

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04885

研究課題名（和文）大規模トラッキングによる超個体創発の解明と集合知の新理論の展開

研究課題名（英文）Analysis of Emerging Super-Organisms by Large-scale Tracking Experiments and Developing a New Theory of Collective Intelligence

研究代表者

池上 高志（Ikegami, Takashi）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：10211715

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,500,000円

研究成果の概要（和文）：3つの生物集団に関する実験を、計画どおりに続行することができた。その結果をSWARM-AROB国際会議(1/25-27/2023)にて発表することが出来た。また2022年の11月22日にOIST（沖縄科学技術大学）において、ゲストスピーカー（水本/OIST、島田/東大、小串/統計数理研、柏木/弘前大）を招いて研究集会“Collective Intelligence in Living/Non-Livings Populations”を組織し、活発に議論を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テトラヒメナの集団における表現型のゆらぎを、世界で初めて定量的に報告した。セイヨウミツバチの役割分化の進化を世界で初めて報告した。またアミアリがある集団サイズで見せる「個体が擬似的に停止した」クラスターと探索個体への分化を、世界で初めて解析報告した。これらの成果は、集団における「個性の進化」という認識を創り出し、新しく基盤Aを申請するきっかけとなった。

社会的な意義として、個人の才能が先か、いいコミュニティーを見つけるのが先か、という観点をメッセージとして社会に提案することができたことは大きいと思う。

研究成果の概要（英文）：We were able to proceed as planned with the experiments on three biological populations. The results were presented at the SWARM-AROB International Conference (1/25-27/2023). Additionally, on November 22, 2022, at OIST (Okinawa Institute of Science and Technology), we organized a research symposium titled “Collective Intelligence in Living/Non-Living Populations,” featuring guest speakers (Mizumoto/OIST, Shimada/Tokyo University, Kogushi/Institute of Statistical Mathematics, Kashiwagi/Hirosaki University) and engaged in active discussions.

研究分野：複雑系の科学

キーワード：集団知 表現型のゆらぎ テトラヒメナ セイヨウミツバチ アミアリ 全個体トラッキング

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

巨大データが自然科学に新しい視点を提供しようとしている。深層学習を始めとする機械学習手法が発展し、人類のみが実行可能と従来考えられていた、データの持つ意味の解釈や仮説のアップデートや理論構築のような、科学者そのものの自動化がすぐそこに来ている。

申請者・池上が長く考えてきたのは、生命・非生命システムの集団に見いだされる生命性である。生命とはなにか。それを理解すべく、1950年代にはサイバネティクス、1980年代には非線形非平衡科学や人工生命といった研究領域が立ち上がり、精力的に研究が行われてきた。なかでも人工生命という研究領域は、「生命とは何か」の理解を求めてコンピュータや化学実験を駆使し、「作って分かる構成論的な分かり方」を目指した運動である。代表者である池上は、この人工生命の分野に設立当初から関わり、化学実験や人工神経回路といったアプローチを駆使して生命性を立ち上げる原理の探求を行い、自己複製の理論、動く油滴の化学実験発見と研究、ホメオスタシスの理論等、世界をリードする成果を挙げてきた。他方、2000年代に入ると、ウェブの発展や、ライフログに代表される巨大データを扱う技術群が登場する。特に2010年を境として、これらを駆使することで、大規模な人工システムがより生命的である仕掛けが見えてきた。日本人工知能学会では2011年より特別セッションをオーガナイズして、それをテーマとして5年間議論した。他にもこうした活動は、国内外でのオーガナイズドセッションの実施、論文誌特集号(人工知能学会紙、国際学会でのワークショップの企画等、アカデミックにおいて一定の評価を得るに至っている。

2. 研究の目的

この過剰な情報の流れのなかに生命性を見出す研究は、人工知能学会や非線形科学の理論など既存の単一の領域には収まりきらない、新規な学際性を持つ。そこで、これまでの研究成果や人的ネットワークを基盤に、一細胞計測技術の進歩を用い、大規模なシステムに発現する生命性に注目し、本プロジェクトを立案した。こうした状況を踏まえ、日本発の研究領域として世界に優位性を示す学術領域を構成することを狙う。

具体的には、本プロジェクトは、一細胞/個体トラッキングの大きなデータの収集から見えてくる新しい生命科学の理論を、特に生命・非生命集団の dynamics から集団知の新しい理論を提案しようとするものである。これまでも、新学術でも提案された「スパーモデルの深化と高次元データ駆動科学」(研究代表者・岡田真人)などが大きなデータに基づく学術領域として提案されてきた。しかし、Big Dataの一般的な方法論として構えるとどうしても対象としての自然現象の面白さから逸脱してしまう。たとえばある種の機械学習の開拓になってしまう。ここでは、生命とは何か、という本質的な問いに、個体のトラッキングに特化して解析し、その結果として創発してくる集団知の理論を提案するものである。

3. 研究の方法

おもに以下の2つの系について、新しく実験を行い発表した。

- A. テトラヒメナ: テトラヒメナをマイクロなシャーレで培養すると、時間とともに個体は分裂し集団運動が組織化される。分裂に伴う個体トラッキングを行うことで、集団のサイズの増加と系統の発生、および集団運動の性質の進化を関係付けることができる。特に、分裂によって徐々に作られる集団と、いきなり16匹

にした集団は振る舞いに違いがあると思われる。ゆっくりと自己組織化して生まれる超個性について、観察していく。この実験は弘前大学の柏木明子グループと協力することで行った（右図が実験システム）。弘前大でテトラヒメナを培養し、その画像データを東京大で解析した。

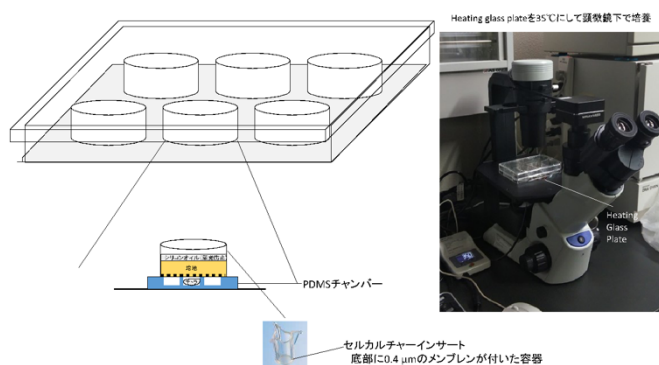


図 1. テトラヒメナの実験装置

- B. アミメアリ：アミメアリを 2 次元平面に閉じ込めた撮影用アリーナの中で行動させ、その様子を上部からビデオカメラで撮影する(図 2)。それを深層学習の U-net を用いて個体同定し、トラッキングする。このシステムを用いて、稠密なクラスター状態での個体ごとのトラッキングを行った。各個体を“ ε (イプシロン) マシン”で抽出される有限オートマトン(FSA)で表し、クラスターからの出入りによって、同じ個体でも FSA が変化するかどうか、より長時間(最長 10 時間)の軌跡のサブセット間で、また、集団サイズが大きい場合に形成される複数の小クラスターの離合集散の過程で、比較した。

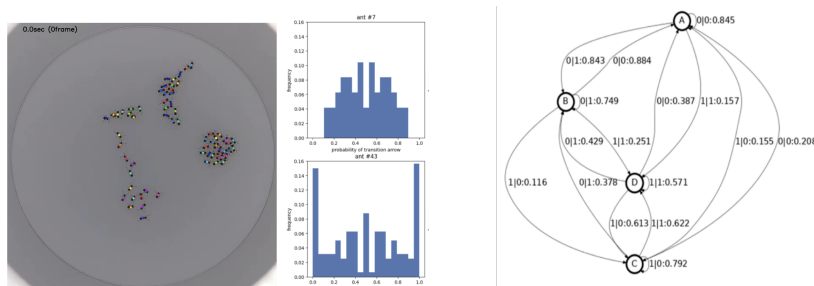


図 2. アミメアリの個体のトラッキング(左端)と、解析された FSA(右端)。

4. 研究成果

3つの生物集団に関する実験(上記二つに加え、イリノイ大学で行われたデータを用いたセイヨウミツバチの実験)を、計画どおりに続けることができた。その結果を SWARM-AROB 国際会議(1/25-27/2023)にて organized session (OS21: Individuals and collectives in (artificial) living systems)を提案し、発表することが出来た。また 2022 年の 11 月 22 日に OIST (沖縄科学技術大学)において、ゲストスピーカー(水本/OIST, 島田/東大, 小串/統計数理研, 柏木/弘前大)を招いて研究集会“Collective Intelligence in Living/Non-Livings Populations”を組織し、活発に議論を行った。

1. 生物実験 1 (セイヨウミツバチ) : ミツバチの各個体の運動エネルギーが揃って立ち上がる大域的なバースト現象を発見し、その定量化と生物学的な意味を考察して、論文として投稿した。
2. 生物実験 2 (テトラヒメナ) : テトラヒメナの元気さの指標として、個体の運動エネルギーを計算し解析した。その結果、個体の運動エネルギーの分布の形状が分裂とともに、世代間で伝達することを見出した。しかしその遺伝の強さは、表現型ごとに異なっている。現在は、このことを説明する簡単な理論モデルをつくり、化学的油滴の運動などと比較して議論している。一部結果を統計力学の国際会議で発表した。またテトラヒメナに関し、その 1 細胞ごとの RNA 発現パターンを解析し、細胞周期以外に特徴的な発現パターンのクラスターが生まれていることが見いだされた。こちらも論文発表した。
3. 生物実験 3 (アミメアリ) : アリの個体集団を餌のないウェルで飼育し、その集団運動の様子を全個体トラッキングから解析した。アリの運動エネルギーの分布か

ら、個体は2つの状態（殆ど動かずに集まっている個体群と、一匹で動いている個体群）に分化していることがわかった。この個体の運動の時系列を ε （イプシロン）マシンによる手法で解析し、一人で動いている個体はより「決定論的な」ルールに従い、集まっている個体群はより「非決定論的」なルールに従って運動していること様子が観察された。現在この結果の解析を精査している。ALIFE2023 に論文として発表した。

全体を通じて、集団の元気さの指標として個体の運動エネルギーに注目することで、新しい発見が得られた。特にテトラヒメナでは一匹から分裂して作り出された集団には個性があり、同じ遺伝子型でもランダムに集めてきて作られた集団とは、その性質が異なることは注目される。またアリの場合に、アリの個体の非決定論的な振る舞い（自由意志？）が、集団をつくることで強化されることは注目される。今後、集団のマクロな振る舞いと個体のミクロな振る舞いの関係を、移送エントロピーや情報閉包などを用いて明らかにし、実験成果を解釈していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ryosuke Takata, Yujin Tang, Yingtao Tian, Norihiro, Maruyama, Hiroki Kojima and Takashi Ikegami	4. 巻 -
2. 論文標題 Evolving Collective AI: Simulation of Ants Communicating via Chemicals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 the proceedings of ALIFE 2023	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 Norihiro Maruyama, Michael Crosscombe, Shigeto, Dobata and Takashi Ikegami	4. 巻 -
2. 論文標題 Emergence of Differentiation of Deterministic/Stochastic Behavior in Ants' Collective Behavior	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 the proceedings of ALIFE 2023	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 Atsushi, Masumori and Takashi Ikegami	4. 巻 -
2. 論文標題 Exploring Hierarchical Inter-Scale Information Flow in Large-Scale Boids Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 the proceedings of ALIFE 2023	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 Riku Adachi, Hiroki Kojima and Takashi Ikegami	4. 巻 -
2. 論文標題 Boundary Between Non-living and Living: from Oil Droplet Experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 the proceedings of ALIFE 2023	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 Riku Adachi, Hiroki Kojima and Takashi Ikegami	4. 巻 -
2. 論文標題 Boundary of Non-living to Living: from Oil Droplet Experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Stat Phys 2023	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 Idogawa Naoto, Sasaki Tomonori, Tsuji Kazuki, Dobata Shigeto	4. 巻 16
2. 論文標題 Comprehensive analysis of male-free reproduction in <i>Monomorium triviale</i> (Formicidae: Myrmicinae)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	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) 10.1371/journal.pone.0246710	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 Idogawa Naoto, Lee Chih-Chi, Yang Chin-Cheng Scotty, Dobata Shigeto	4. 巻 6
2. 論文標題 The complete mitochondrial genome of a parthenogenetic ant <i>Monomorium triviale</i> (Hymenoptera: Formicidae)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mitochondrial DNA Part B	6. 最初と最後の頁 2793 ~ 2795
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/23802359.2021.1970632	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 Shimoji Hiroyuki, Dobata Shigeto	4. 巻 377
2. 論文標題 The build-up of dominance hierarchies in eusocial insects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences	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) 10.1098/rstb.2020.0437	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 IDOGAWA NAOTO, GOTOH AYAKO, DOBATA SHIGETO	4. 巻 5105
2. 論文標題 Morphology of immatures of the thelytokous ant, <i>Monomorium triviale</i> Wheeler (Formicidae: Myrmicinae: Solenopsidini) with descriptions of the extraordinary last-instar queen larvae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Zootaxa	6. 最初と最後の頁 253 ~ 268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11646/zootaxa.5105.2.5	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 Sato Hiroki, Hashimoto Yasuhiro, Oka Mizuki, Ikegami Takashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Exploration in Evolutionary Space by Hashtag Evolution on a Social Network Service	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of the 2021 Conference on Artificial Life	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) 10.1162/isal_a_00464	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22件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Shigeto Dobata
2. 発表標題 Emergence and collapse of frozen clusters in experimental ant (<i>Pristomyrmex punctatus</i>) groups
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akiko Kashiwagi
2. 発表標題 Macro Vitality in Tetrahymena collectives
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Norihiro Maruyama
2. 発表標題 Emergence of Multiple Types of Swarms in a Large Scale Boids Model.
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Masumori
2. 発表標題 Stimulus Avoidance and Informational Closure in Spiking Neural Networks
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhiro Hashimoto
2. 発表標題 Evolutionary Dynamics in Web-Service
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Ikegami
2. 発表標題 A New Concept for Collective Intelligence: a Coupling-Decoupling Hierarchy
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigeto Dobata
2. 発表標題 Emergence and collapse of frozen clusters in experimental ant (<i>Pristomyrmex punctatus</i>) groups
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akiko Kashiwagi
2. 発表標題 Macro Vitality in Tetrahymena collectives
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhiro Hashimoto
2. 発表標題 Evolutionary Dynamics in Web-Service
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本康弘
2. 発表標題 新規性の生成と選択 - ソーシャルメディアの分析とオープンエンド性
3. 学会等名 生物学基礎論研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Sato
2. 発表標題 Exploration in Evolutionary Space by Hashtag Evolution on a Social Network Service
3. 学会等名 ALIFE2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeto Dobata
2. 発表標題 Social insects as a model system of adaptive complexity
3. 学会等名 RIMS Workshop "Toward an integration of fluids, ecology, and evolution" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中康就, 土畑重人, 辻和希, 下地博之
2. 発表標題 アリのワーカーが持つ繁殖ポテンシャルがタスク選択に与える影響
3. 学会等名 第40回日本動物行動学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeto Dobata
2. 発表標題 Quantifying social dilemma in ant societies
3. 学会等名 ICMMA 2021 International Conference on "Emergence of Cooperation and Organization in Groups of Animals and Non-living Objects" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Kojima
2. 発表標題 Phenotypic Inheritance of Dynamical Traits in Growing Populations of Tetrahymena
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics(SWARM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Itsuki Doi
2. 発表標題 Entire Tracking Analysis of Honeybees' Hive Dynamics
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics(SWARM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Ikegami
2. 発表標題 A New Concept for Collective Intelligence: a Coupling-Decoupling Hierarchy
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Itsuki Doi, Hiroki Kojima, Takashi Ikegami,
2. 発表標題 Analysis of a latent space structure in generative neural net trained by sound data
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akiko Kashiwagi, Hiroki Kojima, Takashi Ikegami
2. 発表標題 Fluctuations of the gene expression in populations of <i>Tetrahymena thermophila</i>
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Norihiro Maruyama, Michael Crosscombe, Shigeto Dobata, Takashi Ikegami
2. 発表標題 Emergence of Individuality and the Self-organization of the Collective: The epsilon transducer analysis of an ant colony
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuhiro Hashimoto, Hiroki Sato, Mizuki Oka, Takashi Ikegami
2. 発表標題 Novelty Creation and Preferential Attachment in Hashtags' Evolutionary Dynamics
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroki Sato, Yasuhiro Hashimoto, Mizuki Oka, Takashi Ikegami
2. 発表標題 A Mechanism of Novelty Innovation and OEE in Evolution of a Web Service
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究分担者	橋本 康弘 (Hashimoto Yasuhiro) (10376494)	会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授 (21602)	
研究分担者	柏木 明子 (Kashiwagi Akiko) (40362652)	弘前大学・農学生命科学部・教授 (11101)	
研究分担者	土畑 重人 (Debate Shigeto) (50714995)	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授 (12601)	

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2件

国際研究集会 Collective Intelligence in Living/Non-Livings Populations	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Individuals and collectives in (artificial) living systems	開催年 2023年～2023年

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
---------	---------