

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 白石 直人

本論文は11章からなり、第1章は序論、第2章は確率過程について先行研究のレビュー、第3章はゆらぐ系の熱力学について先行研究のレビュー、第4章は情報熱力学について先行研究のレビュー、第5章は部分エントロピー生成についての論文提出者の研究成果、第6章はカルノー効率の達成可能性について先行研究のレビュー、第7章は自律動作型熱機関におけるカルノー効率の達成可能性についての論文提出者の研究成果、第8章は効率とパワーの関係について先行研究のレビュー、第9章は効率とパワーのトレードオフ関係についての論文提出者の研究成果、第10章は9章の内容の量子系への拡張についての論文提出者の研究成果、をそれぞれ論じており、第11章で結論を述べている。

熱機関の効率には、カルノー効率という、上限があることが熱力学で証明されている。ところが、その上限、すなわちカルノー効率を実際に達成することが可能かどうかについては、熱力学は、無限にゆっくりと動作させれば達成可能である、としか教えてくれない。しかし、仕事をするのに無限の時間がかかるような熱機関は役に立たないので、重要なのは、有限の時間で動作させたときに、カルノー効率が達成可能かどうかである。この根源的な問には、熱力学は何も教えてくれない。さらに、ナノマシンや生物内の微小器官などの、近年注目されている微小系には、そもそも大きな（マクロな）系の理論である熱力学は適用できないので、何も分からなかった。

白石氏は、このような根源的な重要問題について、近年統計力学の分野において活発に研究が行われている「ゆらぐ系の熱力学」の手法を用いることで、はじめて解答を与えた。

氏はまず、一つの遷移のレベルまで理論の最小構成単位を分解し、一遷移レベルで熱力学的構造が存在することを示した。具体的には、ゆらぐ系の熱力学において不可逆性の指標を与える重要な量であるエントロピー生成について、熱力学的性質を保ったまま個々の遷移ごとの寄与に分割する「部分エントロピー生成」というものを導入した。続いて、この視点に基づいてすべての遷移で不可逆的な散逸が発生しない条件を考察することで、自律的な熱機関がカルノー効率に達成するための一般的な必要条件を得ることに成功した。具体的には、遷移レートがあるタイプの特異性を持つことが必要条件であることを示した。そして、これらの結果を用いて、熱機関が、熱力学の対象になるようなマクロ系でも、熱力学の対象外の微小系でも、いずれの場合にも、有限の時間で動作させたときには、カルノー効率を達成できないことを証明した。しかも、動作時間の関数として効率の上限がどのような値をとるかを示す不等式を与えた。この不等式は、カルノー効率の有限時間への拡張と言える。

以上のように、本論文はゆらぐ系の熱力学を発展させることにより、熱機関の効率とパワーのトレードオフ関係を理論的に証明したものであり、統計物理学の進展に重要な寄与をした論文であると認められる。

なお、本論文は、沙川貴大氏、斎藤圭司氏、田崎晴明氏との共同研究であるが、論文提出者が主体になって分析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。