

論文審査の結果の要旨

氏名 伊 藤 創 祐

伊藤創祐氏は本論文において、近年、長足の進歩を遂げている情報熱力学と呼ばれる分野の研究を行いました。熱力学過程にフィードバックなどの操作が含まれる場合、熱力学第2法則（エントロピー増大の法則）は情報量を含む形に拡張されるべきことが最近になって明確にされてきました。これは19世紀に提唱されたパラドックス「マクスウェルの悪魔」を解決するものとして現在、広く興味を集めています。しかし近年の研究は、特定の熱力学過程に限定された議論であったり、不等式の下界の評価が不十分であったりしました。それに対して伊藤氏は本論文において、広範囲の確率過程を表現できる **causal network** という数学的道具を利用し、熱力学第2法則の拡張（エントロピー生成の下界）を一般的な形で書き下しました。それによってモデルを限定しない議論が可能となり、近年の研究に見られた混乱がきれいに整理されました。この成果は既に他研究者にも多く引用され、実際に研究に利用されるほど国際的に影響力の大きいものです。

伊藤氏はこのような一般論だけではなく、本論文において大腸菌の走化性を表す生体内シグナル伝達系の具体的なモデルに対しても成果を挙げました。このモデルには化学反応によるフィードバックが組み込まれており、上記の一般論の有用な適用例となっています。このモデルに対して実際にエントロピー生成の下界を数値的厳密に評価し、一般論による下界がかなり強いものであることを実証しました。

本論文は10章からなり、第1章は全体のイントロダクション、第10章は全体のまとめに充てられています。第2章から第5章までは主に先行研究のレビューに充てられ、第6章から第9章にオリジナルな成果が述べられています。

レビューは初歩的なところから丁寧に書かれています。第2章で情報理論の基礎を、第3章で確率過程の熱力学の基礎を述べた後に、第4章ではそれらを統合した情報熱力学の最近の成果が簡潔にレビューされています。一転して第5章では、数学的な道具となる **causal network** の定義がまとめられています。

いよいよ第6章において、中心的成果である **causal network** 上での情報熱力学が展開されています。ポイントとなるのは、任意の確率過程を **causal network** で表現

する点です。ここで、causal network のノードは各時刻での、系の各部分の確率変数の状態を表し、向き付きリンクが、それらの状態の間の因果関係を表します。時間発展は離散化して、各時刻における状態が一つのノードに対応します。したがって、例えば単純なマルコフ過程は一次元的なネットワークで表現されますが、「マックスウェルの悪魔」が存在するようなフィードバックのある過程は、ある時刻の注目系のノードから観測者のノードへ矢印が延び、さらに観測者のノードから次の時刻の注目系のノードへ矢印が戻るというネットワークで表現されます。伊藤氏は存在する任意のネットワークに対して熱力学第2法則の情報熱力学的拡張である不等式を証明しました。これによって任意の確率過程に対する不等式を与えただけでなく、特定の確率過程に対する先行研究をきれいに整理しました。

第7章では、第6章の成果を大腸菌の走化性を表す生体内のシグナル伝達系のモデルに適用し、細胞内の化学反応による情報伝達を議論しています。ここでポイントとなるのは、大腸菌の細胞内には意思を持った観測者などは存在しない点、そして、生体系では通常 Shannon の定理におけるビット列の冗長性などが明確でない点です。しかし causal network として抽象化することで、第6章の枠組みの中で議論することができ、通信の正確性を測定することができます。このため、将来的には生体情報伝達の基礎理論となる可能性を秘めています。章末では、実際にパラメータを与えて数値的に厳密に微分方程式の解と第6章で与えた不等式によるエントロピー生成の下限を比較して、下限が良い近似にもなっていることを例示しています。

第8章では第6章の更なる数学的拡張を、第9章ではさらなる応用として非平衡定常状態に対する議論や冷却に関する議論を述べています。

本論文の以上の成果は、熱力学・統計物理学の基礎に関する大きな成果であり、物理学に対して新しくかつ重要な貢献をしています。本論文は沙川貴大氏との共同研究に基づいていますが、主要な部分は伊藤創祐氏が主体的に研究を進めて得られた成果です。以上により、論文提出者の伊藤創祐氏に博士（理学）の学位を授与できると認めます。