

Title	繊維濃厚分散流体の流れに関する研究
Author(s)	保田, 和則
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2111
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

繊維濃厚分散流体の流れに関する研究

2001年11月

保田和則

繊維濃厚分散流体の流れに関する研究

2001年11月

保田和則

目次

第1章 序論	7
1.1 研究の背景	7
1.2 研究の目的と論文構成	15
第2章 繊維分散流体とそのレオロジー特性	17
2.1 緒言	17
2.2 繊維濃度の分類	19
2.3 試料流体の作製	19
2.4 試料流体のレオロジー特性	25
2.4.1 せん断粘度と法線応力差	25
2.4.2 伸長粘度	27
2.5 結言	29
第3章 繊維分散流体における繊維の可視化法	31
3.1 緒言	31
3.2 従来のさまざまな可視化法	32
3.3 スリット光源を用いた従来の可視化法	33
3.3.1 理論的解析	34
3.3.2 希薄分散流体中の繊維の可視化	36
3.4 繊維の複屈折を利用した新しい可視化法	39
3.4.1 測定原理	39
3.4.2 希薄分散流体中の繊維の可視化	43
3.4.3 濃厚分散流体中の繊維の可視化	46
3.5 結言	47
第4章 スリット流路を流れる繊維分散流体中における繊維配向と濃度分布	49
4.1 緒言	49

4.2	実験装置	50
4.2.1	導管の選定	51
4.3	繊維配向の解析法	55
4.3.1	繊維の配向角と配向度の計算法	55
4.3.2	配向楕円と配向分布の対応	57
4.4	実験結果と考察	58
4.4.1	繊維の配向角と配向度	58
4.4.2	繊維の濃度分布	64
4.5	結言	67
第5章	急拡大スリット流路を流れる繊維分散流体中における繊維配向と濃度分布	71
5.1	緒言	71
5.2	実験装置	72
5.3	流れの可視化	74
5.4	繊維の配向と濃度分布に対する実験結果と考察	77
5.4.1	ニュートン流体中の繊維の配向と濃度分布	77
5.4.2	希薄分散流体中における繊維の配向と濃度分布に対する高分子の影響	86
5.4.3	濃厚分散流体中における繊維の配向と濃度分布に対する高分子の影響	92
5.5	結言	95
第6章	障害物を有するスリット流路を流れる繊維分散流体中におけるウェルドライン上の繊維配向と濃度分布	99
6.1	緒言	99
6.2	実験装置	100
6.3	流れの可視化	100
6.4	繊維の配向と濃度分布に対する実験結果と考察	100
6.4.1	繊維の配向角	103
6.4.2	繊維の配向度	105
6.4.3	繊維の濃度分布	108
6.4.4	ウェルドラインの可視化	108

	5
6.5 結言	108
第7章 結論	113
参考文献	116
関連発表論文	126
謝辞	129

第1章 序論

1.1 研究の背景

繊維強化複合材料は、材料中の繊維の姿勢（配向）によって、その力学的性質に異方性が生じる。この異方性を問題視して等方的な力学的性質の材料を求める場合と、逆に積極的にその異方性を利用して特徴ある力学的性質の材料を得ようとする場合とがある。したがって、繊維強化複合材料中における繊維の配向を希望通りに制御し、目的の力学的性質を得ることがこの分野の研究のひとつの大きな目標となる。そのために、従来から、繊維強化複合材料中の繊維配向に関するさまざまな研究が行われてきた。

その中でも、成形された繊維強化複合材料中における繊維の配向とその力学的性質の関連を調べる研究が盛んに行われている。製品中における繊維の配向状態は、そのまま製品の力学的性質に直接影響するからである。たとえば、繊維がランダムな方向に配向している場合はその材料の強度は等方的であり、繊維がある特定の方向によく配向している場合は、その方向に強い材料となる。しかし、成形品が製造される工程を考えると、繊維を含有したプラスチック融液が冷却され固化する前に、金型内に流し込まれる過程があり、製品中における繊維の配向はこの流動過程においてほぼ決定されると考えられる。繊維を含有した熔融プラスチックは繊維分散流体であり、したがって、繊維を目的の配向状態に制御するためには、繊維分散流体中における繊維の流動配向状態を知ることがもっとも重要である。

そのために、繊維分散流体の連続体モデルの構築やそれを用いた流動解析、レオロジー特性の測定、流体中の繊維配向の計測などの研究が行われている。

そこで本節では、繊維強化複合材料と繊維分散流体に関する研究の背景と互いの関連について、(1) 流体中における繊維の運動、(2) 繊維分散流体の数学モデル、(3) 流体中における繊維配向の観察、(4) 繊維分散流体のレオロジー特性、(5) 繊維分散流体と繊維強化複合材料、(6) 繊維強化複合材料のウェルドライン問題をとりあげて述べる。

(1) **流体中における繊維の運動** 流体中における繊維の運動は流体力学的に興味ある問題であり、古くから研究されてきた。まず Jeffery [1] は、Einstein [2] が導いた球状粒子を含む流体の粘度式を回転楕円体の場合に拡張する目的で、ニュートン流体中の単純せん断流れ場における回転楕円体の運動を理論的に解析した。この理論は、回転楕円体が他の回転楕円体の運動からの影響をまったく受けず、しかも回転楕円体の運動が流れ場を乱さないという仮定のもとに成立している。Jeffery のこの結果は、実験的にも妥当であることが Goldsmith と Mason [3] によって確認されている。Jeffery のこのモデルを用いて、複雑な流れ中における繊維の配向を計算した最初の研究が Givler ら [4] によって行われた。この研究では、流体の流れ場に応じて繊維が回転運動する様子が数値解析で明らかにされている。その後も、繊維配向について Jeffery のモデルを用いた数多くの研究がある [5-9]。

一方、伸長流れ場における粒子の配向については、伸長流れ場を実現することが難しいことから、実験的研究は少ない。Takserman-Krozer と Ziabicki [10] は、Jeffery の解法を伸長流れ場に適用し、粒子配向の解析解を求めた。山本と松岡 [11] はニュートン流体の一軸伸長場における繊維配向の数値解析を行い、配向方向が伸長方向となす角度の大きな繊維ほどゆっくりと伸長方向に配向することを示した。また、小林ら [12] や Kobayashi ら [13] は、ウイスキーの一軸伸長流動場における流動配向分布を X 線回折により測定し、配向方向が Jeffery のモデルによる結果とよく似た傾向を示すことを報告している。

Jeffery の運動方程式は、すでに述べたように、流体中における回転楕円体の運動を表している。ただし、近傍にある他の回転楕円体からの影響はないものと仮定している。しかし繊維分散流体では、繊維の体積分率が大きく濃厚になると繊維間で干渉を生じ、ある繊維の運動が他の繊維からの影響を流体力学的相互作用により受けるため、このような系には Jeffery のモデルを適用することができない。そこで Folgar と Tucker [14] は Jeffery の運動方程式を拡張し、繊維の体積分率が大きく、繊維間干渉のある繊維分散流体にも対応できる運動方程式を開発した。現在ではこのような濃厚な系における繊維の運動方程式としてこの Folgar-Tucker モデルがもっともよく用いられており、この運動方程式を用いて繊維配向を計算した研究が多数ある [15-17]。しかしこの運動方程式の繊維間干渉を表現する項には実験係数が含まれており、与えられた繊維分散流体に対してその係数を正確に決定することは容易ではない。したがって繊維の運動を計算する市販のコンピュータソフトウェアにおいては、濃厚な繊維分散流体に対しても Jeffery の式を用いて簡略化した計算を行っ

ている例も多い。

(2) **繊維分散流体の数学モデル** Lipscombら [18] は、ニュートン流体中に、互いに干渉しあわない程度に繊維を分散させた希薄な系を対象にした連続体モデルを構築し、その構成方程式を用いて、軸対称急縮小流路における繊維希薄分散流体の流れ場を数値解析した。その結果、わずかな繊維の体積分率であっても、急縮小部における循環二次流れの大きさや形状が、繊維を含まない流体と比較して大きく異なることを見いだした。この現象は実験でも確認された [18]。さらにこの構成方程式は、繊維間干渉がわずかにある、繊維の体積分率がやや濃厚な場合についても適用できることが実験によって確かめられている [18]。千葉ら [19] は、このモデルを用いて、繊維の体積分率やアスペクト比 (=長さ/直径) を変化させて、繊維分散流体の急縮小流れを詳しく検討した。

Dinh と Armstrong [20] は、希薄系よりも繊維の体積分率の大きな準希薄系を対象とした連続体モデルを開発した。このモデルを用いて、中村ら [21-25] は流れ場と繊維配向とを連立させて、複雑な形状の流路内における繊維準希薄分散流体の流れ場と繊維配向とを数値解析した。また蝶野ら [26] は、平行平板間発達流れにおいてこのモデルを数値解析し、繊維の配向状態について検討した。しかし繊維間干渉の大きな繊維濃厚分散流体に対する構成方程式はいまだ開発されていない。

このような数値計算では、繊維は流路内に均一に分布していると仮定されているが、現実にはその仮定は成り立たない。最近では、流路内における繊維の濃度分布を考慮した流れ場の計算も行われている [27]。しかし、連続体モデルと繊維の運動方程式からは流路内における濃度分布を決定することができないので、濃度分布は実験から与えるしか方法はない。

一方、数値解析の対象となる流れ場もさまざまである。たとえば、Papanastasiou と Alexandrou [28] は押し出し流れ、Rosenbergら [29] は押し出し流れと球の周りの流れ、Phan-Thien と Graham はスクイーズ流れ [30] と球の周りの流れ [31]、Ranganathan と Advani [32] は円板間の放射状流れ、Ahmed と Alexandrou [33] は金型のキャビティ充填流れ、Altan と Rao [34] は円板間の放射状流れについて研究を行っている。

繊維の運動を解析する別の手法として、Yamamoto と Matsuoka [35] は、繊維を球の集まりと見なした粒子シミュレーション法を考案し、流体中の繊維の運動を解析した。この手法の特徴は、流体抵抗を計算しやすい球を用いたことと、球と球との結合力を適当に与えることにより、繊維の破断や曲げを扱えることにある。Joung

ら [36] は同様の手法を用い、流れ中における柔軟な繊維の運動を数値解析している。加藤ら [37-39] は、ニュートン流体中の繊維に働く力とトルクを計算し、繊維と流路壁面との干渉も考慮して繊維分散系の流れ場の数値解析を行った。また、最近になって、Stockie と Sheldon [40] は柔軟な繊維の運動を取り扱う手法を開発した。竹村ら [41] はその手法を用いて、単純せん断流れ場において流れ場と繊維の運動を連立させ、柔軟な繊維の運動を数値解析している。

この分野の応用例である繊維強化複合材料では、分散媒である高分子融液に繊維が分散されている。繊維の含有率は、重量比で5%から45%程度、ガラス繊維の場合、体積分率で約2%から18%程度と大きく、これらは濃厚分散系に属する。しかし、上で紹介した研究のほとんどがこのような大きな体積分率での繊維分散流体を扱うことができない。その理由として、濃厚系に対する連続体モデルの構成方程式が開発されていない点が多い。繊維の配向に関しては、濃厚系にも対応できる Folgar-Tucker モデルを用いれば、与えられた流れ場に対して繊維の配向状態を知ることができる。しかし、濃厚系に対する構成方程式がないと、配向状態と速度場を連立させて同時に解析することができない。また、濃厚系に対する構成方程式が得られたとしても、その妥当性を検証するためには、濃厚分散流体の流動実験および繊維の配向状態の観察が必要である。したがって、以上述べてきたような繊維分散系の研究を複合材料の成形過程に応用するためには、繊維濃厚分散流体についての理論的な研究はもとより、繊維の可視化や配向状態の観察などの実験的研究を推進することが是非とも必要である。

(3) 流体中における繊維配向の観察 流体中の繊維配向を観察する実験的研究は古くから行われている。Bell [42] は、エポキシレジンの流れ中において鋼線をトレーサーとして、繊維の配向を調べた。Murty と Modlen [43] は、グリセリンの縮小流れ中におけるガラス繊維を観察し、繊維の配向に対する繊維長・体積分率・分散媒粘度の影響を調べた。Jackson ら [15] は、射出成形を想定して、スリット流路内に充填されるシリコンオイルの流れ中におけるナイロン繊維の配向状態を観察した。これらの研究以外にも、千葉ら [44] や Nishimura ら [45] をはじめ、多くの研究者によって、さまざまな流路内の流れ中における繊維を可視化して配向状態を観察した研究が盛んに行われている [46-48]。しかし、多くの研究は、繊維希薄分散流体を対象にしている。それは、繊維を多量に分散させた濃厚分散流体では繊維自身が邪魔となり、繊維の可視化が難しいからである。

粒子濃厚系における粒子の可視化を可能にする手法のひとつとして屈折率整合法がある。粒子分散系において、粒子と分散媒の屈折率とを一致させて濃厚分散流体を透明化した流体を用いた研究が従来から行われている [42,49–52]。なかでもガラスビーズは、繊維の場合のような切断面がないため光学的に非常に均一であり、この手法はガラスビーズ分散系には非常に適用しやすい [49–52]。これに対して繊維分散系においては、古くは Bell [42] がエポキシレジンとガラス繊維の組み合わせでこの手法を用いた。この組み合わせは、互いの屈折率が近いからという理由で採用されているが、両者の比重差については述べられていない。Folgar と Tucker [14] はナイロンやポリエステル繊維の分散流体にトレーサーとして同じ材料の着色繊維を加え、そのトレーサー繊維の運動を調べたが、繊維と分散媒が透明であるという理由以外、とくに屈折率に関して明言はされていない。最近 Stover ら [53] や Iso ら [54,55] は繊維分散系に対して、繊維と分散媒の屈折率と比重を完全に一致させ、着色繊維をトレーサーとして繊維濃厚分散流体における繊維の可視化を行うことにより繊維間干渉のある繊維の運動を単純せん断流れ場において調べている。Stover らの研究では、屈折率のみならず繊維と分散媒の比重までもが一致していることに注目すべきである。

(4) 繊維分散流体のレオロジー特性 繊維分散流体のレオロジー特性は、多くの研究者によって実験的・理論的に研究されてきた [57–64]。それらの結果によると、繊維分散流体のレオロジー特性は、繊維の形状だけではなく繊維の配向状態や繊維の分散媒にも依存していることが指摘されている。また粘度と第一法線応力差は低せん断速度域で繊維の体積分率とアスペクト比とともに増大し [60,63]、高せん断速度領域では、それらは、分散媒の粘度と第一法線応力差に近づいて繊維の体積分率や繊維の形状に依存しなくなることが明らかにされている [57,60]。また最近では分散媒が非ニュートン流体の場合についても研究が進められている [62,64]。

以上のように、繊維分散流体は、科学的・工学的な興味から数多くの研究がなされてきた。しかし、流路内における繊維濃厚分散流体の繊維の配向状態や濃度分布についてはほとんど知られていない。一方、高分子成形加工では流路の形状や断面積が変化する流路がしばしば現れるため、工学的にはこのような流路内流れにおける繊維濃厚流体中の繊維配向や濃度分布を知ることが重要となる。しかし、複雑な流れ場ではせん断流れと伸長流れが混在し、このような流れ場における繊維の配向状態は十分に解明されていない。

(5) 繊維分散流体と繊維強化複合材料 繊維分散流体は、工業的には繊維強化プラスチックや製紙のパルプ分散系などで見られる。繊維強化プラスチックにおいては、分散媒は高分子流体であるプラスチック溶融物であり、繊維はガラス繊維や炭素繊維が多い。抄紙工程においては、分散媒は水であり、繊維は木材パルプ繊維である。ここでは、前者の繊維強化プラスチックを対象にした研究について述べる。

繊維によるプラスチックの強化は、一般に熱可塑性樹脂の射出成形においてしばしば用いられる。熱可塑性樹脂では、短繊維を分散させて繊維強化することにより、プラスチック本来の軽量・高強度などの特徴を損なうことなく、弾性率・強度・熱安定性を高めることができるからである。さらに分散繊維に炭素繊維を用いることで、プラスチックに導電性を与えることも可能であり、電磁シールドプラスチックとして用いられる [65]。

繊維強化プラスチックの製造過程の問題に、成形品中における繊維の配向や濃度分布が、成形品の品質に大きく影響するという点がある。一般に、材料には等方的な力学的性質を求める場合と、ある目的のために、非等方的な力学的性質が求められる場合がある。たとえば、一般に用いられる高分子のシートは、弾性率や強度などの力学的性質、熱を加えたときの収縮・ひずみなどの熱的性質があらゆる方向にわたって均質・等方的な性質が求められる場合が多い。しかし、荷造りヒモのように、ある方向に強度が求められる場合もある。

繊維強化プラスチックにおいても、一般には均質で等方的な力学的性質が求められるが、逆に、繊維の配向状態をうまく制御することによって望みの配向状態を製品中に作り出すことができれば、さらに有用な材料となりうる。以上のような目的から、成形品における繊維の配向状態を調べる研究が多数行われてきた [67-73]。

Darlington と McGinley [67] は引っ張り試験片の各断面内における繊維の配向状態を観察した。Vincent と Agassant [68] は、円板状の成形品において表面と内部とで配向状態がまったく異なることを示し、Jeffery の繊維配向モデルを用いた数値計算結果とよく一致することを報告している。Darlington と Smith [69] は、放射状流れにおいて厚み方向に五つの層ができ、成形条件によってその構造が変化することを示した。Bay らは、成形品の断面に現れる繊維の切断面の楕円形状から繊維の三次元配向を測定し [70]、円板状とストリップ状の成形品についてこの方法を適用した [71,72]。VerWeyst ら [73] は、リブを有する複雑形状の成形品を対象に、繊維の三次元配向を数値計算し、実験との良い一致をみている。

以上のように、実際に成形された最終製品中における繊維配向を調べる研究は多

い。金型内に流し込んだ後の型締めや冷却のときの製品の変形によって多少の繊維配向の変化は見られる可能性はあるものの、成形品中における繊維配向は、成形過程における繊維の流動配向によってほとんど決まってしまうと考えられる。横井ら [74] と村田ら [75] は、実際の射出成形機を用いて、金型にガラスによる観察窓を設け、その窓から成形過程における繊維の流動配向状態を観察した。しかしこのように実際の成形過程における繊維配向状態の観察は、高温・高圧の条件のもとで行われることによる扱いにくさがあるため、研究はあまり多くない。また、繊維が射出成形機の混練部であるスクリーによって激しく破損し、繊維の長さにはばらつきが大きいなどの条件が、繊維の相互干渉を考える場合にも非常に複雑になり、系自体を単純化できないという問題点がある。このように、実際の成形機を用いた繊維の流動配向状態を研究対象とすることは多くの点で困難を伴う。

そこで、本章の前半で述べたように、古くから、常温・常圧のニュートン流体や高分子流体中における繊維の運動が研究され、成形過程のモデルとして取り上げられている。このような研究では、実際の成形における分散媒のモデル流体として、高粘度のニュートン流体であるシリコンオイルや水飴水溶液 [14,15]、また水溶性で高粘度・高弾性の高分子流体としてポリアクリルアミド水溶液 [44,47] などが用いられる。これらの物質は、取り扱いも容易であり、流体の力学的性質もプラスチック融液と同じような傾向の特性を有している。また流れ場としては、もっとも基本的な単純せん断流れ場 [53-55] や、実際の金型を考慮した、急縮小や急拡大を有する流れ場 [23-25] や放射状の流れ場 [32,34,46] などの多種多様な流れ場が用いられる。本研究においても、このモデル流体を用いて流路内における繊維の配向状態を調べる。

(6) 繊維強化複合材料のウェルドライン問題 プラスチック材料の成形にあたっては、今なお多数の問題が残されている。そのひとつにウェルドラインがある。この問題は、プラスチックが繊維強化されているかいないかにかかわらず生じる問題である。

ウェルドラインの形状や力学的強度の低下については射出成形や押出成形において従来から多くの研究が行われている [76-84]。繊維強化されていないプラスチックに関して、Huang と Prentice [76] は、ウェルドラインを生成する障害物の形状が成形品の強度に大きく影響することを報告している。斉藤ら [77] は、ポリスチレンを成形材料として、邪魔ピンまわりに発生するウェルド構造の発現機構を高速度カメラおよび赤外線放射温度計を用いて詳細に観察した。さらに、Mitsubishi ら [80] は

ウェルドラインの発生原因が、ウェルドライン上における分子配向状態にあることを数値計算により明らかにしている。

繊維強化されたプラスチックに関しては、このようなウェルドライン問題に加えてさらに、この領域における繊維の配向状態が他の領域のそれと異なるという現象が報告されている。Kimら [84] は、ポリブチレンテレフタレートが母材で繊維強化しない場合、ウェルドラインの有無によって力学的強度が変わらないのに対して、繊維強化した場合、ウェルドラインの存在によって力学的強度は約半分に低下することを報告している。これはウェルドライン上での繊維の配向状態が原因であるとしている。NadkarniとAyodhya [82] は、プラスチックを繊維強化した場合、ウェルドライン部の力学的強度が周囲に比べて低下することを報告している。これは、ウェルドラインをまたいで存在する繊維がないことが原因であるとしている。

ウェルドラインの生成や、その付近での周囲と異なる繊維の配向状態、繊維の不存在は、材料全体の力学的性質の均質化を目的とする場合には障害となる。熱可塑性プラスチックにおいては、繊維強化の効果は大きく、ある領域のみの物性が他の領域の物性と大きく異なることになれば、それは材料全体のそり・ひずみなどの変形や力学的強度の不均一につながり、品質上大きな問題となる。ウェルドライン問題の対策には根本的な解決方法がまだなく、生産現場ではできる限り障害物を設けない金型設計にしたり、金型温度を調整したりして、試行錯誤により対策を講じている。

しかし、ウェルドライン付近の繊維配向については、いずれの研究においても、顕微鏡で材料断面を観察し、その断面における繊維の形態を調べるという定性的な手法であり、詳細な繊維の配向状態についての定量的な研究はほとんどない。したがって、ウェルドライン付近における繊維の配向状態を詳細かつ定量的に調べることは、金型の最適設計や、繊維の配向の制御により目的にあうような材料の力学的性質を得るためにはたいへん重要である。

以上のように、繊維濃厚分散流体の流路内における流動や繊維配向、濃度分布は非常に重要な問題であるにもかかわらず、これらに関する研究はほとんどない。したがって、繊維濃厚分散流体の流れ中における繊維配向と濃度分布を明らかにすることは、繊維分散濃厚流体の数学モデルの検証に欠くことができないのみならず、実際の繊維強化複合材料の成形加工のための金型設計や繊維配向や濃度分布の制御を行うにあたって重要な知見を与えることになると思われる。

1.2 研究の目的と論文構成

本研究の目的は、繊維強化複合材料の成形加工における流動と繊維の配向状態の関連を明らかにするために、金型内の流路のモデル流路に対する繊維分散流体中の繊維配向と濃度分布を調べることである。すでに前節で述べたように、従来の繊維分散流体の繊維配向の研究は、その応用である繊維強化複合材料の成形加工分野において材料中の繊維の体積分率が非常に大きいにもかかわらず、その多くが繊維の体積分率の小さな流体を対象としてきた。それは、繊維濃厚分散流体中において流動する繊維の可視化が困難であるという問題が障害となってきたからである。したがって、金型流路内における繊維濃厚分散流体中の繊維の流動と配向状態の関連についてはほとんど知られていない。そこで、本研究では、濃厚分散流体中における繊維の可視化法について提案し、その手法を用いて、濃厚な繊維分散流体の場合における繊維の流動配向と濃度分布について詳しく検討する。

本論文は、全7章から構成される。第1章では、研究の背景および過去の研究報告を紹介したあと、本研究の目的と論文構成について述べる。第2章では、繊維分散流体のせん断流動と伸長流動に対する物性値について述べる。第3章では、流体中の繊維の可視化について従来の方法とその問題点について述べる。さらに、従来の可視化法の問題点を解決するために、本研究で新しく開発した可視化法について詳細に述べ、その有効性を示す実験を行う。第4～6章では、その方法を用いて、さまざまな流路内における繊維の可視化実験を行い、繊維配向状態と濃度分布について詳細に検討を行う。まず、第4章では、もっとも簡単な流路として、ストレート流路を通過する流れ中における可視化実験を行い、ストレート流路内における発達した流れ場における繊維配向状態と濃度分布について検討を行う。また、流路内における濃度分布が、流路に至る導管の内径によって影響されることを考慮し、適切な導管の選定について述べる。第5章では、繊維が回転しやすい急拡大部を通過する流れ中における繊維の可視化実験を行い、配向状態を濃度分布について詳細に検討し、濃厚系の繊維間の干渉が配向に与える影響について考察する。また、分散媒に高分子流体を用いた場合についても述べる。第6章では、流路中に障害物を有する流路をとりあげ、障害物によって生じるウェルドライン付近における繊維の配向状態について述べ、障害物が流路下流部の配向状態に与える影響について検討する。最後に第7章で全体の総括を行い、本研究の結論を述べる。

第2章 繊維分散流体とそのレオロジー特性

2.1 緒言

繊維分散流体中における繊維の運動を調べるにあたって、繊維と分散媒の選定は重要である。なぜなら、繊維の運動はそのアスペクト比 (=長さ/直径) が重要なパラメーターであり [1], また繊維と分散媒の比重が大きく異なると、流体中での繊維の沈降や浮揚が生じやすいからである。

さらに、流体中における繊維を可視化する目的のために、繊維の体積分率に応じて、繊維と分散媒を選定する必要がある。繊維の体積分率が小さい場合には、不透明な繊維を用いることにより、流体中での繊維を容易に可視化できる。分散媒は、その繊維とほぼ同じ比重を有する流体の中から選択すればよい。一方、体積分率が大きい場合には、不透明な繊維を用いれば、互いの繊維を区別できなくなり、また繊維そのものが邪魔になって流体内部の繊維を観察することができない。そこで、透明度の高い繊維と分散媒を用いて繊維分散流体をほぼ透明化したり、さらに高い体積分率の場合には、互いに同じ屈折率を有する繊維と分散媒を選定して繊維分散流体を光学的に均一化したうえで、トレーサーとして不透明な繊維を少量添加し、そのトレーサー繊維を可視化する。

プラスチックを繊維強化するために各種の高分子材料から紡糸された短繊維が市販されており、また分散媒としてもさまざまな流体が選択肢として考えられる。しかし、以上のような観点から繊維と分散媒を選定しようとする場合、長さやアスペクト比、透明度を考慮して実験に使用する繊維を市販品の中から選び、さらにそれに対して、比重と屈折率が繊維とほぼ同じ分散媒を選定するのはたいへん困難である。

そこで、本研究では、研究の目的にあう繊維を得るために、実験に使用する繊維を高分子材料から紡糸した。そのため本章では、まず本研究で用いた繊維について、その紡糸法および調整法について詳述するとともに、繊維分散流体の製作法について述べる。

一方、繊維分散流体における繊維の運動は、分散媒のレオロジー特性と密接な関係にあると考えられる。したがって、分散媒のレオロジー特性を知ることは、流体中における繊維の運動を解析するうえで重要である。

繊維強化プラスチックにおいて繊維の分散媒は高分子流体である。この流体は粘性的性質に加えて弾性的性質をも有する粘弾性流体である。プラスチックの成形金型内において、成形時に生じる問題が粘弾性流体のレオロジー特性に起因すると考えられ、この問題の原因を解明するために、粘弾性流体のレオロジー特性としてせん断変形に対する定常せん断粘度や弾性的性質を表す第一法線応力差などのせん断特性が数多く測定されている。その結果、粘弾性流体はニュートン流体とは異なる力学的性質を示すことが明らかにされた [85]。

繊維分散流体についても、粘弾性流体の場合と同じ目的から、繊維の材料あるいは繊維のアスペクト比や体積分率などを変化させて、せん断特性が測定されてきた [56-61]。その結果、ニュートン流体を分散媒とした繊維分散流体であっても、粘弾性流体と同様にニュートン流体とは異なるせん断粘度特性を示し、また第一法線応力差が生じることも明らかにされた [56]。

しかし、実際の成形加工に用いられる金型内に見られる急縮小部や急拡大部における流れでは、流体粒子のせん断変形だけでなく伸長変形も混在した流れ場である。このような流れ場における複雑な流れ現象を解明するためには、流体のせん断特性だけでは不十分であるという指摘があり、伸長特性も考慮することが求められている [86]。

一般に伸長粘度は、流動性のある溶液のような流体に対しては、伸長流れ場を実現することが困難であることから従来、測定はあまり行われてこなかったが、近年までにスピンドル型レオメーターを用いた測定結果が多数報告されている [87-97]。しかし、繊維分散流体の伸長粘度は、スピンドル型レオメーターの測定装置の問題のために実際に測定することが困難である。

本章では、本研究で使用する繊維分散流体と高分子流体のレオロジー特性を明らかにするため、繊維分散流体と分散媒のせん断粘度および第一法線応力差を円錐円板形レオメーターを用いて、また分散媒の伸長粘度をスピンドル型レオメーターを用いてそれぞれ測定した。

2.2 繊維濃度の分類

繊維分散系では、繊維間の力学的干渉を考慮して繊維濃度を三つの領域に分類することができる。これらは、図 2.1(a) のように繊維が他の繊維と干渉することなしに自由に回転できる状態、図 2.1(b) のようにある面内でのみ自由に回転できる状態、どう回転しても他の繊維と干渉する状態の三種類の状態である。これらの三種類の状態をそれぞれ希薄・準希薄・濃厚と称し、パラメーター nL^3 の値によって区別する [98]。

$$\begin{cases} nL^3 < 1 & (\text{希薄}) \\ 1 < nL^3 < \frac{L}{D} & (\text{準希薄}) \\ \frac{L}{D} < nL^3 & (\text{濃厚}) \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで L は繊維の長さ、 n は単位体積あたりの繊維の本数、 D は繊維の直径である。本研究では濃厚分散流体を主な対象とする。繊維の体積分率 ϕ は次式で表される。

$$\phi = nD^2L \quad (2.2)$$

2.3 試料流体の作製

本研究では、繊維濃厚分散流体中における繊維の可視化を行うことにより繊維の運動を観察する。しかし流体に含まれる繊維のすべてが可視化されたのでは、濃厚系においては非常に多数の繊維が含まれるため、1本1本の繊維を互いに区別できなくなる。それを克服するための方法として、屈折率整合法を利用する。この方法では、分散粒子である繊維（これを基本繊維と称する）と分散媒との屈折率を一致させ、繊維濃厚分散流体を完全に透明化する。そのうえで、観察する繊維（これをトレーサー繊維と称する）を別途少量だけ添加することにより、トレーサー繊維で基本繊維の運動を代表させる。本研究では繊維の複屈折を利用した新規な可視化法によりトレーサー繊維を可視化したが、これについては第3章で詳述する。

繊維濃厚分散流体を屈折率整合法で透明化し、少量だけ添加したトレーサー繊維の運動を調べるためには、使用する基本繊維に次の諸条件が必要である。

- (1) 基本繊維が無色透明であること。

基本繊維は分散流体中に多量に分散されるため無色透明でなければならない。

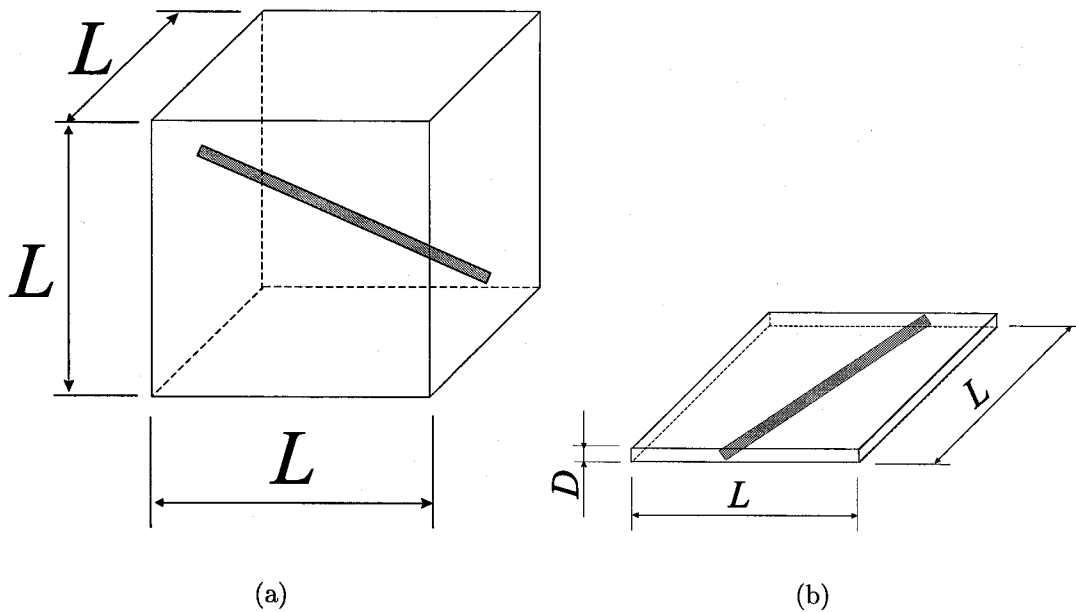


FIGURE 2.1: A fiber in a unit cell. (a) The fiber freely can rotate without interaction between fibers. (b) The fiber can rotate only in a plane having a thickness of D .

- (2) 基本繊維の屈折率が分散媒と同じかそれに近いこと。

基本繊維を分散媒に濃厚に分散させたとき、繊維濃厚分散流体をほぼ透明化するために、基本繊維の屈折率が分散媒と同じかそれに近くなければならない。

- (3) 基本繊維の比重が分散媒と同じかそれに近いこと。

繊維の運動に対する重力の影響をなくし、また分散媒中での繊維の沈降または浮揚を防ぐため、繊維の比重が分散媒と同じかそれに近くなければならない。

- (4) 基本繊維とトレーサー繊維のアスペクト比はほぼ同じであること。

トレーサー繊維が基本繊維と同じ運動をするためには、両繊維のアスペクト比がほぼ同じかそれに近くなければならない。

- (5) 基本繊維が複屈折を有していないこと。

第3章で述べる新しい可視化法で繊維を可視化するために、基本繊維が複屈折を有してはならない。市販の高分子繊維は紡糸時に非常に強く延伸されるために、その多くが複屈折を有していると考えられる。

Stoverら [53] は、上記の (1) から (3) の条件を満たす高分子材料として、セルロースアセテートプロピオネート (cellulose acetate propionate, 比重1.21, 屈折率1.47, 以下CAPと略称する) を、繊維の分散媒としてグリセリン (glycerin) とポリエチレングリコール (polyethylene glycol) の混合溶液 (比重1.21, 屈折率1.47) を用いる手法を開発した。これらの組み合わせにより、基本繊維と分散媒との比重および屈折率が一致した繊維分散流体を作ることができる。これらはいずれも入手しやすく取り扱いも容易な物質である。しかしCAPは本来は繊維用途の材料ではないため繊維として市販はされておらず、繊維として利用するには自前で紡糸する必要がある。そこで本研究では、既存のキャピラリー型粘度計 (株式会社東洋精機製作所製 キャピログラフ) を紡糸機として代用し、CAPの繊維を紡糸した。内径9.95mmのシリンダー内で220°Cに加熱し溶融したCAP (イーストマンケミカルジャパン株式会社製) を、押し出し速度3mm/minで直径0.5mmの穴のダイ (厚み5mm) から押し出した (図2.2参照)。その後、巻き取り装置で直径60mmのパイプ (回転速度1200 r.p.m.) に巻き取った。このとき、上記の条件 (5) を満たすように、繊維が強く延伸されないように注意を払い、複屈折を有することのないように配慮した。

次に、巻き取られたCAPの長繊維を短繊維に加工する必要がある。まず巻き取られた長繊維をそのままの状態に固めるために、糊剤として用いるヒドロキシエチルセルロース (hydroxyethyl cellulose, ダイセル製, QP 4400H, 以下HECと略称する) の10wt%水溶液に、長繊維が巻き取られたままのパイプ全体を浸し、取り出したあと、これを十分に乾燥させた。その後、図2.3に示す工程にしたがって長繊維を短繊維に加工した。まず、(a, b) パイプに巻き取られHECで固められた状態の長繊維をパイプの軸方向に切れ目を入れることでシート状に広げ、(c) 合成紙 (ユポ, FGS95, 厚み95 μ m, 王子油化株式会社製) の上に上記のHEC水溶液を塗布して張り付けた。(d) 合成紙上に張り付けられたCAPの長繊維を、事務用電動裁断機で1mmの長さに切断し、短繊維とした。得られたCAPの短繊維は、水で洗浄してHECを除いたあと、十分に乾燥させ、基本繊維として供した。

以上の方法によるCAPの短繊維の製法では一度に少量しか繊維が製作できないため、同じ製作過程を2度繰り返し、必要量のCAP短繊維を得た。それぞれをCAP繊維A, CAP繊維Bと呼ぶことにする。それぞれのCAP繊維の平均長さとして直径を万能投影機 (Nikon製 Model 6C) で拡大して200本につき測定した結果、CAP繊維Aの長さは0.98mm (標準偏差0.11mm), $L/D = 22$ であり、CAP繊維Bの長さは1.0mm (標準偏差0.08mm), $L/D = 23$ であった。それぞれのCAP繊維の

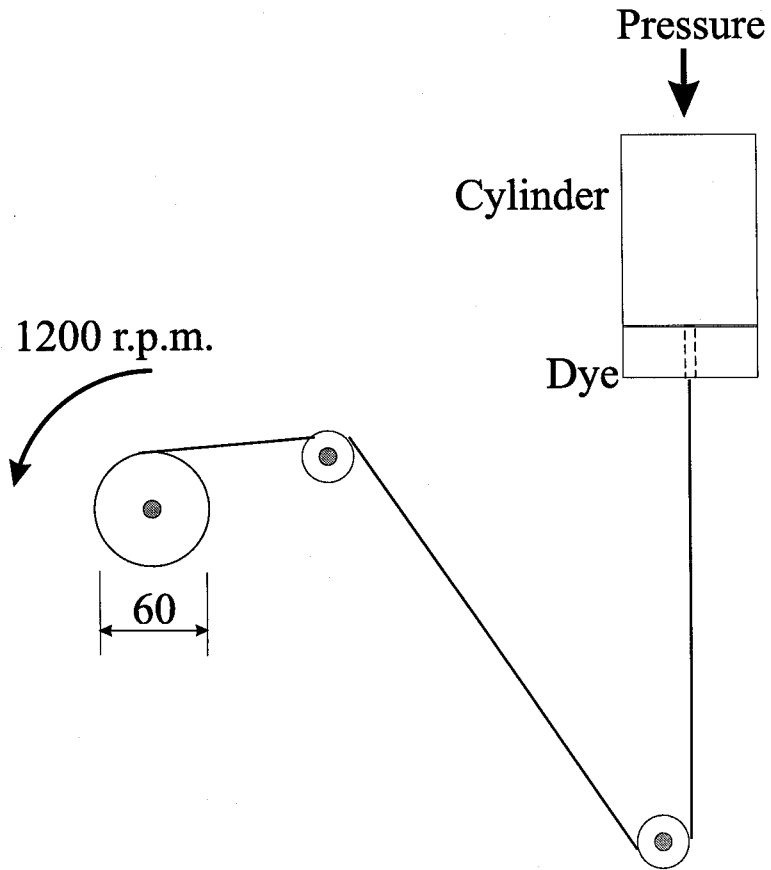


FIGURE 2.2: Schematic setup of fiber spinning system.

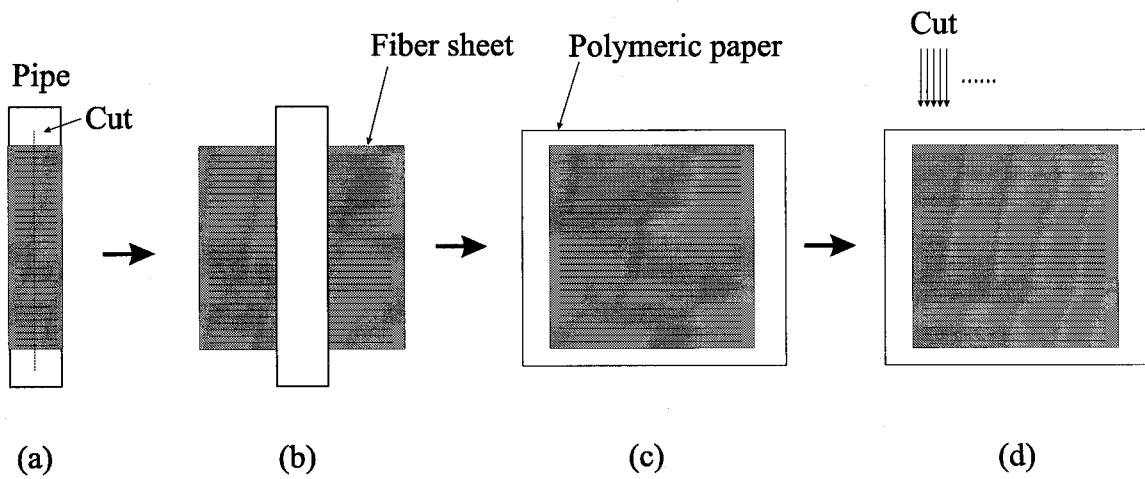


FIGURE 2.3: Flow chart of short fiber processing.

繊維長分布を図 2.4 に示す。これらの図から、両者は類似した長さ分布を持っていることがわかる。第 3 章～第 5 章では CAP 繊維 A を用い、第 6 章では CAP 繊維 B を用いた。

次に分散媒としてグリセリン (glycerin, 阪本薬品工業株式会社製) とポリエチレングリコール (PEG #400, 平均分子量 400, 日本油脂株式会社製) の混合液 (それぞれ 65.1wt% と 34.9wt%, 比重 1.21) を用いた。屈折率は、アッペ屈折計 (株式会社アタゴ製 DR-A1) を用いて計測し、室温で 1.47 であった。分散媒の比重と屈折率は CAP 繊維と同じである。

繊維強化複合材料の成形過程における繊維の運動を対象とした研究では、繊維の分散媒であるプラスチック融液が高分子流体であることから、高分子流体中における繊維の運動の解析も重要である。高分子流体は一般に非ニュートン粘性と弾性的性質を有する。そこで本研究では、そのモデル流体として、上記のグリセリンとポリエチレングリコールの混合流体にさらに高分子を添加した流体も分散媒として用いた。高分子として、高弾性で取り扱いが容易なポリアクリルアミド (polyacrylamide, 平均分子量 約 1000 万, 三洋化成工業株式会社製 Sanfloc AH-70P, 以後 PAA と略称する) を用い、上記の分散媒に溶解して高分子流体とした。PAA は水にしか溶解しないため、上記のグリセリンとポリエチレングリコールの混合流体に蒸留水を 2wt% で混合し、その流体に PAA を 18 p.p.m., 35 p.p.m., 100 p.p.m., 200 p.p.m. だけそれぞれ溶解した 4 種類の高分子流体を用意した。流体は、温度を約 35° に保ちながら、攪拌機でゆっくりと 24 時間攪拌し、PAA を十分に溶解させた。

以上の CAP 繊維と分散媒とを用いて、繊維分散流体 ($nL^3 = 5 \sim 35$, 繊維の体積分率 1 ~ 7%) を得た。しかし、基本繊維と分散媒との屈折率が一致しているため、このままでは繊維を可視化することができない。そこでトレーサー繊維として、比重と屈折率が CAP 繊維に近く、かつ複屈折を有する市販の透明ビニロン繊維 (vilylon, クラレ株式会社製, VF1203-2, 比重 1.26, 屈折率 1.53) を繊維濃厚分散流体に少量だけ ($nL^3 = 0.2$ または 0.5 , 繊維の体積分率は 0.016% または 0.04%) 添加した。透明ビニロン繊維を用いたトレーサーの可視化法については第 3 章で詳しく述べる。このビニロン繊維 200 本につき万能投影機で長さ と直径を計測した結果、長さ 1.0mm (標準偏差 0.14mm), $L/D = 35$ であり、CAP 繊維の長さ と L/D に近い。図 2.5 にビニロン繊維の繊維長分布を示す。

Jeffery [1] によれば繊維の回転運動は繊維の直径に対する長さの比であるアスペクト比 $r_a = L/D$ と関係している。繊維形状に関する無次元数 $\varepsilon = (r_a^2 - 1)/(r_a^2 + 1)$

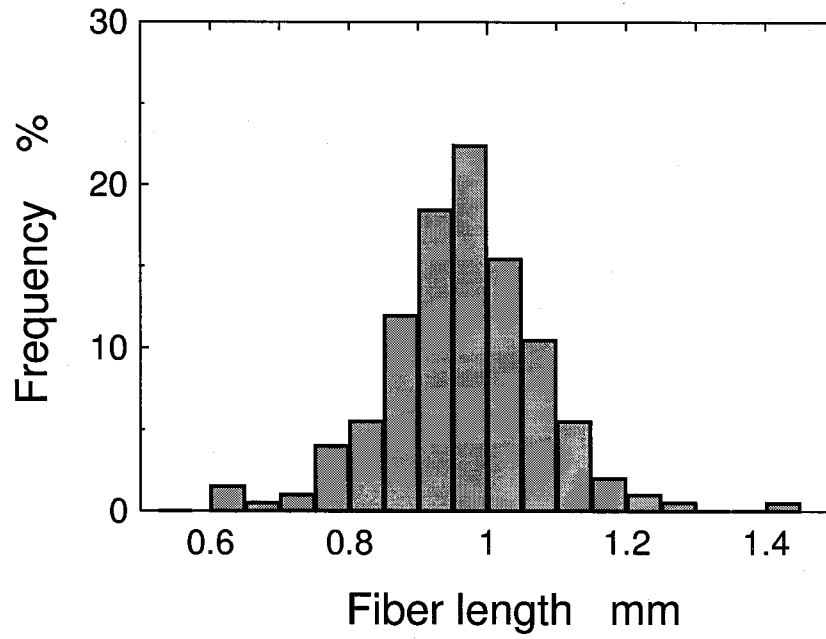
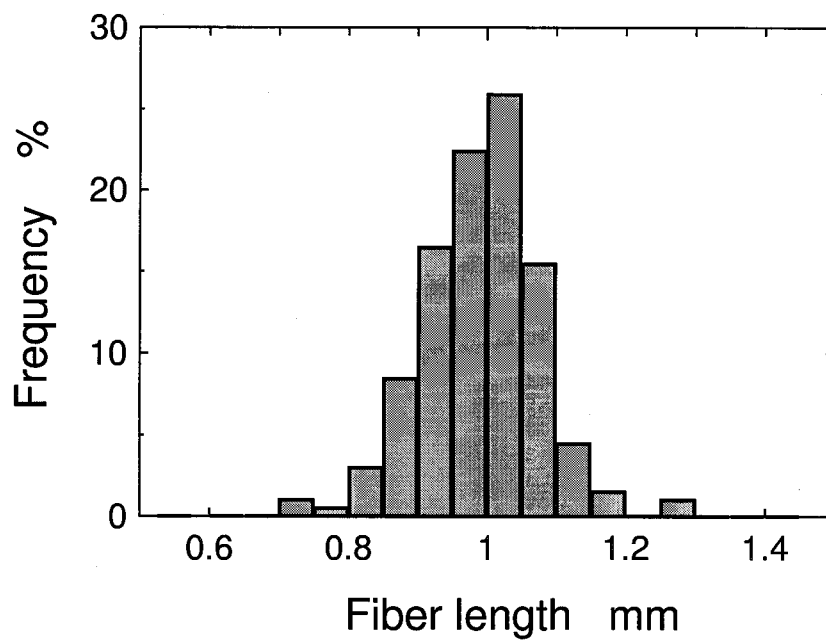
(a) CAP fiber *A*(b) CAP fiber *B*

FIGURE 2.4: Distribution of lengths of CAP fibers.

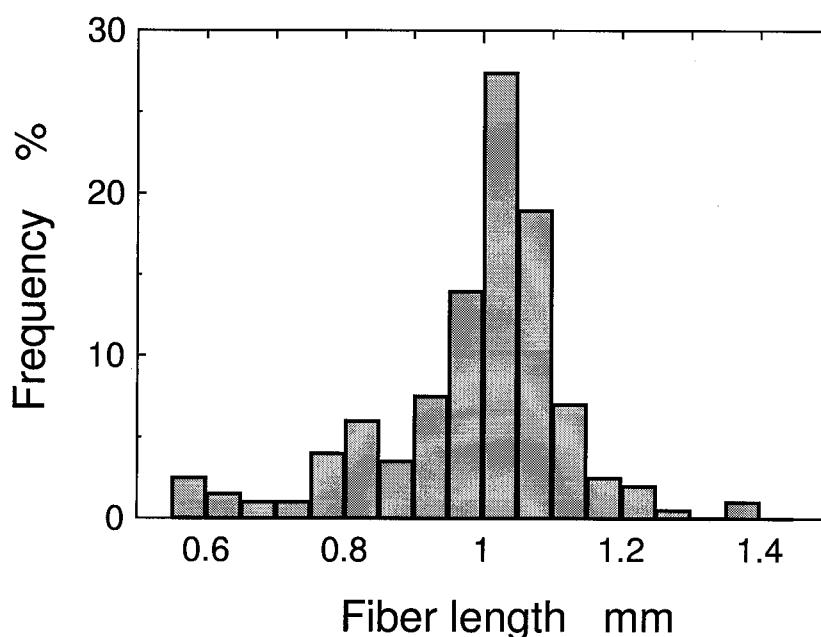


FIGURE 2.5: Distribution of lengths of vinylon fiber.

の値は、図 2.6 に示すように、本研究で用いた CAP 繊維の場合は $\varepsilon = 0.99588$ であり、ビニロン繊維の場合 $\varepsilon = 0.99837$ であり、その差は 0.25% しかない。したがって、このビニロン繊維はトレーサーとして CAP 繊維の運動を代表しているとしてよい。

なお、このビニロン繊維には結束材として水溶性の糊剤があらかじめ塗布されているので、使用にあたっては、水で洗浄したあと十分に乾燥させたものを用いた。さらに、ビニロン繊維のみを同様の分散媒に希薄に分散させた流体 ($nL^3 = 0.2$ または 0.5) を繊維希薄分散流体として用意し、繊維濃厚分散流体との比較のために用いた。

2.4 試料流体のレオロジー特性

2.4.1 せん断粘度と法線応力差

本項では、試料流体の定常せん断粘度と第一法線応力差を測定した。測定には回転型の円錐円板形レオゴニオメーター（日本レオロジー機器株式会社製 NRM-2000S-NF）を使用した。繊維分散流体のレオロジー物性を円錐円板形レオゴニオメーターで測定する場合、円錐の先端切り欠き部に繊維が詰まらないように注意を払う必要がある。そのため円錐には切り欠き部の高さが CAP 繊維の直径である $45\mu\text{m}$ よりも

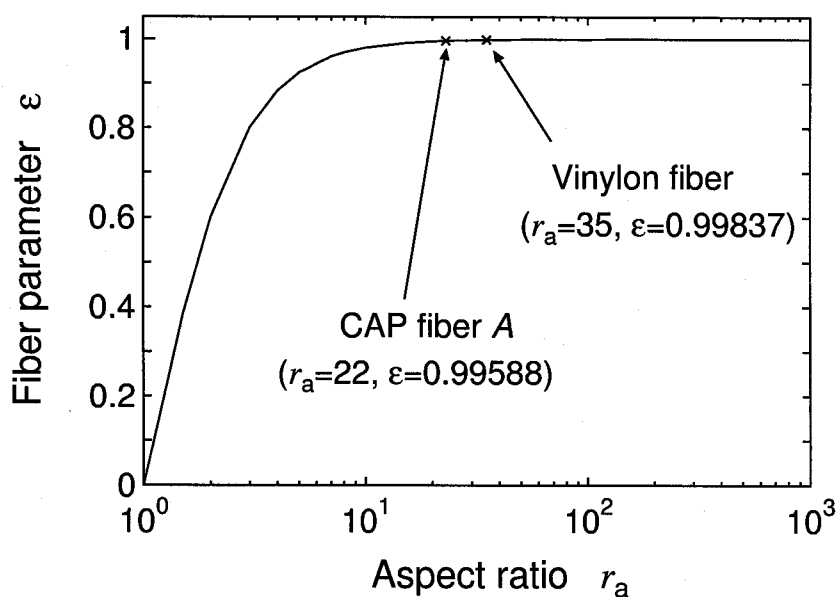


FIGURE 2.6: Dependence of the fiber parameter on an aspect ratio of a fiber.

大きな $100\mu\text{m}$ のもの（円錐の半径 46.4mm ，円錐先端角 2° ）を用いた。さらに，円錐先端の切り欠き部（半径 2.9mm ）に繊維のない分散媒をごく少量だけ注入して円錐先端部に限り繊維が存在しないようにし，繊維の詰まりを防止した。測定温度は 27°C である。測定した流体は，繊維を含まない分散媒（グリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液および高分子流体），それらを分散媒とした繊維濃厚分散流体 ($nL^3 = 30, 35$) と繊維希薄分散流体 ($nL^3 = 0.5$) である。

図 2.7～図 2.9 に測定結果を示す。まず図 2.7 に，グリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液，およびそれを分散媒とした繊維分散流体のせん断粘度を示す。この図から，グリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液と繊維希薄分散流体は，粘度がせん断速度に依存しないニュートン粘性を示す流体であること，繊維濃厚分散流体は，せん断速度が 4s^{-1} 以下でせん断速度の増加に対してせん断粘度が低下する shear-thinning 流体であることがわかる。後者の結果は，粘度は低せん断速度域では繊維の体積分率とともに増大し [60,63]，高せん断速度領域では分散媒の粘度に近づいて繊維の体積分率や繊維の形状に依存しなくなる [57,60] という従来の測定結果と同じ傾向を示していることがわかる。

$nL^3 = 0.2$ の繊維希薄分散流体については，それよりも繊維の体積分率の大きな $nL^3 = 0.5$ がニュートン粘性を示すことから，ニュートン粘性を示すことが明らかである。また流体の弾性的性質を表す第一法線応力差は，繊維濃厚分散流体であっても装置の測定限界値以下であり，測定できなかった。

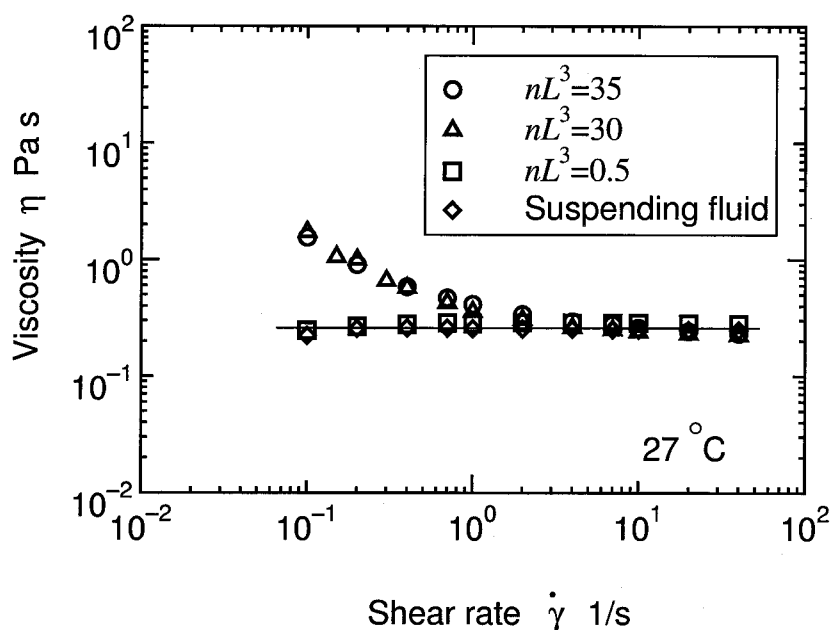


FIGURE 2.7: Shear viscosities of fiber suspensions and suspending fluid.

図 2.8 に分散媒の高分子流体の定常せん断粘度と第一法線応力差を示す。この図から、本研究で用いた高分子流体では、定常せん断粘度は、高分子を添加しない流体と同じように、せん断速度に依存しないニュートン粘性を有していることがわかる。また第一法線応力差は、35 p.p.m. 以上の高分子流体で測定可能であるが、10 Pa.s のオーダーであり、たいへん小さい。

図 2.9 に 200 p.p.m. の高分子流体に繊維を濃厚 ($nL^3 = 30$) に分散させた繊維濃厚高分子流体のせん断粘度と第一法線応力差を示す。図中には、比較しやすいように、PAA を含まないニュートン流体の分散媒の場合の結果についても掲載した。この図から、高分子流体中の繊維濃厚分散流体は、ニュートン流体中の繊維濃厚分散流体の場合と同様に、せん断速度が $4s^{-1}$ 以下でせん断速度の増加に対してせん断粘度が低下する shear-thinning 流体であることがわかる。また繊維濃厚分散流体では、分散媒が高分子流体かニュートン流体かにかかわらず、ほぼ同じせん断粘度特性を示すことがわかる。

2.4.2 伸長粘度

高分子流体のレオロジー物性のなかでも最近とくに注目されているのが、流体の伸長粘度特性である。従来は、せん断粘度や法線応力差などのせん断特性が力学的物性の評価対象であったが、それだけでは説明できない流れ現象が数多く観察され、

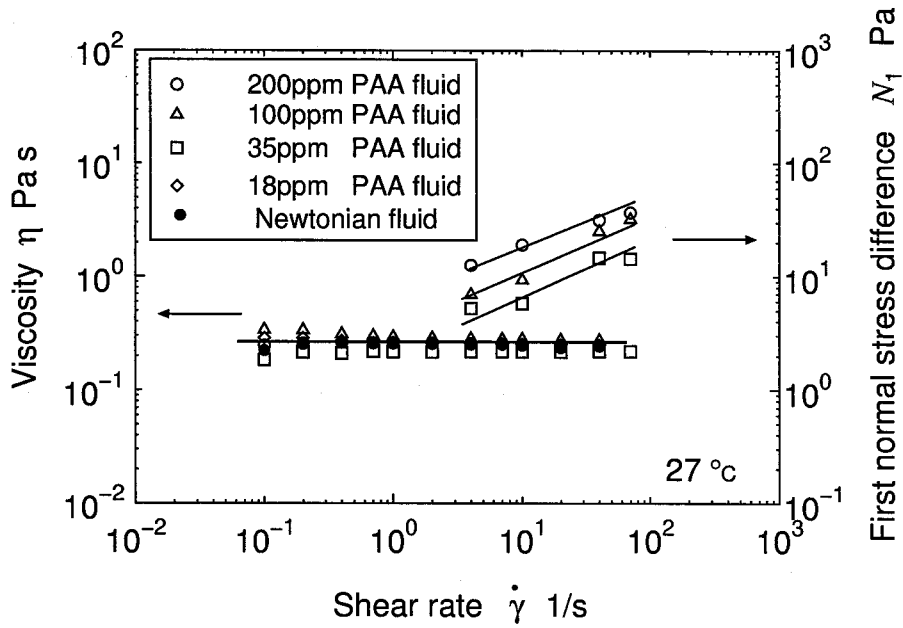


FIGURE 2.8: Shear viscosities and first normal differences of polymer solutions.

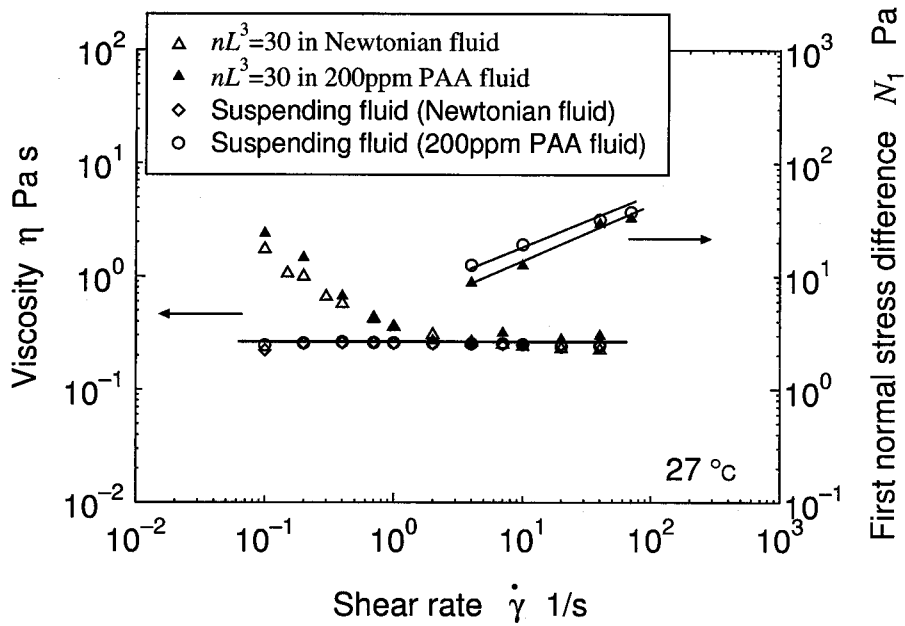


FIGURE 2.9: Shear viscosities and first normal differences of concentrated fibers suspensions in the Newtonian fluid and the polymer solution.

伸長粘度特性を考慮することが求められている [86]。高分子融液の伸長粘度の測定はほぼ確立されているため [99]，多種多様な高分子材料に対する伸長粘度特性が測定されている。しかし，溶液のような流動性のある液体の伸長粘度測定の方法はいまだ確立されたとはいえない。

現在のところ，溶液の一軸伸長粘度の測定装置には，従来から多く用いられているスピンドル型レオメーター [87-97] や最近とくに進歩の著しいストレッチ型レオメーター [100,101] が用いられる。スピンドル型レオメーターは装置が簡易であることやせん断流れの影響を受けにくいという利点はあるが，伸長速度を幅広くコントロールすることが難しい。ストレッチ型レオメーターは最近注目されているが，この装置による測定方法はいまだ十分に確立されているとはいえない。

そこで本研究では，既存のスピンドル型レオメーターを用いて一軸伸長粘度の測定を行った。繊維分散流体の伸長粘度は，繊維が含まれることにより増加することがわかっているが [21]，スピンドル型では装置の構造上，繊維を含んだ流体の伸長粘度を測定することは難しい。そこで，ここでは繊維を含まない高分子流体のみの伸長粘度を測定した。その結果を表 2.1 に各 PAA 濃度に対して示す。スピンドル型レオメーターでは，伸長速度を幅広くコントロールすることは難しいので，伸長速度はほぼ一定値において行った。

ニュートン流体の場合，伸長粘度はせん断粘度の 3 倍であり，伸長速度に依存せず一定である [102]。本研究で用いたグリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液は，図 2.7 よりわかるように定常せん断粘度が約 0.3 Pa.s であることから，この流体の定常伸長粘度は定常せん断粘度の 3 倍である約 0.9 Pa.s である。高分子流体の場合，表 2.1 から，PAA の濃度が増加するにしたがって伸長粘度が増加することがわかる。せん断粘度に対する伸長粘度の比であるトルートン比は，18 p.p.m. の PAA 流体で 4.5 であり，これはニュートン流体とほぼ同じである。また 35 p.p.m. で 15，100 p.p.m. で 222，200 p.p.m. で 1090 であり，PAA の濃度とともに急激に大きくなっている。

2.5 結言

本章では，実験に使用した繊維の作製方法と繊維分散流体のレオロジー特性について述べた。まず，本研究で新しく開発した方法で繊維を可視化するために必要な，複屈折を有しない高分子繊維を紡糸し，その繊維を用いて，屈折率と比重を分散媒

TABLE 2.1: Elongational viscosities of polymer solutions.

Concentration of PAA (p.p.m.)	Elongational rate (1/s)	Elongational viscosity (Pa.s)	Trouton ratio
18	17.9	1.34	4.5
35	16.8	4.63	15
100	13.7	66.7	222
200	4.07	327	1090

と一致させた繊維濃厚分散流体を作製した。

繊維の分散媒であるグリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液はニュートン粘性を示し、その流体を分散媒として繊維を濃厚に ($nL^3 = 30$ または 35) 分散させた繊維濃厚分散流体は、せん断速度が $4(1/s)$ 以下で shear-thinning 性を示す流体であることがわかった。繊維分散流体において、弾性的性質を表す第一法線応力差は、装置の限界値以下であり、測定できなかつた。繊維希薄分散流体 ($nL^3 = 0.2$ または 0.5) では、分散媒と同じせん断粘度特性を示し、繊維の影響はなかつた。さらに、高分子流体を分散媒とした繊維濃厚分散流体のせん断粘度特性は、ニュートン流体を分散媒とした場合とほとんど同じであることがわかった。

一方、グリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液に高分子を添加した高分子流体の場合、せん断粘度特性には高分子の影響は現れなかつた。伸長粘度については、 18 p.p.m の PAA 流体は、ニュートン流体とほぼ同じ値を示したが、それよりも濃度の大きな PAA 流体では、PAA の濃度が大きくなるにつれて伸長粘度が大きくなり、わずか 35 p.p.m. の PAA 濃度であっても伸長粘度が増大した。また 35 p.p.m. 以上の PAA 流体で第一法線応力差が生じ、弾性的性質のある流体であることがわかった。

第3章 繊維分散流体における繊維の可視化法

3.1 緒言

繊維強化複合材料中における繊維の配向を研究する場合、二つの方法が考えられる。第一は、製品の内部における繊維の配向状態を調べる立場である。この場合、製品中の繊維の配向状態と製品の力学的性質やそり・ゆがみなどの品質とが強く関係することから、両者の関係を論じることができる。

製品中における繊維配向の観察方法は、直接観察法と間接観察法とに分けられる。直接観察法は繊維の実像を観察する方法で、光学顕微鏡 (OM)・走査型電子顕微鏡 (SEM)・ソフト X 線透過写真 (CMR)・超音波顕微鏡 (SAM)・紫外線劣化法 [103] などがある。一方、間接観察法は繊維の間接像を観察する方法で、光散乱法 (LS)・X 線回折法 (WAXD)・超音波映像探像法などがある。OM は広域の観察に適しているが、材料の観察表面を研磨する必要があるため、観察部位は平面に限られる。SEM は微小領域が観察対象なので、大型の試料には適さない。CMR は透過であるため、試料の厚み方向で平均化された情報しか得られず、また炭素繊維のように X 線を透過する材料には使えない。SAM は表面を研磨した薄片試料の作成にかなりの困難が付きまとう。WAXD は、結晶性繊維や微小なウィスカー繊維には有効である。いずれの方法にも一長一短があり、それぞれ目的や繊維に応じて使い分けられる。

このような手法で成形品中の繊維配向を調べる研究は数多く、成形品の力学的性質と品質とに対する繊維の配向状態の影響が調べられている。しかし、この手法では繊維の配向を広い範囲にわたって定量的かつ詳細に調べることは困難である。またマトリクスにはさまざまな材料が用いられるため、マトリクスの物性による影響も無視できず、また材料の温度や金型温度、成形速度など成形条件も多岐にわたるために統一的な見解を得るには困難を伴う。

第二は、成形品中における繊維の配向は、成形品を成形する過程における繊維の配向状態と強く関係するから、それをうまく制御することが最終製品の品質の改善

に大きく寄与するという立場である。本研究では、この立場から、繊維強化複合材料中の繊維の配向状態と濃度分布について研究を行う。この立場では、成形中における繊維の流動配向を調べるのが重要であるが、流体中の繊維の運動を観察するためには、流体中の繊維を可視化する必要がある。そこで従来から、流体中の繊維の可視化のためのさまざまな方法が用いられてきた。

本章では、従来からの可視化法について簡単に述べた後、それらのひとつであるスリット光を用いた可視化法についてその問題点を検討する。さらに、その問題点を克服するための新規の可視化法を提案し、その詳細について述べる。

3.2 従来のさまざまな可視化法

流体中の繊維の運動について、Jeffery [1] が理論的に解析したニュートン流体中の回転楕円体の運動を実験的に検証する目的や、繊維強化複合材料の成形過程を対象としたモデル流体中における繊維の運動を調べるために、数多くの研究がなされている。流体中の繊維の運動を観察する場合、最も簡単な繊維の可視化法は、使用する繊維として金属繊維 [42] や炭素繊維あるいは着色した高分子の繊維など [15,45], 不透明な繊維を用いる方法である。しかし、繊維の体積分率が大きくなると、繊維同士の区別がつけられなくなったり、また繊維そのものが邪魔をして流体内部の繊維を観察できなくなったりするため、この方法は体積分率の小さな繊維分散流体にしか適用できないという欠点がある。

この問題を克服するために、体積分率の大きな繊維分散流体において次に用いられる方法は、ガラス繊維のように透明度の大きな繊維を基本繊維として用いる方法である。繊維の透明度が大きいと、繊維を分散媒中に多量に分散させても繊維分散流体の透明度は保たれる。そこで、その中に不透明な繊維をトレーサー繊維として少量だけ添加し、そのトレーサー繊維を観察する。この方法は、従来数多くの研究で用いられてきた [14]。たとえばガラス繊維を基本繊維として用いた場合、トレーサー繊維として濃く着色されたものが入手困難であるという理由から、主として炭素繊維をトレーサー繊維として用いる。しかし、ガラス繊維と炭素繊維とで比重が大きく異なる（ガラス繊維は 2.6 程度、炭素繊維は 1.3 ~ 1.7 程度）ことや、寸法形状がほぼ同じものを市販品の中から選択することが難しいという問題がある。また、基本繊維と分散媒が透明であっても、両者の屈折率が一般には異なるため、繊維の体積分率がさらに大きくなると、その中にたとえ不透明なトレーサー繊維を添加し

たとしても、光の屈折の影響によってそのトレーサー繊維を明瞭に可視化するのは難しくなる。

そこで、繊維分散流体の透明化および基本繊維と分散媒の屈折率・比重の相違の問題を解決するために、Stoverら [53] は、特殊な高分子材料を用いて紡糸した繊維を用いて繊維と分散媒の屈折率および比重を一致させ、体積分率の大きな繊維分散流体をほぼ透明化し、その中に少量だけ添加した着色トレーサー繊維を観察することに成功した。

繊維分散流体中における繊維の体積分率が小さいか大きいかに関わらず、透明な分散流体中で着色したトレーサー繊維を観察する方法は、たいへん簡便な可視化法である。しかし、トレーサー繊維の材料として高分子を用いた場合、高分子繊維の染色工程には高度な技術が要求されるため、一般に希望する高分子の繊維を染色することは容易ではない。一般に高分子の繊維には透明なものが多いので、それを着色することなしに利用できれば簡便である。

この理由から、透明流体中の透明繊維の可視化法として、スリット光を用いる方法が従来から広く用いられてきた [44,47,48]。この方法は、繊維分散流体を充填した流路を暗室内に設置し、流路内の任意の断面にスリット光を照射して、そのスリット面内にある繊維からの反射光を観察することにより繊維を可視化する。またこの方法は、あまり大きな体積分率の繊維分散流体には適用できないが、基本繊維そのものを可視化できるために、トレーサー繊維は不要であり、透明な繊維であればその材料に関わらず用いることができるという利点を有する。さらに、流路中の任意の断面内における繊維のみを可視化できるという点は特筆すべき長所である。しかしこの方法は、次節で詳しく述べるような繊維の形状に基づく欠点を有する。

3.3 スリット光源を用いた従来の可視化法

スリット光を用いた繊維の可視化法は、着色した繊維やトレーサー繊維を用いる必要がなく、さらに任意の流体断面内における繊維を可視化できる便利な手法として長らく用いられている [44,47,48]。しかし、この方法では繊維の配向によっては可視化できない繊維があるという重大な欠点があることがわかった。本節ではその欠点を理論と実験とから明らかにする。

3.3.1 理論的解析

スリット光を用いて透明な繊維の分散流体中における繊維を可視化する方法では、繊維で反射または屈折した光を観察することにより、繊維の配向状態を知る。本項では、繊維をモデル化した円柱で反射または屈折した光の方向を幾何光学を用いて解析することにより、観察者がその反射・屈折光を観察できるかどうかを調べる。

図 3.1 は、繊維に入射する入射光、繊維表面で反射する反射光、繊維で屈折する屈折光についての角度についての定義を示す。繊維の重心位置に xyz -直交座標系の原点をとった。繊維は、 xz -平面内でのみ傾いていると仮定し、入射光は x 軸に沿って入射するとする。角度 ϕ は繊維軸と入射光とがなす角である。角度 ψ と ξ は反射光または屈折光の方向を示す角度である。観察者は y 軸の正の方向にいるものとする。

図 3.2 は、入射光の方向と繊維軸とが直交する場合 ($\phi = 90^\circ$)、反射光と屈折光が繊維軸に垂直な断面内で通過する経路を示した図である。角度 θ_0 は、円柱の表面で入射光が入射する位置を示す角度である。

本解析では、観察者が反射光または屈折光を観察できるためには、角度 ψ と ξ とが次の両方の条件を同時に満たさなければならないものと仮定する。

$$87^\circ \leq \psi \leq 93^\circ, \quad (3.1)$$

$$-3^\circ \leq \xi \leq 3^\circ. \quad (3.2)$$

この角度は、次項で述べる実験から決定された条件である。添え字 1 のついた ψ_1 と ξ_1 を反射光についての角度とし、添え字 2 のついた ψ_2 と ξ_2 を屈折光についての角度とする。

円柱とその周辺の流体の屈折率はそれぞれ 1.53 および 1.47 とした。これらは、ビニロン繊維および分散媒（グリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液）に対する値であり、次節の実験で用いたものと同じである。

反射角と屈折角の解析には、それぞれ光の反射の法則と屈折の法則を用いた。 ϕ と θ_0 を変化させたときの反射角または屈折角の変化を示す解析結果を図 3.3 に示す。図 3.3(a) では、繊維表面で反射した光がそれぞれの条件 (3.1) と (3.2) を満たす場合の θ_0 と ϕ の組み合わせの領域を表している。濃く塗られた領域は条件 (3.1) を満たす θ_0 と ϕ の範囲であり、薄く塗られた領域は条件 (3.2) を満たす θ_0 と ϕ の範囲である。観察者が繊維表面からの反射光を観察するためには、反射光がこれらのふたつ

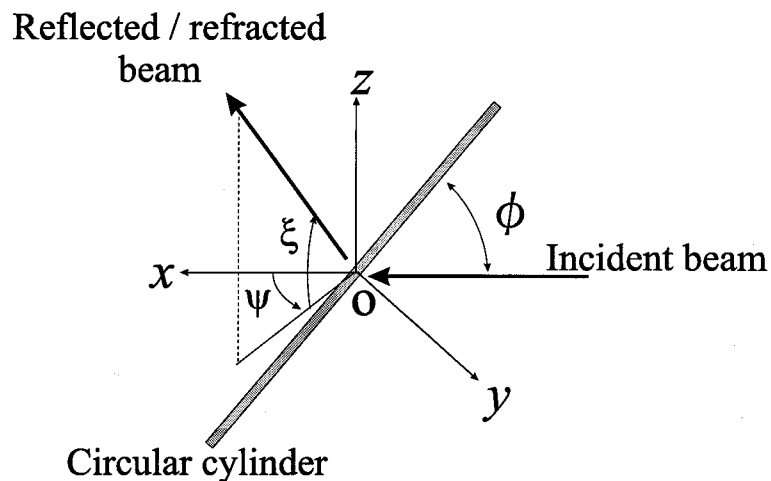


FIGURE 3.1: Reflection and refraction of light beam. A circular cylinder is inclined with respect to the incident beam at an angle of ϕ . Coordinate system is fixed in the space.

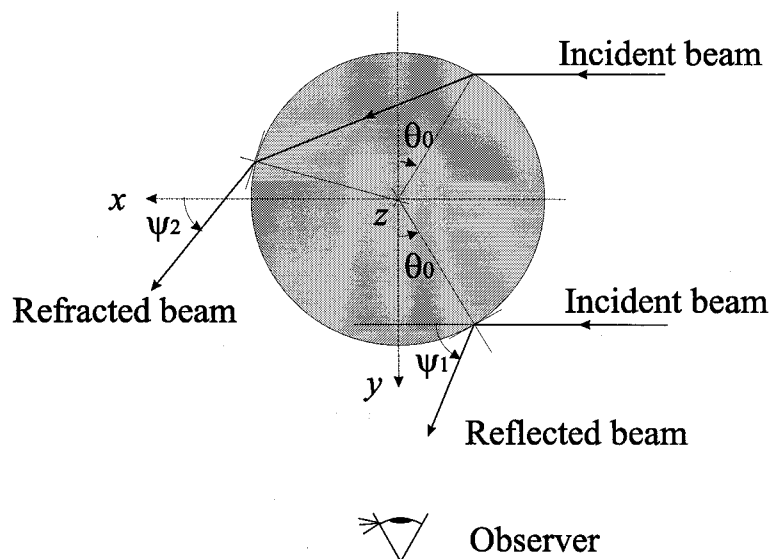


FIGURE 3.2: Reflection and refraction of laser beam in the circular cross section perpendicular to the cylinder axis.

の条件を同時に満足しなければならない。そのためには、 $\theta_0 \cong 45^\circ$ と $\phi \cong 90^\circ$ が必要であることがわかる。

図 3.3(b) では、繊維で屈折した光を観察者が観察できるために、 θ_0 と ϕ とが条件 (3.2) を満たさなければならない組み合わせの領域を表している。この場合、条件 (3.1) を満たす領域は存在しないため、図中にはこれを示す領域は示されていない。したがって、条件 (3.1) と (3.2) を同時に満足する θ_0 と ϕ の組み合わせは存在せず、観察者は繊維で屈折した光を観察できないことがわかる。

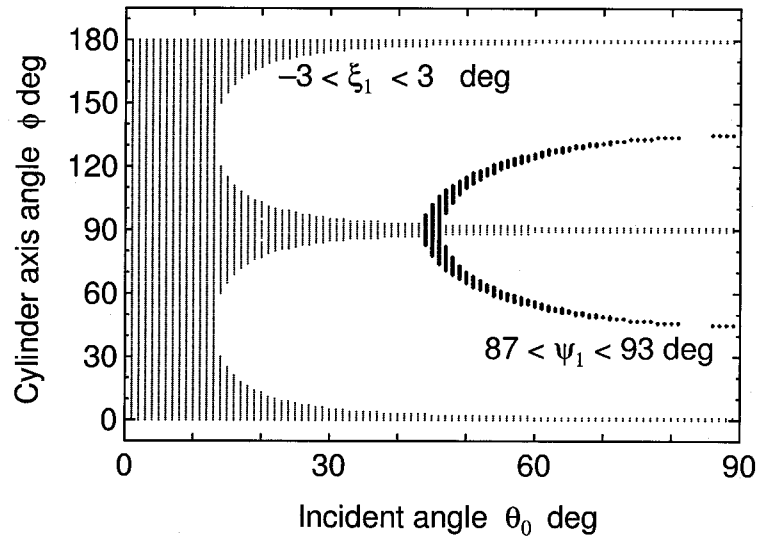
以上の結果から、スリット光を用いた可視化法では、観察者が観察できる光は繊維表面で反射した光のみであり、かつ入射光の方向が繊維軸に対してほぼ直交している場合に限られることがわかった。

3.3.2 希薄分散流体中の繊維の可視化

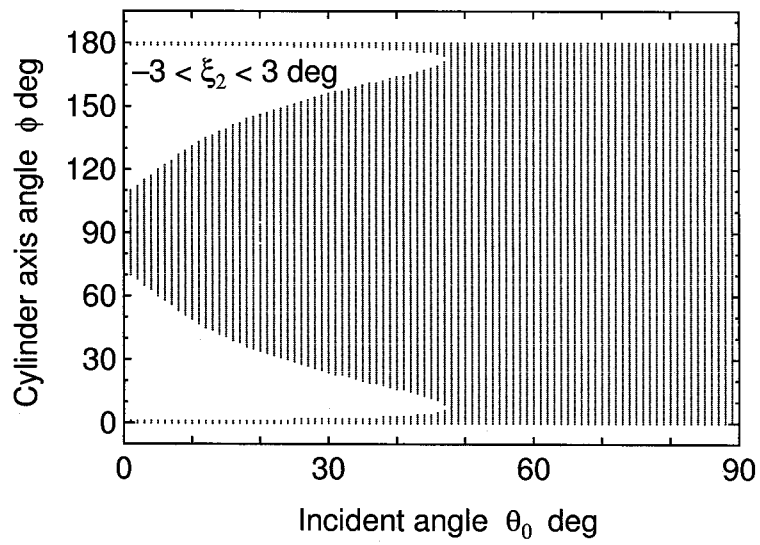
本項では、スリット光を用いて、透明な繊維の希薄分散流体中において繊維を可視化し、可視化した繊維の配向角とスリット光の照射角度との関係を実験により示す。光源には 5mW の He-Ne レーザー（日本電気株式会社製、GLG-5360）を用いた。実験装置の概略を図 3.4 に示す。繊維分散流体は 76mm × 26mm の 2 枚の平行ガラス板の間に挟まれており、ガラス板の間には厚さ 2mm の硬質塩化ビニル製のスペーサーを挟んでガラス板の間隔を維持してある。レーザービームは、円柱レンズによって、厚みが 0.8mm で中心角が 11° の扇状のスリット光に広げられる。このスリット光は平行ガラス板の間隙の厚み方向の中央断面内に照射されている。レーザーは、そのビーム方向がガラス板の長辺と 90° （配置 A）または 45° （配置 B）の角度をなす 2 通りの方向に設置し、それぞれの配置のときに観察される繊維の配向角 δ を測定した。

本実験では、繊維として、第 2.3 節で述べたものと同じ市販の透明ビニロン繊維（平均長さは 1.0mm（標準偏差 0.14mm）、平均直径は $29\mu\text{m}$ （標準偏差 $2.4\mu\text{m}$ ）、比重 1.26、屈折率 1.53）を用いた。また繊維の分散媒として、やはり第 2.3 節で述べたものと同じグリセリンとポリエチレングリコールの混合流体（それぞれ 65.1wt% と 34.9wt%、比重 1.21、屈折率 1.47）を用い、この中にビニロン繊維を少量だけ分散させた。

図 3.5 に可視化実験の結果の一例を示す。図 3.5 の (a) と (b) はそれぞれ配置 A と配置 B の場合の結果である。いずれの場合も、スリット光の光軸方向とほぼ直交す



(a)



(b)

FIGURE 3.3: Dependences of (a) the reflection angle and (b) the refraction one on θ_0 .

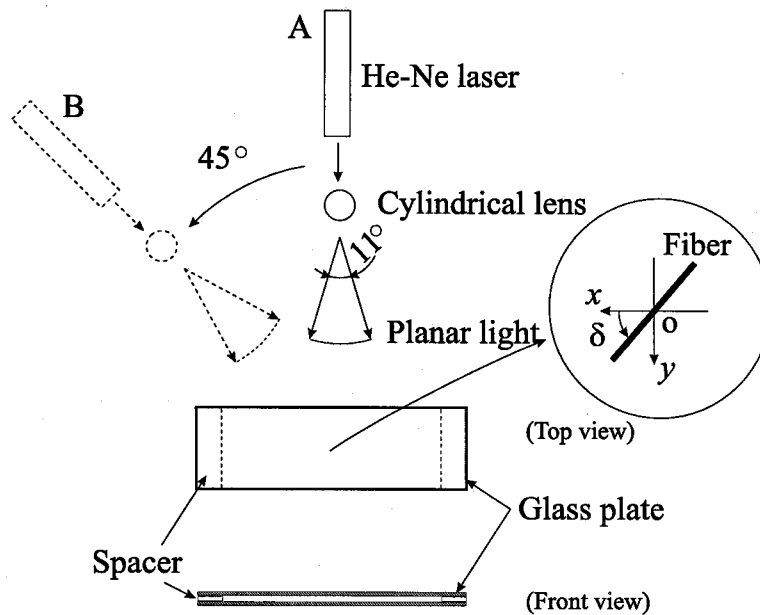


FIGURE 3.4: Schematic illustration of experimental setup for visualization of fiber using planar light source.

る方向に配向している繊維だけが明るく観察されていることがわかる。

ガラス板の間に挟まれている繊維分散流体を入れ替えて、図 3.5 に示されたような写真を数多く撮影し、可視化されている約 100 本の繊維の配向角度をデジタイザーで測定した。図 3.6 に、配置 A と配置 B において可視化された繊維の配向角分布を示す。配置 A と配置 B における平均配向角はそれぞれ 0.4° (標準偏差 10.3°) と 31.7° (標準偏差 7.9°) である。

レーザー光は、平行ガラス板に挟まれた繊維分散流体に入射するとき屈折を生じる。流体表面におけるこの光の屈折と、スリット光が 11° の中心角をもつ扇状をなしていることを考慮すれば、光は理論的に $+y$ 軸方向から測って $-4^\circ \sim +4^\circ$ (配置 A) または $26^\circ \sim 32^\circ$ (配置 B) の方向に進まなければならないことがわかる。第 3.3.1 項で得られた結果で述べたように、繊維は、繊維軸が入射光軸とほぼ直交して配向している場合にしか観察できないとするなら、配置 A の場合、 $-4^\circ \leq \delta \leq +4^\circ$ の範囲にある繊維だけが観察できるはずである。実験で可視化されている繊維の平均配向角 0.4° はこの範囲に入っていることがわかる。同様に配置 B の場合は、 $26^\circ \leq \delta \leq 32^\circ$ の範囲内の繊維が観察できるはずであり、実験による測定値 31.7° もまた、理論的なこの結果の範囲内に入っている。

以上のことから、スリット光を用いた可視化法で可視化できるのは、光軸と繊維

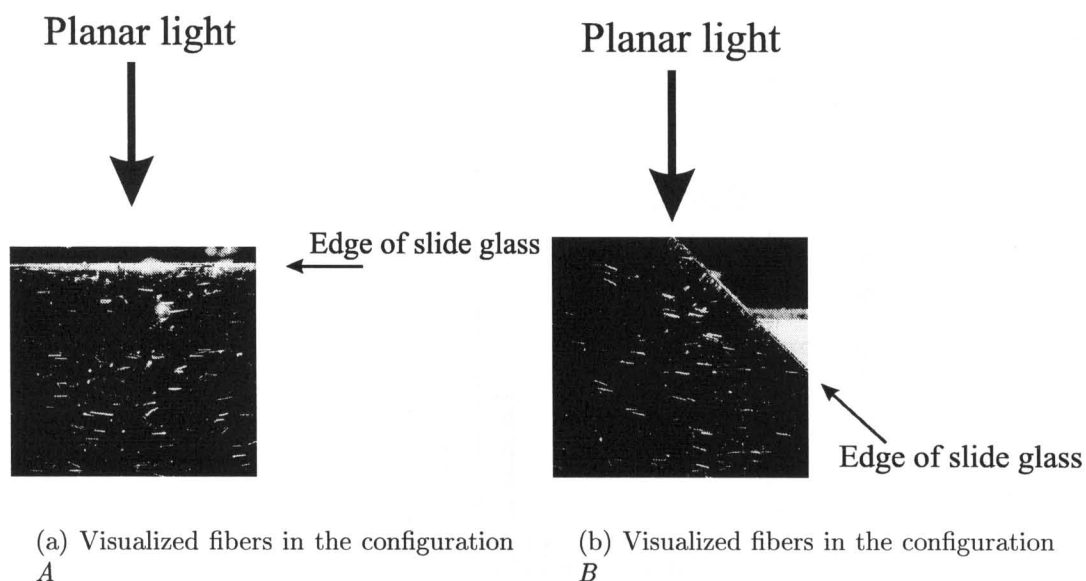


FIGURE 3.5: Visualized results of fibers immersed in the suspending fluid.

軸とがほぼ直交する繊維に限られることが、実験的にも明らかになった。したがってこの方法は、任意の方向に配向している繊維を可視化する方法としては適当でないことがわかった。

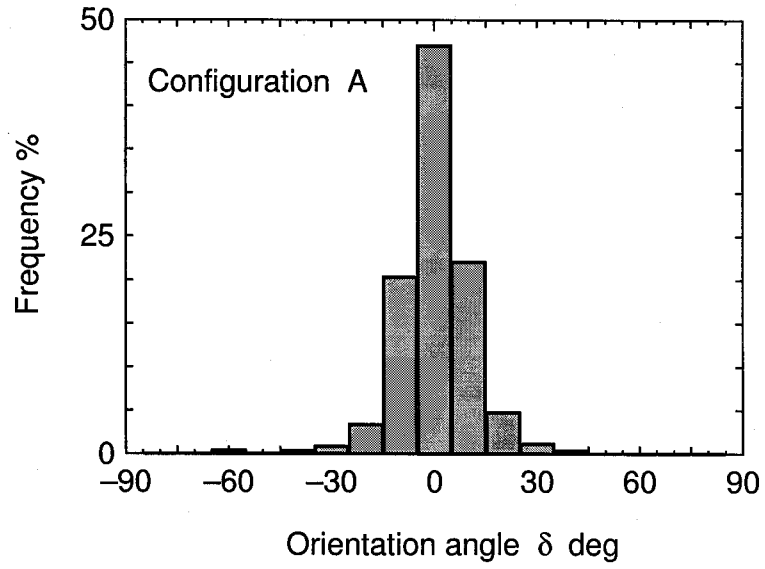
3.4 繊維の複屈折を利用した新しい可視化法

前節で、スリット光を用いた従来の可視化法には繊維軸と光軸とがほぼ直交する繊維しか可視化できないという重大な欠陥があることがわかった。そこで、この方法に代わる新規な方法として、繊維の複屈折を利用した新しい方法を開発した。本節ではその原理と方法、その可視化結果と応用例について述べる。

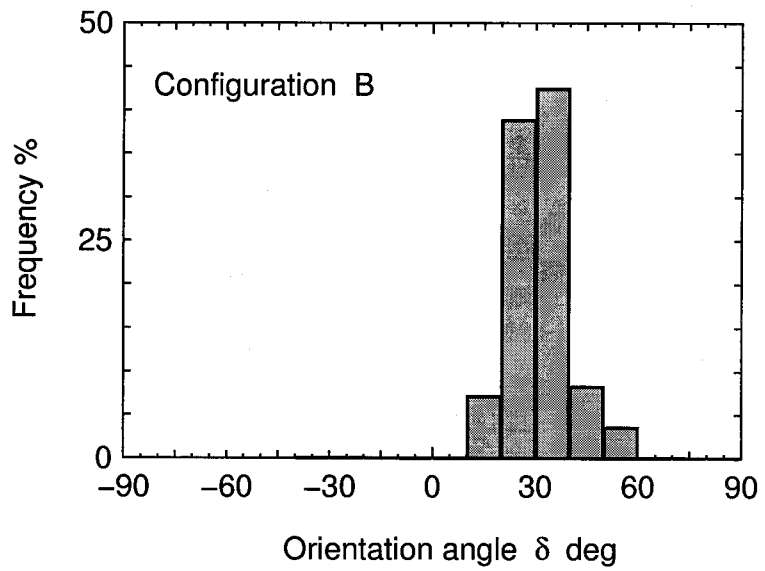
3.4.1 測定原理

高分子の繊維は、紡糸されるときに繊維軸方向に強く延伸される。これによって、高分子が繊維軸方向に強く配向し、それが原因で屈折率の異方性である複屈折が生じる。この複屈折の主軸方向は繊維の軸方向を向いている。本研究で開発した新しい可視化法では、繊維が有するこの複屈折を利用した。

図 3.7 は、偏光顕微鏡（株式会社ニコン製 LABOPHOT2-POL）の透過光下で観



(a)



(b)

FIGURE 3.6: Orientation angle distribution of fibers illuminated by a planar light.

察した高分子繊維を示す。これらの繊維は第2.3項で用いた市販の透明ビニロン繊維であり、繊維の軸方向に強く延伸されて紡糸されている。透明ビニロン繊維は、偏向方向を直交させた状態に組み合わせた2枚の偏光板（クロスニコル）に挟まれた状態で、明瞭に可視化されていることがわかる。しかし繊維の軸方向が、偏向子または検光子の方向に対して 0° 近くに配向していると、繊維は見えにくくなる。これは複屈折の主軸方向がこの方向に向いているためである。

このことをさらに詳しく調べるために、偏光板のクロスニコル下において、ビニロン繊維を透過する光の相対的な強度の繊維配向角度依存性を測定した。そのために、繊維の配向角 ζ を -20° から 110° まで $1\sim 2^\circ$ 刻みで変化させ、画像の写真撮影を行った。繊維の透過光強度は、このとき撮影された図3.7のような写真から、画像処理ソフトウェア（Adobe Photoshop）を用いて計測した。このとき最も大きな透過光強度を1とし、背後の暗視野を0とした。

その結果を図3.8に示す。この図から、繊維は配向角 $\zeta = 45^\circ$ のときに最も明るく見え、 $0^\circ \pm 6^\circ$ と $90^\circ \pm 6^\circ$ のときには最も見えにくいことがわかる。

一般に複屈折を持つ物質を透過する光の強度 I は、次式で与えられる [104]。

$$I = I_0 \sin^2(2\zeta) \sin^2\left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda}\right) \quad (3.3)$$

ここで、 I_0 は入射させた光の強度、 d は試料の厚さ、 Δn は試料の複屈折、 λ は透過光の波長である。したがって、理論的な透過光強度は、 d 、 Δn 、 λ が一定の場合、 $\sin^2(2\zeta)$ に比例することがわかる。この理論式から得られる透過光強度を、図3.8に示す。先に述べた実験結果から、透過光強度は $\zeta = 45^\circ$ で最大値をとり、 $\zeta = 0, 90^\circ$ で最小値をとることがわかっている。この実験結果は理論的な結果とよく一致しており、複屈折の主軸方向が繊維の軸方向に向いていることを示している。

この可視化方法は、複屈折を有する高分子の繊維をたいへん明瞭に可視化できるが、偏向子または検光子の方向と繊維の軸方向とが一致する $\zeta = 0^\circ$ または $\zeta = 90^\circ$ 付近の約 $\pm 6^\circ$ で繊維が可視化できないという欠点を有することが明らかになった。この欠点を克服するためには、偏光板のクロスニコル状態を維持したまま、偏光板を高速で回転させればよい。この方法を用いれば、人間の目の残像現象により、あらゆる方向に配向している繊維を明瞭に可視化することができる。

しかし偏光板を回転させる方法を用いて、クロスニコル下で可視化された繊維をスチルカメラやビデオカメラで撮影するとき問題が生じる。回転する偏光板の偏

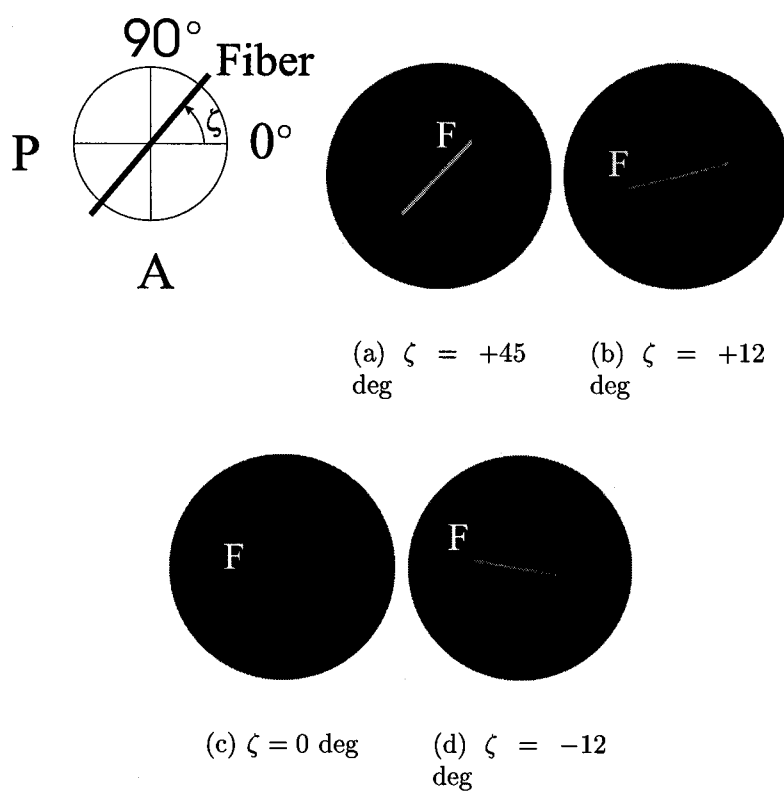


FIGURE 3.7: Fibers observed between crossed polarizers. Fiber F is not visible when the fiber axis is oriented at the angle of 0° in the polarizing/analyzing direction.

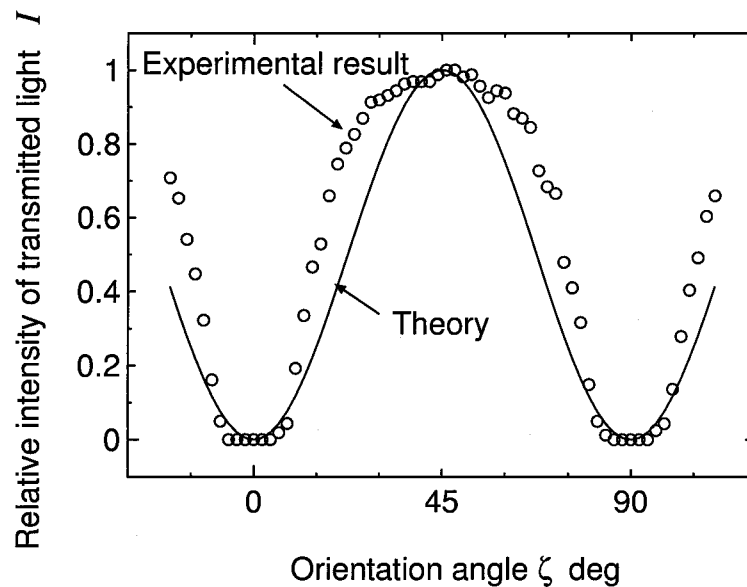


FIGURE 3.8: Dependence of relative intensity of transmitted light through a fiber on an orientation angle ζ .

向方向が繊維の配向角から約 $\pm 6^\circ$ の角度範囲を通過するあいだにカメラのシャッターが開閉した場合は繊維を可視化できないため、繊維を撮影することができないからである。この問題を解決し、あらゆる方向に配向した繊維を撮影するためには、カメラのシャッターが開いている間に、偏光板が少なくとも 12° 以上回転するような条件で撮影すればよい。つまり、カメラのシャッター速度 S [s] と偏光板の回転数 N [r.p.m.] は、次の関係を満たさなければならない。

$$S \gg \frac{2}{N} \quad (3.4)$$

繊維が流動している場合は、繊維の画像がぶれて不鮮明にならないようにするために、繊維の移動速度に応じてカメラのシャッター速度を決定し、それに応じて偏光板の回転数を決める必要がある。

3.4.2 希薄分散流体中の繊維の可視化

前項では、本研究で新しく開発した繊維の可視化法について、その原理を詳述した。本項では、この方法を、繊維分散流体のスリット流路内における繊維の可視化に適用した。繊維の可視化のための実験装置の概略を図 3.9 に示す。

直径約 250mm の円板状の 2 枚の偏光板を約 30mm の間隔をあげ、同軸の状態

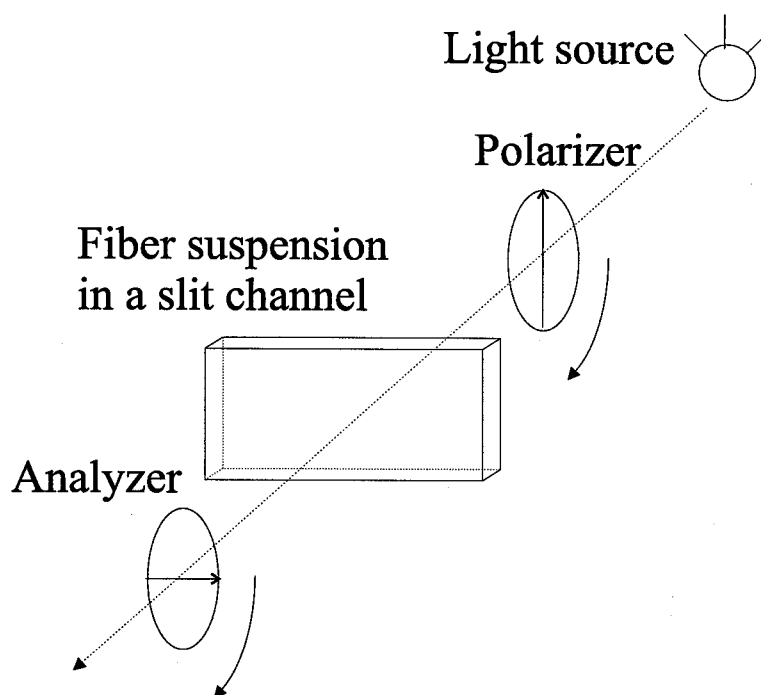


FIGURE 3.9: Schematic illustration of experimental apparatus for visualization of fibers with birefringence through a transmitted light source.

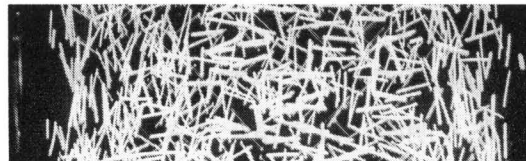
軸を貫通させて互いに接続する。偏光板をクロスニコル状態に調整した後、この軸をモーターで回転させる。光源には300Wの写真用レフランプ（松下電器産業株式会社製，フラッド型，PRF-300W）を用い，レフランプと偏光板との間には光を散乱させるための半透明紙を1枚設置した。2枚の偏光板の間に流路幅16mm，流路厚み2mmのスリット流路を設置し，繊維分散流体を流路内に充填した。その後，偏光板を570 r.p.m.で回転させ，このとき可視化された繊維をスチルカメラでマクロレンズを用いて撮影した。本実験では，繊維分散流体中における繊維を可視化するだけの目的であるため，流体は流動させずに静止させている。カメラのシャッター速度は $1/125$ sとし，このとき偏光板の回転数とシャッター速度とが満たすべき関係式である式(3.4)を十分に満たしている。使用した繊維分散流体は，第2章で述べた透明ビニロン繊維およびグリセリンとポリエチレングリコールの混合流体を用いて作製した。

透明ビニロン繊維の体積分率を変化させた繊維分散流体をスリット流路中で観察した可視化写真を図3.10に示す。体積分率は，図3.10(a)，(b)，(c)でそれぞれ0.04% ($nL^3 = 0.5$)，0.4% ($nL^3 = 5$)，1.2% ($nL^3 = 15$)である。図3.10(a)で

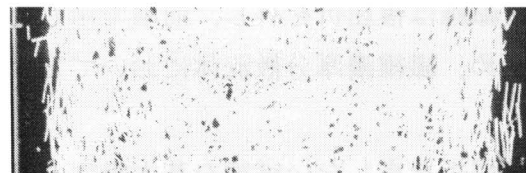
は体積分率が小さく、繊維は明瞭に可視化され、1本1本の繊維を十分に識別できる。しかし図3.10(b)のように体積分率が大きくなるにつれて、繊維が重なりあうために互いの繊維を識別することが次第に困難になっていくことがわかる。さらに体積分率の大きな図3.10(c)では、もはや各繊維を区別することができない。したがって、よく延伸されたビニロン繊維のように複屈折を有する繊維を分散繊維として用いた場合、本研究で開発した可視化法は、体積分率の大きな繊維分散流体において各繊維を識別することができず、このような繊維分散流体には適用できないことがわかった。



(a) Dilute suspension at a volume fraction of 0.04% ($nL^3 = 0.5$). Vinylon fibers are clearly visible.



(b) Semidilute suspension at a volume fraction of 0.4% ($nL^3 = 5$).



(c) Semidilute suspension at a volume fraction of 1.2% ($nL^3 = 15$).

FIGURE 3.10: Visualization of transparent vinylon fibers in suspensions under crossed nicols at various concentrations.

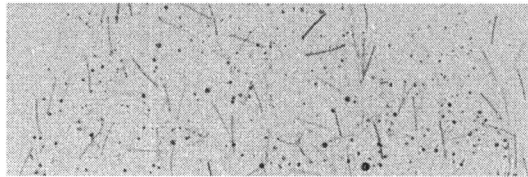
3.4.3 濃厚分散流体中の繊維の可視化

前項で述べた新しい可視化法が大きな体積分率の繊維分散流体には適用できないという欠点を克服するため、本項では、Stoverら [53] が繊維分散流体に対して開発した屈折率整合法を利用する。Stoverらは繊維分散流体に対して、第2章で述べたCAP繊維およびグリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液をそれぞれ基本繊維および分散媒として用い、基本繊維と分散媒の屈折率を一致させ、大きな体積分率の繊維分散流体をほぼ透明化した。しかしこのままでは基本繊維であるCAP繊維は可視化できない。そこでStoverらは、着色繊維をトレーサーとして、基本繊維からなる繊維分散流体に少量だけ添加し、その着色繊維を観察することにより、濃厚な繊維分散流体中における繊維の運動を調べた。

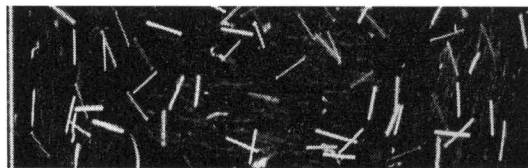
本研究においても、Stoverらの方法にならって、大きな体積分率 (7%, $nL^3 = 30$) のCAP繊維分散流体を作製した。分散媒はグリセリンとポリエチレングリコールの混合溶液であり、CAP繊維とともに第2章で作製したものをを用いた。この繊維分散流体に、前項で用いた透明ビニロン繊維を黒色に染めたものを少量だけ (体積分率で0.04%, $nL^3 = 0.5$) 添加し、この繊維分散流体を透過光で観察した。その可視化結果を図3.11(a)に示す。この図から、基本繊維であるCAP繊維は、分散媒と屈折率が一致しているため観察することができない一方で、黒色ビニロン繊維だけが観察できるものの、あまり明瞭には可視化できていないことがわかる。

そこで本研究では、黒色ビニロン繊維のかわりに、前項でも利用した透明ビニロン繊維を少量だけ (体積分率で0.04%, $nL^3 = 0.5$) CAP繊維分散流体に添加した。この繊維分散流体を前項の図3.9で示した実験装置を用いて可視化した結果を図3.11(b)に示す。透明ビニロン繊維は複屈折を有し、前項で示したようにクロスニコル下で明瞭に可視化されるため、繊維濃厚分散流体においてビニロン繊維のみが観察されている。

以上のことから、複屈折を有しない繊維を基本繊維として大きな体積分率で分散媒中に分散させ、その中に複屈折を有する繊維を少量だけ添加することで、大きな体積分率の繊維分散流体においても、繊維を可視化することができることが可能となった。ただし、この方法では、透過光で繊維を観察しているため、繊維の体積分率にかかわらず、厚み方向に投影された繊維を観察していることに留意すべきである。



(a)



(b)

FIGURE 3.11: Visualization of fibers in concentrated suspension of CAP fibers at volume fraction of 7% containing (a) black-colored vinylon fibers at volume fraction of 0.04% through a transmitted light, and (b) transparent vinylon fibers at volume fraction of 0.04% between crossed polarizers rotating at 570 r.p.m..

3.5 結言

透明な分散媒中に分散させた透明な繊維を可視化するために、従来から用いられてきたスリット光を用いる方法について検討した。その結果、理論と実験とから、繊維が光の入射方向とほぼ直交する方向に配向している場合に限り、繊維の表面で反射する光だけを観察することができることを明らかにした。このとき屈折光は見ることができない。したがって、スリット光を用いた可視化法では、流体中において、スリット光の入射方向とほぼ直交方向に配向している繊維のみを観察していることになり、任意の方向に配向している繊維の可視化には不適當であることが明らかになった。

この問題を解決するため、流体中の透明繊維を明瞭に可視化できる新しい方法を開発した。この方法では高分子繊維が複屈折を有する点を利用し、体積分率の小さな繊維希薄分散流体中であらゆる方向に配向する繊維を明瞭に可視化できた。また、基本繊維と分散媒の屈折率を一致させる屈折率整合法を用いて体積分率の大きな繊維分散流体を透明化した。ここで、基本繊維として複屈折を有しない繊維を、またトレーサー繊維として複屈折を有する繊維を用いることにより、体積分率の大きな

繊維分散流体中においても、トレーサー繊維だけを明瞭に可視化することができた。

第4章 スリット流路を流れる繊維分散流体中における繊維配向と濃度分布

4.1 緒言

本章では、もっとも基本的な流路形状であるストレート形状の流路を流れる繊維分散流体中における繊維配向と濃度分布について検討する。成形品には薄肉品が多いことから、流路は薄肉成形品を対象にしたスリット流路とした。第5章および第6章では、急拡大部や障害物を有する流路を扱うが、ストレート流路はその一部に存在する。またストレート流路内の発達した流れ場における繊維の配向状態や濃度分布を調べることは、急拡大部や障害物を有する流路における配向状態と濃度分布を考察するためにも重要である。

一般に流路内における繊維の配向状態や濃度分布を調べる場合、十分な長さの助走区間を通過させ、繊維配向を完全に発達した状態にして、観察流路に流入させる。一方、濃度分布については、助走区間入口部における濃度分布が助走区間内の濃度分布にほとんどそのまま反映されると考えられる。なぜなら、剛直で棒状の繊維の重心は、流線上に沿って流れ、流れと垂直方向にはあまり移動しないと考えられるからである。したがって、助走区間の入口部で与えられた濃度分布は、助走区間内でほぼそのままの分布を維持されたまま観察流路にまで及ぶ可能性がある。

そこで本章では、まず繊維分散流体を保持しているリザーバータンクと観察流路であるストレート流路とを接続する導管の内径を変化させ、観察流路であるストレート流路内で繊維の濃度分布がどう変化するかを調べ、その結果に基づいて最適な内径の導管を選定する。

さらに、繊維の配向状態を定量的に表す主配向角と配向度および配向状態を視覚的に表す配向楕円を導入し、それらの定義および実際の配向角分布との対応について述べる。最後に、先に選定した導管を用いた実験装置を用いて、ストレート流路

内における繊維の配向状態と濃度分布について詳細に検討する。

4.2 実験装置

図 4.1 に実験装置の概略図を示す。試料流体は、コンプレッサーで一定圧力を加えられたリザーバータンクから一定流量で導管を通じて図 4.1(a) の Test section に供給される。本章では、Test section に、図 4.2 で示される幅 16mm ($= 2H$)、厚さ 2mm、長さ 220mm のストレート流路を設置した。流路は透明アクリル製である。

Test section とリザーバータンクとを結ぶ導管とストレート流路の間には、図 4.2 に示すような緩衝部を設けた。この緩衝部は、導管を通過してきた繊維分散流体がストレート流路に流入する際に、配向状態や濃度分布が導管の内径にできる限り依存しないようにするためである。そのため緩衝部は長さを 70mm と十分長くとり、内径をストレート流路の幅の 16mm よりも大きい 20mm とした。ストレート流路の幅と厚さがいずれも 20mm より小さいため、ストレート流路の入口部では、流れは流路幅方向にも奥行き方向にも縮小流れとなる。繊維は縮小流れにおいて流れ方向によく配向することが報告されており [19]、ストレート流路における繊維の入口配向状態として、ほぼ流れ方向に配向した状態を与えることができる。なお、導管の内径については次の第 4.2.1 項で選定する。

流体はストレート流路を通過した後、外部に流出する。このとき、電子天秤で単位時間あたりの流出重量を測定し、流量を計測する。ストレート流路は、図 4.1(b) に示されているように、その厚み方向の前後をクロスニコル状態に保たれた偏光板で挟まれており、その偏光板を 570 r.p.m. で回転させた。このとき可視化された繊維をスチルカメラで撮影する。シャッターを切る時間間隔は、流速に応じて十分な長さを取り、同一繊維が 2 枚の連続した写真に写らないように配慮した。

ストレート流路内における座標は、図 4.2 に示すように、入口部中央線上に原点をとり、流れ方向を x 方向、それと直交方向を y 方向とした。

試料流体として、グリセリンとポリエチレングリコールの混合流体を分散媒とした繊維希薄分散流体 ($nL^3 = 0.2$ または 0.5) と繊維濃厚分散流体 ($nL^3 = 35$) を用いた。これらの流体は、第 2 章で作製したものである。レイノルズ数は、流路幅の半分の H と分散媒の粘度を用いて定義し、1 より小さな 0.4 に固定した。これは、繊維強化複合材料の成形においては、分散媒の粘度が $10^3 \sim 10^5$ Pa·s オーダーと非常に大きいため、成形を対象とした研究では慣性の影響は無視してよいからである。

実験は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ で行った。

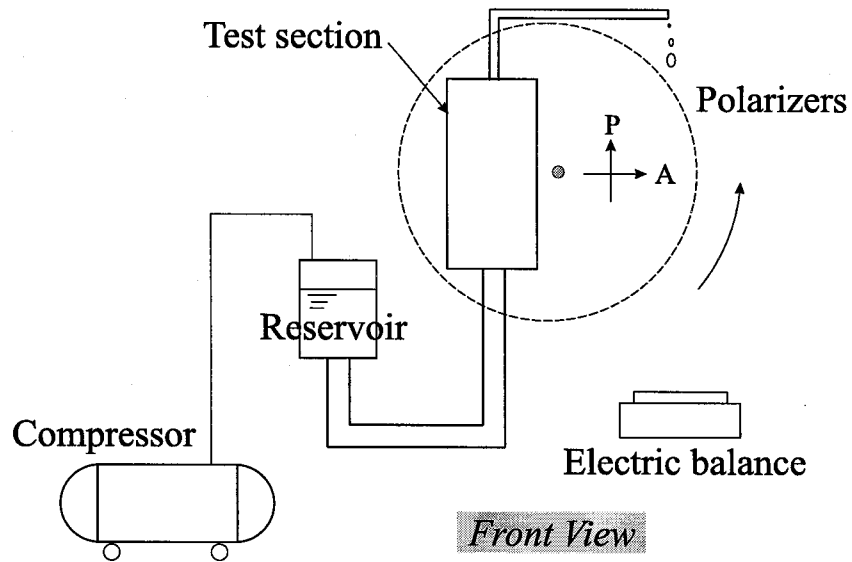
4.2.1 導管の選定

先に述べたように導管とストレート流路との間に緩衝部を設けてはいるが、導管の内径の相違によって、ストレート流路内における繊維の濃度分布が異なる可能性がある。そこで、内径の異なる3種類の管を導管として用意し、予備実験としてそれぞれの導管を用いた場合の観察流路内における繊維の濃度分布を調べた。導管部分の詳細を図4.2に示す。Tube Aには内径4mmの管を、Tube Bには内径6mmの管を、Tube Cには観察流路の幅よりも大きな内径26mmの管を用いた。

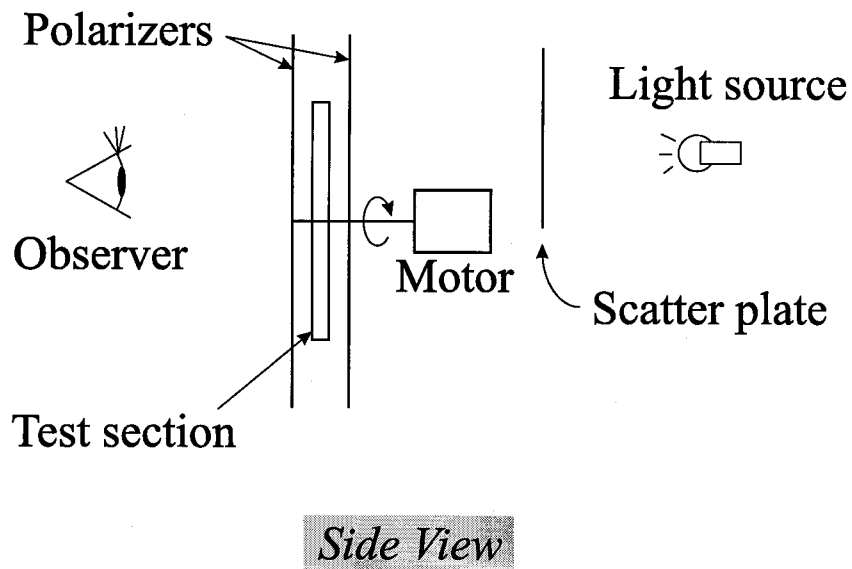
本実験では、試料流体には $nL^3 = 0.5$ の希薄分散流体を用いた。それぞれの導管を用いた実験装置に繊維分散流体を流し、繊維を観察した。観察領域はストレート流路の入口部 ($x = 0$) から十分下流域である $12 \leq x/H \leq 17$ である。流れ方向の距離 x/H は、ストレート流路の入口部からの距離 x を H で無次元化した距離である。写真の一例を図4.3に示す。ただし、写真には観察領域の一部である $12 \leq x/H \leq 15$ の領域だけを示した。

得られた写真から、観察領域 ($12 \leq x/H \leq 17$) にある約14000本の繊維の位置をデジタイザーで測定し、このデータをもとに、流路の幅方向の濃度分布を調べた。その結果を図4.4に示す。この図は、この領域内にある繊維（全繊維本数を N とする）を対象に、流路の幅方向 ($0 \leq y/H \leq 1$) を8等分した各領域内にある繊維本数 n の、全繊維本数 N に対する割合を示した図である。横軸には H で無次元化した y 方向の距離をとった。この領域では、流れはほとんど平行流れになっていることを確認しているため、流路幅方向の繊維の移動は、フリップオーバー現象が壁面近傍で生じる場合を除いてはないと考えられる。したがって、繊維の濃度分布の x 軸方向依存性は考慮しなかった。ここでフリップオーバーとは、図4.5で示すような繊維の急激な回転運動をいう。この回転運動が壁面のごく近傍にある長さ L の繊維で生じると、繊維は壁面と干渉をおこして重心が流路の中央線方向に押しやられ、その結果、壁面から少なくとも $L/2$ だけ離れたところに移動する。

図4.4から、Tube Aの場合とそれ以外の場合とで、繊維の分布に違いがあることがわかる。Tube Aでは、流路幅の中心の領域から壁面にかけて繊維濃度が増大し、 $y/H = 0.7$ 付近で極大値をとったあと、壁面付近で急激に減少する。Tube Aと比べると、Tube BとTube Cでは、いずれも流路幅方向に対してほぼ均一の濃度分布で



(a) Front view of experimental apparatus



(b) Side view of visualization system

FIGURE 4.1: Schematic illustration of experimental setup.

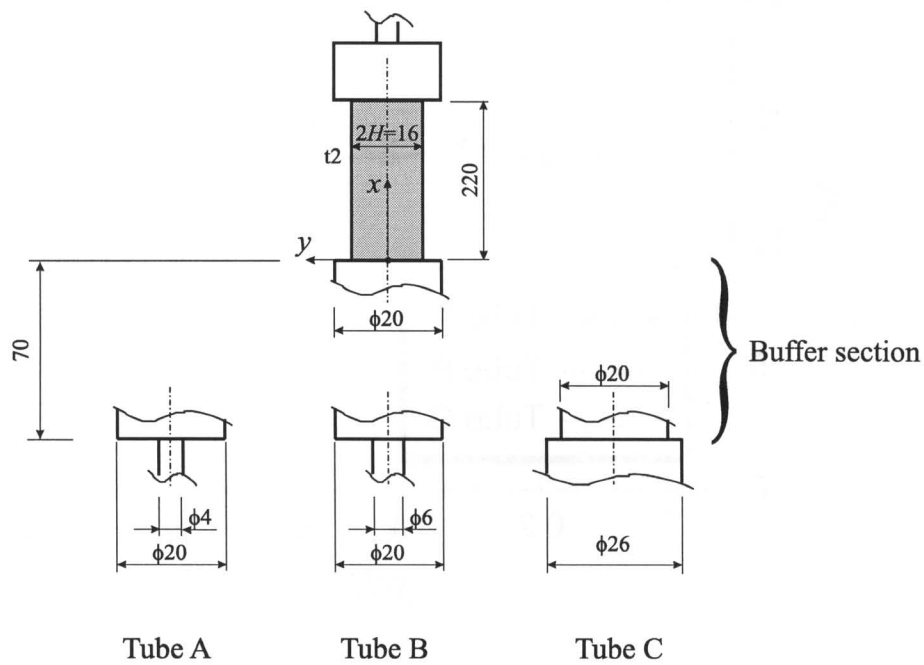


FIGURE 4.2: Connection tube between the reservoir and the straight channel. Diameters of Tube A, Tube B and Tube C are 4mm, 6mm and 26mm, respectively.

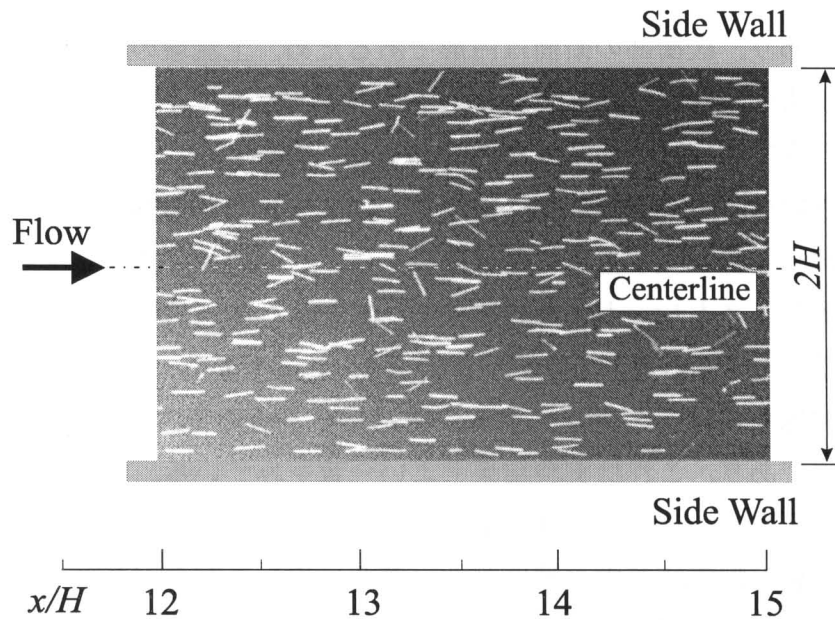


FIGURE 4.3: Visualized fibers in the dilute suspension at $nL^3 = 0.5$.

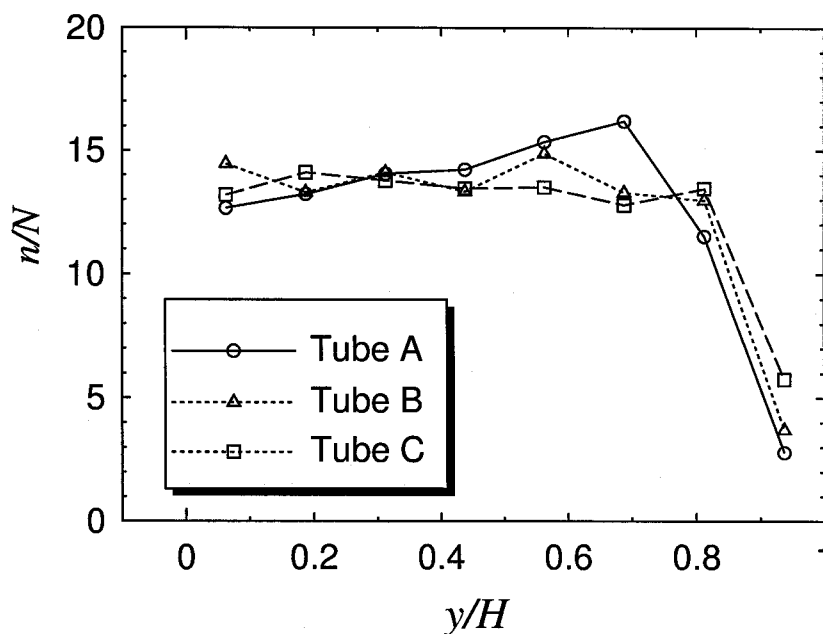


FIGURE 4.4: Fiber distributions at $12 \leq x/H \leq 17$.

あり、壁面付近でのみ減少する。

本実験で用いた装置には、導管とストレート流路との間に緩衝部を設けてある。繊維はその重心がほぼ流線に沿って移動すると考えられるが、ストレート流路の断面は矩形であり、緩衝部の断面は円形であるため、上流域の導管内で生じた濃度分布のそのままの形状が下流域であるストレート流路内にまで及ぶと考えるのは難しい。もしそうであれば、 $y/H > 0.75$ では繊維は存在しないはずであるが、実際には割合は小さいながら繊維は存在している。 $y/H > 0.75$ の領域の繊維の存在は、導管から緩衝部へと流れ出すときの急減速流れにより、繊維の重心が流線上からはずれたり、緩衝部とストレート流路の接続部で繊維が壁面近傍に流れ込んでいることが原因であると考えられる。しかし、繊維長が 1mm であり、導管の内径が 4mm であることを考慮すれば、ストレート流路内における繊維分布は $y/H < 0.75$ で極大部をもつはずであり、これは実験結果とよい一致をみている。

以上のことから、とくに Tube A のように繊維長に対して導管の内径が小さい場合、その影響が観察流路内の濃度分布に顕著に現れることがわかった。このような現象は、いずれの管径の導管においても生じていると考えられ、緩衝部内で強制的な攪拌を行わない限り、導管内の濃度分布の影響を完全に消し去ることは困難である。しかしこの実験結果を考慮すれば、内径が 6mm 以上の導管を使用して、その

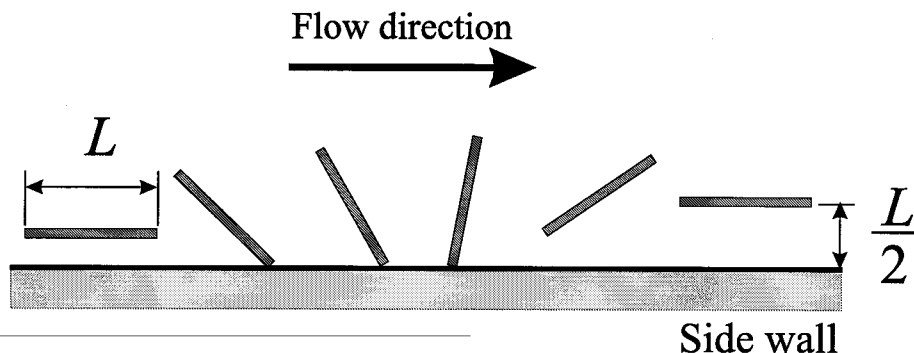


FIGURE 4.5: Flip over of a single fiber having a length of L near the side wall.

管径の影響をたいへん小さくすることができる。したがって、今後の実験では、ストレート流路内における濃度分布に対する影響が少なく、ほぼ均一の濃度分布となる、内径が 6mm 以上の導管を用いることにする。

このような繊維の濃度分布の問題は、実際の射出成形加工においても、生じると考えられる。射出成形においては、ランナーやゲートなどの導管部分は製品ではなく廃棄される部分であるため、コスト低減の観点からできるだけ幅を狭くすることが求められる。しかし、繊維長に比較してランナーやゲートの幅が狭いと、製品内に繊維濃度の分布が生じる恐れがあることに留意する必要があると考えられる。

4.3 繊維配向の解析法

本節では、実験から得られた各繊維の配向角のデータから、図 4.6 に示すような流路内の任意の小領域内における平均的な配向角度およびその方向への繊維の配向の程度を表す配向度の算出の方法について述べ、さらに視覚的に配向状態を表す配向楕円を導入する。また、このとき表示される配向楕円と配向角分布の関係および、ここで計算された配向テンソルから逆に配向角分布を計算する方法についても述べる。

4.3.1 繊維の配向角と配向度の計算法

図 4.6 に示すように、繊維の配向角を繊維軸と x 軸とがなす角と定義する。次に各小領域で得られた配向角のデータから、2 階の配向テンソルの成分 a_{ij} を次式で計算する [34]。

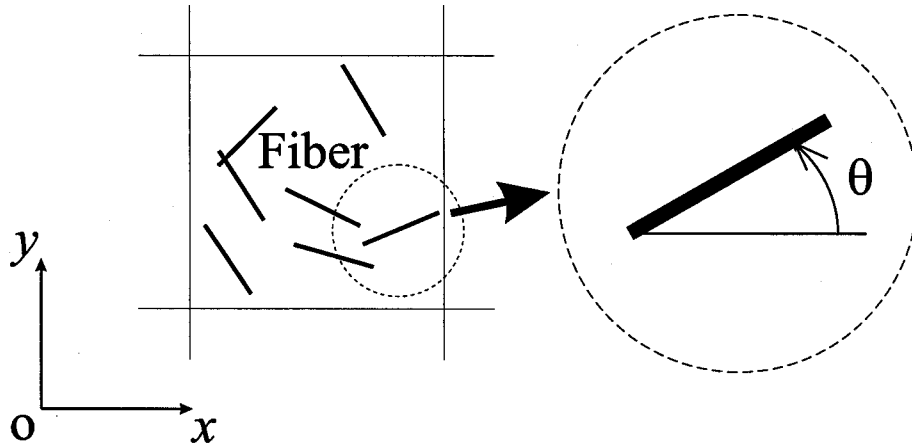


FIGURE 4.6: Fibers in a small region in the flow channel and definition of fiber orientation angle.

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n, \quad a_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \quad (4.1)$$

ここで N は小領域にある繊維の総本数であり、 θ_n は配向角である。また配向テンソルの成分には $a_{11} + a_{22} = 1$, $a_{12} = a_{21}$ の関係があり、これらの成分から小領域にある繊維の主配向角 α は次式で求めることができる。

$$\tan 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}} \quad (4.2)$$

この配向テンソルの固有値の大きさを長軸・短軸の長さとした楕円を固有ベクトルの方向に傾け、配向楕円を描くことができる。配向楕円の長軸方向と x 軸とのなす角は、繊維の平均的な配向方向である主配向角を示し、長軸と短軸の長さの比は主配向角を平均とする配向角の分布の程度を示す。つまり、主配向角の方向に多くの繊維が配向していれば楕円は直線のようになり、ランダム配向していれば楕円は円になる。また配向テンソルの固有値の最大値は、0.5 から 1 の間の値をとり、繊維が一方向に完全配向している場合この値は 1 に、ランダム配向している場合は 0.5 になる。この値を配向度 (orientation order parameter) S と呼び、配向角の分布のようすを定量的に表すことができる。

4.3.2 配向楕円と配向分布の対応

本研究では、2階の配向テンソルを用いて繊維の平面配向状態を評価するが、さらに高階の4階以上の配向テンソルを用いることもできる。本項では、第4.3.1項で説明した配向テンソルしか与えられていない場合、この配向テンソルから逆に元の配向分布関数を計算する方法 [105] について述べる。ここでは、配向度に応じて三種類の配向状態のモデル分布を取り上げ、これらのデータを用いて計算した配向テンソルから逆に計算された配向分布関数を元のモデル配向分布と比較した。また、このモデル分布から計算した配向楕円とモデル分布との対応を示した。

配向分布関数は、2階の配向テンソル a_{ij} から次式を用いて計算できる。ここで ψ_θ を配向分布関数、 θ を配向角、 \mathbf{p} を繊維の配向方向を示す単位ベクトルとする。

$$a_{ij} = \int_0^{2\pi} \psi_\theta(\theta) p_i p_j d\theta, \quad (4.3)$$

$$b'_{ij} = a_{ij} - \frac{1}{2} \delta_{ij}, \quad (4.4)$$

$$f'_{ij}(\mathbf{p}) = p_i p_j - \frac{1}{2} \delta_{ij}, \quad (4.5)$$

$$\psi_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{2}{\pi} b'_{ij} f'_{ij}(\mathbf{p}) \quad (4.6)$$

モデル分布のデータをもとに2階の配向テンソル a_{ij} を式(4.1)から計算すると、式(4.3)の a_{ij} を計算できたことになる。これと b'_{ij} および $f'_{ij}(\mathbf{p})$ から式(4.6)の配向分布関数 $\psi_\theta(\theta)$ を求められる。

また4階の配向テンソル a_{ijkl} を用いれば、さらに精度良く配向分布関数を計算することができる。この場合、次式を用いて配向分布関数を計算する。

$$a_{ijkl} = \int_0^{2\pi} \psi_\theta(\theta) p_i p_j p_k p_l d\theta \quad (4.7)$$

$$b'_{ijkl} = a_{ijkl} - \frac{1}{6} (\delta_{ij} a_{kl} + \delta_{ik} a_{jl} + \delta_{il} a_{jk} + \delta_{jk} a_{il} + \delta_{jl} a_{ik} + \delta_{kl} a_{ij}) \\ + \frac{1}{24} (\delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (4.8)$$

$$f'_{ijkl}(\mathbf{p}) = p_i p_j p_k p_l - \frac{1}{6} (\delta_{ij} p_k p_l + \delta_{ik} p_j p_l + \delta_{il} p_j p_k + \delta_{jk} p_i p_l \\ + \delta_{jl} p_i p_k + \delta_{kl} p_i p_j) + \frac{1}{24} (\delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (4.9)$$

$$\psi_{\theta}(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{2}{\pi} b'_{ij} f'_{ij}(\mathbf{p}) + \frac{8}{\pi} b'_{ijkl} f'_{ijkl}(\mathbf{p}) \quad (4.10)$$

以上の式を用いて、三種類のモデル分布の繊維の配向データを元に、それぞれの配向分布関数を再現した結果を図 4.7 に示す。図 4.7 の (a) は繊維配向分布がほぼランダムに近い場合、(b) は分布にややピークを持つ場合、(c) は高いピークを持つ場合であり、それぞれの場合の主配向角、配向度、配向楕円を図に示した。図中の実線は 2 階の配向テンソルを用いて計算した配向分布関数であり、破線は 4 階の配向テンソルを用いて計算した配向分布関数である。(a) あるいは (b) の場合のように、元のデータがほぼランダムな分布をもつか、あるいは分布のピークが低い場合は、2 階の配向テンソルを用いた計算であっても、再現された配向分布関数は元の分布をよく表現できることがわかる。(c) の場合のように、高いピークを持つ分布の場合は、2 階の配向テンソルよりも 4 階の配向テンソルを用いたほうが比較的良好に配向分布関数を再現できる。モデル分布のさらに正確な再現にはさらに高階の配向テンソルを用いる必要があるが、2 階の配向テンソルであってもモデル分布の傾向はほぼ表現することができるため、本研究では、扱いが容易な 2 階の配向テンソルで配向状態を評価する。

4.4 実験結果と考察

本節では、前節で選定した内径が 6mm の導管を設置したストレート流路を用いて実験を行い、繊維の配向状態と濃度分布について詳しく検討する。繊維分散流体には、第 2 章で作製した繊維希薄分散流体 ($nL^3 = 0.2$) と繊維濃厚分散流体 ($nL^3 = 35$) を用いた。一般に繊維は流路内で三次元配向をする。しかし繊維の可視化実験ではそのほとんどで繊維が平面内配向をしているものと仮定している [5,45,26]。本研究ではあらかじめ繊維の投影長さから、繊維がほぼ平面内配向をしていることを確認している。

4.4.1 繊維の配向角と配向度

繊維濃厚分散流体 ($nL^3 = 35$) の流れ中における繊維の可視化結果を図 4.8 に示す。観察対象とした領域は、流路の入口から十分下流域にある $12 \leq x/H \leq 17$ であ

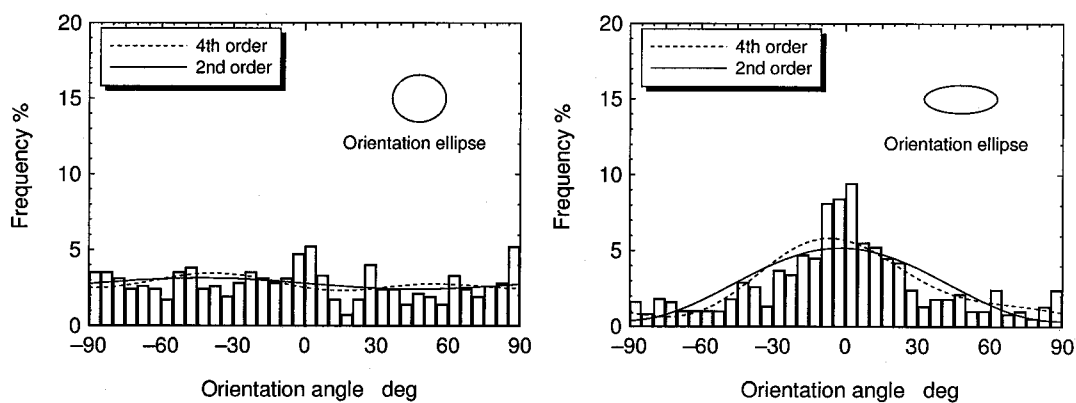
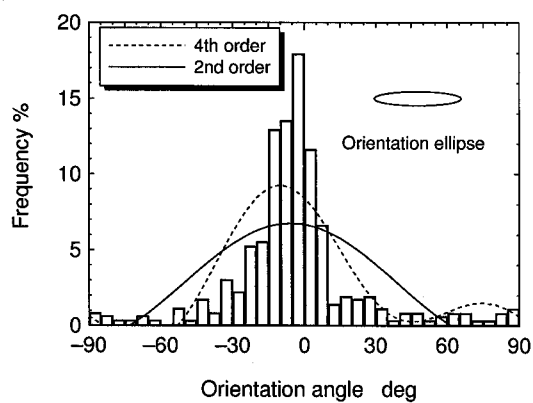
(a) $\alpha = -42^\circ, S = 0.53$ (b) $\alpha = -1.4^\circ, S = 0.72$ (c) $\alpha = -5.6^\circ, S = 0.86$

FIGURE 4.7: Experimental result of fiber orientation distribution functions, orientation ellipses and approximate distribution functions recovered from second-order (solid line) and fourth-order (dashed line) tensors.

るが、図 4.8 には、その一部である $12 \leq x/H \leq 15$ の領域だけを示した。繊維希薄分散流体 ($nL^3 = 0.2$) に対する可視化結果は、図 4.3 に示した $nL^3 = 0.5$ の結果と同様であるので、ここでは省略する。

これらの写真から一条件につき約 14000 本の繊維の位置と配向角をデジタイザーで測定した。デジタイザーから得たデータをもとに、流路内での配向角と位置の分布を詳細に調べるために、図 4.9 に示すように、流路内部を $2\text{mm} \times 4\text{mm}$ の小領域に分割した。それぞれの小領域は、 x 方向、 y 方向ともに 0.5mm ずつ隣の小領域と重なるようにとられている。これらの各小領域では、壁面付近の極端に繊維の少ない領域を除いて 100 本以上の繊維データが得られるようにし、解析の信頼性を上げた。

そのデータから、第 4.3.1 項で述べた方法に基づき、各小領域内において、式 (4.1) および (4.2) を用いて主配向角と配向度を計算し、その結果をもとにして配向楕円を描いた。図 4.10 にストレート流路を流れる繊維希薄分散流体と繊維濃厚分散流体中における繊維の配向状態を配向楕円により示す。図中に、流れ方向 (x 軸方向) およびそれに垂直方向 (y 軸方向) の距離を流路幅の半分の長さ H で無次元化して示した。

この図から、繊維の体積分率にかかわらず、繊維は流れ方向に強く配向していることがわかる。また、上流域から下流域にかけて ($x/H = 12 \sim 17$) 配向楕円の主軸方向がほとんど変化せず、長軸・短軸比がほぼ一定であることから、配向状態は十分に発達していることがわかる。また、配向楕円の長軸・短軸比が大きく直線に近いことから、配向度は繊維希薄分散流体の方が大きく、流れ方向に配向している繊維がより多いことがわかる。

図 4.11 に流路幅方向の配向度の変化を示した。各 y/H における値は、 $12 \leq x/H \leq 17$ の平均値である。この図から、繊維希薄分散流体では、流路幅方向にわたって大きな配向度を示し、中心線から壁面付近にかけてやや大きくなる傾向にあるものの、ほぼ均一な配向度分布であることがわかる。一方、繊維濃厚分散流体では、配向度は、流路中央部付近から $y/H = 0.7$ 付近にかけて 0.8 程度と、繊維希薄分散流体と比較すると小さいが、やはりほぼ均一な分布である。しかし、壁面に近づくとつれて急激に大きくなり、壁面の影響が強く現れる。

より詳細に検討するため、繊維希薄分散流体と繊維濃厚分散流体のそれぞれの配向角と配向度の流れ方向変化を示したのが図 4.12 ~ 図 4.15 である。図 4.12 から、繊維希薄流体では繊維は流路の幅方向の位置 y/H にかかわらず流れ方向 $\alpha = 0^\circ$ に配向し、その流れ方向変化は非常に小さいことがわかる。それに対して、繊維濃厚

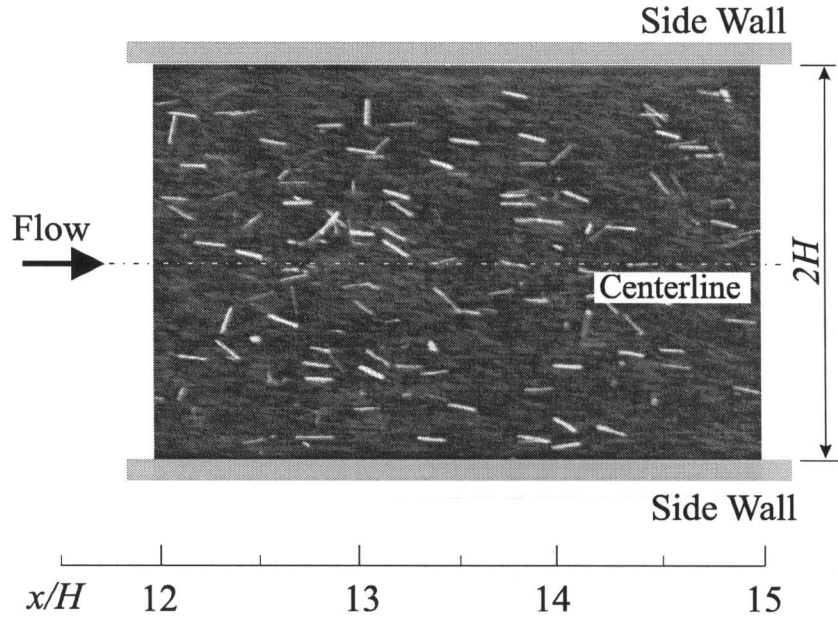


FIGURE 4.8: Visualized fibers in the concentrated suspension at $nL^3 = 35$.

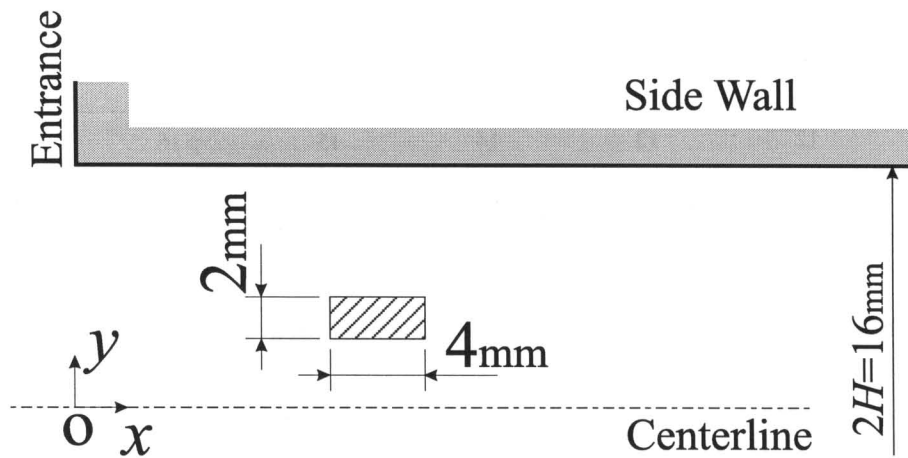
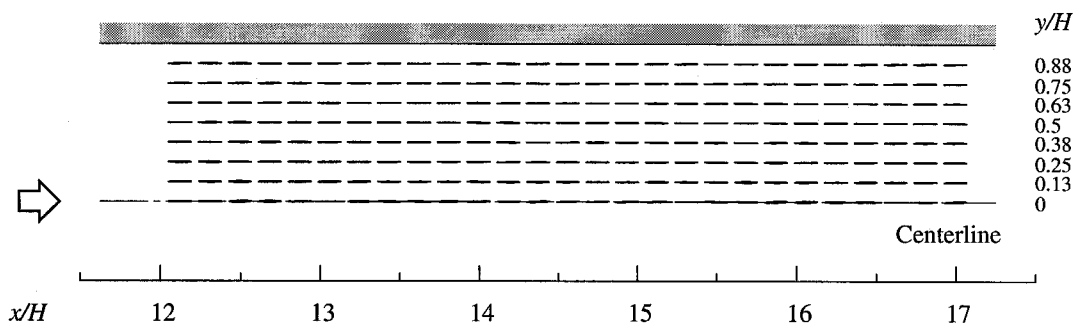
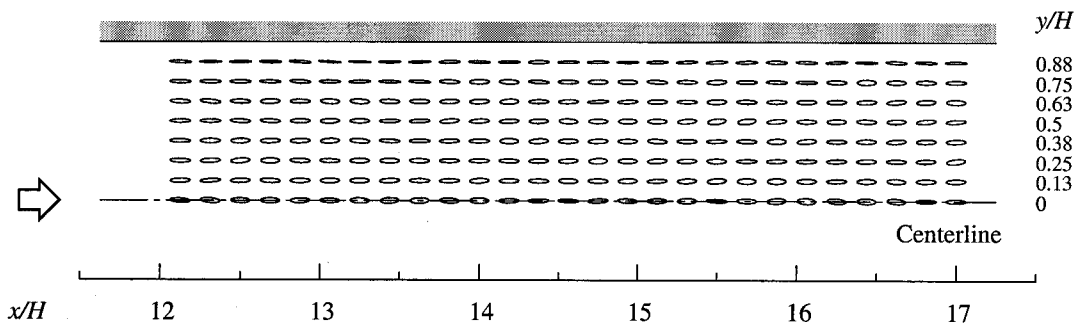


FIGURE 4.9: Schematic illustration of the straight channel, and the small region ($2\text{mm} \times 4\text{mm}$) for calculation of fiber orientation.



(a) Dilute fiber suspension at $nL^3 = 0.2$.



(b) Concentrated fiber suspension at $nL^3 = 35$.

FIGURE 4.10: Fiber orientation ellipses at various fiber concentrations.

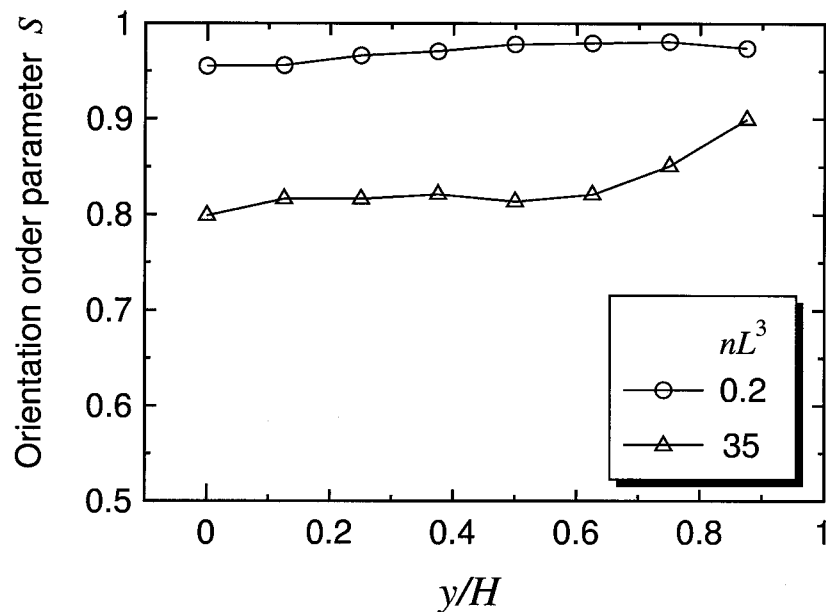


FIGURE 4.11: Distributions of fiber orientation order parameters in the direction of channel width.

流体では、図 4.14 からわかるように、やはり流れ方向に配向しているが、すべての y/H において配向角の揺れが目立っている。

配向度は、繊維希薄分散流体においては 0.9 以上の非常に大きな値であることから、多くの繊維が流れ方向に配向していることがわかる。中心線上 ($y/H = 0$) では他の領域と比較してやや揺れが大きいものの、大きな差はない。それに対して、繊維濃厚分散流体では、配向度は 0.75 から 0.95 付近にかけて幅広く分布し、かつその揺れも繊維希薄分散流体と比較してかなり大きい。しかし、中心線付近から壁面に向かうにつれて、配向度の揺れは小さくなり、値も大きくなっている。

繊維は流れ中において、ほぼ流れ方向に配向している状態から急激に回転するフリップオーバー現象を生じるが、繊維の体積分率が小さい場合、繊維は他の繊維と干渉することなく自由に回転できる。そのため、流れ方向と直交したままの状態を長く維持したまま下流に流れる繊維はほとんどなく、そのためほとんどの繊維が流れ方向に配向し、配向度も非常に大きくなる。それに対して、繊維の体積分率が大きい場合、繊維がフリップオーバーを生じようとするとき、他の繊維と干渉するために必ずしもすばやく回転できず、流れ方向と大きな角度を保ったまま流れる繊維も多数ある。そのため、配向度が繊維希薄流体と比較して小さくなるものと考えられる。繊維濃厚分散流体の可視化実験において、この領域にある繊維の運動を詳し

く観察すると、回転しようとした繊維が繊維間干渉のために回転できずに振動する様子が観察されることから、このような配向角の流れ方向の揺れが理解できる。

4.4.2 繊維の濃度分布

本項では、ストレート流路を流れる繊維分散流体中における流路幅方向の繊維の濃度分布を検討する。濃度分布は、第4.2.1項で述べた方法に基づいて計算した。その結果を図4.16に示す。各 y/H での値は、 $12 \leq x/H \leq 17$ の平均である。この図から、繊維濃度は、繊維希薄分散流体では流路中央部から壁面にかけてほぼ均一であるが、壁面付近では急激に小さくなることがわかる。これは、壁面付近の繊維がフリップオーバーを起こすと、本研究で用いた長さ1mmの繊維は壁面から0.5mm以上離れた領域($y/H < 0.94$)に押しやられ、壁面付近に繊維がない部分ができるからだと考えることができる。

繊維希薄分散流体について壁面付近の繊維の濃度分布の様子をさらに詳細に検討するため、図中の○印で囲まれた領域に相当する流路幅の位置において流路幅をさらに2等分して領域の分解能を高め、濃度分布を調べた結果を図4.16中の小さな図に示す。第4.2.1項において、繊維の濃度分布は、導管の内径に大きく影響されることを示した。本実験ではその結果に基づいて、内径が6mmの導管を用いたが、内径の大小にかかわらず壁面近傍の繊維のフリップオーバーは必ず生じるため、導管の影響を完全に消し去ることは困難であることを第4.2.1項で述べた。もし本実験において、導管内の濃度分布がストレート流路内の濃度分布に大きく影響しているとするなら、導管の半径が3mmであり繊維の長さが1mmであること、および繊維の重心が流線上に乗って移動することを考慮して、繊維濃度の極大部は $y/H < 0.83$ で生じなければならない。また、 $y/H > 0.83$ の領域には、繊維はほとんど存在してはならない。しかし、図4.16からわかるように、 $y/H < 0.83$ では、繊維濃度は流路中央部付近の均一な濃度とほぼ同じであり、 $y/H > 0.83$ にも多数の繊維が存在している。これは、導管から緩衝部へと流れ出すときの急減速流れにより、繊維の重心が流線上からはずれたり、緩衝部とストレート流路の接続部で繊維が壁面近傍に流れ込んでいることが原因であると考えられる。また、濃度分布の極大部が $y/H = 0.9$ 付近で現れていることは、壁面付近の繊維は $y/H < 0.94$ に押しやられ、その領域に集中するからと考えることができ、ストレート流路内の濃度分布に対して導管の影響は少ないと考えられる。この極大部が生じる原因は、緩衝部からストレート流

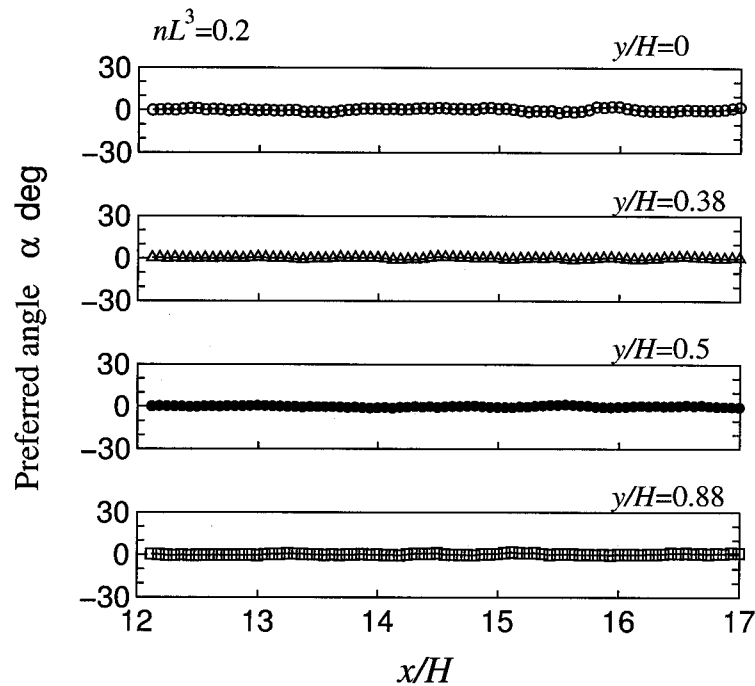


FIGURE 4.12: Preferred angles in the dilute fiber suspension at various y/H at $nL^3 = 0.2$.

路の壁面近傍に流れ込んだ繊維がフリップオーバーして、ストレート流路の壁面との干渉によって生じたものと考えられ、それがストレート流路内における濃度分布に影響している。

一方、繊維濃厚分散流体では繊維希薄分散流体の場合とはやや異なった濃度分布となった。繊維は中心線付近で最も多く分布し、壁面にかけて単調に減少している傾向にあることがわかる。球状粒子（直径が $50\sim 100\mu\text{m}$ 、体積分率が $30\sim 50\%$ ）の濃厚系では、平行平板間流れで球状粒子が同様の分布をしている報告 [51] があり、今回の繊維濃厚分散流体ではそれよりも体積分率は小さいが、球状粒子の場合と同様の現象であると考えられる。また繊維希薄分散流体の時のように壁面付近で顕著な極大部が現れず、さらに、壁面近傍 ($y/H = 0.97$) では、繊維の濃度が繊維希薄分散流体よりも大きいことは、壁面付近の繊維が繊維間干渉によってフリップオーバーが妨げられていることが原因であると考えられる。このことは、先に述べたように、繊維濃厚分散流体では配向角や配向度の流れ方向変化が繊維希薄分散流体の場合と比較して大きい原因は繊維のフリップオーバーが繊維間干渉によって滑らかに行えないことにあるという考えとも符合する。

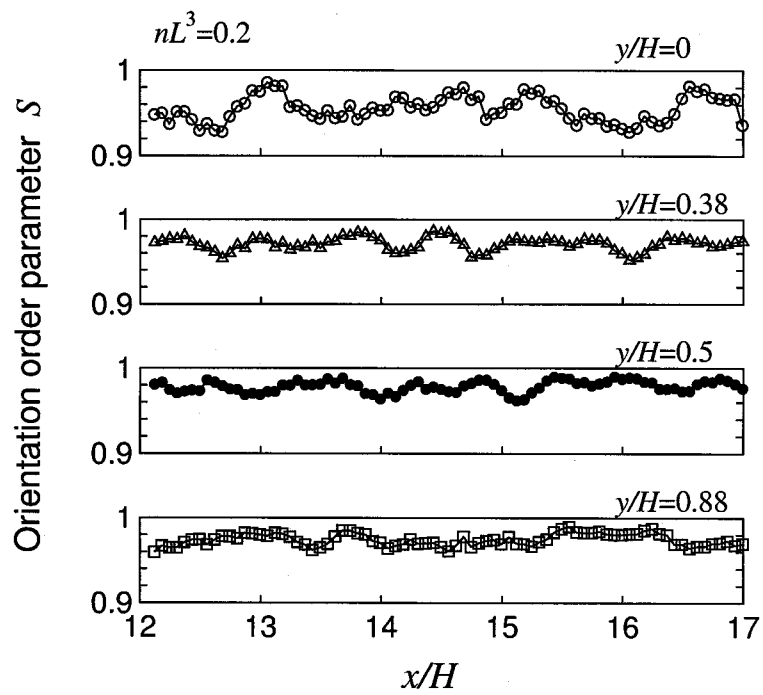


FIGURE 4.13: Orientation order parameters in the dilute fiber suspension at various y/H at $nL^3 = 0.2$.

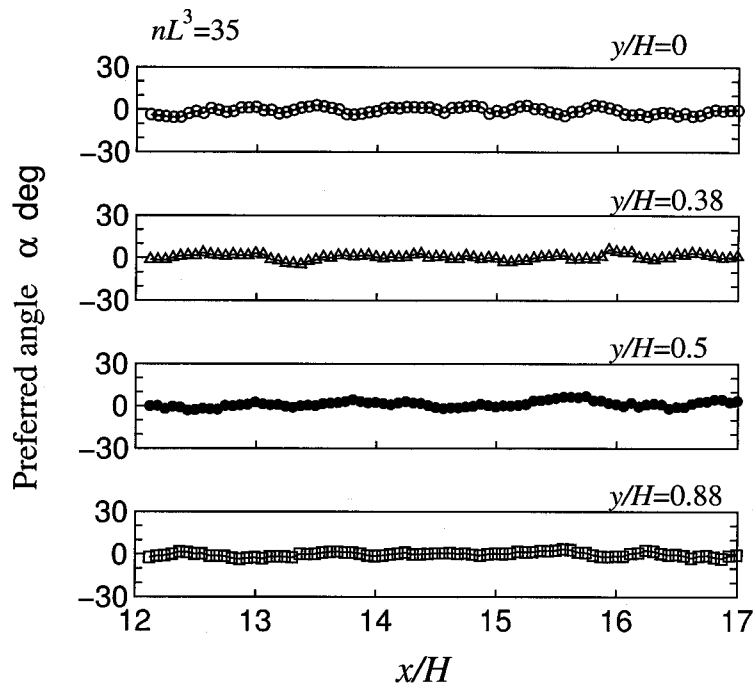


FIGURE 4.14: Preferred angles in the concentrated fiber suspension at various y/H at $nL^3 = 35$.

4.5 結言

本章では、まず実験装置のリザーバタンクからストレート流路に至るまで流体を導く導管の内径が、ストレート流路中における繊維の濃度分布に与える影響を明らかにした。その結果に基づいて、ストレート流路内の濃度分布に影響の少ない内径が6mmの導管を選定した。

また繊維の配向状態を定量的にあらわすための主配向角と配向度を定義し、配向テンソルから配向分布関数を逆に計算する方法について述べた。

内径が6mmの導管を利用した実験装置を用い、ストレート流路を流れる繊維分散流体の発達した流れ中における繊維の配向状態と濃度分布を検討した。その結果、繊維希薄分散流体と繊維濃厚分散流体とで、主配向角・配向度・濃度分布に明らかな差が見いだされた。繊維希薄分散流体では、繊維は流れ方向に強く配向し、主配向角と配向度の流れ方向変化も小さい。一方、繊維濃厚分散流体では、主配向角は流れ方向に向くものの、配向度は繊維希薄分散流体に比べて小さく、またこれらの流れ方向変化の揺れも大きい。

流路幅方向の濃度分布は、繊維希薄分散流体では流路の中心線付近から壁面付近

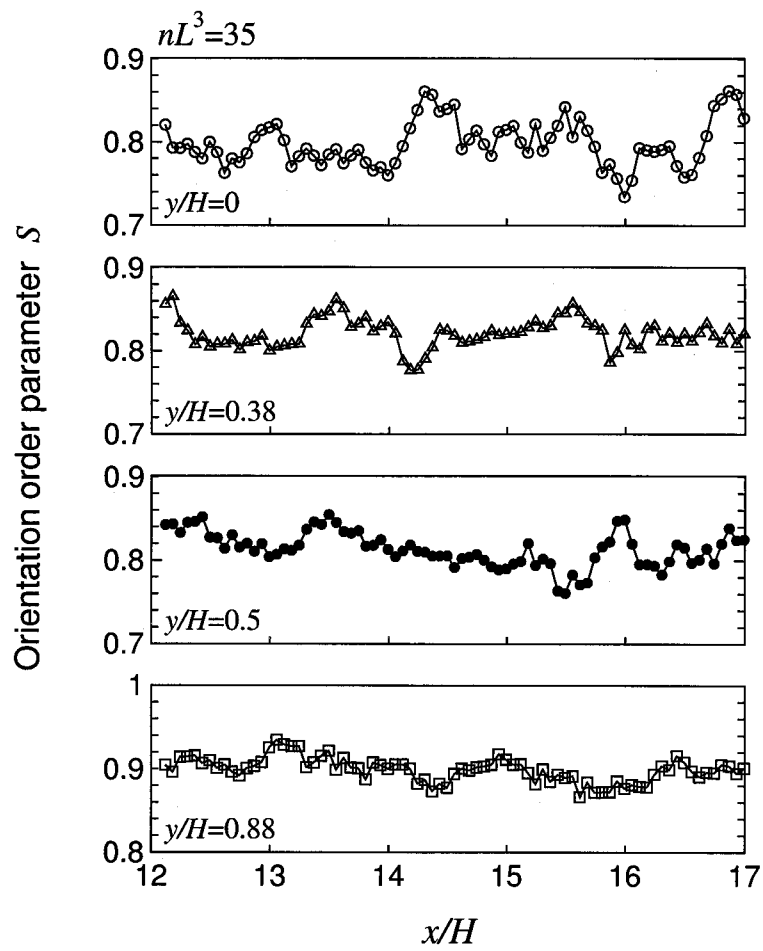


FIGURE 4.15: Orientation order parameters in the concentrated fiber suspension at various y/H at $nL^3 = 35$.

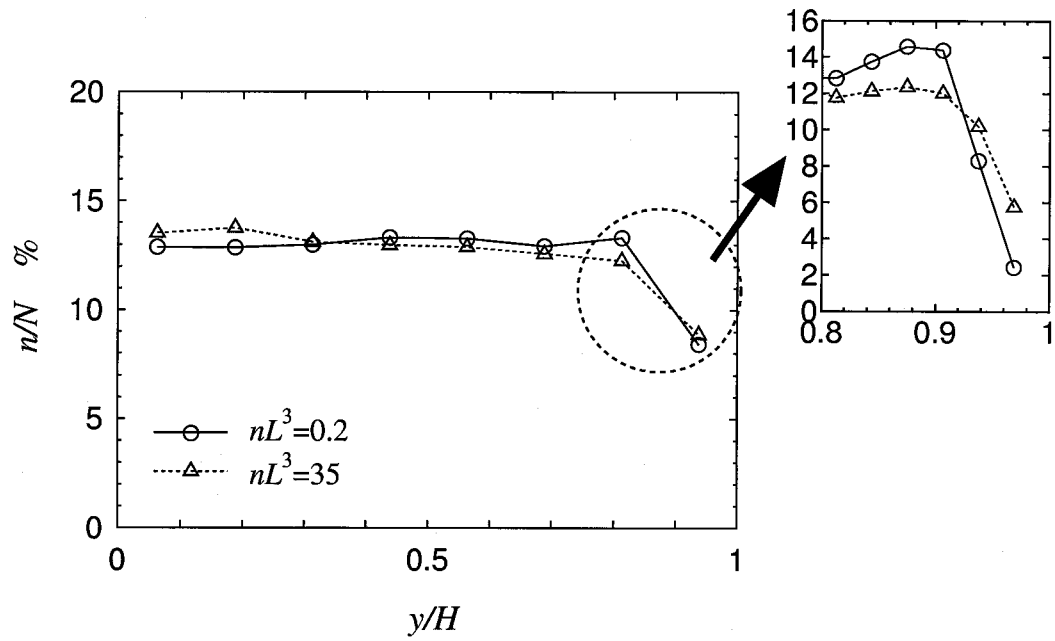


FIGURE 4.16: Fiber concentration distributions in the direction of channel width.

にかけてほぼ均一な分布となった。しかし壁面近傍では繊維が存在せず、壁面からやや離れた領域で濃度分布に極大部を生じた。また繊維濃厚分散流体では、繊維希薄分散流体と異なり、中心線付近から壁面付近にかけて単調に減少する分布となった。

第5章 急拡大スリット流路を流れる繊維分散流体中における繊維配向と濃度分布

5.1 緒言

プラスチック成形においては、様々な形状の部品が成形される。かつては、複雑な形状のプラスチック製品は、数多くの単純な形状の部品に分けて成形し、その後それらの部品を人手で組み立てるという方法で製品化されてきた。しかし近年は、組立費用を削減するために、複雑な形状のプラスチック製品であっても、一度に成形する技術を用いて組立費用を削減し、製品の価格低減をはかっている。

しかし、これらの金型内部の流路形状は数多くの拡大部や縮小部を持ち、製品同様に複雑になる。このような形状の流路を成形材料が流れるとき、その中に含まれる繊維の配向状態や濃度分布およびそれらが生じる原因を知ることは、製品の品質の向上や成形過程の効率化において不可欠である。成形品には薄肉品が多いため、スリット流路内流れは繊維強化複合材料の成形過程によく現れる。高分子材料の流路内流動の研究では、急縮小部を通過する場合の流動解析が盛んであるが、繊維分散流体の場合は、急縮小部では加速流れのために、繊維がほぼ流れ方向に配向することが報告されている [19]。しかし、急拡大部では流れは伸長流れで、流体粒子は流れと垂直方向に伸長される (図 5.1 参照)。そのため繊維は容易に回転し、繊維の配向の特徴が現れやすく、それが製品の品質と大きく関係する。

繊維は、粘弾性流体中においてニュートン流体の場合とは異なる配向状態を示すことが報告されている [44,48]。しかしそれらの実験では、粘弾性流体として用いられる高分子流体の高分子濃度が大きいために、粘弾性流体のレオロジー的特徴であるせん断粘度の shear-thinning 性、弾性特性を表す法線応力差、伸長粘度の stretch-thickening 性が顕著に生じている。そのため、それらの性質が繊維の運動に与える影響を実験で分離して考察することが難しい。これらの影響を詳しく検討した研究

として、単純せん断流れ場において、繊維の運動に対するせん断粘度と弾性の依存性を検討した報告がある [54,55]。しかし、伸長粘度の影響については触れられていない。そこで本研究では、粘弾性流体のレオロジー特性のひとつである伸長粘度特性に注目するため、せん断粘度特性と法線応力差それぞれについて差が小さく、伸長粘度特性が大きく異なる4種類の希薄高分子流体を繊維の分散媒として用い、実験を行った。

本章では、急拡大部を有するスリット流路内の流れを対象に、ニュートン流体あるいは希薄高分子流体を分散媒とする繊維分散流体の流れ中における繊維の配向状態と濃度分布を明らかにすることを目的とする。

5.2 実験装置

実験装置には図 4.1 で示した装置と同じものを用い、図 4.1(a) の test section 部に急拡大部を有する流路を設置した。急拡大流路の形状と寸法を図 5.2 に示す。流路には2種類を用意した。流路厚みが 2mm の type t2 流路および type t2 の厚みと幅をそれぞれ3倍に拡大した type t6 流路である。薄肉成形品を想定した type t2 流路は繊維分散流体を用いた実験に用い、type t6 流路は、厚み方向断面の流れ模様を検討するために用いた。いずれの流路も 1:4 の急拡大部を有する透明アクリル製のスリット流路である。

繊維分散流体の実験に用いた type t2 流路では、急拡大部に至るまでの助走区間を金型のランナー部と想定し、幅は繊維長の 1mm と比較して狭い 4 mm とした。成形品ではランナー部は廃棄される部分なので、製品の価格低減の目的のためにもできるだけ幅を狭くすることが望まれる。しかし第 4 章で詳細に検討したように、流路幅が繊維長と比較して狭いとストレート流路内における濃度分布に影響が現れた。

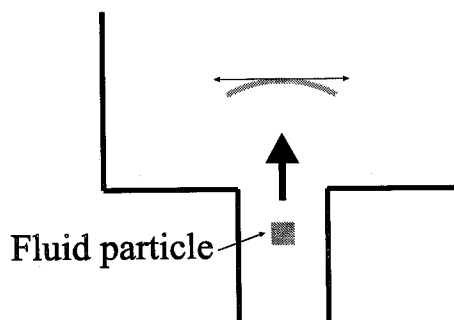


FIGURE 5.1: Elongational flow through an expansion.

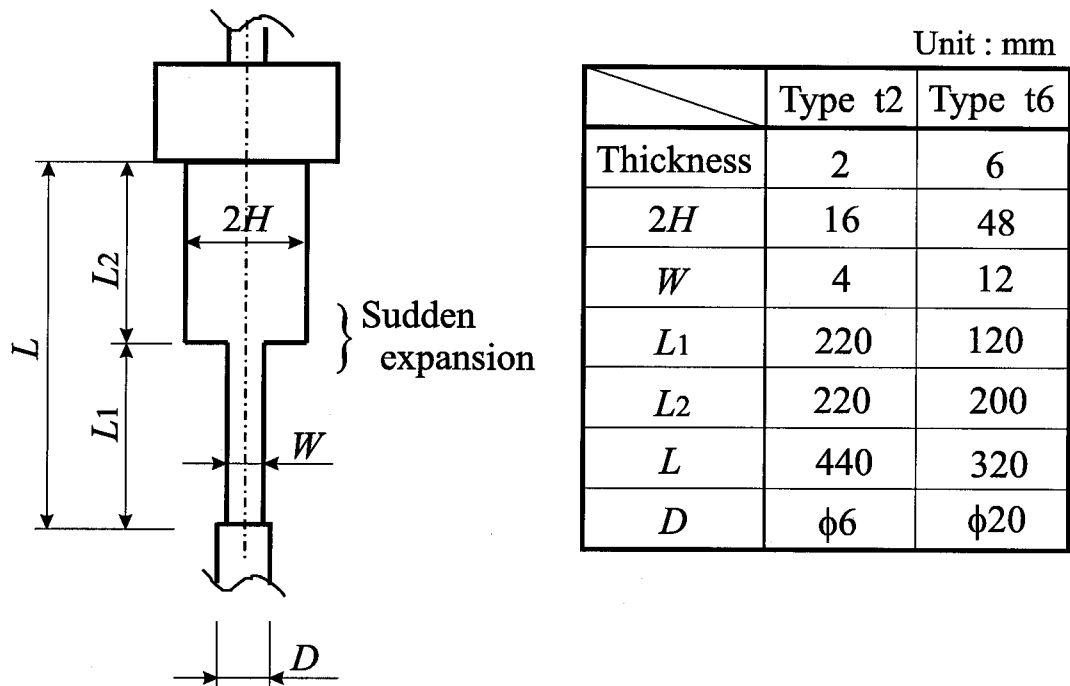


FIGURE 5.2: Schematic description of an expansion channel.

助走区間の幅が 6mm 以上であれば、急拡大部通過後の領域で、繊維の濃度分布が流路幅方向にわたってほぼ均一になるのは明らかである。しかし本章では、あえて繊維長と比較して狭い流路幅を選択することにより、製品部に相当する急拡大部通過後の領域における繊維の配向状態と濃度分布を調べた。また助走区間の長さはその流路幅の 55 倍あり、十分に長い。

図 4.1(a) のリザーバタンクから流路入口までは、助走区間の幅の 4 mm よりも大きな内径 6 mm の導管を用い、導管と助走区間との接続部で縮小流れとなるようにした。これは、助走区間の入口部で、繊維がほぼ流れ方向に配向した入口配向状態となるように配慮したためである。

試料流体として、第 2 章で作製した各種の分散媒に繊維を分散させた繊維分散流体を用いた。使用した分散媒の高分子濃度と繊維の含有量 nL^3 の組み合わせを表 5.1 中に○印で示す。レイノルズ数は、幅の広い方の流路幅の半分の H と分散媒の粘度を用いて定義し、1 より小さな 0.4 に固定した。実験は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ で行った。

TABLE 5.1: Test fluids.

	Concentration of PAA [p.p.m.]				
	0	18	35	100	200
$nL^3 = 0.5$	○	○	○	○	○
5	○				
15	○				
30	○				○
35	○				

0 p.p.m.: Newtonian fluid

5.3 流れの可視化

複雑な形状の流路内における繊維の配向状態を調べるとき、流れ場を知ることは重要である。そこで、急拡大流路内における流れの様子を詳しく調べるために、流れの可視化実験を行った。ここで用いた流体は、(1)グリセリンとポリエチレングリコールの混合流体（ニュートン流体）、(2)それを分散媒とした $nL^3 = 0.5$ の繊維希薄分散流体、(3)200 p.p.m. の PAA 流体を分散媒とした $nL^3 = 0.5$ の繊維希薄分散流体、(4)ニュートン流体を分散媒とした $nL^3 = 30$ の繊維濃厚分散流体の4種類である。

可視化装置の概略を図 5.3 に示す。流れの可視化には様々な方法が用いられるが、本実験では固体トレーサー法 [106] を用いた。トレーサーとして直径 0.1mm 以下の少量のポリスチレン粒子を各流体に添加した。流路内の任意の奥行き断面にスリット状のレーザー光を照射し、カメラで流線を撮影した。レーザーには 5mW の He-Ne レーザーを用いた。スリット状レーザー光の厚みは約 0.8mm である。

まず、type t6 流路で奥行き厚み方向の中央断面と壁面付近の流線を可視化した。Type t6 流路は type t2 流路の幅と奥行きとをいずれも 3 倍に拡大した流路であるので、ニュートン流体の場合には流れの相似則から、type t6 流路内の流れは type t2 流路内の流れと相似な流れとなる。ここで用いた試料流体は、(1) のニュートン流体である。可視化結果を図 5.4 に示す。図 5.4(a) は奥行き中央断面内、図 5.4(b) は壁面から 1mm 離れた断面内での流線である。この図から、type t6 流路では厚みに対して幅が十分に大きいので、流線は中央断面と壁面付近とでほぼ同じであり、二次

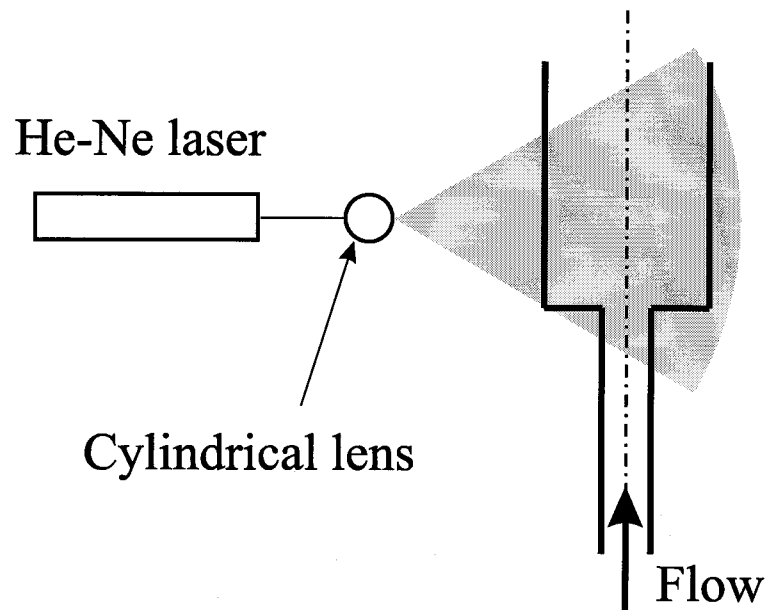


FIGURE 5.3: Visualization system of streamlines in an expansion channel flow.

元流れで生じる循環二次流れも生じていないことがわかる。

つぎに type t2 流路を用いて、各流体の流れの可視化実験を行った。スリット状レーザー光を厚み 2mm の奥行き中央断面に照射した。図 5.5 に可視化結果を示す。図 5.5(a)~(d) はそれぞれ流体 (1)~(4) の可視化写真である。いずれの流体においても流れは中心線に対して対称であることが確認できる。繊維分散流体の場合、流体にはトレーサー粒子だけでなく繊維も含まれているため、流線は鮮明ではない。この図から、流路の厚みに対して幅が十分に大きいので、繊維や高分子の有無にかかわらず、いずれの流体においても流線には大差がないことがわかる。ところが繊維分散流体の可視化実験に用いた type t2 流路では、スリット状レーザー光の厚みが 0.8mm に対して流路の厚みが 2mm しかなく、さらにレーザー光の散乱も考慮すれば、type t2 流路の奥行き中央の厚み 0.8mm の断面内だけを可視化しているとは言いがたい。

しかし、先の type t6 流路を用いた可視化実験で示したように、本研究で用いた流路形状では、流路奥行き方向における中央断面と壁面付近とで流れ模様に大きな違いがなく、type t6 流路内の流れはニュートン流体に対しては type t2 流路内の流れと相似な流れとなることから、type t2 流路においても、奥行き方向の位置にかかわらず、ほぼ同じ流れ模様となると考えられる。したがって、図 5.5 で可視化された流線が、type t2 流路の奥行き方向を代表する流線であると考えられることができる。

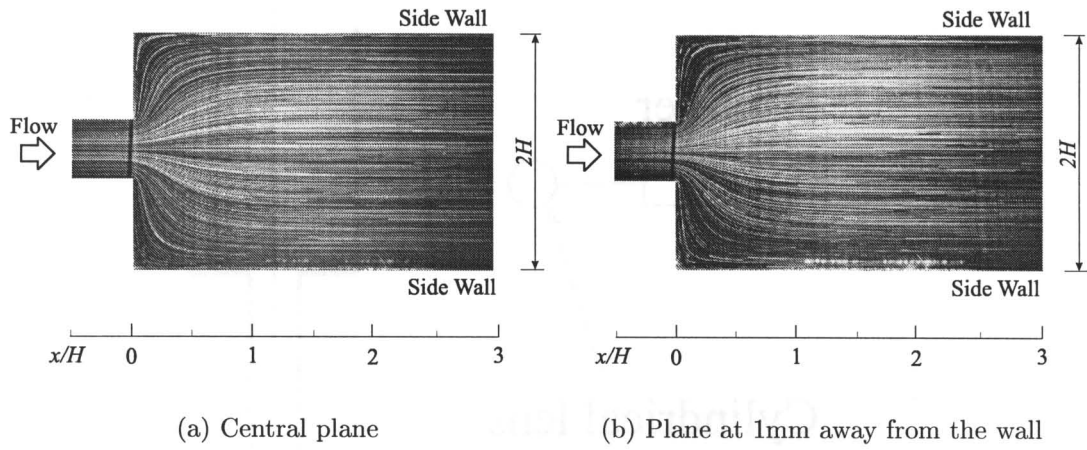


FIGURE 5.4: Streamlines in the type t6 channel.

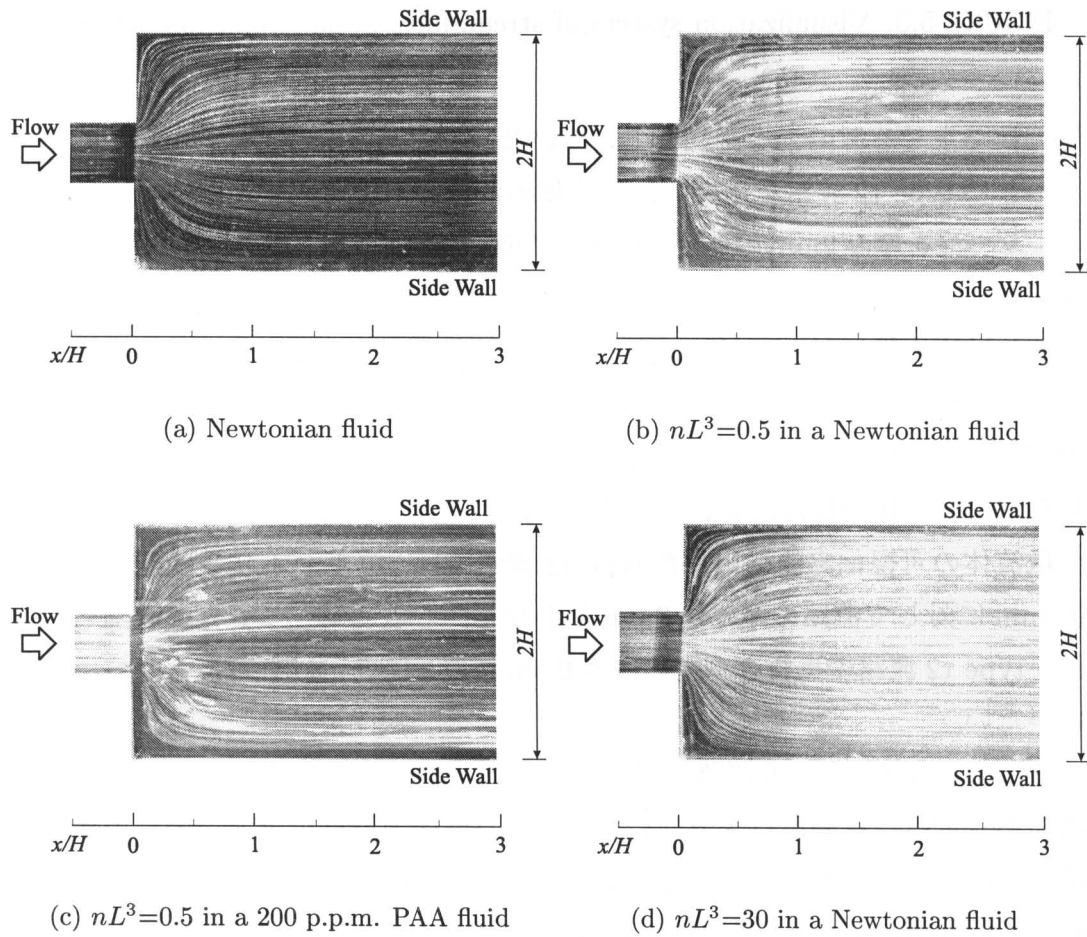


FIGURE 5.5: Streamlines in various conditions through the type t2 channel.

5.4 繊維の配向と濃度分布に対する実験結果と考察

Type t2 流路を用い、第4章のストレート流路の場合と同様にして、繊維の可視化実験を行った。その可視化写真の一例を図5.6に示す。ここで使用した流体は、ニュートン流体を分散媒とした $nL^3 = 30$ の繊維濃厚分散流体である。繊維分散流体は、4mmの幅の助走区間から急拡大部を通過して平行平板間の流路に流れ込んでいる。座標系は、図5.7に示すように、急拡大部の中心線上に原点を置き、流れ方向に x 軸、それと垂直方向に y 軸をとった。観察対象とした領域は、急拡大部前後の $-0.5 \leq x/H \leq 3$ である。

各試料流体について同じ実験を行い、撮影した写真から、第4.4.1項で述べた方法を用いて繊維の配向と位置を解析した。ただし流路内における解析領域の分割は、急拡大部における繊維配向の急激な変化を予測して、空間の分解能を高めるためストレート流路の場合よりも小さな $1\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ とした (図5.7参照)。濃度分布は急拡大部から十分に離れた下流域 ($1.25 \leq x/H \leq 3$) にある繊維を対象に、第4.4.2項で述べた方法で解析した。この計測領域では、図5.5からわかるように、流れはほとんど平行流れになっている。

5.4.1 ニュートン流体中の繊維の配向と濃度分布

本項では、ニュートン流体を分散媒とする繊維分散流体が急拡大流路を流れる場合の繊維の配向と濃度分布について述べる。

繊維の主配向角と配向度 図5.8に繊維分散流体の流れ中における繊維配向を配向楕円により示す。図5.8の(a)~(c)はそれぞれ、(a)希薄分散流体 ($nL^3 = 0.5$)、(b)準希薄分散流体 ($nL^3 = 15$)、(c)濃厚分散流体 ($nL^3 = 30$) の場合である。配向楕円から、急拡大部より上流の助走区間では繊維の含有量 (nL^3) にかかわらず、繊維は流れ方向に強く配向していることがわかる。しかし準希薄または濃厚分散流体では、急拡大部通過直後 ($0.5 < x/H < 1$)、壁面付近を除いて、繊維が流れ方向に対して垂直方向に急激に配向する。その後、繊維は下流に流れるにしたがって、一旦ランダム状態を経て流れ方向に配向していく。一方、希薄分散流体では、急拡大部通過後 ($1 < x/H < 2$) に一旦ランダム状態近くになったあと、下流に流れるにしたがって流れ方向に配向している。濃厚または準希薄分散流体と異なり、急拡大部通過後、流れに対して垂直方向に強く配向することはない。

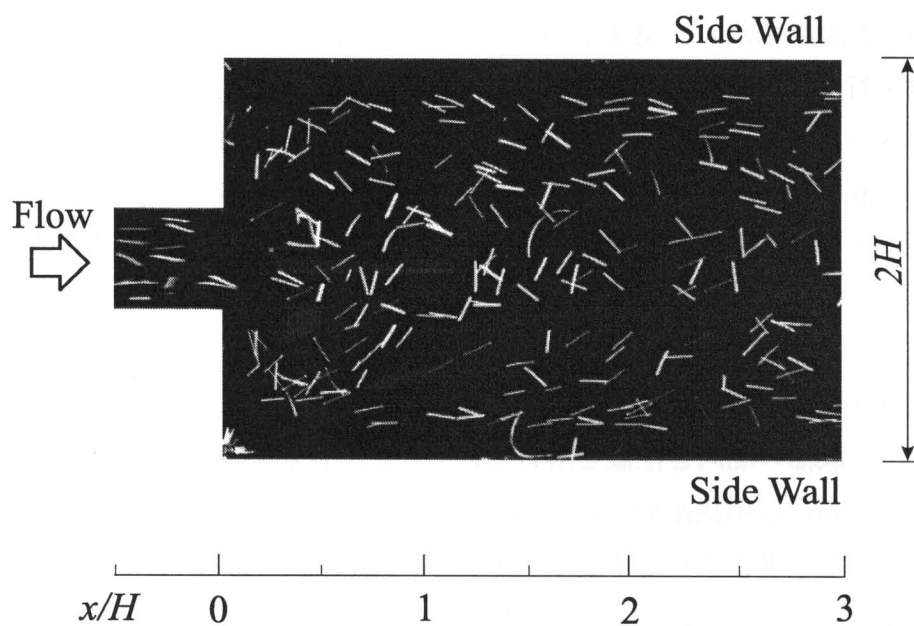


FIGURE 5.6: Concentrated fiber suspension flow at $nL^3 = 30$ in a Newtonian fluid through an expansion channel with 2mm depth.

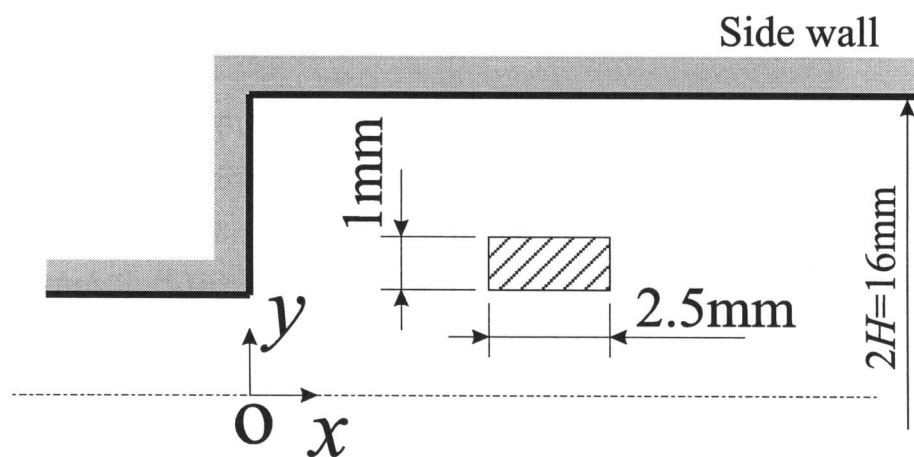


FIGURE 5.7: Schematic illustration of the expansion channel, and the small region ($1\text{mm} \times 2.5\text{mm}$) for calculation of fiber orientation.

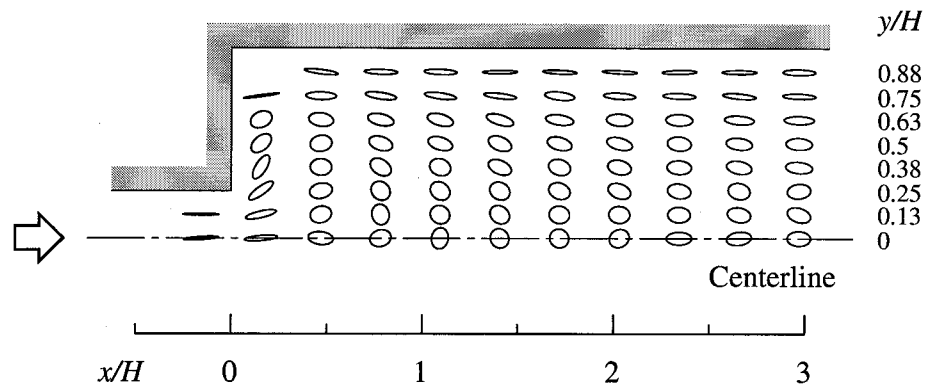
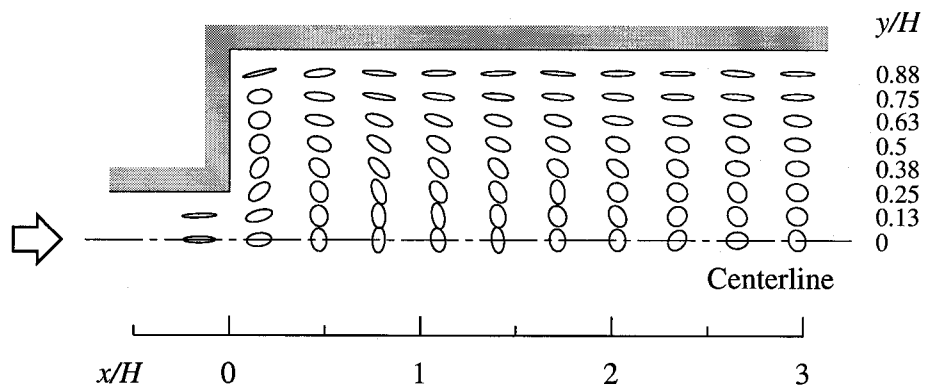
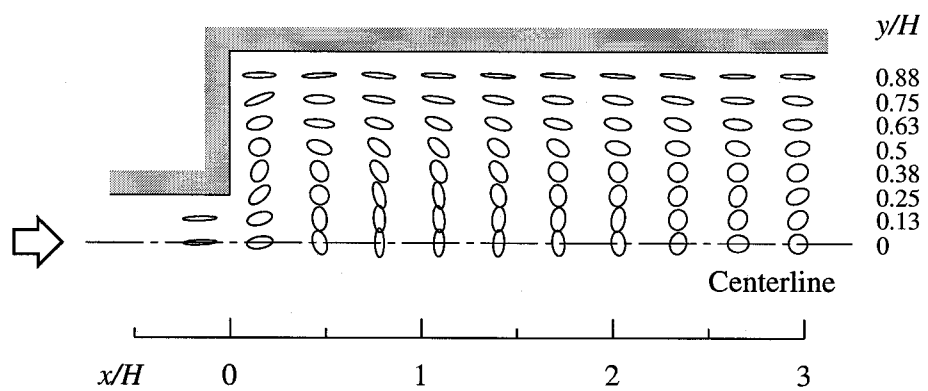
(a) $nL^3 = 0.5$ (b) $nL^3 = 15$ (c) $nL^3 = 30$

FIGURE 5.8: Distributions of orientation ellipses in fiber suspension flows at (a) $nL^3 = 0.5$, (b) $nL^3 = 15$ and (c) $nL^3 = 30$ in Newtonian fluids, respectively.

主配向角の変化をより詳細に検討するため、主配向角の流れ方向変化を示したのが図 5.9 である。ここでは希薄分散流体 ($nL^3 = 0.5$) と濃厚分散流体 ($nL^3 = 30$) について比較した。この図から、壁面に近い $y/H = 0.88$ では壁面の影響のため、いずれの分散流体においても繊維が流れ方向 ($\alpha = 0^\circ$) に配向している。しかし、中心線と壁面との間の $y/H = 0.38$ や 0.5 では、濃厚分散流体の主配向角は希薄分散流体に比べて大きいことがわかる。中心線上 ($y/H = 0$) において、濃厚分散流体では $0.3 < x/H < 2.3$ で流れ方向に対して垂直方向 ($\alpha = 90^\circ$) に配向しており、希薄分散流体ではこの付近 ($0.7 < x/H < 2$) でランダム配向状態に近いいため主配向角は不安定である。

第 4 章で述べたように、平行流路の発達した繊維分散流体の流れ中においては、繊維は nL^3 の大きさにかかわらず流れ方向に配向することがわかっている。希薄分散流体では短い距離で配向場が発達した状態に近づき、いずれの y/H においても $x/H \simeq 2$ までに主配向角が 0° 付近にほぼ収束している。一方、濃厚分散流体では、 $2 < x/H < 3$ においても中心線付近から $y/H = 0.38$ にかけての主配向角がまだ大きな値となっている。しかし中心線を除いて、下流に流れるにしたがって繊維の主配向角は 0° 付近に収束することがわかる。

図 5.10 に配向度の x 方向変化を示す。中心線上 ($y/H = 0$) において、いずれの分散流体でも、配向度は一旦 0.5 (ランダム配向) に近い極小値をとる (希薄分散流体では $1.5 < x/H < 2$, 濃厚分散流体では $x/H \simeq 0.3$)。その後下流に流れるにつれて配向度は上昇する。主配向角の考察で述べたように、繊維の配向角の発達に必要な距離が異なり、希薄分散流体のほうが距離は短い。配向度についても同様で、希薄分散流体では既に $x/H = 2$ 直後で配向度は 0.6 から 0.7 付近に達している。繊維がさらに下流に流れるにつれ、配向度はさらに上昇するものと考えられる。

一方、濃厚分散流体における配向度は、 $y/H = 0$ と $y/H = 0.38$ において絶対値は異なるものの、急拡大部通過直後、 $x/H < 1$ で極大値をとり (このとき繊維は流れと垂直方向に配向している)、その後繊維が下流に流れるにつれてゆっくりと低下していく。流れ模様を可視化した図 5.5 からわかるように、 $x/H > 1$ ではほぼ平行流れであることから急拡大部の減速流れは $x/H \simeq 1$ 付近まで影響すると見られ、この付近までに繊維が流れと垂直方向に配向している。したがって希薄分散流体の場合と比べて濃厚分散流体では、さらに下流域において繊維が流れ方向に配向するためには、多くの繊維が流れと垂直方向から流れ方向へと回転しなければならない。そこで、発達した配向状態に至るまでにはより長い距離を必要とする。とく

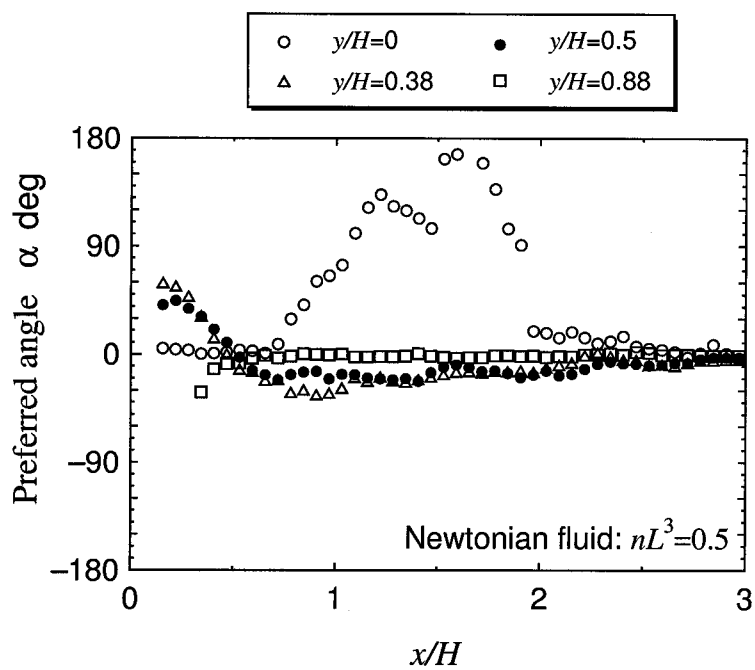
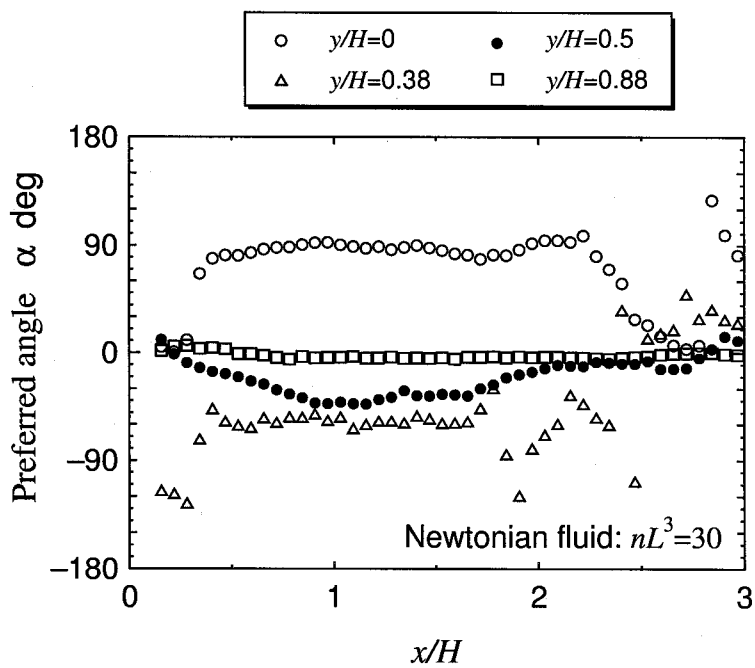
(a) $nL^3 = 0.5$ (b) $nL^3 = 30$

FIGURE 5.9: Distributions of preferred angle in fiber suspension flows at (a) $nL^3 = 0.5$ and (b) $nL^3 = 30$ in Newtonian fluids, respectively.

に中心線上 ($y/H = 0$) では、流路幅方向の速度分布を考えると、もっとも速度勾配が小さいと考えられる。そのため発達した配向状態に至るまでの距離がもっとも長くなり、 $x/H = 3$ においても配向度が0.5程度ともっとも小さい値となっている。一方、壁面に近づくにつれて速度勾配が大きくなるため発達も早くなり、 $y/H = 0.38$ では $x/H = 2 \sim 2.5$ で最小値をとり、その後徐々に上昇している。また $y/H = 0.5$ や $y/H = 0.88$ では、小さな x/H から大きな配向度を保っている。

希薄分散流体と濃厚分散流体の流れ中において、とくに中心線上における配向状態の違いが顕著である。この原因として、次の二つの理由が考えられる。ひとつめは、助走区間における繊維の配向状態の違いである。第4章で述べたように、 nL^3 が大きくなると、ストレート流路内を流れる繊維の配向度がやや低下し、助走区間において主配向角を平均とする繊維の配向角の分布が広がる。一般に繊維は、急拡大部のような減速流れ中では流れ方向と垂直な方向に配向しようとする。したがって、主配向角は同じであっても、このように広い配向角分布を持つと、減速流れによって、より多くの繊維が流れと垂直な方向に配向すると考えられる。

そこで急拡大部直前の助走区間 ($x/H = -0.15$) における配向度を各流体について調べた。その結果を表5.2に示す。この表から、配向度は(a)で0.91であり、(b)と(c)でそれぞれ0.84, 0.88と(a)よりもやや小さいことがわかる。急拡大部においては、流れは伸長流れで、流体粒子は流れと垂直な方向に伸長される(図5.1参照)。山本ら[11]は、ニュートン流体の一軸伸長流れ場において、繊維軸と伸長方向とのなす角度が大きいほど、繊維はゆっくりと伸長方向に配向していくことを明らかにした。よって、(a)の希薄分散流体におけるように中心線上において繊維が大きな配向度で配向していると、繊維はゆっくりとランダム配向状態に近づく ($1 < x/H < 2$)。それに対して、配向度の小さな濃厚分散流体では、速くランダム状態に近づくことになる。

ふたつめは、濃厚分散流体中において、急拡大部の減速流れにより一部の繊維が急拡大部通過後に回転すると、回転が遅れているその周辺の繊維までが繊維間干渉のために回転すると考えられることである。繊維希薄分散流体では繊維間干渉がないために、たとえある繊維が回転してもその影響は周囲の繊維にはほとんど及ばない。ここで繊維間干渉についてさらに詳しく調べるために、図5.11に中心線上の配向度の流れ方向変化をそれぞれの nL^3 の場合について示す。(a)は nL^3 が0.5, 30, 35の場合であり、(b)は nL^3 が5, 15の場合である。また急拡大部直前の助走区間 ($x/H = -0.15$) における配向度は、流体によって完全に一致させるのは実験的に非

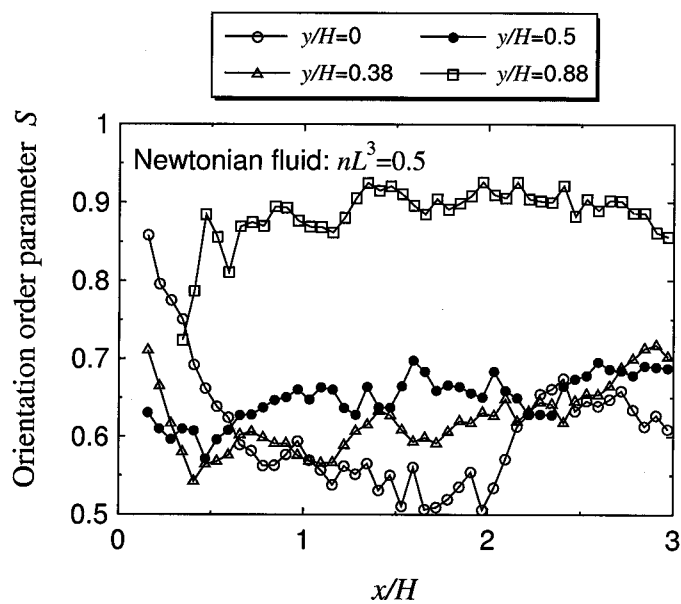
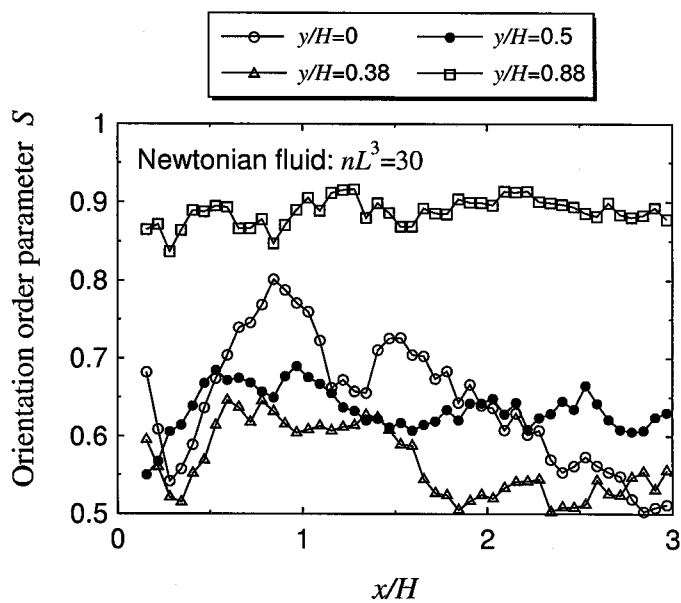
(a) $nL^3 = 0.5$ (b) $nL^3 = 30$

FIGURE 5.10: Distributions of orientation order parameter S in fiber suspension flows at (a) $nL^3 = 0.5$ and (b) $nL^3 = 30$ in Newtonian fluids, respectively.

常に困難であるが、表 5.2 からわかるように、 $nL^3 \geq 5$ では助走区間の配向度にはほとんど違いがない。ところが、図 5.11 からわかるように、急拡大部通過後の配向度の変化の様子は大きく異なっている。 $x/H = 0.8$ 付近における配向度の極大値は、濃厚分散流体 ($nL^3 = 30, 35$) が準希薄分散流体 ($nL^3 = 5, 15$) よりも明らかに大きい。これはより大きな繊維間干渉によって、急拡大部でより多くの繊維が流れと垂直方向に配向した結果であると考えられる。

繊維の濃度分布 流路内での繊維の濃度分布は、成形品の強度不均一性に大きくかわり、金型の設計上重要である。そこで、希薄分散流体 ($nL^3 = 0.5$) と濃厚分散流体 ($nL^3 = 30$) において繊維の濃度分布を調べた。その結果を図 5.12 に示す。

この図から濃度分布は、いずれの流体においても、第 4.4.2 項で述べたストレート流路における濃度分布と同じ傾向である。希薄分散流体では助走区間における壁面付近の繊維のフリップオーバーが、また濃厚分散流体では助走区間における繊維の凝集がそれぞれ原因であると考えられる。繊維の重心はほぼ流線に沿って移動すると考えると、図 5.12 の結果より、助走区間での繊維分布が急拡大部通過後もそのまま反映されていると推測される。

希薄分散流体について壁面付近の繊維の濃度分布の様子をさらに詳細に検討するため、図中の○印で囲まれた領域に相当する流路幅の位置において流路幅をさらに 2 等分して領域の分解能を高め、濃度分布を調べた結果を図 5.12 中の小さな図に示す。この図から、壁面付近の $y/H = 0.78$ において繊維の濃度は極大値をもち、壁面近傍には繊維はほとんど存在しないことがわかる。もし、この濃度分布が助走区間の壁面近傍における繊維のフリップオーバーに由来するものであれば、繊維長が 1mm、助走区間の幅が 4mm であることを考え合わせると、繊維濃度は $y/H = 0.75$ 付近に極大をもつはずである。この値は実験値とほぼ一致していることから、急拡大流路内における繊維希薄分散流体の流れ中における繊維濃度分布は、助走区間における繊維のフリップオーバーが原因であると考えられる。

TABLE 5.2: Orientation order parameter S at $x/H = -0.15$ in a Newtonian fluid.

nL^3	0.5	5	15	30	35
S	0.91	0.85	0.84	0.88	0.83

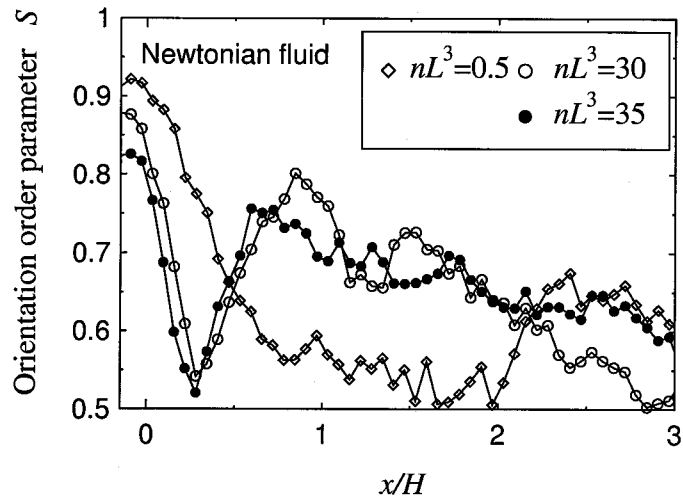
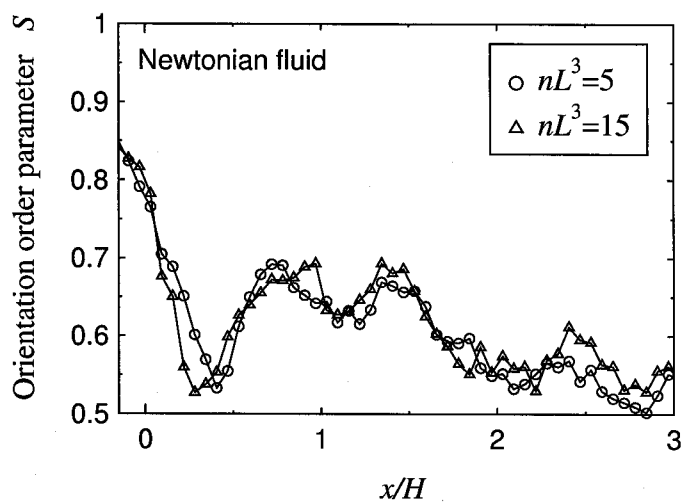
(a) $nL^3 = 0.5, 30, 35$ (b) $nL^3 = 5, 15$

FIGURE 5.11: Distributions of orientation order parameter S on the centerline in fiber suspension flows in Newtonian fluids.

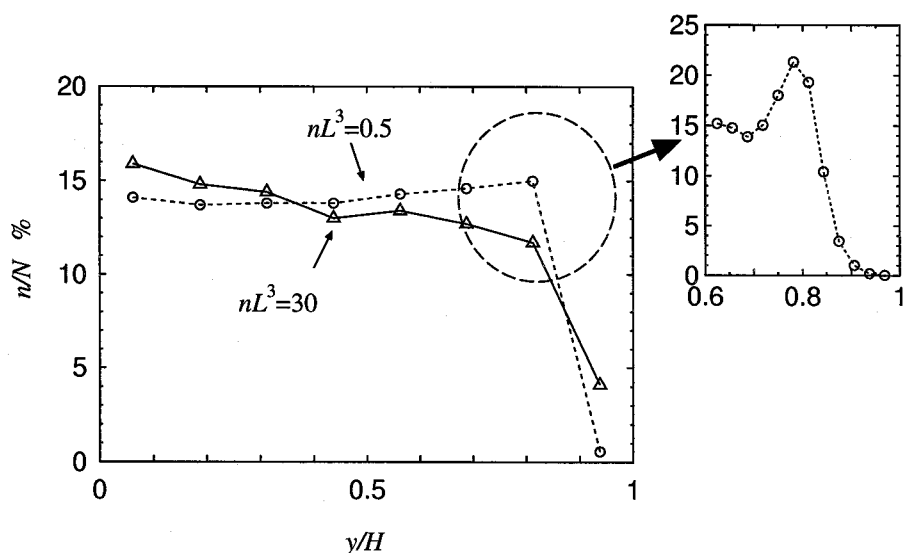


FIGURE 5.12: Fiber concentration distribution in the y -direction at $1.25 \leq x/H \leq 3$.

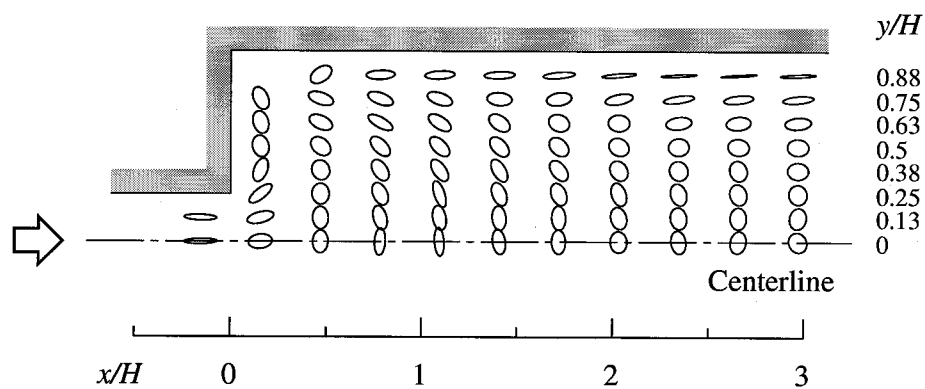
5.4.2 希薄分散流体中における繊維の配向と濃度分布に対する高分子の影響

この項では、高分子流体を分散媒とする希薄分散流体 ($nL^3 = 0.5$) が急拡大流路を流れる場合の繊維の配向と濃度分布について述べる。PAA 濃度は 18 p.p.m. から 200 p.p.m. である。

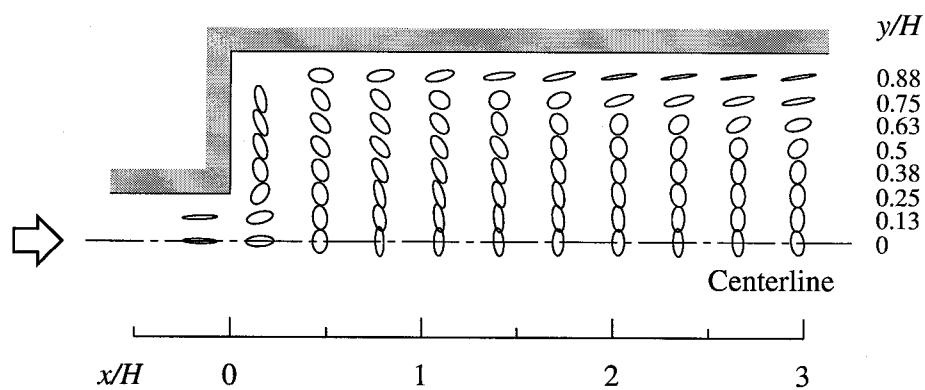
繊維の主配向角と配向度 図 5.13 に急拡大流路を通過する各 PAA 流体中の繊維配向を配向楕円により示す。最も高分子濃度の小さな 18 p.p.m. の場合の配向楕円は、図 5.8(a) ですでに示したニュートン流体の場合とほとんど同じであったので、ここでは省略した。

配向楕円から、急拡大部より上流の助走区間では PAA の濃度にかかわらず、繊維は流れ方向に強く配向していることがわかる。ニュートン流体では、図 5.8(a) にすでに示したように、急拡大部通過後 ($1 < x/H < 2$)、中心線付近において繊維は一旦ランダム状態になり、その後下流に流れるにしたがって流れ方向に配向していく。しかし 35 p.p.m. の PAA 流体では、急拡大部通過後、中心線付近でニュートン流体に比べて繊維が流れ方向に対して垂直方向に急激に配向する。その後、下流に流れるにしたがって、再びランダム状態を経て流れ方向に配向していくが、その変化は非常に遅い。この傾向は、中心線上以外の他の y/H においても同様に見られる。

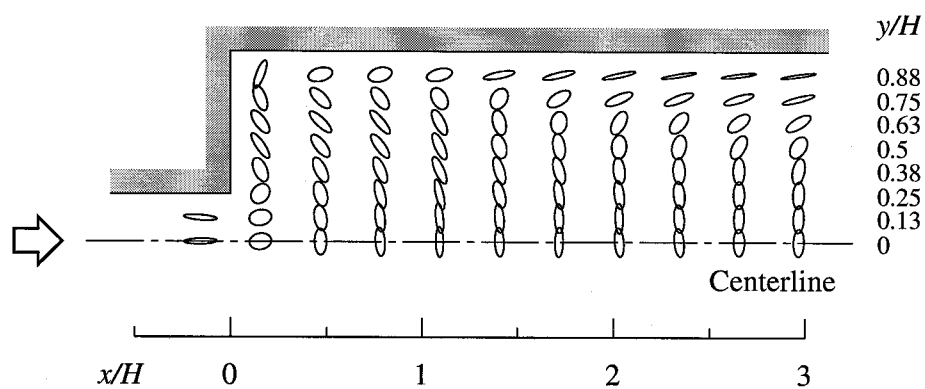
100 p.p.m. の PAA 流体では、35 p.p.m. の PAA 流体の場合と同様の配向角の変



(a) 35 p.p.m. PAA fluid



(b) 100 p.p.m. PAA fluid



(c) 200 p.p.m. PAA fluid

FIGURE 5.13: Distributions of orientation ellipses in a dilute fiber suspension flows at $nL^3 = 0.5$ in (a) 35 p.p.m. PAA fluid, (b) 100 p.p.m. PAA fluid and (c) 200 p.p.m. PAA fluid, respectively.

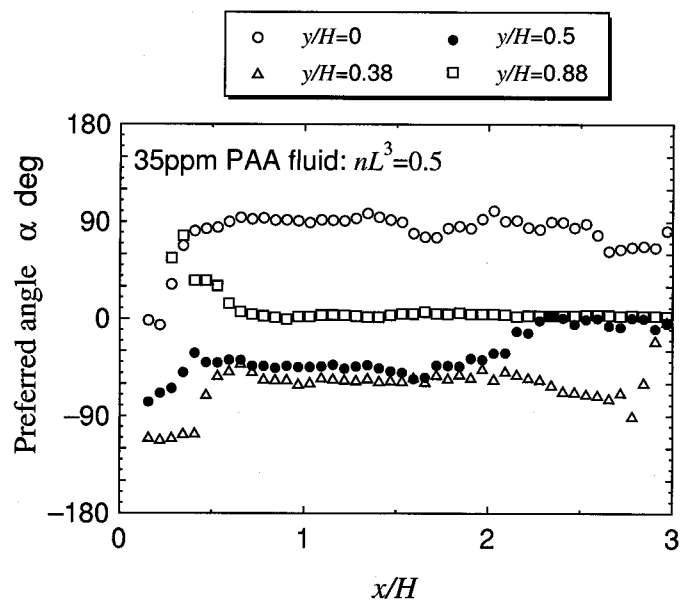
化が観測され、流路の中央部において配向楕円の長軸・短軸比が 35 p.p.m. の PAA 流体の場合に比べて大きいことから、繊維がさらに強く配向していることがわかる。また 200 p.p.m. の PAA 流体では、100 p.p.m. の PAA 流体の場合の傾向がさらに顕著になり、とくに $x/H > 2$ の下流域では $y/H = 0.5$ 付近を境に壁面側と中心線側とでまったく異なる配向状態になっている。

繊維配向をより詳細に検討するため、配向角の流れ方向変化を示したのが図 5.14 である。ここでは、ニュートン流体 (図 5.9(a) 参照), 35 p.p.m. PAA 流体, 200 p.p.m. PAA 流体の場合について比較する。ニュートン流体では短い距離で配向場が発達した状態に近づき、 $x/H \simeq 2$ までに主配向角が 0° 付近にほぼ収束している。35 p.p.m. の PAA 流体では、 $y/H = 0.5$ では $x/H > 2$ で急速に流れ方向に配向するようになるが、中心線上では $x/H > 2$ の下流域でも配向角が 90° 付近に保たれている。また、200 p.p.m. の PAA 流体では y/H にかかわらず、 $x/H = 3$ においても上流側の配向角がほぼ保たれていることがわかる。

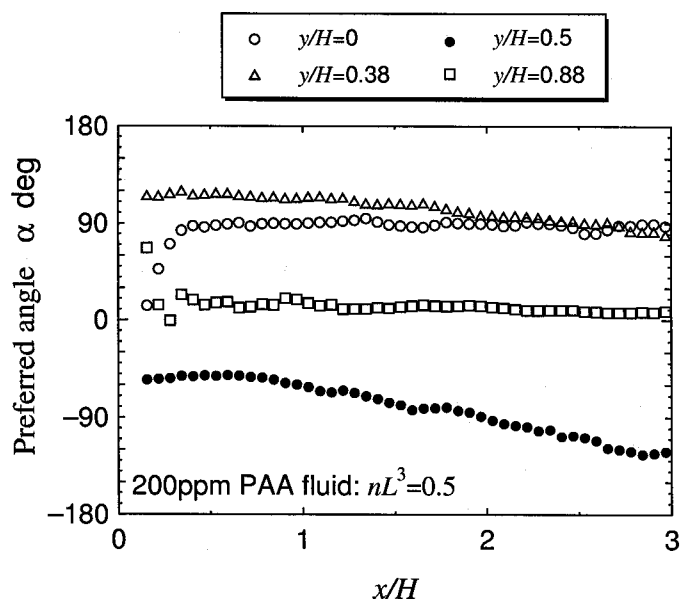
図 5.15 に繊維の配向度の x 方向変化を示す。中心線付近において、ニュートン流体では、図 5.10(a) に示すように、 $1.5 < x/H < 2$ で配向度は一旦 0.5 (ランダム配向) に近い極小値をとったあと、下流に流れるにつれて上昇し、 $x/H \simeq 2$ より下流で 0.6 から 0.7 付近に達する。一方、PAA 流体では、 $y/H = 0.88$ を除いて、いずれの PAA 濃度でも急拡大部通過後、 $x/H < 0.5$ で配向度は一旦 0.5 に近い極小値をとったあと、急激に上昇して極大値をとる。その後、35 p.p.m. の PAA 流体では、配向度は低下し、配向は再びランダム状態に近づく。それに対して、200 p.p.m. の PAA 流体では、配向度が非常にゆっくりと低下する。

分散媒に関わらず完全に発達した流れ中では繊維はほぼ流れ方向に配向することがわかっているが [44,54,55], 本実験結果より、急拡大部通過後、完全に発達した状態に至るまでの距離には高分子濃度により大きな差があると推測できる。

このように、高分子濃度により急拡大部通過後の繊維配向に顕著な違いが生じる原因として、各分散媒の伸長粘度特性と弾性的性質の違いが考えられる。本研究で対象としている流れ場での伸長速度は 8 s^{-1} 程度と見積もられる。使用したスピンドル型レオメーターの特性上、この伸長速度域での伸長粘度は測定できなかったが、PAA の濃度によって伸長粘度に大きな差があることが表 2.1 から推測できる。いずれの分散媒においても、せん断粘度には大きな差がないこと、伸長粘度には大きな差があること、さらに急拡大部では流れと垂直方向に伸長される流れとなっていることを考え合わせると、流体の伸長粘度特性が急拡大部直後の繊維の配向に大



(a) 35 p.p.m. PAA fluid



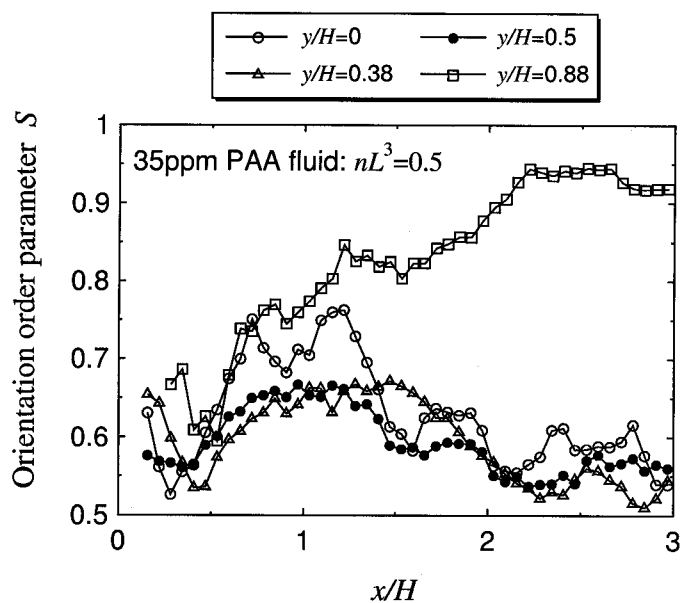
(b) 200 p.p.m. PAA fluid

FIGURE 5.14: Distributions of preferred angle in dilute fiber suspension flows at $nL^3 = 0.5$ in (a) 35 p.p.m. PAA fluid and (b) 200 p.p.m. PAA fluid, respectively.

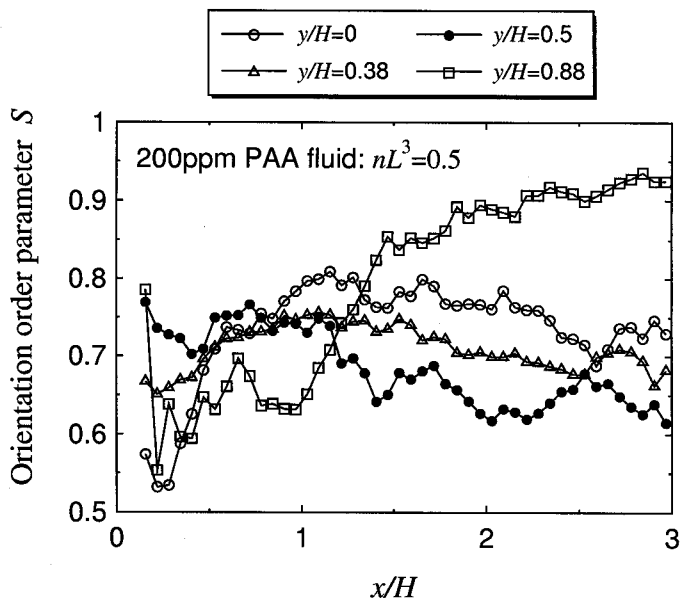
きな影響を及ぼしていると考えられる。繊維は伸長流れ場によって伸長方向に配向しようとする [11] が、伸長粘度が大きいと繊維に働くトルクが大きくなることから、繊維が流れと垂直方向に配向しやすくなると考えられる。

一方、本研究で使用した高分子流体にも、図 2.8 からわかるように、35 p.p.m. 以上の高濃度の PAA 流体において、小さいながら弾性的性質が認められる。そこで急拡大部直後の中心線付近において、せん断による第一法線応力差と伸長に基づく伸長応力を計算し、繊維に働く力を見積もる。急拡大部では、平均伸長速度は、8 [1/s] 程度であり、高分子濃度の小さな 35 p.p.m. の PAA 流体の場合、表 2.1 からわかるように、伸長粘度が約 4 ~ 5 [Pa.s] 程度であるので、伸長応力は 30 ~ 40 [Pa] 程度と見積もられる。また、中心線上ではせん断なし流れであるが、その付近のせん断速度を最大でも 10 [1/s] 程度と見積もると、このときの第一法線応力差は、図 2.8 よりわかるように、5 [Pa] 程度である。さらに濃厚な 100 p.p.m. の PAA 流体では、伸長応力は 500 [Pa] 程度、第一法線応力差は 10 [Pa.s] 程度と見積もられる。したがって、急拡大部では法線応力差は伸長応力よりもかなり小さく、伸長応力のほうが繊維の回転に対して影響が大きい。

さらに、比較しやすいように、中心線上の配向度の x 軸方向変化を各流体について示したのが図 5.16 である。この図から、急拡大部直前の助走区間 ($x/H = -0/15$) においては、PAA 流体の配向度は PAA の濃度にかかわらずほとんど同じであることがわかる。ニュートン流体の場合は、その配向度の流れ方向の変化について、すでに第 5.4.1 項で詳しく述べた。PAA 流体の場合は、急拡大部直前においてほぼ同じ配向度であるにもかかわらず、PAA 濃度が大きい方が、急拡大部下流部の $x/H \sim 1$ 付近で生じる配向度の極大値が大きいことから、伸長粘度が配向度に影響していると考えられる。また、下流に流れるにしたがって、PAA 濃度によって配向状態に大きな差が生じ、PAA 濃度が大きい方が配向度も大きな値を維持していることがわかる。下流域 ($x/H > 1$) では流れは一方向流れであり、伸長流れ場ではない。この領域においては、100 p.p.m. 以上の濃度の PAA 流体の場合、上流部の配向角がほぼそのまま保たれたまま繊維が下流に流れている。これは、中心線付近のように速度勾配の小さな領域で繊維が回転しようとしても、分散媒の弾性的性質のためにその配向が束縛されるためであると考えられる。高分子濃度の最も小さな 35 p.p.m. の PAA 流体では、急拡大部直後に繊維が流れと垂直方向に配向したあと、 $x/H > 1.2$ の下流域で配向度が急激に低下していくというニュートン流体と同様の傾向を示している。



(a) 35 p.p.m. PAA fluid



(b) 200 p.p.m. PAA fluid

FIGURE 5.15: Distributions of orientation order parameter S in dilute fiber suspension flows at $nL^3 = 0.5$ in a (a) 35 p.p.m. PAA fluid and a (b) 200 p.p.m. PAA fluid, respectively.

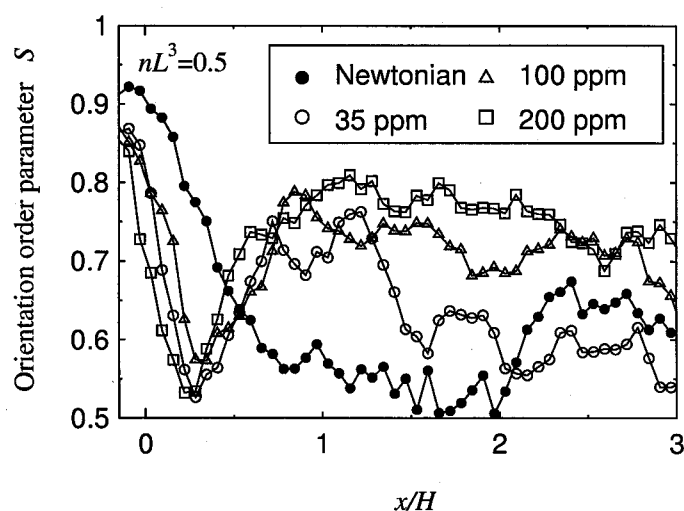


FIGURE 5.16: Distributions of orientation order parameter S on the centerline.

繊維の濃度分布 高分子流体を分散媒とする希薄分散流体の流れ中における濃度分布を調べた結果を図 5.17 に示す。この図から、高分子流体中の繊維の濃度分布は、先に述べたニュートン流体を分散媒とする繊維希薄分散流体の場合とほぼ同じであり、濃度分布に高分子の影響は見られなかった。本実験のように高分子流体が分散媒であっても、ニュートン流体の場合と同様、助走区間における壁面付近の繊維のフリップオーバーが、壁面付近に極大値を持つ濃度分布の原因であると考えられる。

5.4.3 濃厚分散流体中における繊維の配向と濃度分布に対する高分子の影響

本項では、繊維濃厚分散流体において、配向と濃度分布に対する繊維間干渉と高分子の影響を調べる。実験に用いる試料流体は、前項で述べたように希薄分散流体で繊維の配向状態に最も影響の大きかった 200 p.p.m. の PAA 流体を分散媒とした $nL^3 = 30$ の繊維濃厚分散流体である。

繊維の主配向角と配向度 200 p.p.m. の PAA 流体を分散媒とした濃厚分散流体の流れ中における配向楕円を図 5.18 に示す。前項で述べたように、PAA 流体を分散媒とした希薄分散流体では、高分子濃度によって配向状態に大きな差が見られた。これに対して、最も PAA 濃度の大きな 200 p.p.m. の PAA 流体を分散媒とした濃厚分散流体中では、図 5.18 に示すように、ニュートン流体を分散媒とした濃厚分散流体

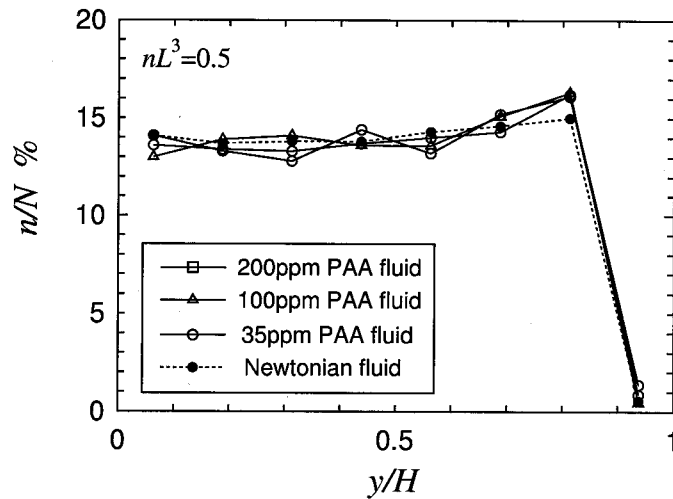


FIGURE 5.17: Fiber concentration distributions in the y -direction at various concentrations of PAA at $1.25 \leq x/H \leq 3$.

中 (図 5.8(c) 参照) と同様の配向状態を示しており, 繊維の配向状態に対する高分子の顕著な影響は配向楕円からは見られない。

繊維配向をより詳細に検討するため, 中心線上における主配向角の流れ方向変化を示したのが図 5.19 である。図には比較のために, 200 p.p.m. の PAA 流体を分散媒とする希薄分散流体 ($nL^3 = 0.5$) とニュートン流体を分散媒とする濃厚分散流体 ($nL^3 = 30$) の結果も同時に示した。これらの流体では, 表 5.3 に示すように, 急拡大部直前の助走区間において, 繊維の配向度はほぼ同じである。

しかし, 下流域で x 方向に対する主配向角の変化が大きくなり始める位置が,

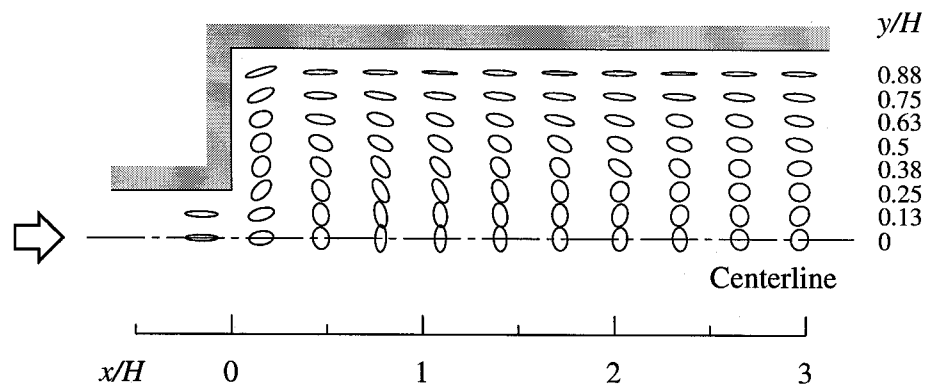


FIGURE 5.18: Distributions of orientation ellipses in concentrated fiber suspension flows at $nL^3 = 30$ in 200 p.p.m. PAA fluids.

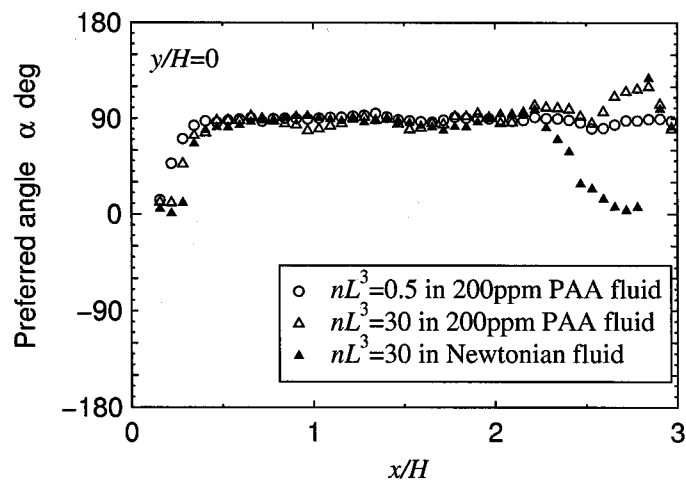


FIGURE 5.19: Distributions of preferred angles in the x -direction at $nL^3 = 30$ in 200 p.p.m. PAA fluid and Newtonian fluid.

TABLE 5.3: Orientation order parameter S at $x/H = -0.15$ in a 200 p.p.m. PAA fluid.

nL^3	0.5 (PAA fluid)	30 (Newtonian fluid)	30 (PAA fluid)
S	0.85	0.88	0.84

ニュートン流体では $x/H = 2$ 付近であるのに対し、PAA 流体を分散媒とする濃厚分散流体では $x/H = 2.5$ 付近と、ニュートン流体の場合と比べてより下流にあり、主配向角の乱れも小さいという違いがある。200 p.p.m. の PAA 流体を分散媒とする希薄分散流体では、 $x/H = 3$ 付近でも主配向角に変化がない。第 5.4.2 項でみたように、高分子流体では、希薄分散流体中において、繊維の配向角が安定し、下流域においても上流域における主配向角をそのまま維持する傾向がある。濃厚分散流体においても、希薄分散流体の場合と同じ理由で、下流域での主配向角の変化が遅れていると考えられる。

図 5.20 に、中心線上 ($y/H = 0$) における繊維の配向度の流れ方向変化を示す。この図から、濃厚分散流体の場合、PAA 流体のほうが $x/H = 0.8$ 付近の極大値が大ききという違いはあるが、極大値からランダム状態への変化には分散媒による大きな違いは見られない。

繊維の濃度分布 高分子流体を分散媒とする濃厚分散流体中における繊維の濃度分布を調べた結果を図 5.21 に示す。比較のために、ニュートン流体を分散媒とする濃厚分散流体中における濃度分布も同時に示す。

この図から、濃厚分散流体の濃度分布は、分散媒によらずほぼ同じであることから、繊維の含有率のみによって決定され、高分子の影響がないことがわかる。

5.5 結言

本章では、繊維希薄分散流体あるいは繊維濃厚分散流体が薄肉の急拡大流路を通過したあとの繊維の配向と濃度分布を測定した。分散媒はニュートン流体と高分子流体である。

まず分散媒がニュートン流体のとき、希薄分散流体と濃厚分散流体の場合について検討した。その結果、主配向角は、濃厚分散流体では希薄分散流体とは異なり、中心線付近で流れ方向に垂直となった。また配向度から配向場の発達の早さに差があることがわかった。繊維の濃度は、希薄分散流体では中心線から壁面に向けてゆるやかに上昇し、壁面付近で最大値をもった。これは助走区間における繊維のフリップオーバーによるものと考えられる。濃厚分散流体では中心部から壁面にかけて濃度が単調に減少した。これは繊維の凝集によるものと考えられる。以上の現象は、繊維間干渉の有無の影響によるものと考えられる。

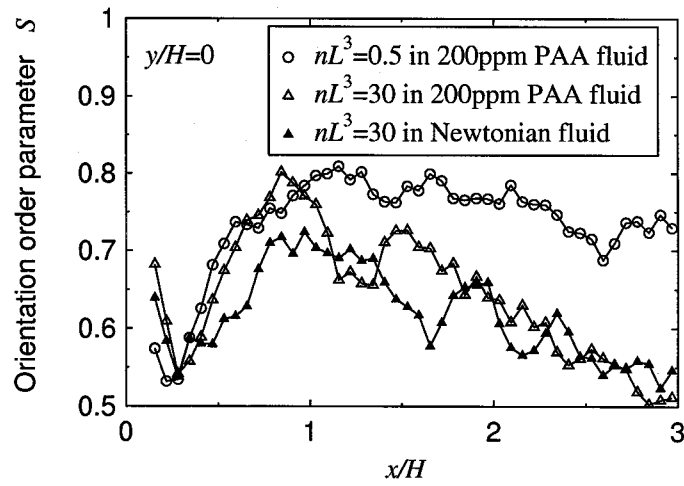


FIGURE 5.20: Distribution of orientation order parameters S in the x -direction at $nL^3 = 30$ in 200 p.p.m. PAA fluid and Newtonian fluid.

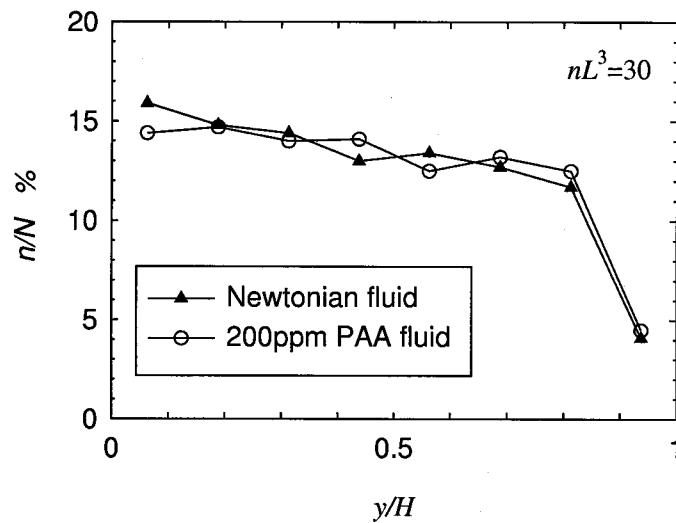


FIGURE 5.21: Fiber concentration distributions in the y -direction at $1.25 \leq x/H \leq 3$.

次に、高分子流体を分散媒とする希薄分散流体の場合に、高分子の濃度による配向状態と濃度分布の違いについて検討した。その結果、主配向角は、PAA 流体ではニュートン流体とは異なり、中心線付近で流れ方向に垂直となった。さらに PAA 濃度が大きい方がより大きな配向度を示した。この現象は、急拡大部において、流体の持つ伸長粘度特性の違いが現れたことによるものと考えられる。また配向度から、配向場の発達に高分子の濃度により差があることがわかった。繊維の濃度分布は、高分子濃度にかかわらず、ニュートン流体との違いはなかった。

最後に、繊維濃厚分散流体の場合に、繊維配向と繊維の濃度分布に対する高分子の影響を検討した。その結果、いずれに対しても、繊維配向・濃度分布ともに、高分子の影響はあまりなかったが、中心線上における下流域の主配向角の変化に対して高分子の影響が見られた。

金型内における繊維の配向状態を数値計算する場合、現在では多くの市販のソフトウェアがニュートン流体を分散媒とした希薄分散流体を対象にして高分子と繊維間干渉の影響を無視しているが、本研究で明らかになったように、これらの影響を考慮することが正確に繊維配向状態を計算するためには欠かせないと思われる。

第6章 障害物を有するスリット流路を流れる繊維分散流体中におけるウェルドライン上の繊維配向と濃度分布

6.1 緒言

プラスチック成形品は現在多方面で利用されているが、その成形にあたっては今なお多数の問題が残されている。そのひとつにウェルドラインの問題がある。ウェルドラインは、流路中にある邪魔ピンなどの障害物によって流体が分離され、障害物の下流域で再び合流するときに生じる。内部に障害物を有するこのような流路は、成形の金型中によく見られる。ウェルドラインを有する成形品では、その部分で製品の力学的強度が低下したり外観が損なわれたりする。この問題については射出成形や押出成形において従来から多くの研究が行われている [76-84]。

一方、繊維強化プラスチックでは、ウェルドラインの問題に加えて、ウェルドライン付近における繊維の配向状態や濃度分布が成形品の品質に大きく影響する。繊維強化プラスチックで発生するウェルドライン付近における繊維の配向状態を調べた研究はいくつかあるが [82,84]、そのほとんどは成形した製品を対象に、電子顕微鏡などを用いてウェルドライン領域における微小領域の繊維の配向状態を観察している。しかし定量的な配向の評価はされておらず、ウェルドラインを生成する流れ場で繊維の配向過程を詳細に調べることが重要である。

そこで本研究では、障害物を内部に有するスリット流路内の流れを対象に、ニュートン流体を分散媒とする繊維濃厚分散流体の流れ中における繊維の配向過程と濃度分布を明らかにすることを目的とする。

6.2 実験装置

実験装置は図 4.1 で示したものと同一のものを用いた。図 4.1(a) の test section 部に、障害物を有するストレート流路を設置した。図 6.1 に実験に用いた流路の形状と寸法を示す。本研究では、障害物として邪魔ピンを想定した円柱を用いた。流路は透明アクリル製スリット流路で、第 4 章で用いたストレート流路の中心線上に直径 8mm の真鍮製円柱を配置したものである。厚みは、薄肉成形品を想定して 2mm とした。また円柱に至るまでの助走区間の長さをその流路幅の 10 倍と十分に長くとした。したがって、円柱の直前では十分に発達した流れ場および繊維配向状態となっている。座標系は、図 6.1 に示すように、円柱の中心に原点を置き、流れ方向に x 軸、それと垂直方向に y 軸をとった。

図 4.1(a) のリザーバタンクから流路入口までは、第 4 章で詳しく述べたように、6mm の内径の管を用いて、円柱に至るまでのストレート流路内における繊維の濃度分布が流路の幅方向にわたってほぼ均一になるように考慮した。使用した繊維分散流体は、ニュートン流体を分散媒とする希薄分散流体 ($nL^3 = 0.2$) と濃厚分散流体 ($nL^3 = 35$) の 2 種類である。レイノルズ数は、平行平板間領域において分散媒の粘度を用いて定義し、0.4 とした。実験温度は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ である。

6.3 流れの可視化

円柱を通過する繊維分散流体の流れの様子を調べるために、流れの可視化実験を行った。可視化装置の概略および可視化の方法は第 5 章で述べたものと同じである。可視化結果を図 6.2 に示す。ここでは $-3 < x/H < 3$ の領域を示した。この図から、繊維分散流体は円柱で分離され、円柱を通過したあと合流していることがわかる。さらに流体は円柱のまわりを対称に流れていることが確認できる。また $x/H = -2$ ではまだ円柱の影響はほとんどなく一方向流れであり、 $x/H = 2$ ではすでに円柱の影響が消失してやはり一方向流れに戻っている。

6.4 繊維の配向と濃度分布に対する実験結果と考察

円柱を有する流路を用い、第 4 章のストレート流路の場合と同様にして、繊維の可視化実験を行った。その可視化写真の一例を図 6.3 に示す。ここで使用した流体は濃厚分散流体である。写真では $-2 < x/H < 2$ の領域だけを示した。

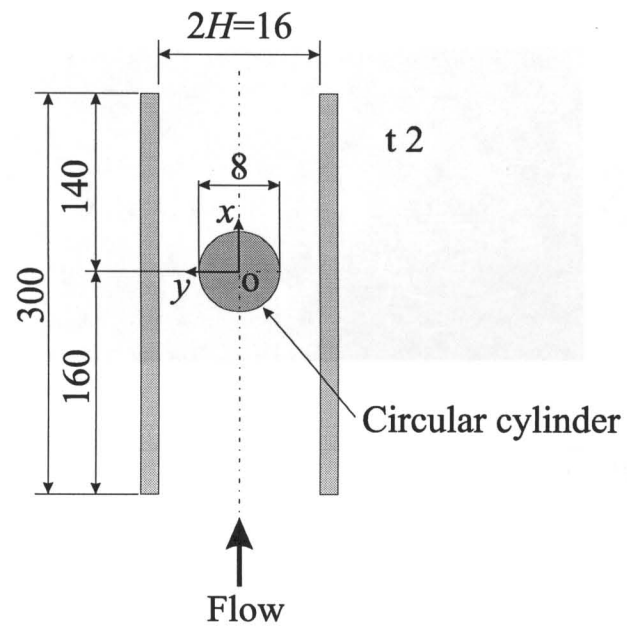


FIGURE 6.1: Illustrations of experimental apparatus and test channel.

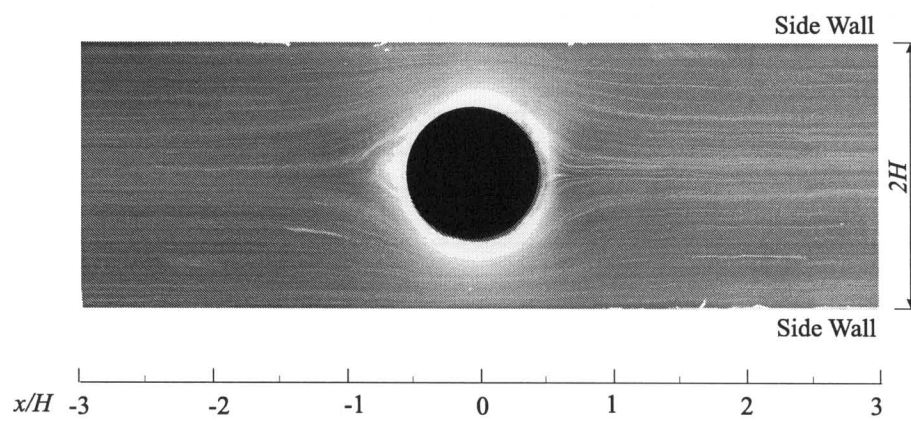


FIGURE 6.2: Streamlines in a concentrated suspension flow past a circular cylinder.

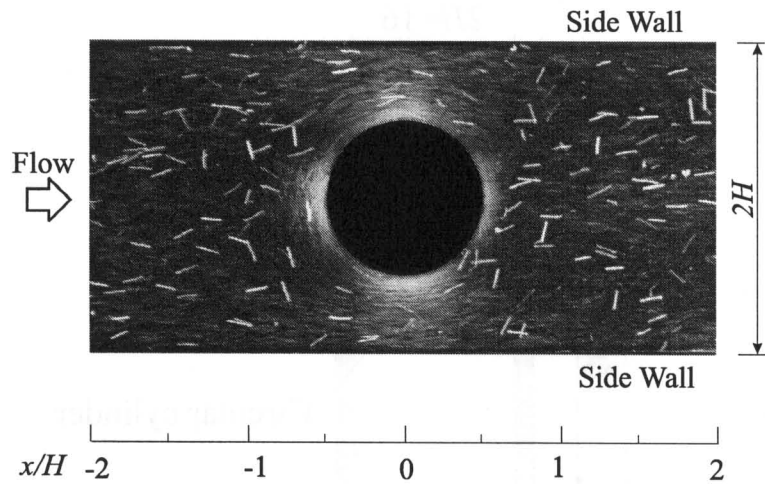


FIGURE 6.3: Visualized fibers in a concentrated suspension flow past a circular cylinder.

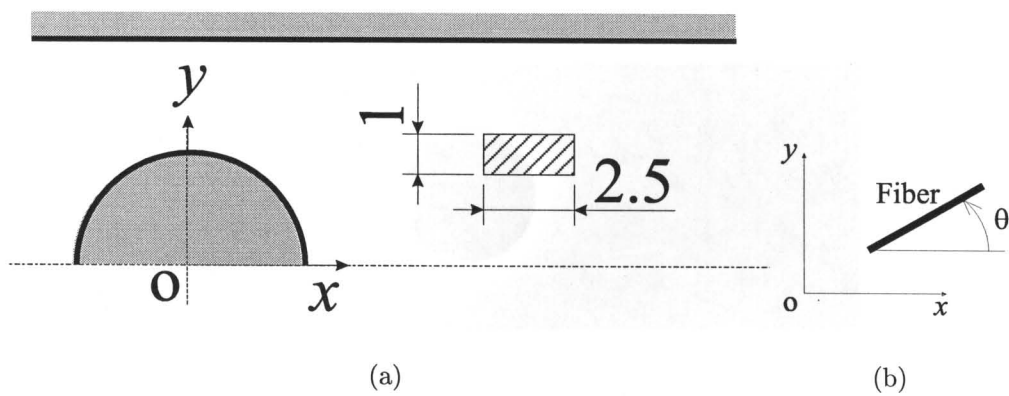


FIGURE 6.4: Division of the test region and the definition of coordinate system and fiber orientation angle.

各試料流体について同じ実験を行い、撮影した写真から一実験条件につき約 30000 本の繊維の配向角と重心位置を市販の粒子解析ソフトウェア（株式会社デジモ製 Image Hyper2）を用いて計測した。流路内における解析領域の分割は、第 5 章と同様に $1\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ とした（図 6.4 参照）。また観察対象とした領域は、前節の流れ模様の可視化結果を考慮して、流れが円柱の影響を受けない領域までを含んだ $-3 \leq x/H \leq 4$ とした。繊維の配向角は、図 6.4(b) に示すように、繊維軸と x 軸とのなす角と定義した。濃度分布は円柱から十分に離れた下流域 ($2 \leq x/H \leq 4$) にある繊維を対象に、第 4.4.2 項で述べた方法で解析した。この計測領域では、図 5.5 からわかるように、流れはほとんど一方向流れになっている。

6.4.1 繊維の配向角

図 6.5 に、円柱を通過する繊維分散流体の流れ中における繊維配向を配向楕円により示す。上流域の $-3 < x/H < -2$ における繊維の配向状態は、 $x/H = -2$ の配向状態とほとんど同じであることを確認しているため、この図では円柱の下流域を重点的に示した。

この図から、 nL^3 にかかわらず、円柱より上流部では繊維は流れ方向 ($\alpha = 0^\circ$) に強く配向していることがわかる。しかし中心線上 ($y/H = 0$) では、円柱の直前において流れが減速流れになるため、繊維は流れと直行する方向 ($\alpha = \pm 90^\circ$) に急激に配向する。一方、円柱と壁面による流路の縮小部では加速流れになるので、繊維は流れに沿ってさらに強く配向する。円柱まわりでは繊維は円柱の形状に沿って配向し、円柱を通過したあと、下流域である $x/H > 1.5$ において再び流れ方向に配向し、とくに中心線上では伸長流れ場のために、繊維は流れ方向に強く配向する。しかし、濃厚分散流体においては、円柱と壁面による流路の拡大部で、減速流れにより回転する繊維があるため、流れに沿って配向しない繊維が多数存在する。その結果、壁面付近や中心線付近と比較してこの領域では配向楕円が円に近い形状になっている。また、その配向状態が下流域までほぼ維持されていることがわかる。第 5 章において急拡大部を通過する濃厚分散流体の繊維配向について検討した。それによると、繊維は急拡大部通過後、中心線付近で流れと直交方向に強く配向することがわかっている。円柱を通過したあとの流れは急拡大部を通過する流れよりもゆるやかな拡大流れであるが、配向度は急拡大部の場合と同様の傾向を示していることがわかる。

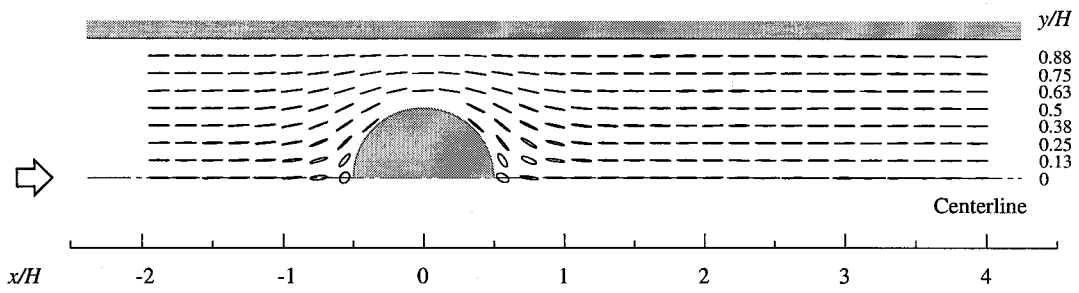
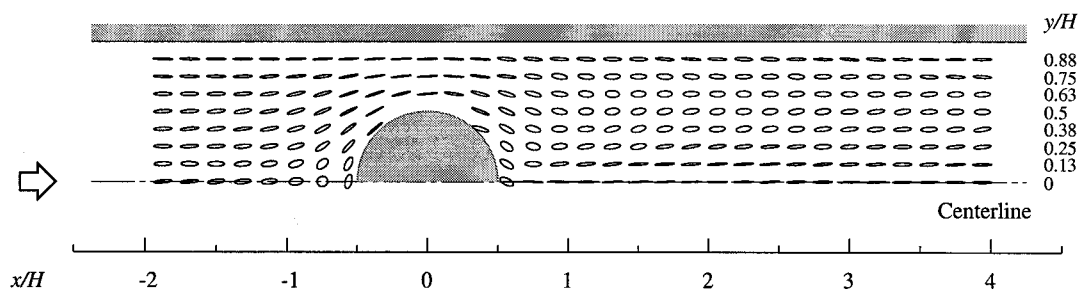
(a) Dilute fiber suspension at $nL^3 = 0.2$.(b) Concentrated fiber suspension at $nL^3 = 35$.

FIGURE 6.5: Distribution of orientation ellipses.

繊維の配向角をより詳細に検討するため、図 6.6 と図 6.7 に配向角の流れ方向変化を示した。図中の灰色部分は円柱の位置を示している。図 6.7 から濃厚分散流体では、円柱の下流域における配向角の揺れが目立っていることがわかる。

6.4.2 繊維の配向度

図 6.8 に配向度の流れ方向変化を示す。希薄分散流体の場合、中心線上では円柱の影響により、その直前で配向度が急激に小さくなることが図 6.8 からわかる。しかし円柱を通過した直後、配向度が逆に急激に大きくなり、 $x/H = 1$ 付近ではほぼ上流側の発達した流れの配向度に戻る。また中心線上以外の領域では、円柱を通過したあとの減速流れにより回転する繊維があるため配向度がやや小さくなるが、常に大きな配向度を保っている。つまり希薄分散流体では流れ中に円柱のような障害物があっても、それが大きく影響する範囲は障害物の直前と直後に限られることがわかる。

一方、濃厚分散流体では、円柱と壁面で挟まれた領域において流れは加速されるので、繊維は流れに沿って良好に配向し、 $x/H = 0$ 付近で最も大きな配向度を示す。しかし円柱を通過した後は逆に減速流れとなるために、中心線と壁面の中間あたり ($y/H = 0.5$) では流れに対して直交する繊維が生じ、配向度は急激に小さくなる。さらに、その影響は下流域まで続くが、配向度は徐々に上昇しながら、上流部の発達した配向度に近づくことがわかる。また中心線上 ($y/H = 0$) においては、希薄分散流体の場合と同じ理由により配向度が急激に小さくなり、円柱直前でほぼランダム配向となる。しかし円柱を通過した後は、伸長流れにより繊維が流れ方向に良好に配向するため、配向度は急激に大きくなる。その後、配向度は徐々に低下しながら上流部の発達した配向度に近づくことがわかる。

以上述べたように、希薄分散流体と濃厚分散流体とを比較した場合、濃厚分散流体では円柱の上流部と下流部とで配向度の分布が大きく異なることがわかった。これにより、障害物の前後において成形品の強度にむらが生じることが考えられる。また、円柱の下流部において、流路の幅方向にわたり、繊維の配向度に大きな分布のあることがわかった。円柱下流部の $y/H = 0.5$ 付近では配向度が小さいのに対し、とくに中心線上では配向度が大きく、壁面付近と同様の配向状態になっている。成形品の特定の部分でこのような配向状態が存在することは、成形品の力学的性質がその付近とそれ以外の部分とで大きく異なる可能性があることを示唆しており、そ

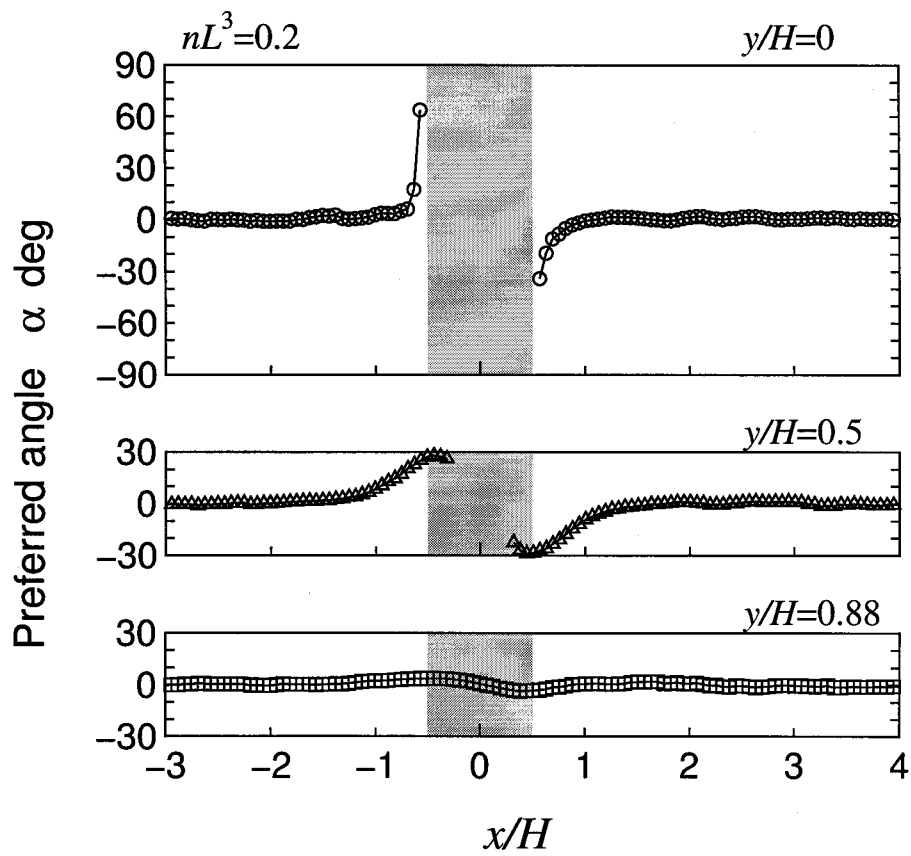


FIGURE 6.6: Change in preferred angles in the x -direction at various values of y/H in dilute fiber suspension at $nL^3 = 0.2$.

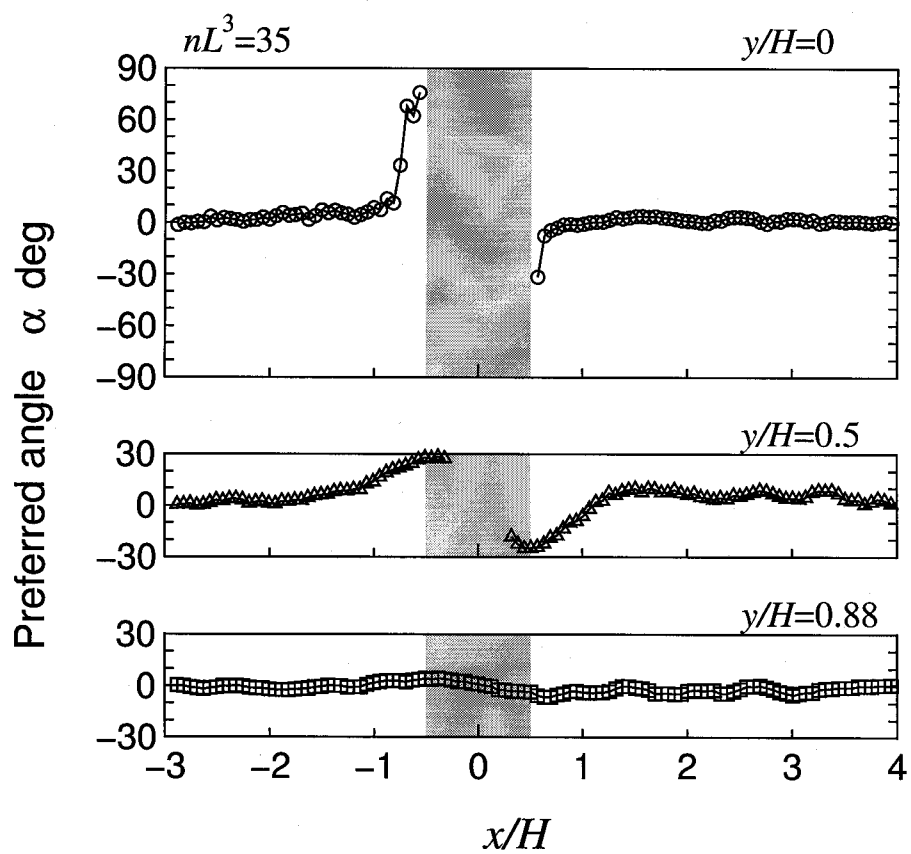


FIGURE 6.7: Change in preferred angles in the x -direction at various values of y/H in concentrated fiber suspension at $nL^3 = 35$.

の部分における幅方向の強度の低下が予想できる。

6.4.3 繊維の濃度分布

希薄分散流体と濃厚分散流体において繊維の濃度分布を調べた。その結果を図 6.9 に示す。この図から濃度分布は、図 4.16 で示したストレート流路を流れる繊維分散流体の発達した流れ中における繊維の濃度分布と同様であることがわかる。

6.4.4 ウェルドラインの可視化

ウェルドライン付近における繊維の分布状態を概観するために、白色光の透過光でウェルド部を可視化し、スチルカメラで撮影した。その結果を図 6.10 に示す。ここまでは繊維配向や濃度分布についてレイノルズ数が 0.4 の場合について述べた。ウェルドラインはレイノルズ数が 0.4 の場合にも現れるが不鮮明なため、より鮮明な 1.2 の場合について示す。図からわかるように、円柱の下流部の中心線上で、繊維が存在しないと考えられる部分があり、そのためにその部分が筋状の模様となって観察できる。このような筋が透過光で観察されることと、この領域では、前項で示したように、繊維が流れ方向に強く配向していることを考え合わせれば、この領域では繊維が存在せず、分散媒だけであることが推測される。しかし、この筋の幅は大変細く、今回の濃度分布の計測では繊維が存在しないことを示すデータは得られなかった。

6.5 結言

本研究では、希薄分散流体と濃厚分散流体に対して、スリット流路に置かれた円柱が繊維の配向と濃度分布に及ぼす影響について検討した。

希薄分散流体の場合、繊維は円柱直前の中心線上で流れと直交方向に配向し配向度は急激に小さくなったが、円柱通過後すぐに流れ方向に配向した。中心線上以外の領域では、繊維は流れに沿って配向し、円柱の前後での配向度の変化は小さく、大きな値を維持した。このことは、希薄分散流体においては、円柱による配向状態への大きな影響が円柱の直前と直後に限られることを示している。

一方、濃厚分散流体では、円柱の下流域で配向度が上流域と比べて小さくなり、その影響はかなり下流域にまで及んだ。濃厚分散流体では、円柱の上流部と下流部と

で繊維の配向状態が大きく異なり、さらには流路幅方向にも配向状態の大きな分布があることから、それらが成形品の力学的性質の不均一の原因となることが考えられる。

円柱を通過した後の流路幅方向の濃度分布は、円柱上流領域とほぼ同じであった。しかしウェルドライン上では繊維が存在しない可能性があることがわかった。

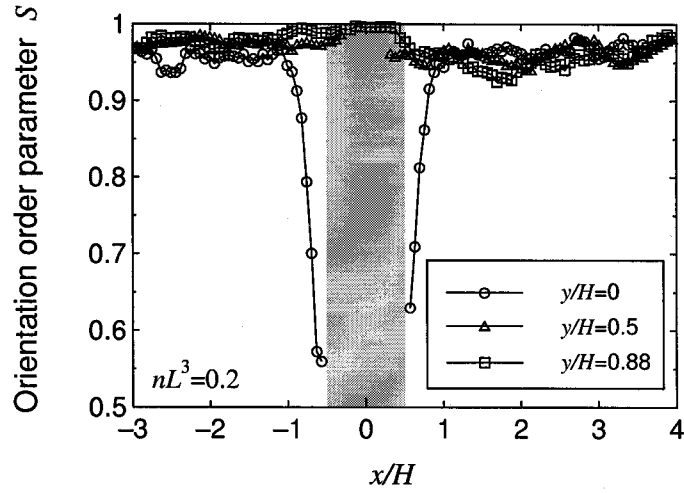
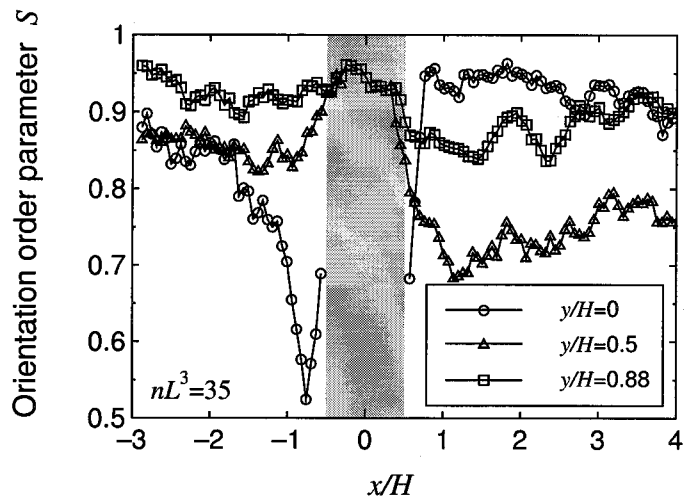
(a) Dilute fiber suspension at $nL^3 = 0.2$ (b) Concentrated fiber suspension at $nL^3 = 35$.

FIGURE 6.8: Change in orientation order parameters in the x -direction at various values of y/H in dilute fiber suspension at $nL^3 = 0.2$ and concentrated one at $nL^3 = 35$.

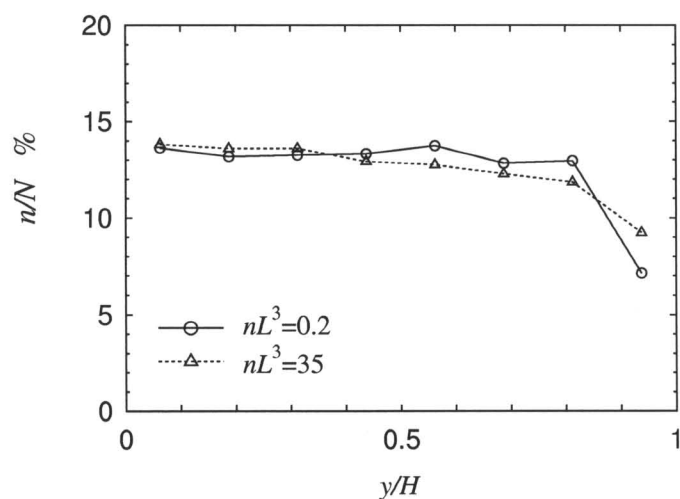


FIGURE 6.9: Fiber concentration distribution in the y -direction at $2 \leq x/H \leq 4$.

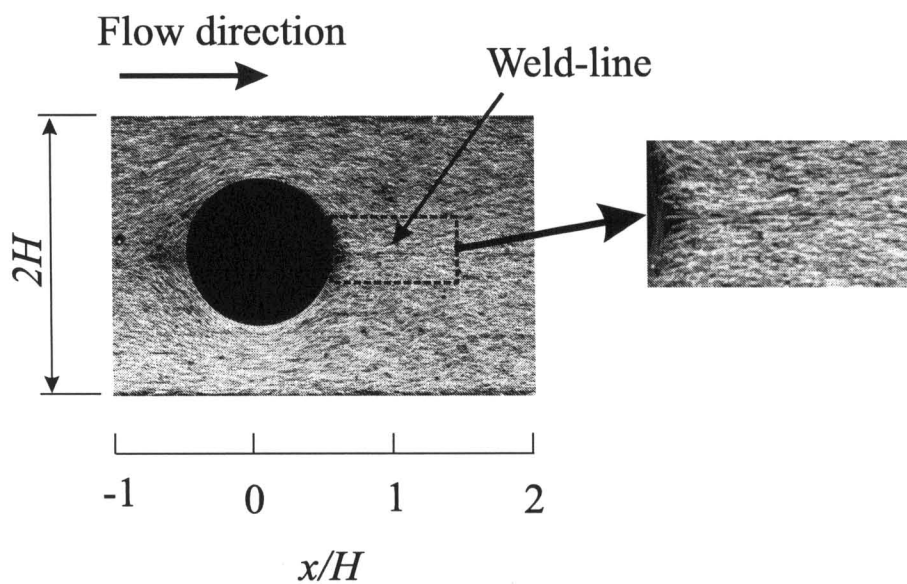


FIGURE 6.10: Visualization of weld-line downstream of the cylinder through a transmitted white light at $nL^3 = 35$.

第7章 結論

本研究は、繊維濃厚分散流体の流れ中における繊維の配向と濃度分布の解明を目的として行われたものである。濃厚分散流体は、希薄分散流体には存在しない繊維間干渉を有し、それが繊維の配向に影響を与える。しかし、繊維の体積分率が大きくなると流体中の繊維を観察することが困難になる。本論文では、濃厚分散流体中の繊維を観察するための可視化法を開発し、その方法を用いて繊維配向と濃度分布について測定を行った。特に、繊維配向の特徴が現れやすい減速流れが生じる急拡大部を有する流路や障害物を有する流路内における繊維配向と濃度分布について検討した。ここで、本研究で得られた結果についてまとめ、結論を述べる。

第1章において、繊維分散流体の研究とその応用である繊維強化複合材料の研究の動向および本研究の目的について述べた。

第2章では使用する繊維の作製法について述べたあと、その繊維を用いて作製した繊維分散流体および分散媒のレオロジー特性を調べた。その結果、ニュートン流体を分散媒とする繊維希薄分散流体は分散媒と同じ定常せん断粘度特性を有し、繊維の影響がないのに対し、繊維濃厚分散流体は、小さなせん断速度領域でshear-thinning性を有する流体であることがわかった。また、分散媒として用いた高分子流体は、高分子の濃度が希薄であるため、ニュートン流体と同じ定常せん断特性を示した。しかし定常伸長粘度は大きく異なり、高分子濃度が大きくなるにつれて伸長粘度が増大した。さらに、高分子流体ではわずかな第一法線応力差を有し、小さな弾性のある流体であることがわかった。この高分子流体を分散媒として作製した繊維濃厚分散流体では、ニュートン流体を分散媒とする濃厚分散流体とほぼ同じ定常せん断特性を示すことがわかった。

第3章では、流体中の繊維を可視化する従来の方法のひとつであるスリット光源を用いる方法について理論的・実験的に解析した。その結果、この方法は光軸と繊維軸とがほぼ直交する繊維しか可視化できないという欠点を有することを明らかにし、繊維の可視化に不適當であることを示した。その後、それにかわる方法として本研究で開発した繊維の可視化について述べた。この可視化法を用いることにより、

濃厚分散流体中の繊維を明瞭に可視化できることを示した。

第4章から第6章では、第3章で述べた繊維の可視化法を用いて、希薄分散流体と濃厚分散流体の流れ中における繊維の配向と濃度分布について検討した。繊維強化複合材料の成形過程のモデルとして、薄肉の流路内流れを対象とした。

第4章では、ストレート流路を流れる繊維分散流体を対象とした。希薄分散流体の場合、流体を保持しているリザーバタンクから観察流路とを接続する導管の径が繊維分散流体の繊維長と比較して小さいと、流路内で濃度分布に大きな影響を与えることがわかった。この結果に基づき、観察流路内における繊維の濃度分布がほぼ均一になるような導管の径を選定し、実験装置を構成した。次に流路内の繊維の配向状態を定量的に評価するための主配向角と配向度を定義し、繊維の配向状態を主配向角と配向度で評価する。ニュートン流体を分散媒とする繊維分散流体がストレート流路内を流れるときの発達した流れ中における繊維の配向状態を調べた。その結果、希薄分散流体では繊維は流れ方向に配向し、配向度は大きく、流れ方向に多くの繊維が配向していることがわかった。一方、濃厚分散流体ではやはり流れ方向に配向するが、繊維の主配向角は繊維間干渉のため、希薄分散流体と比較して主配向角の揺れが大きく、またその配向度は主配向角の希薄分散流体よりも小さかった。これは、フリップオーバーしようとする繊維が繊維間干渉のためになめらかな回転を阻止されることが原因であることが繊維の観察からも明らかになった。

第5章では、急拡大部を通過する繊維分散流体の流れ中における繊維の配向と濃度分布について検討した。まず分散媒がニュートン流体のとき、希薄分散流体と濃厚分散流体の場合について調べた。その結果、濃厚分散流体では希薄分散流体とは異なり、主配向角が中心線付近で流れ方向に垂直となった。また配向度の結果から、配向場の発達の速さに差があることがわかった。繊維の濃度は、希薄分散流体の場合には中心線から壁面に向けてゆるやかに上昇し、壁面付近で最大値をもった。一方、濃厚分散流体では中心部から壁面にかけて濃度が単調に減少した。次に、高分子流体を分散媒とする希薄分散流体の場合に、高分子の濃度による配向状態と濃度分布の違いについて調べた。その結果、主配向角は、PAA流体の場合にはニュートン流体とは異なり、中心線付近で流れ方向に垂直となった。さらにPAA濃度が大きい方がより大きな配向度を示した。また、高分子の濃度により配向場の発達の速さに違いがあることがわかった。繊維の濃度分布は、高分子濃度にかかわらず、ニュートン流体との違いはなかった。最後に、繊維濃厚分散流体の場合に、繊維配向と繊維の濃度分布に対する高分子の影響を検討した。その結果、繊維配向・濃度分布と

もに、高分子の影響はあまりなかったが、中心線上における下流域の主配向角の変化に対して高分子の影響が見られた。

第6章では、希薄分散流体と濃厚分散流体に対して、スリット流路に置かれた円柱が繊維の配向と濃度分布に及ぼす影響について検討した。希薄分散流体の場合、繊維は円柱直前の中心線上で流れと直交方向に配向し配向度は急激に小さくなったが、円柱通過後すぐに流れ方向に配向した。中心線上以外の領域では、繊維は流れに沿って配向し、円柱の前後での配向度の変化は小さく、大きな値を維持した。このことは、希薄分散流体においては、配向状態に対する円柱の影響が円柱の直前と直後に限られることを示している。一方、濃厚分散流体では、円柱の下流域で配向度が上流域と比べて小さくなり、その影響はかなり下流域にまで及んだ。濃厚分散流体では、円柱の上流部と下流部とで繊維の配向状態が大きく異なり、さらには流路幅方向にも配向状態の大きな分布があることから、それらが成形品の力学的性質の不均一の原因となることが考えられる。円柱を通過した後の流路幅方向の濃度分布は、円柱上流領域とほぼ同じであった。しかしウェルドライン上では繊維が存在しない可能性があることがわかった。

参考文献

- [1] Jeffery, G.B.; The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid; *Proc. Roy. Soc., Ser. A* **102** (1922), 161–179.
- [2] Einstein, A; Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen; *Ann. Physik.*, ser. 4, **19** (1906), 289–306.
- [3] Goldsmith, H.L. and Mason, S.G.; Particle motions in sheared suspensions XIII. The spin and rotation disks; *J. Fluid Mech.*, **12** (1962), 88–96.
- [4] Givler, R.C., Crochet, M.J. and Pipes, R.B.; Numerical prediction of fiber orientation in dilute suspensions; *J. Compos. Mater.*, **17** (1983), 330–343.
- [5] 千葉訓司・中村喜代次; 平行平板流路内の希薄繊維懸濁液の流れ中における繊維の挙動; 繊維機械学会誌, **45** (1992), T128–T134.
- [6] 千葉訓司・中村喜代次; 非等方性流体の流路内における流れの数値解析 (第1報) 平行平板流路内での十分に発達している流れの中および発達している流れの中における繊維の配向について; 繊維機械学会誌, **46** (1993), T197–T206.
- [7] 千葉訓司・中村喜代次; 非等方性流体の流路内における流れの数値解析 (第2報) 平行平板流路内での十分に発達している流れの中における繊維の配向について; 繊維機械学会誌, **47** (1994), T291–T299.
- [8] 千葉訓司・中村喜代次; 非等方性流体の流路内における流れの数値解析 (第3報) 2次の closure 近似の検討; 日本レオロジー学会誌, **23** (1995), 159–165.
- [9] Chiba, K. and Nakamura, K.; Numerical solution of fiber suspension flow through a complex channel; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **78** (1998), 167–185.
- [10] Takserman-Krozer, R. and Ziabicki, A.; Behavior of polymer solutions in a velocity field with parallel gradient: I. Orientation of rigid ellipsoids in a dilute solution; *J. Polym. Sci., Part A, General papers*, **1** (1963), 491–505.
- [11] 山本智・松岡孝明; 伸長流動場における繊維分散系の配向シミュレーション; 成形加工, **11** (1999), 510–516.

- [12] 小林正俊・滝本淳一・小山清人; 一軸伸長流動場におけるウイスキーの流動配向分布-Jeffery 理論との比較-; 成形加工, **7** (1995), 590-594.
- [13] Kobayashi, M., Takahashi, T., Takimoto, J. and Koyama, K.; Flow-induced whisker orientation and viscosity for molten composite systems in a uniaxial elongational flow field; *Polymer*, **36** (1995), 3927-3933.
- [14] Folgar, F. and Tucker III, C.L.; Orientation behavior of fibers in concentrated suspensions; *J. Reinf. Plast. Compos.*, **3** (1984), 98-119.
- [15] Jackson, W.C., Advani, S.G., and Tucker, C.L.; Predicting the orientation of short fibers in thin compression moldings; *J. Compos. Mater.*, **20** (1986), 539-557.
- [16] 梶原稔尚・田上秀一・桑野善文・船津和守; 繊維充てん高分子溶融体の繊維配向と分散の数値シミュレーション; 機械学会論文集 (B編), **57** (1991), 2740-2747.
- [17] Matsuoka, T., Takabatake, J., Koiwai, Y. and Takahashi, H.; Prediction of fiber orientation in injection molded parts of short-fiber-reinforced thermoplastics; *Polym. Eng. Sci.*, **30** (1990), 957-966.
- [18] Lipscomb II, G.G., Denn, M.M., Hur, D.U. and Boger, D.V.; The flow of fiber suspensions in complex geometries; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **26** (1988), 297-325.
- [19] 千葉訓司・中村喜代次・Boger, D.V.; 円管の急絞り内における希薄繊維懸濁液の流れの数値解析: 繊維機械学会誌, **43** (1990), T78-T85.
- [20] Dinh, S.M. and Armstrong, R.C.; A rheological equation of state for semiconcentrated fiber suspension; *J. Rheol.*, **28** (1984), 207-227.
- [21] 中村喜代次・千葉訓司・森教安・保田和則・高木秀一・西村太良; 繊維懸濁液の流れの数値解析 (第1報) 合流流れ; 繊維機械学会誌, **45** (1992), T147-T153.
- [22] 中村喜代次・千葉訓司・森教安・保田和則・高木秀一・西村太良; 繊維懸濁液の流れの数値解析 (第2報) 分岐流れ; 繊維機械学会誌, **45** (1992), T165-T171.

- [23] 保田和則・中村喜代次; 繊維懸濁液の二次元絞り・拡大流路内流れ; 繊維機械学会誌, **46** (1993), T131-T139.
- [24] 保田和則・中村喜代次・森教安; 急絞りおよび急拡大流路における繊維懸濁液の流れの数値解析; 日本レオロジー学会誌, **21** (1993), 103-109.
- [25] 保田和則・西村太良・中村喜代次; 繊維懸濁高分子流体の急絞り流れの数値解析; 繊維機械学会誌, **48** (1995), T1-T8.
- [26] 蝶野成臣・牧野幹弘; 繊維含有流体の平行平板間流れの数値シミュレーション; 機械学会論文集 (B編), **61** (1995), 3190-3196.
- [27] Chiba, K., Yasuda, K. and Nakamura, K.; Numerical solution of fiber suspension flow through a parallel plate channel by coupling flow field with fiber orientation distribution; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **99** (2001), 145-157.
- [28] Papanastasiou, T.C. and Alexandrou, A.N.; Isothermal extrusion of non-dilute fiber suspensions; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **25** (1987), 313-328.
- [29] Rosenberg, J., Denn M. and Keunings, R.; Simulation of non-recirculating flows of dilute fiber suspensions; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **37** (1990), 317-345.
- [30] Phan-Thien, N. and Graham, A.L.; The squeezing flow of a model suspension fluid; *Rheol Acta.*, **29** (1990), 433-441.
- [31] Phan-Thien, N. and Graham, A.L.; A new constitutive model for fibre suspensions: flow past a sphere; *Rheol. Acta*, **30** (1991), 44-57.
- [32] Ranganathan, S., and Advani, S.G.; A simultaneous solution for flow and fiber orientation in axisymmetric diverging radial flow; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **47** (1993), 107-136.
- [33] Ahmed, A. and Alexandrou, A.N.; Unsteady flow of semi-concentrated suspensions using finite deformation tensors; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **55** (1994), 115-136.

- [34] Altan, M.C. and Rao, B.N.; Closed-form solution for the orientation field in a center-gated disk; *J. Rheol.*, **39** (1995), 581–599.
- [35] Yamamoto, S. and Matsuoka, T.; A method for dynamic simulation of rigid and flexible fibers in a flow field; *J. Chem. Phys.*, **98**, (1993), 644–650.
- [36] Joung, C.G., Phan-Thien, N. and Fan, X.J.; Direct simulation of flexible fibers; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **99** (2001), 1–36.
- [37] 加藤和典・張佑新・大竹尚登; 短繊維を含む熔融樹脂のスリット状流路内の流れと繊維配向分布の解析; 機械学会論文集 (C編), **64** (1998), 4045–4051.
- [38] Kato, K., Zhang, Y. and Otake, N.; Numerical analysis of flow and fiber orientation in slit channel flow of short fiber-polymer melt mixture; *JSME Intern. J., Ser.C*, **42** (1999), 1061–1067.
- [39] 加藤和典・張佑新・大竹尚登; 高濃度短繊維含有樹脂のスリット状流路内の流れにおける繊維配向および速度・圧力分布の解析; 成形加工, **11** (1999), 847–855.
- [40] Stockie, J.M. and Sheldon, G.; Simulating the motion of flexible pulp fibers using the immersed boundary method; *J. Comput. Phys.*, **147** (1998), 147–165.
- [41] 竹村将志・千葉訓司・中村喜代次; ニュートン流体の流れ中におけるフレキシブル繊維の運動 (第1報) 基礎式の離散化と数値計算の手順および単純せん断流れ中における数値計算結果; 繊維機械学会誌, **54** (2001), T91–T102.
- [42] Bell, J.P.; Flow orientation of short fiber composites; *J. Compos. Mater.*, **3** (1969), 244–253.
- [43] Murty, K.N. and Modlen, G.F.; Experimental characterization of the alignment of short fibers during flow; *Polym. Eng. Sci.*, **17** (1977), 848–853.
- [44] 千葉訓司・林茂寿・小嶋邦夫・宋起元・中村喜代次・堀川明; 繊維分散高分子溶液の流れ中における繊維の配向; 繊維機械学会誌, **41** (1988), T19–T29.
- [45] Nishimura, T., Yasuda, K. and Nakamura, K.; Orientation behaviour of fibers in suspension flow through a branching channel; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **73** (1997) pp.279–288.

- [46] 保田和則・西村太良・中村喜代次; 放射状流れにおける短繊維分散流体中の繊維の配向状態の観察; 繊維機械学会誌, **50** (1997), T61-T67.
- [47] 保田和則・西村太良・中村喜代次; 急拡大部を通過する希薄高分子流体の流れ中における短繊維の配向と分布; 繊維機械学会誌, **50** (1997), T131-T138.
- [48] 蝶野成臣・田上秀一・家元良幸; 画像処理法による繊維含有流体の二次元流れにおける繊維配向の測定; 機械学会論文集 (B編) **64** (1998), 3213-3220.
- [49] Mikami, F., Chen, B. and Nishikawa, N.; Visualization of the flow features of natural convection in particle suspension; *Theoret. Appl. Mech.*, **46** (1997), 341-348.
- [50] Koh, C.J., Hookham, P. and Leal, L.G.; An experimental investigation of concentrated suspension flows in a rectangular channel; *J. Fluid Mech.*, **266** (1994), 1-32.
- [51] Lyon, M.K. and Leal, L.G.; An experimental study of the motion of concentrated suspensions in two-dimensional channel flow. Part 1. Monodisperse systems; *J. Fluid Mech.*, **363** (1998), 25-56.
- [52] Lyon, M.K. and Leal, L.G.; An experimental study of the motion of concentrated suspensions in two-dimensional channel flow. Part 2. Bidisperse systems; *J. Fluid Mech.*, **363** (1998), 57-77.
- [53] Stover, C.A., Koch, D.L. and Cohen, C.; Observations of fibre orientation in simple shear flow of semi-dilute suspensions; *J. Fluid Mech.*, **238** (1992), 277-296.
- [54] Iso, Y., Koch, D.L. and Cohen, C.; Orientation in simple shear flow of semi-dilute fiber suspensions 1. Weakly elastic fluids; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **62** (1996), 115-134.
- [55] Iso, Y., Cohen, C. and Koch, D.L.; Orientation in simple shear flow of semi-dilute fiber suspensions 2. Highly elastic fluids; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **62** (1996), 135-153.

- [56] Zirnask M.A., Hur, D.U. and Boger, D.V.; Normal stresses in fibre suspensions; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **54** (1994), 153–193.
- [57] Czarnecki, L. and White, J.L.; Shear flow properties, fiber damage, and mastication characteristics of aramide-, glass-, and cellulose-fiber reinforced polystyrene melts; *J. Appl. Polym. Sci.*, **25** (1980), 1917–1244.
- [58] Kitano, T., Kataoka, T. and Nishimura, T.; Relative viscosities of polymer melts filled with organic fillers; *Rheol. Acta*, **19** (1980), 764–769.
- [59] Kitano, T., Kataoka, T. and Nagatsuka, Y.; Shear flow rheological properties of vinyl on glass-fiber reinforced polyethylene melts; *Rheol. Acta*, **23** (1984), 20–30.
- [60] Laun, H.M.; Orientation effects and rheology of short glass fiber-reinforced thermoplastics; *Colloid Polym. Sci.*, **262** (1984), 257–269.
- [61] Kim, J.K. and Song, J.H.; Rheological properties and fiber orientation of short fiber-reinforced plastics; *J. Rheol.*, **41** (1997), 1061–1085.
- [62] Ramazani S.A., A., Ait-Kadi, A. and Grmela, M.; Rheology of fiber suspensions in viscoelastic media: Experiments and model predictions; *J. Rheol.*, **45** (2001), 945–962.
- [63] Kamal, M.R. and Mutel, A.T.; Rheological properties of suspensions in Newtonian and non-Newtonian fluids; *J. Polym. Eng.*, **5** (1985), 293–382.
- [64] Patanker, N.A. and Hu, H.H.; Rheology of a suspension of particles in viscoelastic fluids; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **96** (2001), 427–443.
- [65] 石橋壯一; 炭素繊維を用いた導電性射出成形品; 成形加工, **12** (2000), 242–245.
- [66] Stevens, E.S.; Green plastics: *An introduction to the new science of biodegradable plastics*; (2001), Princeton University Press.
- [67] Darlington, M.W. and McGinley, P.L.; Fibre orientation distribution in short fibre reinforced plastics; *J. Mater. Sci.*, **10** (1975), 906–910.

- [68] Vincent, M. and Aggasant, J.F.; Experimental study and calculations of short glass fiber orientation in a center gated molded disc; *Polym. Composites*, **7** (1986), 76–83.
- [69] Darlington, M.W. and Smith, A.C.; Some features of the injection molding of short fiber reinforced thermoplastics in center sprue-gated cavities; *Polym. Composites*, **8** (1987), 16–21.
- [70] Bay, R.S. and Tucker III, C.L.; Stereological measurement and error estimates for three-dimensional fiber orientation; *Polym. Eng. Sci.* **32** (1992), 240–253.
- [71] Bay, R.S. and Tucker III, C.L.; Fiber orientation in simple injection moldings. Part I: Theory and numerical methods; *Polym. Composite*, **13** (1992), 317–331.
- [72] Bay, R.S. and Tucker III, C.L.; Fiber orientation in simple injection moldings. Part II: Experimental results; *Polym. Composite*, **13** (1992), 332–341.
- [73] VerWeyst, B.E., Tucker III, C.L., Foss, P.H. and O’Gara, J.F.; Fiber orientation in 3-D injection molded features, prediction and experiment; *Intern. Polym. Processing*, **14** (1999), 409–420.
- [74] 横井秀俊・村田泰彦・西芳夫・関武邦; ガラスインサート金型による繊維配向過程の可視化解析 (第1報 バックライト金型方式による解析); *成形加工*, **7** (1995), 600–607.
- [75] 村田泰彦・横井秀俊・長谷元弘・原田浩次; ガラスインサート金型による繊維配向過程の可視化解析 (第2報 繊維追跡撮影装置による解析); *成形加工*, **7** (1995), 663–669.
- [76] Huang, Y. and Prentice, P.; Experimental study and computer simulation of the effect spider shape on the weld-lines in extruded plastic pipe; *Polym. Eng. Sci.*, **38** (1998), 1506–1522.
- [77] 斉藤卓志・佐藤勲・上杉憲治・半田浩一; 射出成形の邪魔ピンまわりに生じるウエルドの発現機構に関する研究—充填流動および温度分布の可視化—; *成形加工*, **12** (2000), 325–331.

- [78] Liu, S., Wu, J. and Chang, J.; An experimental matrix design to optimize the weldline strength in injection molded parts; *Polym. Eng. Sci.*, **40** (2000), 1256–1262.
- [79] 渡辺大祐・浜田泰以・泊清隆; サンドイッチ成形品のウエルドラインに関する研究—コア材の流動性がウエルドラインの形状に及ぼす影響—; 成形加工, **13** (2001), 133–137.
- [80] Mitsuhashi, M., Nishimura, K., Nomura, K., Yamamoto, T., Mori, N. and Nakamura, K.; Numerical analysis of viscoelastic welding flow Part 1: Flow behavior in weld-line region; *J. Text. Eng.*, **47**, (2001), 1–8.
- [81] 荒木克彦・北野武・前川善一郎; 繊維充填液晶ポリマー成形品の繊維配向性とその機械的性質; 成形加工, **13** (2001), 374–383.
- [82] Nadkarni, V.M. and Ayodhya, S.R.; The influence of knit-lines on the tensile properties of fiberglass reinforced thermoplastics; *Polym. Eng. Sci.*, **33** (1993), 358–367.
- [83] Meddad, A. and Fisa, B.; Weldline strength in glass fiber reinforced polyamide 66; *Polym. Eng. Sci.*, **35** (1995), 893–901.
- [84] Kim, J.K, Song, J.H., Chung, S.T. and Kwon, T.H.; Morphology and mechanical properties of injection molded articles with weld-line; *Polym. Eng. Sci.*, **37** (1997), 228–241.
- [85] Barnes, H.A., Hutton, J.F. and Walters, K.; *An Introduction to Rheology*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands (1989).
- [86] Debbaut, B. and Crochet, M.J.; Extensional effects in complex flows; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **30** (1988), 169–184.
- [87] Hudson, N.E., Ferguson, J. and Mackie, P.; The measurement of the elongational viscosity of polymer solutions using a viscometer of novel design; *Trans. Soc. Rheol.*, **18** (1974), 541–561.
- [88] Ferguson, J. and Hudson, N.E.; A new viscometer for the measurement of apparent elongational viscosity; *J. Phys*, **8** (1975), 526–530.

- [89] Khagran, M. and Gupta, R.K.; Extensional flow of Xanthan Gum solutions; *Trans. Soc. Rheol.*, **29** (1985), 191–207.
- [90] Williams, P.R. and Williams, R.W.; On the planar extensional viscosity of mobile liquids; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **19** (1985), 53–80.
- [91] Jones, D.M. and Walters, K.; On the extensional viscosity of mobile polymer solutions; *Rheol. Acta*, **26** (1987), 20–30.
- [92] Moan, M. and Macueur, A.; Transient extensional viscosity of dilute flexible polymer solutions; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **30** (1988), 343–354.
- [93] Chan, R.C., Gupta, R.K. and Sridhar, T.; Fiber spinning of very dilute solutions of polyacrylamide in water; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **30** (1988), 267–283.
- [94] 森教安・西村太良・中村喜代次; 高分子溶液および微粒子含有高分子溶液の伸長粘度の測定; 繊維機械学会誌, **43** (1990), T62–T67.
- [95] Hasegawa, T. and Nakamura, H.; Experimental study of the elongational stress of dilute polymer solutions in orifice flows; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **38** (1991), 159–181.
- [96] 森教安・小柴孝・中村喜代次; スピンラインレオメータにより測定される希薄高分子溶液の見かけの伸長粘度の評価; 繊維機械学会誌, **46** (1993), T27–T34.
- [97] 小柴孝・森教安・中村喜代次; スピンラインレオメータによる高分子溶液の伸長粘度測定と流れの数値解析; 日本機械学会論文集 (B編), **62** (1996), 3890–3898.
- [98] Doi, M. and Edwards, S.F., *The Theory of Polymer Dynamics*, Oxford University Press, New York, U.S.A. (1986).
- [99] Meissner, J.; Development of a universal extensional rheometer for the uniaxial extension of polymer melts; *Trans. Soc. Rheol.*, **16** (1972), 405–420.
- [100] Legat, V. and Sizaire, R.; Finite element simulation of a filament stretching extensional rheometer; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **71** (1997), 89–107.

- [101] Schweizer, T.; The uniaxial elongational rheometer RME – six years of experience; *Rheol. Acta*, **39** (2000), 428–443.
- [102] Bird, B.B., Armstrong, R.C. and Hassager, O.; *Dynamics of Polymer Liquids, Volume 1, Fluid Mechanics, Second Edition*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A. (1987).
- [103] 菊池時雄・長谷川隆・渡部修; 紫外線劣化法による成形品全体の繊維配向観察; 成形加工, **7** (1995), 595–599.
- [104] Fuller, G.G.; *Optical Rheometry of Complex Fluids*, Oxford University Press, Inc., New York, U.S.A. (1995).
- [105] Advani, S.G. and Tucker III, C.L.; The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites; *J. Rheol.*, **31** (1987), 751–784.
- [106] 流れの可視化学会; 新版 流れの可視化ハンドブック; 朝倉書店, (1986).

関連発表論文

- [1] A new visualization technique for short fibers in a slit flow of fiber suspensions
Kazunori YASUDA, Noriyasu MORI and Kiyoji NAKAMURA, *International Journal of Engineering Science* (掲載予定) .
- [2] 円柱障害物を有するスリット流路内の流れ中における繊維濃厚分散流体の繊維配向と濃度分布
保田 和則, 中村 喜代次, 森 教安 : 繊維機械学会誌 (掲載予定) .
- [3] 急拡大部を有するスリット流路を流れる繊維濃厚分散流体中における短繊維の配向と濃度分布 : 繊維間干渉と高分子の影響
保田 和則, 中村 喜代次, 森 教安 : 日本機械学会論文集 (C編) , 67(2001), No.662, pp.3363-3369.
- [4] 急拡大部を有するスリット流路を通過する繊維分散流体の流れ中における短繊維の配向と濃度分布
保田 和則, 中村 喜代次, 森 教安 : 日本機械学会論文集 (C編) , 67(2001), No.657, pp.1689-1695.
- [5] Numerical solution of fiber suspension flow through a parallel plate channel by coupling flow field with fiber orientation distribution
Kunji CHIBA, Kazunori YASUDA and Kiyoji NAKAMURA: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 99(2/3) 2001 pp.145-157.
- [6] 急拡大部を有するスリット流路を通過する短繊維濃厚系分散流体中における短繊維の配向と濃度分布
保田 和則, 中村 喜代次, 森 教安 : 日本機械学会論文集 (C編) , 66(2000), No.648, pp.2891-2896.
- [7] 急拡大部を通過する希薄高分子流体の流れ中における短繊維の配向と分布
保田 和則, 中村 喜代次, 西村 太良 : 繊維機械学会誌, 50(1997), pp.T131-T138.
- [8] 放射状流れにおける短繊維分散流体中の繊維の配向状態の観察
保田 和則, 中村 喜代次, 西村 太良 : 繊維機械学会誌, 50(1997), pp.T61-T67.

- [9] Orientation behavior of fibers in suspension flow through a branching channel
Taro NISHIMURA, Kazunori YASUDA and Kiyoji NAKAMURA, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **73**(1997), pp.279–288.
- [10] 繊維懸濁高分子流体の急絞り流れの数値解析
保田 和則, 西村 太良, 中村 喜代次 : 繊維機械学会誌, **48**(1995), pp.T1–T8.
Flow simulation of fiber suspensions in polymeric fluid through abrupt contraction
Kazunori YASUDA, Taro NISHIMURA and Kiyoji NAKAMURA, *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, **43**(1997), pp.90–96.
- [11] 繊維懸濁液の分岐流れ中における繊維の配向挙動
西村 太良, 保田 和則, 中村 喜代次 : 繊維機械学会誌, **48**(1995), pp.T121–T127.
- [12] 繊維懸濁液の二次元絞り・拡大流路内流れ
保田 和則, 中村 喜代次 : 繊維機械学会誌, **46**(1993), pp.T131–T139.
Two-dimensional flow of fiber suspensions through a contraction or an expansion
Kazunori YASUDA, Kiyoji NAKAMURA, *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, **40**(1994), pp.112–119.
- [13] 急絞りおよび急拡大流路における繊維懸濁液の流れの数値解析
保田 和則, 中村 喜代次, 森 教安 : 日本レオロジー学会誌, **21**(1993), pp.103–109.
- [14] 繊維懸濁液の流れの数値解析 (第1報) 合流流れ
中村 喜代次, 千葉 訓司, 森 教安, 保田 和則, 高木 秀一, 西村太良 : 繊維機械学会誌, **45**(1992), pp.T147–T153.
Numerical simulation of fiber suspension flow. Part 1. Merging flow
Kiyoji NAKAMURA, Kunji CHIBA, Noriyasu MORI, Kazunori YASUDA, Hidekazu TAKAGI, Taro NISHIMURA, *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, **39**(1993), pp.1–6.
- [15] 繊維懸濁液の流れの数値解析 (第2報) 分岐流れ
中村 喜代次, 千葉 訓司, 森 教安, 保田 和則, 高木 秀一, 西村太良 : 繊維機械学会誌, **45**(1992), pp.T165–T171.

Numerical simulation of fiber suspension flow. Part 2. Branching flow
Kiyoji NAKAMURA, Kunji CHIBA, Noriyasu MORI, Kazunori YASUDA,
Hidekazu TAKAGI, Taro NISHIMURA, *Journal of the Textile Machinery So-
ciety of Japan*, **39**(1993), pp.51-56.

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成にあたり，懇切な御指導とご鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科 中村 喜代次 教授に感謝いたします。また本論文の作成にあたり，綿密な御校閲と貴重な御教示とを戴きました大阪大学大学院工学研究科 辻 裕 教授ならびに稲葉 武彦 教授に感謝いたします。

本研究の遂行にあたり，数々の御助言と御協力を戴きました大阪大学大学院工学研究科 森 教安 助教授ならびに山本 剛宏 助手に感謝いたします。また，滋賀大学 千葉 訓司 教授・京都工芸繊維大学 西村 太良 助教授・奈良工業高等専門学校 小柴 孝 助教授には，研究上のさまざまな相談にのって戴きました。さらに，大阪府立産業技術総合研究所 吉川 忠作 研究員には本研究で用いた試料の作製にご協力いただきました。ここに感謝いたします。

最後に，本研究を行うに際し，快適な研究環境を提供してくださいました大阪大学大学院工学研究科 機械物理工学専攻 複雑流体力学講座 複雑流体工学領域の諸氏に感謝いたします。

2001年11月

保田和則