

セルオートマトン法による三番瀬における アサリの分布域形成の解析

市 村 康*・松 原 雄 平**

1. はじめに

我が国の閉鎖的な内湾域は、陸上および海上交通の接点の場として発達してきた。このため沿岸域は、社会・経済活動の場として開発され積極的に利用されてきた。しかしながら、一方では、水域への有機物の負荷により、富栄養化などの諸問題が環境問題として顕在化するようになり、沿岸域における環境が見直されるようになってきた。このような、いずれの環境問題も、人間と自然が調和することが必要であり、調和するための定量的な予測あるいは評価が重要である。しかしながら、そのための概念や手法の確立には未だに至っていない。

このような中で、沿岸域で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、生物の生理生態と環境要因に関する知見は未だ十分でなく、多くの仮定とパラメータを設けて生態行動をモデル化している。このため、実験や現地調査によって対象生物の生理・生態を明らかにすることが必要である。しかし、対象生物の生理・生態が明らかにされることは稀であり、多くの係数を設定しモデル化を行っている。したがって、モデル化するためには、多くの係数を設定する必要があるが、その設定根拠が乏しく、実用的な生態系予測モデルの確立には至らない場合が多い。このような問題に対して、生体的な動的システムや創発の概念を工学的なアルゴリズムに置き換えた人工生命手法を生物行動の解析に適用する例が注目されている。

これまで、著者らも、その一手法であるセルオートマトン手法（以下 CA と表示）による予測モデルを提案し（市村ら, 1999, 2000）、二枚貝の個体数変動および分布形成におけるモデルの有効性を示してきた。本報は三番瀬におけるアサリの生態を CA によりモデル化するものであり、これまでの CA モデルに改良を加え、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経年変化についても考察し、長期間におけるアサリの動態を評価しうる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いる。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、三枚洲とともに東京湾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たり、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、その湧昇による背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（沼田・風呂田, 1997）。

3. アサリとその生息環境

アサリは、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

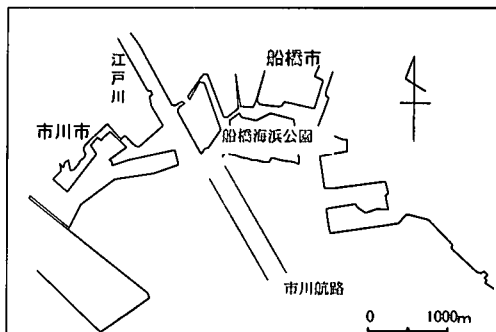


図-1 三番瀬の概要

* 正会員 工博 日本ミクニヤ株式会社 東京支店

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

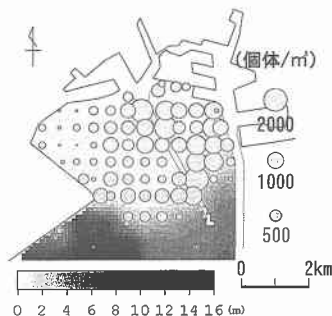


図-2 アサリおよび水深の水平分布

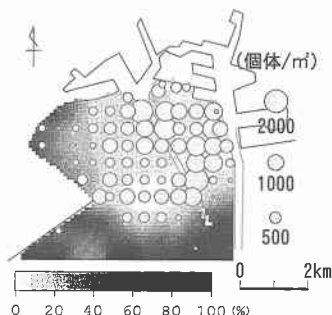


図-3 アサリおよびシルト・粘土分の水平分布

0.06 mm 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 週間まで着底する。親の大きさ(3 cm ぐらい)になるまで 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、夏季から秋季に高い個体数密度を示し、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(千葉県土木部・千葉県企業庁, 1998) 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がわかる。

4. セルオートマトン

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(加藤ら, 1998)。

CA 法の特徴は、簡単なセル間の相互作用から複雑な現象を再現できることにある。生態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

(1) モデル開発の考え方

a) セルサイズ

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

b) 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。

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、アサリによる捕食、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。

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

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

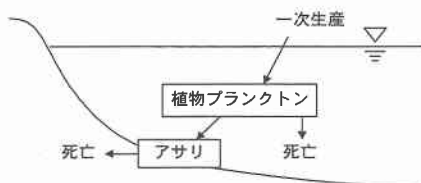


図-4 モデルの概要

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 ($\text{m}^2/\text{個体}/\text{day}$),

$p_{\max}$: 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 ($12 \sim 24 \text{ L}/\text{個体}/\text{day}$),

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、年によって異なるような関数形で与えている。

d) 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。

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

ここに、 $\Delta c_{i,j}(t)$ は、産卵 (c_1)、幼生の拡散と着底 (c_2)、自然死亡 (+ 漁獲) (c_3)、環境による死亡 (c_4) および競合による死亡 (c_5) 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。

$$c_{1,i,j}(t) = c_{i,j}(t) \cdot 0.5 \cdot 10^6 \dots\dots\dots (4)$$

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、

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

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、

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

x : セルサイズ (100 m),

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。したがって、ここでは、成貝の拡散はないものと定義している。

自然死亡 (+ 漁獲) は、

$$c_{3,i,j}(t) = -c_{i,j}(t) \cdot d_c \dots\dots\dots (7)$$

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うけると定義する。

$$c_{4,i,j}(t) = c_{2,i,j}(t) \left(\frac{1}{1 + \exp(\alpha_{en}(en_{i,j} - \theta_{en}))} \right) \dots\dots (8)$$

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 (1998) のアサリの生息範囲調査より、環境要因の傾き係数は、アサリの個体数の上位 9 地点における生息範囲より、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参考 (沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会, 1993) 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、

$$\text{if } c_{i,j}(t) > c_{\max} \text{ then } c_{5,i,j}(t) = -c_{i,j}(t) \cdot c_{\text{com}} \dots\dots\dots (9)$$

$c_{\max}$: 生息限界値 ($2000 \text{ 個体}/\text{m}^2$),

c_{com} : 競合による死亡係数 ($0.2/\text{day}$),

である。

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

$$\Delta c_{i,j} = c_{1,i,j}(t) + c_{2,i,j}(t) + c_{3,i,j}(t) + c_{4,i,j} + c_{5,i,j}(t) \dots\dots\dots (10)$$

となる。

なお、各係数はアサリの生態を参考 (増殖場造成計画指針編集委員会, 1997) 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。

6. 結果と考察

(1) 水平分布

図-5 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。これは、中央海域における環境要因が同様な傾向を示し、そのため個体数の変化に影響を及ぼさ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も含まれており、計算結果に漁獲などの影響も考慮にいれているが、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

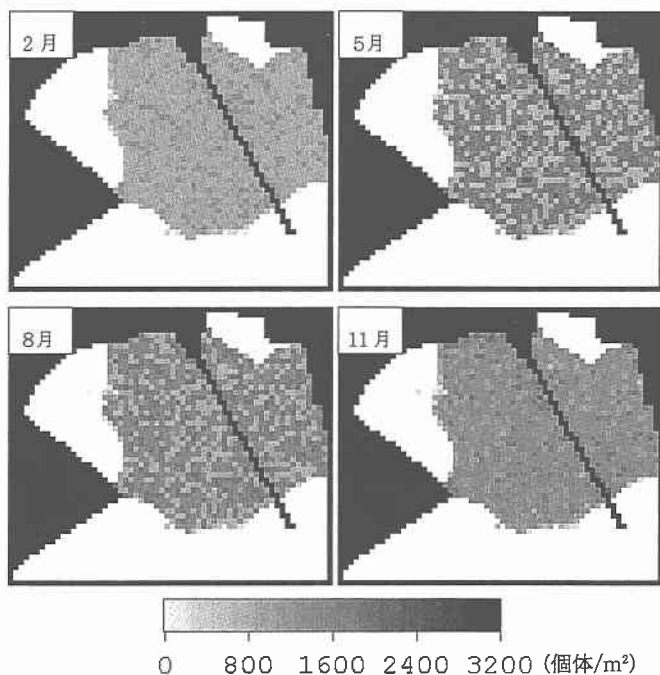


図-5 アサリの水平分布

算結果と観測値の相関をみる指標としてクラーの連関係数(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。四季平均の観測結果と2, 5, 8, 11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、よわいものの分布形態とあわせて考えると比較的よく分布が再現できているものと思われる。

(2) 経日変化

図-6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。ただし、個体の重量は成長に伴って増加するため、個体数の変動とは異なった変動を示すと考え、漁獲量とは異なっているものと思われる。図によると、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、

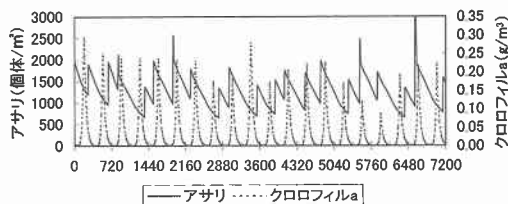


図-6 アサリおよびクロロフィルaの経日変化

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-7は、流動場に大きく関係する拡散係数を図-5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/ m^2 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-5のケースより現存量が小さくなっている。このことより、流動場は、アサリの現存量に大きく影響を及ぼしているものと考えられる。したがって、モデルの中に拡散だけではなく、移流の効果も取り入れる必要があると考えられる。

(3) 環境要因の変動

図-8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-5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

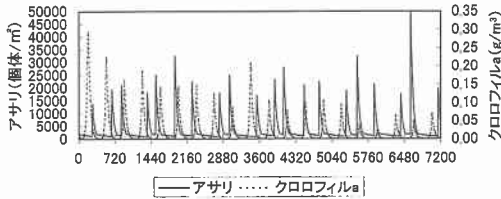


図-7 アサリおよびクロロフィルaの経日変化
(拡散係数を図-6のケースの10分の1に変更)

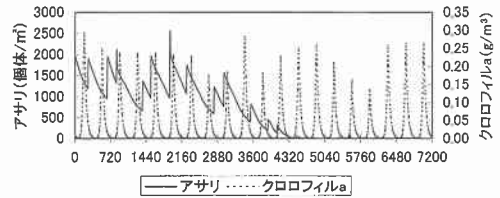


図-8 アサリおよびクロロフィルaの経日変化
(シルト・粘土分を年2%増加)

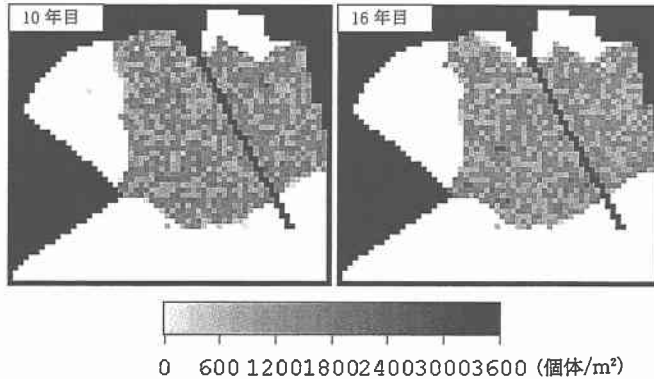


図-9 アサリの水平分布 (計算開始10年目および16年目)

は、計算開始10年目から顕著に表れ、その後減少し絶滅にいたる結果となった。このことより、環境要因が大きく変動しない要因については、その変動によるアサリへの影響は、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閾値までは、現れてこないものと考えられる。したがって、水質など大きく変動する要因についての予測より、変動が小さい要因と大きく関与する場合、その予測には、対象生物の生理・生態について、実験や調査などにより、関係について詳細に調べる必要性がある。

図-9は、上記ケースにて計算を行った10、16年目の5月の水平分布である。シルト・粘土分が増加することによって、アサリの生息範囲が減少しており、中央北部でその影響が大きく現れていることが伺える。これらの結果より、多くの生物において、生息環境の悪化に伴い、生息域および個体数が減少することを説明できる。

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。さらに環境要因が急変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) 観測結果と計算結果の比較より、分布域の広がりはかなり類似した結果を示した。

(2) 環境要因が変動した場合における、アサリの個体数の変動影響は、変動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・生態をもとにルール化を行いモデル化するだけではなく、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ことが必要である。

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.
- 市村 康・松原雄平・中村幹雄・木村 晃 (2000): 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.
- 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会 (1993): 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, 411 p.
- 加藤恭義・光成友孝・築山洋共著 (1998): セルオートマトン法一複雑系の自己組織化と超並列処理一, 森北出版, 211 p.
- 増殖場造成計画指針編集委員会 (1997): 増殖場造成計画指針一ヒラメ・アサリ編一, 全国沿岸漁業振興開発協会, 316 p.
- 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, 336 p.
- 沼田 眞・風呂田利夫編 (1997): 東京湾の生物誌, 築地書館, 411 p.