

## 論文審査の結果の要旨

氏名 林久美子

近年のマイクロスケールでの制御技術の進展に伴って、コロイド粒子や生体高分子などの小さな系に関する実験結果が蓄積されつつある。ところが、このような系に対する理論的理解は未熟なままである。具体的には、時空局所的な統計分布を平衡分布から摂動的に構成できる多くの伝統的な非平衡系と異なり、統計的性質の議論は各論的になり、線形非平衡統計力学の成果である揺動散逸関係は大きく破れる。そこで、各論を超えた新しい理論的枠組みがあることを期待するなら、系の個別的性質に依存しない普遍的側面を抽出していくことが必要である。提出された林久美子氏の博士論文は、その課題に関する成果がまとめられている。

本論文は8章147ページからなる。まず、冒頭で、小さな非平衡系へ問題意識が述べられたあと、各章のまとめと章間の関係について説明される。解析されるモデルにしたがって章を分類すると、(i) 外力駆動格子気体 (1章、2章、3章、5章)、(ii) 1粒子ランジュバンモデル (4章、6章)、(iii) その他 (7章、8章) にわけることができる。

外力駆動格子気体は、外力で駆動されるコロイド粒子多体系に対応する数学モデルだと考えられている。このモデルに対して、1章では、外場に垂直な方向が着目される。適切に選ばれた摂動に対する応答から定義される化学ポテンシャルと系の大きさを変える仕事から操作的に決められた圧力の間にもマクスウェル関係式が成立することが数値実験により見出され、それにもとづいて非平衡定常状態に拡張された自由エネルギーが提案される。その自由エネルギーが外場に垂直な方向の密度揺らぎの強度をきめていることが数値実験で示される。さらに2章では、外場に垂直な方向に摂動外場を加えることにより、各種の線形応答関係式の成立が数値実験で示される。それに対し、外場に平行な方向については、様々な要因のために明確な結論をひきだせないことが5章で議論される。また、3章では、このモデルを題材にして線形応答理論が概説される。

1粒子ランジュバンモデルに対しては、4章において、有効温度が検討される。具体的には、系の特徴的な大きさよりも十分に長い摂動ポテンシャルを適切な速度で付加したときの分布の応答が、摂動ポテンシャルの形に依らず、ある温度のカノニカル分布の形になることが示される。その温度は一般には環境の温度と異なるので、有効温度とよばれる。その有効温度をもちいると、環境の温度を使ったときには破れているアインシュタイン関係式が回復することが示される。さらに、6章において、力の分割が議論される。一般的に、粒子の受ける力の有限時間平均は、散逸的な部分とノイズに分解されることが期待される。このとき、平衡条件下ではその分解は揺動散逸関係によって一意に決められるが、非平衡定常状態では揺動散逸関係の破れのために分解を決める規則が知られていなかった。6章の成果はその規則の発見である。有限時間平均によって新たに得られるノイズは熱的ノイズの有限時間平均と相関をもたない、という簡単な規則(直交条件)があることが理論的に示された。

以上のほかに、7章では、自由度を消去したときの有効ポテンシャル概念がコロイド粒子多体系で考察され、8章では、よりミクロな力学系にもとづく非平衡系研究の準備段階

としてカオス系のエントロピーを計算する新しいアルゴリズムが提案される。

本論文は、一見すると、様々な論点が無節操に調べられているように見える。しかしながら、例えば、熱力学拡張の視点からは、1章と7章に関係があるし、有効温度の視点からは、4章と5章に関係がある。そのような関係だけでなく、論文全体を貫く意図がある。それは、平衡状態の周辺で有効だった「熱力学」と「揺動散逸関係」が非平衡条件下で成立しないとき、そこにまだ何かしらの法則が残るかどうかを徹底的に調べようとする意図である。本論文は、この一貫した動機にしたがって見出された結果のまとめだと考えられる。

それらの結果の中でもっとも重要な寄与は、6章で説明される力の分解に関する直交条件の発見であろう。その直接的な帰結として測定量間の新しい不等式の提案がなされているが、むしろ、理論的な意義が大きい。実際、この直交条件にもとづいて、ランジュバン方程式を解析する新しい数理的技術が開発され、その技術を使って揺動散逸関係の破れとエネルギー散逸の定量的な関係が見出された。まさに、大きな進展の拠点になった。しかも、力の分解に関する直交条件は、結果として数学的に証明されたが、その主張は発見論的であり、特別の感覚をもてるほどに論点や対象に馴染みがないと決して到達できない独創的なものである。

以上のように、林久美子氏はその論文において、小さい非平衡系の普遍的関係式を複数みつけた。これらの関係式が大きな理論的枠組みを生み出していくかどうか、については今後の発展をまたないとはいけない。とくに、力の分解に関する直交条件を微視的な立場から位置づけることはきわめて重要な課題であろう。8章で始められている力学系からのアプローチを踏まえながら、今後明らかにされるべきである。いずれにせよ、本論文は、非平衡系の一般的な研究に対して、新しい視点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、1章、2章、4章、5章、6章が論文として出版されており、7章と8章が論文印刷中、3章が論文投稿中である。

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。