

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K00270

研究課題名(和文) 次世代進化論に向けた構造存在論の数理的發展

研究課題名(英文) Mathematical development of the structuralist ontology for evolution

研究代表者

大塚 淳(Otsuka, Jun)

京都大学・文学研究科・准教授

研究者番号：60743705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：生物進化は、固定された環境だけでなく、同種・異種の競争相手、協同・利用関係、環境(ニッチ)の構築など、様々に変化する状況に対する適応として生じる。本研究では、こうした可変的な進化動態を、因果モデルとゲーム理論という異なる形式的手法を組み合わせることで、統一的に扱うことを可能にした。

また一方で我々は、同じ対象を、様々な粒度・レベルでモデリングすることができる。従来は、こうした異なる抽象度を持つ因果モデルがどのように互いに関連するのかを扱う手段がなかった。本研究では、圏論における「自然変換」という概念を援用することで、異なるレベルにおける因果モデル間を整合的に結びつける手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、「因果モデル」という、因果関係を形式的・定量的に扱う枠組みを用いて、生物集団の様々な進化の仕方・あり方を統一的に考察する視座を与えるものである。進化動態には様々な様式があり、それぞれ別個の(集団遺伝学やゲーム理論など)によって考察されてきた。本研究は、そうした数理的モデルの背景にある生物集団の因果構造をモデリングし、それらを互いに関連づけることによって、進化現象についての我々の理解を深めよるものである。

研究成果の概要(英文)：Biological evolution occurs not only in a fixed environment, but also as an adaptation to changing environments, such as competitors of the same or different species, cooperative/antagonistic relationships, and niche construction. Combining causal models and evolutionary game theory, this study developed a new framework that allows for a unified treatment of various evolutionary dynamics.

The same target system can be modeled at various levels of granularity. Coherently relating causal models of different levels of abstraction has been a challenge in the literature. This study developed a method to consistently link causal models at different levels by resorting to the concept of "natural transformation" in category theory.

研究分野：科学哲学

キーワード：生物学の哲学 因果モデル 進化的総合の拡張 進化ゲーム 対称モノイダル圏

1. 研究開始当初の背景

進化生物学は、環境変化に対する集団の変化を研究する。しかし、何の集団だろうか。ダーウィンにとって、それは生物個体の集団であった。ところが20世紀中頃からの集団遺伝学の勃興に根ざしたネオ・ダーウィニズムは、生物進化を遺伝子の集団の変化として捉え直した。一方で、個体よりより上位の生物グループを、進化の単位として捉える考え方も存在する。これは哲学的には、進化理論の想定する「ユニット」とは何か、という存在論的な問いである。この問いは近年、進化生物学における「拡張された統合 extended evolutionary synthesis」の必要性の是非を巡る論争においてより重要性を増している。

2. 研究の目的

本研究では、この進化の存在論的単位の問題に対して、因果モデルと不変性という二つの観点からアプローチすることを目指した。具体的には、様々な進化動態のもとにある基本的な単位を、因果モデルとして同定すること、そしてそれがどのような変換に対して不変にとどまるか、ということを明らかにすることを目的にした。

3. 研究の方法

上述の第1の目的に対しては、様々な進化動態をモデル化するため、因果性と確率を架橋する因果グラフ理論を用いる。特にすでに先行研究において、進化動態の基本的な法則が、因果モデルから導かれることが示されている。そこで本研究ではその成果を拡張することで、様々な状況におけるモデルを構築し、そのモデルによって表される「構造」を進化的な単位の候補として示す。

次にそうした構造が、どのような変換に対して不変であるかを明らかにするため、群論的なアプローチを用いる。具体的には、進化法則に影響を与えないような生物系への介入を「変換」ととらえ、そうした変換からなる対称群に対して不変に留まるものとして進化論的存在を導くという方策を採る。とりわけ変換の候補として、遺伝子頻度や環境変動を考え、任意の遺伝学モデルがそうした変数のどのような変化に対して不変なのかを群論的に定式化し、そのように得られた進化法則の対称変換群によって進化の存在論的基準を定めること、これが本研究の最終的な目的である。

4. 研究成果

因果モデルを用いた進化動態のモデリングについては、複数の国際共同研究を行い、期待以上の成果を上げることができた。論文[P1]では、イギリスの科学哲学者と共同で、進化動態の基本方程式であるプライス方程式から、因果的な含意を読み込むことができるための条件を明らかにした。[P2]では、スペインの進化生態学者・科学哲学者との共同研究を行い、ニッチ構築や共進化など、様々な状況における進化動態の統一的なフレームワークとしての因果モデルを提案した。また[P3]では、フィンランドの数理遺伝学者と共同で、進化ゲーム理論における因果的想定をモデリングし、そこから進化平衡を求める方法を提案した。これらの成果により、非線形な状況を含む広範な進化動態において、その動態を生み出す基盤としての「単位」を、因果構造としてモデリングする方法が示された。

[P1] Okasha, S., Otsuka, J. (2020). The Price equation and the causal analysis of evolutionary change, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375: 20190365.

[P2] Edelaar, P., Otsuka, J., and Luque, V. (2022). A generalised approach to the study and understanding of adaptive evolution. *Biological Reviews*, 98(1): 352-375.

[P3] Lehtonen, J. and Otsuka, J. (2023). Evolutionary game theory of continuous traits from a causal perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378: 20210507

一方で、進化モデルの不変性については、期待していたほどの成果は得られなかったが、以下の国際会議発表を行った。[01]では、進化単位の問題が変換群への不変性として捉えられること、そしてその観点から考えると、Mayr 流の個体を中心とする進化観と、Dawkins 流の個々の遺伝子を中心とする進化観は、同一のスペクトラムの両極端として捉えられることを論じた。[02]および[03]では、より具体的に、一定の因果的な進化モデルが不変にとどまるような介入変換の種類を探求した。しかしながら、これらは線形の場合にとどまり、理論的に興味深いような視座はまだ得られていない。さらなる探求が必要であると考えられる。

[01] Ontology and symmetry of evolutionary theories, ISHPSSB, Oslo, Norway.

[02] Dynamic invariance of evolutionary models, ESEB 2019 (the European Society for Evolutionary Biology), the Logomo Congress and Events Center, Turku, Finland.

[03] Causal modeling in evolutionary biology, International Workshop on Causality, Probability, and Logic, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, China.

他方、上述の問題を考察する中で、因果モデルの同一性という新たな問題が浮かび上がってきた。つまり、異なる変数や粒度で記述された因果モデルが「同一」であるとされる基準は、いかなるものか、という問題である。この問いにアプローチするため、研究期間中より、圏論を用いた因果モデルの同一性基準の探求という、より基礎的・理論的な探求を行った。近年の因果モデル・機械学習の研究においても、因果モデルの同一性は注目されつつあるが、それに対して十分に満足の行く形での解決策は与えられていなかった。本研究では、圏論の自然変換の考え方を援用することで、この同一性の問題について、整合的な解決を与えることができた。この結果は、以下で発表された。

論文

[E1] Otsuka, J. and Saigo, H. (2023). Process theory of causality: A category-theoretic perspective. *Behaviormetrika*, <https://doi.org/10.1007/s41237-023-00197-z>

[E2] Otsuka, J. and Saigo, H. (2022). On the Equivalence of Causal Models: A Category-Theoretic Approach. *Proceedings of the First Conference on Causal Learning and Reasoning*, PMLR 177:634-646.

発表

[E3] Three Faces of Causality, International Workshop on Causality and Philosophy. 2021

[E4] (with Hayato Saigo; poster presentation) On Equivalence of Causal Models, Causal UAI. 2021

[E5] (with Hayato Saigo) On the Equivalence of Causal Models: A Category-Theoretic Approach (Poster presentation), CLear 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 大塚淳	4. 巻 605
2. 論文標題 統計学はなぜ哲学の問題になるのか	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 哲学研究	6. 最初と最後の頁 1-24
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 大塚淳	4. 巻 95
2. 論文標題 統計学と機械学習から見る「正当化」のあり方	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 アステイオン	6. 最初と最後の頁 163-175
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 Otsuka, J., Saigo, H.	4. 巻 -
2. 論文標題 On the Equivalence of Causal Models: A Category- Theoretic Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research	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 該当する
1. 著者名 Kato Takeshi, Kudo Yasuyuki, Miyakoshi Junichi, Otsuka Jun, Saigo Hayato, Karasawa Kaori, Yamaguchi Hiroyuki, Hiroi Yoshinori, Deguchi Yasuo	4. 巻 7
2. 論文標題 Sustainability and Fairness Simulations Based on Decision-Making Model of Utility Function and Norm Function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Economics and Finance	6. 最初と最後の頁 96 ~ 96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11114/aef.v7i3.4825	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 Kato Takeshi, Kudo Yasuyuki, Miyakoshi Junichi, Otsuka Jun, Saigo Hayato, Karasawa Kaori, Yamaguchi Hiroyuki, Deguchi Yasuo	4. 巻 7
2. 論文標題 Rational Choice Hypothesis as X-point of Utility Function and Norm Function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Economics and Finance	6. 最初と最後の頁 63～63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11114/aef.v7i4.4890	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 田口茂, 大塚淳, 西郷甲矢人	4. 巻 47
2. 論文標題 現象学的明証論と統計学---経験の基本的構造を求めて	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 哲学論叢	6. 最初と最後の頁 20-34
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 Jun Otsuka	4. 巻 1
2. 論文標題 Ockham's Proportionality: A Model Selection Criterion for Levels of Explanation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Risks and Regulation of New Technologies	6. 最初と最後の頁 47-64
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 該当する

1. 著者名 Jun Otsuka	4. 巻 0
2. 論文標題 Ontology, Causality, and Methodology of Evolutionary Research Programs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Evolutionary Causation: Biological and Philosophical Reflections	6. 最初と最後の頁 247-264
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 該当する

1. 著者名 Jun Otsuka	4. 巻 86(5)
2. 論文標題 Species as Models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Philosophy of Science	6. 最初と最後の頁 1075-1086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1086/705519	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 Okasha S. and Otsuka J	4. 巻 375
2. 論文標題 The Price equation and the causal analysis of evolutionary change	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society B	6. 最初と最後の頁 20190365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rstb.2019.0365	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

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Otsuka, J., Saigo, H.
2. 発表標題 n Equivalence of Causal Models,
3. 学会等名 Causal UAI (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Otsuka, J., Saigo, H.
2. 発表標題 On the Equivalence of Causal Models: A Category-Theoretic Approach
3. 学会等名 CLeaR 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Otsuka, J.
2. 発表標題 Three Faces of Causality
3. 学会等名 International Workshop on Causality and Philosophy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Otsuka, J.
2. 発表標題 Modeling Causes of Evolutionary Dynamics
3. 学会等名 Unimelb/ANU joint webinar on evolution and causality (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Otsuka, J.
2. 発表標題 Causal modeling from a philosophical perspective
3. 学会等名 27th AIP Open Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 大塚淳
2. 発表標題 統計学はなぜ哲学の問題になるのか
3. 学会等名 京都哲学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大塚淳
2. 発表標題 統計学はなぜ哲学の問題になるのか
3. 学会等名 哲学オンラインセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun Otsuka
2. 発表標題 Ontology and symmetry of evolutionary theories
3. 学会等名 Asia-Pacific Philosophy of Science Association (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Otsuka
2. 発表標題 Ontology and symmetry of evolutionary theories
3. 学会等名 ISHPSSB (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Otsuka
2. 発表標題 Dynamic invariance of evolutionary models
3. 学会等名 the European Society for Evolutionary Biology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Otsuka
2. 発表標題 Causal modeling in evolutionary biology,
3. 学会等名 International Workshop on Causality, Probability, and Logic, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 大塚 淳	4. 発行年 2020年
2. 出版社 名古屋大学出版会	5. 総ページ数 248
3. 書名 統計学を哲学する	

1. 著者名 Jun Otsuka	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Cambridge University Press	5. 総ページ数 64
3. 書名 The Role of Mathematics in Evolutionary Theory	

〔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
---------	---------