



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Kinematic Rheometry Utilizing Ultrasonic Velocity Profiling [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	芳田, 泰基
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13994号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78308
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Taiki_Yoshida_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 芳田泰基

学 位 論 文 題 名

Study on Kinematic Rheometry Utilizing Ultrasonic Velocity Profiling

(超音波流速計測を用いた運動学的レオメトリの開発研究)

数世紀かけて体系化されてきた古典弾性力学や古典流体力学でさえ、その流動が予測できない物質は数多存在する。それらはレオロジー的理解が不可欠であり、レオロジー物性値として定量化される。物性を計測する装置はレオメータ、実験的手法はレオメトリとそれぞれ呼称される。産業・学理の多分野に最も広く利用される回転式トルクレオメータの原型は、200 年以上前に完成されている。回転子と計測対象の物質を密着させることで、回転に対する力学的応答が計測され、いくつかの仮定から成立する理論式によって物性を導出する。近年、度々議論されている市販レオメータの課題は、非ニュートン性流体に対する計測では必要不可欠な仮定が成り立たないことにある。この問題が生じる最たる原因として、測定対象物質と回転子壁面との間での滑りや、局所剪断層の発現、弾性的不安定性による影響などが数多く報告されている。これらは、市販レオメータの使用上留意点として、ユーザーに広く認知されている現象ではなく、レオロジー物性そのものとして理解される現状がある。この場合、レオメータにおける幾何設計固有の応答が計測され、物性をそのもののみを反映した結果は得られない。解決策として、多くの研究開発で精力的に取り組まれているレオメータの幾何設計や表面性状の改良、クエット逆問題に対する数学的な解法等は、対処療法でしかない。根本的な原因は、非ニュートン性流体挙動が必ずしも仮定を満たすとは限らないことにあり、偏にレオメータにおける流体への拘束条件によって引き起こされる影響である。ゆえに、従来の手法とは全く異なる手段が要求されるが、非ニュートン性流体挙動そのものを直接計測し、レオロジー物性の導出を試みるのが課題解決への最適な手段である。

本論文において新たに提案するのは、運動方程式に基づいた運動学的レオメトリ (Kinematic Rheometry) である。狙いは、複雑流体のダイナミクスに対して、運動方程式を満たすようなレオロジー物性を逆算・定量化することにある。特色は、運動方程式へ各種構成方程式 (レオロジーモデル) を導入できることにある。この構成方程式は、一般にレオロジー分野で用いられる、レオロジー係数の計算を目的としたフィッティング関数の類としてではなく、複雑な流体挙動を記述する目的で導入されていることを強調したい。また、 $O(10^3 \text{ Pa s})$ 以上の高粘性流体や、 $O(10^{-3} \text{ Pa s})$ 以下の極低粘性流体、準完全弾性体など、市販レオメータで高精度のレオロジー物性計測がすでに可能とされている対象は、本レオメトリの適用範囲とは考えていない。市販レオメータでは不可能とされている対象こそ適用範囲に据えており、市販レオメータにおける“盲点”を相補的に埋めることのできるレオメトリとして提案する。流速計測法として、不透明流体から混相流体まで計測可能な超音波流速計測法 (UVP) を利用することで、多様な計測対象に適用可能なレオメトリが実現される。レオメトリ開発研究を推進し、科学研究の発展に貢献できる手法を提案するためには、手法の剛健さと有用性の証明が必要不可欠である。これは、上記市販レオメータにおける課題が数世紀にわたって慣習的に見過ごされてきた要因から説明される。つまり、研究者、或いはエンジニアが、“如何に計測がなされるか” よりも、“如何に容易な計測がなされるか” に興味を持ってしまうこと

に他ならない。そこで、レオメトリの提案・確立、妥当性検証、実践的応用による知見の提示、産業プラントへ応用可能な形態への昇華、これら一連の研究成果を段階的に論じ、本レオメトリの剛健さと有用性を証明する。

本論文は全 10 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。第 1 章は序論であり、レオロジー計測の現代にまで至る潮流と、市販レオメータにおける問題、並びに本研究の背景・目的について述べている。第 2 章では、Tasaka *et al.*, (2015) が提案した手法をより洗練させ、運動学的レオメトリの原型としての位相差粘性逆解析法が提案・検証される。本章の内容は、Yoshida *et al.*, J. Rheol. (2017) において公表済みである。本章では、チキソトロピー性やシェアシンニング性、粘弾性、混相実効粘性等を有する複雑流体に対し、実験計測を行い、そのレオロジー評価を試みた。強調すべき知見として、運動学的レオメトリは同一の手法・幾何設計で上記多様に分岐する流体へ適用可能であることが明らかとなった。第 3 章では、チキソトロピー性を有する粘土懸濁液に対し、第 2 章で用いられた位相差粘性逆解析法を適用した。本章の内容は、Yoshida *et al.*, Appl. Clay Sci. (2018) において公表済みである。先行研究において、粘土懸濁液の降伏臨界せん断速度付近のレオロジー物性は、見かけの降伏応力や見かけの粘性としか評価されていなかった。運動学的レオメトリを用いることで、流速分布によって定義される明確な降伏応力等の評価を行った。第 4 章では、線形粘弾性解析手法を導入することで、非定常に変形する気泡の実効的な粘性・弾性の定量評価を行った。本章の内容は、Tasaka *et al.*, Rheol. Acta (2018) において公表済みである。本手法は、第 2, 3 章でノイズ影響の解決に有効であった周波数空間におけるデータ処理が基軸となっている、また本手法の確立により、運動学的レオメトリの計測能力がより高次の水準へ共時的に引き上げられる。第 5 章では、第 4 章で提案・確立された、運動学的レオメトリにおける線形粘弾性解析手法が、市販レオメータと比較・検証されている。本章の内容は、Yoshida *et al.*, J. Rheol. (2019) において公表済みである。数種の非ニュートン性流体への比較実験の結果、市販レオメータの“盲点”を補い得る、運動学的レオメトリの相補的能力が証明された。第 6, 7 章では、運動学的レオメトリを応用し、非ニュートン性流体の未解明問題解決に挑戦した。具体的な対象は、流体緩和時間に起因する粒子配列現象が実効的粘弾性に与える変調 [Yoshida *et al.*, Phys. Fluids (2019a)] と、ゲル状流動食品の食べやすさとレオロジー物性の関係 [Yoshida *et al.*, Phys. Fluids (2019b)] である。これらは、市販レオメータでは計測不可能なレオロジー的知見であり、本章の研究段階を経て、運動学的レオメトリが新物理の知見創出に足る能力を有することが示された。第 8 章では、確立された運動学的レオメトリの能力を生かし、チキソトロピー性流体が市販レオメータへ与える不可避の影響について指摘した。特筆すべき知見は、市販レオメータにおける動的粘弾性解析法の一つである LAOS (Large Amplitude Oscillatory Shear) 計測によって、運動学的レオメトリによるレオロジー評価が支持されていることである。第 9 章では、運動学的レオメトリを産業プラントへ応用可能な形態へ昇華させるべく、管内の非定常流に適用する。解析解による流速変動からレオロジー評価を逆算的に行い、解析アルゴリズムの妥当性を検証した。第 10 章は本論文の結言にあたる。第 2-9 章における知見を要約し、運動学的レオメトリが産業・学理発展への寄与できることを証明し、今後の展望と共にその結論を述べる。