

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00346

研究課題名(和文) 格子確率モデルによる生物の分布拡大に対する生息地破壊効果の機構解明

研究課題名(英文) Explore the mechanism of habitat destruction effect on range expansion of species by stochastic lattice models

研究代表者

中桐 斉之(Nakagiri, Nariyuki)

兵庫県立大学・環境人間学部・准教授

研究者番号：30378244

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、生息地の破壊が生物の分布拡大に及ぼす影響を解明するため、その空間パターンに着目して、数理モデルの構築とコンピュータシミュレーションによる解析を行った。また、寒天培地に障害物を設置して納豆菌の培養を行って分布拡大を解析する実験を行い、さらに、納豆菌の分布拡大のモデルを構築し、シミュレーションによる解析も行った。その結果、培地の環境条件に依存して、分布拡大のパターンが変化すること、また、寒天培地に障害物がある場合は、分布拡大の速度が抑制されるが、最終的な拡大する分布域には影響しないこと、また、分布拡大には、栄養の流入が重要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate the influence of habitat destruction on the expansion of organisms, focusing on spatial patterns, we constructed a mathematical model and analyzed it by computer simulation. In addition, an experiment was conducted to analyze distribution enlargement by installing an obstacle on the agar medium and culturing *Bacillus natto*. Furthermore, a model of the distribution spread of *Bacillus subtilis natto* was constructed and analyzed by simulation. As a result, depending on the environmental conditions of the medium, the distribution enlargement pattern changes, and when there is an obstacle in the agar medium, the distribution expanding speed is suppressed, but in the eventually expanded distribution area it is found that the inflow of nutrients is important for distribution spreading.

研究分野：格子モデルシミュレーション

キーワード：格子確率モデル 生息地破壊 分布拡大 パターン形成

1. 研究開始当初の背景

これまで研究代表者は、様々な生物の個体群動態を、格子確率モデルを用いてモデル化し、空間分布に焦点をあてて計算機シミュレーションによって解析してきた。個体間の相互の関係をゲーム理論的に設定し、その空間分布を最も単純な格子上の関係に置き換え、その原理的背景を探るといった方法で、多体問題を生物の群集構造に置き換えた結果を生態系の問題などへと幅広く応用してきた。

一方、人類の経済活動によって生息地が物理的に破壊され、現在多くの種が絶滅に瀕している。とくに、開発により生息域が狭まった種では、元来生物が持つ復元的分布拡大力を上回る環境破壊が種の存続に重大な影響を与えている。従来、生息地破壊による個体群の絶滅については生物の個体数や破壊地の面積で議論される事が多かった。しかし、研究代表者らは、これまでに、生物の空間分布に対して生息地が減少する効果を計算機シミュレーションで検証し、空間構造によっては個体数の激減が面積比以上にみられることを見だし、絶滅の可能性が高まることを指摘し、生息地破壊における個体数激減は、生息地の空間パターンが重要な鍵になっていることを明らかにした。これまでは、絶滅における生息地破壊の空間効果を検証してきたが、同様の空間効果は生物が分布拡大により生息域を復元する過程でも重要な鍵を握ると考え、本研究を開始した。

極小化した生息地に生き残る種が、分布拡大によって生息地を回復する過程で、潜在的な生息地破壊にどのような影響を受けるのかは、生物多様性の維持に重要な知見である。土地利用と密接に絡む現実の生息地の保全においては、経済活動への影響を最小限にしつつ、効果的な対策を取らねばならない。破壊の防止のみならず、小さな面積で効果的な生息地の復元を援助する環境保全策を考慮する上でも、生物の分布拡大過程での生息地破壊効果の検証と機構解明は、環境保全の具体策として極めて現実的な解決策を提示できると考えた。

また、本研究では、数理モデルと計算機シミュレーションだけでなく、生態学者や微生物学者と共同で取り組むことで、微生物の培養系での実際の生物による検証を行い現実の条件を反映したシミュレーション条件を構築することとした。実際の生物の分布拡大条件を実験的に検証することで、より現実に即した生物保全に適合可能な理論研究が期待できる。現時点では、生息地破壊と生物の分布拡大に実験とシミュレーションの両面からアプローチする研究は存在せず、本課題は生息地破壊・生物の分布拡大に関する研究として、世界でもユニークな取り組みである。生物の分布拡大に関する理論的な研究に関しては、生物の分布拡大が空間構造に大きく依存しているという研究(Kinezaki et al., 2010)がある。しかしながら、これは空間構

造のみに焦点をあてたものであり環境破壊のモデルとは性質を異にする。また、破壊のあるパターン形成では、ペロウソフ・ジャボチンスキー反応(BZ反応)において障害物を設置した研究があるが、これは化学反応が対象であり生物を扱う本研究とは様々な条件が異なる。このように、生物の分布拡大に対して生息地破壊がどのような影響を与えているかを解析した研究は存在しない。

2. 研究の目的

地球上には絶滅の危機に瀕した生物種が数多くあり、それらの保護は生物多様性保全として世界規模の課題である。生物は元来生息域を広げる力を持ち、多様な環境の拮抗力とのバランスにより種の空間的共存が保たれている。人類の経済活動は、潜在的な生息地を破壊し分布拡大力を過度に抑制することで、生物の絶滅を加速させる一因となっている。この分野では、実験的に生物種を絶滅させられないため、実験検証による研究がほとんどなく、具体的な機構が不明で、効果的な対策が立てられない。

本研究課題では、空間パターンに着目した3つのモデルを提唱し、計算機科学により仮想的に生息地破壊効果を解明する。本研究の目的は、生息地破壊が生物の分布拡大へ及ぼす影響のモデル構築と計算機シミュレーション解析によるメカニズムの解明である。

具体的には、生息地の破壊が生物種の分布拡大に及ぼす影響を解析するため、次の2点に絞って検討した。

(1)生息地を破壊した場合と、生息地を破壊しない場合とで、生物種の分布拡大に与える影響を明らかにする。とくに、生息地の破壊において、どのような条件で、分布拡大が制限されるか、また、促進されるかを解析する。
(2)申請者らが開発した、生息地破壊の手法であるボンド破壊とサイト破壊を比較し、生息地面積の減少と生息地分断化の破壊の違いが生物の分布拡大にどのような影響を及ぼすか解析する。

(3)枯草菌・納豆菌の分布拡大実験とシミュレーション実験の比較を行い、分布拡大に重要となっている要因を明らかにし、分布拡大の機構を解明する。

3. 研究の方法

研究代表者らは、空間の効果を容易に扱える有用点を考慮し、格子確率モデルを用いて絶滅問題等を研究してきた。本研究においても、格子確率モデルという、確率セルオートマトンに分類される手法を用い、モデリングとシミュレーションにより生物の分布拡大に対する生息地破壊の影響を解析することとした。まず、生物の分布拡大における生息地破壊のモデルを構築し、次年度以降では、構築したモデルを用いて生物の分布拡大における生息地破壊の影響や分布拡大の条件などを解析する。また、生息地破壊の方法と

しては、生息地分断化の影響を解析するため、格子に生息地破壊の最新の破壊手法：ボンド破壊・2層サイト破壊・連続サイト破壊を適用する。その際、生息地破壊の分布拡大過程を生息地分断化と生息地面積減少、間接効果という観点から解析するモデルを構築していく。構築したモデルは、計算機シミュレーションによる解析と近似計算による数理解析を行い、生物の分布拡大に対する生息地破壊の影響を解明していく。

具体的には分断化の重要性が予想される為、ボンド破壊、2層サイト破壊、連続サイト破壊の3つの手法を用い比較して解析した。これらの手法の比較を行うことで、生息地面積の変化と分断化が、生物の分布拡大過程にどのような影響を及ぼしているのかをコンピュータシミュレーションによって解析する。

また、研究分担者の向坂准教授と連携研究者の榎原助教と連携して、寒天培地に障害物を設置して納豆菌や枯草菌を培養し、分布拡大を解析する実験を行う。分布拡大と、破壊の影響を、寒天培地に納豆菌を植菌し培養する実験を行っており、この実験の画像データからモデリングを行い、実際の系に即したモデルとシミュレーションを行う。その際、生息地の破壊が分布拡大にどのように影響するか、実験理論の両面から解析する。

4. 研究成果

(1)生物種の絶滅を引き起こす要因の一つに生息地破壊がある。この生息地破壊の研究について格子確率モデルを使用し、空間効果の影響や相互作用について、個体群動態という観点から解析を行った。具体的には、生息地が破壊されたときの影響について、生息地面積と生息地の分断化に焦点を当てて、2種の生物の存在するモデル生態系を用いて解析を行った。生息地を破壊する際、ランダムに生息地を破壊する2層サイト破壊モデルと生息地を破壊する際に全てつながっている連続的サイト破壊モデル、生息地の繋がりだけを破壊するボンド破壊モデルの3つのモデルをシミュレーション実験し、比較した。その結果、生息地破壊によって、生息地が分断化し個々の生息地の大きさが変化すると、個体数密度が急激に減少し、絶滅に至ることがわかった。また、2層サイト破壊とボンド破壊において、急激に捕食者が絶滅することがわかった。これは、生息地の破壊においては、生息地面積の減少によって個体群密度は緩やかに減少するが、生息地の繋がりや破壊すると、個体群密度が急激に減少することを示しており、生物の絶滅において、生息地の繋がりが必要であることを示している。

(2)生物は、生息する環境によって空間分布が変化する。枯草菌・納豆菌などのバクテリアも、栄養を含んだ寒天培地に接種すると表面において成長、分裂を繰り返してコロニー

を形成するが、このコロニーのサイズや空間パターンは、培地の環境条件に依存し、寒天濃度や栄養濃度によって様々なパターンを形成することが分かっている。本研究において、納豆菌においても、培地の栄養濃度は増殖率に影響し、寒天濃度は栄養の拡散に影響し、寒天培地の栄養濃度が高く寒天濃度の低いときにコロニーが拡大しやすいことが分かった。また、納豆菌のパターン形成は、寒天培地の表面での水平方向の二次元的な拡大だけでなく、鉛直方向下向きへと立体的に拡大することが確認された。そこで、培地の厚さを変化させたときの納豆菌コロニーのパターン形成についてモデルとシミュレーションにより解析を行った。現在まで研究されてきた2次元モデルを、鉛直方向にも増殖可能とする3次元モデルに発展させてモデルを構築し、シミュレーション実験を行った結果、コロニーのパターン形成が2次元モデルとは異なるパターンが得られることが分かった。バクテリアのコロニー拡大のパターン形成においては、これまでは2次元の議論に終始しがちであったが、種によっては3次元の議論が重要であることを示唆している。

(3)本研究では、カシノナガクイムシ(以下、カシナガ)の分布拡大の影響についての研究を行った。カシナガは繁殖を行うために、ブナ科樹木に穿入し集合フェロモンを発生する。周辺のカシナガ成虫は集合フェロモンにひきつけられ、その樹木に集中して穿入する集中攻撃を行う。これによって枯死が起こり、ナラ枯れが引き起こされている。このナラ枯れについて、集合フェロモンの重要性を調べるために、集合フェロモンがある場合とない場合について格子確率モデルを用いて検証した。モデルは100×100の格子に樹木100本と、カシナガをランダムに配置し、時間とともに移動を行い、移動先が樹木だった場合穿入が起こる。集合フェロモンを考慮した場合は、樹木が穿入を受けると一定の範囲内に生息するカシナガ成虫が樹木に近寄るようにし、コンピューターシミュレーションによって実験を行った。その結果、フェロモンなしの時は個体数が少ないときそれほど枯死せず、フェロモンありの時は個体数が少なくても多くの樹木が枯死した。集合フェロモンなしの時は、集中攻撃が起こらず、全ての木が偏り無く枯死した。集合フェロモンありの時は、一本の樹木に集る成虫が多くなり、集中攻撃が起こった。しかし、枯死した樹木の周りに生き残った樹木が存在していた。以上より、ブナ科樹木は集合フェロモンによる集中攻撃によって枯死しやすくなり、枯れた樹木の周辺に生き残った樹木があるのは集中攻撃が強く影響していることがわかった。

(4)本研究では繰り返し囚人のジレンマゲームを行うプレイヤーが格子上に存在する

ような空間的囚人のジレンマゲームにおいて、協調行動の分布拡大の可能性について解析を行った。これまで、空間的囚人のジレンマゲームにおいてはしっぺ返し(TFT)およびパブロフ(PAV)の報復戦略が囚人のジレンマゲームにおける勝利者とされていた。しかし、自然界では必ずしも報復戦略が最適ではなく、特殊な協調行動の例が数多くあり、典型的な例は常に協調(AC)の戦略である。そこで、4つの戦略(TFT, PAV, AC, AD:常に非協調)からなる格子モデルを考え、ACでも勝者になりうる条件をシミュレーションによって解析した。シミュレーションの結果、ノイズの割合が増加すると協調戦略をはじめとする非報復戦略が優勢になり得ることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 10 件)

原田凌太, 中桐 齊之, 囚人のジレンマゲームのシミュレーション解析-協力戦略の可能性-, 情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集, 2K-05, 1-2, 2018.

中桐 齊之, 平田 直也, セルフレジによるレジサービスへの影響: マルチエージェントモデルによるシミュレーション解析, 兵庫県立大学環境人間学部研究報告, 20, 41-52, 2018.

Nariiyuki Nakagiri, Yukio Sakisaka b and Kei-ichi Tainaka, Lattice models of habitat destruction in a prey-predator system, Proceedings of MODSIM2017, 22nd International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp. 134-140, 2018.

平田 直也, 中桐 齊之, マルチエージェントモデルを用いたセルフレジ導入によるレジサービスへの影響と解析, 2017年度 情報処理学会関西支部支部大会講演論文集, B-01, 1-4, 2017.

平田直也, 中桐 齊之, MAS を使用したセルフレジシミュレータの開発と検証, 情報処理学会第 79 回全国大会講演論文集, 3J-05, 1-2, 2017.

藤原涼子, 中桐 齊之, 格子確率モデルによる工場の分布拡大と閉鎖のシミュレーション, 情報処理学会第 79 回全国大会講演論文集, 3J-08, 1-2, 2017.

藤原紫王里, 中桐 齊之, 二次元格子上繰り返し囚人のジレンマゲームにおけるフリーライダーの影響, 情報処理学会第 79 回全国大会講演論文集, 3J-09, 1-2, 2017.

中桐 齊之, 萩野周平, 遠藤敏生, 波多拓哉, 榎原周平, 向坂幸雄, 納豆菌のコロニー形成と分布拡大: 環境条件による影響, 情報処理学会第 79 回全国大会講演論文, 1B-02, 1-2, 2017.

藤原涼子, 中桐 齊之, 格子確率モデルによる工場の分布拡大と閉鎖のシミュレーション, 情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集, 1, 353-354, 2016.

藤原紫王里, 中桐 齊之, 繰り返し囚人のジレンマゲームにおける非報復戦略の可能性, 情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集, 1, 299-300, 2016.

〔学会発表〕(計 18 件)

伊藤翔太, 向坂幸雄, 中桐 齊之, シミュレーションによる納豆菌(basilus var. subtilus natto.)コロニーのパターン形成の格子確率モデルによる解析, 日本生態学会第 65 回全国大会, 2018 年 3 月

寺尾明日実, 向坂幸雄, 中桐 齊之, 環境条件の変化による納豆菌コロニーの増殖拡大, 日本生態学会第 65 回全国大会, 2018 年 3 月
坂本杏子, 中桐 齊之, カシノナガキクイムシによるナラ枯れ被害のシミュレーション解析, 日本生態学会第 65 回全国大会, 2018 年 3 月

原田凌太, 内平隆之, 中桐 齊之, 囚人のジレンマゲームのシミュレーション解析-協力戦略の可能性-, 情報処理学会第 80 回全国大会, 2018 年 3 月

Nariiyuki Nakagiri, Yukio Sakisaka b and Kei-ichi Tainaka, Lattice models of habitat destruction in a prey-predator system, 22nd International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2017), Hobart, Tasmania, Australia, Dec. 2017.

平田直也, 中桐 齊之, マルチエージェントモデルを用いたセルフレジ導入によるレジサービスへの影響と解析, 2017年度 情報処理学会関西支部支部大会, 2017 年 9 月

中桐 齊之, 格子確率モデルによる納豆菌コロニーのパターン形成とシミュレーション: 環境条件による影響, 第 14 回「生物数学の理論とその応用 構造化個体群モデルとその応用」, 2017 年 9 月

藤原紫王里, 中桐 齊之, 二次元格子上繰り返し囚人のジレンマゲームにおけるフリーライダーの影響, 情報処理学会第 79 回全国大会, 2017 年 3 月

平田直也, 中桐 齊之, MAS を使用したセルフレジシミュレータの開発と検証, 情報処理学会第 79 回全国大会, 2017 年 3 月

藤原涼子, 中桐 齊之, 格子確率モデルによる工場立地と閉鎖のシミュレーション, 情報処理学会第 79 回全国大会, 2017 年 3 月

中桐 齊之, 遠藤敏生, 波多拓哉, 榎原周平, 向坂幸雄, 納豆菌のコロニー形成と分布拡大: 環境条件による影響, 情報処理学会第 79 回全国大会, 2017 年 3 月

藤原涼子, 中桐 齊之, 格子確率モデルによる工場の分布拡大と閉鎖のシミュレーション, 情報処理学会第 78 回全国大会, 2016 年 3 月
藤原紫王里, 中桐 齊之, 繰り返し囚人のジレンマゲームにおける非報復戦略の可能性,

情報処理学会第 78 回全国大会, 2016 年 3 月
波多拓哉, 遠藤敏生, 榎原周平, 中桐齊之,
枯草菌コロニーのパターン形成と破壊地, 日
本生態学会第 63 回全国大会, 2016 年 3 月
萩野周平, 遠藤敏生, 波多拓哉, 向坂幸雄,
中桐齊之, 環境条件が納豆菌 (*Bacillus
subtilis* var. *natto*) コロニーのパターン形
成に与える影響, 日本生態学会第 63 回全国大
会, 2016 年 3 月
遠藤敏生, 波多拓哉, 榎原周平, 中桐齊之,
環境条件の変化による納豆菌コロニーの増
殖拡大～実験とシミュレーション分析～,
日本生態学会第 63 回全国大会, 2016 年 3 月
前川優衣, 中桐齊之, 格子モデルによるナ
ラ枯れシミュレーション, 日本生態学会第
62 回全国大会, 2016 年 3 月
Nakagiri, N., Ohashi, M., Okada, R., Ikeno,
H, A comb model and simulation of honeybee
with the effects of the space, 2015 Joint
Meeting of The 5th China-Japan-Korea
Colloquium on Mathematical Biology and The
Japanese Society for Mathematical Biology,
Kyoto, Japan, Aug. 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

藤原紫王里, 中桐齊之, 繰返し囚人のジレン
マゲームにおける非報復戦略の可能性, 情報
処理学会第 78 回全国大会学生奨励賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中桐齊之 (NAKAGIRI, NAriyuki)
兵庫県立大学・環境人間学部・准教授
研究者番号：30378244

(2) 研究分担者

向坂幸雄 (SAKISAKA, Yukio)
中村学園大学短期大学部・幼児保育学科・
准教授
研究者番号：90419250

(3) 連携研究者

榎原周平 (EBARA, Shuhei)
大阪青山大学・健康科学部・准教授
研究者番号：10372856

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

(4) 研究協力者

()