

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	小林郁海
論文題目	Operational hardness and controllability in complex systems (複雑な系における操作の難しさと可制御性)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、機能的な分子構造の構築から崩壊した生態系の修復に至るまで、現代科学の核心的課題である「複雑系の操作」をテーマとしている。制御理論や熱力学はシステムを導く枠組みを提供するが、複雑系への適用には根本的な障壁が存在する。第一章で議論されているように、計算の複雑性から万能な一般理論の構築は困難であるため、本論文では「特定のシステムクラスにおいて、システムの固有の性質と操作的限界を定量的に結びつける」という、実用的かつ厳密なアプローチを採用している。具体的には、物理・生物学的な4つのトピックを通じて、システムの構造がいかに操作の可否やコストを決定するかを詳述している。 第2章では、ヘテロポリマー合成における操作の非対称性が議論される。1次元ヘテロポリマーの組み立てモデルを用い、構築と破壊の根本的な違いが解析される。標的となる配列の複雑性が増すと、合成に必要な時間は指数関数的に増大することが証明される。これは、組み立ての過程で「行き止まり」の経路が組合せ論的に急増していくという状態空間の構造に由来している。対照的に、完全な破壊に要する時間は鎖の長さに比例する。この結果、特定の結合制約が順方向の操作には指数関数的な障壁を課す一方で、逆方向の操作は効率的に行えるという「操作の非対称性」が明らかにされる。 第3章では、組み立てシステムにおける並列化の相転移が議論される。組み立てプロセスの効率、特に「並列化」と「逐次化」の可能性に焦点が当てられる。ミクロなペアリング規則が組み立て効率をいかに支配するかを分析した結果、効率に関する「相転移」が発見される。局所的な相互作用規則のわずかな変化により、システムは並列化可能な相から不可能な相へと劇的に切り替わる。これは、操作の困難さが滑らかに変化する量ではなく、非解析的な特異点（相転移）を示し得ることが実証される。 第4章では、環境変動に対する生態系の変容が議論される。外部操作がいかに生態系の実現可能な状態を再形成するかが調べられる。空間確率モデルと資源競争モデルを用いて、コミュニティの組成と環境パラメータが共存、優占、絶滅などの定常状態をいかに決定するかを示す相図が構築される。これにより、達成可能な生態系の構成範囲が、内部のコミュニティ構造と外部の駆動条件の相互作用によって鋭く制約されていることが示される。 第5章では、共生生態系における不可制御条件が議論される。資源制約下での崩壊した生態系の修復問題を扱い、「有効ダイナミクス」の枠組みを用いて根本的な「不可制御条件」が証明される。種間相互作用の関数応答が十分に上に凸的である場合、状態空間は分断され、その結果、多様性が高い安定状態と低い安定状態は、制御コストが臨界閾値を下回ると互に行き来が不可能になる。これは、システムの非線形性とトポロジー構造が生み出す制御性の限界を特定したものである。 第6章では全体のまとめと展望が述べられる。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年、操作限界を定式化する研究は、熱力学を拡張する課題のひとつとして活発に議論されているが、その多くは単純な構造を持つ系に限定されてきた。一方で、複雑系を対象とした一般論から導かれる命題は、実効的な制御指針を与えるには抽象的すぎるという課題がある。本論文では、これらの背景を的確に整理した上で、「特定のシステムクラスにおいて、システム固有の性質と操作限界を定量的に結びつける」という、実用的かつ厳密な方針を採用している。この独創的なアプローチに基づき、分子合成および生態系という多岐にわたる対象に対し、非自明な問題設定を行っている点は、幅広い背景知識と深い洞察力の賜物として評価される。

第2章の「合成と分解の非対称性」については、直観的に理解されてきた現象を具体的な化学反応ダイナミクスとして定式化し、配列の複雑さに伴う指数関数的な時間コストの差を厳密に証明した点に大きな意義がある。第3章の「並列化可能性」についても、定式化そのものに独自の視点があり、局所的なペアリング規則が組み立て効率の「相転移」を引き起こすことを数理的に完結させた点は、氏の高い数理能力の証左である。

第4章および第5章では、より広範な生態系の制御を対象としている。第4章の環境変動下における生態系遷移の問題については、資源競争モデルにおける多様な現象を明晰に解析している。第5章の共生生態系における制御可能性の検討では、マクロな安定性を維持した状態遷移が不可能となるための十分条件を見出している。この結果は極めて非自明であり、有効ダイナミクスの知見を高度に応用しながらも、制御コストの臨界閾値や状態空間の分断を示す論法には極めて高い独自性が認められる。

以上のように、各章は極めて豊かな内容を含んでおり、特に第2章と第5章の成果は、その簡潔さと独創性において群を抜いている。本論文が提唱する「システム固有の性質と制御限界の連結」という方針は、現時点では研究者コミュニティで広く共有されたアプローチではないが、それゆえに既存の枠組みを刷新するポテンシャルを秘めている。例えば、ここで得られたモデル研究の結果を一般化して普遍的な体系に発展することは重要な課題である。さらに、化学や生態系の専門家との議論を深め、物理理論としての汎用性を提示していくことで、他研究分野への波及効果を生むことも期待される。

本論文は、第2章と第3章が既に出版された論文、第4章と第5章が投稿中の論文に基づいており、第1章によって論文全体の背景が記述されている。全体として106ページにわたり精緻に構成されており、複雑系の制御について重要な知見を提示している。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。令和8年1月15日、論文内容および関連事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降