

# 論文審査の結果の要旨

氏名 永澤 謙太郎

本論文の題目にある複雑流体とは、非常に広義の言葉で、高分子融体やコロイド溶液のように複雑な構造をもつ液体、ガラス形成液体のように温度や圧力の変化により複雑に運動状態を変化させる液体、水や液体金属のように複雑な粒子間相互作用をもつ液体などがあげられる。砂や泡のような粉体もこの範疇に入れられることが多い。我々の日常生活には複雑流体が溢れている。この論文で取り扱うソースやクリームのような流動性食品はその典型であるし、生体内にも複雑流体は多数存在する。本論文では、そのような複雑流体のうちの幾つかに対して、数値計算により粘弾性データを微視的に説明する研究とデータ駆動的アプローチにより粘弾性データを再現・予測する手法を提案している。

本論文は 7 つの章から構成されている。第 1 章から 3 章は本論に入る前の準備で、第 1 章では上記に述べたような複雑流体に関する概観と本研究のモチベーションについて、第 2 章では流体の粘弾性に関する一般的な背景について、第 3 章では本研究に用いる数値計算と粘弾性実験について書かれている。第 4 章から 6 章が本論文の研究成果にあたる部分で、第 4 章では粒子にずりを加えた時の粒子軌道の RI 転移（可逆—不可逆転移）に関する計算機シミュレーションによる研究成果について、第 5 章ではデータ駆動的な方法による非線形粘性をもつ物質の混合物の粘性を再現するモデル（一般式）の導出について、第 6 章では画像データと計算機シミュレーションから粘弾性データを導出する新しい手法について書かれている。第 7 章は全体に関する総括である。

以後、第 4 章から 6 章についての概要と評価を述べる。第 4 章では、広い粒子密度範囲で網羅的な数値計算を行い、粒子密度と RI 転移点に関する相図を新たに作成した。ジャミング転移点密度 $\phi_J$ の周りで、様々な（連続、不連続、リエントラント）RI 転移や今まで未知だった特異な物理現象の存在を明らかにした。これらは、RI 転移が粒子の幾何的な構造（接触数  $Z$ ）により支配されていること、および高密度領域では弾性的性質（降伏現象）に関連することを示唆している。過去には粒子密度の両端でしか数値計算が行われておらず、本研究で全体像、特に $\phi_J$ の周りでの挙動を明らかにしたことは高く評価できる。

第 5 章では、様々なソースやクリームなどの日常の複雑流体を対象に、それら混合体の非線形粘性を一般的に再現・推定する定性的な混合モデルを提案した。一般に認められ

ている混合の公理と Herschel-Bulkley モデルと呼ばれる一般混合関数をベースに、多数の実験データに合うようにパラメータ最適化を行い、具体的なモデル関数まで導出している。モデル関数の適用性は必ずしも完全とは言えないが、微視的な物理描像が異なる様々な複雑流体の混合体の流動性を再現できる可能性を示したことは、今後の同様の研究の足がかりとなるものであり、学術的に価値がある。また、自らレオメータを用いて、14 種類もの試料を丁寧に測定し高品質の実験データを得ていることも評価できる。

第 6 章では、やはり複雑流体の流動性を対象に、誰もが利用可能な簡便な計測手法を目指し、撮影した動画と流体シミュレーションを用いた物性計測手法を提案した。自ら製作したダム崩壊流れの装置を用いて、様々なセットアップの複雑流体の流れる様子を撮影している。動画から流動曲線（流速とずり応力の関係）を得るアルゴリズムや計算の過程は非常に複雑で難解であるが、様々な工夫により実験値と比較できるレベルまで到達している。特に、実験とシミュレーションの誤差を最小化するパラメータ最適化にはヘシアン行列の対角化が必要であるが、それを行うのが困難なダム崩壊流れを管内のポアズイユ流れで代替したことは成功のキーとなっている。最終的に、複数のセットアップを導入することにより実験値と比較的良好な一致を得ている。同様の研究は過去に Takahashi らがニュートン流体に対して行っているが、複雑流体に対しては本研究が初めてであり、新規性が高い。本研究は単に簡便な計測方法というだけでなく、土砂崩れや火山から噴出したマグマの流れなどの自然界の希少事象に対しても適用でき、将来重要性が高まることが期待できる。

以上のように、本研究では、複雑流体の粘弾性に対して、幾つかの新しい知見を得るとともに、数値計算やデータ駆動的手法を活用した有効なデータ再現法を提案している。物性物理学としての価値と独創性が認められ、博士（理学）の学位論文としてふさわしいと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文の第 4 章と 5 章はすでに出版されており、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験や結果の解析を行ったので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。