

令和 4 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03449

研究課題名(和文) 開放進化系の複雑性-頑健性関係についての理論研究

研究課題名(英文) Theoretical Study on the Complexity-Robustness Relation of Evolving Open Systems

研究代表者

島田 尚 (SHIMADA, Takashi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：90431791

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構成要素の追加と消滅の繰り返しに対する大規模なシステムの頑健性についての理論研究を進展させ、この理論的枠組みの現実問題への適用に挑戦した。理論の基としてきた簡単なモデルに「休眠・猶予」の過程を取り入れたモデルを解析することにより、より複雑な系や数理モデル群と関係を明らかにした。また、土壌微生物群集系や人流データと感染拡大率の関係、Wikipedia 編集関係などについての実データ解析から広義の生態系の特徴についての再考を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現実の大規模な系の多く(狭義の生態系のみならず生体系、社会・経済システム、工学システム等)は、構成要素の追加と消滅のプロセスにさらされている「開放進化系」であるので、その頑健性についての普遍的性質についての理解を深める事ができたことは意義深い。実際、モデリングにおける理論面での進展に加え、人-人の接触項や Wikipedia での編集者-記事関係などの個別の系の解析における結果は、それぞれの系へのより良い介入の仕方を与えるものともなった。

研究成果の概要(英文)：This project aimed at further developing our theoretical study on the robustness of large and open (i.e. the constituting elements may be added and removed) systems, and applying it to real problems. By introducing dormancy process before the extinction/removal process to the previous basic model, we obtained better theoretical bridging between the minimal modeling and complex models and systems. We also obtained better understanding of the nature of real large and open systems from data-analysis-based theoretical studies on soil-microbiome, crowd and epidemic spread, and edit activity on Wikipedia.

研究分野：統計物理学

キーワード：頑健性、安定性 多様性 生態系 土壌微生物 社会系 感染接触項 非平衡相転移

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現実の大規模な系の多くでは、多様な要素が相互作用しあい、新規要素の包摂（生態系であれば新種の侵入／出現）と要素の消滅（絶滅）を繰り返すことによって複雑な構造を持つに至っている。このような「開放進化系」が崩壊してしまうことなく存続できているのは何故で、またどんなときか、を理解することは様々な分野に通底する重要な問題である。大規模な系の安定性については、その重要性ゆえにこれまでも多くの研究がなされ、重要な進展が得られてきた（微分方程式系の線型安定性に基づいた複雑性-安定性関係の議論、自己組織的臨界性、複雑ネットワーク研究における構造と脆弱性の関係など）。しかしながら系の構成要素が増減するという現実の多くの複雑な系に共通する重要な特徴の正面からの扱いは比較的後回しにされてきた。

研究代表者は、このような開放進化系について内部ダイナミクスと構成要素の導入・絶滅プロセスを出来る限り簡略化した数理模型を提案し、その解析から従来知られていたものとは全く異なる普遍的な頑健性／脆弱性転移の機構を見出してきた。このモデルにおいては唯一のパラメータである新要素あたりに与える相互作用の数 m がほどよい場合 ($5 \leq m \leq 18$) に限り系は複雑なネットワークへと発展できる（多様化相、頑健相）一方その他の場合は系の大きさは有限の大きさに留まる（脆弱相）ことが分かった。さらに、系を構成する要素間の相互作用の相関を無視する一種の平均場近似を行った解析を行い、

- この両相間の転移が「個々の要素にとっては相互作用相手が多い方が良い」 \Leftrightarrow 「全体系にとっては、相互作用数は少ない方が良い」という拮抗関係で決まっていること
- このような系が新要素の導入という厳しい擾乱に対してある程度頑健でいられ、しかしながら系全体も個別の要素も際限なく頑健になることはできない理由

等の、一般の問題に持ち帰る事のできるコンパクトな理解が得られている。またこの模型は同時に構成要素の寿命分布についても生態系や経済系に普遍に見られる分布則を再現する。

これらの結果は、この新規な頑健性-複雑性関係のシナリオの現実性をうかがわせるものであって、現実の個別の系の性質とのより強い対応付けや検証が望まれていた。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、研究代表者が近年発見し進めて来た開複雑性-頑健性関係についての理論研究を進展させ、この理論的枠組みの現実問題への適用に挑戦することを目的とした。具体的には、(1)理論の基としてきた簡単な模型についてその枠組みをより複雑な数理モデル群と接続することを試み、また(2)土壤微生物生態系や社会系などの現実の多自由度系を解析することによってこれらの系の構造と動態の特徴を。これらの理論、データ両方面からのアプローチにより、狭義の生態系のみならず生体系、社会・経済系、工学システム等の現実の開放進化系の普遍的な性質についての理解を深める事を目指した。

3. 研究の方法

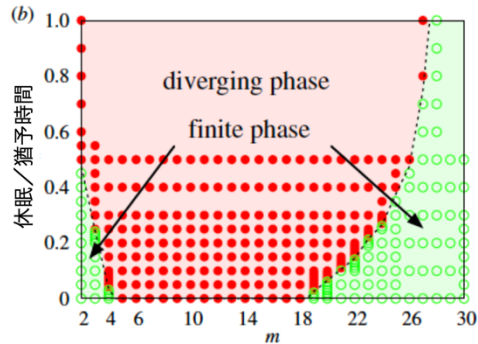
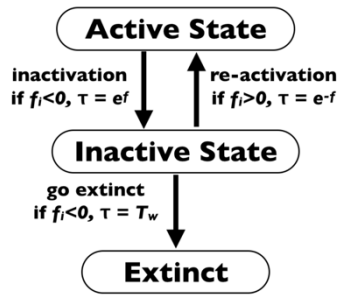
上に述べた目的のため、まず(1)のこれまでの基本モデルとより複雑な数理モデル群との接続のために構成要素の除去ルールに休眠/猶予のプロセスを導入したモデルに取り組んだ。上述の理論の基としてきた基本モデルでは、周りの構成要素との相互作用から決まる「適応度」が負であるような要素の除去は即座かつ不可逆的に行われていた。しかしながら、現実の生態系などでは、そのような生存に不利な状況に陥った種はすぐに死にたえるのではなく、芽胞に代表されるような休眠・耐久状態にうつる例がしばしば見られる。このような場合、自らの不活化も状況が好転した種は再び顕在化する可能性がある。また、新要素の導入ペースが速い状況を対象とする場合やより複雑な相互作用ダイナミクスを考えた場合にも、即座で不可逆的な除去ルールは適切でない領域があると考えられる。このような状況のモデル化として、適応度が負の要素を即座に除去する代わりに一定時間の「休眠」状態とすることにし、引き続いてのダイナミクスの間に適応度が正になった場合に系に復帰させるというモデルについて、複雑性-頑健性関係を構築し解析した。

また、(2)の現実系からのアプローチについては、個体数や活動の分布関数から実質的に少数の自由度により説明することが容易な系ではなく多くの自由度が関わっていることがうかがえる系、すなわち土壤微生物群集系と Wikipedia の編集者-記事の「生態系」等について解析を行った。また、研究期間中に発生した COVID-19 感染拡大状況については、この特異な状況での実データを生かして人-人間の相互作用（接触項）の検証を行った。

4. 研究成果

初年度からまずは(1)から取り組み、適応度が負の要素を即座に除去する代わりに不活性な状態で一定時間休眠できるとしたモデルについて、複雑性-頑健性関係を解析した。その結果、この場合に系のダイナミクスがより複雑になること、またこの休眠状態の導入によって頑健性が上がること、これまでの理論研究の枠組みによってその仕組みの理解が得られること、などを明らかにし、この結果をまとめてオープンアクセスの国際学術雑誌に発表した。このモデルの拡張は、生物における休眠に留まらず社会や経済における猶予や事業休眠などにも対応しており、またより複雑なポピュレーションダイナミクスモデル群における動態の縮約とも関連しているため、現実の系との接続という研究目的に照らしてとても意義深い結果と言える。

(下図：絶滅の前に不活性状態を経るルール (左) と、そのモデルでの成長層の拡大 (右))



これらの理論面での研究の進展とともに、2年目以降には実データの解析にも取り組んだ。当初予定していた土壌微生物群集系については、COVID-19 の感染拡大状況により計画していた介入-応答実験の実施が困難となったが、入手可能なデータからこの生態系が示す頑健性と可塑性を特徴づける方法を見出した。また、この不測の感染拡大状況を奇貨とすべく、都市圏主要部での人手の増減の実データを活用することによりこれと感染拡大率との関係を数理生態学的モデリングに基づいて解析した。ここからまず、一般には推定が難しい「感染から報告までの遅れ時間」がこのようなモデルを基盤としたアプローチによりロバストに推定できることを示し、さらには人-人の接触項については Lotka-Volterra 形からずれていることが明白で、そのずれは人の主体的行動の結果を示唆していること、を発見した。また、Wikipedia の編集者-記事の間の編集関係の2部グラフの解析からは、編集者と記事を良く特徴づける再帰的指標を見出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Fumiko Ogushi, Janos Kertesz, Kimmo Kaski, and Takashi Shimada	4. 巻 11
2. 論文標題 Ecology of the digital world of Wikipedia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18371
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-97755-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Koji Oishi, Shuhei Miyano, Kimmo Kaski, and Takashi Shimada	4. 巻 104
2. 論文標題 Balanced-imbanced transitions in indirect reciprocity dynamics on networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 24310
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.104.024310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 島田尚, 小串典子	4. 巻 40
2. 論文標題 グラフダイナミクスモデル系の頑健性への相互作用の構造の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 シミュレーション（日本シミュレーション学会）2021年9月号 小特集「社会・組織におけるダイナミクスとネットワーク科学」	6. 最初と最後の頁 125-130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小串典子, 島田尚	4. 巻 40
2. 論文標題 再帰的指標で読み解く Wikipedia 編集の生態系	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 シミュレーション（日本シミュレーション学会）2021年9月号 小特集「社会・組織におけるダイナミクスとネットワーク科学」	6. 最初と最後の頁 131-136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 島田尚	4. 巻 ISSN 2434-5946
2. 論文標題 外出人数とCOVID-19 実効再生産数のScaling 関係による人-人接触項の検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第26回 交通流と自己駆動粒子系 シンポジウム (査読付き紀要)	6. 最初と最後の頁 23-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 黒田大地、島田尚	4. 巻 ISSN 2434-5946
2. 論文標題 関西圏におけるCOVID-19 の感染拡大率と外出人数の関係について	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第26回 交通流と自己駆動粒子系 シンポジウム (査読付き紀要)	6. 最初と最後の頁 27-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 島田尚、大平徹	4. 巻 -
2. 論文標題 一次元周期系上の単純探餌運動の拡散係数	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第25回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム紀要 (http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/pdf/mstf2019-07.pdf)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 F. Ogushi, J. Kertesz, K. Kaski, and T. Shimada	4. 巻 6
2. 論文標題 Temporal inactivation enhances robustness in an evolving system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 181471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.181471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 島田 尚, 村瀬洋介, 小串典子	4. 巻 58巻 5号
2. 論文標題 "生態系"諸行無常と頑健性の統計物理学	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生物物理	6. 最初と最後の頁 241-244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophys.58.241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 7件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Takashi Shimada
2. 発表標題 A Comparative Study of the Ecology of Wikipedia
3. 学会等名 Roles of Heterogeneity in Non-equilibrium collective dynamics (RHINO 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Shimada
2. 発表標題 Mean-field Approach to a Glassy Slow Dynamics in an Indirect Reciprocity Model on Networks
3. 学会等名 Complex Networks: The 10th International Conference on Complex Networks and their Applications (Madrid, Spain) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumiko Ogushi and Takashi Shimada
2. 発表標題 Characterization of the digital knowledge ecosystem of Wikipedia
3. 学会等名 Complex Networks: The 10th International Conference on Complex Networks and their Applications (Madrid, Spain) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島田尚
2. 発表標題 構成要素が入れ替わり続けるネットワークの頑健性について
3. 学会等名 生理研シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Shimada
2. 発表標題 Is Lotka-Volterra dynamics applicable for human contact?
3. 学会等名 Roles of Heterogeneity in Non-equilibrium collective dynamics (RHINO 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島田尚、大平徹
2. 発表標題 周期一次元系上の単純な採餌運動について
3. 学会等名 日本物理学会「秋季大会」(物性)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島田 尚、水門善之、和泉潔
2. 発表標題 COVID-19 感染拡大率と外出人数との関係について
3. 学会等名 日本数理生物学会年会 (JSMB2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Shimada
2. 発表標題 A mechanism of determining the robustness of evolving open system
3. 学会等名 FSP2019: Frontiers of Statistical Physics (Hongo Campus, Tokyo, Japan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimada
2. 発表標題 A Positive Role of Heterogeneity in Group Chase and Escape
3. 学会等名 Roles of Heterogeneity in Non-equilibrium collective dynamics (APCTP, 韓国) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島田 尚、美世一守、大塚重人
2. 発表標題 土壌微生物の群集構造を数理で読み解く
3. 学会等名 微生物生態学会第33回大会 (山梨大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimada, Fumiko Ogushi, Janos Kertesz, Kimmo Kaski
2. 発表標題 A positive role of temporal inactivation in evolving open systems
3. 学会等名 Conference on Complex Systems 2019 (Nanyang Technological University, シンガポール) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimada
2. 発表標題 A positive role of heterogeneity of the agents in a model of group chase and escape
3. 学会等名 SWARM2019 (OIST) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimada
2. 発表標題 On the motions of chasers and foragers
3. 学会等名 Self-Organization & Robustness of Evolving Many-Body Systems (RIKEN-RCCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shimada
2. 発表標題 Robustness and Plasticity of Ecological & Financial Systems
3. 学会等名 The 6th International Workshop on Physics of Social Complexity (2018/6/1 POSTECH, 韓国) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島田 尚
2. 発表標題 [依頼講演] 開放進化系の複雑性-頑健性関係について
3. 学会等名 複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (2018/6/8 京都) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島田 尚
2. 発表標題 変遷を続けるネットワーク系の頑健性について
3. 学会等名 経済・社会への分野横断的研究会 (2018/12/4 キヤノングローバル戦略研究所、東京) (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------