

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24500273

研究課題名(和文) 格子ロトカボルテラ模型による生物の進化・機能の研究

研究課題名(英文) Study of biological evolution and functions by lattice Lotka Volterra model

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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：これまで代表者らは、個体ベースのシミュレーションモデルとして、「格子ロトカボルテラ模型」を開発し、格子上で生物の出生と死亡プロセスを行い、生物進化における最適化問題を扱ってきた。

我々は格子気体モデルを適用し、共生系の動態を予測するための方程式(Eco Mod, 2011)を開発した。共生系について順調に論文を論文を出版させてきた。そのなかで最大の成果は、必須共生系における“Ratio Selection”という理論の提唱である(Tainaka and Hashimoto 2016)。また片利共生系において、競争関係が避けられないことを示した。

研究成果の概要(英文)：So far, we have developed “lattice Lotka Volterra model” to explore the population dynamics of biospecies. In 2011, we have presented mutualistic population model. This is very simple, so that we can easily apply various problems in mutualistic systems. The most exciting result is “Ratio Selection” in obligate mutualism (Tainaka and Hashimoto 2016).

研究分野：理論生物学、情報学

キーワード：生物共生系 必須共生 片利共生 企業経営 協調行動 利他行動

1. 研究開始当初の背景

代表者は、生態学の研究において、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」(Lattice Lotka Volterra Model)という格子確率模型を開発した(Tainaka, J. Phys. Soc. Jpn. 1988)。この論文以来、世界中でたくさんの研究が続く、「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年以上にわたってほぼ同一方法(確率セルオートマトン)で、生物進化や複雑系の問題を研究してきた。この方法は、その平均場理論を伝統的なロトカ・ボルテラ方程式に一致させたものである。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ばかりであった: 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、代表者が初めて導入した格子ロトカボルテラ模型を用いて、生物進化および生物の調節機能を研究する。

1)生物進化: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、集団全体の絶滅(crash)を回避する条件で探索する。
2)調節機能:個々の要素は単純でも、集合体として起きる転移現象を研究する。とくに、酵母菌における細胞増殖停止の発現機構や、アユの縄張り転移を研究する。絶滅回避を原理とした最適化問題を研究する。我々は、進化的に存続可能な戦略を提唱している。従来のESS(進化的に安定な戦略)では、異なる個体群(形質・戦略)間でゲームをして、適応度の高い形質を次々に探索してきた。しかし、適応度最適だけで判定することには、問題点もある。たとえ適応度が高くても(ゲームに勝っても)、システムが崩壊(crash)すれば意味がない。生物で言えば、絶滅すれば進化的に安定とは言えない。絶滅しない(存続可能)という条件下で、ゲームに勝たなければ、生き残らない。これまでのシミュレーションによって分かったことは、存続可能という条件は生物にとって、とても厳しいということである。存続可能性だけで、形質がほぼ決定される場合も多い。

現状の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。これは100年以上の歴史を持っている。しかし、ロトカボルテラ方程式は共生系に対して使えない。なぜなら、個体数が無限大に発散するからである。本研究では、個体ベースの第一原理から出発し(確率セルオートマ

トンを使って)、共生系方程式を作成し、共生系の進化を議論する。とくに必須共生、片利共生、協調行動、利他行動などの役割や、進化的メカニズムを議論する。

3. 研究の方法

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。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。とくに酵母菌、アユ、セミを対象に、実験研究者と共同研究を行う。共同研究の中で、我々は数理解析と格子シミュレーションを担当する。

<新しい進化最適化理論の確立>

格子ロトカボルテラ法や独自の進化シミュレーションによって最終的な平衡状態を調べる。多種から成るシステムでは、平衡までの過渡的プロセスが長い。通常のシミュレーションでは共存しているように見えても、やがて絶滅することも多い。多種が共存できるかどうかをシミュレーションによって判定するため、2006年我々は「有限サイズ安定解析法:FSSA」を開発した(Ref. 11 & 30)。これは様々な格子サイズを使って比較し、シミュレーションによって、多種共存が安定かどうかを判定する手法である。FSSAによって、平衡状態を調べる。とくに共生系の進化に重点を置く。格子上に2種の共生生物を置く。各生物個体(エージェント)の出生率や死亡率は、他種の存否によって影響を受ける。このような個体ベースモデルは、格子ロトカボルテラ模型と同様である。しかし、共生系の平均場近似は、ロトカボルテラ方程式と異なり、発散が起きない。この理論を使って、共生系方程式を作成し、また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。

4. 研究成果

生物および社会共生系の個体群動態や進化について、顕著な業績を得た。2011年、生物共生系の個体群動態について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. 雑誌 Ecological Modelling 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がしだいに明らかとなってきた。

<Ratio Selection (比率選択)理論の提唱>
 とくに顕著な成果は、必須共生における Ratio Selection という理論の提唱である。これまで生態系の数理予測は、Lotka-Volterra 方程式を用いて行われてきたが、共生関係が説明できないことなどからあまり深く研究されてこなかった。しかし、生態系で共生関係を持つとされる生物種はきわめて多く観測される。全ての生物個体は、他の生物と Win-Win の関係を持っている。本研究では、共生の「絶対(必須)共生」を対象とし、シミュレーションを用いて研究した。Ratio Selection (比率選択)は、性比選択の一般化である。共生モデルとして、格子上の確率セルオートマトンを使う。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。グローバルとローカル相互作用におけるダイナミクスは、アリー効果が同じように起きた。しかし、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 (Fig. 1)。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 (Fig. 2)。すなわち、ローカル相互作用の場合、2種の共生生物の間において、特定の比率だけが許されるのであった。

Fig. 1 グローバル相互作用の結果

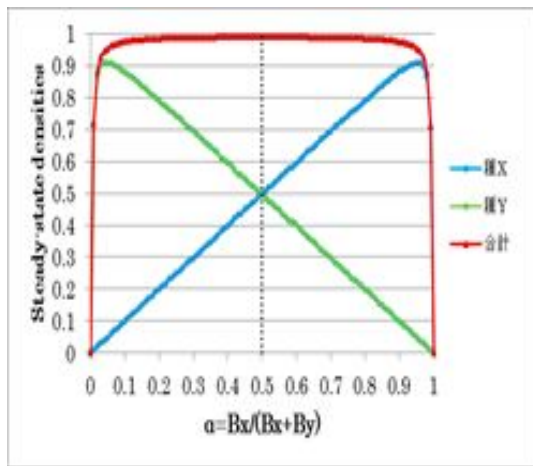
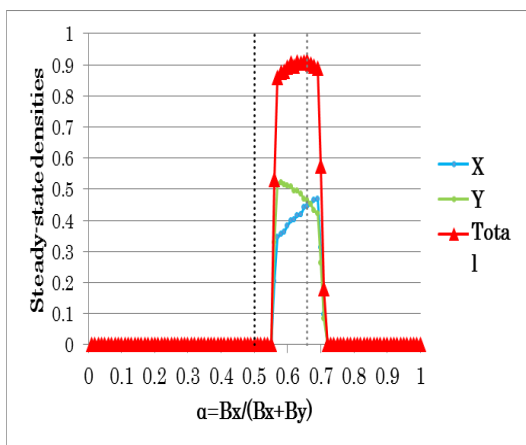


Fig. 2 ローカル相互作用の結果



生物進化において重要な形質は、他の形質に打ち勝つだけではない。生き残る形質こそが重要で、またそれが他を打ち勝つことも大切である。Ratio Selection (比率選択)によって、特定の比率を獲得した形質は、たちまち生物界全体に広がるのである。細胞小器官 (organelle) のミトコンドリアや葉緑体は、Ratio Selection を駆動力として進化したものと考えられる。この論文は、Tainaka K and Hashimoto, T. A Theory of Ratio Selection-Lattice Model for Obligate Mutualism. Open Journal of Ecology, (2016) 6, 303-311 として、出版された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文](計 45 件) 全て査読有り

泰中啓一 Kei-ichi Tainaka

1. Kitamura K, Kakishima S, Uehara T, Morita S, Tainaka K, and Yoshimura J. The effects of rainfall on the population dynamics of an endangered aquatic plant, *Schoenoplectus gemmifer* (Cyperaceae). Plos One, (2016) in press.

2. Tainaka K and Hashimoto, T. A Theory of Ratio Selection-Lattice Model for Obligate Mutualism. Open Journal of Ecology, (2016) vol. 6, 303-311. DOI: 10.4236/oje.2016.66030

3. Sugiura, K. Hosoda A, Miyazaki R, Kanoh Y and Tainaka K. "Population dynamics for freshwater species with cyclic relation." Far East Journal of Applied Mathematics, vol. 94(2016) 247-260.

4. Yokoi, H. Morishita, A. Tateoka, Y. Tainaka K. "Lattice gas model for iterated prisoners dilemma games: emergency of altruism in a company." Theoretical Economics Letters, vol.6 (2016) 324-329.

5. T. Uehara, K. Sato, S. Morita, Y. Maeda, J. Yoshimura and K. Tainaka. A simple model for factory distribution: historical effect in an industry city. Physica A, vol. 444, (2016) 213-219.

6. K. Sato, H. Hasegawa, S. Morita, J. Yoshimura and Tainaka K. "Advantage or disadvantage of migration in a prey-predator system." Far East Journal of Applied Mathematics. vol. 93, (2015) 109-121.

7. Yokoi H, Uehara T, Sakisaka Y, Miyazaki R & Tainaka K. "Population dynamics for two male one-female species" Far East Journal

of Applied Mathematics, vol. 88, (2014) 35-46.

8. Yokoi H, Uehara T, Sakata T, Naito H, Morita S & Tainaka K. "Evolution of altruism in spatial prisoner's dilemma: intra- and inter-cellular interactions" *Physica A*, vol. 416, (2014) 361-370.

9. Yokoi H, Uehara T, Kawai T, Tateoka Y & Tainaka K. 2014. "Lattice and lattice gas models for commensalism: two shellfishes in intertidal zone" *Open Journal of Ecology*, vol. 4, 671-677.

10. K. Tainaka, T. Ushimaru, T. Hagiwara, J. Yoshimura. Lattice gas model for budding yeast: a new approach for density effects. *Procedia Computer Science*, Vol. 29, (2014) 270-280.

11. J.M. Tubay, H. Ito, T. Uehara, S. Kakishima, S. Morita, T. Togashi, K. Tainaka, Mohan P. Niraula, Beatriz E. Casareto, Y. Suzuki, J. Yoshimura,. The paradox of enrichment in phytoplankton by induced competitive interactions. *Scientific Reports*, vol. 3, Article number 2835 (2013).

12. T. Uehara, S. Iwata, R. Miyazaki, J. Yoshimura and K. Tainaka. Coexistence of competitive species on lattice under periodical disturbance: crucial effects of local interaction. *J. Phys. Soc. Japan*, vol. 82 (2013) 093801.

13. J. Yoshimura, H. Ito, D.G. Miller III, K. Tainaka. Dynamic decision-making in uncertain environments I. The principle of dynamic utility. *Journal of Ethology*, (Invited Article), 31, (2013) 101-105.

14. J. Yoshimura, H. Ito, D.G. Miller III, K. Tainaka. Dynamic decision-making in uncertain environments II. Allais paradox in human behavior. *Journal of Ethology*, (Invited Article), 31, (2013) 107-113.

15. Ito H, Uehara T, Morita S, Tainaka K, Yoshimura J. (2013) Foraging behavior in stochastic environments. *Journal of Ethology*, 31: 23-28.

16. T. Togashi, J.L. Bartelt, J. Yoshimura, K. Tainaka, and P.A. Cox. 2012. Evolutionary trajectories explain the diversified evolution of isogamy and anisogamy in marine green algae. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*, vol. 109 no.

34, pp. 13692- 13697.

17. H. Takatsu, M. Minami, K. Tainaka, J. Yoshimura. 2012. Spontaneous flash communication of females in an Asian firefly. *J. Ethology*, 30: 355-360.

18. H. Ito, T. Uehara, S. Morita, K. Tainaka, J. Yoshimura. 2012. Slightly male-biased sex ratios for the avoidance of extinction. *Evolutionary Ecology Research* 13: 759-764.

守田 智 Satoru Morita

19. Quantifying the effect of Vpu on the promotion of HIV-1 replication in the humanized mouse model. Hiroki Ikeda, Shinji Nakaoka, Rob J. de Boer, Satoru Morita, Naoko Misawa, Yoshio Koyanagi, Kazuyuki Aihara, Kei Sato, and Shingo Iwami *Retrovirology* 13:23 (2016) .

20. Evolutionary game on networks with high clustering coefficient. Satoru Morita, *Nonlinear Theory and Its Applications IEICE* 7, 110-117 (2016) (arXiv:1508.03492).

21. Power law in random multiplicative processes with spatio-temporal correlated multipliers. S. Morita, *Europhysics Lett.*113,40007(2016)(arXiv:1511.02983).

22. Host-parasite Red Queen dynamics with phase-locked rare genotypes. *JFR*. Jerrold M. Tubay, H. Ito, T. Uehara, S. Kakishima, S. Morita, J. Yoshimura and D. Ebert, *Science Advances* 2, e1501548 (2016).

23. Six Susceptible-Infected-Susceptible Models on Scale-free Networks. S. Morita, *Scientific Reports* 6, 22506 (2016).

24. Microhabitat locality allows multi-species coexistence in terrestrial plant communities. J M. Tubay, K. Suzuki, T. Uehara, S. Kakishima, H. Ito, A. Ishida, K. Yoshida, S. Mori, Jomar F. Rabajante, S. Morita, M. Yokozawa, J. Yoshimura, *Scientific Reports* 5, 15376 (2015).

25. The contribution of seed dispersers to tree species diversity in tropical rainforests. S. Kakishima, S. Morita, K. Yoshida, A. Ishida, S. Hayashi, T. Asami, H. Ito, D.G. Miller, T. Uehara, S. Mori, E. Hasegawa, K. Matsuura, E. Kasuya, and J. Yoshimura, *Royal Society Open Science*, vol. 2, 150330 (2015) .

〔学会発表〕(計 4 件)

1. A. Morishita, Y. Tateoka and K. Tainaka.
Lattice gas model for company profit:
cooperative relation between contractors
and subcontractors. Proceedings of 21st
International Congress on Modelling and
Simulation, Queensland (Australia) (2015)
pp. 1689-1695.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕出願状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

守田 智 (Morita, Satoru)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：20296750