Flow-induced Orientation and Concentration Distribution of Fibers in a Concentrated Suspension Flow

YASUDA Kazunori

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan*

Received 6 February 2007; accepted for publication 17 April 2007

Abstract

Orientation and concentration distribution of fibers in a slit channel flow were experimentally studied for both dilute and concentrated fiber suspensions. First, the inner diameter of the conduit tube connected to the test channel was determined, because the concentration distribution of fibers in the conduit tube directly affects that in the test channel. As a result, the conduit tube having an inner diameter of 6 mm was selected for fiber of 1 mm long to prevent non-homogeneous concentration distribution in the test channel. Second, the fiber orientation in the test channel was examined. Almost all fibers aligned in the flow direction for the dilute suspension. On the other hand, the preferred direction of large number of fibers also aligned in the flow direction for the concentrated suspension, but the degree of alignment became worse than that for the dilute one. This is because the fibers cannot rotate freely owing to fiber-fiber interaction. However, a large velocity gradient improved the degree of alignment near the channel wall even for the concentrated suspension. Furthermore, it was confirmed that the concentration distribution is nearly uniform in the test channel when the conduit tube larger than 6 mm in inner diameter is used for fiber 1 mm long. From the detailed measurements, however, a local maximum of the concentration appeared beside the channel wall for the dilute suspension because the fiber-wall interaction occurred, while the concentration of fibers gradually and monotonously decreased as one approaches the channel wall for the concentrated suspension.

Key Words: Fiber suspension, Concentrated suspension, Fiber orientation, Concentration distribution, Orientation ellipse

濃厚分散流体の流れ中における繊維の流動誘起配向と濃度分布

保田和則

大阪大学大学院工学研究科

1. はじめに

熱可塑性プラスチックは、力学特性の向上や寸法安定性の確保などを目的として繊維状粒子や板状粒子で強化されることがある。このとき、強化複合材料の特性に粒子の配向状態が大きく影響する。また、粒子の分布ムラの影響も大きい。したがって、強化複合材料中におけるこれらの粒子の配向と濃度分布を制御し、目的の力学的性質と品質を得ることがこの分野の研究の大きな工業的目標のひとつとなる。製品中における配向と濃度分布は、成形加工中の流動によって決定される。そのため、成形にあたっては、流動に起因する繊維状

粒子や板状粒子の配向や濃度分布に関するさまざまな知見が求められ、従来から多くの研究が行われてきた[1, 2]。昨今ではカーボンナノチューブを強化材として使用する複合材料の研究も多数なされているが[3]、長さが1 mm程度のガラス繊維に代表される短繊維は現在でも最もよく用いられている強化材である。

流体中での繊維の運動は流体力学的にも興味ある問題であり、古くから研究されてきた。まず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Jeffery[4]が理論的に解析し、この結果の妥当性がのちに実験的にも確かめられた[5]。それ以降Jefferyの式を用いて、複雑な流れ中にお

ける繊維の配向の計算が多く行われている[6–9].

一方、実験的研究には、繊維分散流体の流れ中における繊維の挙動を単純せん断流れ場[10–13]で調べた研究や、急縮小部[14]や急拡大部[1, 15]、障害物[16, 17]を有する複雑な流れ場で調べた研究がある。また、ガラスインサート金型による繊維の可視化のように実際の成形時の繊維配向を調べた研究[18]や、数値計算結果の検証を目的に成形品中の繊維配向を測定した研究[19]など、実際の工程上での研究も多い。しかし、繊維強化複合材料の成形の観点からは、単繊維の挙動を追跡するだけではなく、流路内のある領域における繊維の平均的配向状態や配向分布、また繊維濃度の流路内分布がむしろ重要である。なぜなら、これらが材料の強度分布と直接結びつくからである。しかし繊維の体積分率が大きな系でこのような量を流動中の繊維に対して評価した研究は少ない。

さらに、このような実験的研究は、繊維分散流体の数値解析のベンチマークとしても重要である。金型を設計するにあたって、計算機によって金型内における繊維分散流体の流動計算を行い、金型内に流入するゲート位置などを決定する計算機援用設計 (CAD, Computer-aided Design) が近年盛んに行われている。数値解析で用いられる繊維分散流体に対する連続体モデルは繊維の体積分率が比較的小さく、したがって繊維間の力学的干渉が少ない系を対象としているものが多く[20, 21]、また繊維間干渉を考慮した繊維配向モデル[10]は実験係数を含んでいる。そこでこれらのモデルの検証のためにも、繊維間の力学的干渉の有無と繊維の配向状態や濃度分布との関係を実験により調べることは必要である。

一般に成形現場で用いられる市販のソフトウェアでは、金型内における単繊維の配向の計算は可能であるが、繊維の濃度分布を計算することはできず、繊維は流体中に均一に分布するものと仮定している。しかし実際にはこの仮定は成り立たない。最近になって、希薄分散流体の実験から得られた繊維の濃度分布を与えて流れ場と配向場を計算した報告[22]もあるが、繊維の濃度分布は今のところ実験で測定するしかない。

そこで本研究では、成形金型内を流れる濃厚分散流体の流動中の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。そのために、繊維強化複合材料の成形材料のモデル流体として体積分率が高く、繊維間干渉の大きな繊維分散流体を用いた。また、金型内流路を模擬した流路として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用い、ランナーを模擬した導管をそれに接続した。この流路系において、まず、ストレート流路内における繊維の濃度分布に及ぼす導管の内径の影響を明らかにすることで最適な内径の導管を選定し、そのうえで、ストレート流路内を流動中の繊維の配向状態と濃度分布を測定した。なお、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。

繊維分散流体では、繊維の体積分率が高いと繊維間の力学的干渉が生じる。この繊維間干渉の頻度は繊維の体積分率が増加するとともに大きくなり、それが繊維の配向状態と濃度分布にも影響を与えと考えられる。そこで本研究では、そ

の第一段階として、繊維間干渉の有無が繊維の配向状態と濃度分布に与える影響を検討した。

2. 試料流体および実験方法

2.1 試料流体

繊維分散流体では、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。これらの三つの状態をそれぞれ希薄・準濃厚・濃厚と称し、パラメーター nL^3 の値によって区別する[23].

$$\begin{cases} nL^3 < 1 & : \text{希薄領域} \\ 1 < nL^3 < \frac{L}{D} & : \text{準濃厚領域} \\ \frac{L}{D} < nL^3 & : \text{濃厚領域} \end{cases} \quad (1)$$

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。

本研究で用いた繊維は、市販のビニロン繊維 (vinylon, クラレ社製, VF1203-2, 比重1.26, 屈折率1.53) と本研究のために紡糸したセルロースアセテートプロピオネート繊維

Fig. 1 Distributions of fiber length: (a) vinylon fibers and (b) CAP fibers.

(cellulose acetate propionate, イーストマンケミカルジャパン社製, 比重1.21, 屈折率1.47, 以後CAP繊維と呼ぶ)である[11-13]. いずれの繊維も透明である. それぞれの繊維の長さと直径を測定したところ, ビニロン繊維は長さ1.0 mm (標準偏差0.14 mm), $L/D = 35$ であり, CAP 繊維は0.98 mm (標準偏差0.11 mm), $L/D = 22$ であった. Fig. 1にそれぞれの繊維の長さ分布を示す.

繊維の分散媒には, グリセリンとポリエチレングリコール400の混合液 (それぞれ65 wt%と35 wt%, 比重1.21, 屈折率1.47) を用いた. この流体はニュートン粘性を示し, せん断粘度は約0.25 Pa.s (27℃) であった. この分散媒に $nL^3 = 0.2$ または $nL^3 = 0.5$ でビニロン繊維を分散させた流体を希薄分散流体として, また $nL^3 = 35$ でCAP繊維を分散させた流体を濃厚分散流体として用いた. また, 繊維の可視化のために濃厚分散流体にはビニロン繊維を $nL^3 = 0.2$ だけさらに加えた. 用いたCAP繊維は複屈折を有さず, トレーサーとしてのビニロン繊維が強い複屈折を示すことを利用した可視化法で流動中のビニロン繊維を可視化した[24].

2.2 実験装置および方法

Fig. 2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Fig. 2(a)のストレート流路に供給される.

Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup.

Fig. 3 Connection tube between the reservoir and the slit channel. Diameters of Tube A, Tube B and Tube C are 4 mm, 6 mm and 26 mm, respectively.

本研究では, 観察流路として, Fig. 3で示される幅16 mm (= $2H$), 厚さ2 mm, 長さ220 mmの透明アクリル製流路を設置した. ストレート流路内における座標は, Fig. 3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 軸, 幅方向を y 軸とした.

ストレート流路と導管との間には, Fig. 3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寸にできる限り依存しないようにするためのものである. そのため緩衝部は長さを70 mmと十分長くとり, 内径をストレート流路の幅の16 mmよりも大きい20 mmとした. ストレート流路の幅と厚さがいずれも20 mm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[14], 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, 導管の内径の選定については次の2.3節で述べる.

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することで流量を計測した. このとき可視化された繊維をスチルカメラで撮影した. 透過光で観察しているので, 流路厚み方向にわたってすべてのトレーサー繊維が見える. シャッターを切る時間間隔は十分な長さを取り, 同一繊維が二枚の連続した写真に写らないように配慮した. このとき撮影された写真の一例をFig. 4に示す (ただし $12 \leq x/H \leq 15$ のみ). この図から, 繊維が明瞭に可視化されていることがわかる.

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, 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.

Fig. 4 Visualized fibers for the dilute suspension with $nL^3 = 0.5$.

2.3 導管の選定

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、使用する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。そこで本研究では、まずリザーバ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（ランナー）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あらかじめ最適な内径の導管を選定した。そのために内径の異なる三種類の管を導管として用意し、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 Fig. 3 に示す。導管Aには内径4 mmの管を、導管Bには内径6 mmの管を、導管Cには観察流路の幅よりも大きな内径26 mmの管をそれぞれ用いた。

導管の選定にあたり、 $nL^3 = 0.5$ の希薄分散流体を用いて実験を行った。繊維の観察領域はストレート流路の入口部 ($x/H = 0$) から十分下流域である $12 \leq x/H \leq 17$ である。得られた写真から、観察領域にある約14000本の繊維の重心位置を読み取り、このデータをもとに、流路の幅方向（y軸方向）の濃度分布を調べた。その結果を Fig. 5 に示す。これは、観察領域内にある繊維（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、繊維の濃度分布の流れ方向（x軸方向）依存性は考慮しなかった。

Fig. 5 から、導管Aの場合とそれ以外の場合とで、繊維の分布に大きな違いがあることがわかる。導管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、 $y/H = 0.7$ 付近で最大値をとったあと、壁面付近で急激に減少する。導管Aと比べると、導管Bと導管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あり、壁面付近でのみ減少する。

Fig. 5 Fiber concentration distributions in $12 \leq x/H \leq 17$ for the connection tubes A, B and C.

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、壁面付近において繊維が少ない原因として繊維のフリップオーバー現象がある[17]。ここでフリップオーバーとは、繊維の急激な回転運動をいう。繊維を回転楕円体とみなしたとき、この回転の周期 T は希薄な系では次式で表される[4]。

$$T = \frac{2\pi}{\dot{\gamma}} \left(r_a + \frac{1}{r_a} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度、 r_a は繊維のアスペクト比である。つまり、壁面近傍のせん断速度の大きな領域では T が小さくなるので、繊維は短い周期でフリップオーバーする。壁面のごく近傍で長さ L の繊維が回転運動すると、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る。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してその地点における繊維の濃度が上昇し、繊維が存在しない層（繊維希薄層と呼ぶことにする）が壁面近傍に形成されるものと考えられる。

導管Aの場合、導管の半径 R が2 mm、繊維長 L の半部分が0.5 mmである。このとき、導管内における繊維の濃度分布は $y/R = 0.75$ で最大部を持ち、それより壁面側 ($y/R > 0.75$) で繊維希薄層が形成されることが考えられる。導管内における濃度分布がストレート流路内における濃度分布にそのまま反映されると仮定すると、ストレート流路内においても導管内と同じく繊維分布は $y/H = 0.75$ 付近で最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。ただ、 $y/H > 0.75$ においても割合は小さいながら繊維は存在している。

この領域に繊維が存在するのは、先の仮定が厳密には成り立たないことが原因のひとつである。先にも述べたように、他の繊維や壁面との干渉がなければ一般に繊維の重心はほぼ流線上を移動すると考えられる。希薄分散流体の場合、導管内ではせん断速度の大きな壁面近傍で繊維のフリップオーバーがほぼ確実に生じていると考えられるので、導管内の

$y/R > 0.75$ では繊維はほとんど存在しない。したがって、先の仮定を厳密に適用すれば、ストレート流路内の $y/H > 0.75$ においても繊維は存在しないことになる。一方、導管と緩衝部の断面はいずれも円形であるため、発達した流れではたとえば上流部の導管内の $y/R = 0.75$ の流線はそのまま下流部の緩衝部内の $y/H = 0.75$ の流線となる。ところが、ストレート流路の断面は矩形であるため、緩衝部内の $y/R = 0.75$ の流線がそのままストレート流路内の $y/H = 0.75$ の流線となると考えることはできない。よって導管内で生じた濃度分布形状がそのままストレート流路内にまで及ぶと考えるのは難しい。ストレート流路内の $y/H > 0.75$ においても繊維が存在することは、上で述べた点や、さらに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だりしていることが原因であると考えられる。

一方、導管Bの場合、導管の半径 R が3 mm、繊維長 L の半分が0.5 mmであるので、導管内における繊維分布は $y/R = 0.83$ 付近で最大部を持ち、それより壁面側で繊維希薄層が形成されることが考えられる。しかし、Fig. 5からは、導管Aでみられたような明確な最大値を持っていないことがわかる。これは、導管Aの場合と比較して、管半径に対する繊維希薄層の厚みの割合が小さく、したがって管内の繊維の全本数に対して、壁面と干渉を起こす層内に位置していた繊維の本数の割合が小さいことが原因であると考えられる。

以上のことから、とくに導管Aのように繊維長に対して導管の内径が比較的小さい場合、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少なからず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6 mm以上の導管を使用することで、ストレート流路における濃度分布に対する影響を極めて小さくできることがわかった。したがって、今後の実験では、ストレート流路内においてほぼ均一の濃度分布となる内径が6 mmの導管を用いることにする。ストレート流路内における希薄分散流体中の繊維の濃度分布については、濃厚分散流体の場合と併せて3.2節でさらに詳細に検討する。

2.4 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、Fig. 6に示すような流路内の任意の小領域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。

Fig. 6に示すように、繊維の配向角 θ 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[25]。

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n, \quad a_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \quad (3)$$

Fig. 6 Fibers in a small region in the flow channel and definition of fiber orientation angle.

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。

$$\tan 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}} \quad (4)$$

この配向テンソルの固有値を長軸・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 α 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。

3. 実験結果と考察

本章では、前章で選定した内径が6 mm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、希薄分散流体 ($nL^3 = 0.2$) と濃厚分散流体 ($nL^3 = 35$) を用いた。一般に繊維は流路内で三次元配向をする。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。

3.1 繊維の配向角と配向度

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Fig. 7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 $12 \leq x/H \leq 17$ であるが、Fig. 7には、その一部である $12 \leq x/H \leq 15$ の領域だけを示した。

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測定した。このデータをもとに、流路内での配向角と位置の分布を詳細に調べるために、流路内部を2 mm × 4 mm

Fig. 7 Visualized fibers for the concentrated suspension with $nL^3 = 35$.

Fig. 8 Fiber orientation ellipses at fiber concentrations of (a) $nL^3 = 0.2$ and (b) $nL^3 = 35$.

の小領域に分割した。それぞれの小領域は、 x 軸方向、 y 軸方向ともに0.5 mm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、2.4節で述べた方法に基づき、各小領域内において、(3)式および(4)式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。Fig. 8にストレート流路を流れる希薄分散流体と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。流れ方向（ x 軸方向）およびそれに垂直方向（ y 軸方向）の距離は流路幅の半分の長さ H で無次元化してある。

この図から、 nL^3 の値にかかわらず、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、しかも長軸と短軸の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、配向楕円が

Fig. 9 Distributions of fiber orientation order parameters in the direction of channel width. The broken curve shows a Newtonian velocity profile in the central plane in the depth direction.

直線に近いことから、配向度は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。

Fig. 9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。また、図中の破線は、流路の厚み方向の中央断面における流体の速度分布であり、平均流速 U で無次元化した値を示す。ストレート流路のような比較的単純な流れ場では、繊維分散流体の速度場はニュートン流体のそれと大きく変わらないと考えられるので、ニュートン流体の速度分布を示した。この図から、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、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、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。希薄分散流体ではもともと配向度が大きいため、速度勾配の大きな壁面付近においても配向度に対する速度勾配の影響はほとんどない。しかし、濃厚分散流体では速度勾配が大きくなるにつれて配向度も上昇し、壁面に最も近い点で配向度が最大値をとっていることがわかる。

希薄分散流体と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詳細に検討するために示した図がFigs. 10～13である。まず配向角について述べる。Fig. 10から、希薄分散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、濃厚分散流体では、Fig. 12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 において配向角の変動が目立っている。

次に、配向度について述べる。Fig. 11からわかるように、希薄分散流体における配向度は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。中心線上（ $y/H = 0$ ）では他の領域と比較して配向度の流れ方向変化がやや大きいものの、いずれの領域においても大きな差はない。それに対して、濃厚分散流体では、Fig. 13からわか

Fig. 10 Preferred angles for the dilute fiber suspension with $nL^3 = 0.2$ at various y/H .

Fig. 12 Preferred angles for the concentrated fiber suspension with $nL^3 = 35$ at various y/H .

Fig. 11 Orientation order parameters for the dilute fiber suspension with $nL^3 = 0.2$ at various y/H .

Fig. 13 Orientation order parameters for the concentrated fiber suspension with $nL^3 = 35$ at various y/H .

るように、配向度は0.75から0.95付近にかけて幅広く分布し、かつその流れ方向変化も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は大きくなり、流れ方向変化は小さくなっている。(y/H = 0.88 参照)

先に2.3節で述べたように、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、繊維間干渉がない場合、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で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、繊維間干渉がある場合、繊維がフリップオーバーを生じようとする、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、希薄分散流体と比較して配向角にばらつきが生じ、配向度が小さくな

るものと考えられる。しかし、平均的には流れ方向に配向している。濃厚分散流体の可視化実験において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、流れ方向に沿ったこのような配向角の変化が理解できる。

3.2 繊維の濃度分布

本節では、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 (y 軸方向) の繊維の濃度分布を詳しく検討する。濃度分布は、2.3節で述べた方法に基づいて計算した。その結果を Fig. 14 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、希薄分散流体では繊維濃度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のがわかる。本実験では内径が 6 mm の導管を用いたが、導管の内径の影響はほとんど現れないことを 2.3 節においてすでに確認した。しかし、内径の大小にかかわらず繊維がフリップオーバーを起こすために、必ず壁面近傍に繊維希薄層が生じるので、導管の影響を完全に消し去ることはできないことも述べた。Fig. 14 からわかるように、 $y/H < 0.83$ では繊維濃度はほぼ均一であるのに対し、 $y/H > 0.83$ でも多数の繊維が存在している。これは、Fig. 5 の導管 B の場合でみた結果と同様であり、原因も 2.3 節で詳細に述べたものと同じであると考えられる。

さらに、 $y/H > 0.83$ における繊維の存在はビニロン繊維の繊維長分布にも原因があると考えられる。Fig. 1 で示したように、ビニロン繊維の長さ分布は単分散ではなく、1 mm よりも短い繊維も含まれている。これらの繊維が導管内の壁面近傍でフリップオーバーを起こしたとき、繊維長が短いにより壁面に近い位置に移動することになる。このことも $y/H > 0.83$ において繊維が存在する原因であると考えられる。

壁面付近の繊維の濃度分布を詳細に検討するため、壁面近傍の領域をさらに細かい領域に分割して濃度分布を調べた結果を Fig. 14 中の小さな図に示す。希薄分散流体の場合、濃度分布の最大部が $y/H = 0.9$ 付近で現れていることがわかる。ストレート流路内での繊維のフリップオーバーを考えると、流

Fig. 14 Fiber concentration distributions in the direction of channel width for the dilute fiber suspension with $nL^3 = 0.2$ and the concentrated one with $nL^3 = 35$.

路幅 $2H$ の半分が 8 mm、繊維長 L の半分が 0.5 mm であるので、繊維希薄層は $y/H > 0.94$ で形成され则认为られる。実験から得られた濃度分布の最大部の位置はこの位置とほぼ一致していることから、この最大部は、緩衝部からストレート流路の壁面近傍に流れ込んだ繊維が流路の壁面と干渉して生じた結果であると考えられる。

また、濃厚分散流体の場合も希薄分散流体の場合とほぼ同様な濃度分布となったが、詳細に観察すると、濃度は中心線付近から壁面にかけてゆっくりではあるが単調に減少していることがわかる。また、希薄分散流体の時のように壁面付近で顕著な最大部が現れず、さらに、壁面近傍 ($y/H = 0.97$) では、繊維の濃度が希薄分散流体よりも大きくなる。これは、繊維間干渉によって壁面近傍の繊維のフリップオーバーが妨げられ、壁面と干渉して中心軸方向へ移動する繊維が少ない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、濃厚分散流体では配向角や配向度の流れ方向変化が希薄分散流体の場合と比較して大きい原因が、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一致する。

4. 結 言

本研究の結論を以下にまとめる。

- (1) 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、導管の内径が小さい場合、観察流路であるストレート流路内の繊維の濃度分布に、壁面付近で大きな最大部が生じることがわかった。
- (2) 1 mm の繊維の長さに対して内径が 6 mm 以上の導管を選定すればストレート流路内の濃度分布にはほとんど影響がないことが明らかとなった。
- (3) 内径が 6 mm 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、希薄分散流体と濃厚分散流体とで、主配向角・配向度・濃度分布に明らかな差が見いだされた。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変動も小さい。一方、濃厚分散流体では、主配向角は流れ方向に向くものの、配向度は希薄分散流体に比べて小さく、また主配向角の変動も大きい。これらの原因として、濃厚分散流体では、繊維がフリップオーバーするとき、繊維間干渉によって繊維が滑らかに回転できないためと考えられる。
- (4) 流路幅方向の濃度分布は、希薄分散流体では流路の中心線付近から壁面付近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が最大となった。これはストレート流路内の壁面近傍での繊維のフリップオーバーが原因と考えられる。
- (5) 濃厚分散流体では、濃度は中心線付近から壁面にかけてゆっくりではあるが単調に減少した。また、壁面付近では希薄分散流体の場合ほど顕著な最大値が現れず、壁面に近づく

と希薄分散流体よりも高い濃度となった。これは、繊維間干渉のため、壁面近傍で繊維のフリップオーバーが妨げられていることが原因と考えられる。

References

- [1] Yasuda K, Henmi S, Mori N (2005) Polym Compos, **26**, 660–670
- [2] Yasuda K, Nishimura M, Chiba K (2006) J Text Eng, **52**, 165–169
- [3] Ohtake N, Enomoto K, Yasuhara T (2002) Nippon Fukugo Zairyo Gakkaishi, **28**, 220–227
- [4] Jeffery GB (1922) Proc Roy Soc London Ser A, **102**, 161–179
- [5] Goldsmith HL, Mason SG (1962) J Fluid Mech, **12**, 88–96
- [6] Givler RC, Crochet MJ, Pipes RB (1983) J Compos Mater, **17**, 330–343
- [7] Nakamura K, Chiba K, Mori N, Yasuda K, Takagi H, Nishimura T (1992) J Text Mach Soc Japan, **45**, T147–T153
- [8] Ranganathan S, Advani SG (1993) J Non-Newtonian Fluid Mech, **47**, 107–136
- [9] Chono N, Makino M (1995) Trans Japan Soc Mech Eng Ser B, **61**, 3190–3196
- [10] Folgar F, Tucker III CL (1984) J Reinf Plast Compos, **3**, 98–119
- [11] Stover CA, Koch DL, Cohen C (1992) J Fluid Mech, **238**, 277–296
- [12] Iso Y, Koch DL, Cohen C (1996) J Non-Newtonian Fluid Mech, **62**, 115–134
- [13] Iso Y, Cohen C, Koch DL (1996) J Non-Newtonian Fluid Mech, **62**, 135–153
- [14] Chiba K, Nakamura K (1998) J Non-Newtonian Fluid Mech, **78**, 167–185
- [15] Yasuda K, Nakamura K, Mori N (2001) Trans Japan Soc Mech Eng Ser C, **67**, 3363–3369
- [16] Chono N, Tanoue S, Iemoto Y (1998) Trans Japan Soc Mech Eng Ser B, **64**, 3213–3220
- [17] Yasuda K, Kyuto T, Mori N (2004) Rheol Acta, **43**, 137–145
- [18] Yokoi H, Murata Y, Nishi Y, Seki T (1995) Seikei Kakou, **7**, 600–607
- [19] Jackson WC, Advani SG, Tucker CL (1986) J Compos Mater, **20**, 539–557
- [20] Lipscomb II GG, Denn MM, Hur DU, Boger DV (1988) J Non-Newtonian Fluid Mech, **26**, 297–325
- [21] Dinh SM, Armstrong RC (1984) J Rheol, **28**, 207–227
- [22] Chiba K, Yasuda K, Nakamura K (2001) J Non-Newtonian Fluid Mech, **99**, 145–157
- [23] Doi M, Edwards SF (1988) “The Theory of Polymer Dynamics”, Chap 9, Oxford Univ Press, New York
- [24] Yasuda K, Mori N, Nakamura K (2002) Int J Eng Sci, **40**, 1037–1052
- [25] Altan MC, Advani SG, Güçeri SI, Pipes RB (1989) J Rheol, **33**, 1129–1155