

応力光学法則の適用限界を明らかに

～複雑流動の光弾性計測に新たな指針～

ポイント

- ・高分子溶液などの複雑な流体に対して、複屈折を用いた光弾性計測は何をしてくれるのかを調査。
- ・制御性と再現性に優れた振動回転円筒内流れを用いて、光弾性計測の「答え合わせ」を実施。
- ・応力光学法則の適用限界を明らかにすることにより、今後の計測手法発展に貢献。

概要

北海道大学大学院工学研究院の田坂裕司教授、ペンシルバニア大学の能登大輔研究員（研究当時：北海道大学大学院工学研究院）、名古屋大学の大家広平助教（研究当時：北海道大学大学院工学研究院）の研究グループは、複屈折^{*1}による光弾性計測を複雑な流体の非定常せん断流れに用いた場合、呈する干渉色とその時間変化が、必ずしも局所の流れのひずみやひずみ速度などと一致しないことを、精緻な流れの計測により明らかにしました。この結果は、現在開発が進む、光弾性を用いた流れの応力場計測法とその適用に一石を投じるものであり、新たな開発の指針とさらなるイノベーションがもたらされることが期待されます。

様々な機能性を持つゲルなど、高分子科学の発展がもたらす「柔らかい材料」の可能性が広がっています。材料の生産性を向上させるには、生産工程で生じる材料の流動状態を把握することが重要ですが、その方法として現在、プラスチックなど固体材料の計測で用いられてきた、複屈折による光弾性計測を流動体に適用する研究が進められ、「複雑な流体の瞬時応力場計測が可能」になる夢の技術として注目されています。複雑な内部ミクロ構造を持たない単純な流体に対しては、確かに数値計算などと一致する結果が得られる一方で、答えの分からない複雑な流体に対してもたらされる結果は、実際に何が計測されているのか不透明なままの状態が続いていました。

本研究では、研究グループが別途複雑流体の物性計測のために用いてきた、振動回転する円筒容器内の流れに対して精緻な流れ計測を行い、瞬時のひずみ速度場とその時間変化を定量化しました。制御性と再現性に優れた流れの装置を用いることで、光弾性計測の応用対象である高分子水溶液などの複雑流体に対して、光学パターンとして得られる複屈折（ミクロ構造の状態に対応）との直接比較・評価をすることが可能となりました。

実験の結果、これまで「対応する」と言われてきた瞬時の複屈折と局所ひずみ速度は一致せず、位相を調整した変動や、ひずみに相当する積分値、時間変動の実効値のどれをとっても結果は同じでした。つまり、「複雑な流体の非定常なせん断流れに対しては、複屈折からはひずみ速度場、ひいては応力場は計測できない」ことを意味します。この原因を探るため、思考実験とそれに伴う検証実験を行い、少なくとも複屈折とひずみ速度が実効値のレベルで一致するためには、計測対象の複雑流体が、弾性を持つような十分に長い緩和時間^{*2}を持つことが必要であることを示しました。

これらの結果は、開発の機運を後退させる一見悲観的な結果に見えますが、「複屈折が反映している情報の正体」と手法の限界や適用範囲が明示されたことで、複屈折を用いた計測法の新たな展開と、この結果を基にした新たな技術のイノベーションがもたらされることが期待されます。

なお、本研究成果は、2025年10月24日（金）公開のNature Communications 誌に掲載されました。

【背景】

粘弾性など複雑な特性を持つ流動体は、材料や化学物質の生産現場をはじめとして、生体内の流動や大規模な地球現象まで、様々な形で遍在しています。その流れを理解し制御するためには流れの応力分布を知る必要がありますが、変形と応力の関係を表す構成方程式とそこに含まれるレオロジー物性が不明なものも多く、仮に流れの速度分布が分かってもそこから力を求めることができません。

近年、プラスチックなどの固体高分子材料に用いられる光弾性計測を複雑流体の流れに適用する研究が盛んに行われていますが（図 1a、複屈折の例）、「複屈折が流れの局所ひずみ速度に対応する」といった未検証の強い仮定が用いられており、どこまで使える・使って良い技術なのか不安がつきまっています。本研究は、グループでこれまで行ってきた複雑流体のレオロジー物性計測の知見を生かし、光弾性計測の適用限界を明らかにするものです。

【研究手法】

本研究では、振動回転する円筒内に物性の異なる高分子水溶液を満たし、画像処理計測を用いた精緻な流れ場計測からひずみ速度場の時間変化を求め、別途同じ装置を用いて行った光弾性計測結果の「答え合わせ」を行いました（図 1b）。再現性と制御性に優れた流れの装置は、局所ひずみ速度と複屈折の時間変化との比較を可能にしました。

続いて、先の実験結果を受けて思考実験を行い、光弾性計測の結果が複雑流体の何を表しているのかについて仮説を立てるとともに、物性、特に緩和時間の異なる高分子溶液の計測結果を用いて仮説の検証を行いました。

【研究成果】

実験による上記答え合わせの結果はまず、「複屈折の指標量は局所のひずみ速度と一致しない」ことでした。ひずみ速度と複屈折の時間変化から作成したリサージュ図形（図 1c）は羽を広げた蝶の形を示しており、強い非線形の関係がうかがえます。これらは、単純な位相差の調整や微積分、実効値を使った比較でも両者が全く対応しないことを示しています。

この結果を受けて、これまでの研究知見から思考実験を行いました。流れの発生装置から与えられた変形は、多数の高分子微細構造を含む仮想的な流体の塊（流体塊）に回転と変形をもたらします。また同時に、そこに含まれる高分子構造が引き延ばされるなど変形を受けます。複屈折は数百ナノメートルの波長を持つ光と微細構造との干渉によって生じるため、それらの回転と変形全ての影響を受けます。つまり、期待していた流体塊のひずみ速度だけを複屈折から取り出すことはできないということです。流体塊の変形状態と高分子構造のそれが一致するためには、変形に対する高分子構造の緩和時間が流れの変化の時間スケールに対して十分に長い必要があります。つまりは、粘性と弾性を併せ持つ流動体である粘弾性流体の中でも、弾性の影響が強くより固体的に振る舞う流体です。なお、高分子溶液の緩和時間を変化させて行った結果は予想通り、緩和時間が短くなれば複屈折とのずれが大きくなるものでした。

【今後への期待】

これらの結果は、開発の機運を後退させる一見悲観的な結果に見えますが、「複屈折が反映している情報の正体」と手法の限界や適用範囲が明示されたことで、複屈折を用いた計測法の新たな展開と、この結果を基にした新たな技術のイノベーションがもたらされることが期待されます。また実験に用いた装置と計測法は、今後新たな計測法を開発する際の検証プラットフォームとして期待されます。

【謝辞】

本研究は、JST「さがけ」JPMJPR2106 の助成を受けたものです。

論文情報

論文名 Unsteady flows uncover the limits of the stress-optic law (非定常流れが明らかにする応力光学法則の限界)
著者名 能登大輔¹、大家広平²、田坂裕司³ (¹ペンシルバニア大学、²名古屋大学大学院工学研究科、³北海道大学大学院工学研究院)
雑誌名 Nature Communications (英国総合科学誌)
DOI 10.1038/s41467-025-64461-4
公表日 2025 年 10 月 24 日 (金) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 教授 田坂裕司 (たさかゆうじ)

T E L 011-706-6371 F A X 011-706-6373 メール tasaka@eng.hokudai.ac.jp

U R L <https://lfc-me.eng.hokudai.ac.jp/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

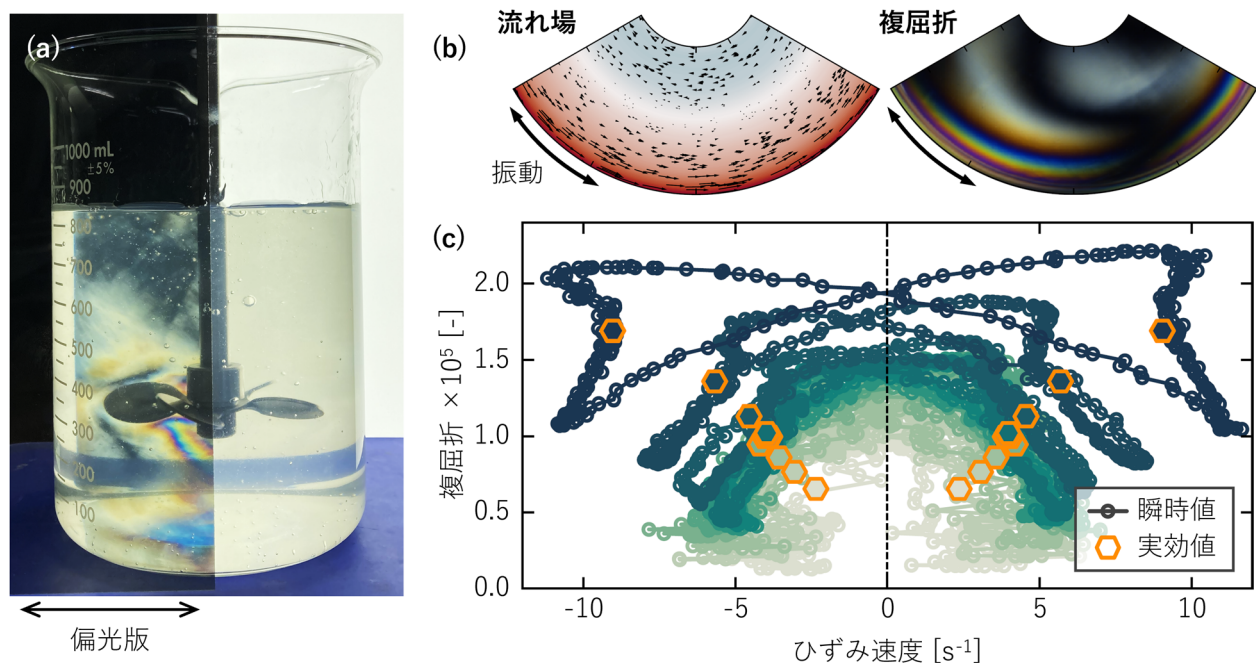


図 1. (a) 流動複屈折を示すキサンタンガム（高分子）水溶液。(b) 振動円筒による流れ場と複屈折場の計測。(c) 複屈折と局所ひずみ速度の直接比較。

【用語解説】

- *1 複屈折 … 直交させた 2 枚の偏光フィルムで対象を挟み、白色光を照射すると、計測対象に含まれる内部構造のひずみ状態を反映してカラフルなパターンが得られる。
- *2 緩和時間 … 流動物質に変形を加えた際に、分子粘性により変形が緩和される時間スケール。高分子溶液などについて、この時間が長いと一般的に弾性の影響が現れる。