

生息地破壊における空間パターンの影響: 移動を考慮した格子モデルによる解析

Effects of spatial pattern in habitat destruction: an analysis of lattice model considering the migration

*中桐 齊之, **泰中 啓一, ***向坂 幸雄

*兵庫県立大学環境人間学部, **静岡大学創造科学技術大学院環境・エネルギーシステム専攻,

***中村学園大学短期大学部幼児保育学科

*†Nariyuki Nakagiri, **Yukio Sakisaka and ***Kei-ichi Tainaka

**School of Human Science and Environment, University of Hyogo, Himeji 670-0092, JAPAN*

***Department of Environment and Energy Systems, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, Hamamatsu 432-8561, JAPAN*

****Division of Early Childhood Care and Education, Nakamura Gakuen Junior College, Fukuoka 814-0198, JAPAN*

† E-mail: nakagiri@shse.u-hyogo.ac.jp

Recently, the reduction in population size and extinction of species are arising big issues not only in the field of conservation biology but also in the world economy. This is because that these problems are assumed to be mostly due to human economical activities such as cultivation, urbanization, destruction of environment and so on. One of the main causes seems to be the habitat destruction. Many studies are conducted, and it is revealed that the simulation model is useful technique for such an ecological scale matter. Especially, the lattice model simulation is a helpful tool to analyze the effects of spatial structure, and there are many works which deals population dynamics with lattice model simulation including study of habitat destruction. Even though, most animal migrate on the field and there are many plant species with seed dispersal, there was no work which considers migration of each organism on the lattice with habitat destruction. To examine how the migration of organism affect the population variability under many conditions of habitat destruction, we applied this technique in predator-prey system for four different conditions where predator and/or prey migrate randomly on the lattice ecosystem field. We compare these conditions as follow: (1) no organism migrate; (2) only prey migrate; (3) only predator migrate; and (4) predator and prey migrate simultaneously. For each four conditions, we obtained typical spatial image of lattice populations, and observed steady state densities of predators, correspond to various densities of destructed site on the lattice. It is suggested that the absence or presence of migration of preys affect more strongly than that of predators to the extinction of predators.

1. はじめに

生物の生息環境は常に変動しているが、近年は特に人間の経済活動により環境が急激に変化し、それによる個体群の減少や絶滅が世界中で急増している。個体群減少は絶滅の前兆現象であり、保全生物学上の大きな課題となるだけでなく、人間にとって有用な生物資源の利用可能性にも絡む、経済的に大きな問題でもある。また特に、絶滅は生物進化の上で不可逆的な現象であり、生物の多様性に重大な影響を与える深刻な問題ともいえる。生息地破壊はこの絶滅の主要な原因の一つである。直接的に生息地を破壊することでその領域に居住する生物が死滅することは容易に考えられ、個体群がその領域だけにしか生息していなければ絶滅に至る。このような直接的な生息地全体の破壊でなくとも、広い空間にパッチ状に生物が生息している場合に、実際の生息地を含む、潜在的な生息地の一定の領域で破壊が起きると確率的に絶滅が生じうる。こういった生息地破壊が生物個体群に及ぼす影響については、実際の生物集団を対象とした研究だけでなく、理

論的手法による研究も数多く行われてきた[1]. 広範なエリアに生息する野生生物の生息地の破壊に関する研究は実験的に検証することが難しく、シミュレーション実験が有効である。中でも空間平面を格子状に区切ったモデルでの検証は格子モデルと呼ばれ、生息地破壊に関する研究も数多く行われてきた。しかし、多くの格子モデルによる研究では、縦横の直線により区切られた格子の升内の領域自体を破壊するサイト破壊により検証が行われている。サイト破壊では生息地そのものが破壊される面積的效果だけでなく、生息地間の繋がりを破壊する効果が同時に現れるものの、それぞれの効果の程度を区別して検証することはできなかった。Tao ら[2]は、生息地間の繋がりを破壊するシミュレーションに、繋がりの破壊のみを実現する **contact percolation process** モデルを導入し解析した。また、Nakagiri ら[3]は、**predator-prey** モデルにこの手法を適用し、捕食-被食関係にある 2 種の生物間相互作用に、生息地間の繋がりの破壊がどのような効果をもたらすのかを検証した。この研究では、繋がりに対してのみの破壊となるボンド破壊と生息地に対する破壊となるサイト破壊を独立に適用し、生息地の繋がりが被食者・捕食者へ及ぼす影響を解析し、生息地の分断化の影響が両者に複雑な振る舞いを及ぼすことを示した。

これまでの生息地破壊を検証したこれらの研究では、そのほとんどにおいて、生物は生まれてから死亡するまで同一の格子升内に留まり続けるという設定で検証が行われてきた。実際に野外に生息する生物は、特に動物では生まれてから死ぬまで同一の場所にとどまり続けることはない。また、繁殖後の定着過程においては、動物植物共に大きく分散する生物が多くいることが知られている。Kitamura ら[4]は被食者と捕食者の移動が個体群動態に与える影響を調べ、それぞれの移動が絶滅に寄与しうることを明らかにした。彼らは格子空間上の被食者と捕食者の移動率をそれぞれ変化させたシミュレーションを行い、捕食者が移動する場合には多くで密度が増大し、被食者が移動する場合には密度が減少するという、個体群密度への非対称な影響を示した。

上述のモデルは、生物の移動は考慮しているが、生息地破壊について検証したものではない。また、これまでの生息地破壊に関する研究では、移動の要素が組み込まれていない。生息地破壊による絶滅や個体群減少を検討すべき生物には移動を行うものが数多く存在する。本研究では、**predator-prey** 系の格子モデルを用いて、生息地の破壊や分断化が移動を考慮した個体群動態に与える影響を、シミュレーション解析により従来の移動を考慮しないモデルと比較した。シミュレーションでは、被食者と捕食者の 2 種が存在するモデル生態系を対象に、移動の要素を、被食者のみに加える場合、捕食者のみに加える場合、被食者・捕食者共に加える場合の 3 つのタイプに分け導入し、両種の個体群動態を解析し、特に生息地の分断化という視点から生息地破壊の影響を探った。

2. モデルと方法

まず、被食者(X)と捕食者(Y)の 2 種の生物で構成されたモデル生態系を考える。二次元の格子を用意し、各格子上のサイトは、被食者(X)か捕食者(Y)か空き地(O)で占められており、次の相互作用が起こるとする (図 1)。



ここで(1a)は、Xが増殖率 r で隣接する空き地(O)にも生息地を拡大する増殖プロセスを表している。次に(1b)では、Yが隣接するXに対して捕食率 p で捕食し、両サイトがYで占められる捕食プロセスを表している。(1c)は、X、Yがそれぞれ死亡率 m_X 、 m_Y で死亡して空き地(O)に戻る死亡プロセスである。(1d)と(1e)は、XおよびYが移動率 S_X 、 S_Y で空き地へ移動を行う移動プロセスであり、X、Yの個体数に変化はない。これを模式図で示すと図1のようになる。

このモデルにおいて、モンテカルロシミュレーションによる計算機実験を行った。 $t=0$ において、生物は密度 x を取るとする。その後、以下のようにして時間発展を行い、Xの個体群密度を記録した。最近接格子点はノイマン近傍により定義される。

- (i) $N \times N$ の二次元正方格子を用意し、Xを密度 x で、Yを密度 y で配置する。次に、密度 D で破壊地を配置する。残りのサイトは空き地Oを配置する。
- (ii) 各々の相互作用につき次の3つのプロセスを行う。
 - A) まず、増殖プロセス(1a)を実行する。1つの格子点を任意に選び、次にその最近接格子点を任意に選び、それら2点がXとOならば、増殖率 r によってOをXに変える。
 - B) 次に、捕食プロセス(1b)を実行する。1つの格子点を任意に選び、次にその最近接格子点を任意に選び、それら2点がYとXならば、捕食率 p によってXをYに変える。
 - C) 死亡プロセス(1c)を実行する。任意の格子点を1つ選び、それがXで占められていた場合、Xを死亡率 m_X でOに変え、それがYで占められていた場合、Yを死亡率 m_Y でOに変える。
- (iii) 移動プロセス(1d)、(1e)を実行する。隣接する2点をランダムに選ぶ。この2点がXとOであったなら、比率 S_X でXとOを入れ替える。この2点がYとOであった場合も同様に、比率 S_Y でYとOを入れ替える。ここで、比率は、相互作用と移動の比率である。例えば $S_X=50$ の場合、(ii)を1回に対し(iii)を50回行うことを意味している。
- (iv) 格子点の総数($L \times L$)回ステップ(ii)~(iii)を繰り返し、1モンテカルロステップ(MCS)とする。本研究では $L=100$ とした。
- (v) (iv)を10000MCS繰り返す。

ここで、格子空間上での反応には周期的境界条件を用い、相互作用を行う際、上記のように隣接するサイトとのみ相互作用するものとして、シミュレーション解析を行った。

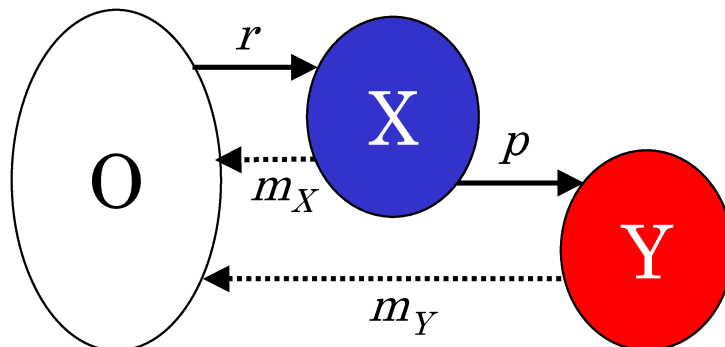


図 1. Predator-Prey モデルの模式図

3. シミュレーション結果

格子モデルにおいて計算機実験を行った結果について述べる。初期密度を一定にし、破壊地密度 D を変化させてシミュレーションを行った。その結果、得られた典型的な空間パターンを図 2 に示す。図 2 より、従来のモデルである移動のない格子モデルにおいては、破壊地の密度 D が高い条件のとき、捕食者が絶滅することがわかる。次に、被食者 X のみが移動を行うときの生息地破壊の影響をシミュレーションにより解析した。被食者が移動を行うとき ($S_X = 50$)、様々な破壊地密度 D についてシミュレーションを行った結果の空間パターンを図 3 に示す。図 2 と比較すると、被食者が移動を行うと、移動を行わないときより生き残りやすく、 $D=0.5$ においても絶滅が起きないことがわかる。

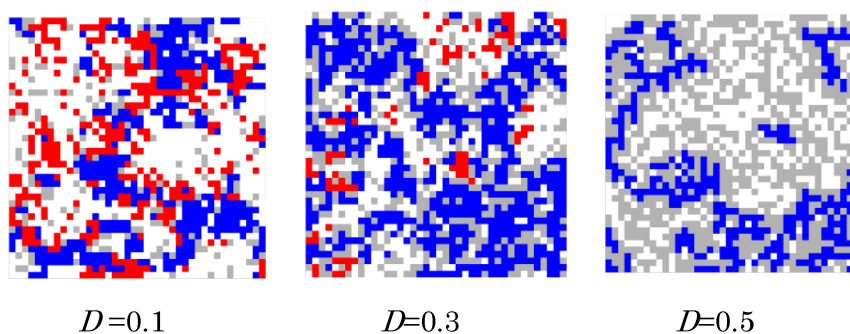


図 2. 移動がない場合 ($S_X=S_Y=0$) における、様々な破壊地密度各 D における空間パターンのスナップショット。
赤：捕食者 Y、青：被食者 X、灰色：破壊地。

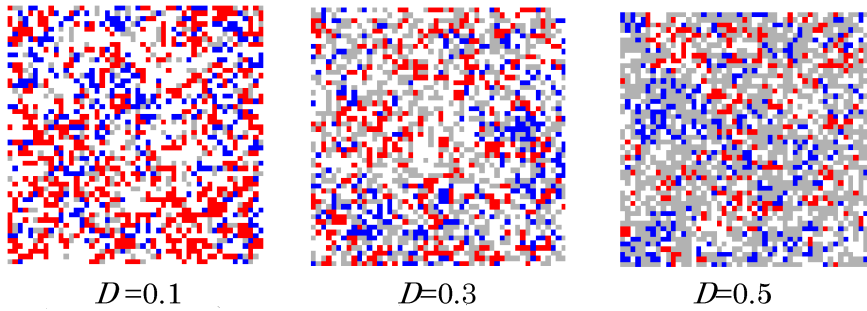


図 3. 被食者のみが移動する場合($S_X=50, S_Y=0$)の, 様々な破壊値密度 D における空間パターンのスナップショット. 赤: 捕食者 Y, 青: 被食者 X, 灰色: 破壊地.

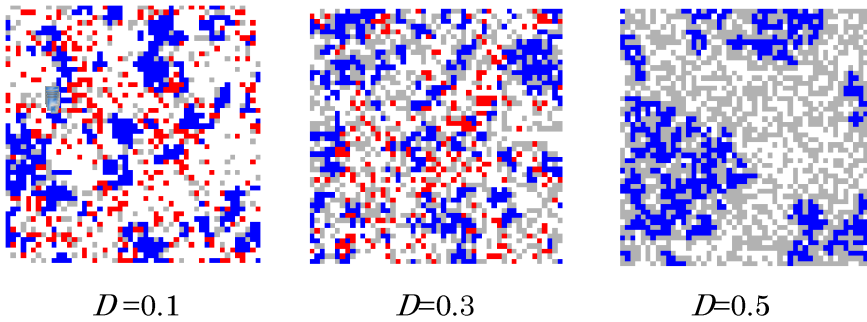


図 4. 捕食者のみが移動する場合($S_X=0, S_Y=50$)の, 様々な破壊値密度 D における空間パターンのスナップショット. 赤: 捕食者 Y, 青: 被食者 X, 灰色: 破壊地.

更に, 捕食者のみが移動する場合についてシミュレーションを行った. 空間パターンのスナップショットを図 4 に示す. 図 4 より, 捕食者のみが移動する場合, 捕食者の絶滅は, 移動がない場合より破壊地密度 D が低い値で起こっていることが分かる.

最後に, 被食者・捕食者の両方が移動する場合についてシミュレーションを行った. 空間パターンのスナップショットを図 5 に示す. 図 5 より, 捕食者の絶滅は, 破壊地密度が高いときに起こり, 被食者のみが移動する場合のシミュレーション結果と同様の結果が得られた.

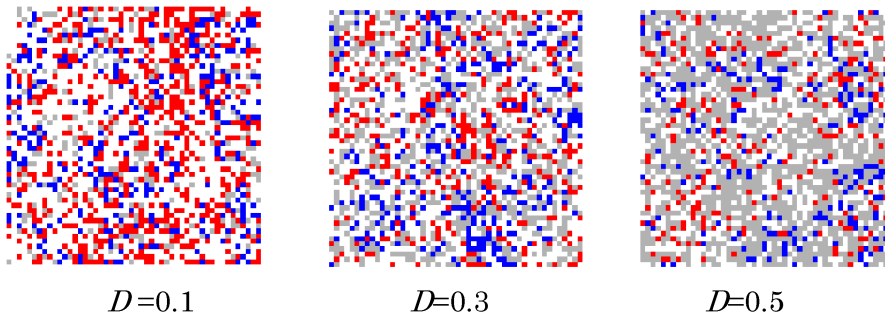


図 5. 両方が移動する場合($S_X=50, S_Y=50$)の, 様々な破壊値密度 D における空間パターンのスナップショット. 赤: 捕食者 Y, 青: 被食者 X, 灰色: 破壊地.

捕食者の絶滅に重要な影響を与えているのは、捕食者自身の移動の効果よりも、被食者の移動の有無に大きく影響されることが分かった。そこで、捕食者の絶滅を詳細に調べるために、定常状態における捕食者の密度を調べた。表 1 に、移動しない場合、被食者が移動する場合、捕食者が移動する場合、被食者・捕食者の両方が移動する場合、それぞれの場合における破壊地密度 D のおおよその値と捕食者の定常密度の関係を示す。表 1 より、被食者 X のみが移動するときは、移動がないときと比較して、 D の値が大きくても生き残り、捕食者 Y が絶滅するときの D の値が大きいことがわかる。また、捕食者 Y の絶滅が起きる最低の破壊地密度 D が、捕食者 Y のみが移動するときには移動がないときに比べて、小さな値を取る事がわかった。捕食者と被食者の両方が移動するときに、捕食者 Y は最も生き残りやすく、捕食者 Y が絶滅状態となる破壊地密度 D の値が被食者 X のみが移動するときに近い値をとるものの、被食者 X のみが移動するときよりも、やや大きいことがわかる。

表 1. X, Y の移動の有無に対し、様々な破壊地密度 D での捕食者 Y の定常状態密度を調べ、それ以上の破壊地密度では常に Y の定常状態密度が 0 となる Y の絶滅が起こる D のおおよその値

	移動がない	X のみ移動	Y のみ移動	X, Y ともに移動
絶滅が起こる D	0.4	0.81	0.35	0.88

4. 考察とまとめ

本稿では、生息地破壊の格子モデル[3]に移動の要素[4]を加えて、生息地破壊の影響を解析した。このモデルにおいては、生息地破壊の程度である破壊地密度 D がある一定以上のときに絶滅が起こるが、その絶滅点は、被食者 X のみが増殖するときと被食者 X と捕食者 Y の両方が移動するときに、移動しないときよりも大きな値をとることがわかった。これは、被食者が移動すると、移動しないときと比較して被食者の隣接する点に空き地と捕食者が増えるため、被食者が増えると同時に、捕食者が捕食しやすくなり、捕食者が生き残りやすくなるためだと考えられる。また、破壊地密度 D が低いときに、移動がないときよりも捕食者の密度が低くなったのは、生息地の繋がりがほとんど破壊されていないため、餌の移動できる範囲が分断化されておらず、捕食者の捕食が促進されなかったためであると考えられる。

逆に、捕食者 Y のみが移動するときは、捕食者の隣接する点に被食者が増えるが、被食者は移動しないため、捕食者が被食者を捕食しやすくなり、被食者は増えにくくなる。その結果、捕食者と空き地だけの領域が増える。捕食者と空き地だけの領域では、被食者がいなくなり捕食者は増殖できず死亡を待つだけとなるため、結果として捕食者は絶滅してしまう。ゆえに、破壊地密度 D が低い値で捕食者の絶滅が起こると考えられる。

本報告では、Predator-Prey 系における移動を考慮したモデルにおいて、生息地破壊の影響がどのように変化するかを解析した。結果をまとめると、生息地破壊の影響が大きくなり、捕食者が絶滅するケースにおいては、被食者が移動するときは、捕食者が移動するしないに関わらず、

絶滅を抑制することがわかった。しかし、捕食者のみが移動するときは、絶滅を促進することがわかった。また、被食者と捕食者の両方が移動する場合は、相乗効果で捕食者の絶滅がさらに抑制されることがわかった。

今回は、モデル生態系として 1 種系モデルを取り扱ったが、3 種以上の系においても、どの種が移動するかによって絶滅しやすくなる種や絶滅しにくくなる種が変化することがあると考えられる。したがって、生物の生息地破壊による影響を考える際には、移住や移動が起こらない場合だけでなく、その移住や移動を考慮しなければならない場合があることが示唆される。生物の保全などを考える際には、その空間パターンも考慮する必要があるが、対象となる生物だけでなく、その系の生物がどの程度の移動をするのかについても考慮する必要があるだろう。

参考文献

- [1] Ryall, K.L., Fahrig, L., Response of predators to loss and fragmentation of prey habitat: A review of theory, *Ecology*, 87 (2006), 1086-1093.
- [2] Tao, T., Tainaka, T., Nishimori, H., Contact Percolation Process: Contact Process on a Destructed Lattice, *Journal of the Physical Society of Japan*, 68 (1999), 326-329.
- [3] Nakagiri, N., Tainaka, K., Yoshimura, J., Bond and Site Percolation and Habitat Destruction in Model Ecosystems, *Journal of the Physical Society of Japan*, 74 (2005), 3163-3166.
- [4] Kitamura, K., Kashiwagi, K., Tainaka, K., Hayashi, T., Yoshimura, J., Kawai, T., Kajiwarara, T., Asymmetrical effect of migration on a prey-predator model, *Physics Letters A*, 357 (2006), 213-217.