

(14) セルオートマトンを用いた二枚貝の変動解析

PREDICTION OF BIVALVIA BY CELL AUTOMATON

市村康*・松原雄平**・中村幹雄***・木村晃****

Yasushi ICHIMURA, Yuhei MATSUBARA, Mikio NAKAMURA, Akira KIMURA

*理修 日本ミクニヤ株式会社 東京事業部 (〒213-0032 川崎市高津区久地 486)

**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

****工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科

In this paper the forecast evaluation technique for the increase and decrease of the *Corbicula japonica* change in an environmental condition is considered by using the cell automaton which is one of the artificial life techniques in this research for the bivalvia. The adaptability of this technique is examined. The cell automaton is the method to pursue inhabiting animal's rise and fall according to an environmental change by the number of animals in the cell by dividing the area where the object animal is inhabited into a lot of cells.

We clarified that it was possible to forecast to some degree by giving a constant rule of an increase and the decrease concerning the change of the *Corbicula japonica* and Phytoplankton by using the cell automaton.

Key Word : *Environment Evaluation, Cell Automaton, Corbicula japonica, Phytoplankton*

1. はじめに

日本列島の沿岸域の閉鎖的な水域においては、社会・経済活動の場、漁業生産の場として多目的に使用されているばかりでなく、海生生物が豊富で多様性に富んでいる生物的に重要な空間である。

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の環境保障を目的としたミティゲーションという概念が導入されて、環境保全、修復および創造について多方面で議論され、自然と人間が調和するための概念や環境創造の技術手法が提案されている。その中でも、環境の変動を予測する技術手法として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¹⁾²⁾および環境要因評価モデルによる手法などが提案されているが、関連している要因が多く定量化が問題である。生態系の変化の予測に関しては、近年多くの分野からその事態の重大さが叫ばれているが、関連する環境要因がきわめて多いため、開発行為がそれに及ぼす影響を定量化するには多くのデータを収集・解析し、各種パラメータを設定すると共に多くの時間を要する。特に、長期にわたる予測においては、膨大な時間がかかることも少なくはない。このようにこれらは、いずれも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。

一方、宍道湖においては、中村ら³⁾⁴⁾により二枚貝の一種であるヤマトシジミと環境要因との関連を明らかにするための研究が行われている。ヤマトシジミは、宍道湖沿岸部にのみ集中して生息しており、植物プランクトンを含む水中懸濁物を捕食している⁵⁾。その捕食を反映して植物プランクトン量は、沿岸部で高く湖心部で低い空間分布を示していると報告されている⁶⁾。

このような、時空間で生ずる様々な現象を再現することが可能なモデルとして、セルオートマトンがあり、現在多くの分野で研究が行われている。そこで本研究は、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、同手法の適応性について検討するものである。

2. モデル

2.1 宍道湖の概要

宍道湖は、島根県東部に位置しており、東西 16km、南北 6.2km、湖沼面積 79.2km²で我が国第7位の広さ、最大水深 6.0m、平均水深 4.2mの浅い汽水湖である。宍道湖の沿岸部には、細粒～中粒砂が分布し、湖中央にかけて細粒化し、水深 4.5～5.5m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³⁾⁴⁾。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 86.8km²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、日本海から気象条件や淡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、10000 トン近くあり、我が国最大の漁獲量を示している。

2.2 ヤマトシジミ

ヤマトシジミの産卵は7～8月が最盛期で、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。ヤマトシジミの生息範囲は、図-1に示すように詳細に調べられており、沿岸域の浅いところに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³⁾。また、生息には餌だけではなく、環境要因も重要な関わりを持っている。

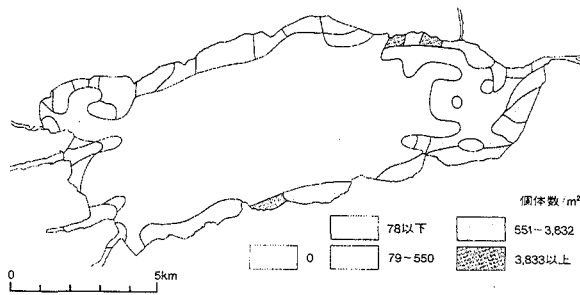


図-1 矢道湖におけるヤマトシジミの分布

2.3 モデルの概要

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動物数で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。

モデルは、簡略化するために、捕食生物をヤマトシジミ、餌生物を植物プランクトン（クロロフィルa）とし、2種類の生物間の相互関連について考えた。生態系の物質循環過程は、植物プランクトンの増殖・死亡、アサリによる植物プランクトンの増殖・死亡を考慮した。なお、モデルの物質循環過程は、図-2に示す。

セルオートマトンにおいては、セル内の増減ルールを決める必要がある。ルールを決めるにあたっては、物質

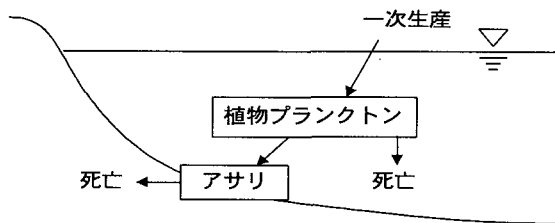


図-2 モデルの概略

循環過程、ヤマトシジミおよび植物プランクトンの生息環境条件を考慮し決めた。なお、本モデルにおいては、

セル内部の増殖・死亡と近傍範囲のセルとの拡散による相互作用を考慮する。また拡散は、自己セルの周囲8つのセルを考慮するムーア近傍を用いる。

あるセル*i*の時刻*t+1*におけるヤマトシジミの状態量*C_i(t+1)*は、式(1)に示すように最も環境要因が好ましい状態にある場合に想定される状態量*C_i(t)*と変化量Δ*C_i(t)*の和と、環境要因*x₁, x₂...x_n*のもたらす環境要因の制限関数の積*f_i*で表される。なおこの関数は、0～1までの正の値をとる。変化量は、式(2)で表され、ロトカボルテラの式による増殖・死亡項(式(3))と拡散項(式(4))で表される。*f_i*は、各環境要因の制限効果を現す関数で、式(4)に示すジグモイド関数により表される。植物プランクトン（クロロフィルa）の状態量は、環境要因の影響は少なく、個体の持つ増殖・死亡による増減が大きいのと仮定すると、状態量*P_i(t)*と変化量Δ*P_i(t)*の和で表される。

$$c_i(t+1) = f_k(x_k)(c_i(t) + \Delta c_i(t)) \quad (1)$$

$$\Delta c_i(t) = a + b \quad (2)$$

$$a = k_c c(t) p(t) - d_c c(t) \quad (3)$$

$$b_c = DL_c \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j(t) - y_i(t) \right) \quad (4)$$

$$f_k(x_k) = \frac{1}{1 + \exp(\alpha(x_k + \theta_k))} \quad (5)$$

$$p_i(t+1) = p_i(t) + \Delta p_i(t) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_i(t) = & k_p p_i(t) \left(1 - \frac{p_i(t)}{p_{\max}} \right) \\ & - d_{p1} c_i(t) p_i(t) - d_{p2} p_i(t) \\ & + DL_p \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_j(t) - p_i(t) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

c : ヤマトシジミの生息密度（個体数/m³）

i, j : セルの番号

k_c : 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）（m³/g/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（1/day）

k : 環境要因数

α : 環境因子の傾き係数

θ : 環境因子の閾値

p : クロロフィルa濃度（g/m³）

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年周期の正弦関数で近似し入力値とした）（m³/個体数/day）

p_{max} : 植物プランクトンの飽和定数（1.5g/m³）

d_{p1} :植物プランクトンの捕食係数 (0.0001 m³/個体数/day)
 d_{p2} :植物プランクトンの消滅 (死亡) 係数 (0.08/day)
 DL_p :植物プランクトンの拡散係 (1/day)

式中のパラメータは、できる限り現地観測で得られている値を用いるよう中村ら⁷⁾を参考に設定した。なお、ヤマトシジミの増殖度係数は、12～3月では0 m³/g/day で、7・8月に最大値をとるような乱数として与えている。また、環境要因の制限関数の閾値は生息限界の1割増しの値に、傾き係数は生息の限界と好適な範囲より、その範囲を示す状態量の差が大きければ、係数を小さく、差が小さければ係数を大きくするようにそれぞれ与えた。表－1には、生息範囲を示す⁸⁾。なお計算はセル格子東西南北 500m, タイムステップ 1日として行っている。

表－1 ヤマトシジミの生息範囲

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

3. 結果と考察

先に示した係数を用い、湖沼内に一様な初期値を与え、環境要因として水深と中村ら⁸⁾が報告しているヤマトシジミの現存量と最も強く相関 ($R=-0.63$) があつたシルト・粘土含有量を制限関数として取り込み計算を行った。その結果を図に示す。

3.1 水平分布

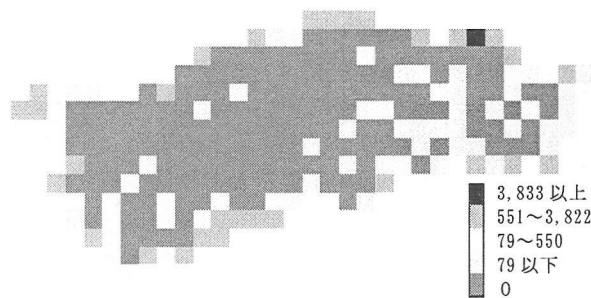
計算は5年間行い、最終年の春の結果として5月1日の分布を、夏の結果としての8月1日の分布をそれぞれ示している。

図－3および4によると、ヤマトシジミ分布は、矢道湖の沿岸に沿って高い密度を示す分布形態をとっている。また、矢道湖東部で高い値を示す分布域の広がりを比較的良く再現できている。しかしながら、図－1に示されるような、湖心を中心とした無生物状態は再現されていないことが分かる。本結果は、環境要因として、水深とシルト・粘土含有量の2つの環境要因を制限関数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、湖心中央に向けて分布域が広がっており、密度0個体数/m³の分布域が少なく密度の多さを示している。

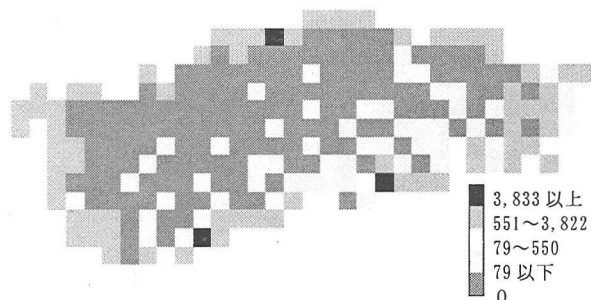
植物プランクトン (クロロフィル a) の分布を示す図－5および6によると、矢道湖沿岸域に分布しているヤマトシジミとは異なり、湖心中央で高い密度を示し、沿岸域で低い個体数を示す分布形態をとっている。これは、ヤマトシジミによる植物プランクトンの捕食

を再現している。また、春と夏の分布では、ヤマトシジミによる捕食を反映して、夏に密度0.5 g/m³以上を示す範囲が少なくなるような分布を示している。

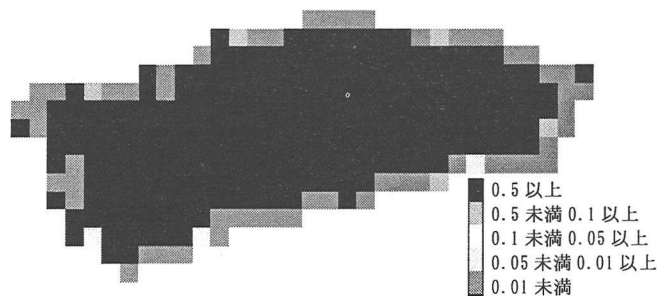
一般に生物の分布は、多くの化学・物理的環境要因の影響以外にも、同種および多種の生物の影響を受けるものと思われる。生物的な要因としては、捕食、へい死および住む場所の競合などがある。その上で、生物の生息範囲がどのような環境要因によって影響を及ぼされるのかを調べ、生物の生息域の拡大や減少、個体数の増減を解明する手法が必要であると思われる。



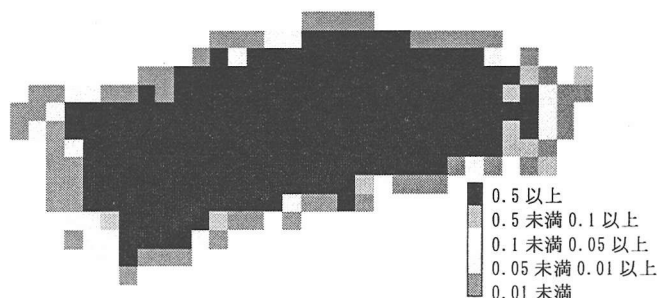
図－3 ヤマトシジミの分布 (春) 単位: 個体数/m³



図－4 ヤマトシジミの分布 (夏) 単位: 個体数/m³



図－5 植物プランクトンの分布 (春) 単位: g/m³



図－6 植物プランクトンの分布 (夏) 単位: g/m³

3.2 経日変化

計算開始から5年間のヤマトシジミの密度と植物プランクトン（クロロフィルa）の計算結果の一例を図-7に示している。なお、計算開始日は春の4月1日を想定している。

植物プランクトンの最大値が先に現れ、ヤマトシジミの最大値が遅れて出現する一年の周期的な変動を示している。これは、宍道湖の場の特性とヤマトシジミおよび植物プランクトンの相互作用による結果、作り出されたものと思われる。ここでは、周期的な変動例を示したが、セルによっては周期的な変動が確認されない場所もある。

ヤマトシジミは、年により、密度の最大値および最小値は変化するものの、密度が0個体数/m³になることはない。一方、植物プランクトンもヤマトシジミと同様に、密度の最大値および最小値は年により変動するものの、その変化が大きく最小密度は0 g/m³を示す。これは、2種類の生物につい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希であるとともに、数種類の生物が捕食・被捕食の関係にあり、種の絶滅にいたることはないと思われる。なお、ヤマトシジミの生息場所の減少や大量へい死の主たる原因は、湖底水の貧酸素化にあることが知られており⁸⁾、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。

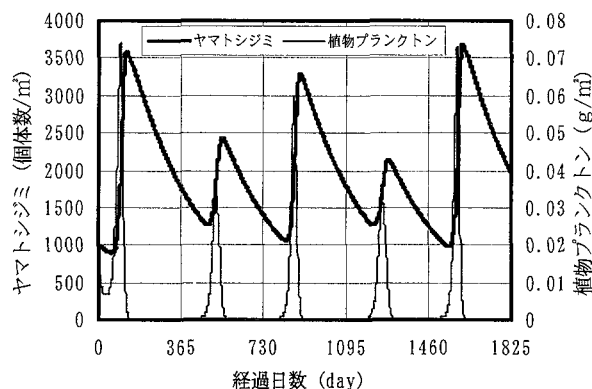


図-7 宍道湖東部セルにおけるヤマトシジミ密度および植物プランクトン（クロロフィルa濃度）密度の計算結果

4. 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。

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ある程度予測ができることが明らかとなった。特に、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、被捕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。しかしながら、ヤマトシジミの生理生態については、いまだに不明な点も多くルールを構築するに当たっては、今後の研究が期待される。その一方、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

- 1) 松原雄平, 野田英明, 市村康: 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, 1997
- 2) 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
- 3) 中村幹雄, 山本孝二, 小川絹代, 須藤正志, 後藤悦朗, 大島展示: 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, 1984
- 4) 中村幹雄, 山本孝二, 山室真澄, 小川絹代, 周藤正志: 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, 1985
- 5) Nakamura, M., M. Yamamuro, M. Ishikawa, and H. Nishimura: Role of the *Corbicula japonica* in the nitrogen cycle in a mesohaline lagoon, Marine Biology, Vol.99, pp.369-374, 1988
- 6) 作野裕司, 高安克巳, 松永恒夫, 中村幹雄, 國井秀伸: 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, 1996
- 7) 中村由行, Fatos Kerciku, 井上徹教, 二家本晃造: 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, 1998
- 8) 中村幹雄, 山本孝二, 小川絹代: 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