

論文審査の結果の要旨

氏名 松尾美希

ガラス状態における物性はその状態に至る履歴に依存することは古くから知られている。近年のスピングラス研究の発展やモード結合理論のガラス状態への適用により、統計理論として扱える領域はひろがってきたが、履歴依存性を正面から扱うのは難しい問題として現在に至っている。提出された松尾美希氏の博士論文は、ガラスの巨視的性質に関する操作論的な特徴づけを考察し、ガラス状態のみならず記憶をもつ非平衡系に対する新しい展望を切り開こうとするものである。

本論文は6章130ページからなる。第1章では、ガラス状態を記憶の存在によって維持される非平衡状態として位置づけ、その形式化が完成するなら、ガラスの問題を越えて、ひろく非平衡世界の新しい見方ができるだろう、という壮大な動機がのべられる。そして、ガラスの巨視的性質の操作論的な特徴づけが最初に考えるべき問題だと説明される。

第2章では、2成分格子気体モデルの数値実験の結果が述べられる。このモデルは、ランダムネスを最初から仮定せずにガラス転移が確認でき、エネルギー論的な対応が可能なおもっとも簡単なものとして松尾氏が提案したものである。系の実効的な体積を変化させるようなポテンシャルの時間変化をつかって、体積変化にともなう仕事とガラス転移の関係が議論され、ガラス状態を経由すると準静的極限においても不可逆仕事が残ることが見出される。

第3章で議論されるように、この事実はいくつかの基本的な問題をなげかけることになる。まず、準静的極限における不可逆仕事の存在は、レオロジー論の立場からは、降伏応力の発生を意味することになる。降伏応力をもつ現象論的なモデルとしてビンガム流体が知られているが、そのマイクロな機構としてガラス転移が関わる可能性が示唆されることになる。第2に、ガラス状態を熱力学系として記述しようとする、熱力学安定性を与える重要な公理である比較仮説が失われることになる。ことごとから、ガラス状態のもっている安定性について深く考える必要が生じる。第3に、熱力学系としての記述ができないことから揺らぎの理論、とくに、揺動散逸関係の存在に疑問がもたれることになる。

最後の点について具体的な考察をすすめたのが第4章である。通常揺動散逸定理のガラス系への拡張は既に提案されており、その定理にもとづいて熱力学関数の存在を主張する研究もある。これらの先行研究と松尾氏が見出した準静的極限で残る不可逆仕事の関係は一見して矛盾するものである。そこで、2成分格子気体モデルにおける揺動散逸関係が数値的に調べられることになる。その結果、数値実験として実際に実現される応答関数には、提案されている揺動散逸定理で表現されない部分が寄与し、そのことが揺動散逸関係の破れにつながることを示唆される。

以上の数値実験の結果をうけて、第5章で、動的平均場理論で導出された密度、応答関数、相関関数の閉じた時間発展方程式が議論される。具体的には、先行研究との関係を明確にするために、揺動散逸関係が閉じた形で導出されているモデルが解析される。この時間発展方程式は、非線形な記憶項をもつ無限自由度力学系であり、力学系として非自明な

ものである。ここで、力学系の変数である応答関数は、線形応答を先に考えてから熱力学極限をとったものであり、微視的応答関数とよばれる。それとは別に、力学系における無限小外場に対する密度の応答を考えることができる。熱力学極限を先にとって外場に対する密度の線形応答をみたものに相当するので巨視的応答関数とよばれる。ガラス状態では、このふたつの応答関数が一致しないことが示される。

つまり、揺動散逸関係を満たす解はたしかに存在するのだが、無限小の外場でこの解は実現されない、というある種の構造不安定性が存在することが示されたことになる。第4章の数値実験で示唆された結果は、このような明確な形で理解されることになる。さらに、この力学系にもとづいて、第2章で議論した準静的過程の残る不可逆仕事の存在も確認され、不可逆仕事と揺動散逸関係の破れの定量的な関係が予想される。

以上のように、松尾氏はその論文において、ガラス状態の操作論的な特徴づけに関して重要な知見をみいだした。実験との関係やより完全な理論に関しては、今後明らかにされるべきであるが、論文で見出された事実やそれがもたらす新しい問題提起だけでも科学の発展に十分な寄与をしている。

また、第6章で議論されているように、この論文は、ガラス状態の理解をおしすすめるだけでなく、そこからひろく非平衡系への新しい研究の方向性を与えている。既に具体的に問題とされはじめている摩擦や粉体との関係だけでなく、アルゴリズム論的複雑性との関係や化学反応ネットワークを介した生命の起源の問題まで触れられる。これらは多くの人が論じてきたテーマであるが、松尾氏が自分自身のガラス状態の研究を通じて独自に培ってきたものであり、新しい研究への駆動力を与えることになる可能性を秘めている。

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4章が論文投稿中であり、第5章に関連した投稿論文を準備中である。

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。