

〔特集〕 注目研究 in 年会 2019

動的流体応力場の実験的可視化手法の開発

東京農工大学大学院 工学研究院

武藤 真和*

東京農工大学大学院 工学研究院

田川 義之

Development of experimental visualization method for hydrodynamic stress field

*Masakazu Muto, Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

Yoshiyuki Tagawa, Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

*E-mail : mmuto@go.tuat.ac.jp

1 はじめに

流体機器の設計開発に伴う応力場の実験的調査では、重錘型圧力計、マノメータ、ブルドン管圧力計等の接触式の点計測手法の利用がほとんどである。これらは、計測用の孔や流路を設けることで流動場に影響を与えるだけでなく、応力集中部を逃す可能性もあり、正確な計測に困難を有する。対して、感圧塗料は物体壁面に作用する圧力を光の明暗として可視化できるが、壁面の色素分子と酸素分子との相互作用を利用するため計測対象が気体に限られ、バルク流体の応力場も可視化できない。

流体応力場計測の需要は医療分野でも高い。例えば、脳動脈瘤の破裂メカニズムの解明には血管壁に作用する壁面せん断応力の計測が鍵となる²⁾。現状の実験では、PIVなどの光学計測による流速場と、壁面からの空間的位置情報とを照らし合わせることで壁面せん断応力を算出するが、壁面の脈動による移動や粒子付着などの技術的問題や非ニュートン数値モデルの学術的問題³⁾から信頼に欠ける。また、4D flow MRIでは血管内の血流の流速場を直接的に可視化できるが、現状では時空間分解能が低い(0.63 mm, 36 ms)ため大動脈解析に限られる^{4,5)}。

そこで我々は、非接触かつ非定常な流体応力場の計測手法の確立を目指し、応力場の光学的可視化手法として知られる光弾性法に着目した。光弾性法は、従来、アクリル樹脂等の透明な固体の応力場の光学計測手法として発展してきた⁶⁾。しかし、本研究室ではゼラチンゲル内の応力場計測に成功したことで、従来の制限を拡張する突破口を開いた⁷⁾。ゼラチンゲルは(熱により可逆的にゾルゲル転移する)固体と液体の中間的な性質を併せ

持つ高分子であり、高分子流体を計測対象として利用すれば、光弾性法を流体計測に適用できると考えられる。

光弾性法では、外力により応力を生じる透明な弾性体が、偏光に対して複屈折性を表す現象を利用する⁸⁾。複屈折とは、光を透過する物体内で二つの屈折光線が現れる現象であり、伝播が速い光と遅い光が現れることで両光の間に位相差が生じる。この位相差 Δ は主応力差 σ_1 に比例することが Brewster の法則⁸⁾として知られており、以下の Eq. (1)で表される。

$$\Delta = \left(\frac{2\pi t}{\lambda}\right)C\sigma_d = \left(\frac{2\pi t}{\lambda}\right)C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

ここで、 t は計測厚さ、 λ は透過光の波長、 C は光弾性定数、 σ_1 、 σ_2 は互いに直交する主応力である。

本稿では、高速度偏光カメラを利用した、高分子流体に作用する位相差分布の可視化実験について報告する。また、高分子流体の(非定常から定常流れになるまでの)緩和時間を計測した。さらに、実験結果と応力場の数値解析結果を比較することで、流体応力場の可視化手法に向けた本計測手法の妥当性を検証したため、その経緯を述べる。

2 高速度偏光カメラによる光弾性計測原理

高速度偏光カメラの原理について述べる。高速度偏光カメラ(CRYSTA P1-P, Photron Co., Ltd., 最高撮影速度 1.55 Mf.p.s.)は光弾性計測を応用した撮影機器であり、位相差を画像の輝度値から算出できる。画像センサの各ピクセルには異なる4方向の偏光子が付属する(Fig. 1(a)).

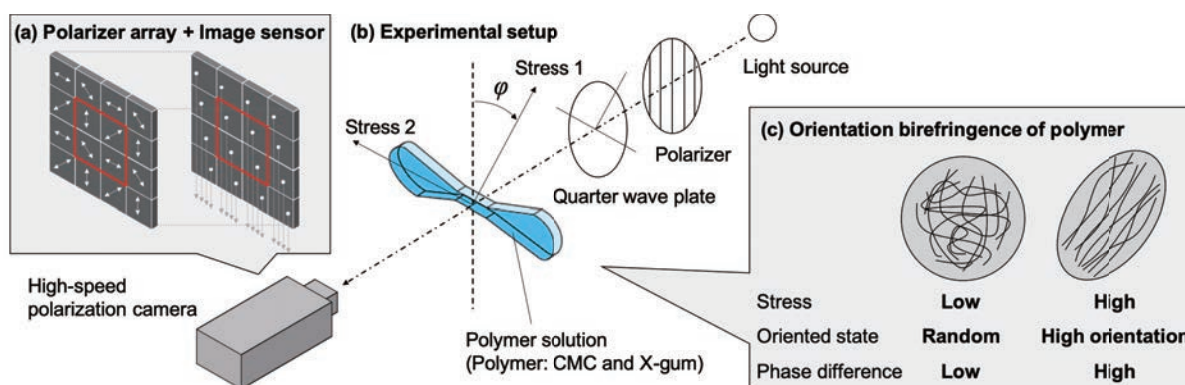


Fig. 1 Schematic of an optical system using the orientation birefringence of polymers for visualization of hydrodynamic stress field. (a) Polarizer array with image sensor of the high-speed polarization camera. (b) The experimental setup for hydrodynamic stress field measurements. (c) The orientation state of a liquid polymer with a relatively long molecular chain under imposing the external stress.

隣り合う 2×2 の 4 つの偏光子は全て異なる方向を向き、各素子で検出する輝度を偏光方向 0° , 45° , 90° , 135° の順に I_1 , I_2 , I_3 , I_4 とする。各々の輝度から、位相差 Δ は Eq. (2)-(3) により算出される。

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}{2} \quad (2)$$

$$\Delta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(I_3 - I_1)^2 + (I_2 - I_4)^2}}{I_0} \quad (3)$$

従来の光弾性実験では、4 方向の偏光情報を取得するために、カメラと撮影対象の間に設置した直線偏光板を回転させていたため、高速で変化する現象を計測できなかった。一方、偏光カメラはその特殊な画像センサにより同時に 4 方向の偏光情報を各 4 ピクセル毎に得ることができるため、応力ベクトル場の高速計測が可能となる。

3 実験装置

本計測手法では、円偏光板が付属した光源 (SLG-55-G, REVOX Inc., 波長 520 nm) と偏光カメラの間に計測対象を置く、シンプルな光学系を構成する (Fig. 1 (b)). 実験では、シリンジポンプにより高分子流体をガラス製準二次元型流路へ流し、流量 0-30 ml/min における高分子流

体の位相差を観測する。流路は狭窄部を有しており、狭窄部流路長さは 4 mm、矩形断面は $1 \times 1 \text{ mm}^2$ である。高分子の種類は carboxymethyl cellulose (CMC), xanthan gum (X-gum) の二種類を用いる。高分子濃度は、CMC 1-2 wt%, X-gum 0.1-0.5 wt% とする。また本報告では、実験で計測した位相差分布の妥当性を検証する際に、数値解析ソフト (COMSOL Multiphysics®) により求めた流体応力場の数値解析結果との比較を行う。

4 高分子流体の位相差分布の可視化

本計測手法により可視化した高分子流体の位相差分布を Fig. 2 に示す。濃度 1 wt%, 2 wt% の CMC 水溶液を Fig. 2(a, b) に、濃度 0.1 wt%, 0.5 wt% の X-gum 水溶液を Fig. 2(c, d) に示す。高分子流体が位相差を示す理由は、その配向状態に関する (Fig. 1 (c)). 高分子は、通常、ランダムに絡み合うことで形状を保つが、応力が加わると高配向状態へ遷移する。この際、高分子の透過光は配向複屈折を発生し、位相差が大きく現れることが知られている⁹⁾。

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。この理由として、まず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) が異なることが要因として考えられる。

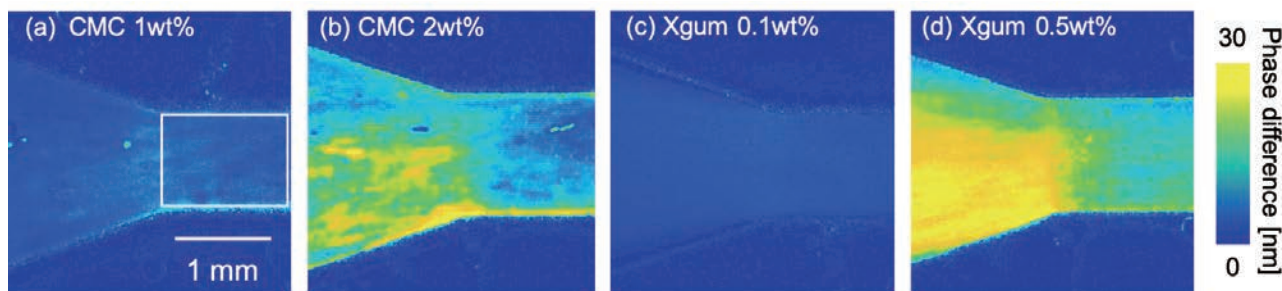


Fig. 2 Visualization of phase difference distribution in steady flow field of (a, b) CMC solution and (c, d) Xanthan gum solution.

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⁹⁾。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分布が異なると考えられる。次に、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 X-gum 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^{10,11)}ため、高分子濃度の上昇に伴い粘度が増加すると、流体応力が上昇すると考えられる。

計測時には(光の屈折を生じる)高分子の密度勾配やキャビテーション気泡による輝度変化が位相差の誤差として表れた。特に CMC 水溶液では、溶解しきれていない高分子のダマが計測ノイズの要因となり、位相差分布の斑を確認できる (Fig. 2(b))。

高分子流体は粘弾性流体であるため、応力場に対応した流れ場に発達するまでの時間(緩和時間)を要する。そこで、本計測手法により各種高分子流体の緩和時間を撮影速度 5,000 f.p.s. で計測した (Fig. 3)。横軸は流入開始からの経過時間を、縦軸は (Fig. 2(a) に示す白線の計測範囲における) 位相差の平均値を示す。平均位相差の緩和時間は、CMC 水溶液では 670–1,800 ms、X-gum 水溶液では 100–200 ms であり、高分子濃度の上昇に伴い、(粘度増加により) 緩和時間が延びることも確認できる。本計測で得た高分子流体の緩和時間は、粘弾性による緩和時間と複屈折の発現に要する緩和時間の合計であると考えられるが、後者は数百 ns 程度¹²⁾と非常に短いため無視できる。よって、従来ではレオメータにより計測していた粘弾性流体の緩和時間を、非接触かつ高時間分解能で計測できるという点でも、本計測手法の価値は高い。

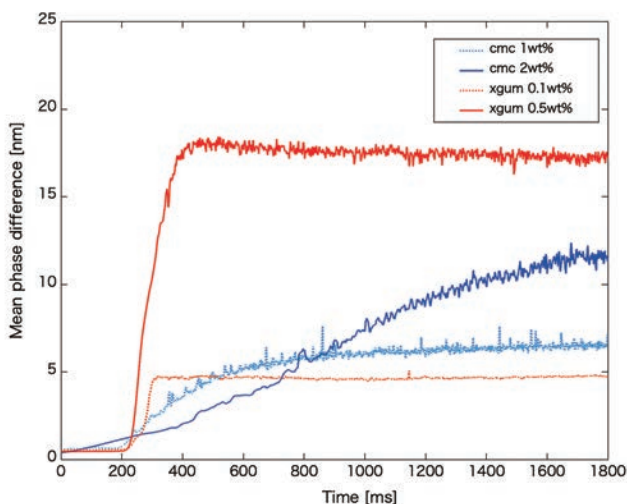


Fig. 3 Difference of relaxation time of mean phase difference with various polymers and its concentration.

5 流体応力場に対応した位相差の空間強度分布の評価

位相差分布が流体応力場に対応した空間強度分布であることを、応力場の数値解析結果を用いることで検証した。現状の本計測手法では、計測可能な値が位相差分布に限られる。そこで、数値解析ソフトにて実験同様の構造・寸法を有する三次元流路を構築し、X-gum 水溶液流入時の圧力場を求め、実験結果と比較した。この際、X-gum 水溶液の shear-thinning 特性を模擬するために Carreau モデル¹³⁾を用いた。実験同様の流量 (30 ml/min) で流入口から溶液を流入し、出口を大気開放とした。流路高さ中央の断面における圧力場の数値解析結果を Fig. 4 に示す。位相差分布の可視化結果と同様に、狭窄部付近で圧力勾配が特に大きく変動している様子を確認できる。

狭窄部流路の流れ方向における、位相差勾配(実験値)と圧力勾配(数値解析値)との比較を試みた。計測範囲は、長さ 4 mm の狭窄部流路全体とその後流 1 mm を含める 5 mm とした (Fig. 5)。位相差 Δ と主応力差 σ_d は比例関係にある (Eq. (1)) が、物理量の次元が一致しないため、Eq. (4)により正規化することで両者を比較した。なお、添字の min と max は、計測範囲内における、位相差および主応力差の最小値・最大値を、 Δ は各ピクセルの位相差の値を表す。

$$\frac{\Delta - \Delta_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \propto \frac{\sigma_d - \sigma_{d,min}}{\sigma_{d,max} - \sigma_{d,min}} \quad (4)$$

正規化した位相差勾配と圧力勾配を Fig. 6 に示す。実験結果の位相差分布は変動しているが、これは溶けきれていない高分子の密度勾配により生じた計測誤差である。そこで、実験値から一次の近似直線を得て、図中に示した。この近似直線と圧力勾配の直線は、正規化した値と傾きのどちらも概ね一致していた。以上より、位相差の空間強度分布は流体応力場に対応するため、本計測手法は応力集中箇所の特定、および、その相対強度の計測に有用であるといえる。

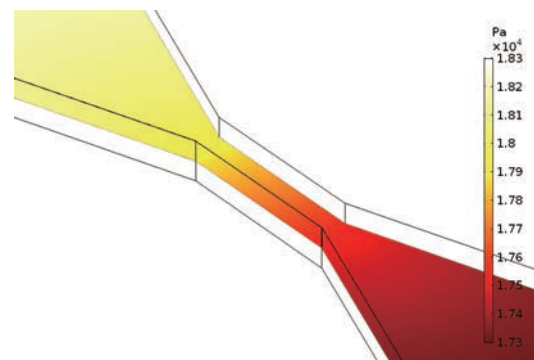


Fig. 4 Simulated pressure field in a 3D channel model, which has same geometry of the experimental one.

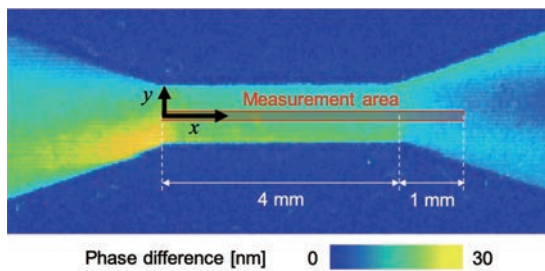


Fig. 5 Measurement area of phase difference gradient to compare with the pressure gradient from the numerical simulation.

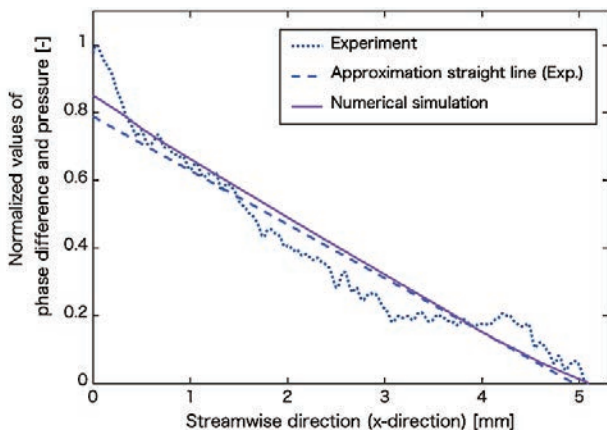


Fig. 6 Normalized values of phase difference and pressure vs. streamwise direction of the channel.

6 おわりに

本稿では、高速度偏光カメラと鎖状高分子を利用した計測系による、高分子流体の位相差分布 (流体応力の空間強度分布に対応) の可視化結果について報告した。また本計測手法が、時々刻々と変動する流体応力場の計測、および、応力集中箇所の特特定に対して有効な手段であることを示した。しかしながら、高分子流体の緩和時間は高分子の種類と濃度により異なるため、実験では計測対象の時間分解能を考慮した作動流体の選定が重要であることが示唆された。また、位相差の応力変換に必要な補正係数を求めるための校正実験を実施していない。本研究を通して顕在化した上述の課題については、今後の研究の発展に期待して頂きたい。

本成果は本研究の最終目標である「動的流体応力場の可視化」のスタート地点に過ぎないが、流体の位相差分布の実験的可視化に成功した本計測手法は、流体計測の新境地を開く高いポテンシャルを秘めた計測法であることを示唆している。

謝辞：ご討論頂いた東京農工大学准教授田川義之先生、同大学大学院生宮崎優太氏と鶴澤雅氏に感謝の意を表す。本研究は、JSPS 科研費基盤(A)(17H01246) および研究活動スタート支援 (19K23483) の助成を受けた。

引用文献

- 1) Gregory, J. W., Asai, K., Kameda, M., Liu, T., and Sullivan, J. P.: A review of pressure-sensitive paint for high-speed and unsteady aerodynamics, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part G*, 222 (2008) 249-290.
- 2) Shojima, M., Oshima, M., Takagi, K., Torii, R., Hayakawa, M., Katada, K., Morita, A., and Kirino, T.: Magnitude and Role of Wall Shear Stress on Cerebral Aneurysm, *Stroke*, 35 (2004) 2500-2505.
- 3) Boyd, J. and Buick, J. M.: 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.
- 4) Potters, W. V., Cibis, M., Marquering, H. A., vanBavel, E., Gijzen, F., Wentzel, J. J., and Nederveen, A. J.: 4D MRI-based wall shear stress quantification in the carotid bifurcation: a validation study in volunteers using computational fluid dynamics, *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 16 (2014) 162.
- 5) Ooij, P. V., Potters, W. V., Collins, J., Carr, M., Carr, J., Malaisrie, S. C., Fedak, P. W. M., McCarthy, P. M., Markl, M., and Barker, A. J.: Characterization of abnormal wall shear stress using 4D flow MRI in human bicuspid aortopathy, *Annals of Biomedical Engineering*, 43 (2014) 1385-1397.
- 6) 梅崎栄作: 光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望, *精密工学会誌*, 79 (2013) 607-611.
- 7) Miyazaki, Y., Endo, N., Kawamoto, S., Kiyama, A., and Tagawa, Y.: High-speed measurement of stress fields in soft material impacted by highly-focused microjets using photoelastic technique, *Proc. 19th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics* (2018).
- 8) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸三: 光弾性実験法, 日刊工業新聞社 (1965).
- 9) 小池康博: 高分子の光物性, 高分子学会編 (1994).
- 10) Yang, H. X. and Zhu, L. W.: Viscosity properties of sodium carboxymethylcellulose solutions, *Cellulose*, 14 (2007) 409-417.
- 11) Zhong, L., Oostrom, M., Truex, J. M., Vermeul, R. V. and Szecsody, E. J.: Rheological behavior of xanthan gum solution related to shear thinning fluid delivery for subsurface remediation, *Journal of Hazardous Materials*, 244-245 (2013) 160-170.
- 12) 吉岡甲子郎: 電気複屈折と電気二色性, *生物物理*, 2 (1962) 160-168.
- 13) Escudier, M. P., Gouldson, I. W., Pereira, A. S., Pinho, F. T., and Poole, R. J.: On the reproducibility of the rheology of shear-thinning liquids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 97 (2001) 99-124.