

セルオートマトン法によるヤマトシジミを中心とした生態系モデルの開発

DEVELOPMENT OF ECOSYSTEM MODEL OF CORBICULA JAPONICA PRIME BY USING CELL AUTOMATON

市村康¹・松原雄平²・中村幹雄³

Yasushi ICHIMURA, Yuhei MATSUBARA, Mikio NAKAMURA

¹正会員 工博 日本ミクニヤ(株)東京支店 (〒213-0001 神奈川県川崎市高津区久地 486)

²正会員 工博 鳥取大学工学部土木工学科 (〒680-0945 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

³水博 島根県内水面水産試験場 (〒691-0076 島根県平田市園町沖の島 1659-1)

The purpose of this paper is to develop an ecosystem model by using cell automaton(CA). First, we simulated the distribution of *Corbicula japonica* prime for a long term ,and then considered the change in the distribution by the change of environmental factor. Our model is applied to Shinji Lake in east part of Shimane Prefecture.

The observation results were compared from distribution with the calculation result. The result showed a comparatively good agreement. It was able to be reproduced the distribution of the *Corbicula japonica* prime in an extremely high density in the coast region. It has been understood that the change of the *Corbicula japonica* prime has strongly received the influence of the change of an environmental factor.

Key Word : Cell automaton, Ecosystem model, *Corbicula japonica* prime

1. はじめに

沿岸域の環境を良好な状態に保つために、沿岸域環境管理が見直されるようになり、人間と自然が調和するための概念や予測評価手法が提案されているが、未だに確立されるに至っていない。特に沿岸域における環境の予測評価モデルとして長期変動を考慮にいたした生態系モデルは少ない。沿岸域の生物の個体数密度や分布などを数学モデルで表現するとき、対象生物種あるいはその行動特性に応じたモデルを構築する必要がある。例えば、魚類行動を追跡するモデルでは、個々の魚体を複数の質点に置き換え、魚の遊泳力、波や流れなどによる魚体への流体抵抗力ならびに魚群を構成しようとする成群力などを考慮した運動方程式を解き、個々の魚体の位置が決定される。また底泥上を生活圏とする生物種の行動をモデル化するには海底面の境界条件の変化に対する個体の運動を記述するモデルが必要となる。当然、モデル化に当たっては、実験や現地調査によって対象生物の生態が明らかにされている必要がある。しかし、通常、対象生物の

生理・生態や行動特性が明らかにされていることはまれで、多くの仮定とパラメータを設定したもとで、生物行動を数学的表現に置き換えている。したがって、モデル化にあたっては、実験室での実験結果あるいは現地での観測結果を基に対象生物固有のパラメータを同定する必要がある。多くの場合、このパラメータ設定の根拠が乏しく、普遍的な生態行動モデルを構築するに至らない場合が多い。こうした問題に対して、生物の有する情報処理機能や最適化機能を、工学的なアルゴリズムに置き換えた人工生命手法によって、生物行動を解析することが注目されている。

これまで筆者らはそうした人工生命手法の一つであるセルオートマトン手法（以下CAと呼ぶ）による予測モデル^{1),2)}を提案し、主に二枚貝類の個体数予測に、その有効性を示してきた。これまでのモデルでは、過去のある時点から現在に至るまでの期間内の個体数変動を再現しうる詳細なモデル化には至っていなかった。本報では、CAによるヤマトシジミのモデル化を再整理するとともに、これまでのCAモデルに改良を加え、宍道湖におけ

るヤマトシジミの分布が長期にわたりどのように変化してきたのかをシミュレートし環境要因の変動と併せて考察する。

2. 宍道湖とヤマトシジミの概要

(1) 宍道湖の概要

宍道湖は、島根県東部の斐伊川水系の下流域に位置し、東西 16 km、南北 6.2 km、湖沼面積 79.2 km²の規模を有している。最大水深 6.0m、平均水深 4.2mの浅水性の汽水湖である。宍道湖の沿岸部には、細粒～中粒砂が分布し、湖中央にかけて底質は細粒化し、水深 4.5～5.5mの範囲に広く広がっている湖底平原にはシルト・粘土が分布している³⁾。宍道湖は、東部の大橋川、中海そして境水道を通じて日本海に連絡している。なお、塩分濃度は、河川水の流入量や気象条件および海水の流入によって異なるが、海水の約 10 分の 1 程度である。

(2) ヤマトシジミ

宍道湖におけるヤマトシジミの年間漁獲量は、昭和 45 年に制定された水質汚濁防止法の施行後、昭和 47 年の 20,000 トン弱をピークに 50 年代後半に一時回復したもののその後減少傾向にあり、近年では、10,000 トンを下まわっている⁴⁾。ヤマトシジミは、わが国の汽水域全般に分布している。産卵は 7～9 月で最盛期は 8 月で、1 個体あたり約 100 万個の卵を水中に放出する。産卵から底生生活に入るまでの幼生期間は 1 週間程度である。なお、成長の盛んな時期は 4～10 月頃で、冬期の 12～3 月

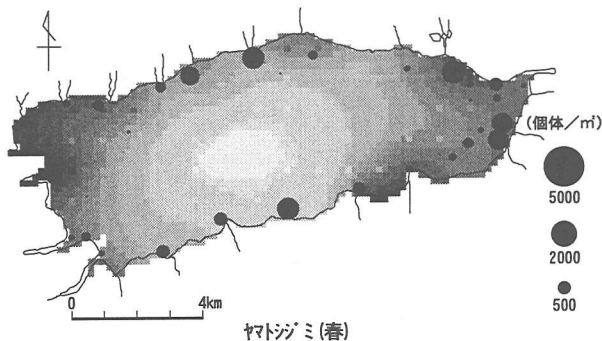


図-1 ヤマトシジミの分布(春期)

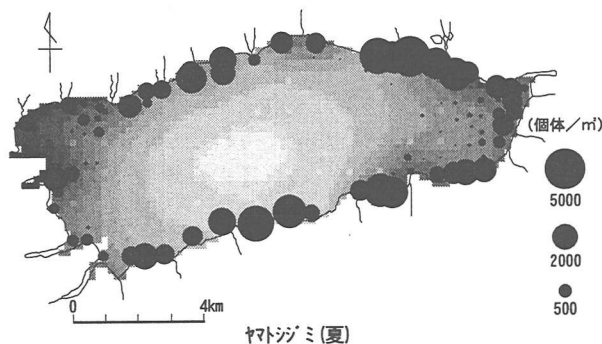


図-2 ヤマトシジミの分布(夏期)

にかけてはほとんど成長しない。図-1 および図-2 は、島根県により調査されたデータ^{3),5)}をもとに GIS を用い作成したもので、それぞれ春期および夏期におけるヤマトシジミの生息範囲を示す。図中の白黒の濃淡は水深を示し、淡くなるほど水深が増すことを示す。ヤマトシジミは、湖岸に沿った浅いところに生息域をもち、植物プランクトンを含む水中の懸濁物質を捕食している。また、個体数は、産卵域の夏期には高い値を示し、春期に少なくなるような周年変動を示すと考えられる。

3. CAモデル

(1) CAモデルの概要

CAは 1950 年代にフォン・ノイマンらによって提案されたオートマトン(自己増殖)理論に緒を発している。

CAでは、対象領域をいくつかのセルに分割し、そこを生息区画として区画の中には被食者とそれを食べる捕食者を置き、「食う」、「食われる」の世界を創る。一つのセル内の被食者と捕食者は、それぞれ与えられた増加・減少のルールにしたがって変動する。すなわち生物の増減は、その近傍セルの状態にのみ依存し、生物量あるいは状態更新のルールは、先行する時間ステップの状態にのみ依存する。セル内には被食者・捕食者が共存しているとし、捕食者は同じセル内に存在する被食者を食べ、被食者は食べられた分だけ減少する。また、すべてのセルの状態は、セル自身とその周辺のセルの状態に依存して同時に更新されるものとする。この増減の決定は、あらかじめ設定した自己セルにおける状態決定のルール(Local Rule: 以下局所ルール)に従って行われる。

特定セルでの状態変数の決定を、領域内の全てのセルに対して行い次の時刻ステップに移る。この処理を繰り返して、長期にわたる生物量の変動を追跡する手法である。このモデルの優れた点は、任意の領域に対して自由にセル空間を設定でき、現象を支配する方程式を数学的に解くことなく、現象をシミュレートできることにある。なお、近年、コンピュータの処理能力の向上は、CAによるシミュレーションを可能にしており、さらにシミュレーションの視覚的表現に地理情報システム(GIS)技術の進歩が大いに貢献している。

(2) モデル開発の考え方

a) セルサイズ

1セルを 200m×200mとし、宍道湖を 88×42 個のセル群に離散化した。

b) セルの状態

本モデルは、ヤマトシジミの分布域の変化をシミュレートするのが目的である。そこで、モデルを簡略化するために、各セルにおける生態系の素過程は、捕食者をヤマトシジミそして被食者を植物プランクトンとし、2種類の生物の関連について構成した。モデルの概略を図-

3に示す。

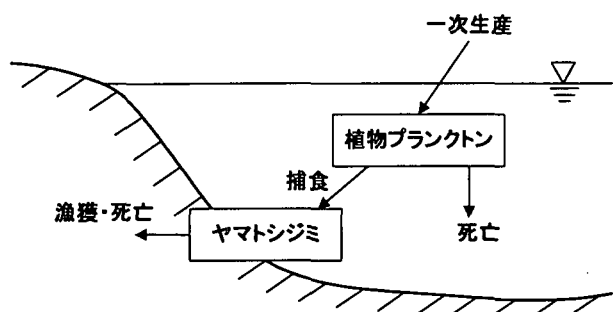


図-3 モデルの概要

c) 植物プランクトンの状態量

植物プランクトンは、クロロフィルaで表現している。その変動は増殖および、ヤマトシジミによる捕食、死亡により定義した。ある特定のセルの時刻($t+1$)における座標(i, j)における植物プランクトンの状態量は、式(1)で与えられる。

$$p_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) + \Delta p_{i,j}(t) \quad (1)$$

$$\Delta p_{i,j}(t) = k_p p_{i,j} \left(1 - \frac{p_{i,j}}{p_{\max}} \right) - d_{p1} c_{i,j}(t) p_{i,j}(t) - d_{p2} p_{i,j}(t) \quad (2)$$

ここに、

p : クロロフィルa濃度 (g/m^3),

i, j : セルの番号,

k_p : 植物プランクトンの増殖度係数 ($1.02^{(t-20)}$) t : 水温 ($\text{m}^3/\text{個体}/\text{day}$),

$p_{\max}$: 植物プランクトンの飽和定数 ($0.4 \text{ g}/\text{m}^3$),

d_{p1} : 植物プランクトンの捕食係数

($12 \sim 24 \text{ m}^3/\text{個体}/\text{day}$),

d_{p2} : 植物プランクトンの死亡係数 ($0.3/\text{day}$)

である。

d) ヤマトシジミの状態量

ヤマトシジミの変動は、産卵、幼生の拡散と着底、自然死亡(+漁獲)、環境による死亡および競合による死亡により定義した。また、産卵は、各セルにおいて7月～9月にかけて行われ、8月1日に産卵が、多くなるような正規乱数で与えている。

ある特定のセルの時刻($t+1$)における座標(i, j)におけるヤマトシジミの状態量は、式(3)で与えられる。

$$c_{i,j}(t+1) = c_{i,j}(t) + \Delta c_{i,j}(t) \quad (3)$$

ここに、 $\Delta c_{i,j}(t)$ は、産卵($c1$)、幼生の拡散と着底($c2$)、自然死亡(+漁獲)($c3$)、環境による死亡($c4$)および競合による死亡($c5$)に分けられる。

ここで、産卵は雌1個体あたり 10^6 個産卵するとする。

$$c1_{i,j}(t) = c_{i,j}(t) \cdot 0.5 \cdot 10^6 \quad (4)$$

産卵した幼生は、式(5)に示すように周囲のセルに拡散する定義すると、

$$c2_{i,j}(t) = \frac{DI_c}{x^2} \left(\sum_{n=i-lm}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \frac{c1_{n,m} - c1_{i,j}}{N} \right) \cdot la \quad (5)$$

N : 周辺水域のセル数

la : 着定率 ($0.001/\text{day}$),

DI_c : ヤマトシジミの拡散係数 (m^2/day) で、

$$DI_c = \frac{x^2}{(2\Delta t)} \quad (6)$$

x : セルサイズ (200m),

Δt : タイムステップ (10 day),

である。

自然死亡(+漁獲)は、

$$c3_{i,j}(t) = -c_{i,j}(t) \cdot d_c \quad (7)$$

d_c : 自然死亡(+漁獲)係数 ($0.5 \sim 0.84/\text{day}$),

である。

ここで、環境による死亡は、式(8)に示すように幼生が拡散により広がり着底後に影響を受けると定義する。

$$c4_{i,j}(t) = c2_{i,j}(t) \left(\frac{1}{1 + \exp(\alpha_{en}(en_{i,j} - \theta_{en}))} \right) \quad (8)$$

ここに、

α_{en} : 環境要因 en の傾き係数,

$en_{i,j}$: 環境要因,

θ_{en} : 環境要因の閾値,

である。なお、中村ら⁹⁾が求めたヤマトシジミの生息範囲より、環境要因の傾き係数は好適範囲の2倍とし、環境要因の閾値は生息限界とした。また、環境要因は、主成分分析を行いその結果より、第1主成分(寄与率0.6)の因子負荷量が0.8以上と高い水深(0.91)およびシルト・粘土(0.88)を抽出し、モデルに組み込んだ。

ヤマトシジミの個体数の増加に伴う競合は式(9)に示し、

$$\text{if } c_{i,j}(t) > c_{\max} \text{ then } c5_{i,j}(t) = -c_{i,j}(t) \cdot c_{\text{com}} \quad (9)$$

$c_{\max}$: 生息限界値 ($6000 \text{ 個体}/\text{m}^3$),

c_{com} : 競合による死亡係数 ($0.1 \sim 0.3/\text{day}$),

である。

よって、 $\Delta c_{i,j}(t)$ は式(10)に示すような、

$$\Delta c_{i,j}(t) = c1_{i,j}(t) + c2_{i,j}(t) + c3_{i,j}(t) + c4_{i,j}(t) + c5_{i,j}(t) \quad (10)$$

となる。

なお、ヤマトシジミの生態については、未知の事が多く、各係数はアサリの生態を参考⁷⁾に設定している。

以上の処理をシミュレーション最終年まで繰り返す。ここで、以上の流れを図示すると図-4のようになる。

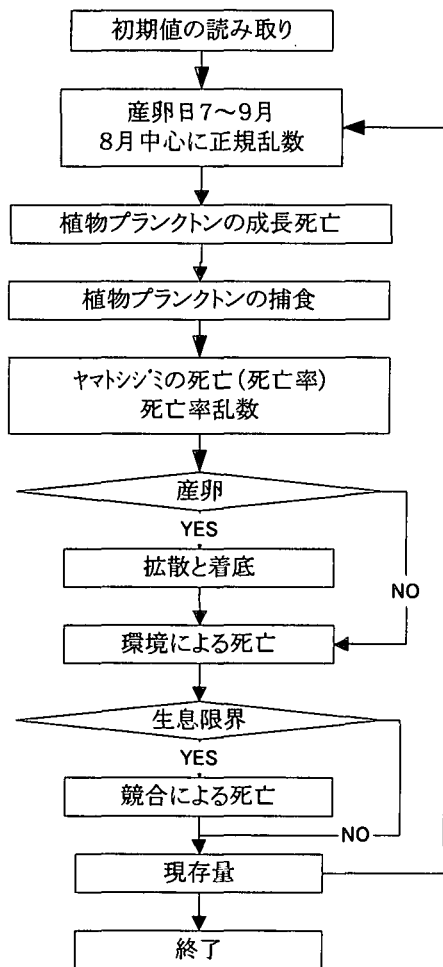


図-4 処理の流れ

4. シミュレーション

(1) 経日変化

図-5は、宍道湖東部の沿岸域におけるセルの計算開始から10年目のヤマトシジミの個体数とクロロフィルaの経日変化を示したものである。

クロロフィルaの最大値が先に現れ、遅れてヤマトシジミの最大値が出現する周期的な変動をしている。同図の結果は、湖岸近くの浅水部における変動であるが、7年目と8年目のヤマトシジミの年間最大値において約500個体/m²の差があり、年により最大値が異なるダイナミックな変動をしているといえる。また、ヤマトシジミ

の個体数は、産卵期である7~9月に急激に増え、年間を通して最大個体数を同期間に示している。一方、産卵期の前の6月に年間最小個体数を示す結果となった。この結果より、ヤマトシジミの総重量は、成長が盛んな4~10月の期間に増えると思われるが、個体数は、産卵期前に年間の最小値を示すともと思われる。なお、宍道湖中央部のセルにおいては、ヤマトシジミの生息は認められなかった。クロロフィルaは、ダイナミックに変動しており、最小値は約0g/m³を示している。この、ダイナミックな変動は、2種類の生物を対象にモデル化を行ったため一方の変動が直接的にもう片一方の変動に影響を及ぼすためと考えられる。

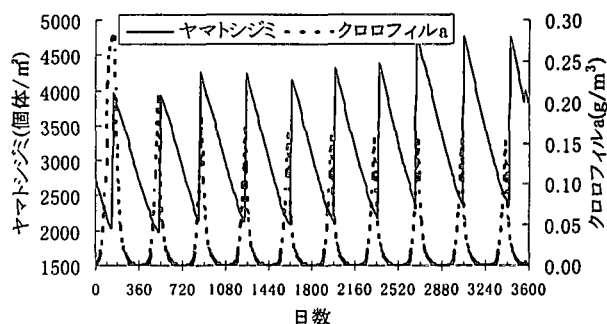


図-5 宍道湖東部セルにおけるヤマトシジミおよびクロロフィルaの経日変化

環境要因の変動として、シルト・粘土含有量が毎年5%づつ増加するものと仮定して、その影響を計算した結果を図-6に示す。その結果、ヤマトシジミへの影響は、計算開始8年目から顕著に表れ年々減少する結果となった。このことは、環境の悪化が直ちに個体数の変化に現れるのではなく、生息に影響を及ぼし始める濃度に達するまでは、影響は見られないことを示している。近年、ヤマトシジミの漁獲高が減少傾向にあるのは、底質などの環境が改善傾向にあるのではなく、悪化の傾向にあり、その結果影響が出ているものと思われる。これらの結果より、本モデルにより環境改変による影響を長期的に予測できるものと考えられる。

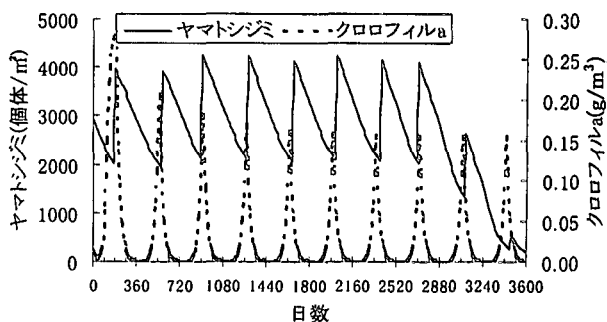


図-6 宍道湖東部セルにおけるヤマトシジミおよびクロロフィルaの経日変化
(シルト・粘土含有量を年5%増させたケース)

(2) 空間分布

前出の図-1 (1982 年夏期) および図-2 (1983 年の春期) に示したヤマトシジミの空間分布調査結果と本モデルによる予測結果の比較から予測精度の検証を行った。図-7 は春期および夏期におけるヤマトシジミの分布の計算結果を示す。なお、図中の等値線は、シルト・粘土の含有量を示す。ヤマトシジミの分布は、観測結果および計算結果共に湖岸に沿って高い値を示す形態をとっており、計算結果は観測結果を良く再現できている。また、春期と夏期における計算結果では、夏期に 5000 個体/m² 以上を示す密度セルが多く出現していることが伺える。観測結果と同様に夏期に個体数密度の高さを示している。なお、計算結果は、宍道湖東部において個体数密度の高い分布域を示しており、夏期における観測結果を良く再現できている。図よりヤマトシジミの分布は、シルト・粘土含有量の分布と比較的良く一致しており、30%の等値線に沿って分布域が広がっている。

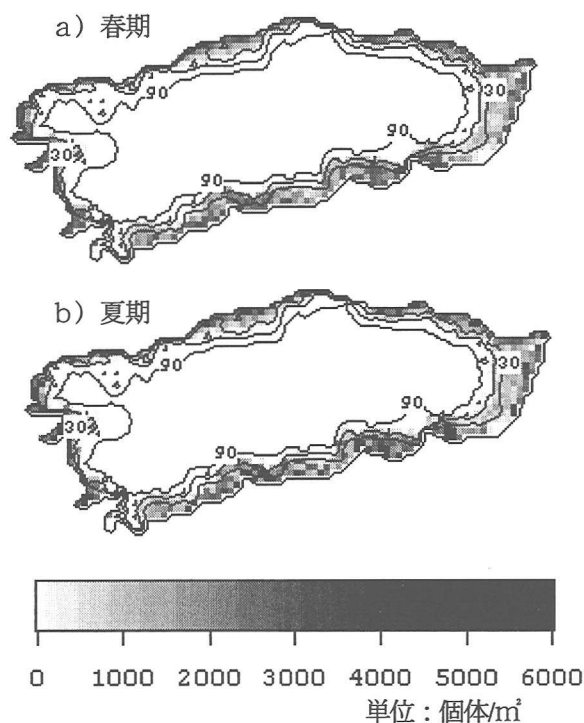


図-6 ヤマトシジミの分布

5. おわりに

本報では、ヤマトシジミの生態をCAによりモデル化する考えを整理するとともに、これまでのCAモデルに改良を加え長期にわたり、宍道湖におけるヤマトシジミの分布がどのように変化してきたのかをシミュレートし

環境要因の変動と併せて考察した。

1) 観測結果と計算結果の比較より、分布域の広がり、かなり類似した結果を示した。また、計算結果よりヤマトシジミは沿岸域に極めて高い濃度で分布することが再現できた。なお、経日変化においては、植物プランクトンの年間最大値が先に現れ、その後ヤマトシジミの年間最大値が後に現れる周年変動を示した。また、その年間最大値は年によって大きく変動するダイナミックな動きを示した。また、季節的変動では、ヤマトシジミの個体数は春季から夏季および秋季に増大し、冬季に減少する結果となった。

2) ヤマトシジミの個体数の変動は、環境要因の変動による影響をうけ変動しており、環境要因の変化により数年後にその影響が現れることが分かった。また、環境改変などによる数年後の影響を予測できることもわかった。

3) GIS による視覚化は、環境要因と生物の関連付けに有用である。今後このモデルをもとにヤマトシジミの分布域が連続的に変動するツールの開発を予定している。

謝辞: 本報告では島根県水産試験場試験場事業報告をもとに解析を行った。記してここに感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 市村康・松原雄平・野田英明: セルオートマトンを用いた底生動物の変動予測に関する研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 119-123, 1999.
- 2) 市村康・松原雄平・中村幹雄・木村晃: セルオートマトンを用いたヤマトシジミの空間変動解析, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1211-1215, 2000.
- 3) 中村幹雄・山本孝二・小川綱代・須藤正志・後藤悦朗・大島展志 (1984): 宍道湖の底生動物と底質 1982 年夏期相, 島根県水産試験場事業報告, 昭和 57 年度, pp. 186-204.
- 4) 中村 幹雄編著: 日本のシジミ漁業 その現状と問題点, たたら書房, 2000.
- 5) 中村幹雄・山本孝二・山室真澄・小川綱代・周藤正志 (1985): 宍道湖の底生動物と底質の季節変化, 島根県水産試験場事業報告, 昭和 58 年度, pp. 195-200.
- 6) 中村幹雄, 山本孝二, 小川綱代: 宍道湖におけるヤマトシジミの分布と底質環境, 第1回全国シジミ・シンポジウム—豊かなシジミ資源を永遠に—, pp. 1-8, 1998.
- 7) 増殖場造成計画指針編集委員会: 沿岸漁場整備開発事業, 増殖場造成計画指針, ヒラメ・アサリ編, (社) 全国沿岸漁業進行開発協会, 1997.