



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Velocity profiling based rheometry toward model-free characterization of non-Newtonian fluids [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	白鳥, 貴久
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11884号
Issue Date	2015-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58674
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Takahisa_Shiratori_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 白鳥 貴久

学 位 論 文 題 名

Velocity profiling based rheometry toward model-free characterization of non-Newtonian fluids
(非ニュートン流体のモデルフリー物性評価のための速度分布計測に基づくレオメトリ)

高分子化合物, 生体材料, エネルギー関連材料の中には, ニュートンの粘性則に従わない流体, すなわち非ニュートン流体が多い. 例えば溶融高分子, 人工関節に利用させるゲル, 石炭スラリーなどは非ニュートン流体である. これらの材料を加工するプラントを設計する場合, 非ニュートン流体の流れを予測する手法が必要になる. また新材料として生まれた液体を加工, 混合する場合, その物性を短時間で知る必要がある. このシミュレーションによる予測と物性理解という課題に対して, 現状ではレオロジーモデルとレオメータの利用がそれぞれ解決策として用いられている. すなわち流体の物性は, レオメータで定常せん断流れや振動流れを作り出し, ひずみ速度依存粘度, 貯蔵弾性率, 損失弾性率などの数値を得ることによって評価されてきた. さらにこれらの計測された物性からレオロジーモデル内の係数を決定し, ニュートンの粘性則の代わりに使うという手法が非ニュートン流れシミュレーションにおいて用いられてきた. 以上の手法は, 高精度のシミュレーションを可能にした一方で, レオロジーの各論化という問題を引き起こした. レオロジーモデルは, 分子動力学などより小さなスケールでの力学を考慮して組み立てられている例が多く, そのようなモデルは適用できる流体の種類に限られる. したがって学問としてのレオロジーは, 高分子レオロジー, バイオレオロジー, 食品レオロジーなどに分化しており, それぞれの分野でモデルをつくる傾向にある. その結果, 新素材を生み出した際に短時間で物性を把握し, 流れをシミュレーションすることが困難になっている. 本研究は, 流体力学において進歩してきた速度場計測技術を応用することで, あらゆる流体に対して適用できる物性評価法および流れのシミュレーション法を構築することを目的としている. 速度場計測技術として超音波流速分布計測 (UVP; Ultrasonic Velocity Profiling) と粒子画像流速測定法 (PIV; Particle Imaging Velocimetry) を併用する. UVP は不透明流体に適用可能, PIV は 2 次元速度ベクトル分布を取得可能という長所がそれぞれあるため, 計測目的に応じて相補的に用いる.

第 1 章は序論である. 先行研究から上記の課題を示し, 解決策として速度場計測技術を用いる方法を提案する. すでに速度場計測を用いた非ニュートン流れの計測は一部で行われているため, 関連研究を参照して本研究の対象を明確にする.

第 2 章では, UVP を利用した, 非ニュートン流体の物性可視化法を構築した. 流体を満たした回転円筒を急停止させ, 停止後の流れと流体物性との関係を議論した. 試験流体として, シリコンオイル, ポリアクリルアミド (PAA; Polyacrylamide) 水溶液, ヨーグルトの 3 種類の流体を採用した. シリコンオイルはニュートン流体, PAA 水溶液は粘弾性とひずみ速度依存粘度を持つ流体, ヨーグルトは物性が不明な流体の代表である. 速度ベクトル場, 格子パターンの変形, 粒子移動とひずみ速度の同時可視化の 3 種類の可視化方法を用いた. 格子パターンの変形では, PAA 水溶液とヨーグルトの流れにおいて, 弾性による変形の復元が可視化された. 粒子移動とひずみ速度の可視化では, 弾性応力に比例するひずみと, 粘性応力に比例するひずみ速度が同時に可視化された. UVP を用いたことで不透明なヨーグルトの中の変形も計測でき, 不透明流体への本物性評価法の適用性が示された. 同時

に、物性を定量評価するためには、応力場を取得しなければならないが、今回用いた体系では応力場が得られないという問題が提起された。

第3章では、二重円筒間流れを用いたひずみ速度依存粘度の定量評価法を確立した。内円筒を回転させるのに必要なトルクを計測することで、応力分布を得られるようにし、流体物性を定量評価できるようにした。ひずみ速度依存粘度を得るためには、ひずみ速度とせん断応力を計測し、この2つの量の関係すなわち流動曲線 (flow curve) を得ればよい。流れがひずみ速度依存粘度に支配される定常状態を計測対象とした。ひずみ速度はUVPにより得た速度分布から、せん断応力は内円筒回転トルクからそれぞれ得た。二重円筒間流れのせん断応力分布は定常状態においては流体によらないことを利用し、流動曲線を短時間で得られることがこの手法の長所である。シリコンオイル、PAA水溶液、ヨーグルトの計測結果を比較し、PAA水溶液のシアシニング (shear thinning) 性を計測できることを確認した。またヨーグルトの計測結果からは、降伏応力を計測できることが示唆された。速度分布からひずみ速度を求める過程で空間微分をとる必要があるが、ここで初歩的な差分を用いると計測誤差が増幅される。そこで誤差を増幅させない関数近似を用いた微分法を採用し、複数種類の関数を用いて結果を比較した。

第4章では、二重円筒間流れを用いた粘弾性物性の評価法を提案した。せん断応力をひずみとひずみ速度の関数で整理する、流動曲面 (flow surface) という評価方法を新たに考案し、実験的にそれを得る方法を示した。粘弾性物性を評価するためには非定常流れにおけるせん断応力の時間変化を知る必要があるため、PIVにより得られた速度分布から運動量保存則を解いて、せん断応力の時空間分布を求めた。速度、ひずみ速度、せん断応力の時空間分布において、粘弾性に起因すると見られる振動が見られた。流動曲面として整理すると、せん断応力がひずみに比例する弾性領域と、ひずみ速度に比例する粘性領域を確認できた。実用例として、流動曲面を流体物性として利用した数値シミュレーションを行った。最も簡単な例として、実験と同じ二重円筒間流れをシミュレーションで再現できるかを検討した。弾性により広い範囲で流体が駆動された後、減速して内円筒近傍のみ流体が流れる様子が定性的にはあるが再現できた。

第5章は結論である。レオロジーの各論化という問題に対して本研究は、速度場計測技術を利用した流体物性評価という解決策を提示した。ひずみ速度依存粘度の評価においては流動曲線、粘弾性評価ではさらにこれを拡張した流動曲面を、速度場計測より取得した。これらの物性評価法は、計測対象が連続体でありさえすれば適用可能である。適切に物性を記述できるモデルがない新素材に対して、即座に利用できる物性評価およびシミュレーション法を確立できた。UVPを用いて粘弾性を評価できるようにすることと、流動曲面によるシミュレーションの精度向上が、今後の課題として明らかとなった。