

生態系における移入種と在来種との相互関係

— エージェント・ベース・シミュレーションによる —

日大生産工(院) ○村山 智隆 日大生産工 柴 直樹

1. 序論

近年、多くの地方、または都心で「移入種(外来種)」による在来種への悪影響が問題になっている³⁾。例えば、動物では、カミツキガメ、ブラックバス、ブルーギル、マングースなど、植物では、サトイソギク、ハナイソギクなどがあり、これら以外にも国内移入された種が多数存在する。これらは、様々な経緯でその土地以外から移入された。

また、現在、移入種についてのさまざまな考え方、偏見、知見が存在している。よって、本論文では、実際に報告されている事例を考察し、それらを再現するためのシミュレーションモデルを構築し、コンピューターシミュレーションを行うことにより、今後の移入種対策について検討することを目的としている。

2. 研究の方法

モデルを構築する手法としてエージェント・ベース・アプローチを採用する。この手法は、ある環境空間に、エージェントと呼ばれる個々のアクターを配置し、そのエージェントに簡単な規則を与え、それぞれの相互作用による全体としての創発的な振舞いを観察するシミュレーション技法である。

今回のシミュレーションにおけるプラットフォームは、NetLogoを用いる。NetLogoはGUIを採用し、Logo言語をベースとしたモデル記述言語による簡単な構築ができる利点がある⁴⁾。

3. シミュレーションターゲット

今回、ターゲットとする事例は以下の通りである。

事例①

近年の長野県木崎湖において、オオクチバスが雑魚を減少させ、雑魚のプランクトンに対する捕食圧が低下し、結果としてプランクトンが増殖した事例³⁾。

事例②

オオクチバスを除去した後にアメリカザリガニが大繁殖し、ヒシが食いつくされた事例³⁾。これは事例①を基に考えると、オオクチバスが侵入したことにより被捕食者の餌が大量発生し、結果、被捕食者が大増殖し、ヒシが食いつくされる事態となったと推定できる。

また、このような事例も存在する。「いくつかの魚種の全長分布はRanger湖(オオクチバスを駆除した湖)では小型個体に偏ったがMouse湖(オオクチバスを放流した湖)では大型に偏った。³⁾これには、「ブラックバスが小さな魚を選択的に摂食したことによるものと推定されている³⁾」という理由がある。よって、

The interaction between introduced species and native species on ecosystem

— by the agent-based simulation —

Tomotaka MURAYAMA and Naoki SIBA

オオクチバスの捕食により遺伝的に大きくなる強い個体のみが残り、全体の体長分布が偏ったと思われる。そこで注目したいことは、1匹当たりのエネルギーの必要量である。大きくなれば、もちろんより多くのエネルギーが必要になることは明らかである。

よって、これらの事例から、「オオクチバスからの捕食圧がかかっている生物は、摂食要求度が高くなる。」という推測をすることができる。また、この推測を「捕食圧による摂食要求度の変動」とする。このことから、事例②をもとに、「摂食要求度が高い状態の生物は捕食圧から急激に解放されると大増殖し、結果餌がなくなり絶滅する可能性がある。」ということが推測でき、これを「捕食圧解放による被捕食者絶滅の可能性」とする。今回は、「捕食圧解放による被捕食者絶滅の可能性」を再現するシミュレーションモデルを構築する。

4. シミュレーションモデル

$t = 0, 1, 2, \dots$ を時間軸とする。モデルでの移入種と在来種についての基本的な相互関係を図1に示す。図1から主なエージェントは、「プランクトン」、「在来種(成体)」、「在来種(幼体)」、「移入種(成体)」、「移入種(幼体)」だとわかる。では、それぞれのエージェントについての行動規則を示す。

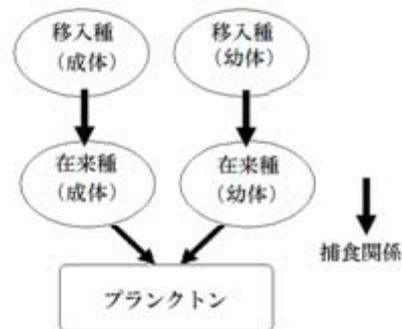


図1: モデルでの移入種と在来種の相互関係

プランクトンの行動規則

プランクトンの個体数は、内的自然増殖率(intrinsic grow rate) ϵ_p 、環境収容力または環境容量(environmental capacity carrying capacity) K 、プランクトンの総個体数 $N_p(t)$ による以下のロジスティック方程式に従う¹⁾。

$$\frac{d}{dt} N_p(t) = \epsilon_p \left\{ 1 - \frac{N_p(t)}{K} \right\} N_p(t) \quad (1)$$

在来種の行動規則

在来種はプランクトンを捕食して繁殖、成長する。捕食方法は摂食要求度 $P(t)$ に従うものとし(2) 式のように定める。 $P(t)$ は自種の現在個体数 $Nn(t)$ 、過去の最大個体数 $Nn_{max}(t)$ に従い変化する。 $Nn_{max}(t)$ は $0 \sim (t-1)$ 時点までの最大個体数である。ここで ϵ_n と AP は定数である。

$$P(t) = \epsilon_n \left\{ 1 - \frac{Nn(t)}{Nn_{max}(t)} \right\} AP + AP \quad (2)$$

また、プランクトン濃度を $PD(t)$ とおく。そして、(3)式の規則に従い、捕食行動を行う

$$\begin{cases} \text{捕食成功: } PD(t) > 100 - P(t) \text{ のとき} \\ \text{捕食失敗: } PD(t) \leq 100 - P(t) \text{ のとき} \end{cases} \quad (3)$$

- 在来種によるプランクトンの捕食
以下では

N : 在来種の個体の集合, I : 移入種の個体の集合
 $i \in N, j \in I$ とする。

個体の総効用 $utility_i(t)$ を(4)式に定義する。

(4)の u : 効用、 C : コスト (幼体はそれぞれ $u=u/v$, $C=C/v$ とする) はともにパラメータである。

$$utility_i(t) = \begin{cases} utility_i(t-1) + u: \text{捕食成功のとき} \\ utility_i(t-1) - C: \text{捕食失敗のとき} \end{cases} \quad (4)$$

また、1回の捕食成功により、プランクトン数 $Np(t)$ は u 減少する。次に、自然死はパラメータである約 L 年 (L はパラメータである、1年=100 ステップ)、または、 $utility_i(t) < 0$ の時に起こるとする。

- 成長

$young_i(t)$ を個体 i が時刻 t において幼体であることを示すブール値関数とする。 T のとき幼体、 F のとき成体である。シミュレーション開始時の個体はすべて $young_i(0) = F$ であり、それ以降に生まれた幼体は $young_i(t) = T$ とする。出産後の時刻 $t(>0)$ での $young_i(t)$ は(5)式に従う。 $growu$ はパラメータである。

$$young_i(t) = \begin{cases} T: young_i(t-1) = T \\ \text{and } utility_i(t) < growu \text{ のとき} \\ F: young_i(t-1) = F \\ \text{or } (young_i(t-1) = T \\ \text{and } utility_i(t) \geq growu) \text{ のとき} \end{cases} \quad (5)$$

- 繁殖

t での個人の幼体出産数 $spn_i(t)$ を(6)式のように定める。 spu と n はパラメータである。

$$spn_i(t) = \begin{cases} n: utility_i(t) \geq spu \text{ のとき} \\ 0: utility_i(t) < spu \text{ のとき} \end{cases} \quad (6)$$

集合 N の要素数を i_{max} とするとき、 t で生まれた総幼体出産数 $spn_{sum}(t)$ は(7)となり、在来種 b の個体数を(8)式のようになる。

$$spn_{sum}(t) = \sum_{i=0}^{i_{max}} spn_i(t) \quad (7)$$

$$Nn(t) = Nn(t-1) + spn_{sum}(t) \quad (8)$$

繁殖により新たに $spn_{sum}(t)$ 数生まれた個体はすべ

て幼体 ($young_i(t) = T$) である。また、出産直後の $utility_i(t)$ は(9)式となる。

$$utility_i(t) = \frac{utility_i(t-1)}{2} \quad (9)$$

以上の成長と繁殖の手法は、移入種でも使用する。

移入種の行動規則

移入種は在来種を捕食して、繁殖、成長する。

- 移入種による在来種の捕食

捕食方法は $vision$ を半径とする視界 (図2) 内に在来種が入った場合、その在来種を捕食し捕食成功となる。それ以外は捕食失敗となる。そして、 $utility_j(t)$ は(10)式のようになる。(10)式の C : コスト (幼体は $C=C/v$) はパラメータである。

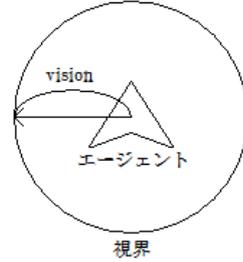


図2: 視覚

$$utility_j(t) = \begin{cases} utility_j(t-1) \\ + utility_i(t): \text{捕食成功のとき} \\ utility_j(t-1) \\ - C: \text{捕食失敗のとき} \end{cases} \quad (10)$$

また、1回の捕食が成功すると、在来種は1個体減少する。次に、自然死、幼体の成長、成体の出産は、在来種での自然死、成長、出産と同様であるが、ただし、移入種固有のパラメータに従う。また、放流される移入種はすべて成体 $young_i(t) = F$ であり、それ以降に生まれた幼体は $young_i(t) = T$ とする。

5. シミュレーション実験

実際にモデルを実行し、様々なパラメータの下で結果を導き出す。シミュレーションモデルにより示したターゲットの振舞いは「捕食圧解放による被捕食者絶滅の可能性」である。よって、この仮定が成り立つ状況をモデル上で再現する手順は I ~ IV の通りである。

表1: プランクトンの初期値

$Np(0)$	10000
K	30000
ϵp	0.25

表2: 在来種の初期値

$Nn(0)$	600
Nn_{max}	$Nn(0)$
$utility_i(0)$	0
ϵn	0.5
$growu$	4 ± 2
L	300 ± 50
C, u	1
v	0.1
spu	50
n	4
$u0$	0
AP	78

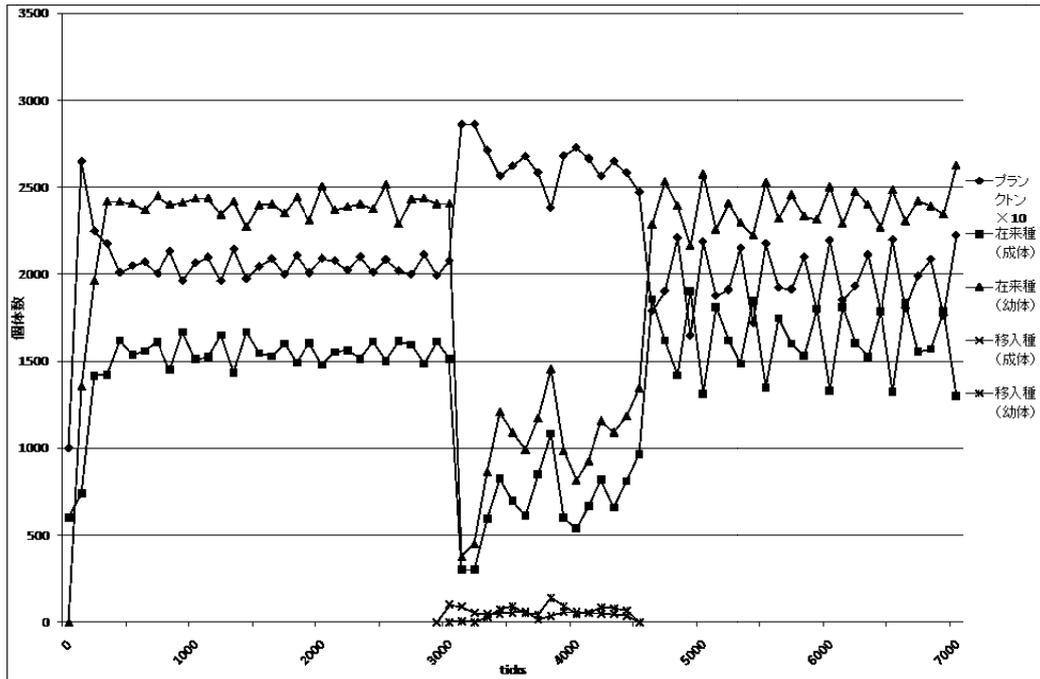


図 3：時間における個体数の変化 (条件(ステップ>4500 and P(t)>90))

表 3：移入種の初期値

Ni(0)	100
growu	50±10
utility _i (0)	0
counter(%)	100
u0	0
L	750±100
C _i u	1
v	0.1
spu	50
n	1

- I. オオクチバスが放流される前の持続可能な状態の再現
- II. オオクチバスを放流
- III. オオクチバスの定着
- IV. オオクチバスを個体数の counter% を除去する。
では、手順に沿って実験を行う。
(counter はパラメータ)

I. 表 1,2,3 の初期値によりモデルを実行

まず、プランクトンの個体数は表 1 を初期値とするロジスティック方程式に従う。プランクトンはエージェントとして環境空間上には配置せずマクロな変数として扱う。次に在来種の個体数は、表 2 に従い、初期個体数 600 匹を環境空間内にランダム配置する。そして、1 ステップ間に環境空間単位 1 ずつ前進する。またこのステップ間に捕食行動、繁殖行動、成長を行う。

II. 3000 ステップにオオクチバスを 100 匹放流する。

I を繰り返し、3000 ステップに、環境内に 100 匹の移入種を放流する。放流後、在来種と同じように、前進、捕食行動、繁殖行動、成長、自然死を行う。

III. オオクチバスが定着することを確認する。

オオクチバスが 4500 ステップまで定着することを確認する。

IV. オオクチバスを個体数の 100% 除去する。

4500 ステップからオオクチバスの 100% を除去する。このとき、摂食要求度 P(t) の値に注目する。今回の仮定である「捕食圧による摂食要求度の変動」を考慮に入れるためである。よって、P(t) の値によりオオクチバスの除去タイミングを表 4 に定める。

表 4：オオクチバス除去開始条件

設定	条件	操作
1	ステップ>4500 and P(t)>90	ブラックバスの個体数100%を除去
2	ステップ>4500 and P(t)>100	ブラックバスの個体数100%を除去

6. シミュレーション結果

モデルの実行結果を図 3、図 4 に示す。

設定 1

A) 0~2999 ステップ

この区間では、まだオオクチバスが放流されておらず、プランクトン、在来種 (成体、幼体) がバランスを保っている。

B) 3000~4499 ステップ

3000 ステップになりようやくオオクチバスが放流される。そして、オオクチバス放流により、在来種が減少する。しかし、絶滅するようなことはない。一時的に減少するが、移入種も減少し在来種が増える形となり、オオクチバスは定着する。

また、ここで注目したいことは、プランクトンの量である。オオクチバス投入以前と比べて大きく上昇している。これはプランクトンの捕食圧が減ったことによるもので、事例①に相当するといえる。

C) 4500~7000 ステップ

この区間で、摂食要求度が 90 以上のときにオオクチバスを 100% 除去する。除去すると今まで捕食圧によって数が抑えられていた在来種が増殖を始める。そして、ある程度の個体数に達したところで、餌がなくなってきたため個体数が減少する。ところが、また餌

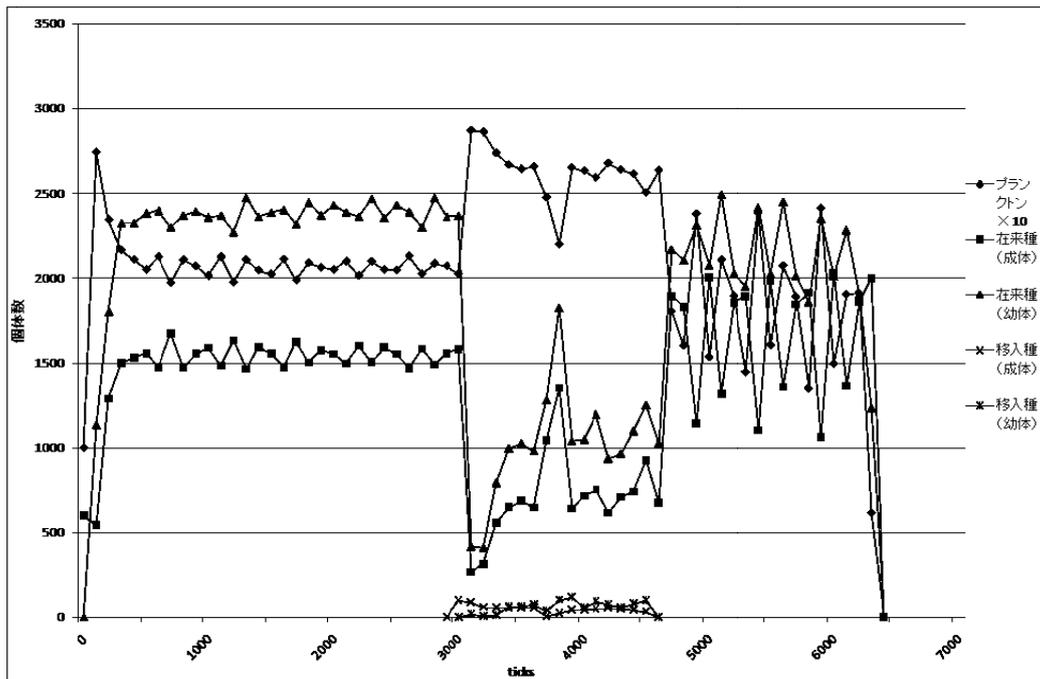


図3：時間における個体数の変化（条件(ステップ>4500 and P(t)>100)）

が増えてきたのでさらなる減少は食い止められた。これは摂食要求度が低く増殖ペースが遅かったため安定したと思われる。

設定2

A) 0~2999 ステップ

この区間は1回目と同じ条件であるので、結果はほぼ変わらない。

B) 3000~4499 ステップ

この区間も1回目と条件が同じなのでほぼ変化は見られない。

C) 4500~7000 ステップ

この区間で、摂食要求度が100以上のときにオオクチバスを100%除去する。除去すると1回目の結果と同じように捕食圧から解放された在来種が増え始める。しかし、1回目よりも摂食要求度が高い時点で捕食圧から解放されたため、1回目よりも大きい在来種の増殖になった。そして、それによりプランクトンが激減した。それを境にプランクトンと在来種の関係が発散し始め、それに伴い摂食要求度も大きく発散し、結果としてプランクトンが絶滅することとなった。これは事例②に相当する現象だと思われる。また、後に在来種も絶滅してしまった。

7. 考察

「捕食圧による摂食要求度の変動」により「捕食圧解放による被捕食者絶滅の可能性」を再現することができた。実際にこのような可能性があるならば、地方で行っている駆除事業を見直す必要がある。また、近年では、在来種を守るというゾーニング（棲み分け）が提案されているが、これには確実な移入種駆除の方法が必要である。やはり、効率の良い移入種駆除方法を何らかの手法で確立するべきである。

今回のモデルでは、捕食圧を個体数の変動により表現し、これをもとに摂食要求度を設定した。しかし、これでは捕食圧がかかっていない移入種が侵入する以前の状態で摂食要求度が上下する。今後、個体それぞ

れに全長を与え、摂食要求度を全長ベースで設定したいと思う。また、ある空間に存在する移入種を100%駆除するという事はあまり現実的ではないので、少量の駆除で効果が表れるような駆除方法も検討したい。このような問題を改善し、モデルを確実なものにすることができれば、私は、このようなシミュレーションにより駆除方法を確立させることは可能だと考えている。よって、今後このような方法により画期的な移入種駆除方法を作ることを目標とする。

8. 結論

今回のシミュレーションにより、仮定の下ではあるが、無作為駆除による在来種絶滅のある可能性が浮かび上がった。移入種駆除についてはやはり慎重にならないをえない。

近年、移入種のいろいろな偏見が存在し駆除のみを推薦する背景があるが、移入種による利益も馬鹿にはできない。利益のある移入種を有効活用するためにも画期的な駆除方法を一刻も早く確立するべきである。人間中心主義か環境中心主義かで意見は分かれるであろうが、移入種の有益性と生物多様性を両立できるような夢のような未来が来ることを願わずにはいられない。

「参考文献」

- 1) 寺元 英, 「数理生態学」, 株式会社 朝倉書店,(1997)
- 2) 松田 裕之, 「ゼロからわかる生態学—環境・進化・持続可能性の科学」, 共立出版,(2004)
- 3) 環境省自然環境局野生生物課, 「ブラックバス・ブルービルが在来生物群集及び生態系に与える影響と対策」, 財団法人 自然環境研究センター,(2004)
- 4) NetLogo Home Page, <http://ccl.northwestern.edu/NetLogo/>, 最終アクセス日 2008/10/24