

# 論文審査の結果の要旨

氏名 白井達彦

ギブス状態に基づく平衡状態の統計力学は大きな成功を収めた。一方、我々が観測する現象の多くは平衡状態から外れており、それらの普遍的な特性を記述する非平衡統計力学の構築は重要な課題である。しかし、平衡状態からのずれが小さい極限における線形応答理論を除いて、非平衡統計力学の一般的な枠組の構築は極めて困難であり、多くは未解明のままである。一方、特に周期的に駆動される量子力学系の理論には、近年多くの進歩が見られる。本論文は、このような状況を踏まえ、周期的に駆動される量子開放系の定常状態が平衡統計力学におけるギブス状態の一般化であるフロケ-ギブス状態によって与えられる条件を、理論的に論じたものであり、以下の6章からなる。

第1章では、序論として本論文の目標を示すとともに、後の解析の準備として、周期的に駆動される閉鎖量子系のフロケ形式による記述をレビューしている。第2章では、さらに外部の熱浴と結合した量子開放系が周期的に駆動される場合についてマスター方程式による定式化をレビューしている。これらの準備に続き、以下の3章で独自の研究の成果をまとめている。

第3章では、系と熱浴の結合が無限小の極限での解析を行っている。このとき、フロケ-リンドブラッド方程式が適用でき、周期的に駆動される系を有効的に静的な系として記述するフロケハミルトニアンが定義できる。すると、フロケハミルトニアンを用いたギブス状態が定義でき、これをフロケ-ギブス状態と呼ぶ。白井氏は、どのような条件が満たされた場合に定常状態としてフロケ-ギブス分布が実現されるか、という問題を設定して研究を行った。その結果、系と熱浴の結合が無限小の極限では、次の3つの条件が全て満たされる場合には定常状態としてフロケ-ギブス状態が実現されることを示した。

- (i) 駆動振動数が、系のハミルトニアンの持つ全てのエネルギースケールよりも十分大きい
- (ii) 全ての時刻における外力項が互いに可換である
- (iii) 系と熱浴の（時間に依存しない）相互作用項が、全ての時刻における外力項と可換である

これらの条件は、「回転座標系」に移ることによって系がフロケハミルトニアンに基づく静的な問題にマップできることを示している。さらに、白井氏はこの結果を踏まえ、6スピンからなる1次元鎖で、両端のスピンのみが熱浴と結合したものを数値的にシミュレートし、理論的な結果の検証を行った。その結果、3条件を満たすモデルでは実際にフロケ-ギブス状態に漸近すること、また、(ii)と(iii)のどちらかの条件を破ると、漸近する定常状態がフロケ-ギブス状態からのずれを示すこと、を見出した。これらの条件は制約が強く、系と熱浴の結合が無限小の極限では非常に特殊な系においてのみ定常状態としてフロケ-ギブス状態が実現されることを示唆している。

第4章では、系と熱浴の相互作用が有限の場合の定常状態をレッドフィールド方程式を用いて解析した。その結果、系と熱浴の相互作用が無限小の場合にフロケ-ギブス状態が定

常状態として実現されるための条件(i)、(iii)はそれぞれ以下のように置き換えられることを示した。

(i') 系の散逸に関するレートが、駆動力による加熱のレートに比べて大きいこと

(iii') 駆動力の周期が熱浴の緩和時間に比べて十分短いこと

さらに、第3章と同様に、6スピンからなる1次元鎖についてシミュレーションを行い、熱浴との結合が無限小の場合についての条件(iii)を破っても、熱浴との結合が十分大きいときには上記の(iii')の条件が満たされれば系はフロケ-ギブス状態に漸近することを示した。第5章では、周期的に駆動される量子開放系の具体的な例として、周期的に駆動される空洞系のいくつかのモデルを調べている。特に、相互作用と駆動力の両者によって引き起こされる新しい種類の対称性の破れを論じている。

最後に、第6章で全体のまとめを行い将来の展望を論じている。

以上のように、本論文は、周期的に駆動される量子開放系が漸近的に到達する定常状態が、平衡状態を記述するギブス状態の一般化であるフロケ-ギブス状態で与えられるかどうかというよく定義された問題を、丁寧な理論的解析によって解明したものである。特に、系と熱浴の結合が有限の大きさを保つ場合、定常状態がフロケ-ギブス状態で与えられるための条件が緩和され、系と熱浴の結合が無限小の極限に比べて広い範囲で実現できることを示した。この成果は、一般には非常に困難な問題である非平衡統計力学に、一つの着実な進歩をもたらしたものとして評価できる。なお、本論文は、宮下精二氏らとの共同研究に基づいているが、本人の寄与は主体的であり十分であると認められる。

よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると認めた。