

論文審査の結果の要旨

氏名 稲垣紫緒

多数の粉体粒子が凝集した系の巨視的な性質は、熱統計力学の法則にしたがう系と全く異なる様相を示すことが知られている。たとえば、粉粒凝集体の巨視的な線形弾性的性質を特徴づける構成方程式のパラメータは、粒子数と応力を指定しても、一意にきまらず、凝集体のつくりかたに依存する。提出された稲垣紫緒氏の博士論文は、このような履歴に依存する構成方程式を、粉粒凝集体の構成要素である粉体粒子の統計的性質から理解しようとするものである。

本論文は4章120ページからなる。第1章では、粉粒体の基本的な性質が、いくつかの現象をまじえながら述べられる。近年、活発になっている物理学としての粉粒体研究の全体像が概観されたあと、粉粒凝集体の巨視的性質に関する履歴依存性を明確に示す典型的実験が紹介され、論点が整理される。

第2章では、粉粒凝集体の巨視的性質とそれを構成する粉体粒子の関係を解き明かす理論的な第一歩として、平均場理論の妥当性が離散要素法による数値実験によって調べられる。ここで、平均場理論とは、粉体粒子の配置を接触角度分布と占有率で特徴づけ、それらと個々の粉体粒子の性質によって、弾性論的パラメータであるヤング率とポアソン比をあらわす試みである。その理論の範囲で評価されたヤング率とポアソン比が数値実験による結果と定量的に食い違うことが指摘される。より重要なこととして、平均場理論の範囲では、履歴に依存する弾性論的パラメータの説明ができないことが示される。

この結果を踏まえて、第3章において、履歴に依存する構成方程式が考察される。第3章の成果は以下の三点にまとめられる。第一に、履歴に依存する構成方程式を理論的に調べるのにもっとも適切な状況設定が見出される。これまでの研究において履歴に依存すると考えられている現象では、様々な要因が込み入って関わっており、履歴依存性だけを鋭く問い詰める対象として適切でなかった。そこで、稲垣氏は、水平におかれた2次元の箱に多数の粉体円盤を接触がないようにつめたのちに、壁を等方的に押し込んで、粉粒凝集体をつくることを提案した。その際、壁をおしこむ速度が制御され、粉粒凝集体が壁に及ぼす応力が一定値になるところで、壁がとめられる。このようにしてつくられた粉粒凝集体は、粒子数と応力が一定であるにもかかわらず、ヤング率やポアソン比の値は2倍以上も異なることが示される。これが第一の成果である。

ついで、この粉粒凝集体に対して、構成方程式の履歴依存性を反映する物理量が探索される。まず最初に、平均場理論の限界の考察によって、粉粒凝集体に微小な力を加えたときに生じる微視的な歪みや応力増分のゆらぎが着目され、それらの分布のひろがりの変動係数によって特徴づけられる。粉粒凝集体のつくりかたを固定したときに有限サイズ効果によって生じる弾性論的パラメータの分布と歪みや応力増分の変動係数の分布に強い相関があることが見出される。この相関は、粉粒凝集体のつくりかたをかえたときにも残ることが示され、微視的歪みや応力歪みの変動係数が、履歴に依存する弾性論的パラメータを特徴づける候補としてあげられる。これが第二の成果である。

ただし、歪みや応力増分は、粉粒凝集体に微小な力を加えないと得ることができない。そこで、応答をみることなく、粉粒凝集体に内在する性質として、履歴に依存する弾性論的パラメータを特徴づける物理量が探索される。試行錯誤の結果、粉体円盤間の接触力の相関関数のふるまいと弾性論的パラメータの相関がみいだされる。ここで、粉体円盤間の接触力に関して、作用反作用の法則のため力の向きの選択に物理的意味がないことより、その自由度を除いた接触力の表現として2階テンソルによるものが使われる。これが第三

の成果である。

以上のように、稲垣氏はその論文において、粉粒凝集体の履歴に依存する構成方程式に関して重要な知見をみいだした。履歴に依存する構成方程式を数値実験を用いて明確に提示する研究は、稲垣氏の結果以前には全くないもので、独創的な第一歩として位置づけられる。この状況設定は、光弾性円盤をつかった実験で行うことも可能であり、実験的研究への刺激の点からも重要であろう。

また、粉粒凝集体の構成方程式の履歴依存性を特徴づける量を模索する研究も他に類をみない試みであり、接触力の相関関数が履歴に依存する弾性論的パラメータを理解する上で重要である、という提案まで到達した意義は大きい。今後、この提案の妥当性が詳細に調べられ、高い普遍性をもつことが確認されたなら、科学の発展に大きな寄与をすることになるであろう。これらは今後の課題であり、将来の展開が期待される。

なお、本論文の内容は、第2章が論文として出版されており、第3章が論文準備中である。また、本論文と直接の関係はないが、粉粒体のゆっくりした斜面流に関する論文が出版されている。

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。