



光で見る！一軸伸長流動するミセル構造のダイナミクス — 全視野伸長レオ・オプティクス計測への挑戦 —

【発表のポイント】

- 一軸伸長流れの中で変形する複雑流体を対象に、応力と光学応答を同時にとらえる全視野・非接触型の伸長レオ・オプティクス計測技術を開発。
- 界面活性剤水溶液（CTAB/NaSal 系）で形成されるひも状・ネットワーク状ミセルの流動配向挙動を光学的に可視化。
- 本新技術により一軸伸長流動下における応力光学則の成立を実証し、応力光学係数の定量化に成功。

【概要】

液体の中には、流れると形を変える「複雑流体（注1）」と呼ばれるものがあります。こうした流体の性質を理解するには、流れの中で分子がどのように配向し、それがどんな応力を生み出しているのかを同時に調べることが重要です。

界面活性剤水溶液は、濃度や塩の種類によってひも状やネットワーク状のミセル構造をつくり、その構造の違いが粘り気（レオロジー特性）を大きく変えます。これまでミセルの構造変化は主に「せん断流れ」の中で研究されてきましたが、「一軸伸長流動」のように流れが引き伸ばされる場では、空間的に流れが不均一になり、観察が難しいことが課題でした。また、流れによる光学的な変化（複屈折（注2））と応力の関係を示す「応力光学則」がこの条件で成り立つかどうか、これまで明らかではありませんでした。

名古屋工業大学電気・機械工学類の武藤真和助教と玉野真司教授の研究グループは、液滴の落下によって一軸伸長流れをつくり出し、高速度偏光カメラを用いた「全視野伸長レオ・オプティクス計測技術」を開発しました。この技術を使い、CTAB/NaSal 水溶液中のミセル構造を対象に、伸長応力と位相差（複屈折の空間積算量）の分布を同時に観測することに成功しました（図1）。また、位相差分布を詳細に解析することで、流れの中でどこに応力が集中し、どのようにミセルが配向しているかを把握しました。その結果、エラストキャピラリー領域（注3）と呼ばれる条件下で応力光学則が成り立つことを実証し、一軸伸長流れにおける応力光学係数を算出できることを示しました。得られた係数は、せん断流れでの既存の報告値と一致し、ミセルの濃度が高くなるほど大きくなる傾向が見られました。この新技術により、これまで難しかった伸長流動下でのミセル配向ダイナミクスを可視化できるようになり、複雑流体の構造がどのように形成されるかを理解するための新たな手がかりを提供します。

本技術は、メガネやカメラレンズ、スマートフォンの画面保護フィルムなどに使われる樹脂材料の製造過程で歪みのない透明材料（ゼロ複屈折材料）をつくる技術につながり、光学デバイスや医薬品製造プロセスの最適化にも応用が期待されます。さらに、非接触・非破壊で計測が可能のため、環境にやさしく、リサイクル材や生分解性プラスチックなどの次世代エコマテリアルの品質評価にも役立ちます。

本研究成果は、米国物理学協会（AIP）が刊行する学術誌 *Physics of Fluids* に 2025 年 10 月 9 日付で掲載され、*Featured Article*（注目論文）に選ばれました。

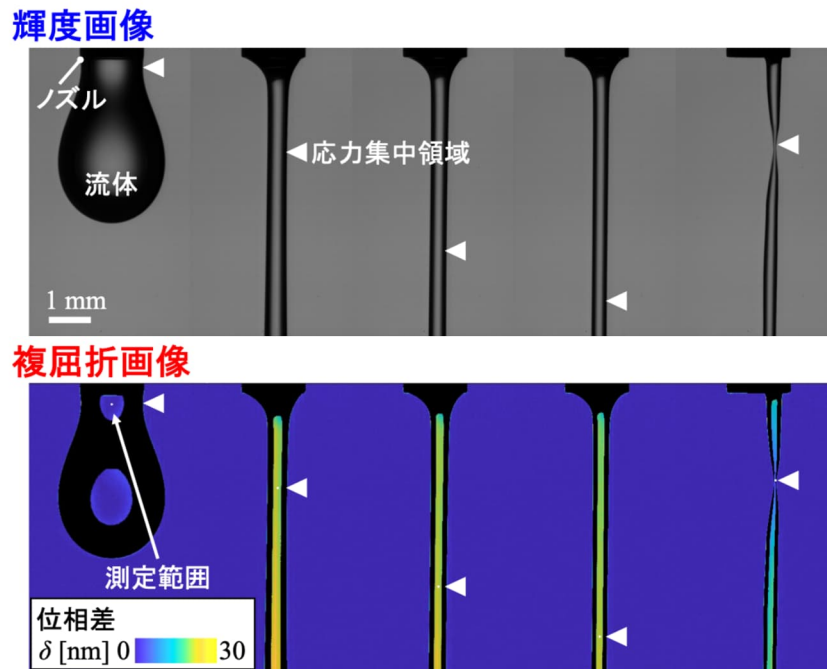


図1 液滴落下過程における伸長応力および位相差分布の可視化 (© AIP Publishing)

【研究の背景】

界面活性剤水溶液は、濃度や塩の種類によって球状・棒状・ひも状・ネットワーク状など多様なミセル構造を形成し、その構造変化が液体の粘り気や弾性（レオロジー特性）に大きく影響します。特にひも状ミセル溶液は、高分子溶液に似た粘弾性を示し、流れの強さによって構造が壊れたり回復したりするなど、複雑な流動挙動を示します。

こうした複雑流体の性質を理解するには、流れの中でミセルがどのように配向・変形し、それがどのような応力を生むのかを同時に評価することが重要です。これまで、この対応関係は主に「せん断流動」で調べられ、光学的な異方性（複屈折）と応力の比例関係（応力光学則）が多くの系で確認されてきました。

一方、「一軸伸長流動」では、流れ方向に速度勾配が大きく変化するため、流体内部の構造変化を正確に捉えることが難しく、従来のレーザ光による点計測では適切な複屈折データを得ることができませんでした。この課題を解決するには、流れ全体を一度に観察できる「全視野」計測によって、複屈折分布を面的にとらえる新しい光学手法が必要です。特に、液滴の落下によって自然に生じる一軸伸長流れは、粘弾性流体の分子配向を観察するのに適した系であり、高い時間分解能と空間分解能を備えた全視野型レオ・オプティクス計測がその鍵を握ります。

【研究の内容・成果】

本研究では、界面活性剤水溶液（CTAB/NaSal 水溶液）を対象として、一軸伸長流動下におけるミセル配向構造と応力応答の関係を明らかにするため、新しい「全視野伸長レオ・オプティクス計測手法」を開発しました（図2）。液滴の落下によって形成される細い液糸を高速度偏光カメラで撮影し、時間とともに変化する複屈折分布や分子配向角を取得しました。さらに、液糸の半径の時系列変化を画像解析することで、非接触的に伸長応力を算出し、応力と複屈折を同時に定量評価することに成功しました。

CTAB/NaSal 水溶液の濃度を変えて測定を行った結果、エラストキャピラリー領域において複屈折と伸長応力が時間的に同様の挙動を示し、両者の間に明確な線形関係が成り立つことを確認しました。このこ

とから、一軸伸長流動下でも応力光学則が成立することを実験的に実証しました。さらに、応力光学則から求めた応力光学係数は、せん断流動で報告されている値とよく一致しました。また、ミセルモル濃度（液体中に存在するミセルの数に相当する指標）が高くなるにつれて、この係数の絶対値が増加する傾向が見られ、ミセルの存在量が光学応答の強さを決める主要因であることが分かりました（図3）。

本研究で確立した手法は、局所的な応力と分子配向を同時に可視化・定量化できる新しいアプローチです。これにより、伸長流動下におけるミセル構造変化を空間的に捉えることが可能となり、複雑流体の構造発現メカニズムやレオロジー挙動の理解に新たな視点を提供します。

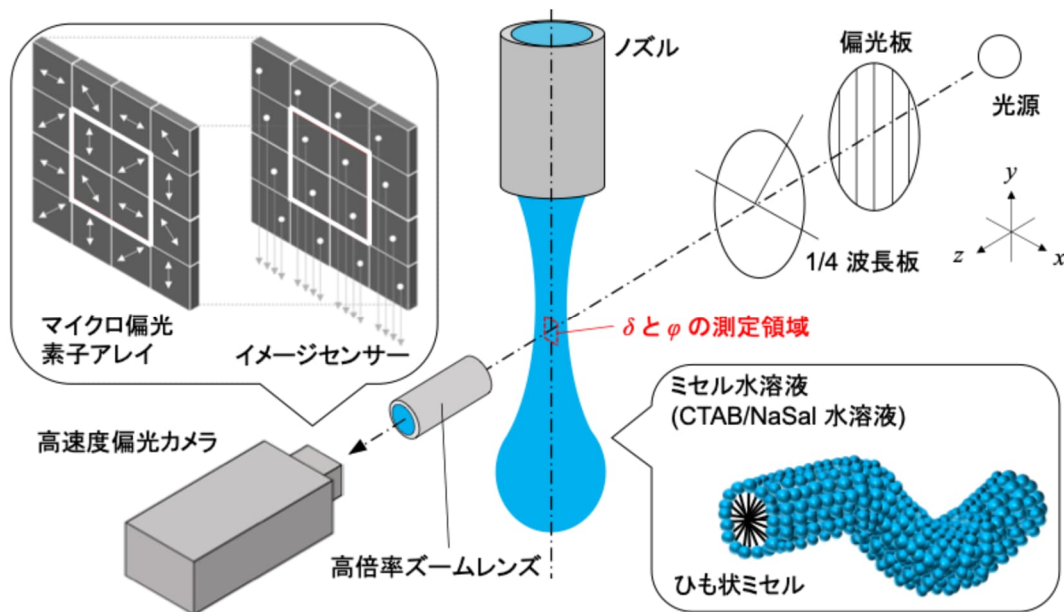


図2 全視野伸長レオ・オプティクス計測システムの外観 (© AIP Publishing)

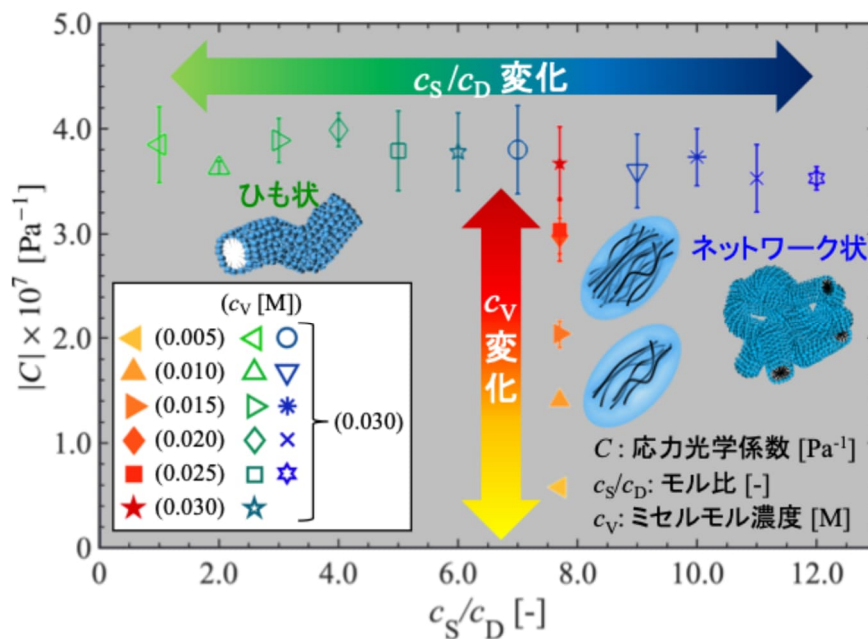


図3 応力光学係数の CTAB/NaSal モル比・ミセルモル濃度依存性 (© AIP Publishing)

【社会的な意義】

本研究で開発した全視野伸長レオ・オプティクス計測手法は、流れの中で起こる分子の配向と応力を同時に可視化できる新しい技術です。これにより、プラスチックや液晶などの材料の内部で、光の通り方（複屈折）がどのように生じるのかを直接観察できるようになりました。

本成果は、たとえば、メガネやカメラレンズ、スマートフォンの画面保護フィルムなどに使われる樹脂材料の製造過程で、分子の配向を制御して歪みやにじみのない透明材料（ゼロ複屈折材料）をつくる技術につながります。また、界面活性剤や高分子などの柔らかい物質（ソフトマター）の流動構造を定量的に調べられるため、ディスプレイや光学デバイス、医薬・化粧品などの製造プロセスの最適化にも応用が期待されます。さらに、本手法は非接触・非破壊で計測が可能のため、環境にやさしく、リサイクル材や生分解性プラスチックなどの次世代エコマテリアルの品質評価にも役立つと考えられます。

【今後の展望】

本研究で確立した全視野伸長レオ・オプティクス計測手法は、複雑流体が伸長流れの中でどのように構造を変化させるかを可視化できる有効な基盤技術です。今後は、CTAB/NaSal 系にとどまらず、異なる界面活性剤系や高分子溶液、液晶性溶液、さらには DNA などの生体高分子溶液にも対象を広げ、応力光学係数の計測に取り組みます。これにより、分子構造や分子間相互作用が応力光学応答に与える影響を体系的に整理し、流動によって誘起される構造変化をより普遍的に理解することを目指します。

【用語解説】

（注1）複雑流体（Complex fluids）

加える力の大きさや速さによって粘度が変わる流体の総称。血液や蜂蜜、界面活性剤などはその代表例。

（注2）複屈折（Birefringence）

物質の中を光が通るときに、光の振動方向によって屈折率が異なる現象。物体に作用する応力（厳密には主応力差）と複屈折の間には比例関係（応力光学則）があり、その比例定数を応力光学係数と呼ぶ。

（注3）エラストキャピラリー領域（Elasto-capillary regime）

弾性力と毛細管力が釣り合い、液糸が指数関数的に細くなる過渡的領域であり、強い伸長応力が生じるのが特徴。

【論文情報】

論文名： Full-field rheo-optical analysis of wormlike and networked micellar structures under uniaxial extensional flow

著者名： Masakazu Muto, Naoki Kako, Tatsuya Yoshino, and Shinji Tamano

掲載雑誌： *Physics of Fluids*

公表日： 2025 年 10 月 9 日

DOI： 10.1063/5.0290249

URL： <https://doi.org/10.1063/5.0290249>

本件への問い合わせ先

名古屋工業大学 電気・機械工学類

助教 武藤真和

TEL： 052-735-5182

E-mail： muto.masakazu@nitech.ac.jp

配信元

名古屋工業大学 企画広報課

TEL： 052-735-5647

E-mail： pr@adm.nitech.ac.jp