

36. 高分子水溶液の流動挙動転移と溶液内部の不均一さに基づくモデル化

名古屋大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻 教授 日出間 るり

概要

高分子など、大きく柔らかい分子で変形しやすいため、溶液内で容易に変形・緩和(元の形に戻る)したり、絡み合ったりする。これら高分子の形態や構造の変化は異方性を有し、溶液にかけた応力や、溶液濃度には一意に対応せず、観察する時間や長さのスケールに依存する、非線形・非平衡な流動挙動を示す。しかし、低濃度高分子溶液の急な流動転移は、いつ、どのような条件で生じるのかについて、解明されていない。そこで本研究では、高分子の変形・緩和挙動の影響に着目できる独自の二次元乱流場を用い、流動転移や各流動挙動の境界を、流体内部の高分子挙動の観点から解明することを目的とした。流動場の乱れの程度を表すレイノルズ数 Re 、高分子伸長を特徴づけるワイゼンベルグ数 Wi により、流動場を分類し、各流動場の特徴を乱流統計量解析により定量化した。そして流動転移を予測する乱流エネルギー生成の定式化を目指した。

背景および目的

高分子や紐状に会合するミセル(紐状ミセル)を形成する界面活性剤など、大きく柔らかい分子や分子集合体はソフトマターと呼ばれる。ソフトマターは変形しやすいため、溶液内で容易に変形・緩和(元の形に戻る)したり、絡み合ったりする。これらソフトマターの形態や構造の変化は異方性を有し、溶液にかけた応力や、溶液濃度には一意に対応せず、観察する時間や長さのスケールに依存する、非線形・非平衡な複雑な流動挙動を示す(複雑流体)。例えば分子量 10^6 オーダーの高分子を含む流体は、 m スケールの流路では乱流を抑制する(乱流抑制、DR)[1, 2]。一方同じ溶液が、レイノルズ数 Re が小さいにも関わらず、 μm スケールの流路では乱れた流れを誘発する(弾性不安定) [3]。これらは流体内部での高分子の変形・緩和と、渦など流体固有の構造の時間や長さのスケールが近い時、互いに相互作用し、流動場に変化が現れると考えられており、複雑流体の流動挙動変化は転移的・周期的で履歴を伴うこともある。しかし、極めて低濃度で、流動中のみ変化が現れる現象について、いつ、どのような条件で転移が生じるのかについては明らかではない。さらに高分子濃度や流動条件により流動挙動特性が異なり、変化の程度には最大値がある。現在、複雑流体が示す流動転移、各流動挙動の境界(図 1c に示すように無次元数で定義される各領域に特徴的な流動が存在するが、それらの境界は明確でない)について注目が集まっている。

そこで本研究では、高分子の変形・緩和挙動の影響に着目できる独自の二次元(2D)乱流場[図 2 および、1, 2]を用い、流動転移や各流動挙動の境界を、流体内部の高分子挙動の観点から解明することを目的とする。具体的には図 1c に示すような、流動場の乱れの程度を表すレイノルズ数 Re 、高分子伸長を特徴づけるワイゼンベルグ数 Wi により、流動場を分類し、各流動場の特徴を乱流統計量解析により定量化する。そして流動転移を予測する乱流エネルギー生成の定式化を目指す。乱流エネルギー生成の定式化にあたっては、高分子の変形・緩和に由来する局所物性の不均一さ(高分子溶液の緩和時間や粘度は一律でなく分布を持ちうる)を独自の手法で測定し、式に反映させる。流体内部の構造の変形・緩和に着目し、不均一さを取得・反映させる視点は、連続性と一律を仮定してきた流体力学に不連続・非一律という概念を取り入れる点で学術的に独創性が高く、国内外に目を向けて

も、数値計算でも実験でもまだ行われていない。これらの手法が確立すれば、 μm スケールの構造変化が、 m スケールの流動場に与える影響が明らかになるだけでなく、これまで個別の現象としてとらえられていた乱流抑制 DR や弾性不安定など、複雑流体の流動挙動を統一的に理解できる可能性がある。

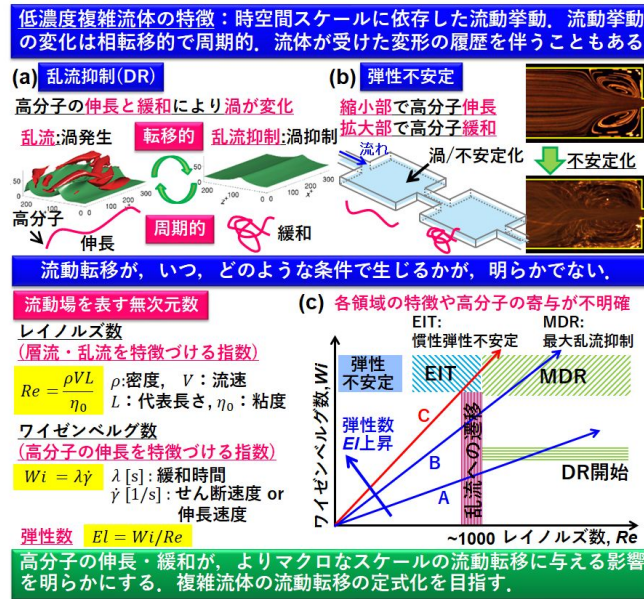


図 1. 研究の目的と意義

方法

研究方法の概要を図 2 に示した。流動挙動への高分子の変形(伸長)・緩和の影響の可視化は、流動石鹸膜(流れる平面状のシャボン玉)で作成した 2D 流動場に円柱列を垂直に差して発生させた 2D 乱流の PIV 法による速度場取得により行う。2D 乱流は壁面を持たないため剪断応力がかからないうえ、円柱列付近で生じる局所速度変化が流動場に伸長応力を生じさせ、高分子を伸長させる。このため伸長した高分子が円柱列からの渦放出に影響を与え、渦の集合体である乱流にも影響を与える。これまでにを行った予備的な研究から高分子である分子量 3.5×10^6 のポリエチレンオキシド(PEO)を添加すると、濃度 $10^{-3}\text{wt}\%$ 程度で放出する渦が変化した。さらに、変化は濃度に一意に依存せず、ニュートン流体(PEO を添加していない溶液)中の渦に対し、PEO 濃度が増加すると、変形・消滅・再生成することがわかった[図 2a、1]。また速度場(図 2b)を取得し、円柱下流の乱流エネルギー k (図 2c)を求めると、ニュートン流体中では、円柱下流で乱流エネルギー k が上昇し、次第に減少した。この k にピークが見られる円柱からの距離は、乱流エネルギーの元となる乱流生成項 P (図 2d)のピークまでの距離と一致し整合性が取れている。一方、PEO を添加し、渦の変形・消滅が見られる流動場では、乱流エネルギー k が著しく抑制され、乱流抑制が生じていることがわかった(図 2c)。さらに PEO 濃度を上げると、流体は乱流抑制能を有するにも関わらず、渦の再生成が見られ、この流動場では、ニュートン流体よりも下流で、 k に再びピークが現れた(図 2c)。この再出現した k の流動場では、 k の元となる乱流生成項 P の上昇が見られなかった(図 2d)。このことは、図 2 式(1)では表せない PEO の変形・緩和に由来するエネルギーの存在が示唆された(エネルギーは円柱列で高分子が伸長する際に高分子に蓄えられ、緩和する際に流体中に放出される)。

本研究では変形・緩和の機構が異なると予想される、異なる種類、分子量の高分子(分子量 8.0×10^6 の PEO、 6.0×10^6 のポリアクリルアミド、どちらも乱流抑制能を有する)を比較し、条件に応じた流動挙動を図 1c のように分類するとともに、その流動場の特徴を、乱流エネルギー、生成項など、乱流統計量により定量化する。さらに、高分子の変形・緩和の影響を組み込むことが可能な生成項の式を検討する。

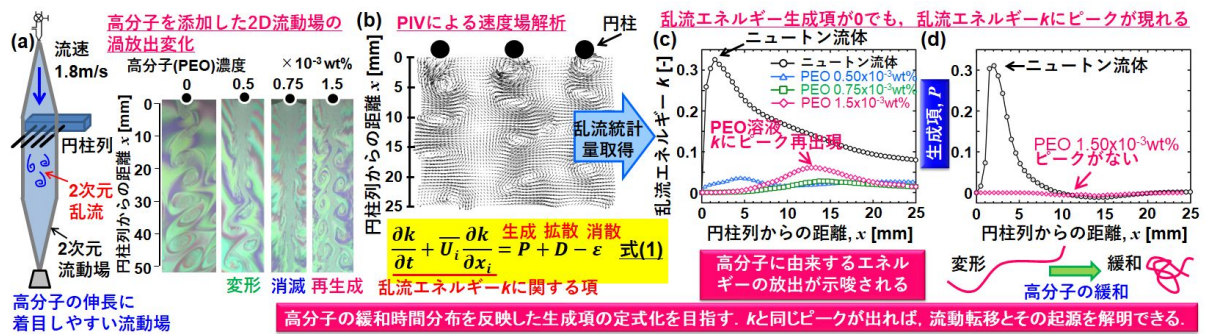


図 2. 研究方法

結果および考察

変形・緩和の機構が異なると予想される、異なる種類、分子量の高分子(分子量 8.0×10^6 の PEO、 6.0×10^6 のポリアクリルアミド、どちらも乱流抑制能を有する)を比較し、条件に応じた流動挙動を図 1c のように、レイノルズ数とワイゼンベルグ数により分類するとともに、その流動場の特徴を、乱流エネルギー、生成項など、乱流統計量により定量化した。高分子を添加した際に乱流中で放出される渦の変形・消滅・再生成は、粘弾性マッハ数と、弾性数の値により、分類できることがわかった。乱流統計量を計算すると、高分子の種類によらず、流動場に大きな影響を受けていることが分かった。

今後は、高分子の変形・緩和の影響を組み込むことが可能な生成項の式の検討を進める。例えば、粘弾性モデルと、独自の手法により得られる溶液の緩和時間の分布を反映させた生成項の定式化を目指す。新しい生成項の式について、渦の再生成が見られる流動場の k と同じ位置にピークが見られれば、流動転移に最も影響を与える高分子特性を特定できると予想される。これにより、現在未解明である、いつ、どのような条件で、何がトリガーとなって、流動転移が生じるかを明らかにでき、複雑流体の流動挙動の予測・制御が可能となる。

(完)

発表論文

- 1) Kengo Fukushima, Haruki Kishi, Ryotaro Sago, Hiroshi Suzuki, Robert J. Poole, Ruri Hidema, “Polymer-doped two-dimensional turbulent flow to study the transition from Newtonian turbulence to elastic instability”, *Physics of Fluids*, Vol.36, p.103128, 19 pages (2024) Featured Article

引用文献

- 1) R. Hidema*, K. Fukuashima, R. Yoshida, H. Suzuki, Vortex deformation and turbulent energy of polymer solution in a two-dimensional turbulent flow, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 285, 104385 (2020)
- 2) K. Fukushima, H. Kishi, H. Suzuki, R. Hidema*, Modification of turbulence caused by cationic surfactant wormlike micellar structures in two-dimensional turbulent flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 933, A9 (2022)
- 3) R. Hidema*, T. Oka, Y. Komoda, H. Suzuki, Effects of flexibility and entanglement of sodium hyaluronate in solutions on the entry flow in micro abrupt contraction-expansion channels, *Physics of Fluids*, 31, 072005 (2019)