

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月28日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06099

研究課題名(和文) フローフォーカシングを利用した粒子懸濁液の粒子配向観察技術の開発

研究課題名(英文) Observation technique for particle orientation in concentrated suspension with flow focusing

研究代表者

加藤 学 (Kato, Manabu)

津山工業高等専門学校・総合理工学科・准教授

研究者番号：20370017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フローフォーカシングを用いて二次元流れ場における濃厚系懸濁液の粒子の動きを観察する技術を開発した。この技術を用いて、濃厚系懸濁液の二次元ポアズイユ流れ場および急縮小流路を通過する粒子懸濁液に適用し個々の粒子の運動の観察を行った。ポアズイユ流れ場では、繊維状粒子が流線に沿った配向角度に収束する様子やその過程で壁面や近傍粒子との相互作用で粒子の回転運動が阻害されるケースを観察することができた。急縮小流れでは、縮小流路入り口における複雑な繊維状粒子の配向運動とそれらの流れ場への影響を観測した。以上より、本測定技術により数値モデルの検証など有益な実験データが得られることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、申請者がこれまで取り組んできたフローフォーカシングを用いたマイクロ流路測定技術の懸濁粒子測定への応用である。濃厚系懸濁液の観察では、粒子同士が重なり合うことで特定領域の粒子の運動を直接観察することが困難となる。本測定技術は、分散粒子に邪魔されることなく、ピンポイントで流れの中の観察したい領域の特定の粒子の撮影が可能となる。既存の手法と比較してもシンプルな測定手法であり様々な流れ場への適用が可能である。観察結果は、数値解析モデルの検証にとどまらず、流れ場による粒子の姿勢の制御に対して重要な知見が得られ、CFRPのさらなる高機能化に対して大きなインパクトを与えるものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a technique to observe particle movement of concentrated suspension in two-dimensional flow field using flow focusing. We applied this technique to the two-dimensional Poiseuille flow field and the contraction channel flow of concentrated suspension and observed the movement of particles. In the Poiseuille flow field, we observed the orientation motion of fibrous particles which converge at the orientation angle along the streamline. In addition, their orientation motion is disturbed by the interaction with the wall surface and nearby particles. In the case of contraction channel flow, we observed that the fibrous particles show complex orientation motion at the entrance of the channel and their orientation motion influences on the flow field. From this results, we have confirmed that this technique is simple and useful method to obtain valuable data for verification of numerical models.

研究分野：流体工学

キーワード：懸濁液の流動 懸濁粒子の配向運動 流れの可視化技術 フローフォーカシング

1. 研究開始当初の背景

体中に固体の微粒子を分散させた系を懸濁液と呼び、自然界や産業界において広く存在する。工業製品では、インク、化粧品、製薬、繊維強化プラスチックなど様々存在し、その流動特性の評価は、製造過程の流れ場や最終製品の力学特性を理解する上で非常に重要である。粒子懸濁液の流動特性は、体積分率、形状、粒子間の相互作用や配向状態などに依存し、複雑な現象であると言える。そのため、粒子の体積分率と粘度の関係や懸濁粒子の配向運動を表現する数値モデルが数多く提案されている。実際には、粒子の運動とレオロジーとは相互に密接な関係があり¹⁾、これらの現象を理解するために実験的な研究も非常に重要である。実験的な研究では、レオロジー測定や流動中の懸濁液中の粒子運動を直接観察し、流れ場と粒子の運動の関係を調べるのが一般的な方法である。分散濃度が低い場合の懸濁粒子の観察は、流路内の流れ場を顕微鏡やマイクロスコープを用いて観察すればよい。しかし、繊維を多量に分散させた濃厚系では繊維自身が邪魔となり、流れ場の観察側壁面近傍の粒子は観察可能であるが、流路中央での粒子の運動を観察できないという問題がある²⁾。この問題に対して、これまでもいくつかの観察技術が提案されている²⁻³⁾。本研究では、フローフォーカシングを用いる観察手法の提案を行う。この手法では、流路中央のみに粒子を分散させることができ、通常では把握が難しい位置の粒子の運動を直接観察することが可能となる。実験装置や方法も非常にシンプルな測定手法であり、様々な系への適用が可能である。

2. 研究の目的

(1) フローフォーカシングを用いて、懸濁液のフィルム状の流れ場を形成し、フィルム内の粒子の運動を直接観察する技術を開発する。

(2) フローフォーカシングを用いた観察技術を用いて、平行平板間の速度分布を明らかにし、二次元ポアズイユ流れとなっていることを確かめる。次に、濃厚系懸濁液において粒子の接触による速度分布および配向運動への影響を明らかにする。

(3) 本観察技術を急縮小流路、急拡大流路に適用して、急縮小流れにおける粒子の運動を観察し、粒子の配向運動の流れ場への影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) フローフォーカシングデバイス 図1に流路の概略図を示す。図1(a)は矩形断面の流路でありポアズイユ流れ場で粒子運動を観察を行うための流路である。図1(b)は、急縮小急拡大を有する管を通過する流れでの粒子運動の観察を行うための流路である。コア流体である懸濁液の流入口はいずれも図の上側にあり、流入口から 25 mm

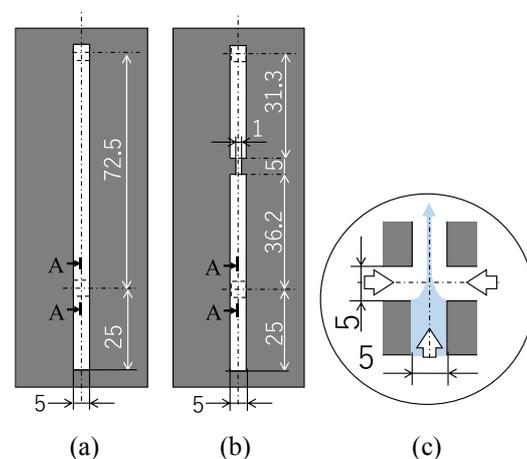


図1 フローフォーカシングデバイスの概略図。
(a) 平行流路, (b) オリフィス流路, (c) "A-A"断面

下流にシース流体の流入口がある. 図 1 (c)に
フローフォーカシング領域の断面図を示す.

中央を流れるコア流体である懸濁液を, 分散
媒であるシース流体で左右から挟み込むこと
でコア流体をフィルム状の流れ場にするこ
とができる. この時, コア流体の厚さはコア流
体とシース流体の流量比でコントロールする
ことができる. 流れ場の観察は, 流れ方向を x
軸, シース流体流入方向を y 軸として, x-z 平
面をマイクロscopeによって行う.

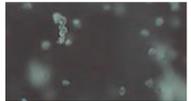
(2) 試験流体 シース流体には水道水に水
飴(比重 $s=1.55$)を重量比 50 および 83 wt%で
混合した水飴水溶液を用いる. コア流体には,
シース流体と同じ重量比の水飴水溶液に粒子
を分散させた懸濁液を用いる. 粒子は表 1 に
示すように, 球形状と繊維形状の二種類を用
いた.

4. 研究成果

(1) 平行流路での速度分布の計測 まず流路内
の流れ場の確認を行う. (x, 0, z)平面の球形粒子の
動きから速度分布を計測し, 二次元ポアズイユ流
れでの速度分布と比較した 図 2 は流量比 1:25

(コア流量 $3.14 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$: シース流量 $7.84 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$), 水飴水溶液 50wt%に粒子分散濃度 0.1wt%
で分散させた場合の結果を示す. 実線は二次元ポ
アズイユ流れを仮定した場合の流速の計算結果
である. 図 4 に結果を示す. 浮力の向きと反対方
向に流した場合には, 粒子の移動速度の分布は二
次元流れよりもわずかに小さい程度で, ほぼ一致
することがわかる. 粒子の移動はほぼ二次元ポア
ズイユ流れに従うことがわかる. 次に, 粒子形状
を針状粒子にし分散濃度を 3.0, 5.0wt%に高めて
同様に速度分布の確認を行った. この時の流路内
に分散する粒子の様子を図に示す. この図からわ
かるように, 粒子は一様に分散せず, 中央部分を境

表 1 使用した懸濁粒子の種類

	Particle	Fiber
Sample Name	ORGASOL 0457 Kanomax	0.9T, Nissen
Size	$\phi 50 \mu\text{m}$	$\phi 10 \mu\text{m}, L=0.5 \text{ mm}$
Specific gravity	1.03	1.14
Appearance		

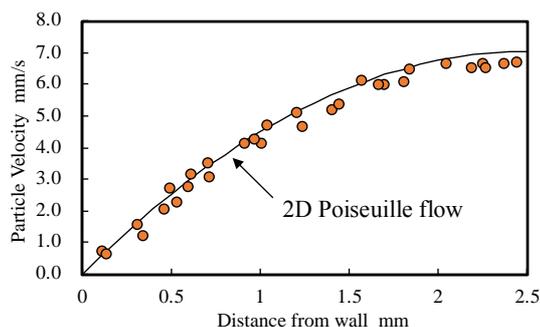


図 2 平行流路内の速度分布測定結果 コア流量
 $Q_c = 1.70 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, シース流量 $Q_s = 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

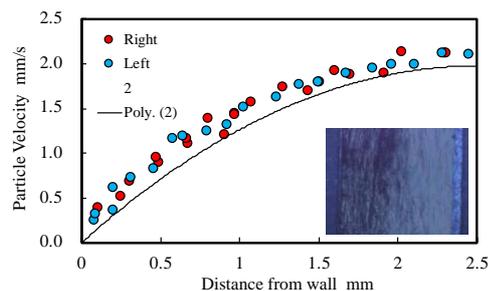


図 3 平行流路内の速度分布測定結果 粒子分
散濃度 3.0 wt%, コア流量 $Q_c = 1.57 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$,
シース流量 $Q_s = 1.96 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$.

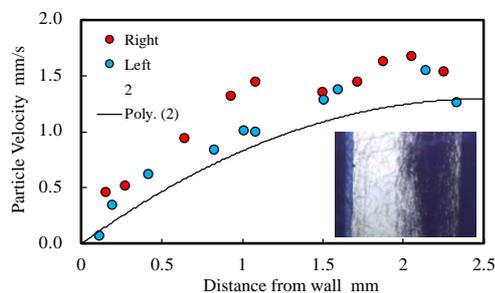


図 4 平行流路内の速度分布測定結果
粒子分散濃度 5.0 wt%, コア流量 $Q_c = 1.57 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$,
シース流量 $Q_s = 1.58 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$.

にして粒子の分散が密な領域と疎な領域に別れた。この原因は不明であるが、この分散濃度の違いを利用して、左右で速度分布の違いが発生するかを確認した。その結果が図3である。平均の分散濃度が3.0wt%では、分散濃度の粗密に関わらず全体にわたって二次元ポアズイユ流れの速度分布を示していることがわかる。一方、図4に示す5.0wt%では、粒子分散が疎な左側の領域では概ね二次元ポアズイユ流れの速度分布に近いと言えるが、分散濃度が密な右側の両機では中央に近い領域で、一様な速度分布となっており、粒子同士が接触して一つの塊となって移動していることを示している。

(2) 粒子の配向運動観察 粒子の配向運動の時間的な変化を動画から計測した結果を図5に示す。角度ゼロは流れ方向を示している。計測開始時点で流れと平行に配向している流路中央の粒子は配向角が変化しないことが確認できる。一方、壁面近くの粒子は、流れ方向に配向し、その後一定を示す。また角速度は、流れ方向に配向していくとともに徐々に減少していることが確認できる。最後に、粒子の分散濃度が高い領域を移動する粒子は、およそ70度で回転運動が停止しており、近傍の粒子集団との接触によるものである。

(3) 急縮小流路流れでの粒子の運動 図6に急縮小領域での流れ場の観察動画を示す。左側が球形状、右側が針状粒子である。針状粒子の観察画像から、ほとんどの粒子が流線に沿って配向していることが確認できる。観察動画より、粒子形状による経路線および速度変化の違いを調査したところ、いずれも違いは確認できなかった。次に、針状粒子において、配向角による経路線の違いを確認した。図7(a)に示す通り、流路を流れる繊維の多くは流線に沿って流れているが、中には流線に沿わず回転運動を含みながら流れるものも存在する。そこで、配向運動の有無による経路線の違いを調査した。図7(a)のとおり、急縮小の角部を原点として、壁面か

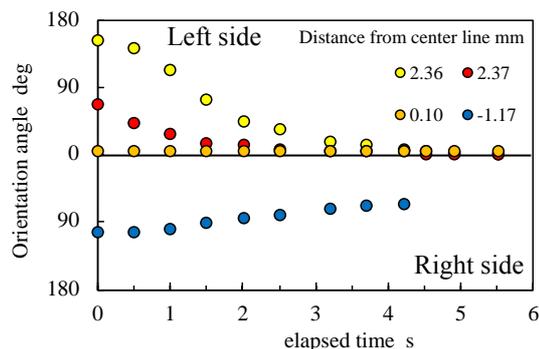


図5 平行流路内の針状粒子の配向角の時間変化. 粒子分散濃度 3.0 wt%, コア流量 $Q_c=1.57 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$, シース流量 $Q_s=1.96 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$.

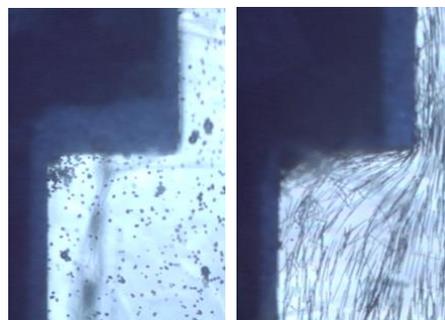


図6 急縮小領域における観察結果

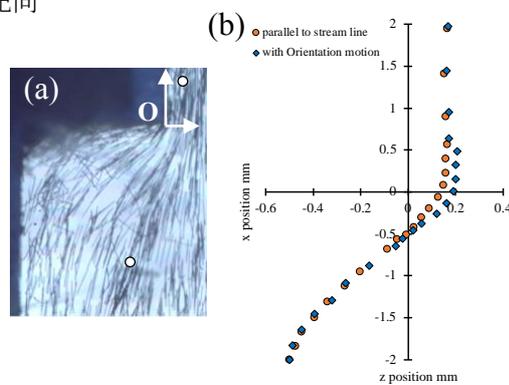


図7 急縮小領域での配向運動の有無による経路線の違い

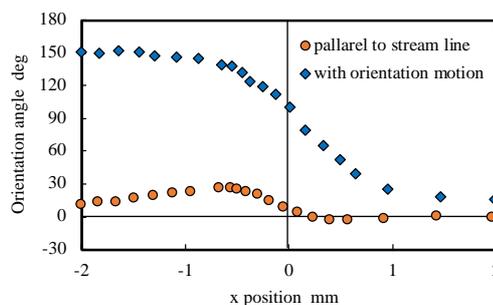


図8 急縮小領域の配向角の時間変化

ら 1.5 mm の位置 (図中の白点) を通過する粒子を計測した. 縮小後の白点は, 観察対象の粒子が通過する位置を示している. 図 7 (b)より, 配向運動を伴う粒子が急縮小部においてわずかに内側に膨らむ経路をたどることがわかる. この時の配向角の変化を図 8 に示す. 縦軸は x 軸に対する配向角度を表している. 従って, ●の変化は x 軸に対する流線の角度を表している. これに対して, 回転運動を伴う粒子 (◆) が急縮小領域で急速に流れ方向に配向する様子がわかる. この回転運動が経路線の変化を生じさせたと思われる. この結果から, 急縮小部の流れ場は複雑になることが予測される. 最後に, 観察動画より急縮小領域に着目して, 0.25 秒毎の写真を切り出した連続写真を図

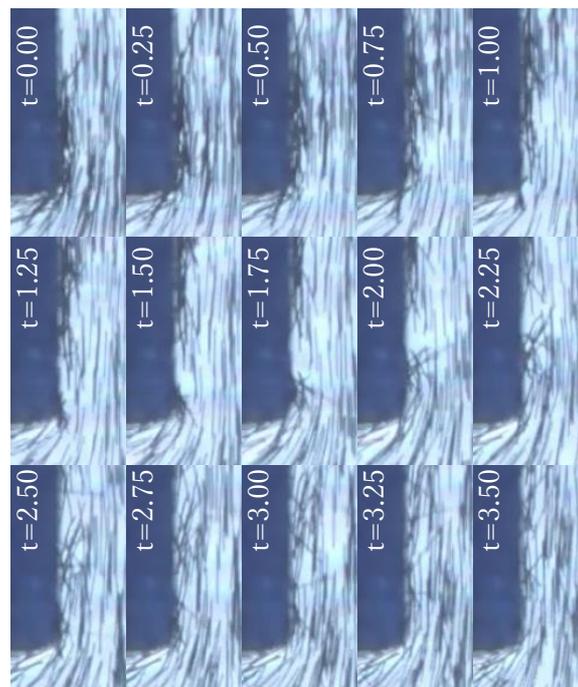


図 9 急縮小流路の角を回り込む針状粒子運動

9 に示す. $t=0\sim 1.00$ において急縮小流路の角部を回り込む針状粒子の動きに注目する. $t=1.00$ において縮小後の流路に入ったあと, $t=1.25\sim 1.50$ にかけて後続の粒子に押されるように反時計方向に回転していることが確認できる. その後 $t=1.75$ 以降で流線方向に配向しながら流れ去る様子が把握できる.

<引用文献>

- (1) S. Mueller, E. W. Llewellyn and H. M. Mader, The rheology of suspensions of solid particles, Proc. R. Soc. A (2010) 466, 1201-1228.
- (2) Stover, C.A., Koch, D.L., Cohen, C., Observations of fibre orientation in simple shear flow of semi-dilute suspensions J. Fluid Mech., 238, 277 (1992)
- (3) 保田・中村・森, 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, 日本機械学会論文集 C 編 66 巻 648 号(2000), 2891-2896.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

① 濃厚系懸濁液の急縮小流れにおける流れの観察

内藤 涼, 新山勝也, 加藤 学 (津山高専)

2019.1 計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会, 平成 30 年度学術講演会

- ② フローフォーカシングを利用した濃厚系粒子懸濁液の粒子配向観察技術
加藤学, 有井峻, 高橋勉
2018.11 平成30年度 日本機械学会 第96期 流体工学部門講演
- ③ Complex fluid flow in elongational flow and Evaluation of rheological property
Manabu KATO
2018.7 The 2nd NIT-NUU Bilateral Academic
- ④ Development of Observation Technique for Suspension with Flow Focusing
Ryou ARII, Manabu KATO, Yuuki KONDO, Tsutomu TAKAHASHI
2018.6 The 7th Pacific Rim Conference on Rheology
- ⑤ フローフォーカシングを利用した粒子懸濁液の粒子観察技術の開発
有井峻・加藤学(津山高専)・高橋勉(長岡技科大)
2018.1 計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会, 平成29年度学術講演会

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力氏名 : 高橋 勉
ローマ字氏名 : (TAKAHASHI, Tsutomu)
所属研究機関名 : 長岡技術科学大学
部局名 : 工学部 機械創造工学専攻
職名 : 教授

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。