B′A′C′ や ∠B″A″C″ などである。短繊維は実際には図 4. 15 や表 4. 2 のよ

のように単純に変化しないが，高分子鎖のからみ合いによる網目構造が図 4.15 の i から ii や iii に近い形に変形すれば，繊維は網目構造の影響を受け表 4.2 の値に近い角度に配向すると考えられる。また，高分子流体は拡大流れのときに流速が低下すると，分子鎖はエントロピの小さい伸びた形からエントロピの大きい糸まり状態に近い形に変形し，粘度は増加すると考えられる。拡大部での粘度は流線模様の垂直方向でほぼ等しいとすれば，図 4.16 の実線で示した扇状に対して垂直な方向に粘度の勾配が生じると考えられる。そのため，拡大部から流出した繊維の先端部は流速が遅く粘度の高い流体中にあり，後端部は流速が速く粘度の低い流体中に存在し，流体の拡大や網目構造の変化により傾いた繊維は後端から押されて粘度がほぼ等しい流線模様の垂直方向に扇状に配向すると考えられる。いっぽう，流線模様とほとんど平行に流出した繊維は慣性により流線模様に沿って流出し，扇状に分布した粘度の勾配とは垂直になるため流体の拡大や粘度勾配の影響をほとんど受けず，流れ方向に配向すると考えられる。そのため，短繊維を分散した高分子流体の拡大流れでは，流れ方向に配向した繊維と流れ方向にほぼ垂直に配向した繊維に規則的に分かれて流れるものと考え

表 4.3　流線模様の拡大による繊維の配向角変化

初期角度	拡大後の配向角 (deg)					
(deg)	1.5	2	2.5	3	4	5
1	2.3	4.0	6.2	8.9	15.6	23.6
5	11.1	19.3	28.7	38.2	54.5	65.4
10	21.6	35.2	47.8	57.8	70.5	77.2
20	39.3	55.5	66.3	73.0	80.3	83.7
30	52.4	66.6	74.5	79.1	83.8	86.0
40	62.1	73.4	79.2	82.5	85.7	87.3
60	75.6	81.8	84.8	86.3	87.9	88.7

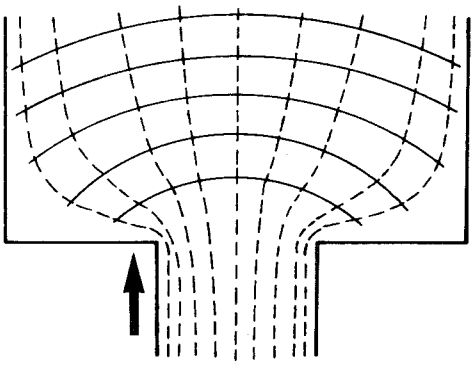


図 4.16　拡大流れにおける粘度変化

られる。

いっぽう，ニュートン流体の場合にも短繊維は流体の拡大や流速の差による力を受けるが，高分子流体の場合のように流体中の分子鎖からの力や繊維の先端と後端での粘度の差による作用を受けないため，繊維の配向は拡大部で不規則な配向をすると思われる。

また，ニュートン流体の拡大および縮小流れのスリット角部で繊維がほとんど存在しない現象も，流体の分子鎖長の違いから説明ができる。すなわち，ニュートン流体では拡大部を過ぎた所で短繊維はスリットの角部方向へ流線模様に沿って慣性によって流出するが，慣性力が減少してくると速い流速の方へ繊維は引張られて行くため，繊維は流速の遅いスリット角部まで行かなくなり角部で繊維が存在しなくなる。ところが，高分子流体では慣性力が減少すると繊維は抵抗の大きい流線模様を横切って流れるより，からみ合った分子鎖が流動している流線模様に沿って分子鎖に引張られながら流れる方が抵抗が少なくなるため，流速の遅いスリット角部までゆっくりではあるが繊維は流れると考えられる。

短繊維を分散した高分子流体の拡大流れでは，繊維は流れ方向と流れ方向に垂直に配向する規則性を持って流れる現象が観察されたが，この現象が生じる限界のス

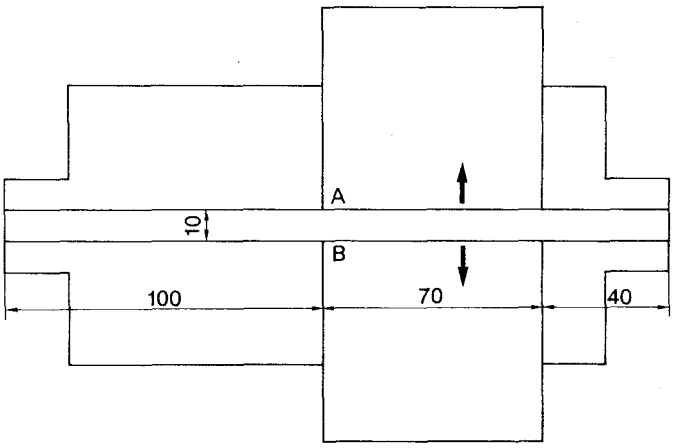


図 4.17　スリット比可変式の拡大・縮小スリット
（A，B；可変板）

リット比を図4.17に示すスリット比が可変できるスリットを作成して検討した。スリット可変式の拡大・縮小スリットはスリット間隙を 0.5 mm，固定した方のスリット幅を１０mm とし，可変板ＡとＢを対称に移動して種々の拡大流れを得た。その結果，拡大比が小さい場合でも流線模様が拡大している所では繊維は流体の流れ方向と傾いて流れる傾向を示すが，流体の流れ方向と垂直に配向した繊維が明瞭に観察されたのは，拡大部のスリット幅が１２mm，すなわちスリット比が1.2程度からであった。また，拡大流れで繊維が流れ方向と垂直に配向する現象は流量にはほとんど影響されなかった。しかし，流量が増加すると拡大部から流体の流れ方向に垂直に配向した繊維が観察されるまでの距離は，長くなる傾向を示していた。

４．４ 結　　言

短繊維を分散した高分子流体の急激な拡大・縮小スリット内流れにおける繊維配向を，スリット比や流量を変えて明らかにし，さらに拡大部および縮小部での繊維挙動をニュートン流体の場合と比較して明らかにした。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 拡大・縮小スリット内流れでの流線模様は，拡大流れと縮小流れでほとんど同じであり，スリットの角部まで流れが存在していることがわかった。また，拡大流れおよび縮小流れにおいて，高分子流体とニュートン流体による流線模様の違いはほとんどなかった。

(2) 拡大流れにおける繊維配向は拡大部直前まで安定であり，拡大部を過ぎたスリット内では繊維配向は変動する。繊維配向が変動している領域（変動域）は相当直径の約４５～５０倍に達しているが，スリット比や流量による影響はほとんどなかった。

(3) 縮小流れでの繊維配向は，縮小部での絞り効果のため縮小部手前で変動するが，変動域はスリット比や流量に影響されず，相当直径の約１５～２０倍であった。しかし，縮小後の変動域は流量による影響が大きく，流量が多くなると変動域は

短くなる傾向を示した。

(4) 拡大および縮小流れにおいて，繊維配向が安定な領域（安定域）での繊維配向角分布の標準偏差 σ と繊維本数割合 W_f の値は，第3章の平行平板スリット内流れで求めた各壁面での剪断速度に対応するそれぞれの値とほぼ一致していた。

(5) 拡大部では繊維は放射状に流出しているが，その後流線模様に沿って流れる繊維とそれに垂直に扇状に配向して流れる繊維とに，規則的に分かれる現象が見られた。

縮小部では繊維はほぼ流線模様に沿って流れ，スリット比が大きいほど絞り効果が大きく，ワイングラス状の形は顕著に現われた。

流線模様はアルミニウム粉末の流れであり，拡大および縮小流れでその挙動はほとんど同じであったことから，高分子流体に分散した物質（アルミニウム粉末や短繊維）の形状により，拡大流れと縮小流れで，分散した物質の挙動が異なることがわかった。

(6) ニュートン流体の場合は，高分子流体の拡大流れで見られた繊維挙動の特異的な現象は現われなかったが，拡大および縮小流れのスリット角部で，繊維がほとんど存在しない現象が見られた。高分子流体やニュートン流体で現われた繊維挙動は，各流体の溶質の分子の大きさの違いが原因であると考えられる。

(7) 拡大流れで拡大割合が小さい場合には，繊維は流れ方向と垂直な方向に配向する傾向は見られるが，流れ方向とほぼ垂直に配向した繊維が明瞭に現われるスリット比は約1.2以上であった。

参　考　文　献

1) W.K.Lee and H.H.George ; Poly. Eng. Sci., 18, 2, 146(1968)

2) K.N.Murty and G.F.Modlen ; Poly. Eng. Sci., 17, 12, 848(1977)

3) L.Kacir, M.Karkis and O. Ishai ; Poly. Eng. Sci., 15, 7, 525 (1975)

4) D.G.Taggart, R.Byron Pipes and J.C.Mosko ; Tech. Conf. Soc. Plast. Eng. 37, 601(1981)

5) 堀川　明，中村喜代次，梅垣静雄；繊維機械学会論文集．29，5，63 (1976)

6) 中村喜代次，山本康博，中村富士夫，堀川　明；繊維機械学会論文集，29，11，157(1976)

7) 荒井定吉，浅野秀樹；高分子化学，29，327，510(1972)

8) 荒井定吉，浅野秀樹，石川広高，水谷　純，村井真之；高分子化学，29，330，743(1972)

9) 堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，33，10，118(1980)

10) 堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，34，6，109(1981)

11) 堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，34，11，219(1981)

12) 堀川　明，千葉訓司，西谷憲三，上島　徹；繊維機械学会論文集，34，12，238(1981)

13) 塩見　昭，木瀬　洋，宇野　稔；繊維機械学会論文集，35，8，105 (1982)

14) 塩見　昭，松本龍守，宇野　稔；繊維機械学会論文集，35，10，135 (1982)

15) 生井武文；流れの力学，p.115．コロナ社(1974)

16）筏　義人，大村恭弘，梶　慶輔，上原　浩，西崎靖子，坂井文敬；高分子辞典，p.258，高分子刊行会（1971）

第５章　直交ベンドおよび直交エルボスリット内流れにおける繊維挙動

５．１　緒　　言

繊維工業や高分子工業などにおいて，流体や短繊維を分散した流体が曲管内を流れる現象は多い。ニュートン流体[1)〜2)]や高分子流体[3)〜6)]の円形断面曲管内の層流流れについては，理論的にほぼ解析されている。しかし，短繊維を分散した流体の曲管内流れでの繊維運動に関する研究は少なく，塩見ら[7)]が回流水槽のベンド部の回転流れ中を運動する線状体の軌道や姿勢などを，解析的および実験的に扱った研究がみられる程度である。曲管内の繊維は流体からの力と回転による遠心力の影響を受けながら運動するため，真直ぐな管路内の繊維に比べると繊維運動は複雑である。

射出成形などにおいても種々の曲率半径を有するスリット状の管路は存在するが，スリット状の曲管内での繊維配向に関する研究は少ない。本章では，短繊維を分散した高分子水溶液の直交ベンドおよびエルボスリット内流れでの繊維挙動を，ニュートン流体の場合と比較して明らかにする。

５．２　実験装置および実験方法

スリット内流れでの繊維挙動を撮影する装置，使用する流体や実験方法は，第３章の平行平板スリットの場合と同じで，すでに3.2節で示している。

直交ベンドスリットの形状を図5.1に示す。直交ベンドスリットはベンド部の曲率半径Ｒを，スリット幅（１０mm）の１，２，３および５倍，すなわち１０mm，２０mm，３０mm，５０mmと変えて４種類（以下，それぞれＲ１０，Ｒ２０，Ｒ３０，Ｒ５０スリットと表示する）作成する。直交ベンドスリットの直線部の長さは各スリットとも７０mmとした。

直交エルボスリットの形状を図5.2に示す。直交ベンドおよび直交エルボスリットは透明のポリ塩化ビニルを使用し，スリット幅は１０mmで，スリットの間隙は0.5mmである。

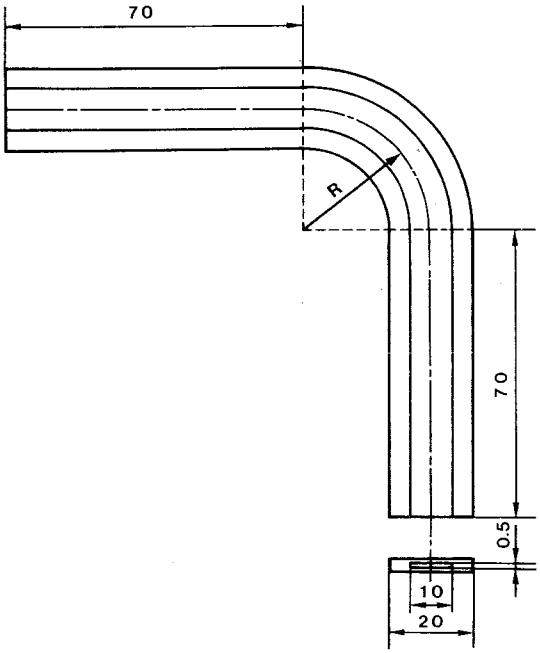


図 5.1　直交ベンドスリット

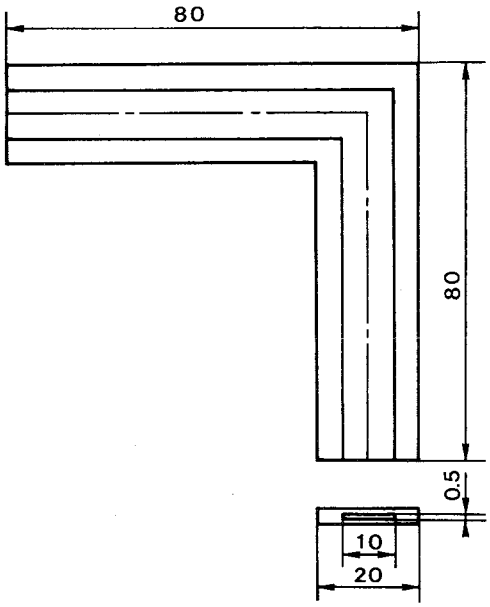


図 5.2　直交エルボスリット

繊維配向角分布の測定法および評価法は，第 3 章の 3.3 節と同じであるためここでは省略する。

5．3　直交ベンドスリット内流れにおける繊維配向

短繊維を分散した流体は直交ベンドスリット内で直線部（直管）を流れ，つぎにベンド部（曲管）で徐々に方向を変えて流れ，ふたたび直線部を流れる。直交ベンドスリット内流れでの繊維配向を，ベンド部の曲率半径の異なるスリットを用いて検討し，直交ベンド部での繊維挙動を明らかにする。

5．3．1　流線模様

ベンド部の曲率半径が１０mm の直交ベンドスリット（Ｒ１０スリット）の流線模様とその模式図を図 5.3 および図 5.4 に示す。図中の（ａ）は高分子流体，（ｂ）

はニュートン流体で，各流体の流量は0.23cc/sec.である。流線模様はベンド部より上流の直線部ですでに傾き，ベンド部より下流の直線部では流線模様は遅れて直線部と平行になる。この傾向は流量が多い場合や，ベンド部の曲率半径が小さい場合には，より顕著に現われていた。流線模様はベンド部の内側で縮小し，外側で

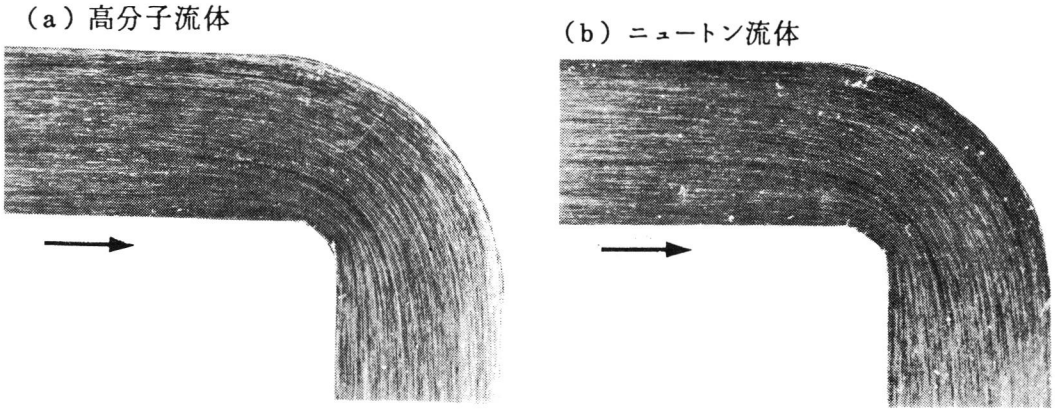


図 5.3　直交ベンドスリット内流れでの流線模様

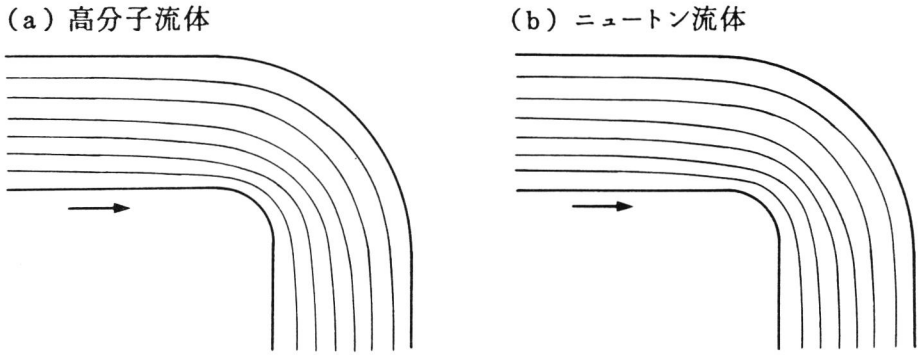


図 5.4　流線模様の模式図

は拡大する傾向があるが，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんど見られない。

5．3．2 スリット内各部での繊維配向

直交ベンドスリット内での繊維配向角分布の測定位置と標準偏差σおよび繊維本数割合 W_f との関係を図5.5に示す。スリットの中心軸をx軸とし，ベンド部のx軸上の中心を原点0とする。原点0より流れの上方を負，下方を正とする。グラフの横軸はスリットのx軸とし，スリット各部の測定位置は各スリットにより多少異なるが，9×9 mm の正方形の枠で示した測定部の中心を測定点とし，x軸上の各測定点での繊維配向角分布の標準偏差σはグラフ上で白丸(○)，繊維本数割合 W_f は黒丸(●)で示した。また，グラフの破線で囲まれた部分はベンド部を示し，一点鎖線は原点0の位置を示す。

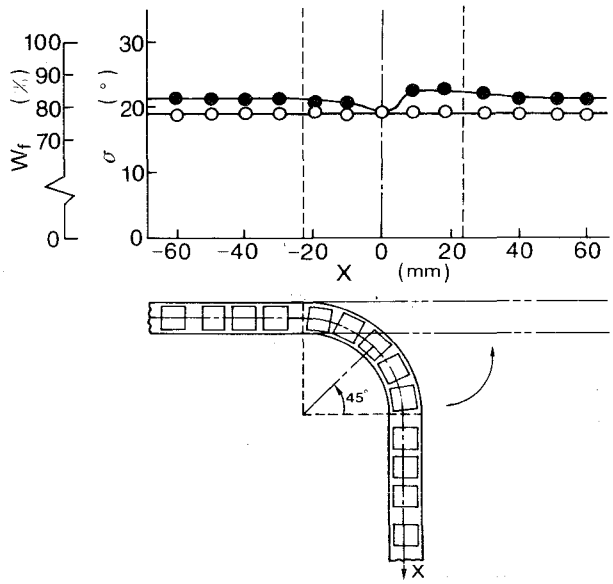


図5.5　繊維配向角分布の測定位置と繊維配向角分布の標準偏差および繊維本数割合との関係

高分子の水溶液に短繊維を分散させた流体を直交ベンドスリットに流したときの，スリット各部での繊維配向角分布の標準偏差σと繊維本数割合 W_f を図5.6から図5.9に示す。流量は各スリットとも0.05 cc/sec. から0.43 cc/sec.の間で5種類変えて実験を行っているが，ここではそのうちの3種類を示す。曲率半径がスリット幅と等しいR10スリットやR20スリットでは，流量が多くなるとベンド部前後の直線部で，繊維配向は変動し，繊維配向が変動する区間は曲率半径の約2倍程度であった。しかし，ベンド部の曲率半径がスリット幅の3倍以上のスリット（R30，R50スリット）では，流量が少ない場合にはベンド部内での繊維配向の変動はほとんどなく，流量が多い場合でも繊維配向の変動は少ない。各スリットで変動のない直線部の繊維配向角分布は，各流量においてそれぞれの剪断速度に対応した値を示し，第3章の平行平板スリット

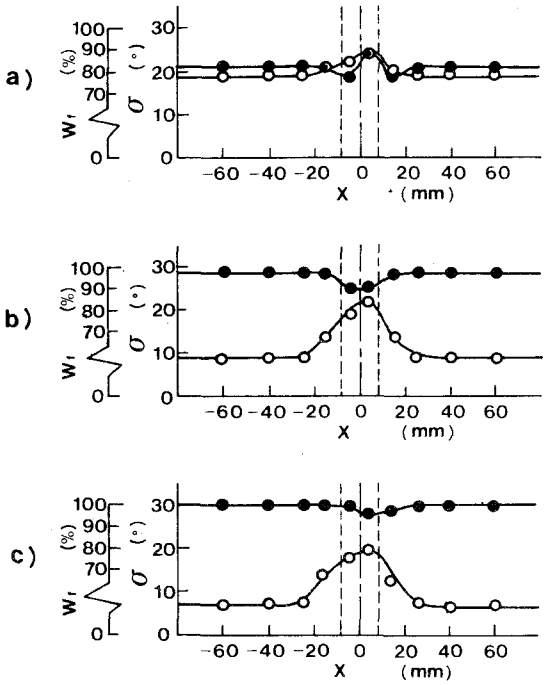


図 5.6　R 10 スリット内流れでの繊維配向

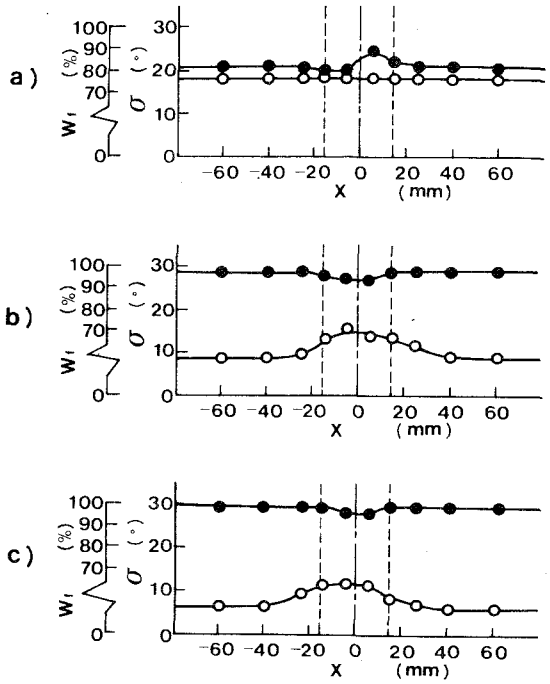


図 5.7　R 20 スリット内流れでの繊維配向

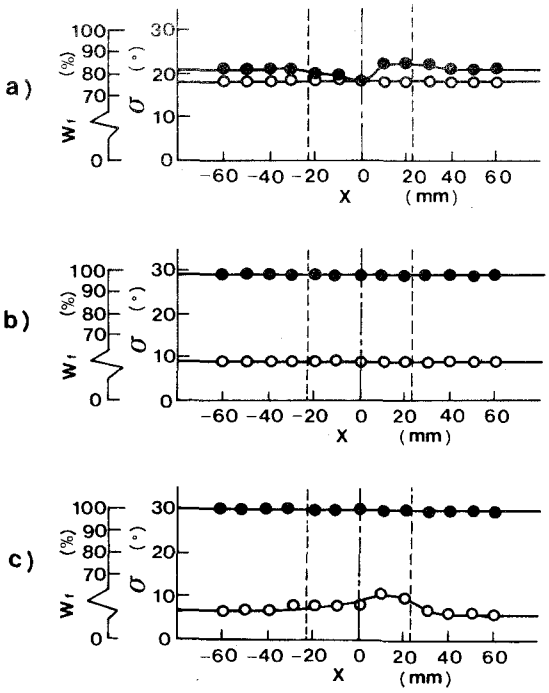


図 5.8　R 30 スリット内流れでの繊維配向

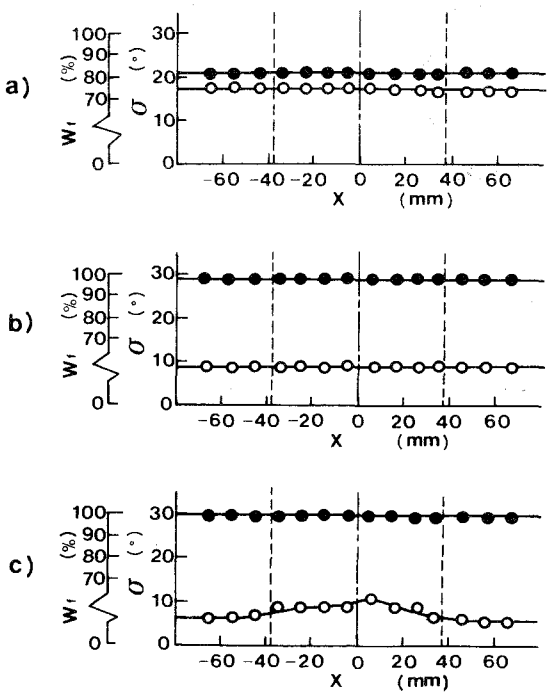


図 5.9　R 50 スリット内流れでの繊維配向

内流れで得た値とほぼ一致していた。

ニュートン流体を用いた場合には，繊維配向が乱れている位置での繊維配向角分布の値は高分子流体の場合と多少異なるが，繊維配向が安定な領域での繊維配向角分布の値はほとんど同じで，各スリット内での繊維の配向状態は高分子流体とほぼ同じになる傾向を示していた。

直交ベンドスリット内を流れる短繊維は，ベンド部付近で姿勢を変えながら流れるため，繊維配向角分布の主軸もベンド部付近で変化する。各スリット内流れにおける繊維配向角分布の主軸の変化を，図5.10から図5.13に示す。図中の縦軸の角度 θ_n は，繊維配向角分布の主軸とベンド部上流の直線部のx軸とのなす角であり，θ_n が90°のときはベンド部下流の直管のx軸と主軸の方向が一致していることを示している。また，実線はベンド部上流の直管のx軸とベンド部および直管のx軸の接線とのなす角を示している。曲率半径が20 mm 以下のスリットでは，繊維配向角分布の主軸はベンド部より上流域ですでに傾き実線と一致しなくなるが，ベンド部の中心（原点0）を越えた付近から実線と一致してくる傾向を示す。しかし，R30やR50スリットでは主軸はベンド部および直線部でほぼ実線上に乗っている。曲率半径が小さい場合や流量が多い場合には，繊維の慣性により短繊維はベンド部付近の流線模様に沿って流れることができず，繊維は流体より遅れて傾いてくるためだと考えられる。

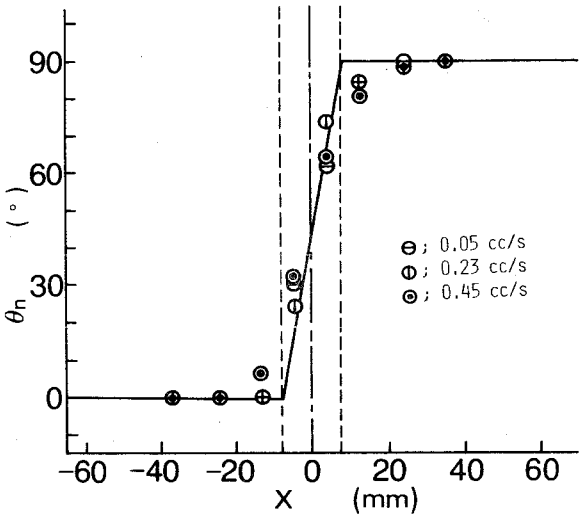


図5.10　R10スリット内流れにおける主軸の変化

R20スリットとR30スリット内流れで流量が多い場合には，図中の矢印で示したベンド部下流域で，主軸が90°より約5～7°大きく傾く現象が見られた。この現象

はベンド部を越えた所で，ベンド部内側の流速の速い方向に短繊維が引張られたことにより生じたものと考えられる。しかし，ニュートン流体の場合にはこの現象は現われず，高分子流体では，速度差による高分子鎖の網目構造の変形が影響していると考えられる。この現象以外の繊維の配向状態などは，高分子流体とニュートン流体でほとんど同じであった。このことから，流線模様はベンド部付近で方向を変えベンド部外側でわずかに拡大し，内側で縮小しているが，拡大・縮小スリットの場合より流線模様の拡大割合が小さいため，高分子流体の非ニュートン性が顕著に現われなかったものと考えられる。

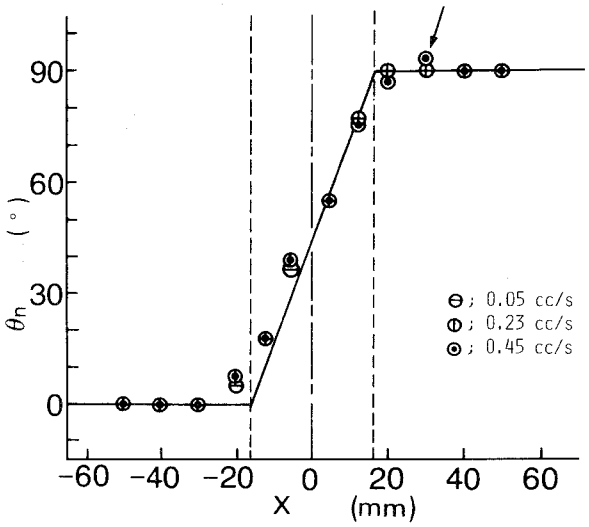


図 5.11　R20スリット内流れにおける主軸の変化

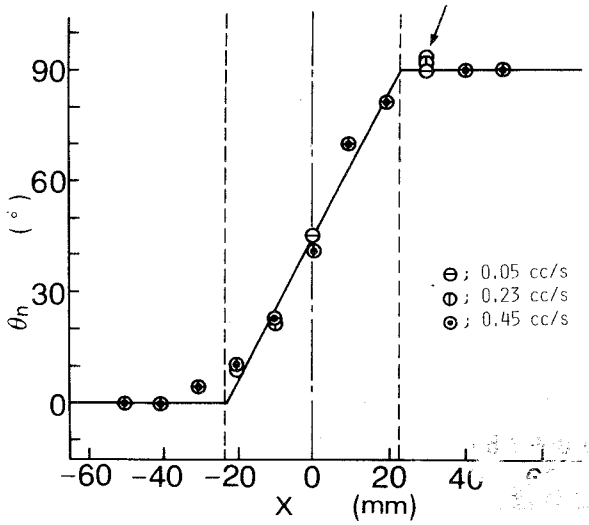


図 5.12　R30スリット内流れにおける主軸の変化

5．3．3　ベンド部での繊維挙動

曲率半径が10 mm のR10スリットのベンド部での繊維挙動を図5.14 に示

す。ベンド部内側の短繊維は，流速が大きいため動いて撮影されるが，その他の位置での短繊維は停止している。このことから，ベンド部の内側では流速は速く，外側へ行くほど流速が遅いことがわかる。また，ベンド部内側の短繊維は流れ方向に配向し，外側では流れ方向と傾いて流動する傾

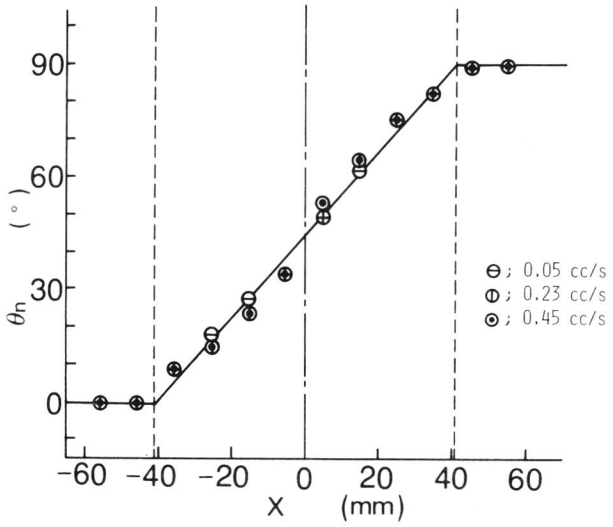


図 5.13　R 50 スリット内流れにおける主軸の変化

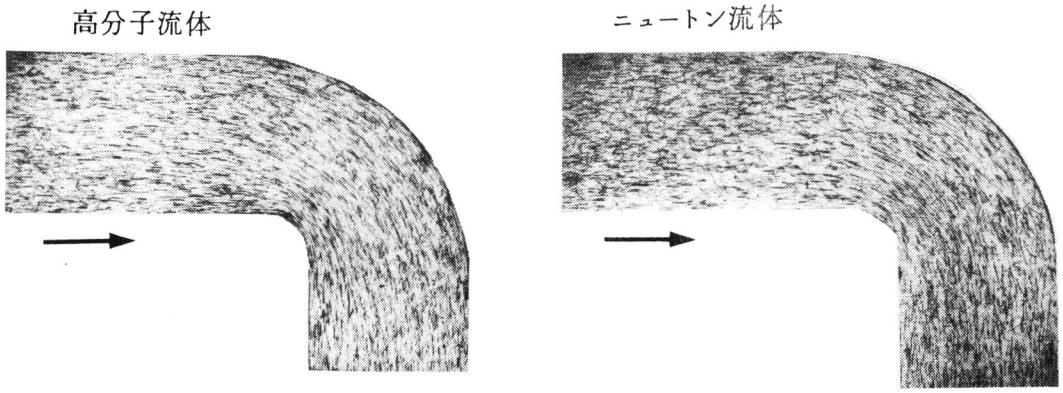


図 5.14　直交ベンド部での繊維挙動

向を示しているが，短繊維は流線模様と垂直になるまでは傾いていない。これは図 5.3 および図 5.4 に示したように，流線模様はベンド部内側で縮小し，外側では拡大しているが，ベンド部外側での流線模様の拡大割合が拡大・縮小スリットの拡大流れの場合ほど大きくないことが原因であると考えられる。また，高分子流体とニュートン流体により繊維配向の違いが明確に表われなかったことも，ベンド部での

流れの拡大割合が小さく，高分子流体に非ニュートン性が顕著に現われなかったことが原因していると考えられる。

5．4 直交エルボスリット内流れにおける繊維挙動

直交ベンドスリットでは直線部およびベンド部での断面積は同じであるが，直管を2本直角に突き合わせた形状をした直交エルボスリットでは，直交部で断面積が増加している。直交ベンドスリット内流れでは断面積の変化はなく流体の流れの方向だけが変化するが，直交エルボスリット内流れでは直交部で断面積が変化し，さらに方向を変えて流体が流れるため，流体の流れや繊維挙動は直交ベンドスリットの場合より複雑になる。直交エルボスリット内流れでの繊維配向を流量を変えて検討し，さらに直交部での繊維挙動を明らかにする。

5．4．1 流線模様

高分子流体とニュートン流体の直交部付近の流線模様を図5.15に示す。各流体の流線模様は流量が等しいときはほとんど同じで，流体による違いは見られない。このことは図5.16に示した流線模様の模式図からさらに明確にわかる。流線模様は直交部手前で傾き，直交部を越えた直線部まで流線模様の傾きは及んでいる。直

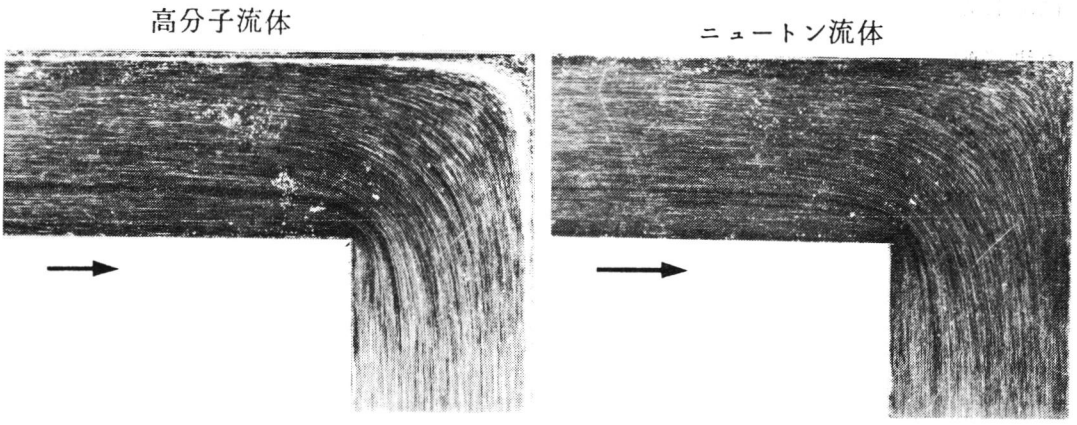


図5.15　直交エルボスリット内での流線模様

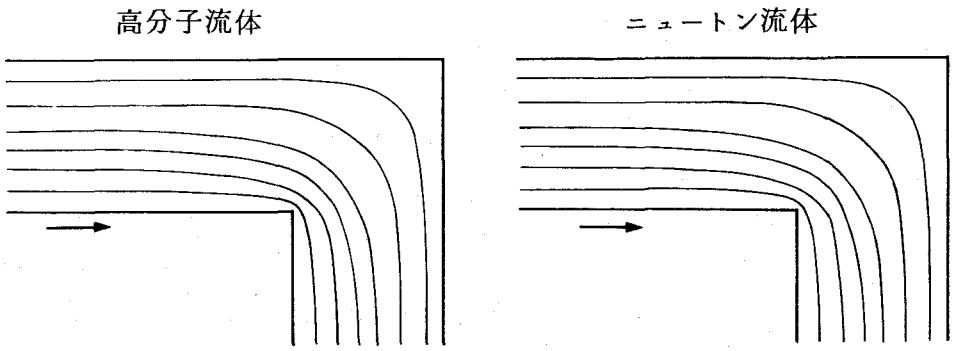


図 5.16　流線模様の模式図

交部内側の流線模様の間隔は狭くなり，流れは縮小しているが，外側では流線模様の間隔は広がり，流れは拡大している。直交部での流線模様の拡大割合は，直交ベンドスリットの場合と比べると大きく，拡大・縮小スリットの拡大流れの場合と良く似ているが，これは直交部での断面積の増加によるものである。

5．4．2　スリット内各部での繊維配向

高分子水溶液に短繊維を分散させた流体を直交エルボスリット内に流したときの，スリット各部での繊維配向角分布の標準偏差 σ と繊維本数割合 W_f を図 5.17 に示す。繊維配向角分布の測定位置と標準偏差 σ および繊維本数割合 W_f との関係は直交ベンドスリットの場合と同じで，x 軸の原点 0 は直交部の中心と一致させている。スリットの原点付近での繊維配向角分布の値は直交ベンドスリットのＲ１０スリットの場合と多少異

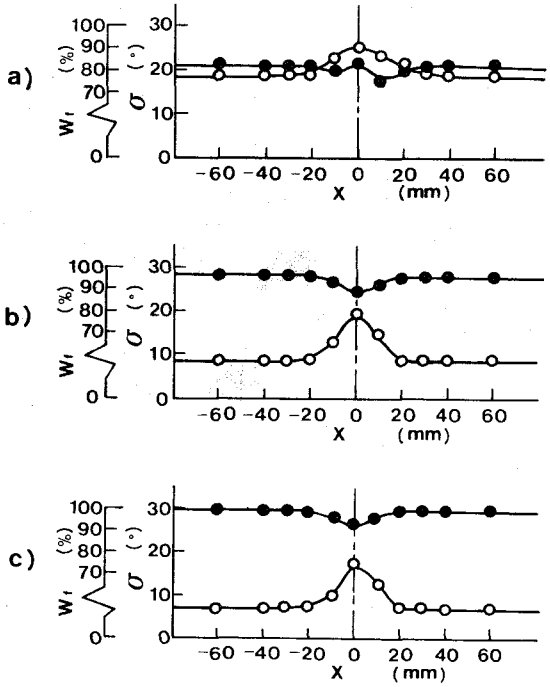


図 5.17　直交エルボスリット内流れでの繊維配向

なっているが，直管部での繊維配向角分布や繊維配向が変動している区間の距離などは，R10スリットの場合とほとんど同じであった。

直交エルボスリット各部での繊維配向各分布の主軸の変化を図5.18に示す。直交部前後での主軸の変化角度 θ_n はR10スリットの場合より大きいが，主軸の変化の様子はR10スリットの場合とほとんど同じであった。しかし，直交部のフラウンホーファ回折像と直交ベンドスリットのR10スリットのベンド部でのフラウンホーファ回折像は，図5.19に示すように異なっていることがわかる。すなわち，直交ベンドスリットのベンド部では流れ方向とわずかに傾いて配向している繊維が存在するが，直交エルボスリットの直交部では流れ方向に分布した繊維と流れ方向にほぼ垂直に分かれて分布している繊維が存在している。このよう

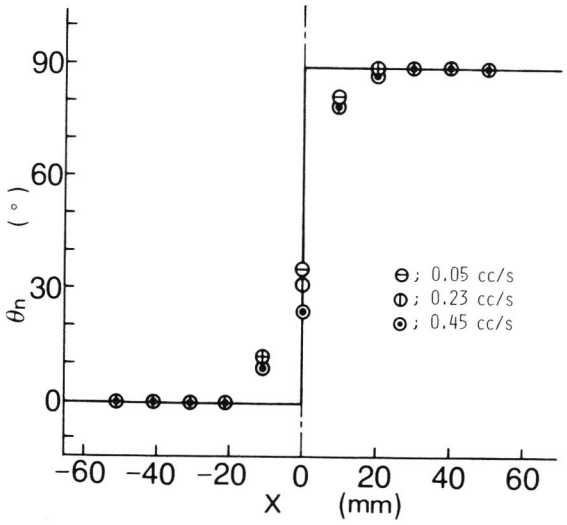


図5.18　直交エルボスリット内流れでの主軸の変化

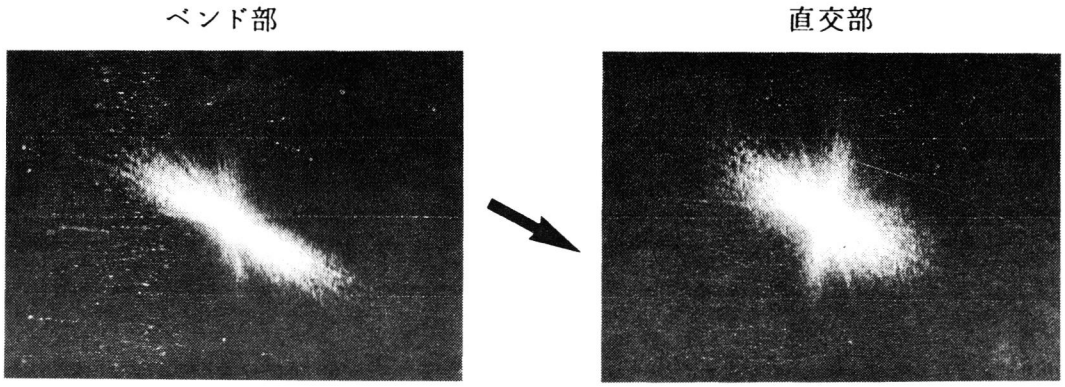


図5.19　直交ベンドおよびエルボスリットのベンド部と直交部でのフラウンホーファ回折像　（矢印；流体の流れ方向）

な直交部での繊維配向は，第4章の拡大・縮小スリットの拡大流れで現われていた現象と同じであり，直交部での繊維挙動については5.4.3項で報告する。

5．4．3 直交部での繊維挙動

直交エルボスリットの直交部での繊維挙動を図5.20 に示す。図5.15と図5.16で示した流線模様で，流線模様が縮小していた直交部内側では繊維は流線模様に沿って配向し，高分子流体とニュートン流体による差はほとんどない。しかし，流線模様が拡大している直交部外側では拡大・縮小スリットの拡大流れのときと同様に，高分子流体の場合には流れ方向と垂直に配向している繊維が見られ，このような繊維挙動は直交部を過ぎた直管部まで及んでいることがわかる。ニュートン流体の場合には直交部外側の角部で繊維はほとんど存在していないが，この現象も拡大およ

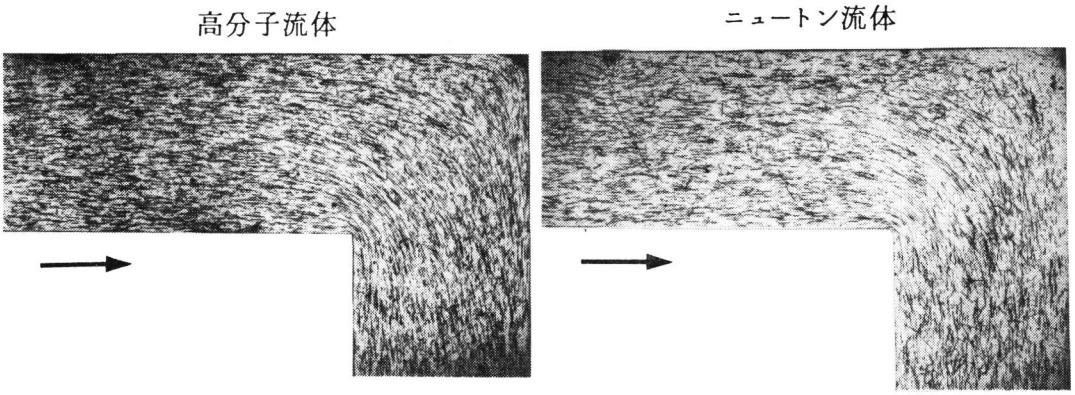


図5.20　直交エルボスリットの直交部での繊維挙動

び縮小流れのスリット角部ですでに観察されており，直交部の繊維は拡大・縮小スリットの拡大流れとよく似た挙動を呈していることがわかる。

高分子流体およびニュートン流体の直交部での繊維挙動の模式図を図5.21 に示す。図中の斜線は繊維がほとんど存在していない部分を示す。高分子流体やニュートン流体で現われる繊維配向の特異な現象は図5.22に示すように，扇形部分に比べて約27.3％の斜線で示した部分の体積の増加により，流れの拡大割合が直交ベンドスリットの場合よりも増加したためと考えられる。そこで，図5.23に示すよ

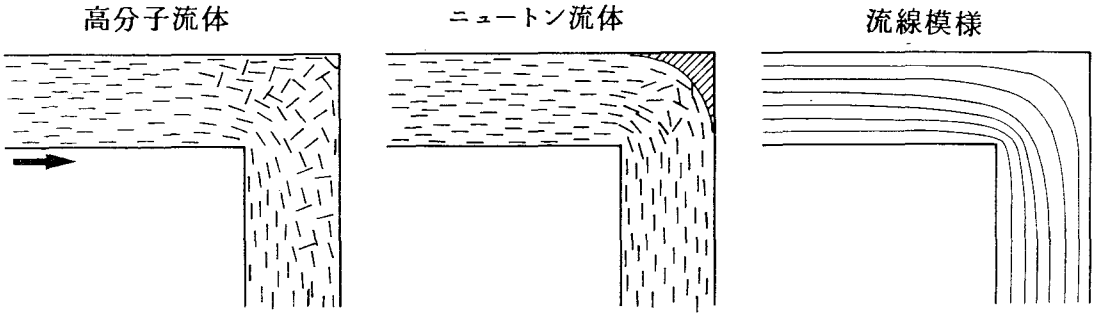


図5.21　直交エルボスリット内流れにおける繊維挙動の模式図

うに直交エルボスリットの体積の増加部分を埋めたスリット（曲率半径が5 mmの直交ベンドスリットになる）を作成して実験を行った結果，直交エルボスリットで観察された繊維配向の特異な現象は消滅し，繊維配向の特異な現象は流れが拡大していることが原因であることがわかった。

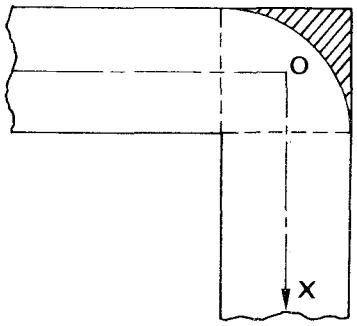


図5.22　直交エルボスリットの直交部での体積増加部分

直交エルボスリットの直交部で流れが拡大している部分の個々の繊維の配向状態を観察した結果，流れがわずかに拡大している部分ですでに繊維は流れ方向と傾いて配向する傾向を示すが，流れ方向とほぼ垂直に配向するのは流れが約1.2～1.3倍以上拡大している所であった。この値はスリット比可変式のスリットを用いて行った場合の値とほぼ一致していた。

直交エルボスリットの直交部のように，流れが拡大する所と縮小する所が存在すれば，スリット内で繊維の配向状態が異なることがわかった。すなわち，間隙の小さいスリット内流れで，高分子流体の流線模様が拡大する所では，繊維は流れ方向とそれに垂直方向に規則的に分かれて配向し，縮小する所では繊維は流れ方向に沿

って配向する。また，ニュートン流体の場合には流線模様が拡大し，流速が遅くなるスリット角部では繊維がほとんど存在しない。このような繊維挙動の現象は，第4章の拡大・縮小スリット内流れで述べたように，各流体の分子の大きさの違いが主な原因であると考えられる。

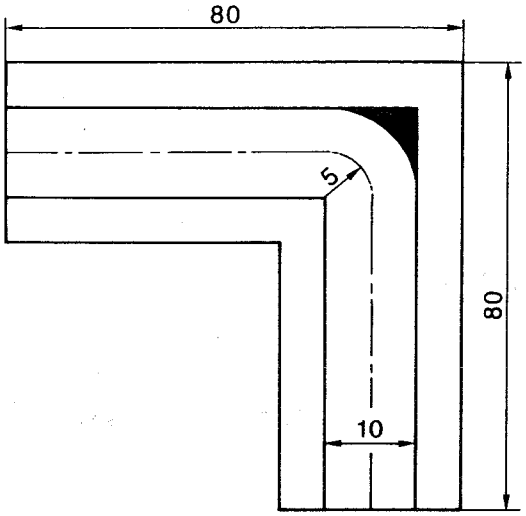


図5.23　直交エルボスリットの体積増加部分を埋めたスリット

5.5 結　　言

短繊維を分散した高分子水溶液の直交ベンドおよび直交エルボスリット内流れでの繊維配向を，ベンド部の曲率半径や流量を変えて明らかにし，ベンド部およびエルボ部での繊維挙動をニュートン流体の場合と比較して検討した。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 直交ベンドスリット内流れの流線模様は，ベンド部上流の直線部ですでに傾き，ベンド部下流の直線部で遅れて直線部と平行になっていた。ベンド部では，ベンド部内側で流線模様は縮小し，外側では拡大していたが，流線模様の拡大や縮小の割合は拡大・縮小スリットの場合と比べると少なく，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんどなかった。

(2) 曲率半径が小さい直交ベンドスリットでは，ベンド部前後およびベンド部での繊維配向の変動は大きく，曲率半径が大きくなるとスリット内での繊維配向の変動はほとんどなくなる傾向を示していた。スリット内の繊維配向が安定な領域での繊維配向角分布の標準偏差σや繊維本数割合W_fは，第3章の平行平板スリット内流れで求めた各壁面での剪断速度に対応する，それぞれの値とほぼ一致して

いた。

(3) 繊維配向角分布の主軸の方向は，ベンド部の曲率半径が小さい場合には，スリットの中心軸の接線方向と一致していないが，曲率半径が大きくなると接線方向とほぼ一致する傾向を示していた。しかし，曲率半径が２０mm と３０mm のＲ２０スリットとＲ３０スリット内流れで，流量が多い場合には，ベンド部下流の直線部で主軸がスリットの中心軸より約5～7°内側へ傾く現象が見られた。

(4) 直交ベンド部の内側では流速が速く，流線模様も縮小されているために，繊維は流線に沿って配列している。いっぽう，ベンド部の外側では，流線模様と約数十度の角度をなして流れている繊維が見られるが，流線模様の拡大割合が拡大・縮小スリットの拡大流れの場合より小さいため，流線模様と垂直方向には配向していない。

(5) 直交エルボスリット内流れでは，直交部内側で流線模様は直交ベンドスリットの場合と同様に縮小し，外側では拡大しているが，直交部で断面積が増加しているため，流線模様の拡大割合は直交ベンドスリットの場合と比べると大きい。しかし，高分子流体とニュートン流体による流線模様の違いはほとんどなかった。

(6) 直交部以外の直交エルボスリット内の繊維配向や繊維配向角分布の主軸の変化は，曲率半径が１０mm のＲ１０スリットの場合とほとんど同じであった。

(7) 直交部の内側では流線模様は縮小し，繊維は流線模様にほぼ沿って配向していた。しかし，直交部の外側では流線模様は拡大し，拡大・縮小スリットの拡大流れの場合と同様に，流線模様に沿って流れる繊維とそれに垂直に配向して流れる繊維とに，規則的に分かれる現象が見られた。

(8) ニュートン流体の場合には，拡大・縮小スリット内流れのときと同じように，直交部の角部で繊維がほとんど存在しない現象が現われていた。

(9) 直交部での繊維挙動の特異な現象は，直交部で体積が約２７.３％増加している

ことが原因であり，体積の増加部分を埋めたスリット（曲率半径が5 mm の直交ベンドスリットになる）を用いて実験を行った結果，繊維挙動の特異な現象は消滅した。

(10) 高分子水溶液の拡大・縮小スリットの拡大流れのときだけでなく，スリット内で流線模様が拡大する所では，繊維が流れ方向とそれに垂直に規則的に分かれて流れる繊維挙動をすることがわかった。また，ニュートン流体においても流れが拡大または縮小するときに，スリット角部などの流速が極めて遅くなる所で，繊維が存在しなくなる現象が現われることがわかった。

参　考　文　献

1) W.R. Dean ; Phil. Mag., **4**, 20, 208 (1927)

2) W.R. Dean ; Phil. Mag., **5**, 30, 673 (1928)

3) J.R. Jones ; Quart. Journ. Mech and Applied Math., **13**, 4, 428 (1960)

4) R.H. Thomas and K. Walters ; Journ. Fluid Mech., **16**, 228 (1963)

5) 家元良幸，澤崎吉太夫；繊維機械学会論文集，**34**, 1, 1 (1981)

6) 家元良幸，澤崎吉太夫；繊維機械学会論文集，**35**, 4, 50 (1982)

7) 塩見　昭，松本龍守，宇野　稔，繊維機械学会論文集，**35**, 10, 135 (1982)

第6章　T形およびY形スリット内流れにおける繊維挙動

6.1

6．1 緒　　言

プラスチックやゴムの成形において，溶融材料が金型内で分流し，ふたたび合流するような場合，合流部分で完全に融着せず接合線（ウエルド　マークまたはウエルド　ライン）が生じ，ウエルド部での強度は低いことが知られている。

短繊維を分散した溶融高分子についても同様の現象が見られ，ウエルド部での強度低下が報告されている[1)〜3)]。柿崎ら[1)]はＦＲＴＰのウエルド部での繊維の配向状態を観察し，ウエルド部分では繊維は流れ方向に配向せず，繊維が存在しているだけで，繊維や成形時に巻き込んだ空気などにより樹脂の再結合が弱められ，樹脂だけを成形した場合より力学的強度が低下することを報告している。ウエルド部の強度を向上させるため，合流後さらに流動するように樹脂溜り（コールド　スラグウエル）をつけることは有効であるとされている。

分岐合流部における高分子水溶液の２次元粘弾性流れについては西村ら[4)〜7)]が研究し，粘弾性流体とニュートン流体では循環流れが発生する位置が反対になることを報告している。

短繊維を分散した高分子流体の金型内での分岐や合流流れにおける繊維の流れ状態を知ることは，製品設計や金型設計上重要であるが，分岐や合流部での繊維挙動に関する研究は少ない。本章では，間隙の小さいＴ形およびＹ形スリットを用いて，短繊維を含有した高分子水溶液の分岐および合流流れでの繊維の配向状態を，ニュートン流体の場合と比較して明らかにすることとした。

6．2 実験装置および実験方法

繊維挙動撮影装置，流体，繊維配向角分布の測定法および評価法は第３章で報告したものと同じであるため，ここでは省略する。

Ｔ形スリットの形状を図6.1に示す。Ｔ形スリットにおいて管①と③を本管，管②を支管とする。本管および支管のスリット間隙とスリット幅はそれぞれ0.5

mm と 10 mm で，各管の断面積は等しい。

図 6.2 に各管のなす角度が 120° の対称なY形スリットの形状を示す。各管のスリット間隙とスリット幅は 0.5 mm と 10 mm で，各管の位置は対称であるが，管①と③を本管，管②を支管とする。本管および支管のスリット間隙とスリット幅はそれぞれ 0.5 mm と 10 mm で，各管の断面積は等しい。

T形およびY形スリット内流れでの分岐および合流流れの種類を表 6.1 に示す。表中の太線は分岐前または合流後で，細線と比べると流量が多いことを示している。T形スリット内流れは 4 種類あるが，Y形スリットの場合には各管が対称であるため，流れは 2 種類である。

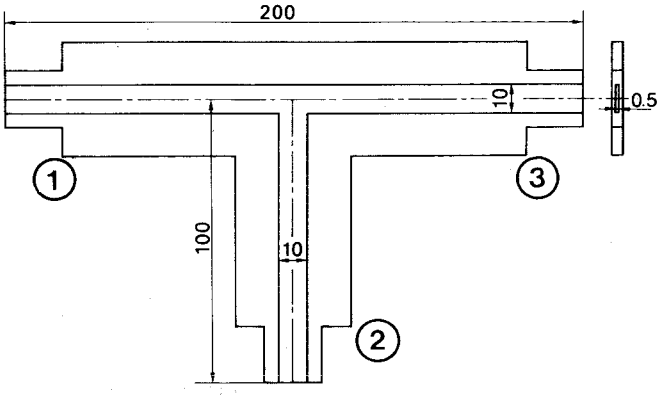


図 6.1　T形スリットの形状
（①，③；本管，②；支管）

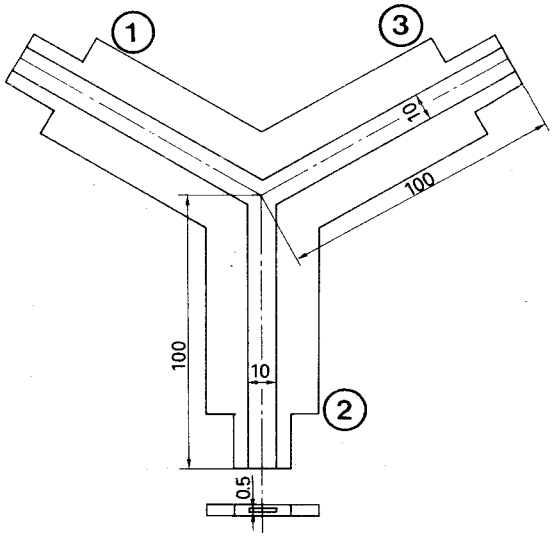
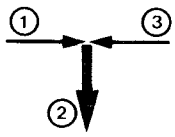
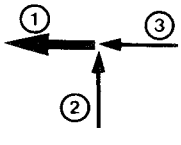
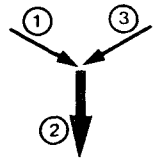
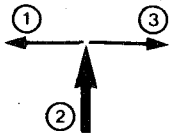
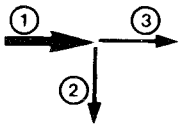
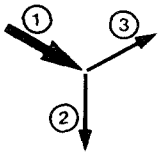


図 6.2　Y形スリットの形状
（①，③；本管，②；支管）

表6.1　T形およびY形スリット内流れの種類

	T形スリット		Y形スリット
合流流れ			
分岐流れ			

6．3　T形スリット内流れにおける繊維挙動

T形スリット内流れは，合流流れと分岐流れがそれぞれ2種類存在する。短繊維を分散した高分子流体のT形スリット内流れにおける繊維挙動を，ニュートン流体を用いた場合と比較して明らかにする。

6．3．1　合流流れでの繊維挙動

a）流線模様

T形スリットの合流流れは，本管①と③から支管②に流入する流れと，本管③と支管②から本管①に流入する流れがある。本管①の流量が0.23 cc/sec. のとき各流れの流線模様を図6.3と図6.4に示す。合流流れでは合流した流体の境界を示す線が明確に現われているが，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんど見られない。流量が多くなると，流線模様の曲率がわずかに小さくなる傾向が見られる程度であった。各合流流れの模式図を図6.5と図6.6に示す。本管①と③からの流れが支管②に流入する合流流れでは，合流部で拡大された後縮小する流れと，拡大されずに徐々に縮小する流れが存在している。また，本管③と支管②からの流れが本管①に流入する合流流れでは，本管③と支管②の角部付近で流れは拡大し，そ

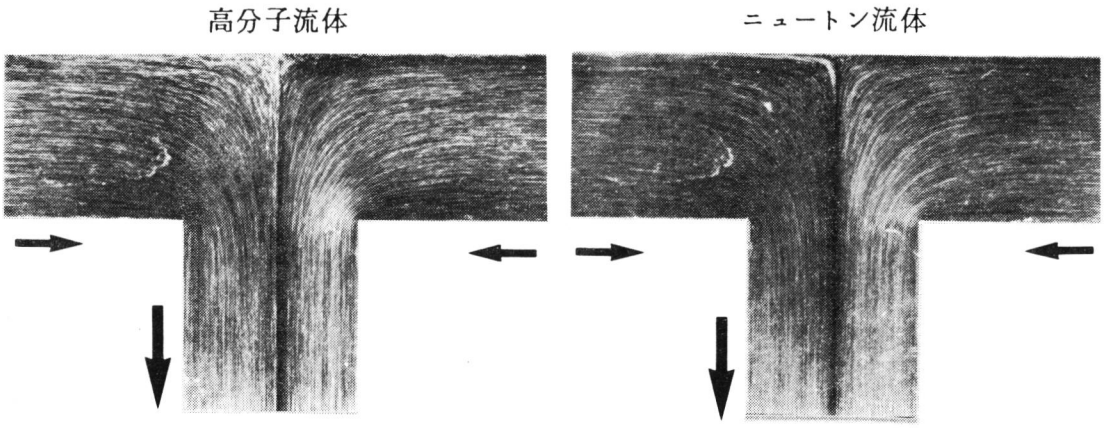


図 6.3　支管②へ合流する合流流れの流線模様

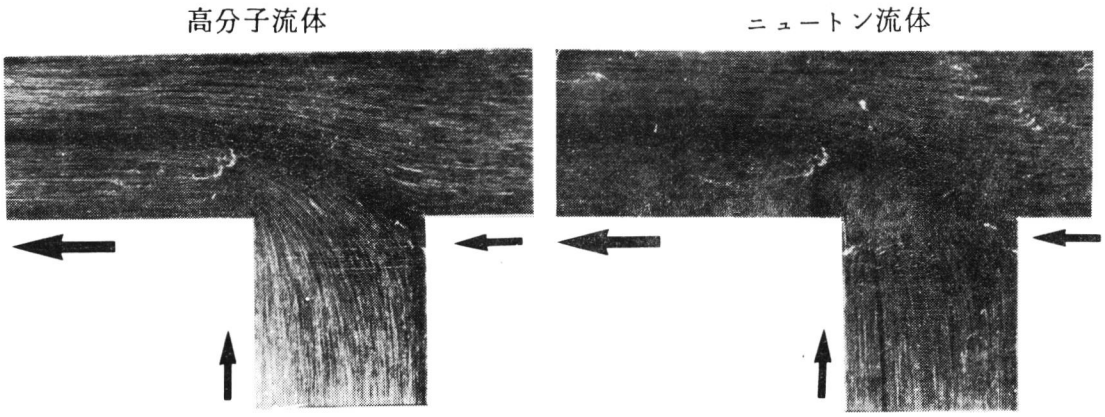


図 6.4　本管①へ合流する合流流れの流線模様

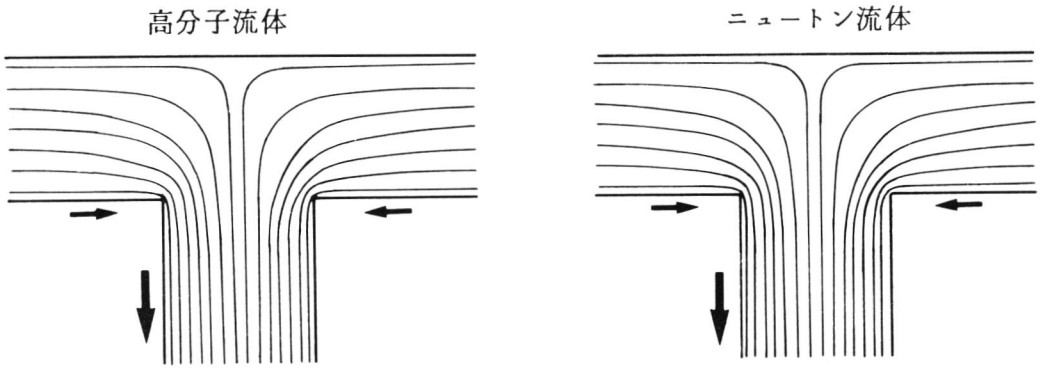


図 6.5　支管②へ合流する合流流れの流線模様の模式図

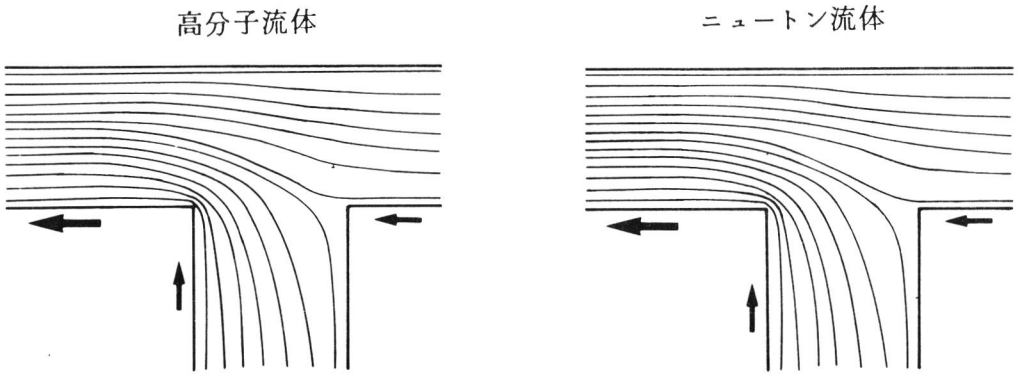


図 6.6　本管①へ合流する合流流れの流線模様の模式図

の後徐々に縮小して本管に流入している。しかし，その他の合流部分では流れは縮小流れである。このように，T形スリットの合流流れにおいては，合流部で拡大流れと縮小流れが存在していることがわかる。

b）合流部での繊維挙動

本管①と③からの流れが，支管②へ流入する合流流れにおける繊維挙動を図 6.7 に示す。高分子流体では流線模様が拡大している所で，流れに沿った繊維と流れとほぼ垂直に配向した繊維が観察され，合流部付近での繊維配向は乱れている。このように，繊維が流れ方向とそれに垂直方向に配向する現象は，拡大・縮小スリット

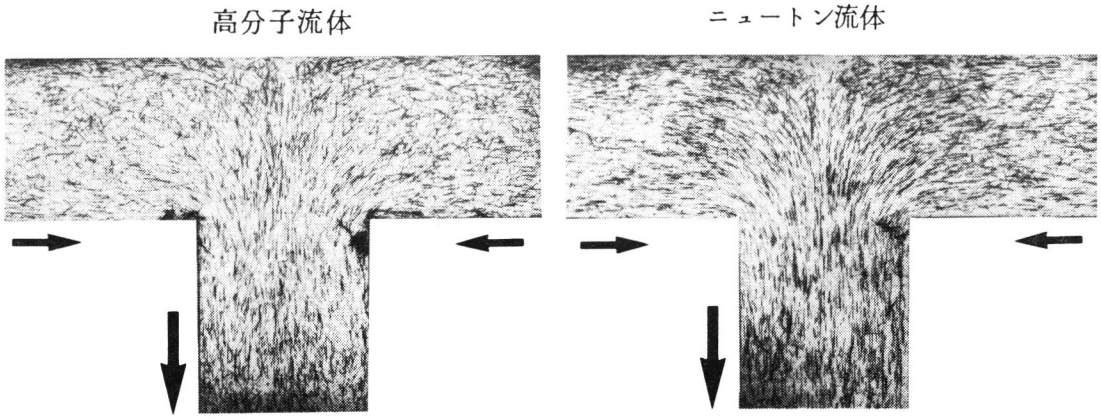


図 6.7　支管②へ合流する合流流れでの繊維挙動

や直交エルボスリット内流れで，流線模様が拡大するときに観察された現象と同じである。いっぽう，ニュートン流体の場合には，短繊維は流線模様にほぼ沿って配向している。しかし，流体の合流部で繊維が存在しない部分が見られ，この部分は流線模様で合流した流体の境界が明確に現われていた所と一致している。繊維が存在していない所の流線模様は，直交エルボスリットの直交部での流線模様の形状と似ている。すなわち，流線模様が大きく拡大し，流れの方向が変化する所で，流速が速くなる部分である。

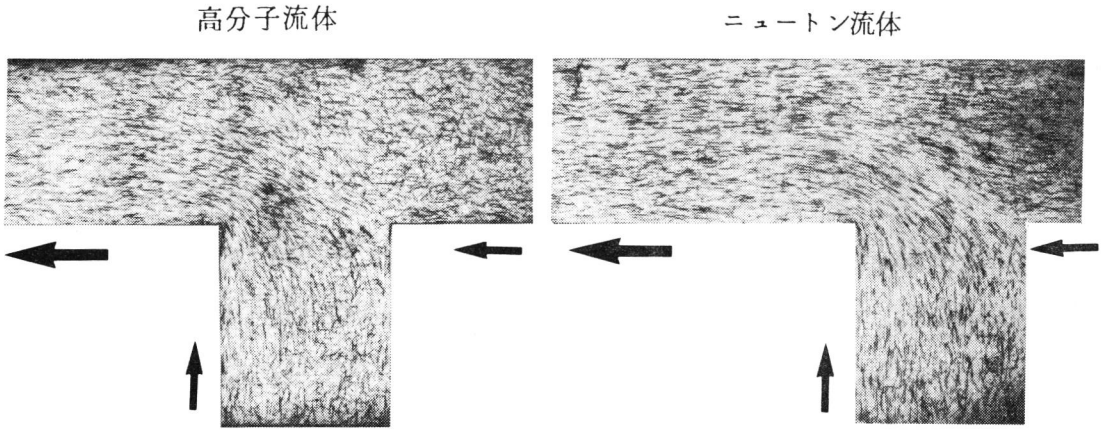


図 6.8　本管①へ合流する合流流れでの繊維挙動

図 6.8 に示す本管③と支管②からの流れが，本管①へ流入する高分子流体の合流流れでの繊維挙動は，本管①と③から支管②へ合流する場合と同様に流線模様が拡大している所で，繊維は流れ方向とそれに垂直方向に規則的に分かれて配向している。また，ニュートン流体の場合には，スリットの内部で繊維が存在していない所は流線模様で流体の境界が明確に現われていた所と一致し，合流後の本管①の内部まで明確にこの現象が現われている。このことから，ニュートン流体の場合には，スリットの角部だけでなく流れが合流したスリット内部においても繊維がほとんど存在していない所が生じることがわかる。

T 形スリットの合流流れは図 6.3 から図 6.6 に示したように 2 種類あり，流線模

様は合流による流体の境界層が明確に現われ，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんどなかった。しかし，繊維挙動は図 6.9 と図 6.10 にその模式図を示すように，流体による違いが現われていた。すなわち，高分子流体では合流流れによる境界線が始まる所においてわずかに繊維が存在しない所が見られる程度であるが，ニュートン流体の場合には流線模様の境界層では繊維がほとんど存在していない。これは，高分子流体では合流部で流体間に高分子相互の分子のからみあいによる分子鎖の移動があり，この分子の移動により繊維が流体の境界層に引き込まれるため，流体の境界層に繊維が存在するものと考えられる。しかし，ニュートン流体では，流体の境界層で溶

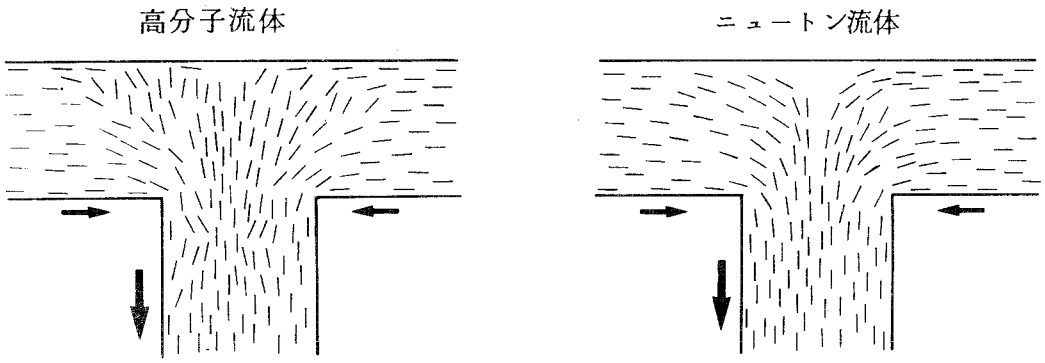


図 6.9　支管②へ合流する合流流れでの繊維挙動の模式図

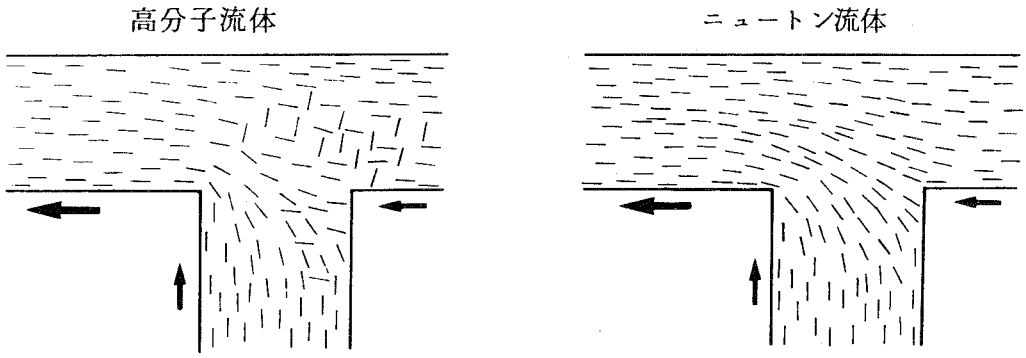


図 6.10　本管①へ合流する合流流れでの繊維挙動の模式図

質分子の移動があっても分子が小さいため，繊維の配向に影響を与えないものと考えられる。また，高分子流体の場合には，合流後の支管②および本管①の流入部付近で繊維は絞られ，その後放射状に拡散した配向が見られる。この現象はニュートン流体の場合には見られず，合流後の繊維はほぼ流線模様に沿って流れている。合流部でのこのような繊維挙動の現象は，高分子流体が粘弾性流体であり，流体の弾性効果によるものと考えられる。

6．3．2 分岐流れでの繊維挙動

a） 流線模様

T形スリットの分岐流れは支管②から本管①と③へ分かれる流れと，本管①から本管③と支管②へ分かれる流れがある。分岐前の流量が 0.23 cc/sec. のときの各流れの流線模様をそれぞれ図 6.11 と図 6.12 に示す。各分岐流れとも高分子流体とニュートン流体による流線模様の違いはほとんど見られない。

各分岐流れの流線模様の模式図を図 6.13 および図 6.14 に示す。分岐流れでは，合流流れに見られたような流体の境界線は現われていないが，流線模様の形状は合流流れの場合と同じであり，模式図から分岐流れと合流流れの区別はほとんどでき

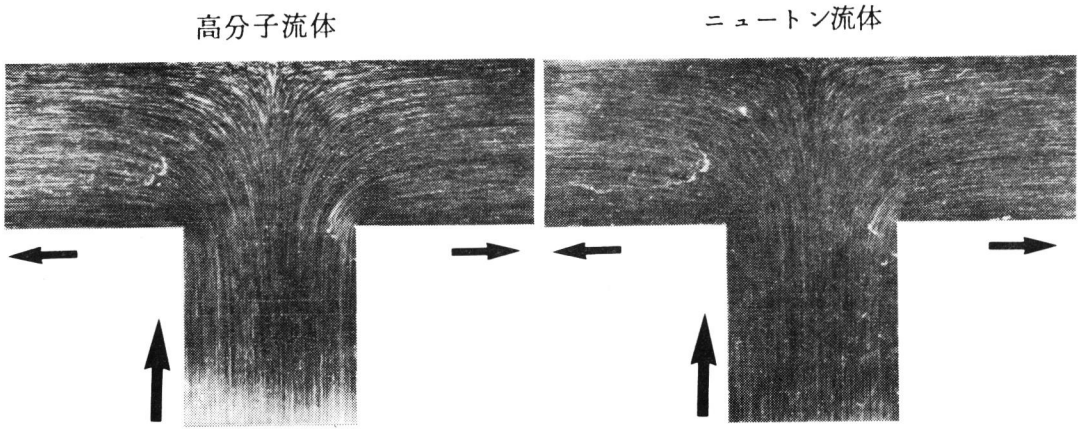


図 6.11 支管②からの流れが本管①と③へ分かれる分岐流れの流線模様

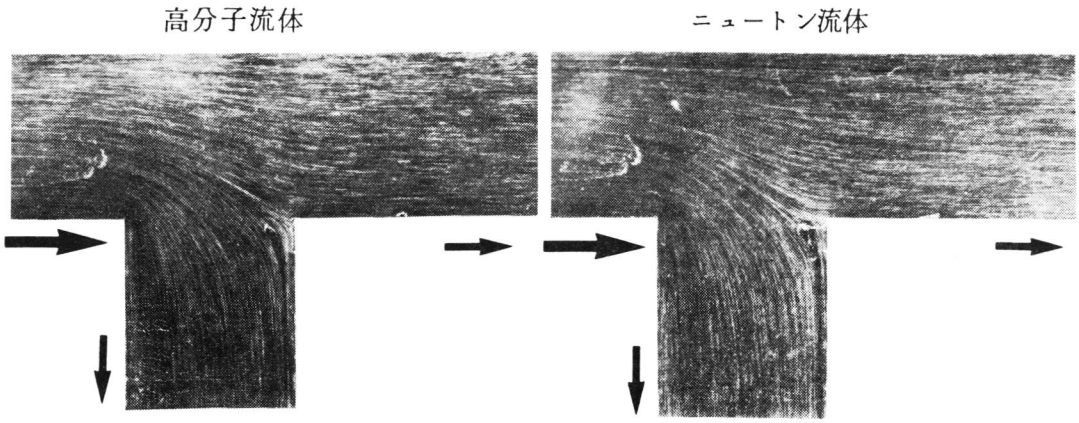


図 6.12　本管①からの流れが本管③と支管②へ分かれる分岐流れの流線模様

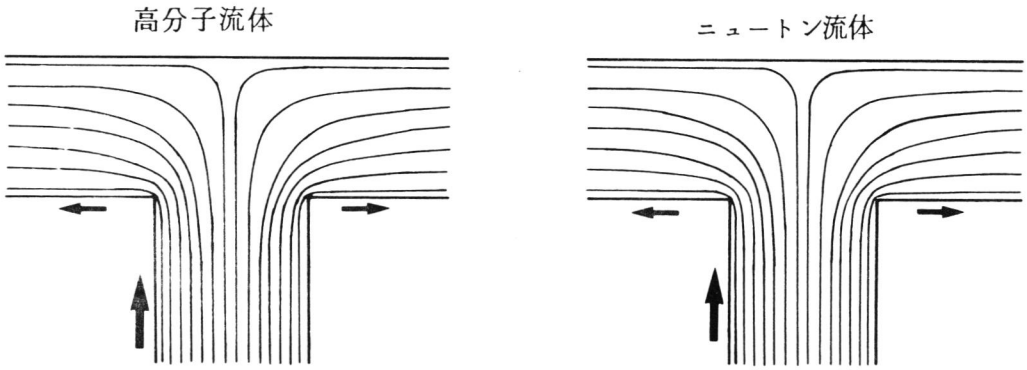


図 6.13　支管②からの流れが本管①と③へ分かれる分岐流れの流線模様の模式図

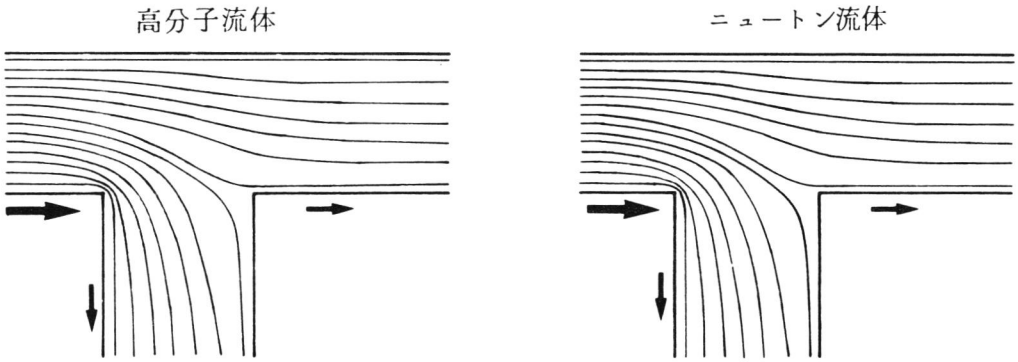


図 6.14　本管①からの流れが本管③と支管②へ分かれる分岐流れの流線模様の模式図

ない。分岐流れでは，合流流れの場合と比べると分岐部での流体の流れは拡大流れが多いことがわかる。

b） 分岐部での繊維挙動

支管②からの流れが本管①と③へ流入する分岐流れにおける繊維挙動を図6.15に示す。高分子流体に分散した短繊維は，支管②内では壁面での剪断速度に対応した繊維配向を保っているが，分岐部では流線模様に沿った繊維と流線模様にほぼ垂直に配向した繊維とに分かれて流れ，扇状に配向した繊維が明確に見られる。いっ

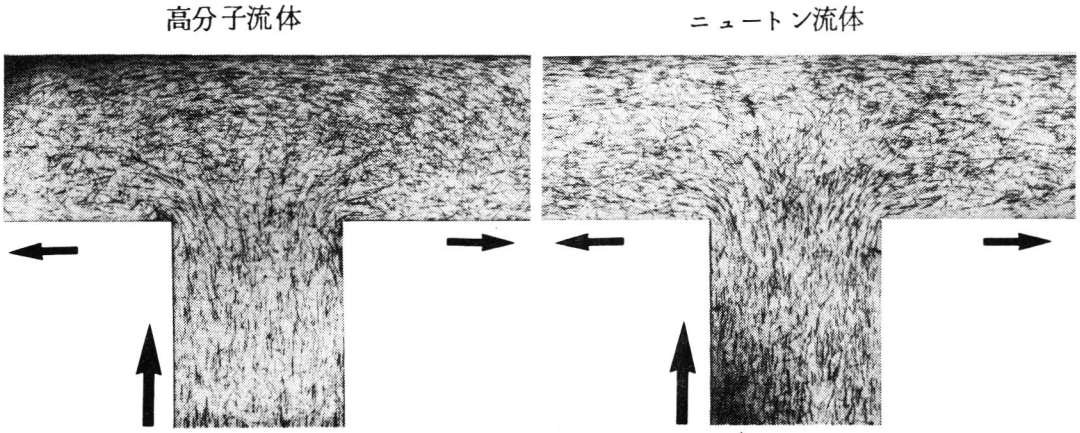


図6.15 支管②からの流れが本管①と③へ分かれる分岐流れでの繊維挙動

ぽう，ニュートン流体に分散した繊維は流線模様に沿って放射状に流出するが，流出方向の壁面の影響を受けて繊維配向は乱れ，その後壁面近くの繊維は壁面とほぼ平行になり，本管①や③へ流れる。

本管①からの流れが本管③と支管②へ流入する分岐流れにおける繊維挙動を図6.16に示す。高分子流体の場合には，流線模様とほぼ垂直に配向した繊維が分岐した本管③や支管②内のかなり下流まで及び，繊維が扇状に配向しているのが認められる。いっぽう，ニュートン流体に分散した繊維は分岐による多少の乱れはあるが，ほぼ流線模様に沿って配向している。しかし，ニュートン流体の分岐流れでは流体が拡大している部分が多いため，繊維配向は合流流れの場合に比べると悪いが，

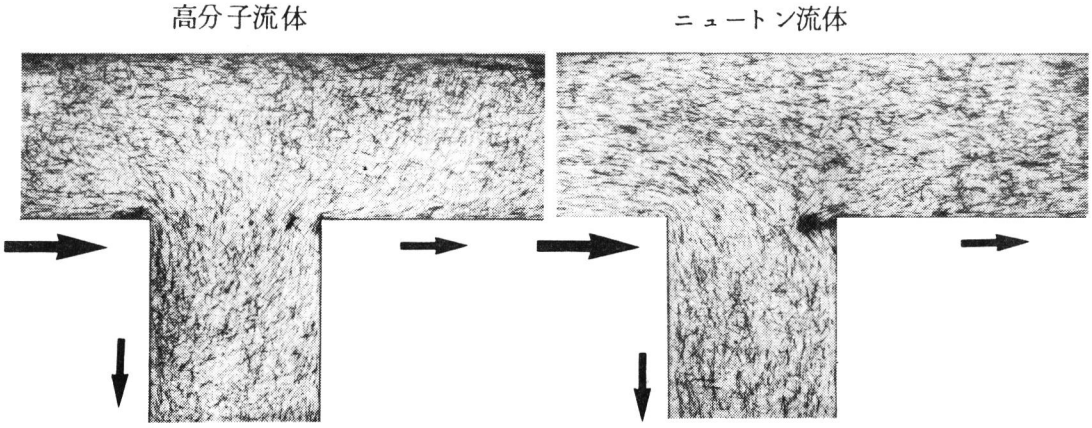


図 6.16 本管①からの流れが本管③と支管②へ分かれる分岐流れでの繊維挙動

合流流れで現われていたスリット内で繊維が存在しない現象は見られず，繊維の分布状態はスリット内でほぼ均一であった。図 6.17 と図 6.18 に各分岐流れにおけ

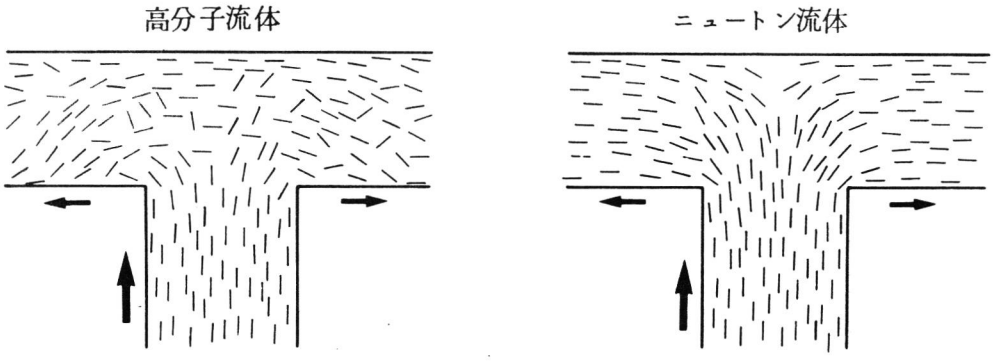


図 6.17 支管②からの流れが本管①と③へ分かれる分岐流れでの繊維挙動の模式図

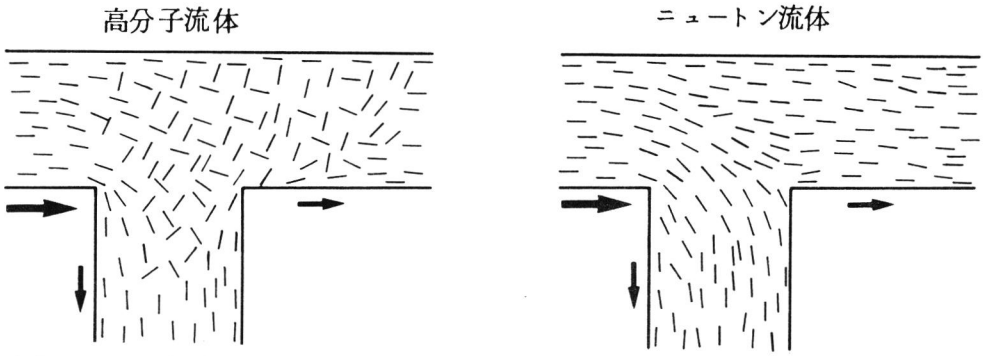


図 6.18 本管①からの流れが本管③と支管②へ分かれる分岐流れでの繊維挙動の模式図

る繊維挙動の模式図を示す。

合流流れと分岐流れで流線模様は良く似ていたが，繊維挙動はそれぞれ全く異なっている。これは，合流流れと分岐流れで流体の拡大や縮小の割合が異なり，繊維は流れの拡大や縮小の影響をアルミニュウム粉末より強く受けるため，分岐および合流部での繊維挙動が異なるものと考えられる。

6．4　Y形スリット内流れにおける繊維挙動

Y形スリット内流れは，各管の位置が対称であるため，合流流れおよび分岐流れはそれぞれ1種類存在する。短繊維を分散した高分子流体のY形スリット内流れにおける繊維挙動を，ニュートン流体を用いた場合と比較して明らかにする。

6．4．1　流線模様

Y形スリットの合流流れおよび分岐流れの流線模様をそれぞれ図6.19および図6.20に示す。合流流れでは，T形スリットの合流流れの場合と同様に，合流した流体の境界を示す線が見られる。図6.21および図6.22にそれぞれ合流流れと分岐流れの流線模様の模式図を示すが，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんど見られない。合流流れでは，徐々に縮小してゆく流れと，流れが一度拡大し，その後

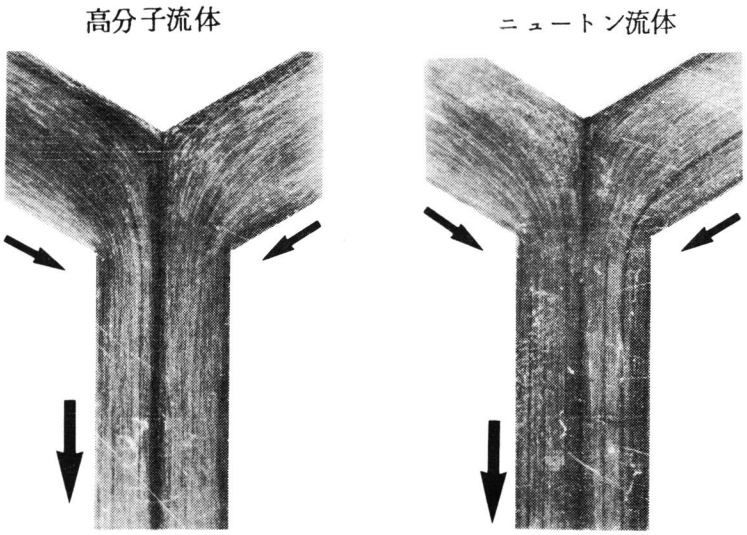


図6.19　合流流れの流線模様

縮小してゆく流れが存在している。分岐流れでは，スリット各部での流れの拡大割合は異なるが，流れはすべて拡大している。

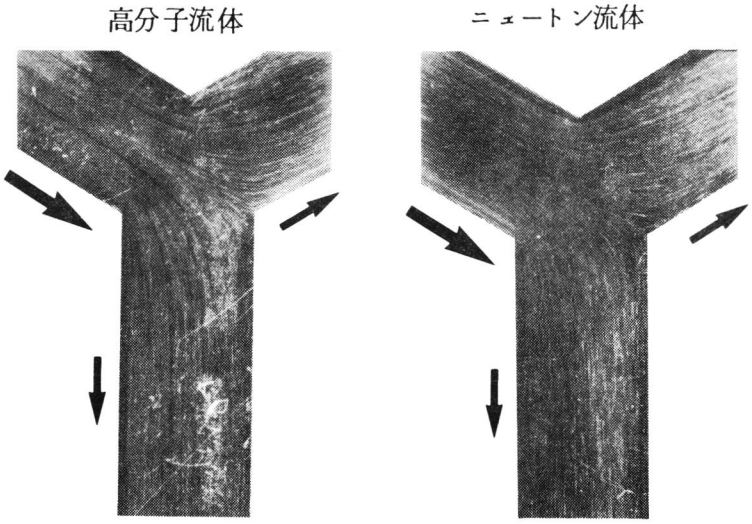


図 6.20　分岐流れでの流線模様

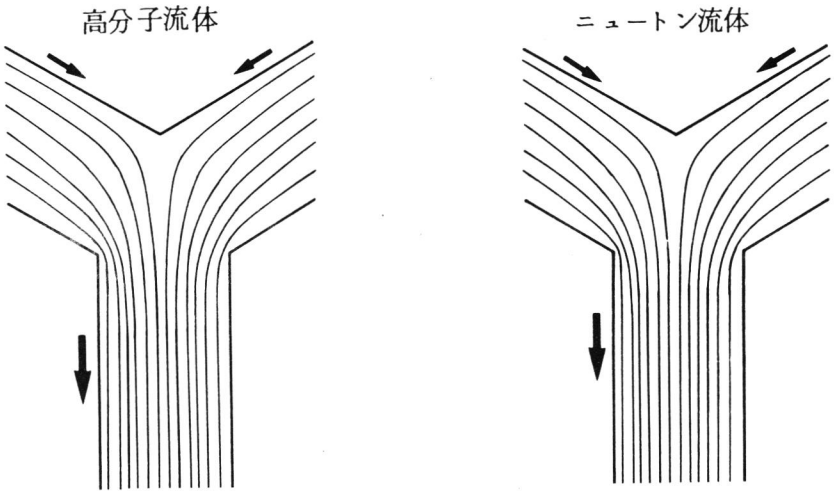


図 6.21　合流流れでの流線模様の模式図

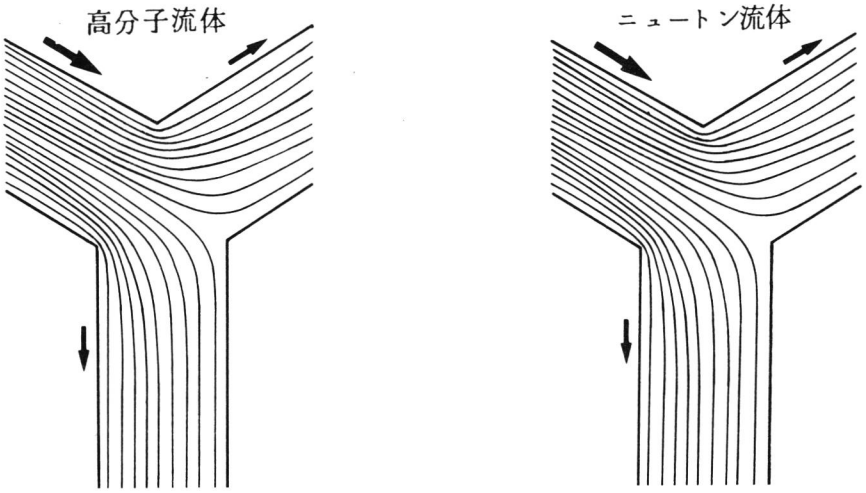


図 6.22　分岐流れでの流線模様の模式図

6．4．2 スリット内流れでの繊維挙動

合流流れおよび分岐流れでの繊維挙動をそれぞれ図6.23 および6.24 に示す。高分子流体では，合流および分岐部付近での流線模様が拡大している所で，繊維は流れ方向とそれに垂直方向に配列している。ニュートン流体では，繊維はほぼ流線

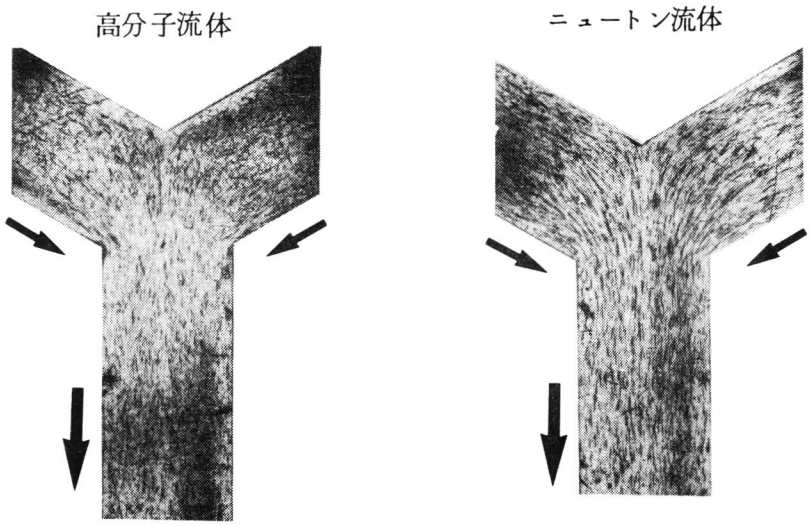


図 6.23 合流流れでの繊維挙動

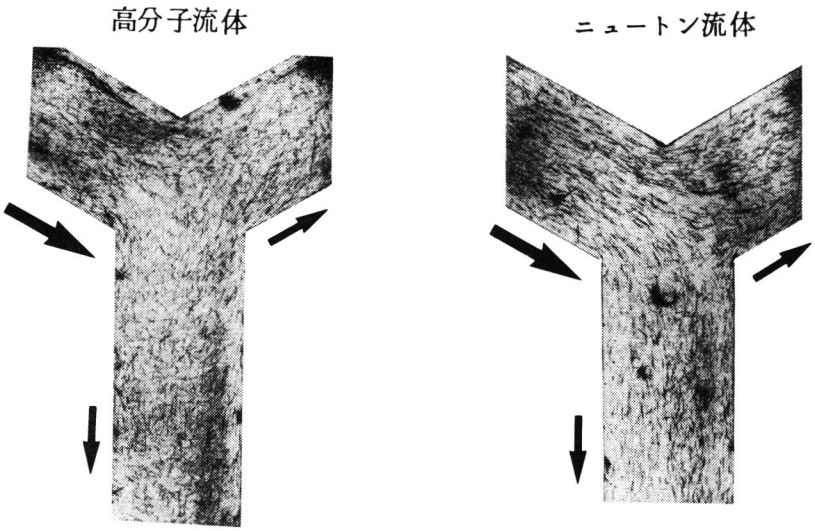


図 6.24 分岐流れでの繊維挙動

模様に沿って配向し，高分子流体の場合と比べると繊維の配列状態は良い。しかし，ニュートン流体の分岐流れにおいて，支管②の本管①側で繊維が少なくなっている。これは，流れの拡大により流速が低下し，繊維の慣性により流線模様に沿って繊維が流れなかったためと考えられる。高分子流体の場合にはこのような現象は見られなかったが，第2章の繊維配向角分布の測定法の試料として作成した炭素繊維を分散した低密度ポリエチレンのダンベル型射出成形品において，図6.25に示すように，ゲート側に繊維が存在していない試料もあった。このように，短繊維を分散した溶融高分子の射出成形などでは，条件によっては繊維が不均一に分布する場合がある。本実験で行った条件と，射出成形の場合とは条件は種々異なるが，流速が急激に変化し，流れ方向が変わる所や流れが分岐および合流する所では繊維の流れは不安定になり，繊維の配列状態や分布の状態が変化すると考えられる。

図6.25 炭素繊維を分散した低密度ポリエチレンの射出成形品
（矢印；射出方向）

Y形スリットの各流れにおける繊維挙動は，T形スリットの場合とほとんど同じであったが，T形スリットに現われていた各流れの繊維挙動ほど各現象は顕著ではなかった。これは，図6.26に示すように，Y形スリットの斜線で示した分岐または合流部の体積は，T形スリットの場合の約43.3％と小さいため，流体の流れの拡大および縮小割合がT形スリットの場合と比べて少ないのが原因であると考えられる。

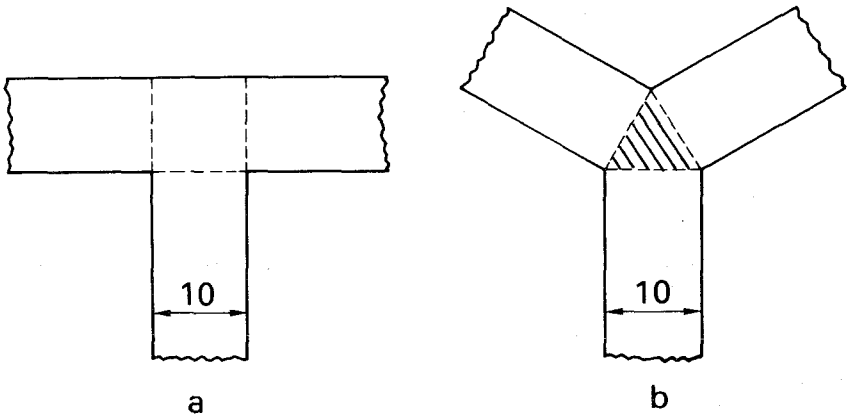


図6.26　T形スリット(a)およびY形スリット(b)の
分岐・合流部の形状と大きさ

6.5 結　　言

T形およびY形スリットを用いて，短繊維が分散した高分子流体の分岐流れと合流流れでの繊維挙動を，ニュートン流体の場合と比較して明らかにした。分岐流れと合流流れは，T形スリットの場合にはそれぞれ2種類，Y形スリットの場合にはそれぞれ1種類存在する。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 合流流れの流線模様では，合流した流体の境界を示す線が明確に現われていた。合流流れでは，拡大されたあと縮小する流れと，拡大されずに徐々に縮小する流れが存在していたが，高分子流体とニュートン流体による違いや流量による違いはほとんど見られなかった。

(2) 合流流れでの繊維挙動は，高分子流体の場合には流れが拡大している所で，流線模様に沿った流れとそれに垂直に配向した繊維が観察された。また，合流後の管内で繊維は絞られた状態で配向し，その後放射状に拡散する現象が見られたが，これは高分子流体の弾性効果によるものと思われる。

(3) 分岐流れの流線模様は，合流流れのときに見られた境界を示す線が存在しないことを除けば，合流流れの場合とほぼ同じ形状であり，高分子流体やニュートン流体による違いはほとんどなかった。

(4) 分岐流れは合流流れに比べると，スリット内での流体の拡大流れが多いため，高分子流体の合流流れで現われていた特異的な繊維挙動は合流流れの場合より顕著に現われていた。ニュートン流体の合流流れでは，流体が合流する境界付近に繊維が存在しない現象が見られたが，分岐流れの場合には繊維の分布はスリット内でほぼ均一であり，繊維配向は高分子流体の場合より良く，繊維はほぼ流線模様に沿って流れていた。しかし，流体の流れ方向に壁面があり，流れが左右に分岐する場合には，壁面付近での繊維は壁面の影響を受けて，壁面とほぼ平行に配列していた。

(5) T形スリットとY形スリット内の流れが拡大している所や縮小している所では，繊維はほとんど同じ挙動を示すが，T形スリットの分岐または合流部の体積はY形スリットの場合と比べると約2.3倍多いため，拡大や縮小の割合も大きく，各流れでの特異な繊維挙動はY形スリットの場合より顕著に現われていた。

参　考　文　献

1）柿崎哲司，遠藤　紘，黒田敏彦；プラスチックス，25，4，58（1974）

2）甲田広行；強化プラスチックス，14，6，348（1968）

3）日本化学編；複合材料，№8，p.144，学会出版センター（1975）

4）西村太良，中村喜代次，堀川　明；繊維機械学会第35回年次大会，講演論文集，3（1982）

5）中村喜代次，西村太良，伊藤英人，堀川　明；繊維機械学会第３６回年次大会，講演論文集，４７（１９８３）
6）中村喜代次，温　洪昭，西村太良，堀川　明；繊維機械学会第３６回年次大会，講演論文集，４９（１９８３）
7）西村太良，中村喜代次，堀川　明；繊維機械論文集，３６，５，６７（１９８３）
8）種子田定俊；高分子，２２，２５４，２６４（１９７３）

第7章　盲管を有するスリット内流れにおける繊維挙動

7．1 緒　　言

プラスチックやゴムの成形では，複雑な形状の成形品が作られるため，金型内で流れが分岐や合流し，さらに一部が盲管となった状態で金型を流体が流れる場合もある。いっぽう，短繊維を分散した熱可塑性樹脂の射出成形やＢＭＣの成形においても，かなり複雑な形状の短繊維強化プラスチックが成形可能であるため，金型内で一部が盲管となり，金型内を短繊維を分散した流体が流動することも考えられる。また，金型内では樹脂溜りを設けるなど，分岐や合流流れだけでなくスラグ　ゲートなども存在するため，盲管を有する金型内流れでの繊維挙動は重要である。

高分子流体の分岐流れや合流流れについては研究されているが[1)〜4)]，一部を盲管としたスリット内流れにおける流体の流れや，粉末および短繊維を分散した流体の流れに関する研究は少ない。本章では，Ｔ形およびＹ形スリットの３つの管路のうちの１つの末端部を止めた管路，すなわち盲管を作り，短繊維を分散した流体を流して，盲管を有するＴ形およびＹ形スリット内における繊維の配向状態を明らかにすることとした。さらに，Ｔ形スリットを用いて直管部を流体が流れるように盲管を作り，盲管部に着色した流体，アルミニュウム粉末および短繊維を分散した流体を満たして直管部に流体のみを流し，またその逆に，盲管部に流体のみを満たして直管部にアルミニュウム粉末や短繊維を分散した流体を流して，盲管部での繊維挙動を明らかにすることとした。

7．2 実験装置および実験方法

Ｔ形スリットとＹ形スリットの形状を図7.1および図7.2に示す。各スリットは第６章の分岐および合流流れで使用したものと同じであるが，３つの管路のうち１つを盲管とする場合には，表7.1に示す種類が存在する。すなわち，Ｔ形スリットの場合には，本管③を盲管として本管①から支管②に流れる場合と，その逆に支管②から本管③に垂直に流れる場合，それに支管②を盲管として本管①から本管③へ

真直ぐ（180°方向）に流れる3通りの流れがある。また，Y形スリットの場合には，各管が対称であるため，支管②を盲管とし本管①から本管③への流れだけである。

盲管での流体，アルミニュウム粉末および繊維の挙動については，T形スリットを用いて支管②を盲管とし，流体は本管①から本管③の直管部に流す。まず，盲管内に墨で着色した流体やアルミニュウム粉末および短繊維を分散した流体を満たし，本管①から本管③へ流体のみを流動させた。つぎに，その逆に盲管内に流体のみを満たし，アルミニュウム粉末や短繊維を分散した流体を本管①から本管③へ流動させて実験を行った。

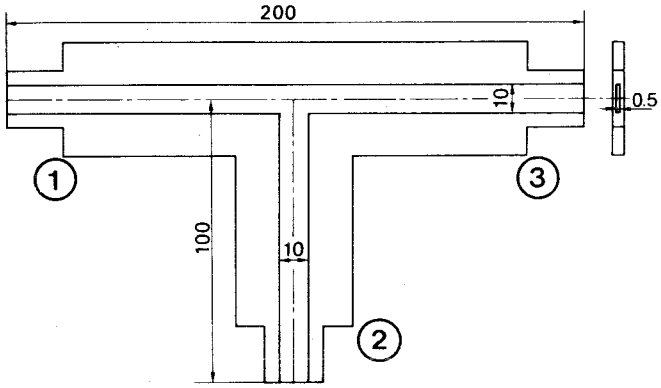


図7.1　T形スリットの形状
（①，③；本管，②；支管）

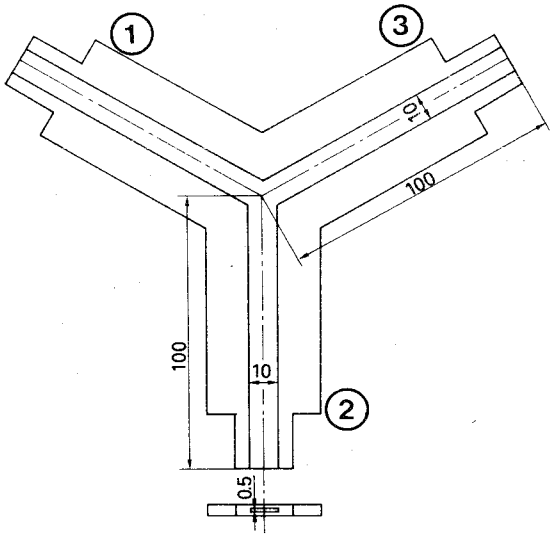


図7.2　Y形スリットの形状
（①，③；本管，②；支管）

盲管内での流体，アルミニュウム粉末および短繊維の挙動は，第3章で報告した繊維挙動撮影装置を用いて行い，定量ポンプを始動させ，流体を流し始めてから850秒後までの流動状態を撮影した。流れが一定したときの流量は0.23 cc/sec.

表7.1　盲管を有するT形およびY形スリット内流れの種類

T形スリット			Y形スリット
①③②	①③②	①③②	①③②

とした。

流体は高分子流体として2wt%のポリエチレンオキサイド水溶液，ニュートン流体として水アメを水に溶解させた水溶液を使用した。その他，アルミニュウム粉末や短繊維などは第3章で報告したものと同じであるため省略する。

7．3　盲管を有するT型スリット内流れにおける繊維挙動

盲管を有するT形スリット内流れは3種類存在する。短繊維を分散した高分子流体の盲管を有するT形スリット内流れにおける繊維挙動を，ニュートン流体を用いた場合と比較して明らかにする。

7．3．1　流線模様

盲管を有するT形スリット内での流れは，本管③を盲管として本管①から支管②に流れる場合と，その逆に支管②から本管③に垂直に流れる場合，それに支管②を盲管として本管①から本管③へ真直ぐ（180°方向）に流れる3通りの流れがある。盲管を有するT形スリット内流れにおける各流線模様を図7.3，図7.4および図7.5に示す。各流れにおける流線模様は盲管内以外では，高分子流体とニュートン流体の差はほとんどないが，盲管内ではニュートン流体の流れがほぼ対称に近い形であるのに対して，高分子流体ではやや非対象な流れをしている。しかし，流線模様を得るために用いたアルミニュウム粉末の盲管内での状態は異なっている。すなわち，高分子流体では各流れにおいて盲管内でアルミニュウム粉末は集合して停滞しているが，ニュートン流体ではアルミニュウム粉末は集合することなく盲管内ではほと

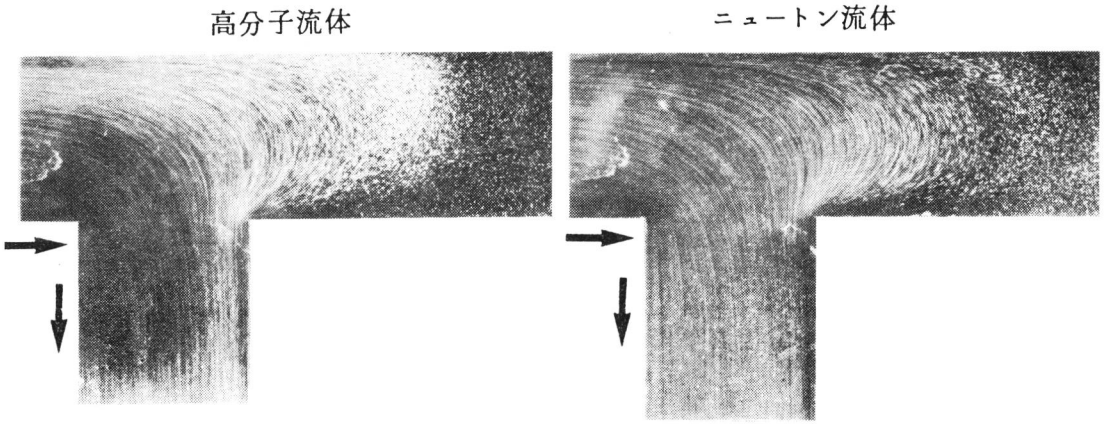


図 7.3　本管③を盲管として本管①から支管②へ流したときの流線模様

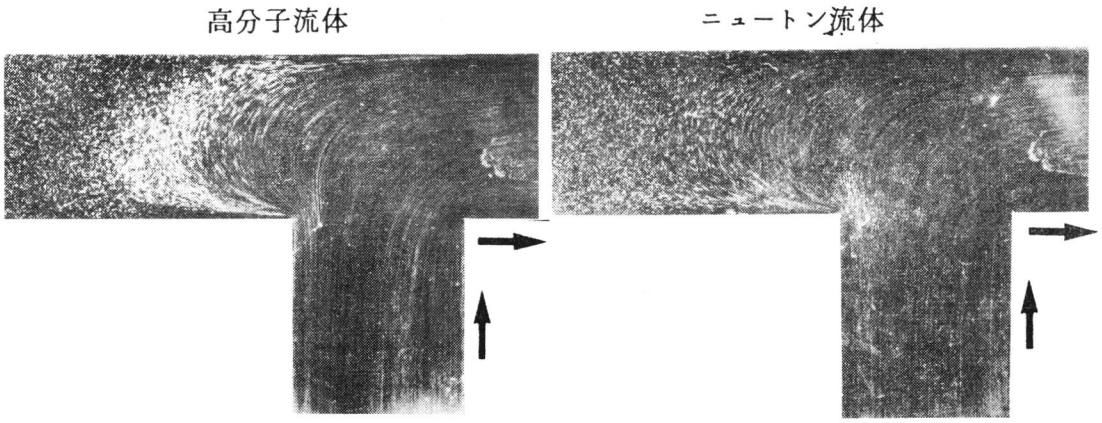


図 7.4　本管①を盲管として支管②から本管③へ流したときの流線模様

んど均一に分布している。このような現象は溶媒である水に溶解している溶質（ポリエチレンオキサイドと水アメ）の分子の大きさの違いによるものと考えられる。高高分子水溶液では，流体が流動しているときには高分子鎖は伸びた形で網目構造を形成し，ほぼ流れ方向に配向しているが，流速が遅い所や流体が停止している所では分子鎖はエントロピの大きい糸まり状態の球形に近い形状をしていると考えられる。そのため，盲管内へ流入したアルミニュウム粉末は流体の流速が遅くなると，

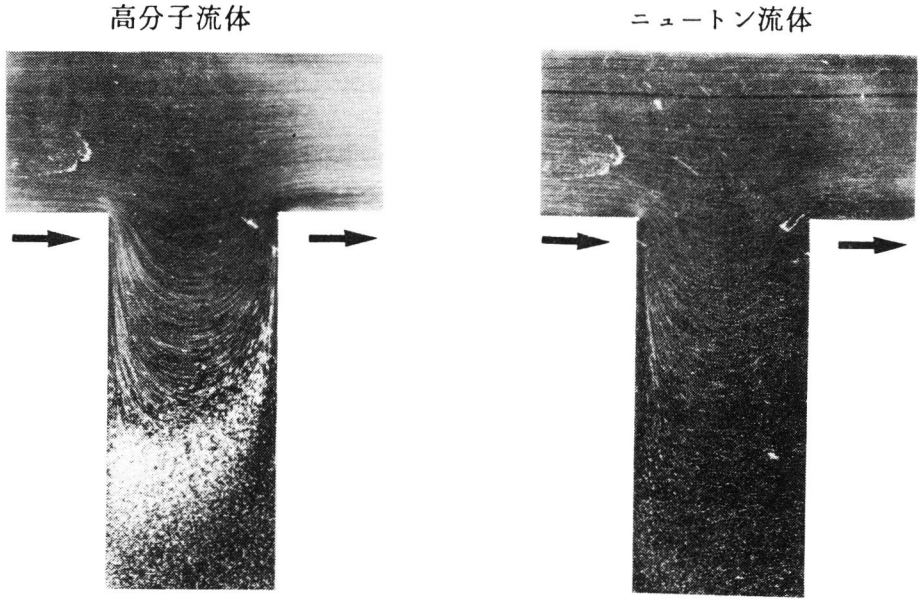


図 7.5　支管②を盲管として本管①から③へ流したときの流線模様

からみ合った分子鎖が糸まり状態になるため分子鎖の束縛を受け，最終的には糸まり状態の分子鎖内に閉じ込められて停止するため，盲管内でアルミニュウム粉末は集合し停滞すると考えられる。

しかし，ニュートン流体の場合には，分子は小さくアルミニュウム粉末の流れに影響を与えないと考えられ，微小なアルミニュウム粉末の重力による沈降速度は水中で 10^{-6} cm/sec.[8] 程度であることから，アルミニュウム粉末は流体の流れが遅い場合でも，流体とほぼ同じ速度で流動し停滞しないため，盲管内でのアルミニュウム粉末の分布がほぼ均一になると考えられる。

いままで用いた平行平板スリット，拡大・縮小スリット，直交ベンド，直交エルボスリットおよびT形スリットの分岐・合流流れでは，流線模様は高分子流体およびニュートン流体でほとんど同じであった。しかし，盲管を有するT形スリット内流れの場合のように，流体の流速が0の停止した状態から連続的に流速が変化している所では，アルミニュウム粉末でも高分子流体中の分子の影響を受けることがわかる。高分子量のポリエチレンオキサイドは工業的には凝集剤としても用いられていることから，流体が

停止している所や流速が遅い所ではポリエチレンオキサイド水溶液の凝集効果によりアルミニュウム粉末が集合したものと考えられる。

7．3．2 盲管を有するT型スリット内での繊維挙動

本管③を盲管として流体を本管①から支管②に直角に流した場合と，その逆に支管②から本管③に直角に流した場合，それに支管②を盲管とし本管①から本管③へ真直ぐに流したときの繊維挙動と流線模様の模式図を図7.6，図7.7および図7.8に示す。いずれの盲管を有するT形スリット内流れにおいても，流線模様は拡大しているため，高分子流体の場合には流線模様に沿った繊維と流線模様にほぼ垂直に

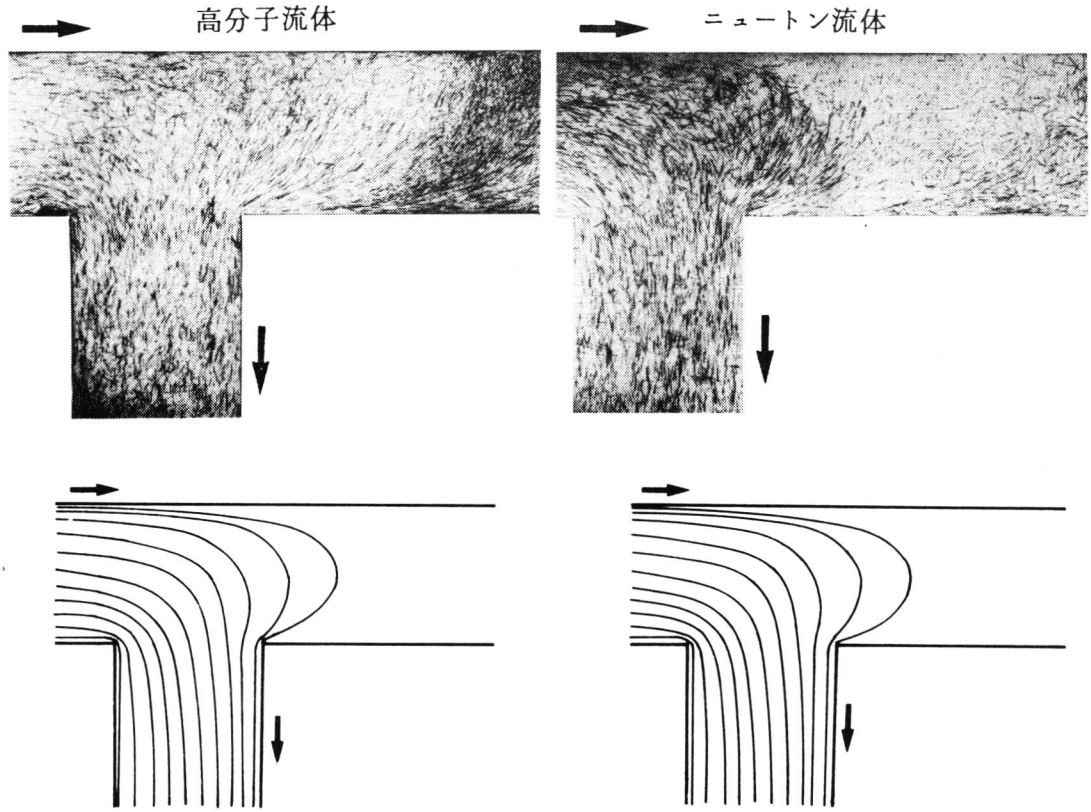


図7.6　本管③を盲管として本管①から支管②へ流したときの繊維挙動と流線模様の模式図

配向した繊維が観察される。また，繊維配向はニュートン流体の方が高分子流体に比べると良く，合流流れや分岐流れの場合と同じ傾向を示している。ところが，各繊維挙動の模式図を図7.9，図7.10および図7.11に示すように，盲管内での繊維の分布状態は高分子流体とニュートン流体の場合では著しく異なっている。すなわち，高分子流体の場合には盲管内で繊維は不均一には分布しているが，繊維が全

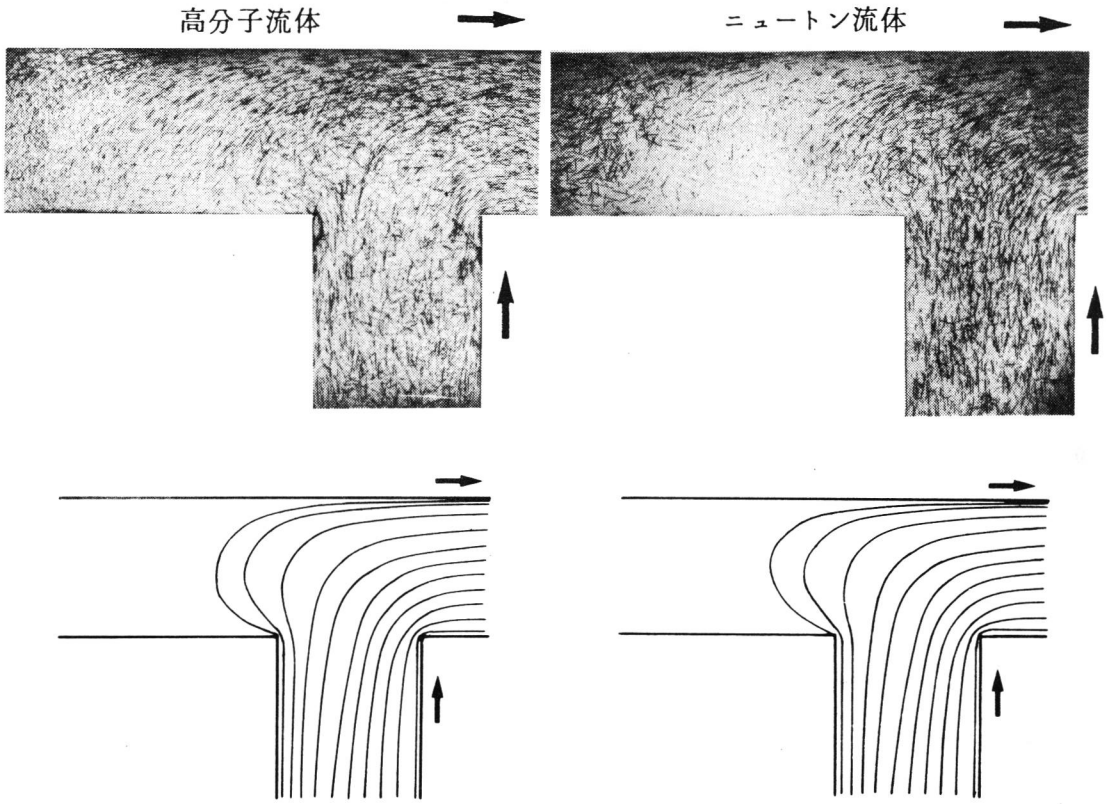


図7.7　本管①を盲管として支管②から本管③へ流したときの繊維挙動と流線模様の模式図

く存在していない所はない。しかし，ニュートン流体の場合には繊維が全く存在していない部分か，または存在していてもごく細かい繊維だけが存在している部分と繊維がほぼ均一に分布している部分とにはっきり分かれている。このような盲管内での繊維の分布状態の違いは，使用した流体の分子鎖の大きさの違いによるものだと思われる。

盲管を有するT形スリット内流れでは，最初流体は3つの管内に通しておき，つぎに盲管にする管路の末端を瞬間に閉鎖し，その後流体の流れが一定し，盲管内での繊維の流れが時間的にほとんど変化しなくなった状態で繊維挙動を撮影している。

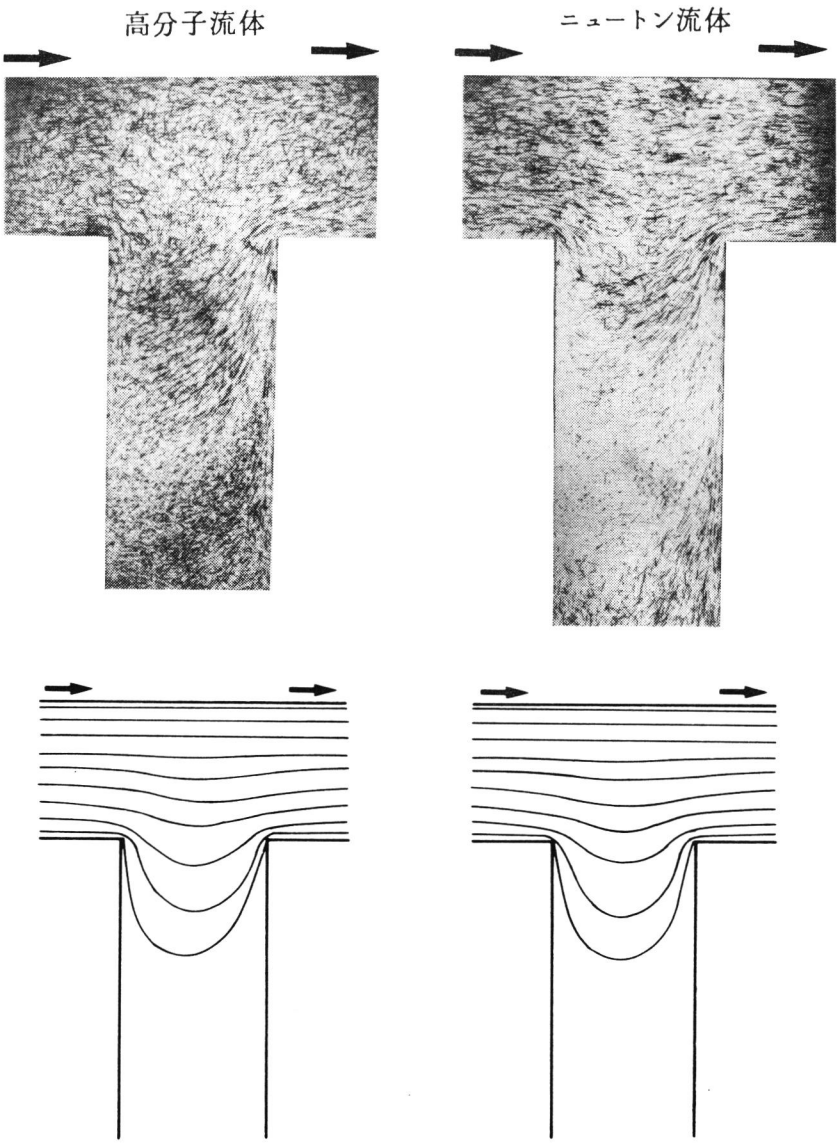


図7.8　支管②を盲管として本管①から③へ流したときの繊維挙動と流線模様の模式図

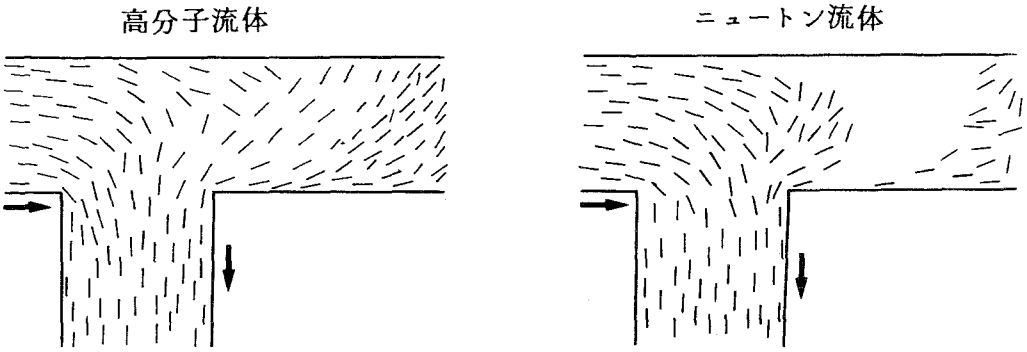


図 7.9　本管③を盲管として本管①から支管②へ流したときの繊維挙動の模式図

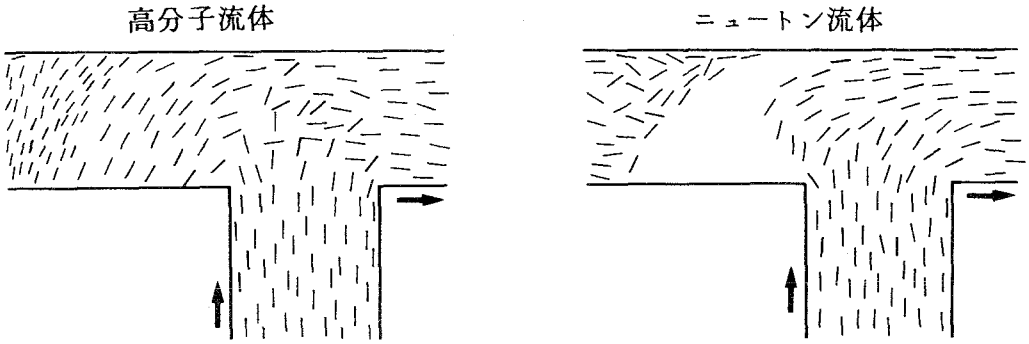


図 7.10　本管①を盲管として支管②から本管③へ流したときの繊維挙動の模式図

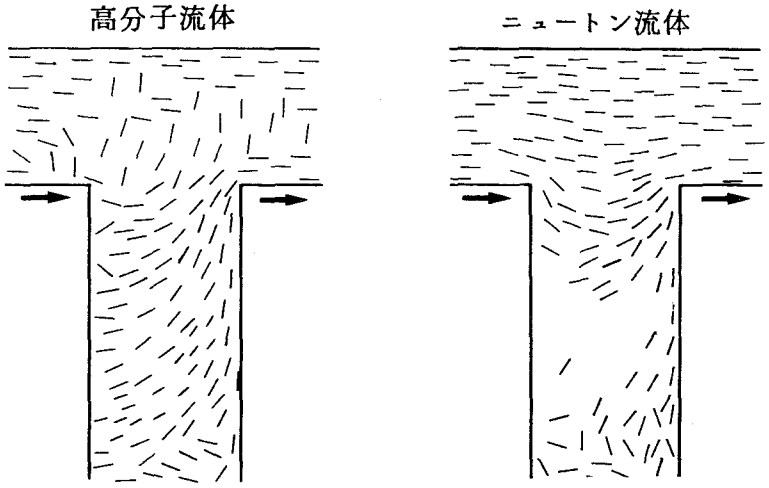


図 7.11　支管②を盲管として本管①から③へ流したときの繊維挙動の模式図

そのため，スリットの一端を閉じた瞬間は各管とも繊維の分布状態は同じである。盲管内での繊維の流れが時間的にほとんど変化しなくなるまで繊維挙動を観察した結果，高分子流体とニュートン流体では異なっていた。すなわち，高分子流体では繊維は盲管内で流線模様が観察された所までゆっくりではあるが供給されて流れていくが，比較的細かい繊維は途中で停止する。さらに，流線模様で流れがほとんど観察されなかった所にある比較的長い繊維だけは，きわめてゆっくりではあるが移動して引き抜かれてゆく。そのため，盲管内では，繊維の分布が不均一になり，細かい繊維だけが集合した所が存在してくる。

いっぽう，ニュートン流体では，盲管内への繊維の供給は，流量にはほとんど関係なくスリット幅の半分程度の距離までしか行かず，繊維の供給がなく流れだけが存在している所では，比較的長い繊維だけがゆっくり移動して流れてゆく。そのため，盲管内で比較的長い繊維だけが全く存在しなくなる現象が生じる。盲管内での繊維の供給や繊維の引き抜きなどの繊維挙動が，高分子流体とニュートン流体で異なる現象は，各流体中の溶質の分子の大きさの違いにより起因するものと考えられる。すなわち，高分子流体では流線模様に沿って伸びている分子鎖とともに繊維が引きずられてゆくため，閉じた管内の奥まで繊維は供給される。また，流線模様がほとんど観察されない所での比較的長い繊維の引き抜きは，流動している分子鎖に停止していた分子鎖が引っ張られるときに，ほぼ止った状態にある流体中の繊維が少しづつ引き出されて，繊維の一端が流動している流体中に出て，流れている分子鎖や速度勾配の影響を受けて，徐々に停止している糸まり状態の分子鎖からぬけ出して流れてゆくと考えられる。細かい繊維は長さが短かいため糸まり状の分子鎖内に閉じ込められて束縛され，しかも速度勾配の影響も小さいため，アルミニュウム粉末の場合と同様に管内に停滞する。長い繊維は短かい繊維よりも速度勾配の影響を強く受けて流動しやすいことは，ニュートン流体の場合に，閉じた管内で細かい繊維だけが残って分布していることからも理解できる。盲管内での繊維の移動については7.5節で報告する。

分岐および合流流れにおける，分岐部や合流部での繊維挙動は，高分子流体およびニュートン流体ともに流量による顕著な違いはなかったが，図7.12に示すように，T形スリットの盲管内での繊維挙動は高分子流体の場合には，流量により異な

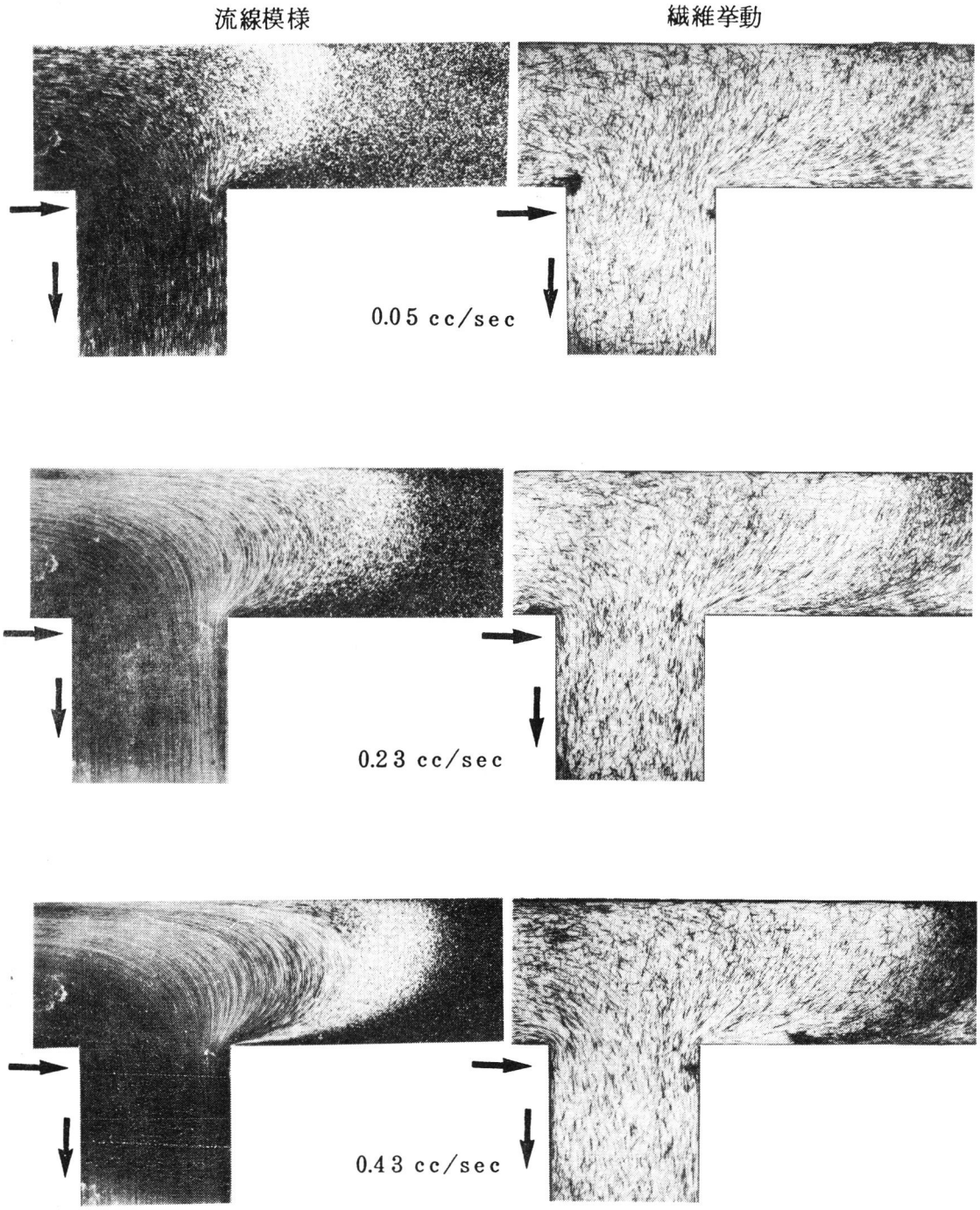


図 7.12 流量による流線模様と繊維挙動の変化
（高分子流体）

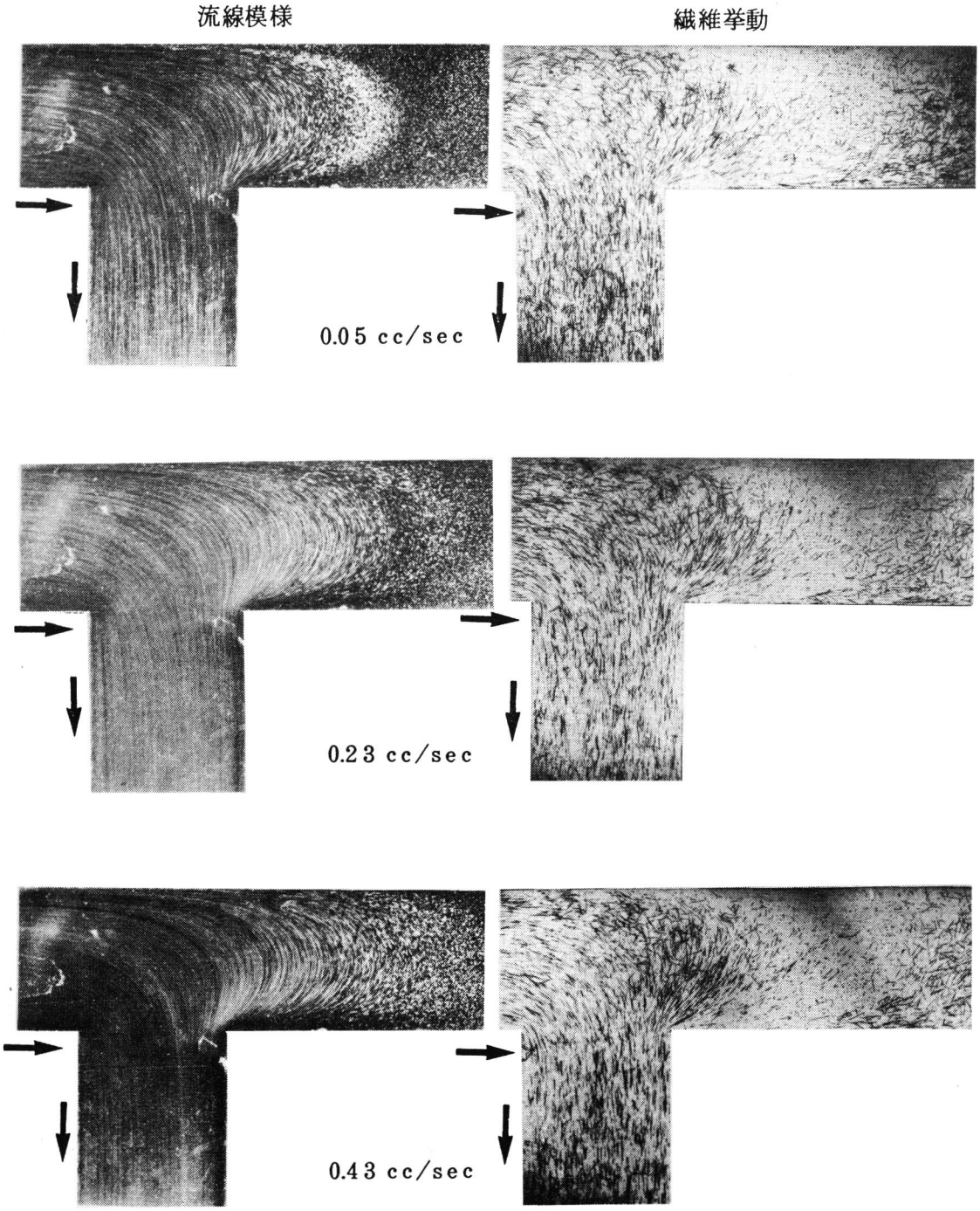


図 7.13 流量による流線模様と繊維挙動の変化
（ニュートン流体）

っている。すなわち，流量が少ないときは盲管内での繊維の分布はほぼ均一であるが，流量が増すとスリット幅の約2倍の所で繊維が多く集合し，繊維の分布は不均一となる。

図7.13にニュートン流体を用い，流量を変えたときの繊維挙動と流線模様を示すが，繊維が盲管内へ進入している距離はスリット幅の半分程度で，流量による違いはほとんど見られず，繊維の分布状態はほとんど同じである。これは，ニュートン流体の分子が小さく，高分子流体の場合のように繊維が分子鎖に引っ張られて，盲管の奥まで移動しないためだと考えられる。

流体に分散した繊維やアルミニュウム粉末などの物質が盲管内へ進入する距離は，高分子流体とニュートン流体とでは異なり，さらに分散している物質の比重，大きさや繊維長などの形状の違いにより異なると考えられる。また，分散している物質間に相互作用が生じる場合や，異種および形状の異なる物質が混合して分散している場合には盲管内で物質の分離なども生じ，盲管内での物質の挙動は複雑になる。

7．4 盲管を有するY型スリット内流れにおける繊維挙動

Y形スリットの各管の位置が対称であるため，盲管を存するY形スリット内流れは1種類存在する。短繊維を分散した高分子流体の盲管を有するY形スリット内流れでの繊維挙動を，ニュートン流体を用いた場合と比較して明らかにする。

7．4．1 流線模様

高分子流体とニュートン流体の盲管を有するY形スリット内流れでの流線模様と流線模様の模式図を，それぞれ図7.14および図7.15に示す。盲管内以外での流線模様は，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんど見られないが，盲管内では，ニュートン流体の流線模様はほぼ対称な形状であるのに対して，高分子流体の流線模様は非対称的な形状である。このような現象は盲管を有するT形スリットの盲管内でも現われていた。盲管部付近での流線模様の拡大は，盲管を有するT形スリットの場合と比べると小さい。流線模様を得るため流体中に分散したアルミニュウム粉末は，ニュートン流体では盲管内でほとんど集合しないが，高分子流体

では盲管内で集合し，盲管を有するT形スリットを用いた場合と同じ現象が見られる。

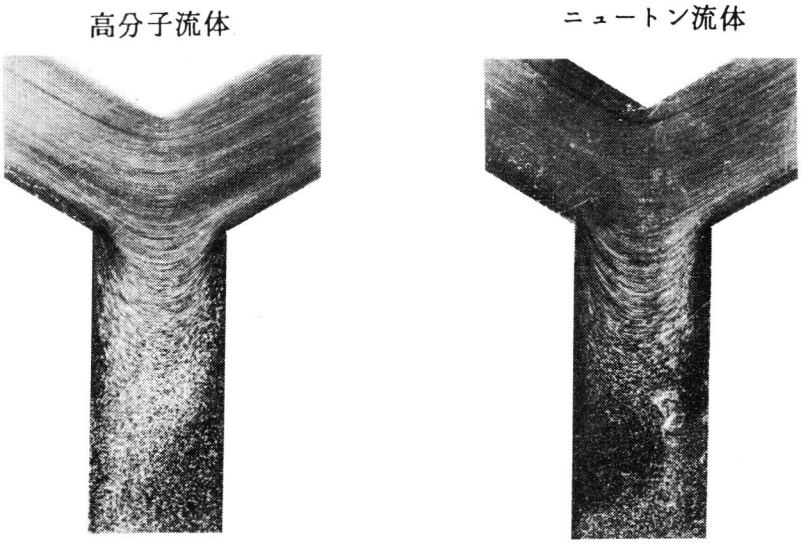


図7.14 支管②を盲管として本管①から本管③へ流したときの流線模様

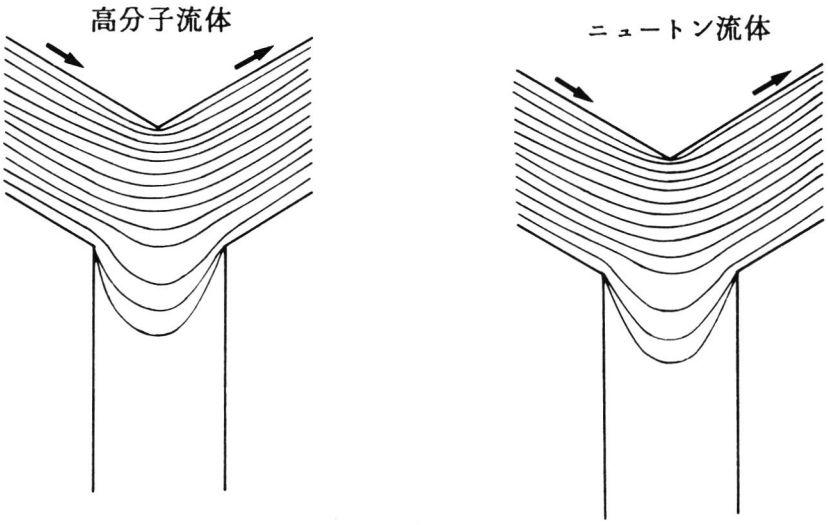


図 7.15 流線模様の模式図

7．4．2 盲管を有するY型スリット内での繊維挙動

短繊維を含有した高分子流体とニュートン流体の盲管を有するY形スリット内流れでの繊維挙動を図7.16に示す。高分子流体では，繊維は流線模様が拡大している所で流れ方向と垂直方向に配向しているが，盲管を有するT形スリットより流線模様の拡大が小さく，また拡大している範囲も狭いため，繊維が流れ方向と垂直方向に配向する現象は盲管を有するT形スリットの場合より顕著でない。ニュートン流体では，繊維はほぼ流線模様に沿って配向しているが，盲管内で繊維がほとんど存在していない所が観察される。しかし，高分子流体の場合には，盲管内で繊維は不均一ではあるがほぼ全体に分布している。盲管を有するY形スリット内流れでの繊維挙動は，盲管を有するT形スリットの場合と同様の現象を示していた。

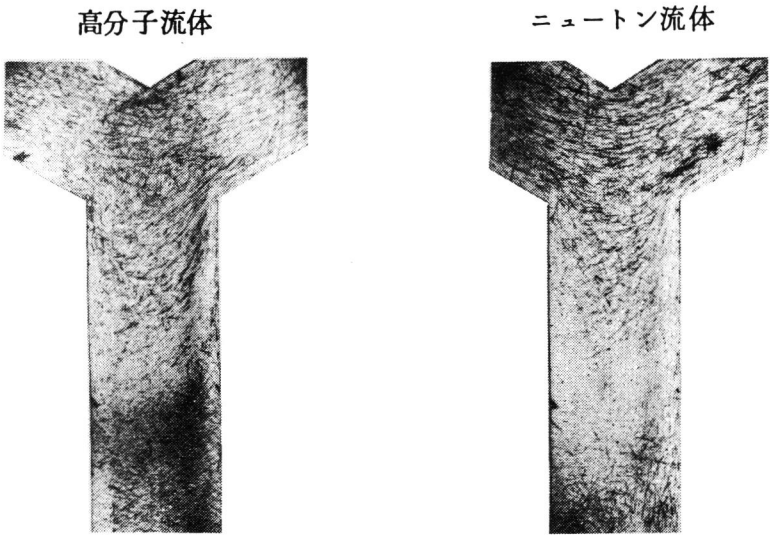


図7.16 支管②を盲管として本管①から本管③へ流したときの繊維挙動

7．5 盲管内での繊維挙動

T形スリットの直管部を流体が流れるように盲管を作成し，高分子流体に分散した繊維の盲管部での挙動を，ニュートン流体の場合と比較して明らかにする。

7．5．1　盲管部での流体の挙動

盲管内に着色した流体を入れ，本管①から③の直管部に流体を流した場合の盲管内での流体の移動状態を図7.17と図7.18に示す。図7.17は高分子流体で，図7.18はニュートン流体であり，直管部に流体を流し始めてから180秒後までの

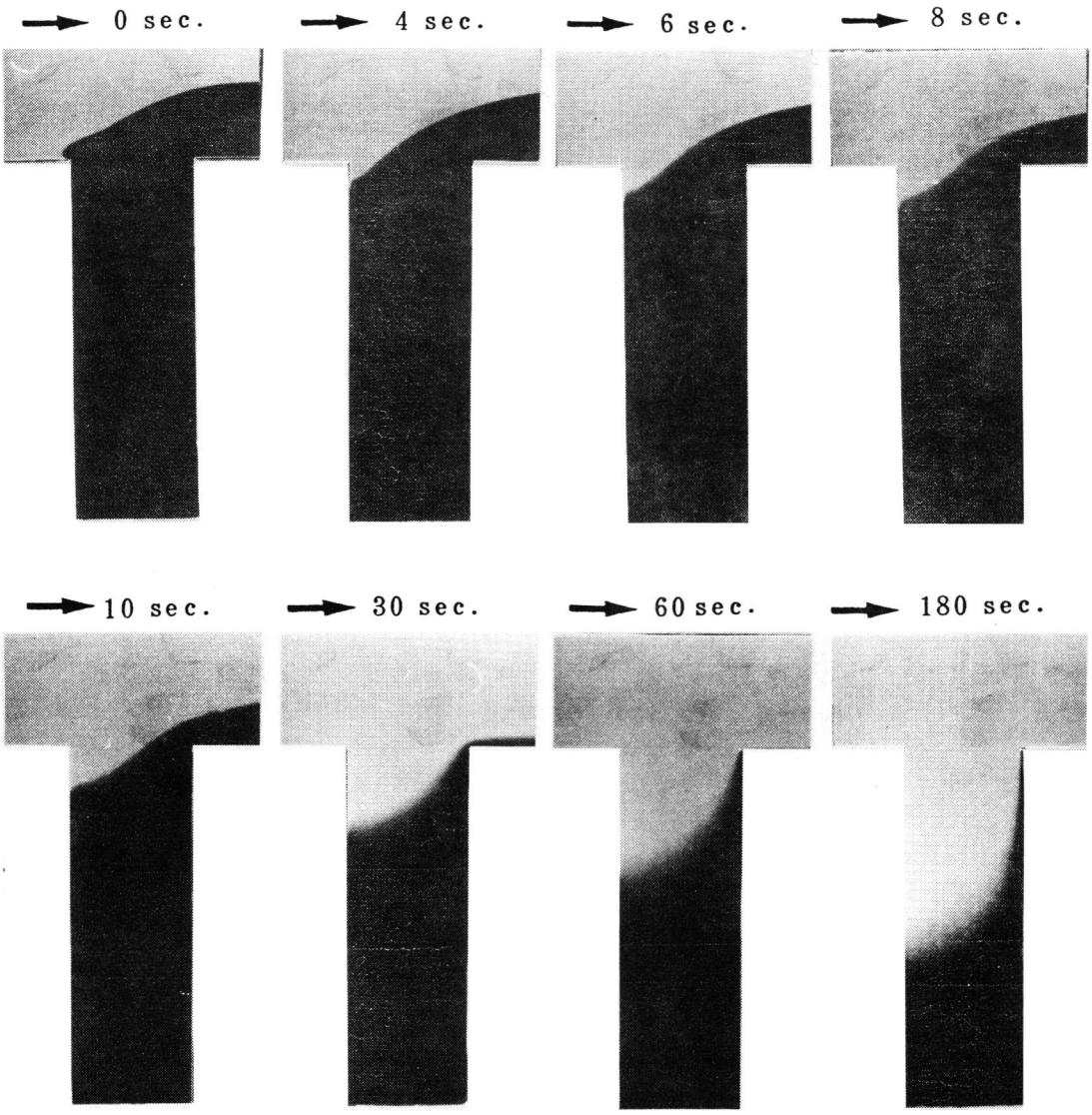


図7.17　盲管部での高分子流体の移動

流体の移動状態を示している。直管部の流量はそれぞれ0.23 cc/sec. である。直管部の流体が流れ始めると流体は盲管内に進入してくるが,直管部の流体と盲管内の着色した流体は混り合わずに，直管部の流体が盲管内の流体を追い出

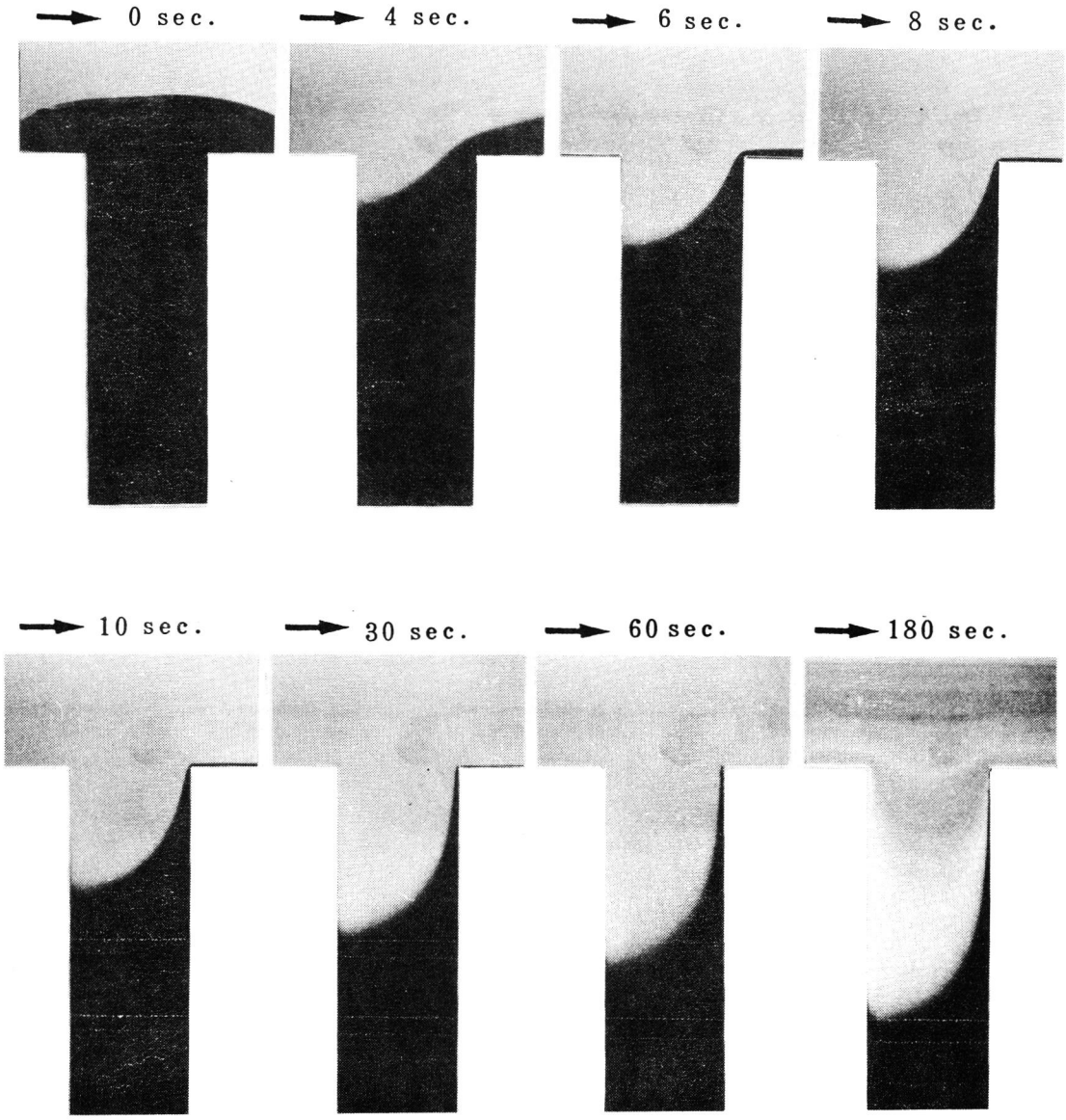


図7.18 盲管部でのニュートン流体の移動

し進入してくることがわかる。直管部から進入してきた無着色の流体と盲管内の着色した流体との境界は，ニュートン流体の場合に比べ高分子流体の方が不鮮明であるが，無着色の流体と着色した流体との間の分子鎖の移動によるものと考えられる。

直管部から進入した無着色の流体と着色した流体との境界の形状は高分子流体とニュートン流体ではほとんど同じであるが，流体を流し始めた初期では流体が盲管部に進入する距離はニュートン流体の方が長い。図7.19に流体を流し始めてからの時間と，流体が盲管内に進入した距離との関係を示す。縦軸は流体が盲管内に侵入した距離をスリット幅（10 mm）の比で示している。流体が盲管内に浸入する距離はニュートン流体の方が速く，約500秒後に流体が盲管内へ浸入する距離はほぼ平衡に達している。いっぽう，高分子流体の場合には約750秒後にほぼ平衡に達しているが，無着色の流体が進入する距離の平衡値はそれぞれスリット幅の約2.5倍でほぼ等しい。高分子流体が盲管内へ進入する速度が遅いのは，高分子流体は剪断速度が小さいときには粘度が大きいことが原因であると考えられる。

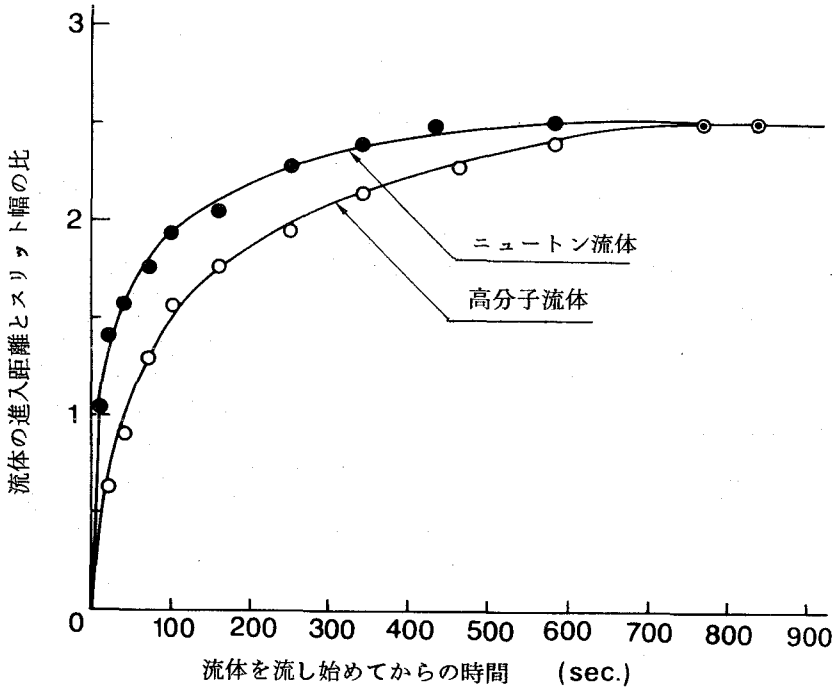


図7.19 直管部に流体を流し始めてからの時間と盲管内への流体の進入距離との関係

7．5．2 盲管部でのアルミニュウム粉末の挙動

盲管内に流体のみを満たし，本管①から③の直管部にアルミニュウム粉末を分散

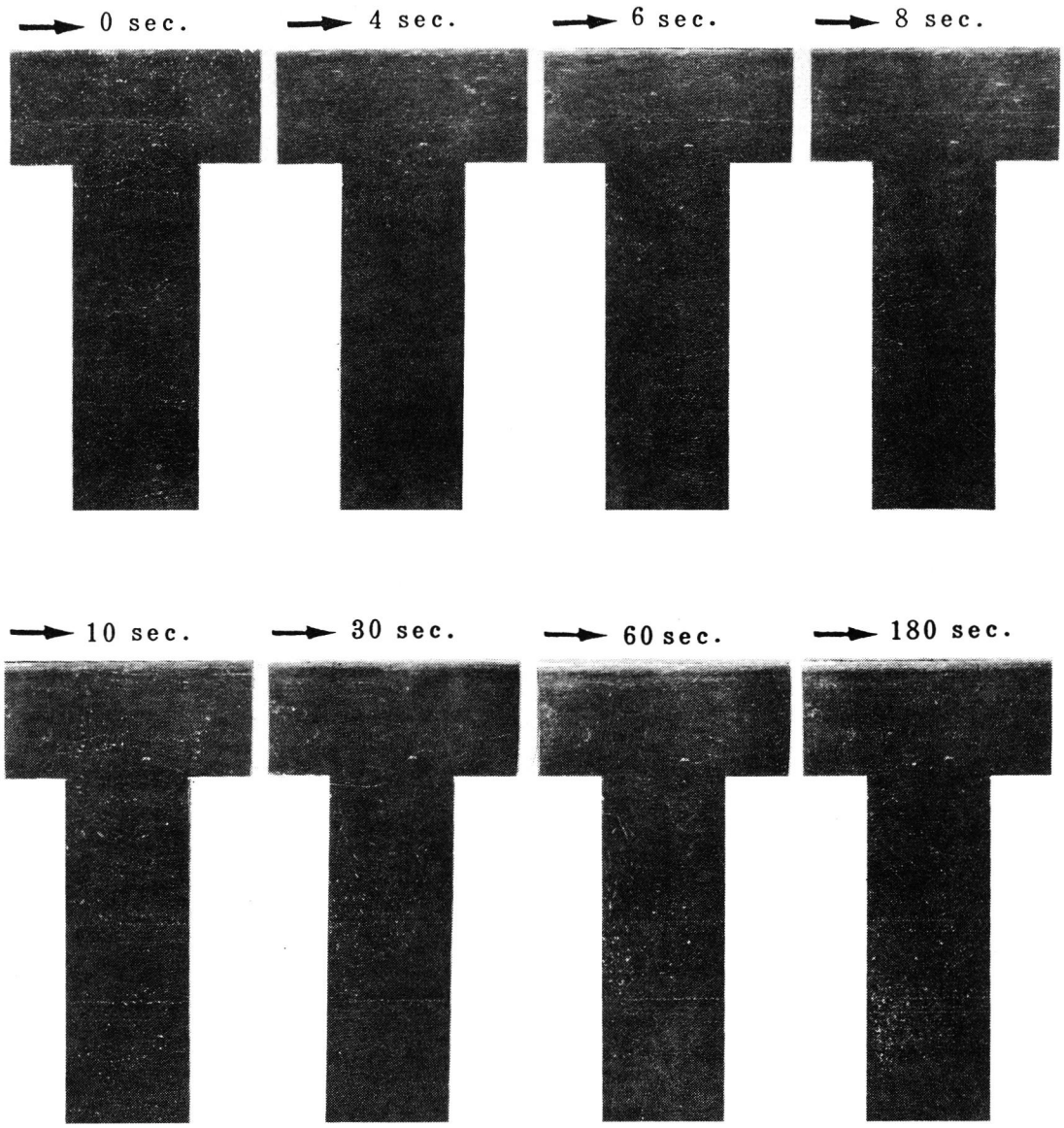


図7.20 直管部にアルミニュウム粉末を分散した高分子流体を流したときの、盲管部へのアルミニュウム粉末の移動

した流体を流したときの，盲管内へのアルミニュウム粉末の移動を図7.20と図7.21に示す。図7.20は高分子流体で，図7.21はニュートン流体である。流体を

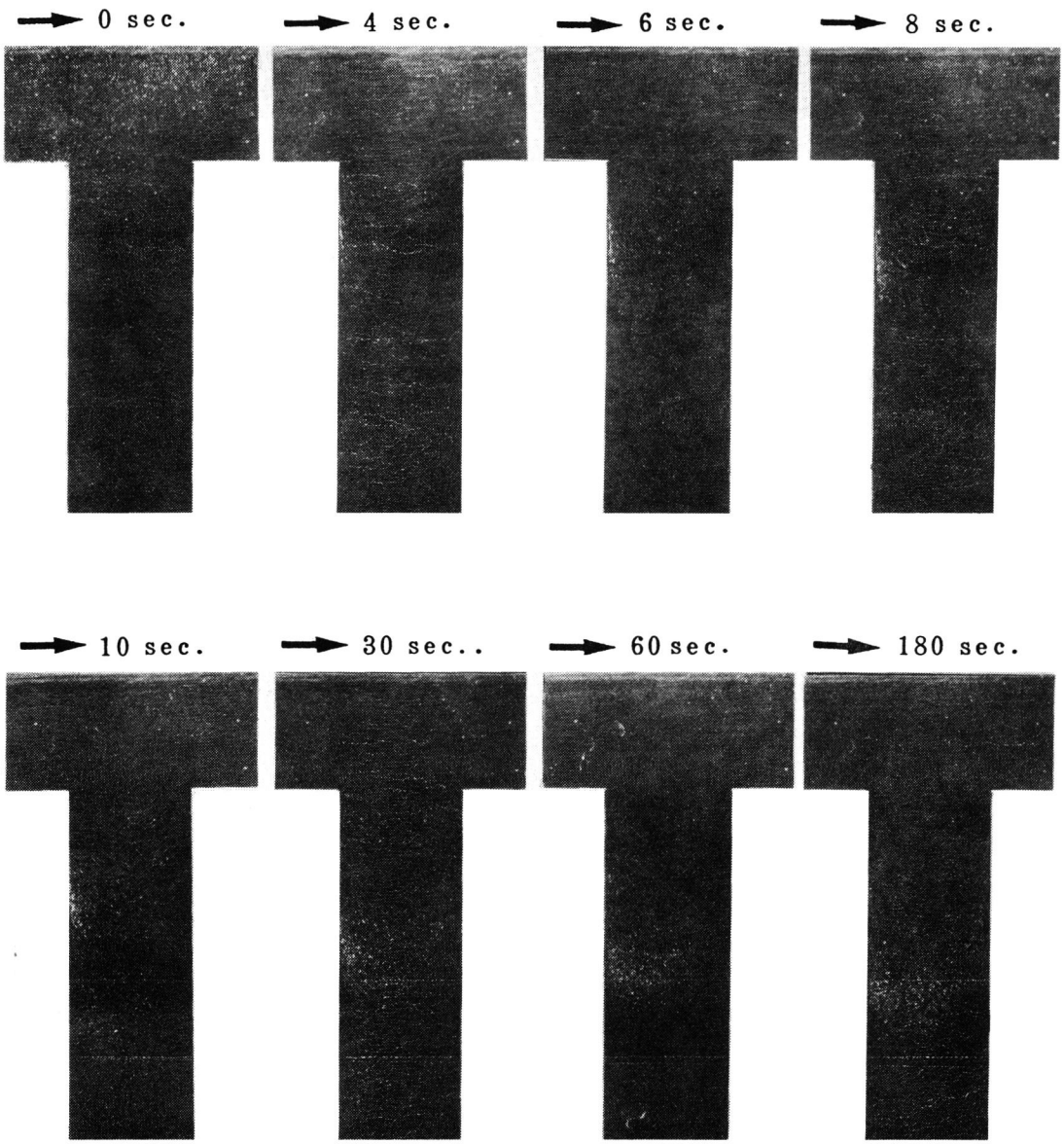


図7.21 直管部にアルミニュウム粉末を分散したニュートン流体を流したときの、盲管部へのアルミニュウム粉末の移動

流し始めてから30秒まではアルミニュウム粉末が盲管内へ進入する距離はニュートン流体の方が長いが，60秒以上では流体による差は見られず，180秒後には

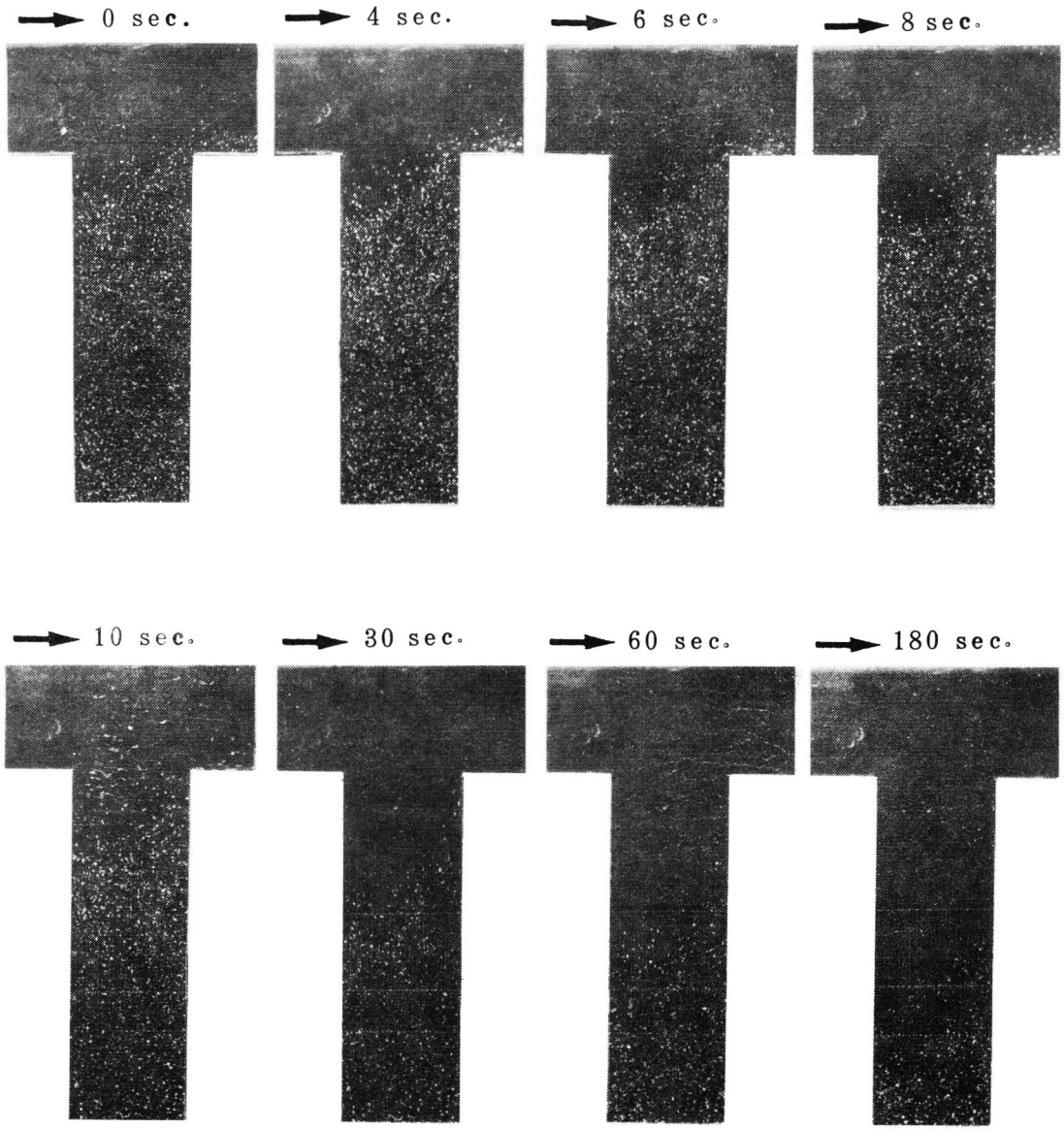


図7.22 直管部に高分子流体のみを流したときの、盲管部でのアルミニュウム粉末の挙動

それぞれスリット幅の約２倍の所までアルミニュウム粉末は達している。ニュートン流体の盲管内への進入距離は１８０秒後には図7.19スリット幅の約２倍であり，

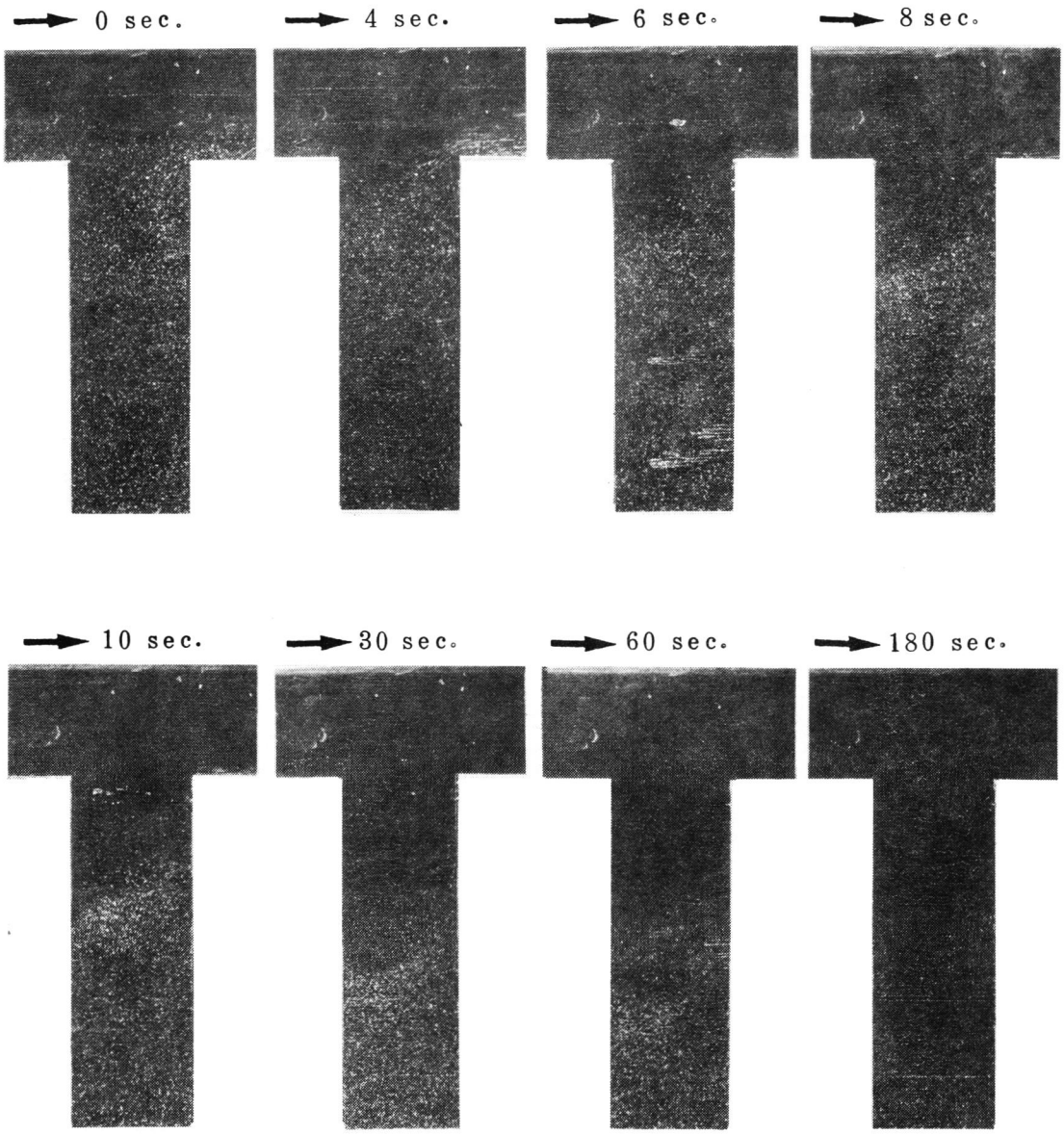


図7.23 直管部にニュートン流体のみを流したときの、盲管部でのアルミニュウム粉末の挙動

アルミニュウム粉末の進入距離とほぼ一致している。しかし，高分子流体の盲管内への進入距離は図7.19からスリット幅の約1.8倍であり，アルミニュウム粉末の進入距離より短い。これは高分子流体の場合には図7.17に示したように，盲管内での着色した流体と無着色の流体との境界層が不鮮明であったことと関係があると考えられる。すなわち，高分子流体の境界層では分子鎖の移動があり，分子鎖の移動のときにアルミニュウム粉末も引きづられて行くため，アルミニュウム粉末は無着色の流体が観察される所よりも盲管の内部まで進入するものと考えられる。盲管内でアルミニュウム粉末が分布している先端部の形状は，着色した流体と無着色の流体との境界層の形状と似ている。

盲管内にアルミニュウム粉末を分散した流体を満たし，直管部に流体のみを流したときの盲管内でのアルミニュウム粉末の挙動を図7.22と図7.23に示す。図7.22は高分子流体で，図7.23はニュートン流体であるが，アルミニュウム粉末が盲管内から流出し，盲管内でアルミニュウム粉末が存在していない位置は各流体ともほぼ同じである。盲管内でアルミニュウム粉末が存在していない位置は，ニュートン流体の場合には着色した流体と無着色の流体との境界層の位置とほぼ一致している。しかし，高分子流体の場合には盲管内でアルミニュウム粉末が存在していない位置は，各時間における流体の境界層より盲管部の奥まで及んでいる。このことからも，盲管内での高分子流体の境界層では分子鎖は移動し，分子鎖の移動によりアルミニュウムは影響を受けると考えられる。

7．5．3 盲管部での繊維の挙動

直管部に繊維を分散した流体を流したときの，盲管部への繊維の移動状態を図7.24と図7.25に示す。高分子流体の場合には繊維は徐々に盲管内に移動し，長さが1 mm程度の長い繊維はスリット幅の約1.5倍の位置まで進入しているが，細かい繊維は約2.0倍の位置まで達している。いっぽう，ニュートン流体の場合には流体を流し始めてから4秒後に長さが1 mm程度の繊維はスリット幅の約0.5倍に達し，その後はさらに盲管部の奥へ進入することはないが，細かい繊維はスリット幅の約2.0倍まで達している。このことから，長さの異なる繊維は盲管内へ進入する距

離が異なり，盲管内で分離することがわかる。

盲管部に繊維を分散した流体を満たし，直管部に流体のみを流したときの，盲管

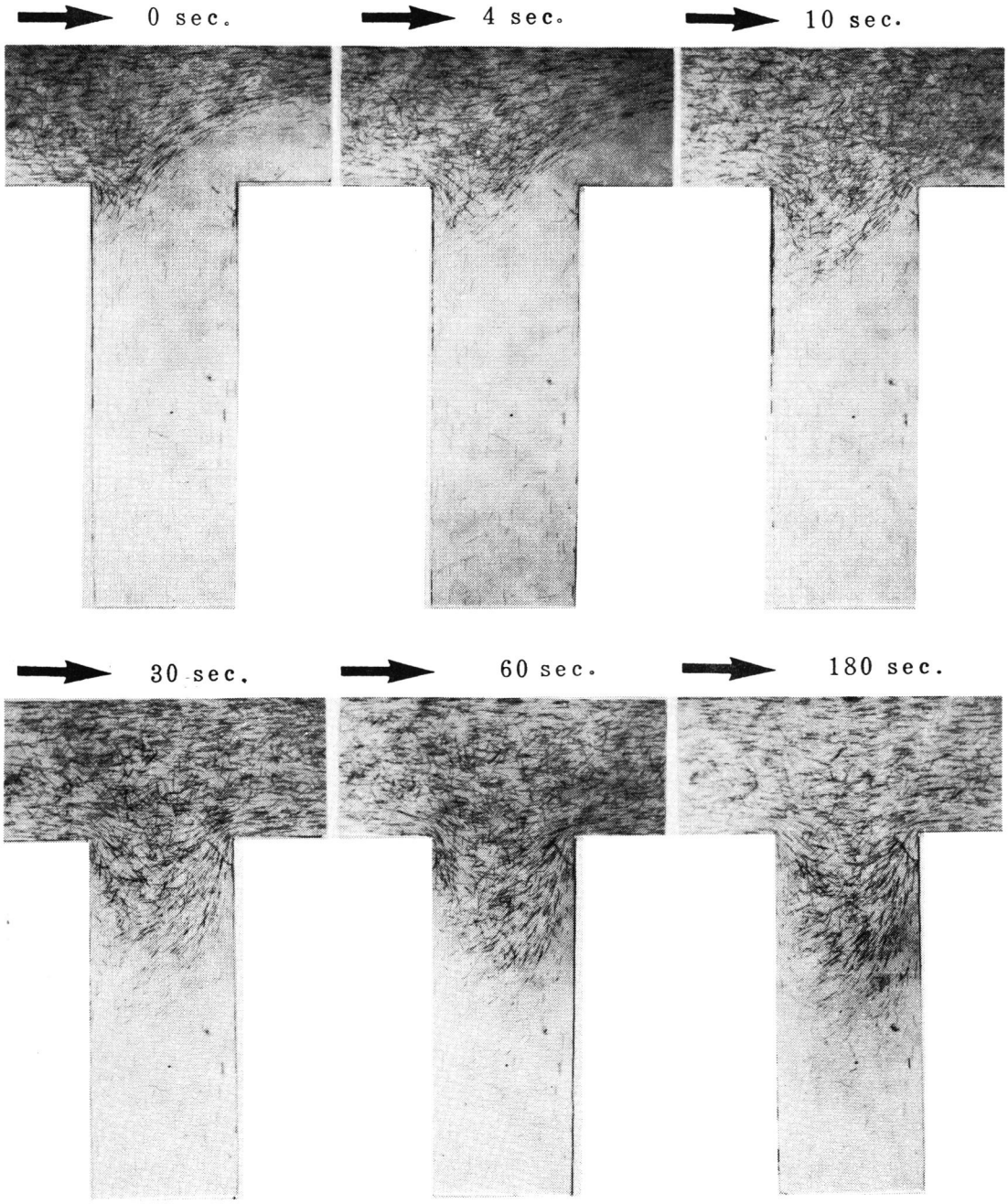


図 7.24 直管部に繊維を分散した高分子流体を流したときの、
盲管部への繊維の移動

部での繊維の移動状態を図7.26と図7.27に示す。高分子流体ではニュートン流体に比べると盲管内での繊維の移動は速く，同一時間ではより多くの繊維が移動し

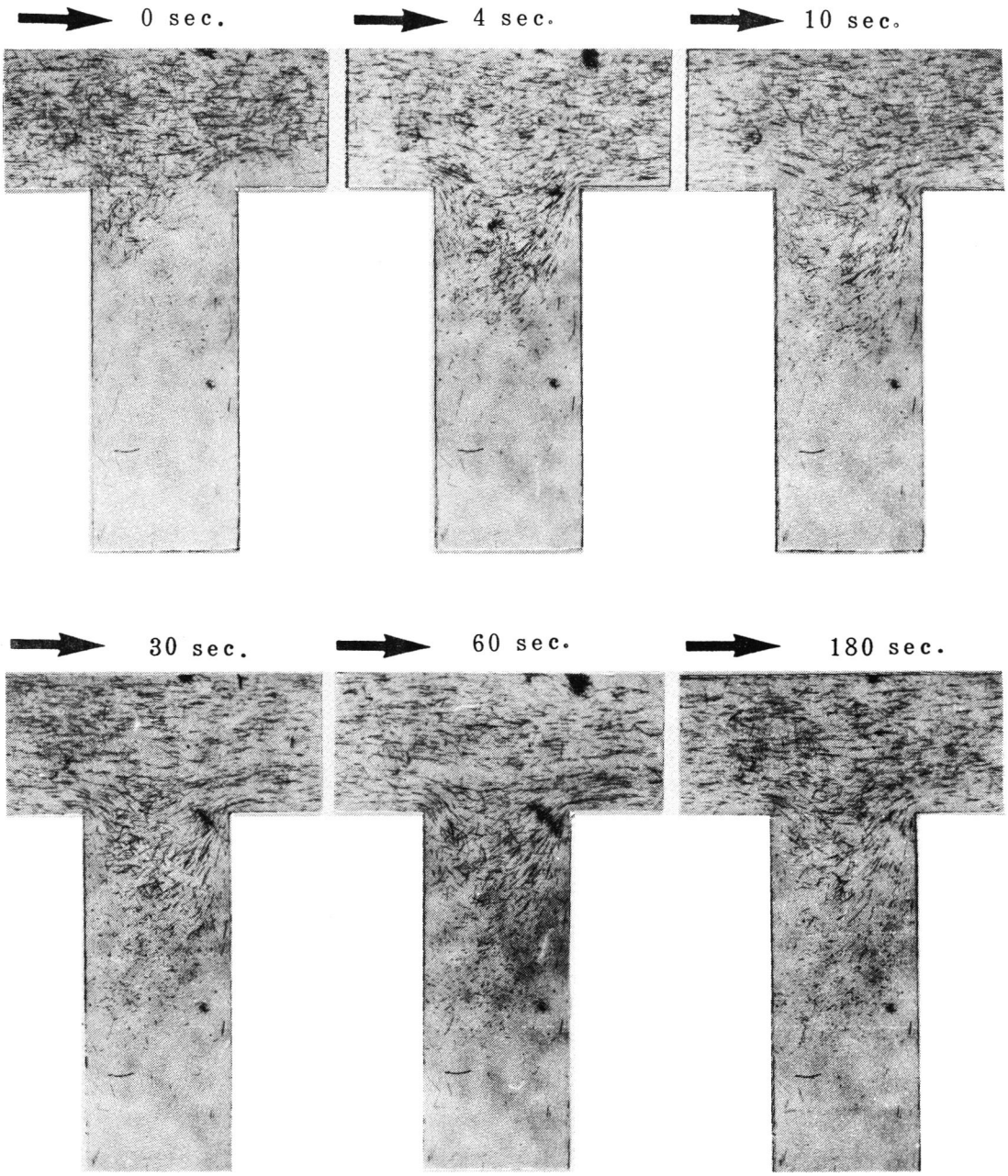


図7.25 直管部に繊維を分散したニュートン流体を流したときの、盲管部への繊維の移動

流出している。また，盲管内へ進入してきた流体と接する付近の繊維は流れ方向に配向し，図7.17 に示した着色した流体と無着色の流体との境界層の形状と同様の

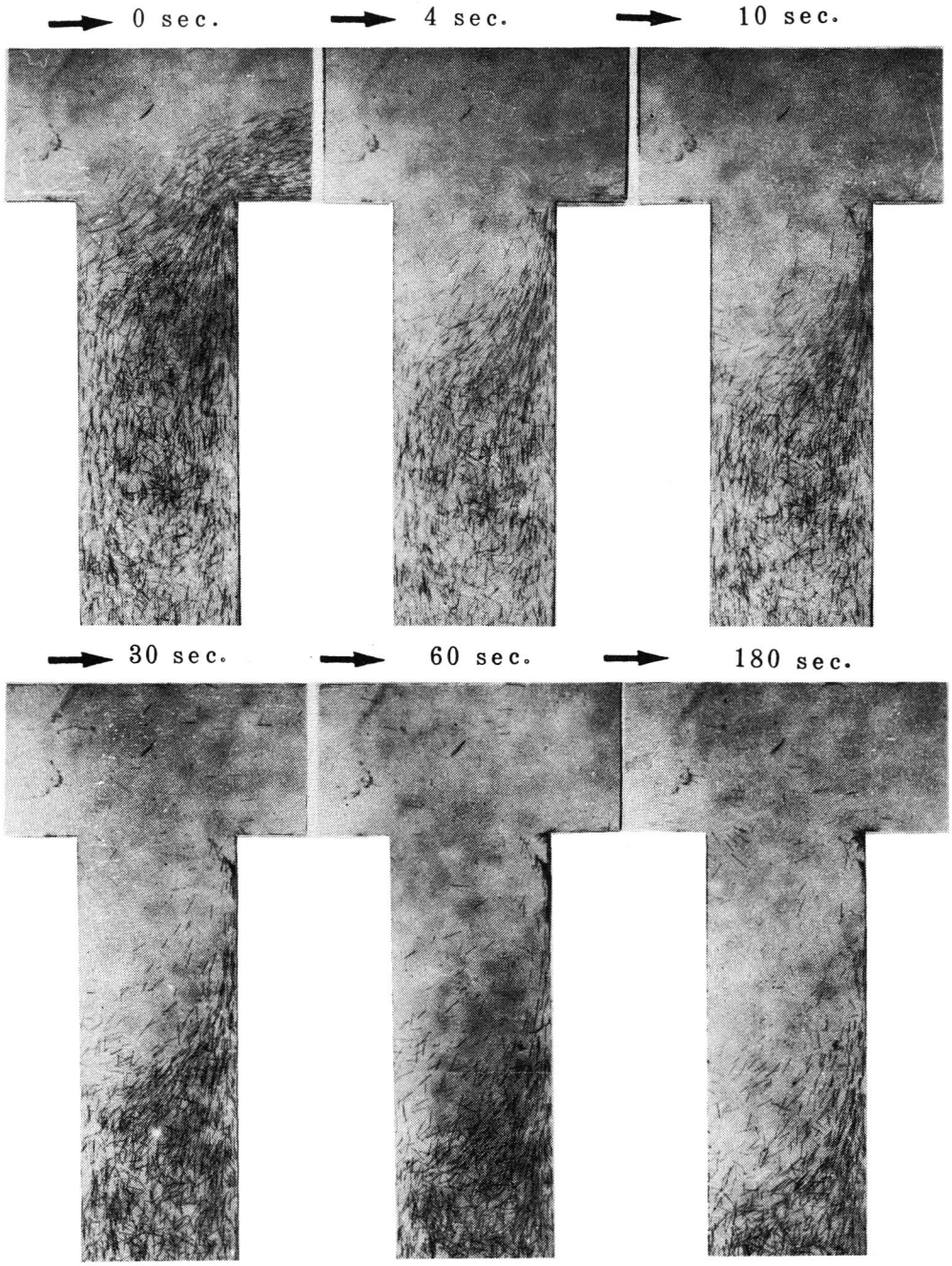


図7.26 直管部に高分子流体のみを流したときの、盲管部での繊維の挙動

形状を呈している。しかし，ニュートン流体の場合は高分子流体に比べると盲管内での繊維の配向状態は悪く，繊維の移動は遅いが，繊維が引き抜かれ流出した盲管

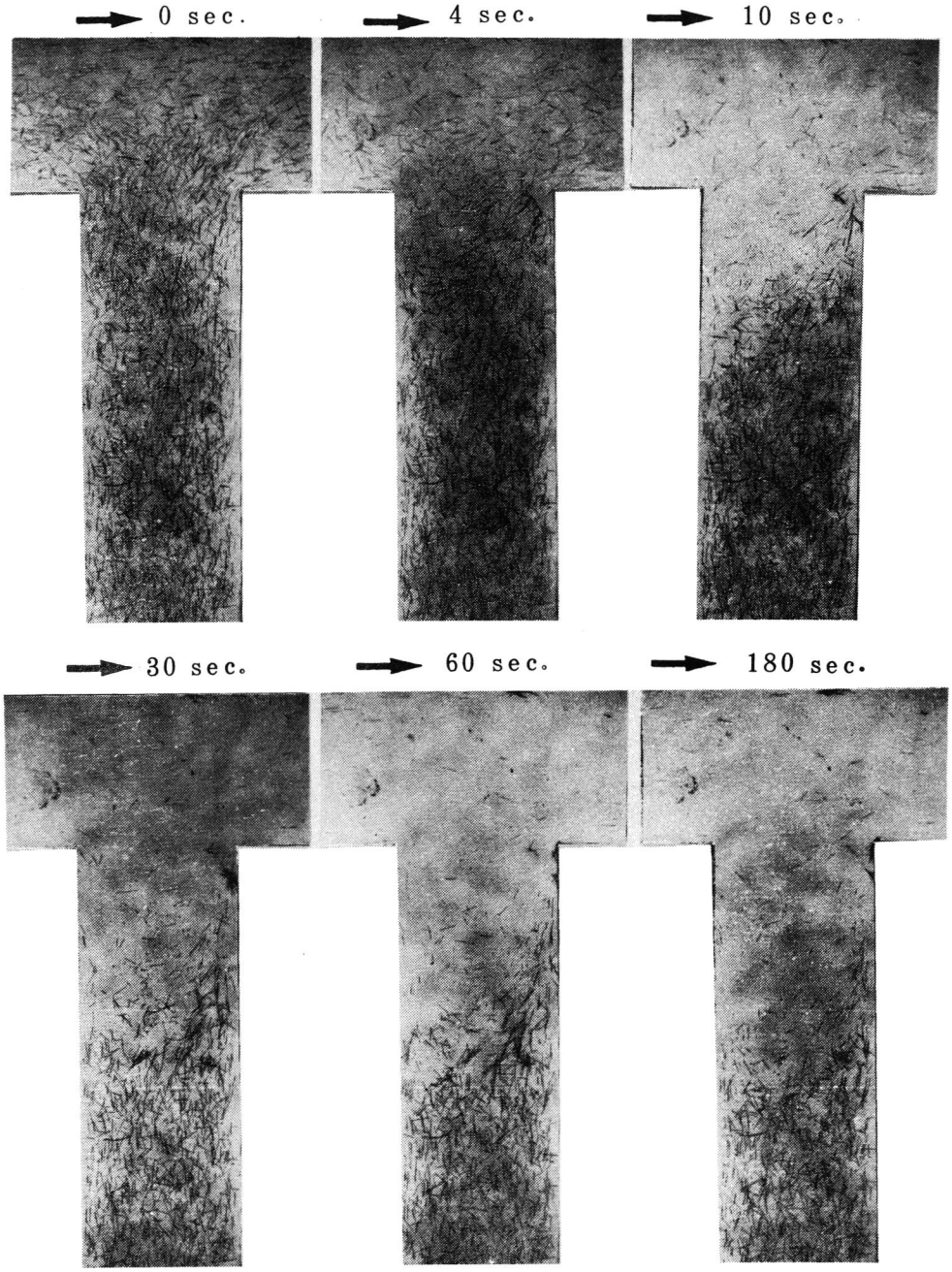


図7.27　直管部にニュートン流体のみを流したときの、盲管部での繊維の挙動

内の繊維がほとんど存在していない位置の平衡値は高分子流体もニュートン流体もほぼ同じで，スリット幅の約2.0倍である。これらのことから，高分子流体の場合には盲管内で流体の流れが観察されていない流体の境界層付近でも，流動している分子鎖の影響を受けて分子鎖は配向し，この分子鎖の配向により繊維は流れ方向に配向すると考えられる。しかし，ニュートン流体の場合には分子が小さいため，流れが存在していない所の繊維は分子の影響を受けず，流れが存在する所の繊維だけが速度勾配により配向し移動すると考えられる。また，細かい繊維は1 mm 程度の長い繊維と比べると盲管内に存在している位置は短いが，これは短い繊維は長い繊維に比べて流体の速度勾配の影響が少ないためだと考えられる。

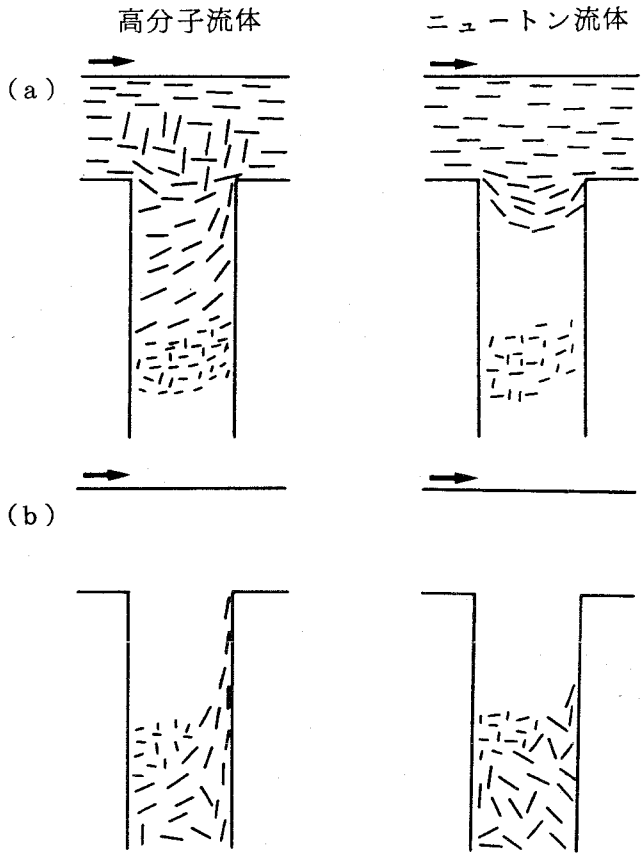


図7.28 盲管内での繊維の挙動の模式図

直管部に流体を流し，盲管内での繊維の移動がほぼ平衡状態になったときの模式図を図7.28 に示す。図中の（ a ）は直管部に繊維を分散した流体を流した場合で，（ b ）は盲管部に繊維を分散した流体を満たし，直管部に流体のみを流した場合である。7.3 と 7.4 節で示した盲管部に繊維を分散した流体を満たし，直管部にも繊維を分散した流体を流した場合の盲管部での繊維の分布状態は，高分子流体およびニュートン流体とも図7.28 の（ a ）と（ b ）を重ね合わせた繊維の分布状態とほぼ一致している。すなわち，高分子流体の場合には繊維はスリット幅の約1.5倍ま

で盲管内へ進入し，盲管内の繊維はスリット幅の約2.0倍の所まで引き抜かれて移動してゆくため，それらを重ね合わせると盲管内に繊維は不均一に分布しているがほぼ盲管内全体に存在する。ところが，ニュートン流体の場合には盲管内の繊維は高分子流体の場合と同様にほぼスリット幅の2.0倍の所まで引き抜かれるが，盲管内へ繊維はスリット幅の約0.5倍の所までしか進入しないため，盲管内で繊維が存在しない現象が生じる。

ニュートン流体を用いた場合に盲管内で繊維が部分的に存在しない現象は，拡大・縮小スリットの角部や直交エルボスリットの直交部および合流流れの合流部で見られた現象と原因は同じであると考えられる。すなわち，スリット内で流線模様が拡大し，流速が遅くなる所では繊維はより速い流れに乗って流動するため，盲管内への繊維の進入距離は短くなると思われる。ところが，高分子流体の場合には分子鎖は流線模様に沿って配向し，配向した分子鎖が繊維を引きづって行くため，ニュートン流体の場合より盲管内の奥へ繊維は進入して行くものと考えられる。このことは，盲管内に繊維を分散した流体を満たし，直管部に流体を流した場合に，高分子流体では盲管内に進入してきた流体付近の繊維が流れ方向に配向する現象からもわかる。

7.6 結　　言

短繊維を分散した高分子流体の盲管を有するT形およびY形スリット内流れにおける繊維挙動を，ニュートン流体の場合と比較して明らかにした。さらに，T形スリットの直管部を流体が流れるように盲管を作成し，盲管部に着色した流体やアルミニュウム粉末および繊維を分散した流体を満たして盲管部に流体を流し，また，その逆に盲管部に流体のみを満たし，直管部にアルミニュウム粉末や繊維を分散した流体を流して，盲管部での繊維の進入および移動について明らかにした。

得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1) 盲管を有するT形およびY形スリット内流れでの流線模様は，盲管内以外では流体による差はほとんどなく，盲管内でのニュートン流体の流れはほぼ対称であ

ったが，高分子流体の場合にはやや非対称な流れであった。流線模様を得るために流体中に分散させたアルミニュウム粉末は，高分子流体の場合には盲管内で集合して停滞していたが，ニュートン流体の場合には停滞することなくほぼ均一に分散し，盲管内でのアルミニュウム粉末の挙動は，高分子流体とニュートン流体で異なる。

(2) 盲管を有する管内での繊維挙動は，高分子流体の場合に流量が少なければ，繊維の分布はほぼ均一であるが，流量が多くなるとスリット幅の2倍付近の位置に特に細かい繊維が集合していた。ニュートン流体の場合には流量にほとんど関係なく，繊維はスリット幅の約半分の所までしか供給されず，盲管内での繊維はゆっくりではあるが流出して行くため，繊維は盲管内に存在しなくなり，繊維の分布は不均一になる。

(3) T形スリットとY形スリット内で流れが拡大している所や縮小している所では，繊維はほとんど同じ挙動を示すが，T形スリットの分岐または合流部の体積はY形スリットの場合と比べると約2.3倍多いため，拡大や縮小の割合も大きく，各流れでの特異な繊維挙動はY形スリットの場合より顕著に現われていた。

(4) 直管部の流体は流れ始めると盲管内へ進入して行くが，直管部の流体と盲管内の流体は混り合わずに直管部の流体が盲管内の流体を追い出して盲管内へ進入する。盲管内の着色した流体と直管部の無着色の流体との境界層は，高分子流体の場合にはニュートン流体と比べると不鮮明であった。

(5) 盲管内への高分子流体の進入距離は，ニュートン流体に比べると同一時間では短いが，流体を流し始めてから約750秒後にはニュートン流体の場合とほぼ同じ距離に達していた。各流体が盲管内へ進入する距離の平衡値は，スリット幅の約2.5であった。

(6) 盲管内へのアルミニュウム粉末の進入距離は，流体が流れ始めてから30秒まではニュートン流体の方が長いが，60秒以上になると進入距離は高分子流体と

ニュートン流体でほとんど同じであった。アルミニュウム粉末の盲管内への進入距離と盲管内でのアルミニュウム粉末が移動して存在していない距離は，ニュートン流体の場合には流体が盲管内に進入した距離とほぼ一致していたが，高分子流体の場合にはアルミニュウム粉末の進入距離と流体の盲管内への進入距離は異なっていた。

(7) 盲管部に流体のみを満たし，直管部に繊維を分散した流体を流したときの盲管内への繊維の移動は，高分子流体の場合には 1 mm 程度の繊維はスリット幅の約 1.5 倍まで進入していたが，ニュートン流体の場合にはスリット幅の約 0.5 倍までしか進入していなかった。しかし，細かい繊維は高分子流体とニュートン流体ともスリット幅の約 2.0 倍まで進入していた。すなわち，盲管内では長さの異なる繊維は分離して存在していた。

(8) 盲管内に繊維を分散した流体を満たし，直管部に流体のみを流したときの盲管部での繊維の移動はニュートン流体より高分子流体の方が速いが，盲管内で繊維が存在していない距離の平衡値は各流体ともほぼ等しく，スリット幅の約 2.0 倍であった。ニュートン流体に比べると高分子流体の場合には，盲管内で繊維が引き抜かれ移動している付近の繊維は流体の流れ方向に良く配向していた。

(9) 盲管内に繊維を分散した流体を満たし，直管部にも繊維を分散した流体を流したときの盲管内の繊維の分布状態は，高分子流体とニュートン流体ともに，盲管内に流体のみを満たして直管部に繊維を分散した流体を流したときの盲管内での繊維の分布と，盲管内に繊維を分散した流体を満たして直管部に流体のみを流したときの盲管内での繊維の分布を重ね合わせたものとほぼ同じになることがわかった。

参　考　文　献

1）西村太良，中村喜代次，堀川　明；繊維機械学会第３５回年次大会，
講演論文集，３（１９８２）

2）中村喜代次，西村太良，伊藤英人，堀川　明；繊維機械学会第３６回年次大会，
講演論文集，４７（１９８３）

3）中村喜代次，温　洪昭，西村太良，堀川　明；繊維機械学会第３６回年次大会，
講演論文集，４９（１９８３）

4）西村太良，中村喜代次，堀川　明；繊維機械論文集，３６，５，６７（１９８３）

第8章　結　　論

短繊維を分散した熱可塑性樹脂の射出成形や押出成形およびＢＭＣの射出成形などは工業的に広く行われているが，金型内での繊維の流れや繊維配向についてはまだ十分に解明されていない。

本論文は，間隙の小さい種々の形状をしたスリットを用い，短繊維を分散した高分子流体のスリット内流れにおける繊維の流れや繊維配向をニュートン流体の場合と比較して実験的に明らかにし，金型内での繊維の流れや繊維配向を解明するために行った基礎的研究である。

本論文では，まず短繊維が分散した流体中の繊維の配向角を測定する方法を明らかにし，つぎにこの測定方法により，平行平板スリット内流れ，拡大および縮小流れ，直交ベンドおよび直交エルボスリット内流れ，分岐および合流流れ，盲管を有するスリット内流れにおける繊維の挙動を明らかにした。

本研究によって得られた結果を要約すると，つぎの通りである。

(1)　短繊維強化プラスチックに用いられている短繊維のようにアスペクト比が100以上の繊維集合体の場合には，短繊維集合体のネガフィルムから得られるフラウンホーファ回折像の相対強度分布曲線は，繊維の交わりなどによる影響はほとんどなく，繊維の配向角分布とほぼ一致する。

短繊維強化プラスチックの射出成形品では，繊維の配向角分布は正規分布で近似でき，フラウンホーファ回折像の相対強度分布曲線における exp（－1／2）の値は，正規分布の標準偏差 σ とほぼ一致する。　また，繊維の分布が１軸方向だけでなく，２軸以上の方向に分布している成形品から得られるフラウンホーファ回折像の相対強度分布曲線では，分布曲線の各ピークの面積比はその方向に対応する分布内の繊維本数の比とほぼ一致する。

フラウンホーファ回折像による繊維配向角分布の測定法は，アスペクト比が大きい繊維集合体だけでなく，アスペクト比が小さい矩形状物質の集合体の配向角

測定にも利用できることがわかった。

(2) 平行平板スリット内に繊維を分散した高分子流体を流した場合，平行平板スリットの流入部および流出部では流体の流れは不安定であり，流線模様や繊維配向は乱れる。しかし，流れが安定なスリット中央部では，流線模様はスリットの長軸（流れ方向）に平行であり，繊維配向は安定でスリットの幅方向での繊維配向の違いはほとんどない。

流れが安定なスリット内での繊維配向は流量が増加すると良くなり，繊維配向角分布の標準偏差σは壁面での剪断速度（$\dot{\gamma}_W$）のみの関数として表わされ，スリット幅やスリット間隙および流体の濃度にはほとんど影響されないことがわかった。また，流量が増すと流れ方向に分布する繊維の本数は増加し，壁面での剪断速度が400 $sec.^{-1}$ 以上になるとほぼすべての繊維は流れの方向に分布する。壁面での剪断速度が400 sec^{-1} 以下の場合には，全繊維本数に対する流れの方向に分布している繊維本数の割合（繊維本数割合 W_f ）は，標準偏差の場合と同様に壁面での剪断速度のみの関数として表わされる。

平行平板スリット内流れにおいて，流れが安定な定常流れの場合には，流線模様や繊維配向は高分子流体とニュートン流体による違いはほとんどなく，ニュートン流体の場合も繊維配向角分布の標準偏差σや繊維本数割合W_f は，高分子流体の場合と同様に壁面での剪断速度のみの関数として表わされる。

(3) 拡大・縮小スリット内流れでの流線模様は拡大流れと縮小流れでほとんど同じであり，流れはスリットの角部まで及んでいる。また，流線模様は拡大および縮小流れにおいて，高分子流体とニュートン流体による違いはほとんど見られない。

拡大流れでは拡大部を過ぎた付近で繊維配向は乱れ，繊維配向が変動している領域（変動域）は相当直径の45～50倍に達していたが，変動域の長さはスリット比や流量に影響されずほぼ一定である。拡大流れでは拡大部で繊維は放射状に流出するが，その後流線模様に沿った繊維と流線模様に垂直に配向した繊維に分かれて流れる特異現象が見られる。拡大流れで繊維が流れ方向とほぼ垂直に配向するのは，流線模様が1.2倍程度以上拡大している所である。

縮小流れでは縮小部での絞り効果のため繊維はワイングラス状に配向し，繊維配向は縮小部手前で変動するが，拡大流れに比べると繊維配向の変動は少ない。

ニュートン流体の場合には拡大流れで繊維配向は乱れるが，高分子流体の拡大流れで見られたように繊維が流れ方向とそれに垂直方向に規則的に分かれて流れる現象は見られない。　しかし，ニュートン流体では拡大流れと縮小流れにおいて，流れが拡大し流速が低下するスリット角部で繊維がほとんど存在しない現象が観察される。高分子流体とニュートン流体の流線模様はほぼ同じであったが，流線模様が拡大している所では繊維の配向状態は，高分子流体とニュートン流体で異なっている。

(4)　直交ベンドスリットのベンド部の曲率半径が小さいスリットでは，ベンド部内側で流線模様は縮小し，外側では拡大する傾向が見られる。また，ベンド部の曲率半径が小さいスリット内流れではベンド部で繊維配向は乱れるが，繊維配向は高分子流体とニュートン流体による差はほとんどない。

直交エルボスリットの直交部では体積増加のため流線模様は拡大し，流線模様が拡大している所で繊維は流体の流れ方向とそれに垂直方向に分かれて配向している。

ニュートン流体の場合には，流線模様が拡大したスリット角部で，拡大・縮小スリットの場合と同様に繊維がほとんど存在していない現象が見られる。

(5)　T形およびY形スリットで流れが合流する場合，流線模様には合流した流体の境界を示す線が明確に現われている。分岐流れの流線模様は，合流流れで見られた流体の境界を示す線が存在しないことを除けば合流流れの場合とほぼ同じ形状で，高分子流体とニュートン流体による違いもほとんどない。

分岐および合流流れにおいて流線模様が拡大している所では，高分子流体の場合には繊維が流れ方向とそれに垂直方向に規則的に分かれて流れる現象が見られる。また，ニュートン流体の場合には，流れが合流し流線模様が大きく拡大している付近では繊維がほとんど存在していない現象が見られる。

(6) 盲管を有するT形およびY形スリット内流れでの流線模様は，盲管内でニュートン流体の場合にはほぼ対称な形状をしているが，高分子流体の場合にはやや非対称な形である。また，トレーサとして用いたアルミニュウム粉末は，ニュートン流体の場合には盲管内でほぼ均一に分布していたが，高分子流体の場合には盲管内で集合して分布する傾向が見られる。

盲管を有するスリット内流れにおける盲管部以外での繊維挙動は，高分子流体の場合には流れが拡大する所で繊維が規則的に分かれて配向する現象が見られ，ニュートン流体の場合にはほぼ流線模様に沿って配向している。しかし，盲管内では高分子流体の場合にはスリット幅の約2倍の所で細かい繊維が集合する現象が見られ，ニュートン流体の場合にはスリット幅の0.5～2倍付近で繊維がほとんど存在しない現象が見られる。

(7) 盲管を有するスリット内で流体が流れ始めると流体は盲管内へ進入するが，進入してきた流体と盲管内の流体はほとんど混り合わない。盲管内への流体の進入はニュートン流体の方が速いが，盲管内への進入距離の平衡値は各流体ともほぼ等しく，スリット幅の約2.5倍である。

盲管内への繊維の進入と盲管内での繊維の引き抜きによる移動はそれぞれ独立して起こり，盲管内への繊維の進入と繊維の引き抜きを重ね合わせた状態が，繊維を分散した流体を盲管を有するスリット内に流したときの盲管内での繊維の分布状態となることがわかった。すなわち，高分子流体では盲管内へ繊維はスリット幅の約1.5倍まで進入し，スリット幅の約2.0倍付近までの繊維が引き抜かれるため，盲管内では繊維の分布は不均一ではあるが繊維は盲管内全体に存在する。しかし，ニュートン流体の場合には，繊維の引き抜きは高分子流体の場合と同様にスリット幅の2倍程度まで及ぶが，繊維の進入がスリット幅の0.5倍であるため，盲管内で繊維が存在しない現象が生じることがわかった。盲管内では細かい繊維やアルミニュウム粉末は長い繊維よりも盲管内の奥まで進入するため，盲管内では長さの異なる繊維が分離して分布する現象が見られる。盲管内での繊維の分布状態や，流れが拡大する所で生じる高分子流体とニュートン流体による異な

った繊維挙動の特有な現象は，高分子流体の分子鎖が大きく，からみ合った分子鎖の運動が繊維に影響を及ぼしたためだと考えられる。

繊維を分散した高分子流体が間隙の小さいスリット内を流れる場合，流れが拡大する所で繊維は特異な配向をし，また盲管内では長さの異なる繊維や粒子などが分離して集合する現象が見られるため，これらのことを考慮に入れて金型の設計を行う必要があると思われる。

謝　　辞

本研究を遂行するにあたり，終始御懇篤な御指導と御鞭撻を賜わりました大阪大学　工学部　堀川　明教授，ならびに御校閲いただきました大阪大学　工学部　長谷川嘉雄教授，森川敬信教授，大阪大学　歯学部　木村　博教授に厚く御礼申し上げます。

また，種々の有益な御助言を賜わりました大阪大学　工学部　中村喜代次助教授　山田国広助手，千葉訓司助手をはじめとする堀川研究室の方々に深く感謝いたします。