



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_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 高野 哲秀

審査担当者 主 査 教 授 田坂 裕司
副 査 教 授 村井 祐一
副 査 特任教授 大島 伸行
副 査 教 授 渡部 正夫
副 査 教 授 塚原 隆裕 (東京理科大学創域理工学部)

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)

大規模数値計算や実験計測技術の進展により、ニュートン流体が呈する流れの遷移と乱流現象は、乱れの初生から秩序的な運動量・エネルギー輸送の機構までが詳らかにされてきた。近年、この研究の枠組みは、流体内部の微視的構造に起因し多様な物性を示す複雑流体の流動へと展開されている。これらは、界面活性剤や微細気泡の添加に代表される、摩擦抵抗低減技術の最適化をもたらす基盤研究として工学的にも重要であり、数値計算ではモデル化された構成則に基づく詳細な流れ構造が、実験では添加に対する軸トルクや圧力損失などのバルク平均値の変化がそれぞれ示されている。一方で、流体と流れの双方が時空間のマルチスケール性を有する複雑流体の流動においては、微視的構造と流れ構造の変調が双方に生じており、抵抗低減をもたらす局所の運動量輸送がどのように変化しているかを定量的に評価する枠組みは確立されていない。

本論文は、巨視的な運動量拡散とその伝達指標としての乱流渦粘度を定義し、その理論的枠組みと実験的評価手法を提案するとともに、流れ場への応用を通じてその方法論がもたらす、構造間の運動量輸送への新たな理解を示している。統計的に安定で既存知見が豊富なテイラー・クエット流れを応用の対象とすることで、ニュートン流体から複雑流体に至るまで、流れの構造とその変調を実効的な巨視的流動物性として定量化する方法論が示されている。論文は、序章と結論を含む全6章から構成されている。2章において、粘弾性を呈する界面活性剤水溶液が粒子群沈降挙動に与える影響について調査された後、3章では、界面活性剤水溶液の実効レオロジー物性の評価について新たな手法が提案され、テイラー・クエット系における弾性乱流遷移過程が体系的に調査されている。4章では、運動量輸送を特徴づける物理量としての渦粘度とその計測手法、ニュートン流体乱流への適用結果が、5章では、この手法の界面活性剤水溶液への拡張と、弾性慣性乱流における運動量輸送の定量化、提案手法の適用範囲と限界がそれぞれまとめられている。これらの成果は以下に要約される。

- (1) 界面活性剤水溶液中を重力沈降する粒子群個数の振る舞いが、マクロな非線形拡散過程として記述された。微視的な非ニュートン性の変化と粒子群形成との相互作用が実効的な拡散時定数により示された。
- (2) 乱流プレコンディショニングなる新たな手法により、せん断誘起構造を有する界面活性剤水溶液の再現可能なレオロジー物性が定量化された。またこれを用いることで、界面活性剤を用いた再

現性の高い実験が可能となった。高分子水溶液とは異なる、きわめて長い緩和時間を有する界面活性剤水溶液がもたらす、大きな弾性と慣性が共存する遷移過程において、レイノルズ数に依存した普遍的な摩擦特性が示された。

(3) 乱流中の運動量輸送モデルである渦粘度を、被計測量として、平均流の移流方程式から逆解析する方法論が提案された。ニュートン流体へと適用し、既存文献との整合性が確認された。またモード分解を導入することによって、ストリークやロールといった流れの構造間での乱流を維持するための運動量交換が、レイノルズ数の関数、即ち流れ構造に依存した実効的流動物性値として評価された。

(4) 前述のレオロジー物性計測結果を組み込んだ構成則を用いて、平均流の移流方程式を導出し、渦粘度計測手法を粘弾性乱流へと拡張した。これにより、従来レイノルズ応力低下として議論されてきた抵抗低減効果と、せん断と弾性応力の局所的な非線形輸送機構との関係が明確化された。その結果、異なる弾性と慣性の度合いに応じて、運動量輸送が増強・抑制・局所的な反転など多様な形態を取ることが示された。

これを要するに、本論文では、複雑流体の移流現象で生じる運動量輸送の変調を、巨視的な流れの構造に着目することで、実効的な拡散・運動量特性を定量的に評価可能な枠組みが構築されている。この一連の研究は、界面活性剤水溶液に代表される粘弾性流体を用いた乱流制御において、制御効果の予測を与えるとともに、従来分断されていた、壁面摩擦に基づくバルクでの評価と、支配方程式に内在する非線形輸送機構とを結びつける新たな視座を提示することで、流体工学の発展に大きく貢献するものである。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。