



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	On the Macrodynamic Identification of Flow Modulations in non-Newtonian Shear Flows
Author(s)	高野, 哲秀
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。利用可能日以前の閲覧方法は https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/ をご参照ください。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16842号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16842
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99687
Type	doctoral thesis
File Information	Akihide_Takano_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 高野 哲秀

学 位 論 文 題 名

On the Macrodynamic Identification of Flow Modulations in non-Newtonian Shear Flows

(非ニュートン流体せん断流における巨視的動力学に基づく流れの変調の同定)

流体力学は移流現象を対象に運動量やエネルギーの輸送を記述する学問として体系化され、扱われる流れの多くはニュートン流体を仮定した単純な構成則で表される。乱流を代表とする非線形現象は、支配方程式の移流項によりもたらされるが、一般的な複雑流体では、流体自身がつ緩和機構が流れを変調させ、流れの複雑さを生み出す。例えば流れの抵抗低減をもたらす界面活性剤水溶液や高分子溶液などの粘弾性流体においては、流体が内包する非ニュートン性が流れと相互作用し移流に伴う動力学の性質を変化させることで、多様な非線形現象を呈する。このような流れの変調は、さまざまなスケールで発現する普遍的現象である。複雑流体における流動現象を理解するためには、変調を支配する動力学の性質、すなわち流れ場で、どのような運動量拡散・伝達が行われているかを定量化する必要がある。本研究はこの哲学に基づいて、流れの変調を体系的に捉える巨視的な運動量拡散・伝達を表す指標を定義することで、粒子群沈降から乱流輸送に至るまでの一連の現象の理解を目的とする。乱流摩擦抵抗低減効果を有し、アラスカパイプラインや札幌市役所などで実用化される界面活性剤水溶液を、複雑流体を代表する粘弾性流体として主な対象とする。本論文の第一章ではこれらの流れの変調現象の研究背景について整理する。

第二章では、疑似二次元流れを実現する Hele-Shaw(HS) 系を用いて、界面活性剤水溶液中における粒子群の沈降現象を観察した。この水溶液は粘弾性を有し、粒子群の後流構造は、ニュートン流体の場合と比較して変調した渦度分布を形成する。この後流構造は、弾性に由来する水溶液の伸長緩和時間スケールと結びつき、粒子群全体の沈降挙動を変調させる。その結果、粒子群はストリーク状の構造を形成しながら分裂・再凝集を繰り返すことを示した。粒子群の輪郭と個数の画像追跡によりその時間発展を定量化した結果、場全体の粒子群の沈降挙動はロジスティック方程式で記述される非線形拡散過程として整理された。界面活性剤水溶液ではこの巨視的な拡散時定数が水より短く、伸長緩和時間に基づく粒子の分裂・再凝集サイクルが速い拡散現象を生み出すことが示唆される。この結果は、非ニュートン流体中の微視的な粘弾性が、巨視的な粒子群拡散過程を変化させることを明確に示したものである。

第三章からは、二重円筒間の Taylor-Couette(TC) 系における流れの変調について述べている。この流れでは、単一の波長をもつ定常なテイラー渦流れから、細かな乱れを有する乱流まで、多様な三次元流れを安定して実現できる。さらに周方向に閉じた流れであり、複雑流体による変調現象が統計的な定常値により表される強みがある。最初に、界面活性剤水溶液の単純せん断場における粘弾性特性を定量化する新たな手法論を提案した。水に代表される低粘度溶液は、TC 型の計測治具によってその粘性が評価される。しかし、界面活性剤水溶液は、遠心力に由来する局所的な高分子構造の絡み合い(せん断誘起構造,SIS)を有するため再現性の高い計測が困難であるとされる。第三章一節では、SIS の形成を試験流体全体で均一に促進させることを目的に、流動計測開始前に高せん断を与える乱流プレコンディショニングなる手法を提案した。さらに、プレコンディショニング中に投入されたエネルギーと、その後の局所構造化の関係を解析することで、SIS の局所構造を抑制するためには一定以上のせん断によるエネルギー注入が必要であることを明らかにした。提案手法により、均質な SIS 生成を伴う界面活性剤水溶液の粘弾性計測が可能となった。また、界面活性剤水溶液の乱流遷移では、せん断が弾性構造を誘起し物性自体が遷移の経路に依存するため、系統的な遷移過程の調査が

行われた例は他の粘弾性流体に比べごく僅かである。そこで、本手法を基盤技術として行った、界面活性剤水溶液の弾性慣性乱流遷移過程の系統的な調査を第二節に示す。ここでは、流れ履歴に依存しない初期条件のもとで、周方向の流れ構造の可視化と高精度なせん断応力計測を行った。弾性慣性乱流を支配するワイゼンベルグ数とレイノルズ数を系統的に変化させ、せん断応力の変化と空間波数の関係を調査した。弾性と慣性の相互作用によって形成される流れの空間構造に依存して、実効的な運動量輸送であるせん断応力が変調することが示された。

このように複雑流体にみられる乱流変調現象は、慣性由来の運動量輸送が複雑流体の持つ局所的なせん断依存物性によって変調されることに起因する。この乱れが作り出す平均的な運動量伝達は、レイノルズ応力として理解される。ニュートン流体を扱う古典的な流体力学では、レイノルズ応力を推定するために、モデルパラメータとしての渦粘性が半世紀にわたり議論されてきた。一方、従来の渦粘性の記述に用いられる物理モデルは、ニュートン流体のエネルギーカスケードに立脚し、複雑流体に有効な渦粘性の推定方法は存在しない。そこで、乱流中の平均速度分布の空間構造が局所的なレイノルズ応力を反映していることに着目し、平均的な速度勾配に対する運動量拡散指標として渦粘度を再定義した。第四章一節では、最初に渦粘性そのものを実験的に測定する新たな計測手法論を提案した。この手法では、超音波により計測した平均流速を用いて平均流の移流方程式を解くことで、渦粘度を残差として評価する。計測手法の検定として行ったニュートン流体の計測では、本手法によって定量化される渦粘度と、古典的な乱流力学で導かれるスケーリング則との対比を用いて、計測された渦粘度の物理的解釈を議論した。さらに、渦粘度を流れの構造に分解して解析するモード分解型渦粘度解析法を第二節に提案した。TC 流れは、ロール、ストリーク、およびその波動といった、せん断乱流に現れる典型的な秩序構造を有する。近年では TC 流を利用し、各構造間での運動量の伝達メカニズムが議論されている。本節では、平均流を構成するモード（平均、ロール、ストリーク）ごとに移流方程式を導出し、各モードの平均速度勾配に対する渦粘性拡散から、秩序構造間の運動量交換を評価した。これは、自己維持機構の成分間でやりとりされる非線形増強メカニズムを、乱流拡散による渦粘性として捉える試みである。

第五章では、この手法論を界面活性剤水溶液の粘弾性乱流変調へと適用した。弾性と慣性の双方向相互作用の結果として生じる流れ場を対象とするため、平均流移流方程式に粘弾性応力項を導入し、粘弾性特性を反映させた解析を行った。これにより、弾性と慣性の相互作用によりレイノルズ応力の低下が生じる場所において、粘弾性由来の応力増加とバランスする形で渦粘性が低下することが評価された。

本研究を通じて、複雑流体における動力学的特性を様々なスケールに根差した平均的な拡散・伝達という視点で体系的に捉える実験的・理論的枠組みを提示した。HS 系における疑似二次元流れから多様な三次元流れを有する TC 系へと横断しつつ、動力学的な拡散・伝達に着目することで、非ニュートン流体そのものの緩和機構と流動との相互作用を定量化した。本研究は、粒子沈降から乱流輸送に至るまでの一連の現象をスケール依存的な拡散という共通概念で貫くことにより、スケールを跨いだ流動の普遍的原理を記述できる可能性を示した。