



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on multi-timescale rheology of heterogeneous fluids by advancement of velocity-profiling-based rheometry [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	大家, 広平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15845号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/92144">https://hdl.handle.net/2115/92144</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Kohei_Ohie_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 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 大家 広平

### 学位論文題名

#### Study on multi-timescale rheology of heterogeneous fluids by advancement of velocity-profiling-based rheometry

(流動計測型レオメトリによる不均質流体のマルチタイムスケールレオロジーに関する研究)

物質の変形および流動一般に関する学問分野であるレオロジーは、産業界や自然界におけるあらゆる流動現象の理解において重要な役割を担う。産業界においては、流動製品の内部組成に応じて粘性や粘弾性に代表されるレオロジー物性が変化するため、機能性評価や品質管理のツールとして用いられる。近年では、触感や食感をレオロジー物性と対応付け、化粧品や食品の市場分析、新製品開発に応用する動きもある。自然界においては、泥やマグマ、石油資源など微細気泡や固体成分の混入によって非ニュートン性を持つ流動が遍在し、その流動現象の理解にはレオロジーが必須となる。社会課題の複雑多様化に応じてレオロジーの対象もまた複雑化し、人口の超高齢化や資源の有効活用を背景に、例えば具材を含む流動食品や気泡や固体粒子を含む懸濁液への需要が高まっている。これら複雑流体は従来の計測手法の適用対象外であり、新たなツールの開発が求められる。また、これらは化学反応や相分離による経時変化のみならず、付加されるせん断の強度や周波数に応じて変化する難しさがある。ツール開発に並行して、この複数時間スケールに跨るレオロジーを包括的に理解するための指標作りも必要となる。本論文の第1章にて、これらの研究背景を整理する。

第2章では、上述した複雑流体の計測を可能にする、流速情報に基づいたレオメトリの概要を説明する。標準的なレオメータは、微小間隙に試験流体を満たし、ひずみ速度が一定であることを仮定し、回転速度と軸トルクの計測から間接的に流動物性を評価する。複雑流体では、ひずみ速度が分布を持ちこの仮定が満たされず、評価不可能となる。そこで、超音波スピニングレオメトリ (USR) が開発され、本手法は超音波流速分布計によって計測した流速分布が流体の運動方程式を満たすように逆算的にレオロジー物性を評価する。開発の過程で蓄積された知見は技術資料として本章に記録される。USRの強みは複雑流体に対して高い適用性を持つことに加え、物性のひずみ速度依存性を瞬時に評価できる点にある。従って、相分離や化学反応中の擬塑性の経時変化を捉えることができる。第3章では、その代表例として、相分離を伴う水油混合液および多糖類によって増粘した水溶液に $\alpha$ アミラーゼを添加した際の擬塑性の時間変化を評価する。そこで提案するK-nマップにより、経時変化する複雑流体の非ニュートン性を容易に評価することが可能となる。将来的に嚥下食品をこのK-nマップ上にデータベース化し、医学的知見と組み合わせることで、食品の安全性や食べやすさの定量化への期待が高まる。

実効粘度や粘弾性は、付加されるひずみ速度や振動周波数に応じて多様に変化する。緩和時間よりも遅い変形に対して物質は流体的であり、急な変形には固体的に振る舞う。第4章では、ひずみ速度と周波数に対する粘弾性変化を包括的に評価するための指標として、レオロジーマップを提案する。代表的な高分子溶液に対して適用し、粘性支配流体としてポリビニルピロリドン水溶液、擬塑性流体としてカルボキシメチルセルロース水溶液、粘弾性流体としてポリアクリルアミド水溶液を扱う。溶液ごとに特徴的な模様がマップ上に表現される。このレオロジーマップは、内部構造とマクロ物性を

関連付けるポリマーレオロジーや非ニュートン流体の数値計算において構成方程式を選択するための効果的な手法となる。本章ではその応用例として気泡レオロジーを扱う。流体に微細な気泡が混入すると、レオロジー物性が変調する。食品や化学工業における気泡懸濁液はもとより、自然界ではマグマに含まれる気泡により噴火形態が一変し、これらの流動性を理解する上で気泡レオロジーの知見が必須となる。エマルションの構成方程式を出発点として希薄気泡懸濁液の粘弾性を理論的に求め、レオロジーマップによってその全体像を示す。気泡添加による粘度の増減および粘弾性が最も顕著に発現される条件を明らかにする。さらに、定常せん断と脈動せん断を組み合わせた、いわば体内の血流のようなせん断条件下における、気泡の粘弾性特性を追究する。マグマの噴火時や乱流渦内での気泡懸濁液は、このように複合せん断が付加されると考えられ、物性評価法自体を整備する必要がある。付加する周波数成分が増えることにより物性パラメータの組み合わせが増加するため、レオロジーマップによる多角的な視点で、その粘弾性特性を明らかにする。

流速情報に基づくレオメトリの強みとして、評価したレオロジー物性を元の速度場に再構成できることが挙げられる。第5章では、USRで評価した粘弾性データを基に、円筒内の振動流れを再構成し、実験結果との比較を行う。物性評価に留まらず、それを流れの予測に応用することを本章で試みる。流れ予測の基礎段階として、代表的な高分子溶液と流動食品を対象に、円管内の定常および脈動流れの予測を扱う。実験結果との一致が確認でき、USRで得られる物性データの可逆性が示される。非ニュートン流体の数値計算に向けて信頼できる構成方程式を提供することが可能になる。第6章では、速度情報から運動方程式を介して物性を推定するという、逆解析のアプローチをインラインレオメトリに応用する。管内流動の流速分布や圧力の計測データから流体の運動方程式を介してレオロジー物性を評価する、産業的に需要の高い技術開発となる。流動食品のおかゆを代表例に、水や増粘剤、アミラーゼの添加によって経時的に変化する様子をインラインで評価できることを示す。

これら一連の研究を通じて、従来評価対象外となっていた複雑流体のレオロジー物性評価が可能となり、さらに複数の時間スケールに跨る性質を包括的に理解するための指標を提案した。これらのツールは、産業界と自然界を問わず幅広い分野における複雑流体の物性評価、そしてその流動現象の予測と制御における基盤技術になることが期待される。