

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：32661

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23710285

研究課題名(和文) 外来生物の分布拡大加速化を予測する予兆シグナルの開発

研究課題名(英文) Early warning signals for predicting impending expansion of invading populations

研究代表者

瀧本 岳 (TAKIMOTO, Gaku)

東邦大学・理学部・准教授

研究者番号：90453852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：生態系や人間社会に大きな影響をもたらす外来生物のなかには分布を拡大するまえに低密度での潜伏期間を経るものがある。本研究では、そのような外来生物を特定し分布拡大を事前に予測するための方法を開発した。低密度で1匹あたりの個体群増殖率が下がる「アリー効果」現象は、外来生物の分布拡大加速化の時間遅れを生む原因となる。本研究では、(1) 外来生物の分布拡大加速化の時間遅れがアリー効果によるものかどうかを判別し、(2) 外来生物の潜伏期間中に事前に分布拡大加速化を予測するための基本理論を構築できた。また、霞ヶ浦における特定外来生物カワヒバリガイの分布状況を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Invasive organisms can have significant impacts on ecosystems and human society. Some invasive species have latent periods of low densities before they start expansion. We developed a methodology to predict such species and their impending expansion. Allee effects are one of the mechanisms lowering the growth of low-density populations and thereby causing latent periods before the expansion of invading populations. We built a basic theoretical framework to (1) determine whether Allee effects are responsible for a latent period of an invading population, and to (2) construct an early warning signal for the acceleration of population spread during the latent period. In addition, we reported the current distribution of invasive golden mussel in Lake Kasumigaura.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：資源保全学・資源保全学

キーワード：保全生物 外来生物管理 分布拡大予測 個体ベースシミュレーション アリー効果

1. 研究開始当初の背景

外来生物がもたらす生態学的・経済学的インパクトは甚大である。生態学的インパクトには、外来捕食者による在来生物相の衰退や外来植物による生態系栄養塩循環の改変などがあり、経済学的インパクトとしては、米国で年間 1380 億ドルの外来生物対策コストがかかっているとの試算があり、日本の小笠原のグリーンアノール対策では年間数千万円の費用が投入されている。

大きな生態学的・経済学的インパクトをもたらす外来生物の管理理論の確立は、現在の生態学に課せられた重要課題の 1 つである。

外来生物の典型的な分布拡大パターンの 1 つに、狭い地域に低密度で分布する潜伏期間がしばらく続いた後に、分布拡大が加速し、広域に高密度で分布するようになるというものがある。この時間遅れのために、外来生物のインパクトを過小評価し、適切な管理施策を迅速にとることができないことがある。分布拡大速度が増加し分布域が急速に広がったときには、有効な対策ができないほどに増えてしまっているか、対策に多額のコストがかかってしまうことがある。しかし、外来生物の分布拡大の時間遅れに注目し、分布拡大の加速化を予測しようとした研究は、本研究の開始当初にはなかった。

2. 研究の目的

(1) 外来生物の分布拡大の時間遅れを引き起こす原因の 1 つにアリー効果がある。アリー効果とは、1 個体あたりの個体群増加速度が、低密度個体群において下がる現象のことである。本研究では、アリー効果を受ける外来生物個体群の空間明示的な個体ベースモデルを作成し、その分布拡大過程をシミュレーションすることで、分布拡大の加速化を予測するための基礎理論を構築することを目的とした。

(2) また、得られた理論を実際の野外の系に適用するための応用研究も行った。対象とした系は、特定外来生物カワヒバリガイの霞ヶ浦における分布状況である。カワヒバリガイ (*Limnoperna fortunei*) は中国・朝鮮半島原産のイガイの一種であり、足糸で基質に付着し、大量繁殖すると利水施設の通水阻害を引き起こすことが知られている。約 0.1mm の浮遊幼生として移動分散するため、いったん導入されると分布拡大を抑えるのが難しい。霞ヶ浦からは関東圏の広い地域に水を供給されており、霞ヶ浦におけるカワヒバリガイの分布拡大を予測することができれば、応用的意義の高い研究となる。

2006 年に霞ヶ浦におけるカワヒバリガイの分布状況の調査が行われており、湖岸全体の約半分での生息が確認されている。本研究では、その 8 年後となる 2012 年に分布状況を再調査することで、(1) で構築する理論を適

用して今後の分布拡大を予測することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 個体ベースモデルでは均質な二次元空間を仮定した。空間は 1000 × 1000 のサイトからなり、1 つのサイトは個体に占有された状態と空き状態のどちらかをとる。個体の死亡は一定の率で起こるとする。個体の増殖は、周辺サイトを占める個体の数に依存し、周辺サイトを占める個体が少ないと生産する子孫の数が減ると仮定した。この仮定によりアリー効果を導入している。また、生産された子孫は周辺サイトに分散され、そのサイトが空き状態の場合には占有し、すでに占有された状態の場合には死亡する。このプロセスにより個体群増殖率に負の密度依存性を導入していることになる。

アリー効果により分布拡大の時間遅れが生まれるしくみを精査するため、個体ベースモデルの平均場近似モデルを作成した。さまざまな初期個体群密度から平均場近似モデルをスタートさせた結果、ある閾値を境に個体群の増加あるいは絶滅のどちらかが起こった (図 1)。さらに閾値に近い初期個体群密度から増加にいたる際には、増加速度加速化の時間遅れが観察されることが分かった。この閾値はアリー効果によって生まれる不安定平衡点に対応している。この不安定平衡点の近傍を個体群密度が通過する際の個体群増加速度が小さくなるために、増加速度加速化の時間遅れが生じていた。

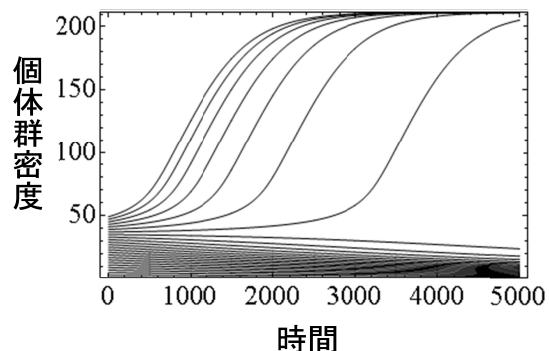


図1. 平均場近似モデルの解析結果

個体ベースモデルを用いて外来生物の分布拡大をシミュレートした。パラメータの値を変えながらモデルを走らせ、予め定めた基準を満たすシミュレーション結果を抽出することで、アリー効果による時間遅れをともなう分布拡大が起きた時系列を 500 サンプル得た。

このサンプル時系列 O を 2 種類のリファレンス時系列 RA と RB と比較することで、分布拡大加速化の予兆シグナルを検討した。リファレンス時系列 RA は、サンプル時系列と似た潜伏動態と分布拡大加速化がアリー効果ではなく急速な環境条件の変化によって

生じると仮定して得た時系列である。リファレンス時系列 RB は、サンプル時系列と似た潜伏動態を示すが分布拡大が起きない時系列である。これらのリファレンス時系列とサンプル時系列を比較対照することにより、分布拡大加速化の予測、および分布拡大加速化がアリー効果と環境条件変化のどちらによるのかの判別を行うための指標を探索した。候補とした指標は、個体数の平方根（分布域面積の指標）、時間変動係数、時間自己相関、空間変動係数、局所的な時間自己相関、空間相関の6つである。

(2) 霞ヶ浦におけるカワヒバリガイの分布調査では、2006年に行われた調査結果と比較可能な定量データを得る必要があった。そのため、霞ヶ浦の湖岸線を130個の1kmごとのセグメントに区分化し、1つのセグメントを1調査単位とした。各セグメントにおいて、1名が10分間、あるいは2名が5分間ずつ、カワヒバリガイを目視と手探りで探索し、見つけたカワヒバリガイを全て採集した。採集したカワヒバリガイは現地でそのまま10%中性ホルマリンで固定したのち実験室に持ち帰り、個体数を計数した。

4. 研究成果

(1) 6つの候補指標を比較した結果(図2)アリー効果による分布拡大加速化を予測するには、空間相関が良い指標となることが分かった(図2F)。しかし分布拡大加速化が環境条件の変化により起きる場合には、空間相関ではそれを事前に検出することが難しく、むしろ時間変動係数が比較的有効な指標となりうるということが判明した(図2B)。

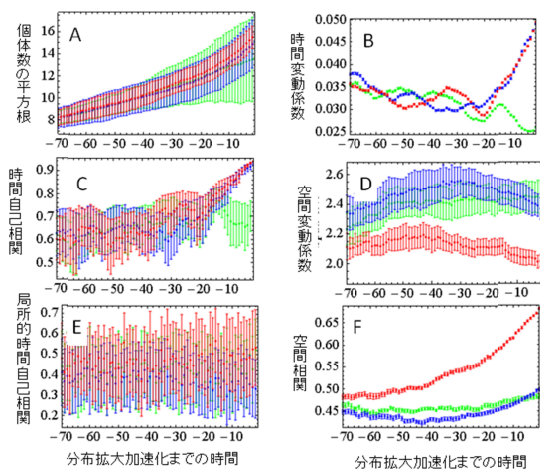


図2. 指標候補の比較。サンプル時系列0、リファレンス時系列RA、RBから計算した指標をそれぞれ赤、青、緑で表す。

このことから、アリー効果による爆発的な分布拡大が起こる場合の前兆は早くから捉えられるが、環境変化による分布拡大加速化の検出は、加速化が非常に近くなるまでは困難であるといえる。しかし、アリー効果が原因で起こる爆発的な分布拡大では、空間相関だけでなく変動係数にも注目することで爆

発的な分布拡大のどの程度迫っているのかをより正確に知ることができるかもしれない。

外来生物の分布拡大加速化を予測するこの基礎理論は、今後さらに発展させていく必要がある。本研究で使用した個体ベースモデルは均質空間を仮定しているが、実際の系では環境条件の異なるサイトが混在したり、移動分散の障壁となるサイトがあったりする。そのような状況に対しても適用可能なように、本研究で得られた理論を拡張していくことが今後の課題である。

(2) 2012年の調査では、カワヒバリガイは霞ヶ浦のほぼ全域で確認された。調査したセグメントのうちの83.2%においてカワヒバリガイの生息が確認された(図3)。生息がみられなかったのは、霞ヶ浦北部の恋瀬川の河口付近のみであった。また、2006年に生息が確認されたセグメントでは、個体数の指標値(調査員1名が10分間の採集努力の結果得た採集個体数)が2.8倍となっており、分布拡大のみならず、顕著な個体数の増加も起きていることが分かった。特に高密度の調査地では護岸や湖底に沈んでいる固い基質にカワヒバリガイが大きな固まりとなって付着している様子が観察された。

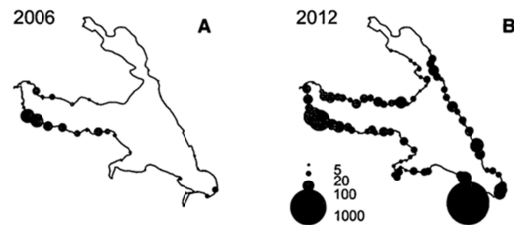


図3. 霞ヶ浦におけるカワヒバリガイの分布。黒丸の大きさは、調査員1名の10分間の採集努力の結果得られた個体数に比例している。

この結果から、霞ヶ浦におけるカワヒバリガイの分布拡大は本研究開始当初に予期していたよりも早く進んでいたことになる。そのために、分布拡大を事前に予測するために(1)で開発した理論の適用は試みなかった。その代わりに、メタ個体群モデルを用いて、2006年から2012年の6年間の分布拡大の様子を外挿し、次の6年後の2018年における分布状況を予測したところ、2018年をまたずに霞ヶ浦の湖岸全域でのカワヒバリガイの生息が予測された。これらの結果は、霞ヶ浦の全域においてカワヒバリガイが急速に拡大・増加しつつあること、また今後は霞ヶ浦から供給される水を取水する利水施設にはカワヒバリガイが生息していることを前提とする必要があること、を示している。

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 3 件)

Hiroyuki Yokomizo、Gaku Takimoto、
Making the most of mathematical models
for effective environmental management、
Population Ecology、査読無、56 巻、2014、
3 - 5

Alan Hastings、Persistence and
management of spatially distributed
populations、Population Ecology、査読有、
56 巻、2014、21 - 26

伊藤 健二、瀧本 岳、メタ個体群モデルを
用いた霞ヶ浦におけるカワヒバリガイの分
布拡大予測、日本ベントス学会誌、査読有、
68 巻、2013、42 - 48

〔学会発表〕(計 4 件)

Kenta Suzuki、Gaku Takimoto、Early
warning signals during transient phases
before expansion of alien populations、The
Joint Annual Meeting of the Japanese
Society for Mathematical Biology and the
Society for Mathematical Biology、2014 年
7 月 30 日、大阪国際会議場(大阪)

鈴木 健大、瀧本 岳、外来生物の分布拡大
加速化の予兆シグナルに関する研究、日本生
態学会第 61 回全国大会、2014 年 3 月 18 日、
広島国際会議場(広島)

伊藤 健二、瀧本 岳、霞ヶ浦におけるカワ
ヒバリガイの分布拡大の現状：2006-2012 年
の比較、日本生態学会第 60 回全国大会、2013
年 3 月 7 日、グランシップ静岡(静岡)

Gaku Takimoto、Local-regional richness
relationships of metacommunities with
local facilitation、第 96 回アメリカ生態学会、
2011 年 8 月 8 日、Austin Convention Center
(米国テキサス州)

〔図書〕(計 1 件)

瀧本 岳、すぐに増える、ゆっくり増える、
やがて消える? - 外来種がもたらす影響の
時間変化とそのしくみ-、西川 潮・宮下 直
編『外来生物-生物多様性と人間社会への影
響-』、裳華房、2011、102 - 123 (執筆分)

〔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) 研究代表者

瀧本 岳 (TAKIMOTO, Gaku)
東邦大学・理学部・准教授
研究者番号：90453852

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

鈴木 健大 (SUZUKI, Kenta)
東邦大学・理学部・博士研究員

伊藤 健二 (ITO, Kenji)
農業環境技術研究所・生物多様性研究領
域・主任研究員