

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03650

研究課題名（和文）大自由度非線形進化力学系に対する統計力学的研究

研究課題名（英文）Statistical mechanics of nonlinear evolutionary dynamics with a large degree of freedom

研究代表者

時田 恵一郎 (Tokita, Kei)

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：00263195

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：マウス腸内細菌叢データを解析し、OTU相互作用と微生物叢ネットワークの特徴を発見した。さらに、レプリケーター・ミューテーター方程式をシミュレーションすることにより、検出限界以下まで存在量が減少した後に復活するなど、カオス的なダイナミクスを示す種を発見した。また、この種の存在量パターンは、1930年に本村功によって発見された幾何級数型であることもわかった。これらの成果は、国際生物物理学会議（ICBP2023）で招待講演として発表された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マウス腸内細菌叢のOTU間相互作用がこれまでさまざまな数理モデルで仮定されてきたランダム行列に近いものであることを示唆しており、統計力学、数理生物学における重要な仮説を検証したことになる。また、各OTUの役割分担についても重要な示唆を得た。さらに、腸内細菌叢の種の豊富さのパターンが水系生態系等で観測されるものと同様の幾何級数型になることを強く示唆する結果を得た。これらの成果は、実証生物学、理論生物学、データ科学の融合領域における新たな発見という意味で学術的意義があると考えている。腸内細菌とホストの疾患との関係の探求に対しても重要な示唆を与えており、社会的意義は深いと考えている。

研究成果の概要（英文）：We analyzed murine intestinal microbiota data and discovered characteristics of OTU interactions and the microbiota network. Furthermore, by simulating the replicator-mutator equation, we found that the species exhibit chaotic dynamics, including a resurgence after a decrease in abundance to below the detection limit. We also found that the abundance pattern of the species is of the geometric series type discovered by Isao Motomura in 1930. These results were presented as an invited talk at the International Conference on Biophysics (ICBP2023).

研究分野：統計力学、数理生物学

キーワード：腸内細菌叢 生態系 種間相互作用 ネットワーク ランダム行列 種の豊富さのパターン

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2021年度のノーベル物理学賞が複雑系物理学に対して授与されたように、物理学、生物学、情報科学、社会科学、経済学などの様々な分野で個別に研究されてきた巨大システムを理解して制御するうえで、それらに共通するメカニズムや法則に注目するという複雑系科学の考え方の重要性が認識されつつあった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の巨大システム、特に多種多数な主体が複雑な相互作用を介して影響し合いながらその個体数などを変動させ時間発展する大自由度非線形進化力学系の巨視的性質を、統計力学的手法や計算物理学的手法を用いて解明することである。特に、レプリカ法や生成汎関数などこれまで申請者が用いてきた数理物理学的手法を適用することにより、生態系、免疫系、経済システムなどの様々な現実の進化力学系に共通に見出されてきた種個体数分布、種数面積関係などの巨視的なパターンが生み出されるメカニズム、特に環境や種などの性質を表すパラメータに対する依存性を明らかにする。さらに、それらの結果を相互作用が変動する巨大システム一般(例えば現在応用が著しい深層学習や生成 AI など)の理論的解明にもつなげる。さらに、実証研究者によるデータを用いた理論の検証も行う。

3. 研究の方法

(1) 申請者が行ってきたランダムレプリケータ力学系(RRE)に対するレプリカ法や生成汎関数などの統計力学的解析を用いて、適応や進化も考慮したランダムレプリケータ・ミュテータ方程式(RRME)における多様性、種個体数分布、種数面積関係などの大自由度進化力学系の巨視的パターンの各種パラメータ依存性や多種共存状態から大絶滅状態への相転移の条件・性質を明らかにする。

(2) 統計力学的手法を用いて、相互作用が進化的に時間変動する RRE における巨視的パターンのパラメータ依存性や相転移の条件・性質を明らかにする。

(3) 上記の結果をもとに、実証研究グループとの共同研究を通じて、実証データを用いた理論の検証、精密化を進め、環境評価・保全、社会・経済システムにおける格差是正、深層学習などの機械学習システムの安定性評価等にも応用も図る。

4. 研究成果

(1) 種間相互作用行列が対称ランダム行列かつ突然変異率行列が対称な一様行列の場合については、レプリカ法を用いて RRME の多様性、種個体数分布を解析的に求め、そのパラメータ依存性や相転移の条件・性質を明らかにすることができた。これについては日本物理学会、日本数理生物学会、数理生物学関係の国際会議などで発表し、現在論文執筆中である。

(2) 相互作用が適応的・進化的に時間変動する RRE に対する統計力学的解析には成功していないが、微生物群集に対する実験研究を行っている研究者と共同研究を開始しており、提供されたデータから数理モデルのパラメータ推定を行った。その推定値を用いて、飢餓状態などパラメータ値が急変した場合のシステムの応答特性に関する重要な結果を得ており、上記の学会などで発表し、論文も共同執筆する予定である。

(3) マウス腸内細菌叢の OTU 存在量データを取得し対応する多種ロトカ-ボルテラ方程式のパラメータ推定を行った先行研究のデータを解析した。その結果、マウス腸内細菌叢は相対的な相

相互作用が全くない競争群集であること、推定した種間相互作用行列がランダム行列に類似したのになっていること、さらに存在量が多い OTU 間には例外的な強い捕食被食関係が見られることを見出した。さらに、そのパラメータ値を用いてレプリケーター・ミュテーター方程式のシミュレーションを行い、変異率(死亡個体が資源として他の OTU に再分配される割合)が高いときには平衡点に収束する安定なダイナミクスが、また変異率が低い場合には検出限界以下への存在量減少や復活を含むカオティックな動態(非平衡・非定常状態)を示すことを見出した。さらに種の豊富さのパターンが1930年に元村勲が世界に先駆けて発見した幾何級数型になっていること、すなわち腸内細菌叢が厳しい腸内環境で競争していることを示唆する結果を得た。これらの成果を上記の学会などで発表した。さらに、国際会議(International Conference on Biological Physics (ICBP2023))では招待講演も行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kei Tokita	4. 巻 1
2. 論文標題 May's dream: the interactions in biological networks were random matrices after all	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of AROB-ISBC-SWARM 2023	6. 最初と最後の頁 1398-1401
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 時田恵一郎	4. 巻 1
2. 論文標題 生物ネットワークの相互作用はランダムか?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023年電子情報通信学会総合大会 NBT-1 次世代ネットワークを支える数理モデルの展開	6. 最初と最後の頁 1-4
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 無
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 Tomoei Takahashi, George Chikenji, and Kei Tokita	4. 巻 104
2. 論文標題 Lattice protein design using Bayesian learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 014404_1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.104.014404	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 時田恵一郎, 佐藤純	4. 巻 26
2. 論文標題 生物進化の渋滞モデルと種個体数分布	5. 発行年 2020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論文集	6. 最初と最後の頁 1-4
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 中井貴生, 時田恵一郎	4. 巻 2166
2. 論文標題 アリ・アブラムシ系の個体群ダイナミクス -共生と捕食のスイッチング-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 54-58
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 無
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 田口優真, 時田恵一郎	4. 巻 2166
2. 論文標題 腸内細菌叢の数理解析モデルとその相互作用行列の解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 72-76
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 無
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13件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kei Tokita
2. 発表標題 Parameter Estimation of Population Dynamics of Bacterial Flora and Rank Abundance Relationships Using Real Data 招待有り 国際
3. 学会等名 International Conference on Biological Physics (ICBP2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kei Tokita
2. 発表標題 May's dream: the interactions in biological networks were random matrices after all
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 時田恵一郎
2. 発表標題 生物ネットワークの相互作用はランダムか？
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kei Tokita
2. 発表標題 Species abundance distributions in evolutionary dynamics
3. 学会等名 Roles of Heterogeneity in Nonequilibrium Collective Dynamics 2022 (RHINO 2022)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋智栄, 千見寺浄慈, 時田恵一郎
2. 発表標題 Cavity 法による格子タンパク質模型のデザイン
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田口優真, 時田恵一郎
2. 発表標題 進化の大規模モデルに対する統計力学的解析II
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田口優真, 時田恵一郎
2. 発表標題 大規模群集モデルに対応したパラメータ推定手法
3. 学会等名 第68回日本生態学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋智栄, 千見寺浄慈, 時田恵一郎
2. 発表標題 水の効果を外場とした格子タンパク質の経験ベイズ法によるデザイン
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口優真, 時田恵一郎
2. 発表標題 大自由度非線形進化力学系への統計力学的手法の応用
3. 学会等名 第6回数理生物学交流発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 時田恵一郎, 川元琢, 坂野鋭
2. 発表標題 六道湖・中海生態系の数理モデリング
3. 学会等名 第28回汽水域研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 時田恵一郎, 佐藤純
2. 発表標題 生物進化の渋滞モデルと種個体数分布
3. 学会等名 第26回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口優真, 時田恵一郎
2. 発表標題 大規模群集モデルのパラメータ推定
3. 学会等名 2020年度日本数理生物学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋智栄, 千見寺浄慈, 時田恵一郎
2. 発表標題 経験ベイズ推定を用いた水の効果の最適化によるタンパク質デザイン
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Atsushi Yamauchi, Kei Tokita, Toshiyuki Namba, Tae-Soo Chon	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 429
3. 書名 Creative Complex Systems	

〔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
---------	---------