

セルオートマトンを用いたヤマトシジミの時空間変動解析

市村 康*・松原雄平**・中村幹雄***・木村 晃****

1. はじめに

東京や大阪を初めとして、わが国の大都市の多くは、陸上ならびに海上交通の接点である内湾域に面して発展してきた。このため沿岸域は社会・経済活動の場として活発に利用されてきたが、同時に漁業生産の場あるいは魚介類の生息場として重要視されてきた。しかしながら、これら水域では、開発の圧力も高いために、湾岸の大規模な埋め立てが進むとともに、海水交換の低下、水質の悪化、ヘドロ堆積あるいはプランクトンの異常発生などの現象が進行している。

近年、このような沿岸域の環境を良好な状態に保持するため、環境保障を目的としたミティゲーションの概念が導入され、環境の保全、修復および創造について多面で議論されている。特にミティゲーションでは、客観的に環境の現状分析と将来予測のための環境評価手法の確立が急務とされ、数学的モデルによる方法、統計学的モデルによる手法、人工生命による手法(松原ら, 1997; 市村ら, 1999) および環境要因評価モデル法などが提案されている。近年のコンピュータ演算能力の進展は、生態系環境の複雑現象を素過程のモデル化によって、実現象を説明可能なまでに到達しようとしている。しかし、各種のパラメータの設定や諸仮定など、各予測方法ともに様々な課題や問題を抱えており、沿岸域の環境創造を行う際の予測技術として確立されるに至っていない。

本研究では、時空間内で生ずる様々な現象を再現するために、高い自己組織化能力で知られるセルオートマトンを用い、ヤマトシジミと植物プランクトンの相互作用を考慮したモデルを作成し、島根県東部に位置する宍道湖におけるヤマトシジミの時空間分布について検討するものである。

2. 宍道湖の概要

宍道湖は、島根県東部に位置しており、東西 16 km, 南北 6.2 km, 湖沼面積 79.2 km²で我が国第 7 位の広さを持つ。

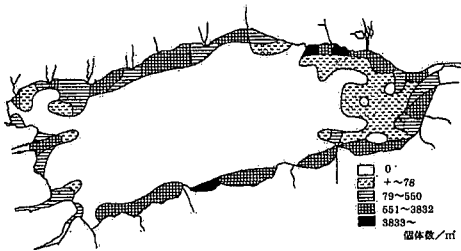
- * 正会員 理修 日本ミクニヤ株式会社
- ** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科
- *** 水博 島根県内水面水産試験場場長
- **** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科

ち最大水深 6.0 m, 平均水深 4.2 m の広くて浅い汽水湖である。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 4.5～5.5 m の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。

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つながっている。また、大橋川と結ばれている中海(湖沼面積 86.8 km²で第 5 位)と合わせると、我が国最大の汽水湖となる。なお、塩分濃度は、斐井川流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。なかでも、ヤマトシジミの漁獲量は、近年減少傾向にあるが、10,000 トン近くあり、我が国最大の漁獲量を示している。

3. ヤマトシジミ

ヤマトシジミの産卵は 7～8 月が最盛期で、1 個体あたり約 1000 万個の卵を水中に放出し産卵する。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 月にかけてはほとんど成長しない。生息範囲は、沿岸域の浅いところ全域にわたっており、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。その捕食を反映して、植物プランクトン量は、沿岸部で低く湖心部で高い空間分布を示している(作野ら, 1996)。また、生息には、餌としての植物プランクトンだけではなく、環境要素も重要な関わりを持っており、中村ら(1984, 1985)は、詳細な調査・研究を行っている。



図一 宍道湖におけるヤマトシジミの分布(中村ら, 1984)

4. セルオートマトン

セルオートマトンは、対象生物の生息する領域を多数のセルに分割し、環境要因の変動に伴う生物の消長をセル内の簡単な局所ルールで与え、全体の複雑な現象を再現・追跡するものである。セルオートマトンが扱う、時間・空間・状態はいずれも離散化されており、空間は均質である。

セルオートマトンの解析の特徴は以下のようになる。

- ① 計算対象領域をセルと呼ばれる矩形格子に分割する。
- ② 各セル上で離散的な状態を定義する。
- ③ セル上の状態量と近傍のセルの状態量との相互作用を定義して変動ルールを決める。
- ④ 局所的変動ルールに従い、離散時間の経過に伴う状態量の推移を求める。

生態系の変化を捉えるためには、場の支配方程式を導いて現象をモデル化し解析する手法が一般的である。しかし、セルオートマトンは、構成要素間の相互作用を取り入れてモデル化する手法であり、空間的な表現にも優れている。このような、構成要素の相互作用により現象が創発される系を複雑系と呼んでおり、経済学の分野をはじめ、流体解析や拡散解析など多くの分野の複雑な問題に適用されている。

5. ヤマトシジミの変動解析

モデルは、宍道湖を 34×17 の 500 m 格子のセル群に離散化した。計算領域を図-2に示す。

各セルに置いては、捕食生物をヤマトシジミ、被食生物を植物プランクトン(クロロフィル a)とし、状態量をヤマトシジミは個体数、植物プランクトンは濃度で表現した。生態系の素過程は、図-3に示すように、植物プランクトンの増殖・死亡、ヤマトシジミによる植物プランクトンの捕食と死亡を考慮した。

注目しているセルから近傍セルへのヤマトシジミの移動に関するルールは、セル中でヤマトシジミが産卵し、幼生が浮遊し周囲のセルに拡散することで定義した。こ

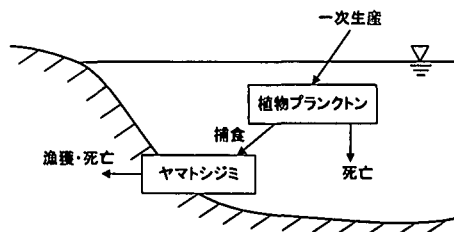


図-3 モデルの概略

こでは、産卵した幼生は、ムーア近傍を考慮し、時間ステップに注目セルから周囲の8つのセルに等しい確率で移動および残るものとし、幼生の移動は他の幼生の移動には妨げられないものとした。ただし、周囲に陸域がある場合は、そのセルを除いた確率で移動するものとした。また、植物プランクトンは、浮遊し周囲のセルに拡散することで、近傍セルとの移動変動ルールを定義した。

ある特定のセルの時刻 $t+1$ におけるヤマトシジミの状態量 $c_{i,j}(t+1)$ は式(1)で与えられる。

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

ここに、

$$\Delta c_{i,j}(t) = f_k(y_k) a_{i,j} + b_{i,j} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$a_{i,j} = \frac{DL_c}{(X)^2} \left(\sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \frac{a_{l,m} - a_{i,j}}{N} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$a_{i,j} = \Delta k_c c_{i,j}(t) p_{i,j}(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$b_{i,j} = -d_c c_{i,j}(t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f_k(y_k) = \frac{1}{(1 + \exp(\beta_k(y_k + \theta_k)))} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$p_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) + \Delta p_{i,j}(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{i,j}(t) = & k_p p_{i,j} \left(1 - \frac{p_{i,j}}{p_{\max}} \right) \\ & - d_{p1} c_{i,j}(t) p_{i,j}(t) - d_{p2} p_{i,j}(t) \\ & + \frac{DL_p}{(X)^2} \left(\sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \frac{p_{l,m}(t) - p_{i,j}(t)}{N} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

であり、

c : ヤマトシジミの生息密度 (個体数/ m^2)

i, j : セルの番号

k_h : ヤマトシジミの増殖度係数 (4~11月で正となり7.8月が最大値をとるよう正弦関数として与えた) ($\text{m}^2/\text{g}/\text{day}$)

d_c : ヤマトシジミの消滅(死亡+漁獲)係数 (0.03/day)

DL_c : ヤマトシジミの拡散係数 ($10^4 \text{ m}^2/\text{day}$)

y : 物質濃度

k : 環境要因数

β_k : 環境因子の傾き係数

θ_k : 環境因子の閾値

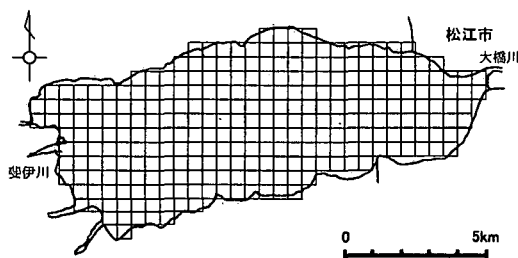


図-2 計算領域

p : クロロフィル a 濃度 (g/m^3)

k_p : 植物プランクトンの増殖度係数 (水温に依存した関数で、水温は 1 年周期の正敏感関数で近似し入力値とした) ($\text{m}^2/\text{個体数}/\text{day}$)

$p_{\max}$: 植物プランクトンの飽和定数 ($1.5 \text{ g}/\text{m}^3$)

d_{p1} : 植物プランクトンの捕食係数 ($0.0006 \text{ m}^2/\text{個体数}/\text{day}$)

d_{p2} : 植物プランクトンの消滅 (死亡) 係数 ($0.08/\text{day}$)

DL_p : 植物プランクトンの拡散係数 ($10^4 \text{ m}^2/\text{day}$)

X : セルサイズ (500 m)

である。

式 (2) 中の変化量 ΔC_i は、幼生が浮遊後着底した場の環境要因 $y_1, y_2 \dots y_n$ による環境要因の制限関数 (式 (6)) との積に表される項と、個体の消滅 (死亡および漁獲) による項の和とする。また、ヤマトシジミは、式 (3) に示されるように、増殖した幼生が周囲のセルに振り分けられることによって拡散する。なお、増殖は、植物プランクトンの捕食による式 (4) のように表される。式 (5) は消滅を示す。

植物プランクトンの変動ルールは、式 (7) のように定義した。植物プランクトンの変化は、環境要因から受ける影響量よりも個体の増殖・死亡による増減が大きいのと仮定すると、その変化 Δp_i は、式 (8) に示すようにその発生項、ヤマトシジミによる捕食項、死亡項および拡散項によって表される。

式中のパラメータは、中村ら (1998) を参考に、できる限り現地観測で得られた実測値を用いるよう設定した。ここで、ヤマトシジミの増殖度係数は、12~3 月では $0 \text{ m}^2/\text{g}/\text{day}$ で、8 月に最大値をとるような乱数で与えている。また、環境要因の制限関数において、閾値はヤマトシジミの生息範囲より生息の限界値を用い、傾き係数は表-1 (中村ら, 1998) に示すように好適な範囲と生息の限界値より求め用いた。なお、植物プランクトンの増殖速度は、水温に依存した関数形で与えた。環境要因は、水深と中村ら (1998) が報告しているヤマトシジミの現存量と最も強く相関があるシルト・粘土と水深の 2 項目を制限要因として取り込んだ。

6. 結果と考察

(1) 経日変化

図-4 は、宍道湖東部の沿岸部における計算開始から 10 年間のヤマトシジミの個体数密度と植物プランクトン (クロロフィル a) 濃度の計算結果を示したものである。なお、計算開始日は 4 月 1 日を想定している。

植物プランクトンおよびヤマトシジミの時系列曲線によると、植物プランクトンの最大値が先に現れ、遅れて

表-1 ヤマトシジミの生息範囲 (中村ら, 1998)

	水深	DO	IL	COD	シルト・粘土
生息の限界	4.0 m <	50% >	14% <	50 mg/l <	50% <
好適な範囲	3.5 m <	80% >	5% <	5 mg/l <	10% <

ヤマトシジミの最大値が出現する一年の周期的な変動を示している。この結果はヤマトシジミならびに植物プランクトンの観測結果とほぼ一致している。同図の結果は、湖岸近くの湖底棚部での周期的な変動例であるが、湖心中央付近のセルでは、前述のような周期的変動が計算値に現れず、また観測でもヤマトシジミの生息は観測されていない。以上のことから、本モデルで宍道湖でのヤマトシジミおよび植物プランクトンの捕食、被食の相互作用が再現されているといえる。

さらに、時系列の計算結果をみると、年毎にヤマトシジミの生息密度の最大値および最小値は変動するものの、絶滅状態すなわち密度が $0 \text{ 個体数}/\text{m}^2$ になる結果は得られていない。しかし、植物プランクトンはヤマトシジミと同様に、密度の最大値および最小値の年変動はあるものの、その変化が大きく最小密度は $0 \text{ g}/\text{m}^3$ となる結果も計算値に現れている。これは、対象生物を 2 種類にしぼってモデルを構築したためと考えられる。実際の水域では、特定の種だけがインパクトをうけることは稀であるとともに、数種類の生物が捕食・被食の関係にあり特定種が存在しなくなることは稀であると思われる。

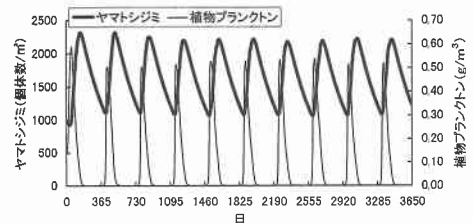


図-4 宍道湖東部セルにおけるヤマトシジミおよび植物プランクトンの計算結果

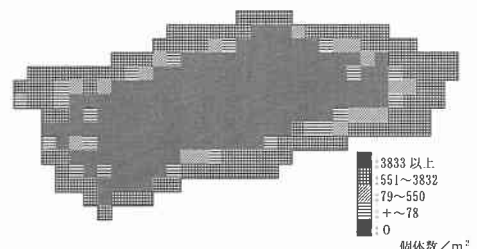


図-5 ヤマトシジミの分布 (夏)

(2) 空間分布

計算は10年間行い、最終年の夏の結果として8月1日の分布をそれぞれ図-5に示している。

図によると、ヤマトシジミの分布は、宍道湖の湖岸に沿って高い密度を示す局所的な分布形態をとっている。特に、宍道湖東部で高い値を示す分布域の広がり方が計算結果にみられ、これは実測結果を比較的良く再現している。しかしながら、湖心を中心とした無生物の分布域の広がり方は再現できていないことが分かる。本計算は、環境要因として、水深と・粘土含有量の2つの要因を制限要因としているためと考えられる。なお、春と夏の分布では、夏の分布が、湖心中央に向けてやや分布域が広がっており、個体密度ゼロの分布域が少なく、全体的に密度の多い分布を示している。

図-6は、同時日における植物プランクトン（クロロフィルa）の分布を示す結果である。これによれば、宍道湖沿岸域に分布するヤマトシジミとは異なり、植物プランクトンは湖心中央で高い密度を示し、沿岸域で低い個体数を示す分布形態となっている。これは、湖岸域でのヤマトシジミによる植物プランクトンの捕食と中央部でのヤマトシジミがいないことを示している。また、春と夏の分布では、ヤマトシジミの個体数の多い夏に高密度の 0.5 g/m^3 以上を示す範囲が少なくなるような分布を示している。これらの結果より、かなり正確に分布を再現できる可能性があることがわかる。

ヤマトシジミの分布を再現するにあたっては、幼生期

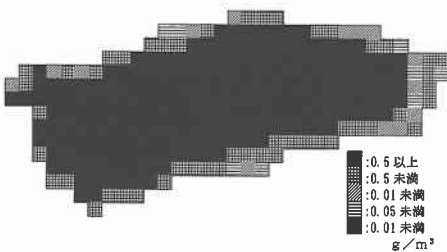


図-6 植物プランクトンの分布 (夏)

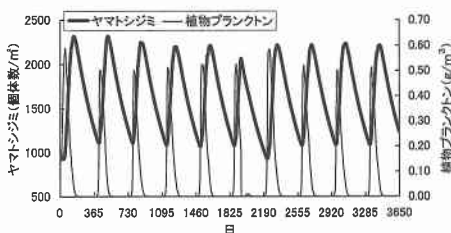


図-7 宍道湖東部セルにおけるヤマトシジミおよび植物プランクトンの計算結果(計算6年目の夏季に夏季に植物プランクトンの急減を与えている)

の浮遊、拡散そして着底までの期間が1週間と比較的長く、その結果ヤマトシジミが湖全体に広がり、分布域を形成しているものと思われる。また、広がりにあたっては、移流を考えてないので、今後再現していく上で検討すべき課題である。なお、ヤマトシジミの生息場所の減少や大量への死の主たる原因は、湖底水の貧酸素化にあることが知られており、生存は短い周期で変わる環境要因の変動に大きく影響をうけている。今後水質も考慮しモデルを構築していく必要がある。

一般に生物の分布は、多くの化学・物理的環境要素の影響以外にも、同種および多種の生物の影響を受けている。生物的要因としては、捕食、への死さらに住む場所の競合などがある。その上で、生物の生息範囲がどのような環境要因によって影響を及ぼされるのかを調べ、生物の分布域の拡大や減少、個体数の増減を解明する手法が必要であると思われる。

(3) 環境変化に対する変動

環境要因の変動により、植物プランクトンが急減したものと仮定し、その影響を予測した結果を図-7に示す。その結果、急減によるヤマトシジミへの影響は、その後数年間現れ、急減量によっては、その後絶滅に至る場合もあった。この絶滅は、幼生の拡散との相互関係によって決まってくるものと思われる。また、ヤマトシジミの寿命については、確かなことは調べられていないものの、10年以上は生きると報告されており、拡散等とあわせて考えると現実に絶滅に至る場合はないものと思われる。

次に漁業規制によって漁獲量が減少したものと仮定し、規制の影響を予測した結果を図-8に示す。これより、規制とともに年間の資源量は増大し、漁獲規制はヤマトシジミの増大をもたらす、資源保護に効果的であることがわかる。しかしながら、年間最大個体数に大きな変化はないことがわかる。資源を管理していくためには、湖沼の環境を保全するとともに、管理していく漁業が必要であるといえる。

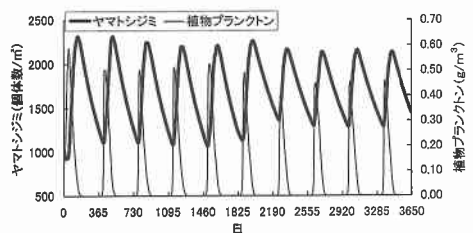


図-8 宍道湖東部セルにおけるヤマトシジミおよび植物プランクトンの計算結果(計算6年目の春季から漁獲量の減少を与えている)

7. おわりに

本研究では、環境要因の変化によるヤマトシジミの変動現象を解明するために、人工生命の一つであるセルオートマトンを用い、島根県宍道湖におけるヤマトシジミの現存量および地形および底質特性をもとに解析を行い次の結果を得た。

(1) 人工生命手法の1つであるセルオートマトンを利用し底生動物の増加・減少に関する一定のルールを与えることにより、ヤマトシジミの変動現象を予測ができることが明らかとなった。

(2) セルオートマトンでは、競合関係にあるヤマトシジミと植物プランクトン間の増減あるいは捕食、被食の関係にある個体間の増減現象を再現することに有効であることや、環境要因を取り込んだ生物の変動を予測できることが確認できた。

(3) モデルにより多くの環境要因、さらには進化のシステムを組み込むことによって、予測精度の高いシステムを構築でき、長期にわたる底生動物の変動予測も可能であると思われ、環境創造の予測手法として利用する

ことが可能であると考えられる。

参考文献

- 市村 康・松原雄平・野田英明 (1999): 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.
- 作野裕司・高安克巳・松永恒夫・中村幹雄・岡井秀伸 (1996): 宍道湖における衛生同期水質調査, LAGUNA(汽水域研究), Vol. 3, pp. 57-72.
- 中村幹雄・山本孝二・小川絹代・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.
- 中村幹雄・山本孝二・山室真澄・小川絹代・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.
- 中村幹雄・山本孝二・小川絹代 (1998): 宍道湖におけるヤマトシジミの分布と底質環境, 第, 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.
- 中村由行・Fatos Kerciku・井上徹教・二家本晃造 (1998): 汽水湖沼におけるヤマトシジミの水質浄化機能に関するボックスモデル解析, 用水と廃水, Vol. 40, No. 12, pp. 18-26.
- 松原雄平・野田英明・市村 康 (1997): ニューラルネットワークによるエゾアワビの生息環境に関する研究, 第 5 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp. 147-151.