

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15299

研究課題名（和文）偏光イメージングによるナノ繊維複合材料の成形過程における流動誘起配向の計測

研究課題名（英文）Measurement of flow-induced orientation of nanofiber suspension in the molding flow by polarization imaging

研究代表者

佐藤 大祐 (Sato, Taisuke)

新潟大学・研究推進機構・助教

研究者番号：70778703

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、セルロースナノファイバー分散流体の成形流れにおける繊維配向を明らかにすることを目的とし、そのために必要なレオロジー特性の計測や2次元複屈折分布を計測するための偏光イメージング装置を開発した。試験流体は、shear-thinning性および弾性的性質の強い流体であることがわかった。また、縮小流れでは、繊維は流れ方向に強く配向し、下流域では、再びせん断流れ場における配向へと発達することが明らかになった。さらに、発達するまでに要する距離は、流量、縮小比およびアスペクト比に依存しないことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在セルロースナノファイバー（CNF）は、複合材料の強化材としての応用が考えられている。繊維複合材料の成形において、製品中の繊維配向は、成形加工中の材料の流動でほぼ決定され、それが複合材料の歪やソリ、強度ムラといった欠陥に大きく影響する。したがって、目的とする良い材料特性を発現させるには、CNFを含んだ流体の流動に関する基礎的な知見を得ることが極めて重要である。本研究ではCNF分散系において、繊維配向を定量的に評価しており、この成果は、CNFを用いた複合材料の品質向上に大きく寄与すると期待される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to clarify the fiber orientation in the molding flow of the cellulose nanofiber suspension. In this study, rheology properties and distribution of the flow-induced birefringence were measured. In addition, polarization imaging device, which was configured by low price optical elements, was developed to measure the fiber orientation. The test fluid exhibits viscosity with shear-thinning behavior and strong elasticity. In the contraction flow, fibers were aligned strongly in the flow direction. In the downstream region, the birefringence decreases and reaches a constant value. The result shows that the fiber orientation induced by the contraction flow was varied to the orientation in the shear flow. Furthermore, it was found that the distance at which the birefringence reaches a constant value is not affected by the flow rate, contraction ratio and aspect ratio.

研究分野：流体工学

キーワード：セルロースナノファイバー 繊維分散流体 サスペンション 偏光イメージング 繊維配向 流動複屈折 平面流れ

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

木材パルプから抽出したセルロースナノファイバー(以下, CNF)は, 鉄の 1/5 の軽さと 7~8 倍の強度を有し, 幅が 3~20 nm の極めて細い繊維である。この CNF は, 繊維強化複合材料の強化材として, ガラス繊維に代わり炭素繊維に続く将来の有力候補として注目されている。強化材として CNF を考慮した場合, 従来の強化材であるガラス繊維や炭素繊維と異なり大きさが非常に小さいため, そもそも CNF 単体の運動を可視化することは困難であり, 流動により生じる繊維配向をどのように計測するのか, という問題がある。さらに, CNF は母材である樹脂の高分子と大きさのスケールが近く, その挙動や配向状態が高分子のそれらと同じであると見なしてしまってもよいのか, あるいはスケールは高分子と近いがそれとは異なる配向状態となるのか, 繊維間の機械的な干渉も繊維配向を決める大きな要因であるのか, 等々については未知である。

2. 研究の目的

CNF 分散流体の繊維配向は, 光学的測定のひとつである流動複屈折測定によって計測できる。成形過程において生じる流れの多くは, 時々刻々と変化する非定常流れであり, それゆえ流体関連計測はリアルタイム計測が望ましい。そこで本研究では, 安価な光学素子で 2 次元複屈折測定(偏光イメージング計測)ができる装置を開発することで, 濃厚な CNF 分散流体の流動により生じる繊維配向の生成メカニズムを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では, CNF 分散流体(分散媒は水, 濃度は 0.5 wt.%) について下記の順序で研究を進める。(1) 2 次元複屈折分布を測定できる偏光イメージング装置を開発する。(2) 濃厚な CNF 分散流体のレオロジー特性を詳細に測定し, 流動特性に関する基礎的知見を得る。(3) 工業で現れる複雑な流れ場において, 流れ場や繊維の配向場の測定を行い, 流れ場と関連付けて配向の生成メカニズムを理解する。

(1)については, 図 1 に示すように, 各光学素子を適切な順番と方向で配置することで, 高速度ビデオカメラによって撮影される各画素の光強度から, 2 次元複屈折分布をリアルタイムで計測する装置を開発する。

(2)については, レオメータによって CNF 分散流体のレオロジー特性(せん断粘度など)を調べる。

(3)について, 本研究では流れ場として平面急縮小流れを対象とする。流れ場は, CNF 分散流体の 2 次元速度分布計測を行う。これは, 添加したトレーサー粒子を追跡する一般的な手法により行う。CNF の繊維配向は, 開発した偏光イメージング装置によって 2 次元複屈折分布を計測することで調べる。

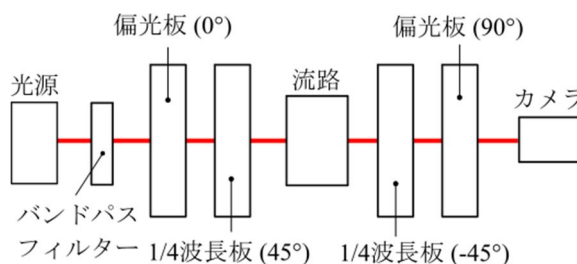


図 1 偏光イメージング装置の概略図。図中の角度は光学軸の方向を示めしている。

4. 研究成果

まず, CNF 分散流体のせん断粘度特性を図 2 に, 動的粘弾性計測の結果を図 3 に示す。図 2 より, CNF 分散流体は, せん断速度の増加に伴いせん断粘度が低下する shear-thinning 性を有する流体であることがわかる。続いて, 図 3 より貯蔵弾性率 G' が損失弾性率 G'' よりも高い値を有していることから, 非常に弾性的性質が強い流体であることがわかる。

本研究では, 図 4 に示すような平面急縮小流れを対象とした。流路幅 (2H1 および 2H2) を変更することで, 様々な縮小比およびアスペクト比を有する流れ場における CNF の繊維配向を検討した。図 5 に偏光イメージング装置による結果の代表例を示す。図 5 より赤色ほど繊維がある方向に強く配向しており, 青色は繊維が無秩序に配向していることを意味している。縮小部上流では, 側壁面近傍で繊維が配向していることがわかる。これは, 側壁面によるせん断によって配向しているものと考えられる。一方で流路中心線上付近では, 繊維は概ね無秩序に配向していることがわかった。縮小部近傍では, 繊維が非常に強く配向している結果となった。これは, 縮小部近傍で生じる加速流れ, すなわち伸長流れによって, 繊維が流れ方向に強く配向したためと

考えられる。

本研究では、縮小部で生じる繊維配向についてより詳細に検討するために、流路中心線上における複屈折分布を評価した。図6に代表例を示す。図6より、上流部から縮小部にかけて複屈折の値が急激に増加し、縮小部で最大値を示した後、急激に複屈折の値が減少し、最終的には一定値を示すことがわかった。縮小部における複屈折の最大値は、流量や縮小比によって異なることが明らかになった。一方で、下流域での複屈折の値が一定になるまでの距離について、フィッティングによって詳細に検討した。その結果、縮小部で形成された繊維の配向構造が平行平板における発達した繊維の配向構造へと変化するのに要する距離は、縮小比、アスペクト比および流量には依存しないことが明らかになった。

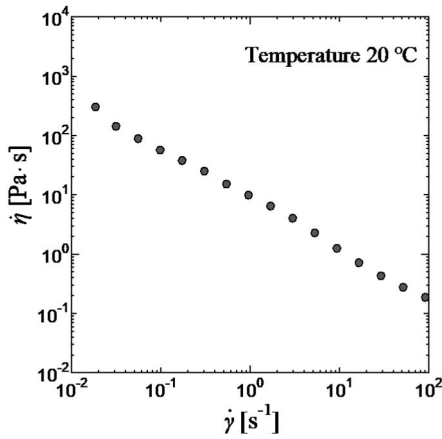


図2 せん断粘度特性 (液温は 20)

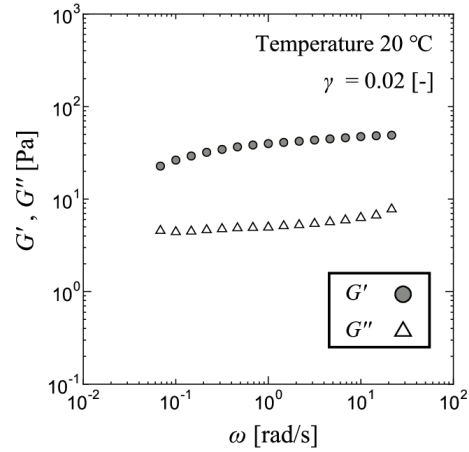


図3 CNF 分散流体の動的粘弾性計測の結果 (液温は 20)

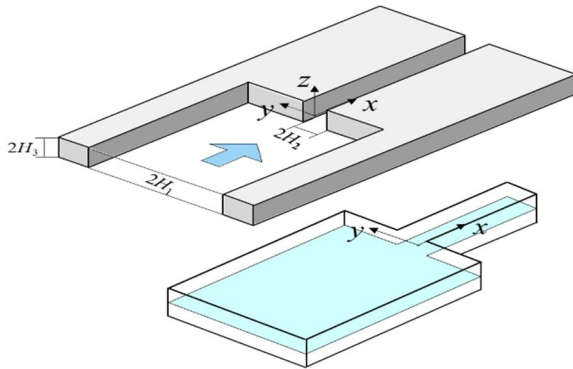


図4 試験流路の概略図

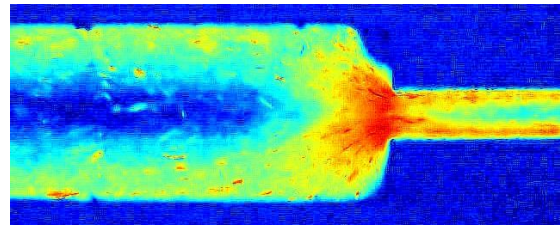


図5 偏光イメージング装置による計測結果の代表例。流路の縮小比は4-1。赤色ほど複屈折の値が高く、青色は複屈折の値が0に近いことを示している。

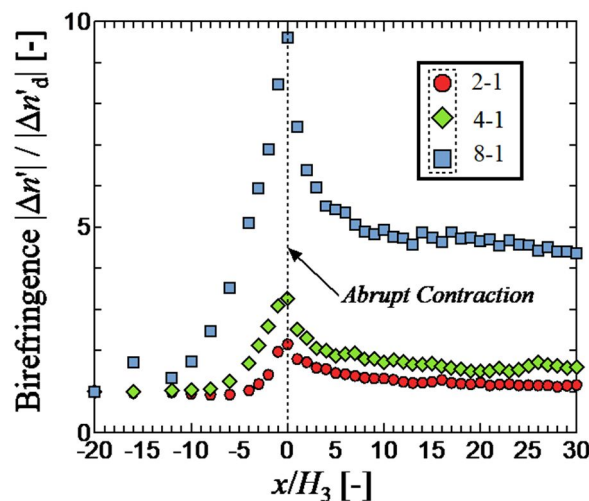


図6 流路中心線上 ($y = 0$ mm) における複屈折分布の結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Akiomi Ushida, Taisuke Sato, Takatsune Narumi, Tsutomu Takahashi, Takashi Onuma, Masatoshi Ito, Tomiichi Hasegawa	4. 巻 280
2. 論文標題 Flow properties of surfactant solutions of rod-like micelles passing through a small slit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jnnfm.2020.104296	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taisuke Sato, Takatsune Narumi, Akiomi Ushida	4. 巻 48
2. 論文標題 Flow-induced orientation of a polymer solution in a planar channel with abrupt contraction and expansion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 129-135
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1678/rheology.48.129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐藤大祐, 生天目修弥, 鳴海敬倫, 牛田晃臣
2. 発表標題 平面急縮小流れにおけるCNF分散流体の流動配向
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第27回秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taisuke Sato, Syuya Namatame, Takatsune Narumi, Akiomi Ushida
2. 発表標題 Flow-induced orientation of cellulose nanofiber suspension in planar channels with an abrupt contraction
3. 学会等名 The International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松諒平, 鳴海敬倫, 牛田晃臣, 佐藤大祐
2. 発表標題 ゲル状のCNF分散系の流動反転後の変形特性
3. 学会等名 第67回レオロジー討論会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関