

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12605

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23483

研究課題名(和文)非定常流体応力場の可視化に向けた光弾性計測システムの開発

研究課題名(英文)Development of photoelastic measurement system for visualization of unsteady hydrodynamic stress field

研究代表者

武藤 真和 (Muto, Masakazu)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教

研究者番号：30840615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非接触非定常な流体応力場の光弾性法の開発を目的とする。本課題で構築した高速度偏光カメラを用いた光弾性法により高分子流体の矩形管内定常層流を計測した結果、鎖状高分子流体が応力負荷時に発する位相差の可視化に成功した。さらに位相差の発現は、レオロジー特性だけでなく、高分子の固有複屈折も影響し、特にセルロースナノクリスタル水溶液の位相差が応力に高い感度を示した。数値解析した応力分布と位相差分布の空間強度分布が概ね一致したため、位相差から応力への変換に必要な校正係数をCaBER-DoSシステムを用いて取得した。この校正係数により、一軸伸張状態における高分子流体の応力場の可視化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題にて構築した光弾性法は非接触かつ高時空間分解能な応力場計測手法である。そのため、非定常せん断応力の調査が鍵となる脳動脈瘤の破裂メカニズム解明に向けて、脈動流速の発達時間(80 ms程度)内で瘤内流体応力場を低侵襲に計測でき、今後の医・工学分野発展のキーテクノロジーとなる。さらに計測した実験応力場とPIVやPTVによる実験流速場との比較により、流体応力の数値モデルの妥当性を実験検証でき、その学術的価値も非常に高い。現状の流速を既知とする「流体力学」に対して、本手法の確立により応力を既知とした研究パラダイムへ転換できれば、複雑な流動現象の抜本的な解明と予測・制御へ展開できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of our study is to develop an unsteady and non-contact photoelasticity method to measure hydraulic stress field. Our system with high-speed polarization camera enables us to visualize phase retardation field induced by solution of chain polymers under stress loading. Measurement of steady laminar flow field of liquid polymer in a channel using our photoelasticity method reveals that the retardation is influenced by not only the rheological properties of chain polymers but also its intrinsic birefringence. Especially, the solution of cellulose nano crystal is highly sensitive towards stress loading. Since the spatial intensity distribution of the measured retardation matches that of stress field obtained by numerical analysis, our method with CaBER-DoS system can measure the stress-optical coefficient necessary for the conversion from retardation to stress. From the measured coefficient, the stress field of liquid polymer under uniaxial extension is successfully visualized.

研究分野：流体力学

キーワード：可視化技術 流体計測 圧力計測 偏光計測 血管障害 光弾性法 複屈折 複雑流体

### 1. 研究開始当初の背景

非定常流体応力場の計測システムの開発は、今後の医・工学分野発展のキーテクノロジーとなるだけでなく、従来困難であった流体応力の数理モデルの実験検証を可能とするものであり、その価値は非常に高い。

クモ膜下出血を引き起こす脳動脈瘤の破裂メカニズムの解明には、非定常せん断応力 (図 1) の調査が鍵となる。現状の圧力センサなどの流体応力計測手法では、流動場に影響を与えるため侵襲性が高く、点計測のため応力集中部を逃す可能性もある。さらに、脈動による流速の発

達時間は 80 ms 程度であり、その時間分解能に対応した実験的計測手法は限られる。そこで、光学計測 (PIV や PTV など) により得られた流速場に対して、非ニュートン流体 (血液) の数理モデルに基づきせん断応力を推定する手法が用いられてきた。しかし、モデルの妥当性について十分な実験的検証が行われておらず、血液の最適モデルについても議論段階にある [1]。したがって、非定常応力場の非接触計測システムの開発が強く望まれている。

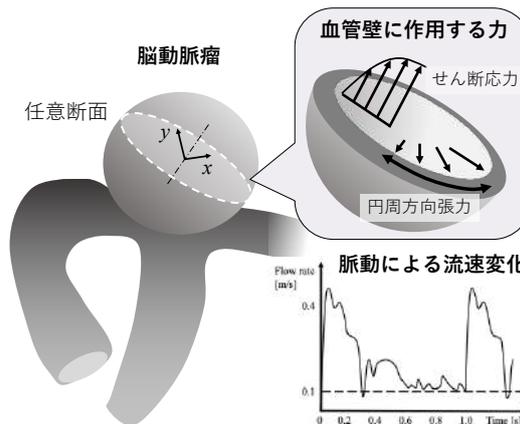


図 1 瘤の任意断面に作用するせん断応力。円周方向張力は脈動により寄与される。

### 2. 研究の目的

本研究の目的を「非接触かつ非定常な流体応力場の計測手法の開発」とする。研究代表者は、流体応力計測のアイデアとして光弾性法に着目した。光弾性法は応力場の光学的可視化手法として、従来、アクリル等の透明な固体 (光弾性体) に対して発展してきた。本研究では、作動流体として鎖状高分子流体を用いることで光弾性法を流体計測に拡張し、高速度偏光カメラを用いることで流体応力分布を非定常に可視化できる独自の計測システムを実現する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 計測系の確立

本計測系では、光源と高速度偏光カメラ (CRYSTA P1-P, Photron Co., Ltd.) の間に設置した計測対象の位相差分布を取得できる。位相差強度は、高分子の配向状態に依存し、応力負荷により配向状態が遷移して大きくあらわれる (図 2)。本計測系の確立に向け、光源の波長と各種フィルタを選定する。また、計測には高分子の高配向状態が発現しやすい流路が必要となるため、高い応力を負荷できる流路を設計する。設計では、先導実験で得た位相差分布と流体応力分布の数値計算結果を参考にする。

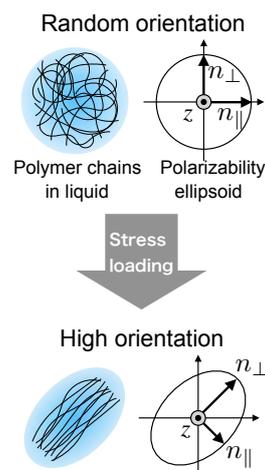


図 2 応力負荷による鎖状高分子の配向状態

#### (2) 高分子の選定

同じ流体応力でも高分子の種類が異なると、高分子流体の配向状態とレオロジー特性の違いにより位相差の表れやすさが異なる。そこで予め、せん断速度に対応するせん断粘度を動的粘弾性測定法により計測する。その結果を踏まえ、ガラス流路内を一定条件 (一定のせん断応力など)

で流れる各種高分子流体の位相差を計測し、位相差を最も大きく発現する高分子を選定する。複雑流動場の非定常計測には、高分子流体が定常流れになるまでの緩和時間の短い高分子流体の方が好ましい。そこで、脈動の流れ場に対応できる数十ミリ秒を目標として、各種高分子流体の位相差の緩和時間を本手法により計測する。

### (3) 応力値の妥当性の検証 と (4) 応力場の可視化実験

応力の算出には、位相差と応力値が対応した校正曲線を予め取得する必要がある。そこで、実験同様の流体圧力分布を数値計算により解析し、実験から得た位相差分布と照らし合わせる。加えて、非接触式応力センサによる点計測結果と本手法の位相差による計測結果を比較し、校正曲線を取得する。この際、位相差が被写界深度分の積算値であることを考慮する。取得した校正曲線を用いて、複雑流体の応力場の可視化を試みる。

当初計画していた、瘤のシリコンモデルを用いた複雑形状を有する流路内部流動場における応力分布の可視化に関しては、本研究課題と相補関係にある若手研究（課題番号：20K14646）に引き継いで研究を遂行する予定である。

以上を本学大学院生・学部生の協力を得て進める。

## 4. 研究成果

### (1) 計測系の確立

光学系設計では、光源と、光源波長および高分子の偏光状態に対応したフィルタを選定することで、高速度偏光カメラと円偏光光源を取り入れた非接触非定常な位相差分布の偏光計測システムを構築した（図3）。

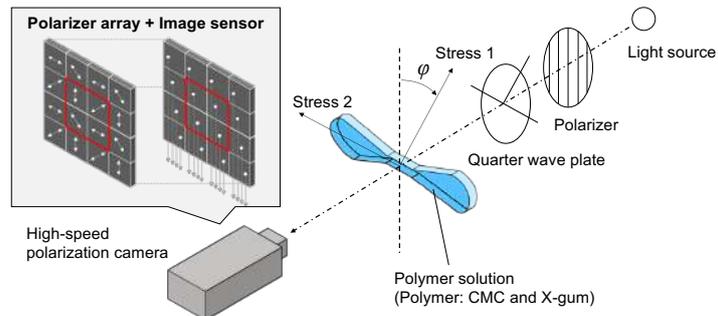


図3 高速度偏光カメラを用いた位相差計測システム

また、流路設計では、数値解析ソフト（COMSOL Multiphysics®）の利用により圧力勾配の解析を実施することで、作動流体に高圧を作用できるベンチュリ形状型ガラス矩形流路を製作した。

製作した流路に三種類の高分子（キサタンガム（XG）、カルボキシルメチルセルロース（CMC）、ヒドロキシプロピルセルロース（HPC））の水溶液を流し、本手法により計測した結果、XG 水溶液および CMC 水溶液の位相差分布の取得に成功した（図4）。同一の流量条件（30 ml/min）にも関わらず、高分子の種類と濃度の変化により、異なる位相差分布を示した。この一つ目の要因として、高分子の種類が異なると、高分子の持つ固有複屈折（固有の物性値）が異なることが考えられる。高分子の配向に伴う配向複屈折は固有複屈折と配向度の積として表され、固有複屈折とは鎖状高分子が完全に配向したときの複屈折である。従って、異種の高分子流体に同一の配向度を与える流体応力を負荷した場合でも、それらの固有複屈折の違いにより位相差

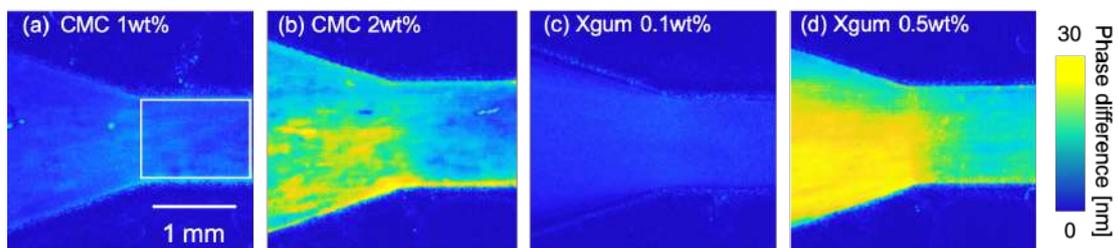


図4 XG 水溶液および CMC 水溶液の光弾性計測 [2]

分布が異なると考えられる。二つ目の理由として、高分子の種類と濃度により異なるレオロジー特性も位相差変化の要因として挙げられる。CMC水溶液とXG水溶液の粘度は異なるため、同じ流量でも流体応力場が異なることは自明である。さらに、両者の粘度は高分子濃度に正の相関を示すため、高分子濃度の上昇に従い粘度が増加すると、流体応力が上昇すると考えられる。(武藤ら, 日本流体力学会年会, 2019) (Muto et al., ASV15, 2019)

## (2) 高分子の選定

高分子の選定では、本計測システムに最適な作動流体となる高分子流体の選定を試みた。上述の高分子水溶液に加えて、高分子結晶である、セルロースナノクリスタル (CNC) およびパーミキュライトの水溶液に関して、位相差計測および動的粘弾性計測を実施

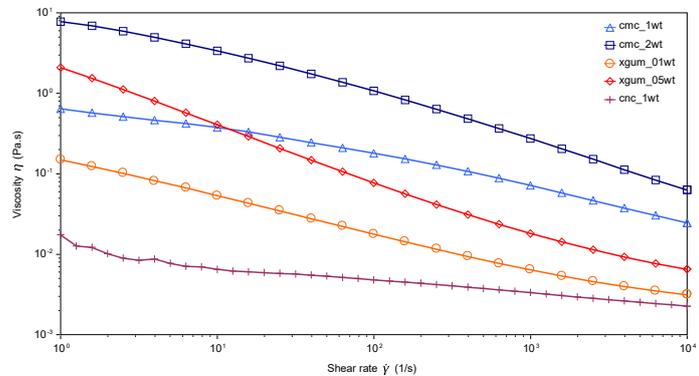


図5 動的粘弾性計測による各種高分子流体のせん断粘度を測定した。位相差計測では、同一の流量条件 (30 ml/min) におけるXG水溶液やCMC水溶液が発現する位相差30 nmと比して、CNC水溶液の位相差が50 nmと最も高感度であることを確認した。この際、非定常流動場におけるXG水溶液の立ち上がり時間は72 msであり、脈動による流速の発達時間 (80 ms程度) を達成していることを確認した。さらに動的粘弾性計測では、CNC水溶液のせん断粘度が、XG水溶液やCMC水溶液のそれと比して低い値を示した (図5)。低いせん断粘度にも関わらず位相差の感度が高いことを示した上述の結果は、CNCの固有複屈折の値が高いことを示唆していると研究代表者は考えている。また、CNC水溶液および低濃度XG水溶液は、低せん断粘度かつShear-thinning性流体 (せん断粘度がせん断速度に対して減少する非ニュートン流体) であり、その粘性挙動は血液のそれと類似しているため、光弾性計測が可能な血液模擬材料として利用できるポテンシャルを有している。(Muto et al., APS/DFD, 2019)

## (3) 応力値の妥当性の検証 と (4) 応力場の可視化実験

流体応力場と位相差分布の空間強度分布の違いに関して調査を実施した。実験同様の構造・寸法を有する三次元流路内を流れる高分子流体の応力場の数値解析は、COMSOL Multiphysics®を用いて実施された。高分子水溶液のShear-thinning特性を模擬するために非ニュートン流体モデル (Carreau) [1] を適用した。位相差分布の実験結果 (図6 (a)) と応力場の数値解析結果を照らし合わせた結果、両者の空間強度分布が良い一致を示したため、応力光学則 (位相差と応力の線形比例関係) [3] が成立することを確認した (図6 (b))。 (武藤ら, 日本流体力学会年会, 2019)

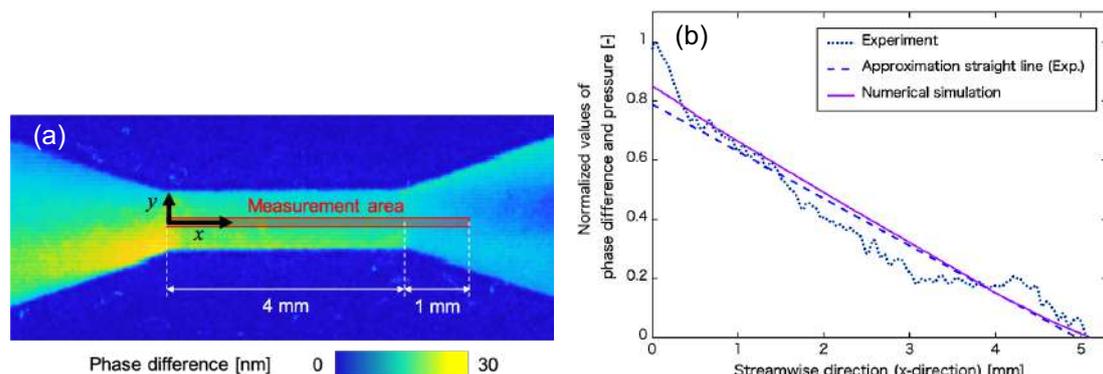


図6 (a)計測範囲における、(b)位相差の計測値と圧力分布の計算値との比較 [2]

位相差と応力値が対応した校正曲線 (応力光学係数 [3]) の取得に向けて、レーザードップラー式非接触応力センサを用いて流路壁面近傍の流体せん断応力の計測を試みた。しかし、位相差は主応力 (せん断応力をゼロにした面に作用する垂直応力) に比例するため、せん断応力を用いる校正は不向きであり、また、この方法では白濁した高分子流体の透過率の低さが計測に支障をきたすことが判明した。上述の事態を鑑みて、校正手法を、粘度や応力を非接触計測できるレオロジー測定手法の Dripping-onto-substrate capillary break-up extensional rheometry (CaBER-DoS システム)[4]に変更した。伸張状態下の高分子流体の液系に作用する位相差を光弾性計測することで、伸張応力および位相差の同時計測を実現した (図 7)。伸張応力は、液系半径の時系列変化の観測により非接触計測でき、せん断応力が作用しないため主応力と同値とみなせる。伸張応力および位相差の計測値を用いて、キサタンガム水溶液 (濃度 0.5 wt%) の応力光学係数を導出した結果、 $8.11 \times 10^{-8}$  [Pa<sup>-1</sup>]となった。本成果は、査読付き国際誌へ投稿中である。取得した応力光学係数および光学的厚さ分布により、流体応力場の可視化に成功した (図 8)。現時点の応力変換は簡易な方法であり、屈折率が低減される液系中央以外の領域では計測精度が粗いため、レイトレーシング補正により可視化精度の向上が狙える。さらに、高分子鎖の配向方向 (屈折率楕円体) も考慮する必要がある。(武藤ら, 日本流体力学学会年会, 2020) (Muto et al., APS/DFD, 2020)

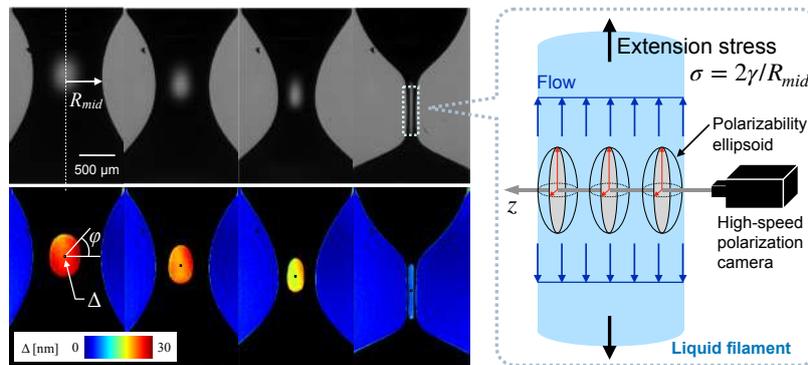


図 7 伸張状態下における高分子流体の液系の位相差分布計測

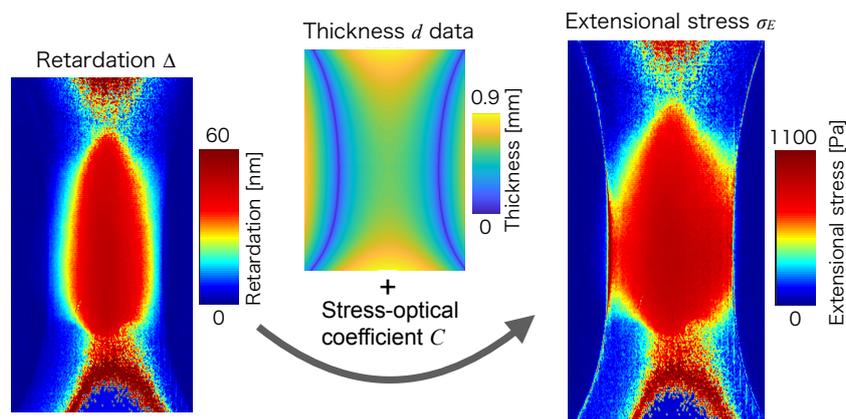


図 8 伸張状態下における高分子流体の流体応力場の計測結果

〈引用文献〉

- [1] J. Boyd, J. M. Buick, and S. Green, Analysis of the casson and carreau-yasuda non-newtonian blood models in steady and oscillatory flows using the lattice boltzmann method, *Physics of Fluids*, 19 (2007) 093103
- [2] 武藤真和, 田川義之, 動的流体応力場の実験的可視化手法の開発, *ながれ*, 38 (2019) 419-422.
- [3] D. Noto, Y. Tasaka, J. Hitomi, and Y. Murai, Applicability evaluation of the stress-optic law in newtonian fluids toward stress field measurements, *Physical Review Research*, 2 (2012) 043111
- [4] G. H. McKinley and A. Tripathi, How to extract the newtonian viscosity from capillary breakup measurements in a filament rheometer, *Journal of Rheology*, 44 (2000) 653-670

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 武藤真和, 田川義之	4. 巻 38
2. 論文標題 動的流体応力場の実験的可視化手法の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 419-422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Masakazu Muto, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Measurement of Unsteady Stress Field of Extending Liquid Polymer
3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (APS DFD) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武藤 真和, 田川 義之
2. 発表標題 光弾性を利用した伸長状態下の高分子流体の流体応力場計測
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中峰 健登, 武藤 真和, 田川 義之
2. 発表標題 矩形マイクロ流路内定常層流の理論応力場と実験計測
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河合 脩真, 宮崎 優太, 武藤 真和, 田川 義之
2. 発表標題 集束形状型マイクロジェット貫入による軟質材料内応力場の可視化
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masakazu Muto, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Development of experimental visualization method for unsteady hydrodynamic stress field by using photoelasticity of liquid polymer
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (APS/DFD) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masakazu Muto, Yuto Miyazaki, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Photoelastic measurement of polymer solutions for visualization of hydrodynamic stress field: view for application in medical diagnosis
3. 学会等名 The 15th Asian Symposium on Visualization (ASV15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 マイクロ・ナノ熱工学の進展編集委員会 代表者 丸山茂夫 編集委員一同	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 808
3. 書名 マイクロ・ナノ熱工学の進展	

〔産業財産権〕

〔その他〕

動的流体応力場の実験的可視化手法の開発  
[http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=38-6\\_tokushu8.pdf&dir=35](http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=38-6_tokushu8.pdf&dir=35)  
 所属研究室WEBページ  
<http://web.tuat.ac.jp/~tagawayo/>  
 武藤真和 research map  
<https://researchmap.jp/mmuto/>

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
研究協力者	宮崎 優太  (Miyazaki Yuta)		
研究協力者	中峰 健登  (Nakamine Kento)		
研究協力者	河合 脩真  (Kawai Shuma)		
研究協力者	スーホア ザング  (Xuehua Zhang)		
研究協力者	アンドレス フランコゴメス  (Andres Franco-Gomez)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	田川 義之  (Tagawa Yoshiyuki)		

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			
カナダ	University of Alberta			
中国	Tsinghua University			
チリ	University of chile			