

セルラーオートマトンを用いた三番瀬におけるアサリの時空間解析

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF *RUDITAPES PHILIPPINARUM*
(SHORTNECK CLAM) IN SANBANSE FLATS BY CELLULAR AUTOMATON市村 康*・松原 雄平**
Yasushi ICHIMURA, Yuhei MATSUBARA

*博(工) 日本ミクニヤ株式会社 東京支店 環境部長(〒213-0032 川崎市高津区久地 486)

**工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科(〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

In this study, in order to simulate various phenomena observed in time-space, we created a model considering the interaction between Shortneck clam and phytoplankton using cellular automaton that is known to have high self-organizing ability and studied time-spatial distribution of Shortneck clam in the Sanbanse flats. The basic process of ecosystem in each cell constituted it about Shortneck clam and phytoplankton (chlorophyll a), connection of two kinds of inhabitants. We examined calculation results and comparison of observation value. Furthermore, We let a parameter change about influence to give to distribution of Shortneck clam and calculated a distribution. The expanse of distribution area showed a considerably similar result than comparison of an observation result and a calculation result. We clarified that is was possible to forecast to some degree by giving a constant rule of an increase and the decrease concerning the change of the Shortneck clam by using cellular automata.

Key Word: Cellular Automaton, Distribution, Shortneck clam

1. はじめに

日本の都市の多くは沿岸域に位置ないし隣接しており、都市機能の発達に伴い、沿岸域の開発が求められ、海岸線の様相が大きく変化してきている。その変化は国土保全上、必要に迫られたものであったと言えよう。しかし閉鎖性水域と称される内湾の沿岸域においては、浅場、干潟域が埋め立てられて人工海岸化するとともに、豊かな生物相や優れた浄化機能も同時に失われてきている。さらに、沿岸域への人口の集中は、陸域から海域への流入負荷量の増大を引き起こし、富栄養化に伴う赤潮の発生など水質の悪化や沿岸漁業の衰退をもたらす要因となっている。このような状況の中で、沿岸域を良好な状態に保つため、沿岸域環境管理が見直されるようになり、開発に対する環境の保全・修復・創造などの要求が高まっており、自然と人間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。しかしながら、その概念や予測評価手法の確立には未だに至っていない。

このような中で、沿岸域における人間の開発行為が生態系環境に与える影響を予測評価するために物質循環モデルや生態系モデルが提案されているが、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元に対象生物固有のパラメータを同定する必要がある。しかし、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。

本報は三番瀬におけるアサリの生態を AL 手法の一つであるセルラーオートマトン(以下 CA)によりモデル化を行うものであり、アサリの分布パターンの形成シミュレーションを行うとともに、現地で観測されたアサリの分布の四季変化パターンと比較しその有効性を検討する。さらに環境要因が急変した場合におけるアサリ個体数や平面分布に関する変動について検討し、長期間におけるアサリの動態を評価する可能なモデルとして提案する。

2. 三番瀬の概要

三番瀬は、図-1に示すように東京湾湾奥部の市川市、船橋市および浦安市の地先に位置する広さ約12,000ヘクタールの干潟・浅海域であり、中央を貫流する江戸川放水路と市川航路によって東西に分かれており、中央に江戸川が流入している。この三番瀬周辺の海岸部は埋め立

てが進んでいるが、近隣の葛西沖、三枚洲とともに湾奥部に残された貴重な自然干潟の一つである。三番瀬は元々、河口デルタの形成によって作られた干潟であって、活発な酸素供給により多種多様な生物が存在し、湾奥部最大の生物の現存量を有している。しかし、湾奥に位置するため陸域からの流入負荷の影響を受け、さらに、夏季の海底に発生する貧酸素水塊の影響も受けやすい海域でもある。この貧酸素水塊は、その湧昇による青潮の発生により三番瀬の生物生息に深刻な影響を与えており、全域的な生物のへい死が生じることもある¹⁾。

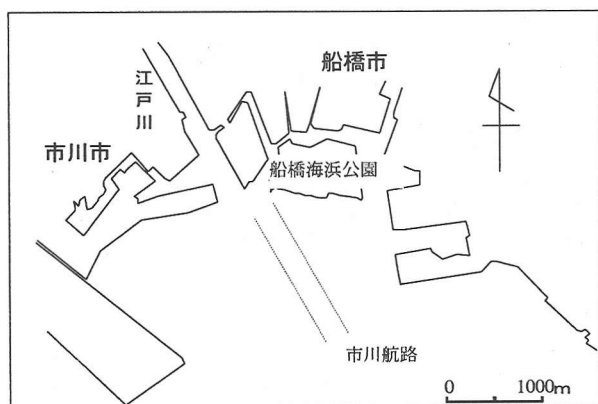


図-1 三番瀬

3. アサリとその生息環境

アサリは、学名を *Ruditapes philippinarum* といい、二枚貝綱マルスダレガイ科に属し、内湾域、河口域の水深 10 m 以浅の砂底、砂泥底に分布する。産卵時期は地域によって異なり、東京湾では 3 月下旬～7 月上旬と 9～11 月上旬の二回である。産卵時の卵の直径は 0.06mm 程度であり、1 個体のアサリから約 100～300 万個の卵を水中に放出し産卵する。卵は翌朝にはふ化して、幼生が泳ぎ出し 2～3 週間で着底する。親の大きさ (3cm ぐらい) にな

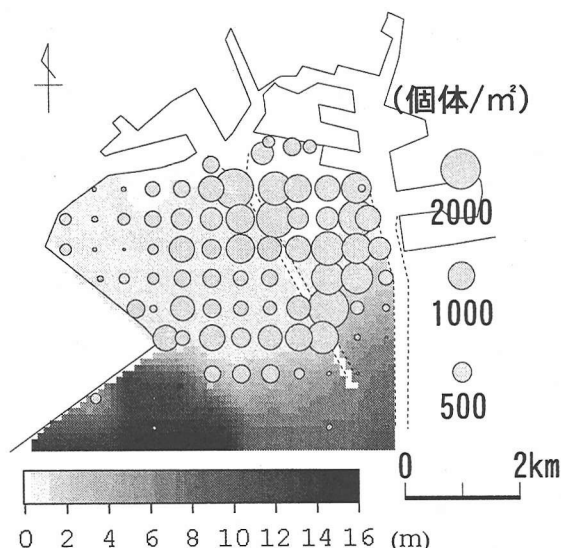


図-2 アサリおよび水深の水平分布

るまで 1 年半から 2 年を要する。アサリ個体数の季節変化は、大規模な青潮の発生した年を除き、夏季から秋季に個体数密度の高い値を示し、冬から春先にかけて低下する明確な周期性を持っている。

なお、図-2 は、千葉県が行った調査結果²⁾ より、三番瀬における平成 6～平成 8 年度の各年度の四季に調査されたアサリの平均個体数密度と水深の分布を示す。これより、アサリの分布は、三番瀬中央部および北東部の水深の浅い場所で個体数密度が高く、北西部および南部で低くなっていることが伺える。また、各年度の平均シルト・粘土分とアサリの分布を図-3 に示す。シルト・粘土分は中央部および北東部で低くなっており、この海域でアサリの分布量も多くなっていることがわかる。これらのことより、水深が浅くシルト・粘土分の少ない中央部および北東部に高い個体数密度を示す分布をもつことがわかる。

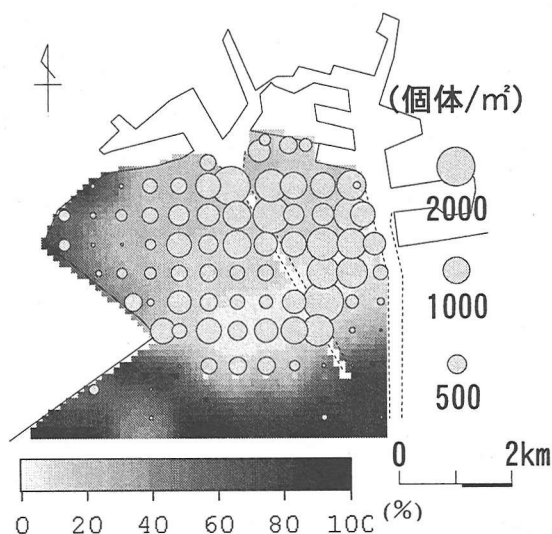


図-3 アサリおよびシルト・粘土分の水平分布

4. セルラーオートマトン

生物個体の分布や生育などの、生体の自己組織化は、外部からの情報によって組織化されるのではなく、自己個体と周辺個体との相互の関わり合い (相互作用) により、組織が自然に形成される。このような相互作用に基づく計算手法として、CA 法がある。CA は 1950 年にノイマンらによって提案され、現在では物理・化学現象、交通、社会・経済現象など様々な分野で適用されるようになってきている³⁾。

CA 法の特徴は、簡単なセル感の相互作用から複雑な現象を再現できることにある。生体系における計算にあたっては、対象領域をいくつかのセルに分割し、そこを生息区域とする区画の中で、周辺セルからの個体の流入、個体間の競合、複数の個体について捕食および被食をルールとして与える。一つのセル内の個体は、それぞれ与えられたルールに従って増加・減少する。すなわち個体

の増減は、そのセルと近傍のセルの状態に依存し、個体数などの状態量の変動ルールは、先行する時間ステップの状態のみに依存する。

自然現象を記述する場合は、微分方程式を数値解法を用い解き、特性を得ることが多い。しかしながら、CAの大きな特徴は微分方程式を代替している点にあり、自然現象を人の手を介さずに再現し特性を得ることにある。

5. モデルの概要⁴⁾

5.1 セルサイズ

1セルを 100m×100mとし、三番瀬海域を 62×54 個のセル群に離散化した。

5.2 セルの状態

本モデルは、アサリ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、捕食者をアサリ、そして被食者を植物プランクトン(クロロフィルa)とし、2種類の生物の関連について構成した。そのモデルの概略を図-4に示す。

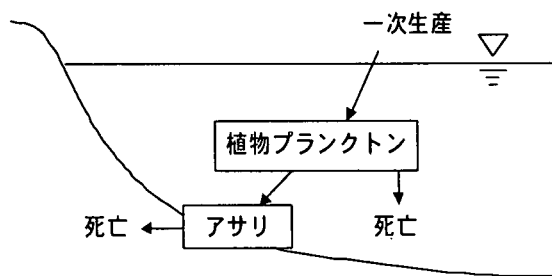


図-4 モデルの概略

5.3 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、アサリによる捕食および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。また、変化量は式(2)で示される。

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

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

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

($12 \sim 241/\text{個体}/\text{day}$),

d_{p2} : 植物プランクトンの死亡係数 ($0.22/\text{day}$)

である。また、植物プランクトンの増殖度係数は、日によって異なるような関数形で与えている。

5.4 アサリの状態量

アサリの変動は、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)におけるアサリの状態量は、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 個産卵するとすると式(4)のようになる。

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

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 : アサリの拡散係数 (m^2/day) で、

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

x : セルサイズ (100m),

Δt : タイムステップ (10 day),

である。ただし、幼生の拡散は、産卵直後の1ステップとする。また、ここでは、成貝の拡散はないものと定義している。

本モデルでは、自セルと周辺セルを合わせた9個のセルを用いたムーア近傍を採用し、対象のセルへ、幼生が浮遊し拡散することで近傍則を定義している。ここでは、図-5に示すように、産卵した幼生は、森下ら⁵⁾を参考に、次の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留するムーア近傍をとるものとし、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および残留するものとした。ここで用いた近傍則は周囲との相互作用を考慮していないの

で、ランダムウォークモデルとほぼ同様なモデルになるものと思われる。

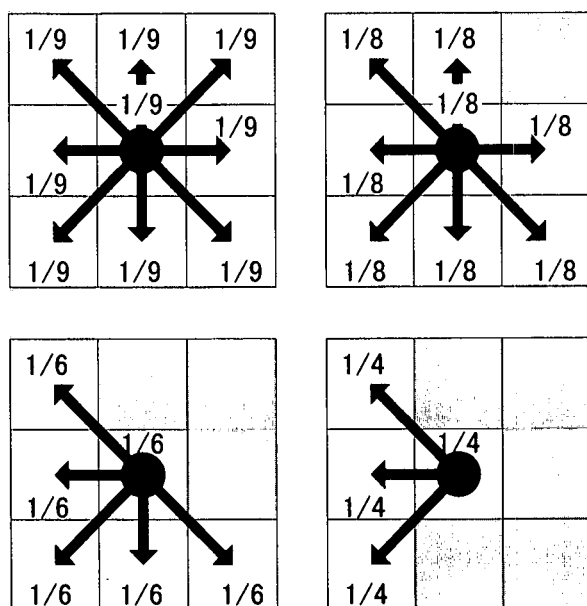


図-5 局所ルール

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（0.5~0.84/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、その後着底した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、前述の千葉県の実験結果のアサリの生息範囲より、環境要因の傾き係数は、アサリの個体数の生息範囲より、環境要因の閾値は生息限界より、それぞれ求めた。また、環境要因は、アサリの生息条件をまとめた指針⁶⁾を参考に、水深およびシルト・粘土を抽出し、モデルに組み込んだ。

アサリ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（2000 個体/m²）,

c_{com} : 競合による死亡係数（0.2/day）,

である。

よって、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、各係数はアサリの生態をまとめた増殖場指針⁷⁾を参考に設定している。

以上の処理をシミュレーション最終年まで繰り返し、アサリの個体数およびクロロフィル a 量を算出する。ここで、以上の流れをまとめると図-6 のようになる。

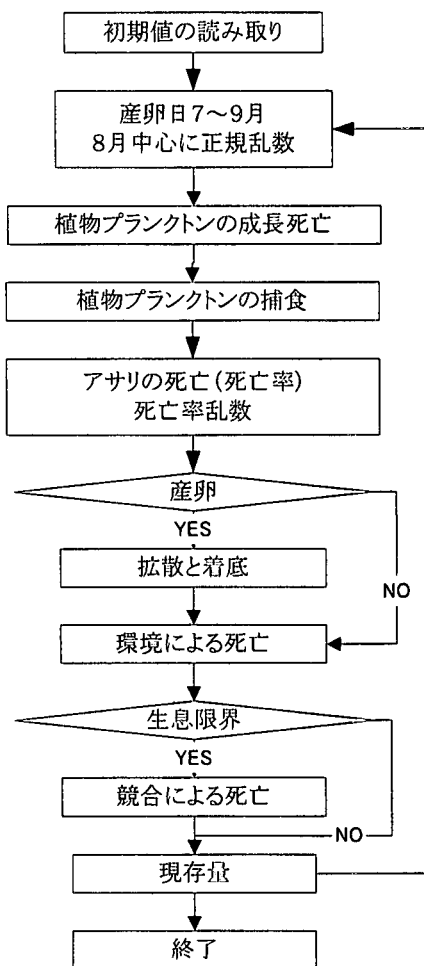


図-6 計算概要

6. 結果と考察

6.1 水平分布

図-7は、アサリの2、5、8、11月における水平分布を示す。アサリの個体数は、三番瀬中央域に生息範囲をもつ結果となった。図-2および3に示す観測結果と同様な結果を示しているが、計算結果は、船橋海浜公園前面でのアサリの出現や、西部海域における出現結果を再現するには至らなかった。また、観測結果では、三番瀬

中央海域において、航路沿に高い個体数の分布域を示すが、計算結果では中央海域全般に高い個体数を示した。中央海域における環境要因は全域に同様な傾向を示し、そのため個体数の変化に影響を及ぼす要因に至らなかったためと考えられる。また、観測結果には、漁獲などによる影響含まれており、計算結果に漁獲などの影響も考

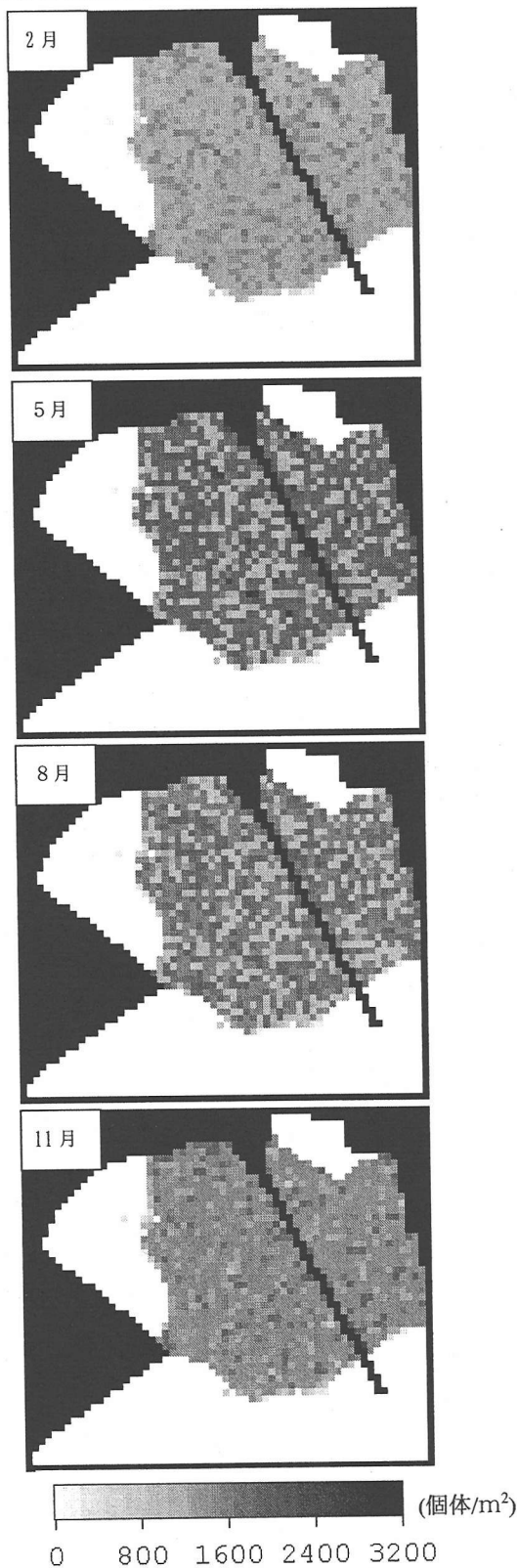


図-7 アサリの水平分布の計算結果

慮にいれているが、水域内での違いは考慮していない影響もその要因としてあるものと考えられる。

水平分布の計算結果と観測結果を比較するために、計算結果と観測値の相関をみる指標としてクラマ-の連関係数（Y）を求め検討を行った。Yは、計算結果と観測値の個体数の出現頻度による相関をみるために用いる。この値が高いと計算結果と観測値の出現頻度は、異なっている割合が高いことを示す。

$$Cr = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(l-1)}} \quad (11)$$

ここに、

Cr：クラマ-の連関係数

χ^2 ：関連表のカイ二乗値

l：2つの属性のカテゴリー（ランク）数のうち小さい方の値

である。

連関係数を求める手順は、次のとおりである。①図-2に示した四季平均個体数を7階級のランクに分ける。②計算結果より四季平均を求める。③計算結果についてランク分けを行う。④先の①および③の結果より連関係数を求める。

四季平均の観測結果と2、5、8、1月の四季平均の計算結果は、Y=0.58の値を示す。やや連関は、よわいものの、相関が弱いと言えず分布形態とあわせて考えると比較的よく分布を再現できているものと思われる。

6.2 経日変化

図-8は、三番瀬中央北部におけるセルの計算開始から20年間のアサリとクロロフィルaの経日変化を示したものである。アサリは、産卵日直後に個体数の年間最大値を示し、その後産卵直前まで減少する周年変動を示している。アサリは1個体あたり、100～300万個の卵を水中に放出し、その後他の生物からの捕食、アサリ自身の死滅や漁獲などにより減少する。したがって、個体数としては、産卵直後が年間を通して最大個体数を示すと考えられる。また、その個体数は餌となる植物プランクトン

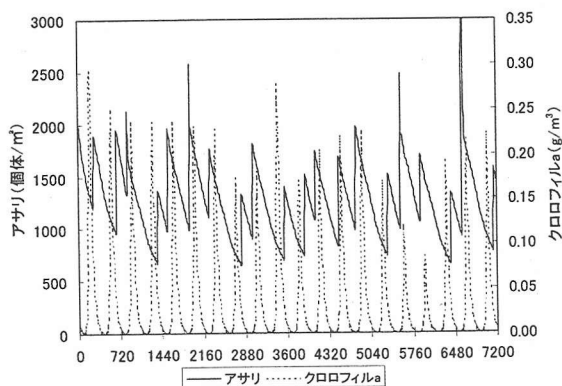


図-8 アサリおよびクロロフィルaの経日変化

ン（クロロフィル a）の量に左右され、アサリの年間最大個体数の変化は、年によって大きく異なっていることが伺える。一方、クロロフィル a の変動は、アサリの現存量とは、密接な関係は認められず、年によって年間最大個体数は大きく異なっている。これは、クロロフィル a は、アサリに捕食されアサリの現存量に左右されるものの、その影響より年変動する水温に依存する増殖量に大きく左右されるためと考えられる。

図-9 は、流動に大きく関係する拡散係数を図-8 に示すケースの 10 分の 1 にし、他の係数は同一とし計算を行った結果を示す。アサリは、産卵後の幼生の自セルからの拡散が少なく、最大で 5 万個体/m² 弱の値を示す。一方、クロロフィル a は、アサリの個体数の増加による捕食により図-8 のケースより現存量が小さくなっている。

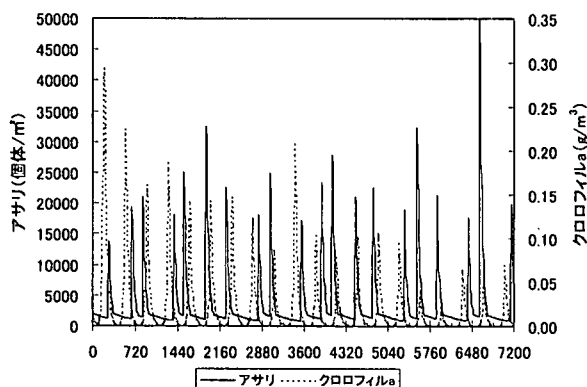


図-9 アサリおよびクロロフィル a の経日変化
(拡散係数を図-8 の 10 分の 1 に変更)

6.3 環境要因の変動

図-10 は、シルト・粘土分を年 2 % 増加するものとして計算を行った結果である。他の係数は、図-8 に示すケースと同じとしている。シルト・粘土分の増加による影響は、計算開始約 10 年目から顕著に表れ、その後影響

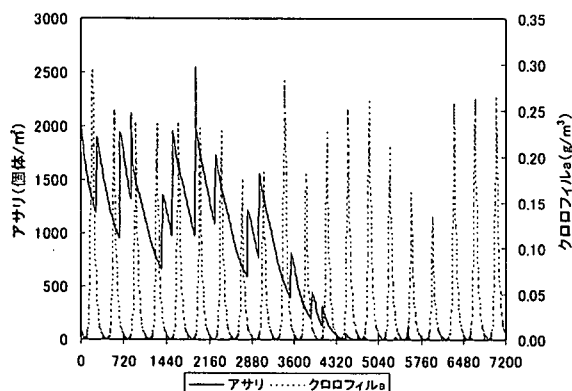


図-10 アサリおよびクロロフィル a の経日変化
(シルト・粘土分を年 2 % 増加)

を強く受け減少し、絶滅にいたる結果となった。このことより、環境要因によっては、その変動による影響は、アサリへ変動後直ちに現れるのではなく、環境要因が生存に影響を及ぼすある閾値までは、現れてこないものと考えられる。

7. おわりに

本報は三番瀬におけるアサリの生態を CA によりモデル化し、アサリの分布パターンの形成シミュレーションを行い、現地で観測されたアサリの分布の四季変化パターンと比較しその有効性を検討した。さらに環境要因が変動した場合におけるアサリの個体数や分布に関して考察し、長期間におけるアサリの動態を評価する可能なモデルとして提案を行った。

- (1) 分布パターンの形成は、観測結果と計算結果の比較より、比較的類似した結果を示した。
- (2) 環境要因が変動した場合は、アサリの個体数の変動に影響を及ぼすことがわかった。環境要因によっては、アサリの個体数への変動影響は、変動が始まった直後でなく数年後に大きくその影響が現れることがわかった。
- (3) 今後の課題として、生物の生理・生態をもとに相互作用を取り入れたルール化を行いモデル化するだけでなく、さらには環境要因についてもルール化を行い長期予測モデルとして開発する予定である。

参考文献

- 1) 沼田眞, 風呂田利夫編: 東京湾の生物誌, 築地書館, 411p, 1997.
- 2) 千葉県土木部・千葉県企業庁 (1998): 市川二期地区・京葉港二期地区計画に係る環境の現況について (要約版), 千葉県環境財団, 1998.
- 3) 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋共著: セルオートマトン法-複雑系の自己組織化と超並列処理-, 森北出版, 1998.
- 4) 市村康, 松原雄平, 中村幹雄: 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, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp.387-391, 土木学会, 2001.6.
- 5) 森下信, 長谷川純一, 中野孝昭, 築山洋: セルオートマトン法による拡散現象の解析, 日本造船学会論文集, 第 183 号, pp.181-187, 1998.
- 6) 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会: 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針, 全国沿岸漁業振興開発協会, 1993.
- 7) 増殖場造成計画指針編集委員会: 増殖場造成計画指針-ヒラメ・アサリ編-, 全国沿岸漁業振興開発協会, 1997.