

# 論文の内容の要旨

## Quantum Thermodynamics with Measurement Processes

### (測定過程のある量子熱力学)

氏名 森國 洋平

近年、実験技術の発展により従来の熱力学が想定していないような微小な熱機関が実現されるようになってきている。このような熱機関を理解するためには微小な系での熱力学を考える必要があり、現在、統計力学とミクロな力学の運動法則を用いて解析が行われている。特に、ミクロな力学として量子力学を用いたときは量子熱力学と呼ばれ、微小な量子系を対象としている。

これまでの量子熱力学の研究においては主に、外部の操作者が行う操作を微小な量子系のハミルトニアンの変化で表現する方法が用いられている。この方法では、微小な量子系の時間発展はユニタリー発展で記述される。また、外部の操作者が得た仕事量は微小な量子系のエネルギー減少量と等しいと定義される。しかし、この方法は次のような問題がある：(1) 微小な量子系は外部の操作者と相互作用しているため、時間発展は厳密にはユニタリー発展で記述することができない、(2) エネルギーの減少で実際の仕事を正しく記述できるか明らかではない。実際、いくつかの研究において、ユニタリー発展とエネルギー減少による仕事の定義を両立することができないことが示されている。そのため、これ以外の方法で量子熱力学を定式化する必要がある。

新しい方法として提案されているのが、仕事取り出しの操作を量子測定とみなす方法である。この方法は熱力学の仕事取り出しと量子力学の測定の間にある類似性をもとに提案され、量子熱力学が本質的には量子測定理論であることを指摘している。この方法の量子熱

力学の研究では測定の影響を積極的に取り入れている。

本論文では、この新しい方法をもとに量子熱力学の研究を行った。まずはじめに、簡単な二準位のモデルを例に従来の方法の問題点を詳細に調べた。その結果、微小な量子系のエネルギー減少量の分散は微小な量子系の時間発展に依らず有限な値で抑えられるのに対し、微小な量子系の時間発展をユニタリー発展に近似するほど、外部の操作者が得たエネルギーの分散が大きくなり発散してしまうことを得た。つまり、ユニタリー発展では外部の操作者が得た仕事のゆらぎを微小な量子系のエネルギー減少のゆらぎで正しく記述することができないことがわかる。これは特に、仕事量のゆらぎの性質である Jarzynski 等式が従来の方法では正しく記述されていないことを意味している。

そこで次に、我々は新しい方法を用いて Jarzynski 等式がどのようなになるのかを調べた。その結果、

$$\langle e^{\beta W} \rangle = \gamma e^{-\beta \Delta F}$$

という Jarzynski 等式を導いた。ここで、 $W$  は外部の操作者が得た仕事、 $\beta$  は逆温度、 $\Delta F$  は微小な量子系のヘルムホルツ自由エネルギーの変化、 $\gamma$  は外部の操作者の影響を表す量、 $\langle \dots \rangle$  は仕事についての期待値である。この量  $\gamma$  が新しい方法を用いて現れた違いであり、従来の方法では  $\gamma = 1$  となっている量である。また、先行研究により量  $\gamma$  はフィードバックの効率や不可逆性を表すことが知られている。本研究では、仕事取り出し過程がサイクルでフィードバックがない自然な熱力学的な過程である場合を計算すると常に  $\gamma = 1$  となる。したがって、この量  $\gamma$  は測定の反作用がフィードバックとして働いている効果を表していると考えられる。

本研究で導いた Jarzynski 等式は仕事の正しいゆらぎの性質を表現しているが、一方、微小な量子系が外部の操作者にどのように操作されているかが不明確となっている。例えば、気体が入ったシリンダーを考えたとき、外部の操作者の操作はシリンダーのピストンの動きで表現することができるが、新しい方法ではこのピストンがどのように動いているかが不明確となっている。そこで、このピストンの動きを監視するような操作を仕事取り出し過程に入れ、外部の操作者がどのような操作を行ったかがわかるように状況を考察した。その結果、Jarzynski 等式の形に変更はなく、ピストンの動きを監視した影響は量  $\gamma$  に含まれることが導かれた。さらに、熱力学第二法則について計算した結果、第二法則を超えるような操作を行う確率は指数的に小さくなることが導かれた。この結果は量子熱力学で実現できる操作の制限を与えている。