

令和元年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05202

研究課題名(和文) 開放進化系の頑健性決定機構についての統計物理学的研究

研究課題名(英文) Statistical physics approach to the robustness 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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：生体、生態系、経済・社会等の現実の複雑な系には、新規要素の包摂と要素の消滅が繰り返されているという共通の特徴が見られる。本研究ではこのような「開放進化系」について研究代表者が簡単な理論模型に基づいて発見した新しい頑健性決定機構について研究を行い、その普遍性と現実問題への適用の妥当性を吟味した。この結果、生態系や社会系の多くで重要な性質である「相互作用に双方向性がある場合」など拡張モデルについて新しい発見をし、またそれを通して頑健性決定機構についてより良い理解を得ることができた。また、これらの結果については論文として出版しただけでなく、国際学会や解説記事を通じてより広く発信した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で理解の深まった「開放進化系の頑健性」が多くの現実の系に共通する性質を捉えているものと考えられる。このことは実際に本研究中に行った現実系のデータとの比較解析によっても確認された。この吟味と、相互作用に相関構造を入れた場合などの拡張モデルについて本研究課題を通じて得られた新しい知見とを合わせて、本理論研究の成果は現実の大規模系についての理解をより深めた。また、そのことを通じて現実の系の制御・設計の原理に関しても新しい視点を与えたものと言える。

研究成果の概要(英文)：The robustness against inclusion of new elements is an essential feature of diverse kinds of real complex systems such as living organisms, ecosystems, social and economic systems, and complex engineering system with bottom-up design principle. A recently proposed simple model has revealed a general mechanism of determining the robustness of such systems against inclusion of elements with totally random interactions. In this project, we obtained better understanding about the robustness of evolving open systems through investigations on some types of extended models and finer comparison to the real data. For example, the interaction in many real systems has bidirectional nature like mutual symbiosis, predation, and competition in ecology. We indeed found the strong reinforcement effect of the bidirectionality of the interactions on the robustness of evolving systems.

研究分野：統計物理学

キーワード：頑健性・安定性 多様性 開放系 非平衡相転移 共存 ネットワーク

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現実の大規模で複雑な系の安定性の問題（つまり、それらがなぜ存在できているのか）は分野をまたいで大きな関心を集めて来た問題である。線型安定性に基づいた伝統的な複雑性-安定性関係の議論、自己組織的臨界性を示す生態系モデル、複雑ネットワーク研究における構造と脆弱性の関係の発見等が特に重要かつ有名なこれまでの理論的枠組みとして挙げられる。

しかしながら、生体内反応系/遺伝子ネットワーク、脳神経回路、生態系、経済系や社会のコミュニティ、…等々の現実の多くの複雑な系に共通して見出されるある特徴は見逃されがちであった。それは系が本質的に開放系であることである。これらの系では多様な要素が相互作用しあい、新規要素の包摂と要素の消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。本研究課題ではこのような系を「開放進化系」と呼ぶ。

研究代表者はこのような系の理論研究を経て非常に簡単な数理モデルに辿り着き、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、本研究課題開始の前年に論文として発表したところであった。ここで提案したモデルは同時に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とから、現実の開放進化系の普遍的な側面を捉えていることが期待され、更なる研究の推進が待たれる状況であった。

### 2. 研究の目的

上記のような状況に基づき、本研究課題では以下のこと目標とした：

- A) 基本のミニマルモデルに相関構造や空間構造を入れる等の拡張を行うことで理論の適応・比較範囲を広げる
- B) 基本モデルから得られた新しい頑健性決定機構の描像に基づき現実の系の統計性を解析し直し（あるいは入手し直し）、この新規な機構が本当に実世界の普遍的側面と対応するものかどうかを吟味する
- C) 転移のより良い理解や、解析解を得る

### 3. 研究の方法

まず頑健性転移機構の発見に用いてきたモデルについて自然な拡張を行い、この機構の適用・比較の対象範囲を広げる。次年度には、生態系等とのより直接的な対応付けの可能性を探るため相関構造を入れた拡張モデルについて解析を進めていくという方法をとった。

こうして得られた知見をもとにこれまで説明してきた頑健性決定機構の現実系・現象との比較を進め、この機構の有用性・普遍性を吟味する。このような解析は当然初年度より適宜取り組んでいく予定であるが、知見の揃う最終年度を特に重点的に充てる計画である。

### 4. 研究成果

初年度にはまず理論の基になっている簡単なモデルの拡張の端緒として、(A) 既存要素がすでに持っている相互作用本数に比例して新規導入要素からの相互作用が結ばれる場合及び (B) 新規導入種の持つ相互作用項の平均が従来の0からずれた場合 について解析を行い、2年目には (C) 「系のサイズを固定したモデル」と (D) 「相互作用の結合に双方向性を持たせたモデル」について主に取り組んだ。引き続き3年目にはまず (D) の研究の仕上げに取り組み、共同研究者と共に解析の緻密化と査読結果を受けての論文の改訂を進め、学術論文誌にオープンアクセス論文として出版した。また、本研究において追求してきた「モデル相互作用の現実との比較」の問題意識から、「集団での追跡・逃走」についての理論研究もを行い、捕食者側に分業的に「怠け」を入れた場合に捕食者全体の効率が上がることとその原因についての解析結果を論文にまとめ学術論文誌にオープンアクセスの論文として出版することができた。

また、これらの成果については国際学会や解説記事などで広く発信することもできた。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- (1) F. Ogushi, J. Kertész, K. Kaski, and **T. Shimada**  
“Temporal inactivation enhances robustness in an evolving system”  
Royal Society Open Science Vol. 6, 181471 (2019).
- (2) **島田尚**, 村瀬洋介, 小串典子  
「“生態系” 諸行無常と頑健性の統計物理学」  
生物物理 Vol. 58 (5), 241-244 (2018).
- (3) F. Ogushi, J. Kertész, K. Kaski, and **T. Shimada**  
“Enhanced robustness of evolving open systems by the bidirectionality of interactions between elements”  
Scientific Reports Vol. 7, 6978 (2017).

- (4) T. Shimada and F. Ogushi  
 “A mean-field analysis of the simple model of evolving open systems”  
 Journal of Physics: Conference Series Vol. 750, 12008 (2016).  
 (会議後改めての投稿・査読を経た論文)
- (5) T. Shimada, Y. Murase, and N. Ito  
 “Do connections systems robust?: A new scenario for the complexity-stability relation”  
 Proceedings of the International Conference on Social Modeling and Simulation, plus  
 Econophysics Colloquium 2014 (2015) .  
 (同上)
- (6) Y. Murase, T. Shimada, and N. Ito  
 “A universal lifetime distribution for multi-species systems”  
 Proceedings of the International Conference on Social Modeling and Simulation, plus  
 Econophysics Colloquium 2014 (2015).  
 (同上)

[学会発表] (計 17 件)

- ① T. Shimada  
 “A complexity-stability relation in evolving open systems”  
 (Models of Life (国際学会) , 2015/8/5 Krogerup Hoejskole (Humlebaek, Denmark))
- ② T. Shimada “Another look at the diversity-stability relation”  
 (2015 Joint Meeting of The 5th China-Japan-Korea Colloquium on Mathematical Biology  
 and The Japanese Society for Mathematical Biology (国際学会) 2015/8/29 同志社大  
 学 (京都市上京区))
- ③ 島田尚, 小串典子  
 “開放進化系の構造と頑健性について”  
 (日本物理学会 2015 秋季大会 2015/9/16 関西大学)
- ④ 島田尚, 村瀬洋介, 伊藤伸泰  
 “自由度の増減を許した動的な系の頑健性決定機構について” (日本物理学会 2015 秋季  
 大会 2015/9/18 関西大学)
- ⑤ T. Shimada and Y. Murase  
 “Lifetime distributions of the elements in growing systems”  
 (Artificial Life and Robotics 20th (国際学会) 2016/1/21 別府ビーコンプラザ)
- ⑥ T. Shimada  
 “Transition in robustness of evolving systems”  
 (Recent Developments in Computer Simulation Studies in Condensed Matter  
 Physics(国際学会) 2016/2/23 Georgia University (USA))
- ⑦ T. Shimada  
 “On the robustness of open evolving systems”  
 (NetSci 2016(国際学会) 2016/6/2 K ホテルソウル (韓国))
- ⑧ T. Shimada and F. Ogushi  
 “Robustness of evolving open systems with mutual interactions”  
 (日本数理生物学会 2016 年会 2016/9/7 九州大学伊都キャンパス)
- ⑨ 島田 尚  
 “自己組織臨界性を示す開放進化系モデル”  
 (日本物理学会 2016 秋分科会 2016/9/4 金沢大学)
- ⑩ T. Shimada  
 “On the robustness and growth of open evolving systems”  
 (JKCCS workshop 2016(国際学会) 2016/10/20 Pukyong 大学(韓国))
- ⑪ T. Shimada  
 “A complexity-robustness relation in evolving open systems”

(Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science (国際学会、招待講演)  
2016/11/6 鹿児島大学)

- ⑫ T. Shimada  
“Critical and non-critical behaviors in evolving systems”  
(A mini-workshop on complexity theory and its applications (国際学会、招待講演)  
2016/11/12 上海理工大学(中国))
- ⑬ 島田 尚, 小串典子  
“双方向性相互作用を持つ開放進化系における頑健性転移(2)”  
(日本物理学会 2017 年次大会 2017/3/19 大阪大学)
- ⑭ 島田尚  
“開放進化系の頑健性について”  
(第 1 回松江数値生物学・現象数理学ワークショップ 2017/11/30 松江テルサ)
- ⑮ T. Shimada and F. Ogushi  
“Bidirectional interactions Enhance the Robustness of the Evolving Open Systems”  
(NetSciX 2018(国際学会) 2018/1/8 杭州 (中国))
- ⑯ 島田尚, 増子真, 伊藤伸泰  
「集団追跡・逃走モデルにおける“怠け”の効用」  
(電子情報通信学会 Complex Communication Sciences 2017 年度第 4 回第 1 種研究会)
- ⑰ T. Shimada, F. Ogushi, K. Kaski, and J. Kertész  
“The Strong Reinforcement Effects of Bidirectionality of Interactions on the  
Robustness of Evolving Open Systems”  
(CCS2018 main track (国際学会) 2018/9/24 Thessaloniki, Greece)

[図書] (計 2 件)

- I. T. Shimada  
“A Universal Mechanism of Determining the Robustness of Evolving Systems”  
*in Mathematical Approaches to Biological Systems* (Springer, 2015), p95-117.
- II. 島田 尚  
“開放進化系の頑健性の決定機構”  
シミュレーション学会誌 Vol. 34 No. 1, 「シミュレーションの世界」 (2016) p54-58.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/eos/research.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者  
(無し)

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 村瀬 洋介

ローマ字氏名： MURASE, Yohsuke

研究協力者氏名： 小串 典子

ローマ字氏名： OGUSHI, Fumiko

※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、研究者個人に帰属されます。