

# 論文審査の結果の要旨

氏名 森國 洋平

本論文は、全7章からなる。第1章は序論、第2章は量子ダイナミクスと量子測定に関する概説、第3章は時間依存ハミルトニアンを用いた量子熱力学の定式化に関する先行研究の概説、第4章は時間依存ハミルトニアンを用いた定式化の問題点の提示と量子測定過程を用いた仕事の定義に関する先行研究の概説、第5章は量子測定過程を用いた仕事の定義を用いた場合の量子 Jarzynski 等式に対応する関係式の導出、第6章は連続量子測定下での量子 Jarzynski 等式に対応する関係式の導出、第7章が結論という構成である。

近年の微細加工技術などの発展により、従来の熱力学では想定していないような微小なスケールでの熱機関が実現されつつある。量子熱力学は、量子力学が支配的になるような、微小な系における熱力学的な性質を解明することを目的とし、近年急速に発展している。これまでの量子熱力学の研究においては、外部の操作者が微小な量子系に対して行う操作を、時間依存ハミルトニアンによるユニタリー発展の作用としてモデル化し、操作によって生じた量子系のエネルギー期待値の減少量を、外部の操作者が得た仕事として定義している。しかし、外部の操作者と量子系との相互作用が存在すると、厳密には量子系のみには作用するユニタリー発展として記述することができず、また、量子系においても古典系と同様に、量子系のエネルギー期待値の減少量を外部の操作者が得た仕事とみなして良いかどうか明らかではないという問題点があった。さらに、ユニタリー発展とエネルギー期待値の減少による仕事の定義が両立しない場合があることが最近の研究によって示され、仕事取り出しの操作を完全正值 instrument で記述される量子測定過程としてみなして仕事を定義する新しい量子熱力学の定式化が進められている。

本論文の第5章では、まず、量子2準位系について従来の方法の問題点を詳細に調べ、外部の操作者の操作を量子系のユニタリー発展に漸近させると、外部の操作者が得たエネルギーの分散が大きく発散してしまうことを示した。この結果は、ユニタリー発展を用いたモデルにおいては、熱力学的な意味で通常用いられる外部の操作者が得たエネルギーである仕事のゆらぎが、量子系のエネルギー減少のゆらぎと同一視できないことを示唆する。量子熱力学の性質を特徴づけるゆらぎの定理の1つとして、仕事のゆらぎの性質を記述する量子 Jarzynski 等式が知られているが、この等式はこれまでの仕事の定義によるものであった。このため、量子測定過程に基づいた新たな仕事の定義を用いた場合に、量子 Jarzynski 等式に対応する関係式がどのようになるかは量子熱力学的に重要な問題となるが、これまで解明されていなかった。

そこで次に、初期と最終ハミルトニアンが同一で時間に依存しないハミルトニアンで記述されるサイクル過程と、初期と最終ハミルトニアンが異なり時間依存ハミルトニアンで

記述される非サイクル過程について、仕事取り出しの操作を量子測定過程としてみなして仕事を定義する新しい量子熱力学の定式化に基づいて、量子 Jarzynski 等式に対応する関係式を導出した。非サイクル過程については、コントロール系を導入して量子系を拡張し、時間に依存しないハミルトニアンで記述する方法を用いた。その結果、量子 Jarzynski 等式の右辺に  $\gamma$  で表される補正項が現れることが示された。この補正項は、外部の操作者の操作の影響を表す量であり、先行研究で示されたようにフィードバック操作や不可逆性を付加した際にも同様の補正項が現れる。サイクル過程でフィードバックがなく系のエントロピーが減少しないような自然な熱力学過程の場合は  $\gamma$  が 1 となるが、非サイクル過程の場合は必ずしも 1 とはならないことを示した。

さらに本論文の第 6 章では、非サイクル過程における外部の操作者の操作が刻一刻追跡できる場合を考察し、連続量子測定を用いた仕事取り出しとしてモデル化することによって、対応する量子 Jarzynski 等式を導出した。この場合も、自然な熱力学過程においても  $\gamma$  は 1 となるとは限らず、操作を追跡する影響の効果も  $\gamma$  に含まれることが判明した。また、得られた量子 Jarzynski 等式から熱力学第二法則への影響について考察し、熱力学第二法則を破る可能性はあるが、その確率は指数的に小さくなることを示した。

本論文は、従来の量子熱力学の定式化で用いられている仕事の定義を用いると、仕事のゆらぎが熱力学での通常定義される仕事のゆらぎとは一致しなくなるため、そこで成り立つ量子 Jarzynski 等式の熱力学的意味を再考する必要性を示したとともに、量子測定過程に基づいた新たな仕事の定義を用いた定式化に基づいて対応する量子 Jarzynski 等式を導出し、その熱力学特徴を考察することにより、量子熱力学に対して新しい知見を与えたと評価できる。よって本論文は、博士論文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。

なお、本論文第 5 章の研究は、羽田野直道教授とよび田島裕康博士との共同研究であり、本論文 6 章の研究は田島裕康博士との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。