

## 論文審査の結果の要旨

氏名 大槻道夫

泥、泡、粉体、ペーストなどの流れは、標準的な流体方程式に従わない。それらの異常な流れに関する学問分野は、レオロジーとよばれる。異常な流れについて系統的な理解を得ることは、100年以上前から設定されてきた古典的問題である。しかし、とくに非線形性が強く効く非線形レオロジーにおいては、現象に応じた各論しかなく、その各論においても複雑に込み入ったパラメータを実験により決めないといけない。つまり、現象論としても簡潔な形にまとまっていない。

ところで、近年、異常な流れを構成要素の動力学モデルから理解しようとする試みがなされてきた。例えば、数値実験による複雑なマクロな現象が再現され、そこから新しい法則を探索しようとする気運が、実験、理論ともに高まっている。とくに、理論においては、ランダム系やスロダイナミクス系に対する知見が提案されはじめてきた。この状況において、提出された大槻道夫氏の博士論文は、新しい理論的枠組みの拠点をつくらうとするものである。

本論文は7章106ページからなる。第1章で、論文全体の問題意識が述べられたあと、第2章で、ペーストの異常な流れに伴う典型的な現象が提示される。それに対する現象論的な解析により、降伏応力の重要性が明らかにされる。第3章で、降伏応力の出現を微視的モデルの解析によって示される。第4章で、その考えが粉体系に適用され、さらに、第5章においてナノ流体に適用される。第6章は、第3章の解析のより定量的な議論が展開される。

本論文の核心は、第3章にある。降伏応力の存在を構成粒子の記述にもとづいて理論的に示す課題は、従来より難問として認識されていた。最近、非線形応答理論と射影演算子の方法の組みあわせにより、非線形粘性係数が密度揺らぎの時間相関関数であらわされ、時間相関関数の振る舞いがモード結合理論によって評価された。その結果、時間相関関数が凍結する転移にもなった粘性係数の異常増大が議論され、これが降伏応力の存在の理論的証拠だと考えられた。

ところで、第1章で議論されるように、応力は構成粒子の配置によって決まる量である。したがって、応力の計算に時間相関関数に関わる必然性はない。もっとも直接的な論旨を期待するなら、2体分布関数の統計的性質だけから、降伏応力の出現という異常性が示されるべきである。本論文の解析は、まずこの自然なアイデアにたつことから始まる。このアプローチでは、降伏応力の存在は、2体分布関数のずりに対する異常性として記述される。そこで、2体分布関数のずりに対する線形安定性が調べられ、その安定性が失われるパラメータで分岐解析が実行される。その結果、磁性体の臨界現象に対する平均場近似と類似の結果が得られる。例えば、降伏応力の存在は、自発磁化の存在と数学的には等価になっており、降伏応力発生に関係したシェアニング指数が具体的に計算される。

このように求めたシェアニング指数が第一近似として妥当なものであることは、数値実験で確かめられている。とくに、系の大きさが小さいとき、この予言はより正確になる。これは近似の平均場的な性質のためであろう。この点を積極的に利用して、小さい系

におけるレオロジー性質の顕著な大きさ依存性を明らかにしたのが第5章である。この際、シェアシニング指数の値と動的相関長を用いて、有限サイズスケールリングが数値的に実行され、顕著な大きさ依存性は、系の大きさと増大する動的相関長のクロスオーバーとして理解される。計算されたシェアシニング指数が、ナノ流体に対する既知の実験事実と整合するだけでなく、その機構として新しいアイデアが提案されたことになる。

さらに、第5章の粉体多体系の解析も、第3章の結果にもとづいた発展として位置づけられる。粉体多体系にずりを加えたときの振る舞いも典型的な非線形レオロジーの対象になる。ただし、粉体多体系の散逸機構はペーストと質的に異なるので、第3章の結果がそのまま適用されるわけではない。とくに、温度は制御パラメータとして与えられていなくて、系を駆動する条件と散逸を特徴づける定数によって有効的溫度として決まる。その条件を次元解析によって実効的に考えることにより、非線形レオロジーの特異性の各指数が求められる。これらの理論的値は、数値実験によって得られた値とよく一致している。

以上のように、大槻氏はその論文において、非線形レオロジーの性質を微視的モデルから明らかにする理論枠組みを提出した。斬新で自然なアイデアにもとづく明晰な結果であり、その有効性も具体的に示されている。ただし、計算を具体的に実行するために用いた仮定の妥当性については、十分に理解されているわけではない。これについては、第6章で議論されている計算の詳細を完遂するとともに、さらなる検討が必要であろう。このように、本論文は、非線形レオロジーに対して、新しい枠組みを明確な形で持ち込んだものであり、将来、大きく発展する可能性を秘めた研究として位置付けることができる。

なお、本論文の内容は、第2章、第3章、第4章が3編の論文として出版されており、第5章が論文投稿中、第6章が投稿準備中である。

以上の点から本論文は博士(学術)の学位を与えるのにふさわしい内容であると審査委員会は全員一致で判定した。