短繊維の高粘性流動液中での配向に関する研究*

美 馬 源次郎** 中 村 克 孝**

Genjirō Mima and Katsutaka Nakamura : Study on the Discontinuous Fiber Orientation in High Viscous Liquid Flow. The degree of reduction in whisker length and whisker-surface damage is higher in metallic materials than in plastic materials. Then the special methods have been devised for making whisker reinforced metallic composite materials. Among those methods, there is the fluid mechanical alignment of whiskers developed by Calow and Wakelin.

The purpose of our work is to resolve the problems of Calow and Wakelin's method and then to obtain the optimum processing condition. This report presents the experimental results on the effects of aspect ratio of the rectangular duct cross-section on the discontinuous fiber orientation in high viscous liquid flow when the ratio of the discontinuous fiber length to the duct depth (the minor width) was comparatively large. Here the aspect ratio of the duct cross-section is defined as the width to depth ratio.

As a result, it can be said that the discontinuous fibers in the duct become disarranged in the flow direction with increasing aspect ratio of the duct cross-section.

(Received June 20, 1977)

I. 緒 言

ウィスカー強化金属系複合材料の作製の際に、押出しあるいはプレス過程で、ウィスカーの破損、ウィスカー表面の損傷などが生じる。これら複合材料の強度の劣化を招くウィスカーの破損、ウィスカー表面の損傷の程度は、母材がプラスチックである場合に比し、母材が金属である場合が著しく、ウィスカー強化金属系複合材料の作製にあたっては特別な注意が払われている。なかでもウィスカーを破損させないで、かつ金属の母材中に一方方向にウィスカーを配向させるために、ウィスカーと母材となる粉末金属をアルギン酸中に浸し、ゾル状からテープを作り、第二段階でテープを圧縮して高強度のウィスカー強化金属系複合材料を得るという Calow と Wakelin⁽¹⁾ の巧妙な方法が注目されている。

ところが、先駆的な彼らの研究のなかで、理論解析に不十分な点がいくつか見られること、得られた複合材料中のウィスカーの配向に関する定量的な測定が行なわれていないこと、ならびにウィスカーの配向におよぼすダクト断面の形状の影響に関する考察が十分にはなされていないことなどの不備が見受けられる。そこで著者らは、Calow と Wakelin のウィスカー強化金属系複合材料作製法⁽¹⁾に関する上述の問題点を解明し、最適な操作条件を求めることを目的として研究を進めている。

高強度のウィスカー強化金属系複合材料の作製にあたっては、まずからみあったままのウィスカーを分散させること、つぎに分散されたウィスカーを一定長さごとに選別するという前処理が必要である。ウィスカーの分散について

は、ミキサーを用いる Parratt の方法⁽²⁾、Mehan の空気洗浄法⁽³⁾、Artech Corp. が開発したカンフン押し法⁽⁴⁾、超音波を利用した方法⁽⁵⁾などが見受けられるが、この分散方法のみを取り上げてみても、技術的に困難な点が少なくない。

そこで著者らは、ウィスカーの流体工学的配向に関する基礎研究においては、分散され選別されたウィスカーを用いることなしに手軽に得られる短繊維(切断されたナイロン糸)を用いて基本的現象の把握を試みた。著者らが用いた短繊維はウィスカーに比して直径などの諸寸法は相当大きなものになっているが、ウィスカーの場合にも適用できるよう相似則を満足させるため、短繊維のアスペクト比、短繊維の長さ対ダクト厚さの比などの無次元数を用いて実験結果を整理した。

Calow と Wakelin⁽¹⁾ は、母材となる粉末金属とウィスカーを用いて複合材料を得ているが、基本的事実を詳細に検討していくためには、できるだけ基礎的な問題から取り上げていくべきであると考え、短繊維のみを配して、短繊維と粉末金属との干渉のない場合について基礎研究を行っている。

著者らはさきに、流動している液体中の短繊維の運動におよぼす作動液の粘度の影響を考慮した運動方程式を導き、短繊維の配向時間におよぼす液体の速度こう配、密度と粘度、ならびに短繊維の長さと直径、密度の影響を定量的に見いだすとともに、短繊維の配向におよぼすこれらの諸因子ならびに液流速の影響を、タンクとダクトとからなる装置を用いて実験的に調べた結果を報告した⁽⁶⁾。その中

** 阿南工業高等専門学校(Anan Technical College, Anan)

* 1976 年 7 月日本金属学会中国四国支部第 19 回講演大会に発表

で、短繊維の長さ $2l$ 対ダクトの厚さ D の比 $2l/D$ が比較的大きい場合は、短繊維とダクト壁との接触により配向が乱れることが推論された。この乱れに関係すると思われる矩形ダクト断面の縦横比 W/D (W :ダクトの幅)の影響に関しては塩崎⁽⁷⁾、Darlington と McGinley⁽⁸⁾ は厚物になると中央部で短繊維の配向が悪化すると述べており、寺山らは試料の幅の増大につれ表面中央部で配向が悪化することを報告しており⁽⁹⁾、いずれもダクト内での速度こう配の相違に起因すると結論づけている。

ところが $2l/D$ が比較的大きい場合について著者らが行った実験によると、ダクト横断面の厚さの減少につれダクト内での短繊維の配向が悪化するという結果が得られた。本論文は、液流速ならびにダクト断面の縦横比が、タンク内のフローパターン、管まじり係数ならびに短繊維の配向におよぼす影響を実験的に調べた結果について述べたものである。

II. 実験装置および実験方法

ダクト出口で良好な配向を得るには、配向状態を悪化させるダクトは短いほど良いことが分かっているので、前回⁽⁶⁾よりもダクト長さを短くして $L=65\text{ mm}$ の一定とし、短繊維の配向におよぼすダクト厚さの影響を見出すため、 $D=2, 5, 10\text{ mm}$ である3種類のダクトを用いた。タンクの断面は幅 $B=50\text{ mm}$ の正方形であり、不規則な方向に置かれた短繊維をダクト入口で配向を完了させるため、タンクの高さは Fig.1 に示すように 200 mm となっている。Fig.1 にはダクト内の位置を示す直交軸系 (x, y, z) が描かれている。タンクは透明塩化ビニール、ダクトの上下面は透明な磨きガラス、 $D=10\text{ mm}$ のダクトは、側面 (xy 面)

Fig.1 Experimental apparatus.

からの鮮明な観察を可能にするため側壁も磨きガラスが用いられている。

作動液として動粘性係数 ν を任意に選ぶことができるように、水道水ならびに各種濃度のグリセリン水溶液が用いられた。タンク内の気泡が描く流跡線⁽¹⁰⁾の観察ならびに管まじり係数の測定方法は前回と同様である。

短繊維として Fig.2 に示す寸法を有する切断された釣糸用ナイロン糸 (比重 ≈ 1) が用いられた。Fig.2 中の縦軸は任意の $d/\bar{d}$, $A.R./\bar{A.R.}$ である短繊維が全短繊維数に占める割合を示す。ここで $A.R.$ は短繊維のアスペクト比 (短繊維の長さ $2l$ 対短繊維の直径 d の比)、 $\bar{d}$, $\bar{A.R.}$ はそれぞれ d , $A.R.$ の平均値である。短繊維の混入率 C は $0.1\text{ wt}\%$ である。

Fig.2 Dimensions of specimens.

ダクト内での短繊維の配向評価は、 xz 面ならびに xy 面からの写真撮影により、流れの方向と短繊維の長軸とのなす偏角 θ を、正負を考えないで 10° 刻みに読み取って得られる角度分布ならびに標準偏差 σ で表現される。

III. 実験結果

1. タンク内の流跡線と短繊維の配向

Photo.1 にタンク内の流跡線の代表例が示されている。これらの写真よりタンク底部に流れのよんだ死水域が見られるが、タンク内の液位 H 、ならびにダクト厚さによって流跡線はほとんど影響されないことが分かった。

前回の実験⁽⁶⁾と同様、タンク内の短繊維は、速度こう配の影響により短時間で流跡線に沿うことが写真撮影による結果から確認された。

2. ダクト内の流れ

矩形ダクト内の層流の理論速度分布と管まじり係数は、Boussinesq の式で与えられる⁽¹¹⁾。 $W/D=15$, $L/W=5$ のときはダクトが十分長いので、ダクトの管まじり損失に比してタンク内の管まじり損失、ダクトの入口損失ならびに出口損失を無視することができたが⁽⁶⁾、 $W/D=3, 6, 15$, $L/W=2.17$ のときはダクトの出口損失を無視することができない。すなわち圧力損失水頭 H (タンク内の液位に等

Photo.1 Flow in the tank at $W/D=3$, $\nu=1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $H=80 \text{ mm}$, $v_s=74.1 \text{ mm/s}$, light frequency $=30 \text{ Hz}$ and exposure $=0.5 \text{ s}$.

しい)は、ダルシー・ワイスバッハの式で与えられるタンクならびにダクトの管まざつ損失水頭と、ダクトの入口および出口損失水頭の総和⁽¹²⁾

$$H = \lambda_t \frac{H}{B} \cdot \frac{v_t^2}{2g} + (\xi + \lambda) \frac{L}{2DW/(D+W)} + 1 \frac{v_s^2}{2g} \quad (1)$$

で表わされる。ここでタンクならびにダクト断面の形が円形以外の場合であるから、相当直径として水力平均深さ r_h (断面積と断面の周りの長さの比) の 4 倍を用いた⁽¹³⁾。タンクの r_h は $B/4$ 、ダクトの r_h は $DW/2(D+W)$ となる。右辺第 1 項のタンク内の管まざつ損失、第 2 項のダクトの入口損失を、第 3 項のダクトの管まざつ損失、第 4 項のダクトの出口損失に比して無視すれば、

$$\lambda = \left(\frac{2gH}{v_s^2} - 1 \right) \frac{2DW/(D+W)}{L} \quad (2)$$

Fig.3 Coefficient of pipe friction of the rectangular duct.

が得られる。ここで λ_t, λ はそれぞれタンクおよびダクトの管まざつ係数、 v_t, v_s はそれぞれタンクおよびダクト内の平均流速、 g は重力加速度、 ξ はダクトの入口損失係数である。式(2)を用いて実験値を整理したところ、Fig.3に示す結果が得られた。図にはそれぞれの W/D に関する Boussinesq の理論⁽¹¹⁾ と円管内の乱流に関する Blasius の式⁽¹³⁾ が比較のために記されている。これらの結果より、近似式(2)がそれぞれの W/D に対して妥当であり、とくに $W/D=15$ のときは、 v_s ならびに相当直径 $4r_h$ を用いたレイノルズ数 Re が 0.001 という小さな値についても妥当であることが分かる。なお Fig.3 の縦軸は W/D ごとに座標移動して描かれている。

3. ダクト内での短繊維の配向におよぼすダクト厚さの影響

ダクト内の短繊維の配向状態を xz 面から撮影した代表例を Photo.2 に示す。これらの写真より配向角度を 10 度刻みに読み取って得られた短繊維の角度分布の代表例を Fig.4 に示す。図の縦軸の $\%/10^\circ$ は 10 度刻みに θ を読み取ったことを示している。図より W/D の減少につれ短繊維は流れ方向によく配向することが分かり、 $\theta < \pm 10$ 度にある短繊維数が全短繊維数の 85~94% に達する。これ

Photo.2 Discontinuous fiber orientation on the xz plane in the duct at $W/D=6$, $\nu=1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $H=70 \text{ mm}$, $v_s=11.9 \text{ mm/s}$, $\overline{A.R.}=45.6$ and $C=0.1 \text{ wt}\%$.

Fig.4 Discontinuous fiber orientation.

らの値は前回の結果⁽⁶⁾を上回り, Bagg らの結果⁽¹⁴⁾に匹敵する。

これまで短繊維の配向評価は, Fig.4に示したように角度の分布で表現していたが, 配向角度分布の標準偏差を用いても評価できる。すなわち Fig.4に示した角度分布を $H=130\sim 30$ mm の場合についても描き, それらの分布より $\theta < \pm 10^\circ$ の短繊維のパーセントを求めて縦軸に, 平均値を零度とみなした標準偏差 σ を横軸に選んで実験値を整理すると Fig.5に示す結果が得られた。実験値は正規分布から計算される値とは一致しない。両者の相違の主たる理由は角度分布が正規分布と幾分異なることである。第2の付随的な理由は, 角度分布のデータを図示する際に10度刻みに近似された表現を用いたことが考えられる。Fig.4に示した例では, $W/D=3, 6, 15$ のとき $\sigma=7.85, 12.5, 19.8$ が得られているが, 上記第2の理由に基づく誤差により σ をそれぞれ7, 4, 1%程度大きく見積っている。角度読み取りの刻みを半分の5度にすれば, $\sigma=7.85$ の場合でも誤差は1%程度に軽減できる。いずれにせよ Fig.5の縦軸と横軸には負の相関関係が存在し, σ を用いて短繊維の配向評価が可能であることを示している。なお後述する xy 面での配向も同様な相関が認められた。

σ を用いて短繊維の配向におよぼす W/D ならびに H の影響を図示したのが Fig.6である。図より W/D の増大につれ σ は増大し配向は悪化することが分かるが, H の影響は明確に見出すことはできない。

Fig.5 The correlation between standard deviation and the discontinuous fiber orientation.

Fig.6 Effects of the tank head and the duct depth on the discontinuous fiber orientation on the xz plane.

4. xz 面内の短繊維の配向におよぼす x, y, z の影響

一般には複合材料の中央部で短繊維の配向が悪化し⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾, ダクト内のグリセリン中でも中央部で配向が悪化するとされている⁽¹⁶⁾。いっぽう Fig.6に示したように, 著者らが行なった $2l/D$ が比較的大きい場合の実験においては W/D の増大につれ xz 面内の短繊維の配向は悪化した。これはダクト入口までに十分配向を完了した短繊維が, ダクト壁との接触により壁近くで配向が乱れたためと推察されたので $W/D=3$ の矩形ダクトを用いて xz 面内の短繊維の配向におよぼす x, y, z の影響を実験的に調べた。

その結果, ダクト長さが大きいときはダクト入口よりもダクト出口付近で配向は悪化した⁽⁶⁾, ダクト長さを 65 mm とした今回の実験ではダクトの入口と出口付近では σ にはほとんど相違は見られなかった。

ダクトの厚さ方向 y の影響を調べたところ, Fig.7に示すようにダクト壁近くでの配向が悪化した。タンク内の液位 H が 20 mm になると液流速が小さくなり配向が悪化した。なお Fig.7にはダクトでの観察方向と W と D の説明図が描かれている。

Fig.7 Effects of the tank head and y on the discontinuous fiber orientation on the xz plane.

ダクトの幅方向 z の影響は, $|z| \leq W/4$, $|z| > W/4$ について検討した結果, 両者のあいだにはほとんど相違は見られなかった。

5. xy 面内の短繊維の配向におよぼす x, y, z の影響

上述の実験により, xz 面内の配向は D の減少につれ悪化することが分かったので, つぎに xy 面内の配向を写真撮影により求めた。 xy 面内の配向は観察の容易な $W/D=3$ の場合について行なわれた。その代表的な写真 ($W/4 < z < W/2$) を Photo.3に示す。その結果, ダクト出口付近を除いて配向におよぼす x の影響はほとんど見られないことが分かった, ダクト出口ではきゅうす効果⁽¹⁷⁾により短繊維の配向は乱れるが, Calow と Wakelin⁽¹⁾ あるいは Parratt⁽¹⁸⁾ の方法に従って短繊維を含む流出物をゲル化し水平方向に引張りを与えることにより実用上これらの乱れは防止できると考えられる。なおダクト出口近くの補

Photo.3 Discontinuous fiber orientation on the xy plane in the duct at $W/D=3$, $\nu=880 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $H=70 \text{ mm}$, $v_x=51.6 \text{ mm/s}$, $A.R.=45.6$ and $C=0.1 \text{ wt}\%$.

強材が視野をさえ切る構造になっているので、出口での乱れは xz 面から撮影した Photo.2 にはほとんど現われていない。

z の中央部断面の写真から短繊維の配向におよぼす y の影響を見出したところ Fig.8 に示す結果が得られた。この図より y の中央部で配向が良いことが分かる。

つぎに z の影響を調べたところ (Fig.9), z の中央部で短繊維は流れ方向によく配向することが分かった。 $-W/8 < z < W/8$ のデータは、 y の違いによって整理された Fig.8 を総合して表示されたものである。

Fig.8 Effects of the tank head and y on the discontinuous fiber orientation on the xy plane.

Fig.9 Effects of the tank head and z on the discontinuous fiber orientation on the xy plane.

IV. 考 察

上述の実験結果より $2l/D$ が比較的大きい場合には短繊維

の配向はダクト中央部よりもダクト壁近くで悪化することが分かった。 xy 面ならびに xz 面からの観察により x , y , z の影響を調べたところ、壁近くでの短繊維とダクト壁との接触が配向を悪化させる原因となっていると結論できる。短繊維とダクト壁との接触による配向悪化の領域が D によらずほぼ一定とみなせば、 W/D の増大 (著者らの実験では W を一定にして D を変化させた) とともにダクト横断面積 ($D \times W$) の中で配向悪化の領域の占める割合が増大する。このことが W/D の増大につれ xz 面での短繊維の配向が悪くなることの原因となっているものと考えられる。

つぎに母材として塩崎はポリエチレンフタレート⁽⁷⁾, Darlington と McGinley はナイロン 66⁽¹⁵⁾, 寺山らはポリエチレンペレットを用いているため⁽⁹⁾, 必ずしも Calow と Wakelin⁽¹¹⁾, Parratt⁽¹⁸⁾, 中村と美馬⁽⁶⁾ならびに浜田ら⁽¹⁶⁾が用いたニュートン流体であるとは限らない。事実 Bortz と Li⁽¹⁹⁾ は可塑剤を加えてスラリー状にしたものはビンガム流体⁽²⁰⁾と見なせると述べている。ニュートン流体の場合には中村と美馬が解析したように、ほとんどの場合短繊維はタンク内で十分配向を完了するので⁽⁶⁾, ダクトはその配向を維持し続けるか悪化させるかのいずれかである。タンク内での不十分な配向をダクト内で改善することはまれである。

いっぽう配向用タンクを有しない構造のものでは⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ ダクト内の速度こう配の増大とともに配向は良好となる。その場合でも、短繊維を含む可塑剤あるいは母材がニュートン流体であるか否かによってダクト内の速度こう配は大きく異なり、このことがすぐさま短繊維の配向に影響すると考えられる。

本論文で述べられた結果は、短繊維と粉末金属との干渉のない場合について得られたものである。ウィスカー強化金属系複合材料作製のため、今後は短繊維と粉末金属との干渉の考慮とともに、分散かつ選別されたウィスカーを用いた第2段階の研究へ進めていきたいと考えている。

V. 結 言

短繊維の長さ対ダクト厚さの比が比較的大きい場合について、配向タンクとダクトとからなる実験装置を用いてダクト厚さが液体の流動状態と短繊維の配向におよぼす影響を実験的に見出して考察した結果、以下に示す結言が得られた。

(1) タンク内の液位ならびにダクト厚さによってタンク内の流跡線はほとんど影響されず、短繊維は流跡線に従う。

(2) 矩形ダクト断面の縦横比 W/D が、3, 6, 15 のとき、出口損失を考慮すれば管まっす係数は Boussinesq の理論に一致する。

(3) ダクト内での短繊維の配向は正規分布と幾分異なるが、標準偏差を用いて配向の度合を表現できる。

(4) xz 面内での短繊維の配向は W/D の増大につれ悪化する。

(5) xz 面ならびに xy 面において、短繊維とダクト壁との接触によりダクト壁近くの配向が乱れた。 W/D の増大とともに接触による配向悪化の領域がダクト横断面積に占める割合が増大すると見なせば、結言(4)を説明できる。

文 献

- (1) C.A. Calow and R.J. Wakelin : J. Inst. Metals, **96**(1968), 147.
- (2) N.J. Parratt : Powder Metallurgy, **7**(1964), 152.
- (3) R.L. Mehan : J. Composite Materials, **4**(1970), 90.
- (4) F. Ordway, P.J. Lare and R.A. Hermann : Technical Report AFML-TR-71-252 (Artech Corp.), (1972).
- (5) 高橋仙之助 : 第5回復合材料シンポジウム発表報告集, (1972), 253.
- (6) 中村克孝, 美馬源次郎 : 日本複合材料学会誌, **2**(1976), 80.

- (7) 塩崎哲也 : 工業材料, **18**(1970), 63.
- (8) M.W. Darlington and P.L. McGinley : J. Mater. Sci., **10**(1975), 906.
- (9) 寺山龍彦, 山田国広, 堀川 明 : 日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会, 講演前刷集, (1976), 45.
- (10) R.C. Pankhurst and D.W. Holder : Wind-Tunnel Technique, Pitman, (1965), 137.
- (11) J. Boussinesq : J. Mathe., Pures et Appliquees, **7**(1868), 377.
- (12) 板谷松樹 : 水力学, 朝倉書店, (1967), 150.
- (13) (12) の p.133.
- (14) G.E.G. Bagg, L.E. Dingle, H. Edwards, M.E. N. Evans and H. Ziebland : 7th Internat. Reinforced Plastics Conf., Brighton, (1970), 1.
- (15) M.W. Darlington and P.L. McGinley : J. Mater. Sci., **10**(1975), 906.
- (16) 浜田幸一, 山田国広, 堀川 明 : 日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会, 講演前刷集, (1977), 88.
- (17) M. Reiner : 改訂レオロジーの基礎理論 (山田, 柳沢 : 訳), コロナ社, (1966), p.29.
- (18) N.J. Parratt : Composites, **1**(1969), 25.
- (19) S.A. Bortz and P.C. Li : The Society of the Plastics Industry, Inc., Section 7-C, (1967), 1.
- (20) (17) の p.123.

(211)[$\bar{1}11$] 70/30 黄銅単結晶の圧延におけるせん断帯の発達

森井賢二* 目良光男* 中山 豊*

Kenji Morii, Mitsuo Mera and Yutaka Nakayama : Development of Shear Bands during Rolling of the (211)[$\bar{1}11$] Single Crystals of 70/30 Brass. The deformation behavior of (211)[$\bar{1}11$] single crystals of 70/30 brass during rolling has been examined metallographically from a view point of the deformation mode which is characterized by the development of shear bands.

It is shown that a shear band is nearly perpendicular to the side surfaces of the specimen and inclined at 25~35 deg to the (111) twinning plane. At larger reductions than 40%, at which extensive mechanical twins were nucleated, peculiar slip traces deviated from the (111) plane appear among the slip trace groups of the slip systems having the slip plane parallel to the twinning plane. It is shown that the areas where these peculiar slip traces exist have higher density of mechanical twins and are accompanied by a local lattice rotation of ~30 deg about the $[01\bar{1}]$ transverse direction of the specimen. With increasing rolling reductions, these areas are closely arranged so as to form the band-like regions. It is concluded that linear arrangement and accumulation of the peculiar slip traces in these regions cause the formation and development of shear bands.

(Received June 24, 1977)

I. 緒 言

圧延された銅合金多結晶の変形組織を試料側面において観察すると、試料板面に対して約 35° の傾きをなす帯状の変形模様が認められることは古くから知られていた⁽¹⁾⁽²⁾。その後、同様の変形組織に関する研究によって、この変形

模様は圧延変形時の塑性ひずみの集中によって形成された帯状領域に対応することが明らかにされた⁽³⁾⁽⁴⁾。このような領域は通常せん断帯 (shear band) と称されている。

さらに著者ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾は上述の多結晶の場合と同様のせん断帯が α 黄銅単結晶の圧延変形において出現することを示した。ここで、単結晶に認められたせん断帯は、その trace

* 大阪府立大学工学部 (College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai)