

令和元年6月14日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00334

研究課題名(和文) 格子ロトカボルテラ模型の生物・生態学への応用研究

研究課題名(英文) Application of lattice Lotka-Volterra model to biological and ecological systems

研究代表者

泰中 啓一 (Tainaka, Kei-ichi)

静岡大学・創造科学技術大学院・客員教授

研究者番号：30142227

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)：本研究では、格子シミュレーション模型を生物・生態学へ応用してきた。主に2つの問題に取り組んだ。(1) 共生系ダイナミクスの研究。生物進化の最適戦略として、「打ち勝つ」戦略ではなく、「生き残る」戦略を考え、Ratio selection (比率選択)の理論を提案した。共生系ダイナミクスは、経営学における長期予測にも適用された。(2) 生態系メタ個体群モデルの研究。生物の生息地は、いくつかのパッチ(ノード)に分かれている。パッチ間に経路(リンク)がある時、パッチとリンクで構成されるネットワークを理論的に研究してきた。ネットワークの構造によって、メタ個体群動態が大きく変わることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで生物共生系の数理モデルは、複雑であった。我々は、格子シミュレーション模型を適用することによって、生物共生系における初めての使いやすい数理モデルを提案した。この数理モデルは、経営学における長期予測にも適用された。日本の老舗企業は、自社の利益だけでなく、むしろ協調戦略を重視する。協調によって「生き残る」戦略は、自社のシェア拡大を最優先する「打ち勝つ」戦略よりも優れていると考える。この成果は、今後の商学における革命になる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We apply lattice simulations to biological and ecological systems. Two main subjects have been studied. (1) Dynamics in win-win systems. The optimal strategy usually beats any other strategies. However, we consider the optimal strategy for survival. We present a theory of “ratio selection” which is the generalization of sex-ratio selection. The dynamics for win-win system is also applied to long-term forecast in business study. (2) Metapopulation model. In general, a species lives in spatially separated patches. When there are links (paths) between patches, the links and patches form a network. It is found that the dynamics of metapopulation model are largely affected by network structure of spatially separated habitats.

研究分野：情報学

キーワード：ロトカボルテラ模型 生物進化 格子シミュレーション 数理生態学 メタ個体群 生物移動 ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

代表者は、格子確率模型を開発し、Lattice model for the Lotka-Volterra system という論文を発表した(J. Phys. Soc. Jpn. 1988)。この論文以来、世界中でたくさんの研究が続き、「格子ロトカボルテラ模型」という一つの分野が形成された。私はこの分野の創始者と自負している。20年以上にわたって格子シミュレーションで、生物進化や複雑系の問題を研究してきた。この方法は、その平均場理論が伝統的なロトカ・ボルテラ方程式に一致している。これにより、単なる空間シミュレーションでなく、しっかりとした数理解析的な基盤を持つことになった。とくに生物共生系の個体群動態について、次の論文が出版された: Iwata, et al. A simple population theory for mutualism by the use of lattice gas model. Ecological Modelling, 222 (2011). この雑誌のレフェリーは、“great breakthrough”と評価した。この様な高い評価を得た理由は、当時は十分理解できなかった。その後、しだいに明らかとなった。

2. 研究の目的

本研究は、格子ロトカボルテラ模型を用いて、生態系などの複雑系を研究する。とくに以下の点を重視する。

1) 理論生態学: 生態系動態予測手法としてよく知られているのは、ロトカボルテラ方程式である。しかし、これは共生系に対して使えない。本研究では、格子モデルを使って、生態学や生物進化への応用を図る。新しい最適化問題に取り組む: 適応度を最大とする解を探索する際、集団全体の長期的絶滅回避の条件で探索する。

2) 生物の調節機能: 個々の要素は単純でも、集合体として起きる創発現象、とくに微生物における密度効果（酵母菌の細胞増殖停止機構）、アユの縄張り転移を研究する。

3) 経営学と共生系方程式: 現在の経済学は、競争を市場原理としている。しかし、この競争原理が過剰競争を生み、格差拡大・環境被害等の弊害を招いたかもしれない。我々は、競争だけでなく、共生の重要性を数理的に主張する。とくに、「マーケットの成長限界効果」を示す。

3. 研究の方法

本研究は、本研究は、モデリングと格子上のモンテカルロ・シミュレーションによって生物進化および生物の調節機能を研究する。研究代表者は、これまで生物間の相互作用が有限の範囲で起きると仮定し、「格子ロトカボルテラ模型」という格子上の確率模型を開発し、それによって生物の個体群動態や生物進化の問題を研究してきた。具体的な研究方法では、やはりこの格子確率模型を使う。進化では、遺伝アルゴリズムよりずっと単純な進化シミュレーション方法を適用する。また、調節機能の研究では、様々な相転移（群知能）現象を扱う。密度効果の細胞増殖停止因子は、極めて短期間で発現する。その時期を特定するため、シミュレーションが不可欠となっている。とくに、進化の最適化理論を確立する

(a) 共生系の進化（泰中・吉村・上原）: 従来からの「競争による生き残り（ESS）」とは異なり、「長期的生存の最適性」である。この理論によって、ミトコンドリアや葉緑体などの進化仮説（細胞内共生説）の起源を説明したい。

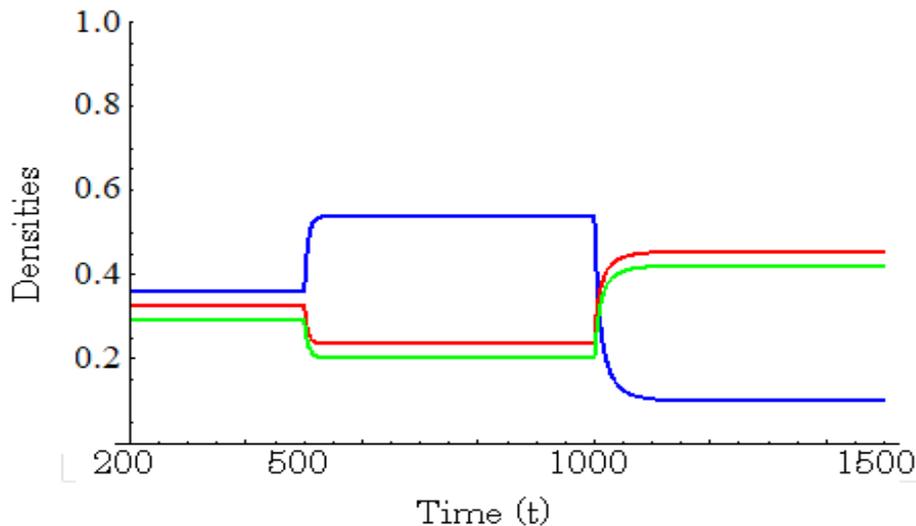
(b) 周期セミの進化（泰中・吉村）: メンデル遺伝に基づく独自の進化シミュレーションを使って、複数の遺伝子座の時間的変動を調べる。セミの形質は極めて多様で、各ブルード毎に多様な形質を持つ。ブルードの出現や生き残りについて、独自に開発したシミュレーションによって実証する。具体的には、適応度の高くない遺伝子が浸透すること（遺伝子浸透仮説）を実証する。

(c) 経営学（泰中・吉村・宮崎）: 各企業の資産ダイナミクスを格子気体モデルによって記述する。マーケットの普及率がすでに成長の限界に達している時、ダイナミクスは特異な振る舞いをする。本研究の独創的な点は、日本の老舗経営の持つ優位性を、“マーケットの成長限界効果”（マーケットが成長限界に近いとき、共生関係の役割が重要となること）として、数値的（数理的）に示すことである。老舗経営に学び、共生方程式を使って、様々なシナリオ分析を進める。

4. 研究成果

(1) 経営学

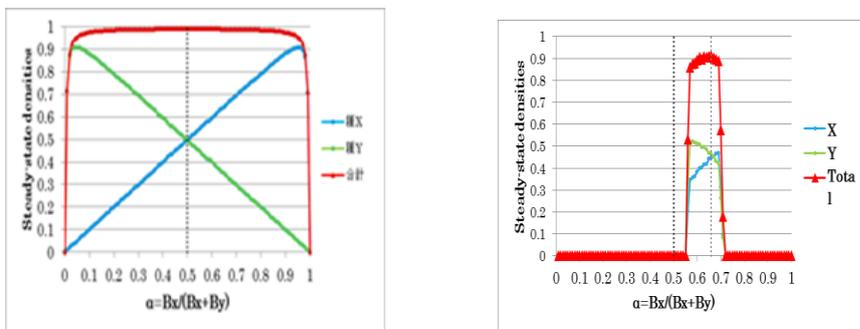
各企業の資産ダイナミクスを格子気体モデルによって記述した。マーケットの普及率がすでに成長の限界に達している時、ダイナミクスは特異な振る舞いをする。本研究の独創的な点は、日本の老舗経営の持つ優位性を、“マーケットの成長限界効果”（マーケットが成長限界に近いとき、共生関係の役割が重要となること）として、数値的（数理的）に示すことである。具体的には、日本の老舗経営に対して、共生方程式を使って、様々なシナリオ分析を進めた。シミュレーション結果として次のことが分かった。自社のみを優先する経営は、短期的には優位である。しかし、長期的には大きな損失を生み出す。株価は短期的な利益に左右されやすい。もっと長期的な視点が必要である。



図の説明：長期的には「裏切」よりも「協調」がすぐれている。他社を裏切ることによって、会社1（青い曲線）は、短期的には優位である。しかし、長期的には大きな損失となっている。
 <引用文献> A. Morishita and K. Tainaka, Cooperation promotes the sustainability of companies: lattice-gas model for a market, Physica A, 525 (2019) 119-127.

(2) 生物進化

必須共生における Ratio Selection（比率選択）という理論を提唱した。この理論は、性比選択（Sex-ratio Selection）の一般化である。共生モデルとして、格子上の確率セルオートマトンを使い、シミュレーション方法は、グローバルとローカル相互作用を使った。シミュレーション結果を見て驚いた。必須共生する二種において、グローバルとローカル相互作用の結果には、顕著な違いがあった。グローバル相互作用のとき、どんな比率でも生き残ることができる（下図左）。しかし、ローカル相互作用の場合、グローバル相互作用よりも、生き残る条件が格段に厳しかった（下図右）。すなわち、ローカル相互作用の場合、性比選択（オス・メスの出生比率が一定）と同様に、2種の共生生物の間において、特定の比率だけが存続を許される。



図の説明：性比選択のシミュレーション結果。必須共生する二種において、グローバル相互作用のとき、どんな比率でも生き残ることができる（左図）。しかし、ローカル相互作用の場合、特定の比率のみが存続できる（右図）。この結果から、ローカル相互作用の場合、2種の共生生物の間において、特定の比率だけが存続を許される（比率選択）という理論を提唱した。

<引用文献> K. Tainaka and T. Hashimoto, A theory of ratio selection - lattice model for obligate mutualism. Open Journal of Ecology, (2016) vol. 6, 303-311.

(3) アユの縄張り転移

格子モデルに基づき、アユの縄張り転移のダイナミクス（差分方程式）を導出した。この差分方程式は、アユの特異な放流政策をうまく導くこともできる。アユの放流政策は、他の魚の放流方針とは大きく異なる。アユを放流する場合、何回かに分けて少数のアユを放流する必要がある。これはどんな漁協でも共通に行っている。このようなアユの放流政策は、アユのダイナミクスから最適化問題として導出された。

<引用文献> Y. Katsumata et al. (5 番目). Density-dependent population model of effective release policy for Ayu fish, Ecological Modelling, 388 (2018) 80-88. Y. Katsumata et al. (5 番目). Territory holders and non-territory holders in Ayu fish coexist only in the population growth process due to territorial hysteresis. Scientific Reports,

7, (2017) 16777. Y. Tanaka et al. (5 番目). Historical effect in the territoriality of Ayu fish. J. Theor. Biol. 268 (2011), 98-104.

(4) メタ個体群動態

代表者は、1988 年「格子ロトカボルテラ模型」という確率模型を開発した。ジャンケンゲームのモデルでは、グローバルとローカル相互作用の結果には、顕著な違いがあった。グローバル相互作用のとき絶滅し、ローカル相互作用の場合は全種が生き残る。この結果は、2002 年スタンフォード大学の Kerr らの実験で実証された。彼らは大腸菌を使い、溶液中（グローバル相互作用）のとき絶滅し、シャーレ（ローカル相互作用）のとき共存することを確かめた。しかし、メタ個体群動態によれば、グローバルでもローカル相互作用の場合でも共存することが分かった。

<引用文献> T. Nagatani, G. Ichinose and K. Tainaka. Heterogeneous network promotes species coexistence: metapopulation model for rock-paper-scissors game. Scientific Reports, 8 (2018) 7094. T. Nagatani, G. Ichinose and K. Tainaka. Metapopulation model for rock-paper-scissors game: mutation affects paradoxical impacts. J. Theor. Biol. 450 (2018) 22-29. Kerr, et al. Local dispersal promotes biodiversity in a real-life game of rock-paper-scissors. Nature 418 (2002) 171-174. K. Tainaka: Lattice model for the Lotka-Volterra system, J. Phys. Soc. Japan 57 (1988) 2588-2590.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

1. Ayako Morishita and Kei-ichi Tainaka, Cooperation promotes the sustainability of companies: lattice-gas model for a market, Physica A, 525 (2019) 119-127. 査読有
doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.005

2. Takashi Nagatani, Genki Ichinose, and Kei-ichi Tainaka, Metapopulation dynamics in the rock-paper-scissors game with mutation: effects of time-varying migration paths, Journal of Theoretical Biology, 462 (2018) 425-431. 査読有
doi: 10.1016/j.jtbi.2018.11.030.

3. T. Tahara, M.K.A. Gavina, T. Kawano, J.M. Tubay, J.F. Rabajante, H. Ito, S. Morita, G. Ichinose, T. Okabe, T. Togashi, K. Tainaka, A. Shimizu, T. Nagatani & J. Yoshimura. Asymptotic stability of a modified Lotka-Volterra model with small immigrations, Scientific Reports, 8, (2018) 7029. 査読有
doi:10.1038/s41598-018-25436-2.

他 18 件

[学会発表] (計 3 件)

1. N. Nakagiri, Y. Sakisaka and K. Tainaka. Lattice models of habitat destruction in a prey-predator system, Proceedings of 22nd International Congress on Modelling and Simulation, (2017) pp. 134-140.

他 2 件

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 吉村 仁

ローマ字氏名: Yoshimura, Jin

所属研究機関名: 静岡大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号：10291957

(2)研究分担者

研究分担者氏名：宮崎 倫子

ローマ字氏名：Miyazaki, Rinko

所属研究機関名：静岡大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号：40244660

(3)研究分担者

研究分担者氏名：上原 隆司

ローマ字氏名：Uehara, Takashi

所属研究機関名：名古屋短期大学

部局名：保育科

職名：准教授

研究者番号：40621660

(4)研究協力者

研究協力者氏名：森下 あや子

ローマ字氏名：Morishita, Ayako

※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。