

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

PREDICTION OF BENTHIC ANIMAL BY CELL AUTOMATON

市村 康¹・松原雄平²・野田英明³

Yasushi ICHIMURA, Yuhei MATSUBARA, Hideaki NODA

¹正会員 理修 日本クニヤ株式会社 東京事業部 (〒213-0032 神奈川県川崎市高津区久地 486)

²正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-0945 鳥取県鳥取市湖山南 4-101)

³正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-0945 鳥取県鳥取市湖山南 4-101)

In this paper the forecast evaluation technique for the increase and decrease of the short-necked clam 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 benthic animal. 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 short-necked clam by using the cell automaton.

Key Word : mitigation, cell automaton, simulation, short-necked clam

1. はじめに

日本列島の閉鎖的な内湾では社会的・経済的な要請のもとで、大規模な開発行為が継続的に行われてきており、多くの浅海域が埋立てられ、干潟や浅瀬など海生生物が豊富で多様性に富んでいる重要な生物の生息域が消滅しつつある。同時に沿岸域への人口集中によって、海域への流入負荷量が飛躍的に増大し、富栄養化に伴う生態系の変化をもたらしている。特に東京湾に代表されるような沿岸域では、社会経済的な要請のもとで、大規模な開発が継続的に行われ、多くの干潟や浅海域が埋立てなどにより消滅してきた。現在では、東京湾湾中央において残された干潟や浅海域は、富津および盤洲にあり、湾奥においては、三番瀬と三枚洲のみとなっている。

近年、このような沿岸域の環境を良好な状態に保とうとする、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て、環境保全、修復および創造について多方面で議論されており、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⁾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、関連する環境因子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、湾奥部に残る干潟・浅海域の三番瀬の調査は風呂田²⁾や千葉県³⁾などにより詳しく行われており、水質、底質、および生物について多くの知見を得ている。また、三番瀬は湾奥部に残る唯一のアサリの漁場でもある。この水域の、アサリの現存量は、年ごとあるいは季節ごとに大きく変動している。三番瀬内のアサリの空間分布は大きな差があるが明確ではない。

そこで、本研究は、湾域の底生動物(アサリ)を対象として、環境条件の変化による底生動物の増加・減少の予測評価を、人工生命手法のひとつであるセルオートマトンを用いて考察し、同手法の適応性について検討するものである。

2. 三番瀬における底生動物の概要

三番瀬は、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、中央の市川航路によって東西に分かれている。この、三番瀬は、東京湾の湾奥部に位置し、周辺の海岸部は埋立が進み、近隣には葛西沖、三枚洲のみが残っている。干潟や浅場は、活発な酸素供給により多種多様な生物が存在しており、三番瀬は、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やすく、また、夏期の海底に発生する貧酸素水塊の影響を受けやすい海域でもある。貧酸素水塊は、三番瀬の生物生息に深刻な影響を与えており、青潮による貧酸素水塊の湧昇によって生物のへい死が生じることもある。

図-1は、三番瀬における平成6～平成8年度四季のアサリの平均個体数密度と計算領域を示す。三番瀬中央部および北東部が個体数密度が高く、北西部および南部が個体数密度が低くなっている。底質は、北西部および南部に、粒径の小さいシルト・粘土分が多く、水深は、南側で10m以上と深くなっている。これらの要因がアサリの生息密度に大きく影響を及ぼしていると考えられる。アサリの季節変化は、大規模な青潮の発生した年度を除き、夏季から秋季に個体数密度の高い値を示している。なお、クロロフィルa濃度は、干潟・浅海域の南部が約10.0mg/lと高く、北部が約5.0mg/lと低い値となっている。クロロフィルaの季節変化は、夏季および秋季に高い値を示している。

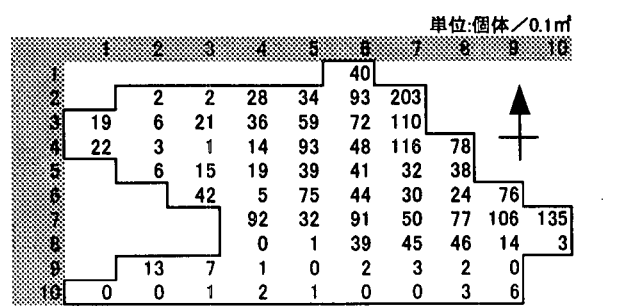


図-1 アサリの個体数と計算領域

3. セルオートマトン

(1)モデルの概要

セルオートマトンとは、対象動物の生息する領域を多数のセル(区画)に分割し環境変動に伴う捕食生物・餌生物の消長をセル内の動物数で追跡するものである。以下にセルオートマトンの特徴を挙げる⁴⁾。

- 空間的なセルの離散的格子からなる。

- 各セルの値はある離散的タイムステップのシーケンスによって更新される。
- すべてのセルは同じ状態遷移則に従い、規則正しく並べられている。
- 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。
- 各セルの状態は決定論的な規則に基づいて更新される。
- 各セルに適応される規則はその近傍セルの状態にのみ依存する。
- 値あるいは状態更新のための規則は、先行する時間ステップの状態にのみ依存する。

(2)モデルの構築

モデルは、簡略化するために、捕食生物をアサリ、餌生物を植物プランクトン(クロロフィルa)とし、2種類の生物間の関連についてモデルを考えた。生息海域を矩形格子(セル)で分割し、各セルに現地調査データを基にアサリの個体数密度およびクロロフィルaの濃度を数量に応じてそれぞれランク分けを行い初期データとして配置した。また、流入河川の影響はないものとし、計算は三番瀬中央にある市川航路西側の海域についてのみ行った。

生態系の物質循環過程は、植物プランクトンの増殖・死亡、

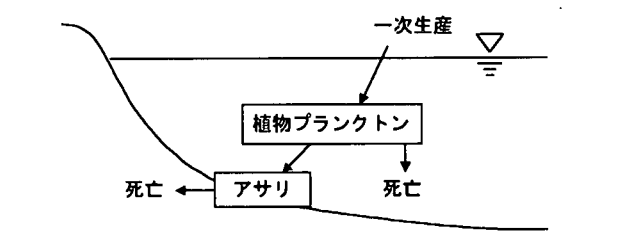


図-2 モデルの概略

アサリによる植物プランクトンの捕食・増殖・死亡を考慮した。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、物質循環過程およびアサリの生息環境条件を考慮し決めた。表-1には、アサリの生息環境条件を示す⁵⁾。

モデルにおいては、餌としてのクロロフィルaは定常的に存在するが、アサリは餌が十分にあって、近くに仲間が適当な数だけいるときにのみ増えるとした。また、仲間が多すぎてもストレスがたまったりして増えないとした。

表-1 アサリの生息環境条件

生殖期	標準サイズ	標準期間	卵の性状と成育段階別主要餌料	生息環境条件				
				水深(m)	水温(℃)	塩分(‰)	水質	底質
本州中部 4～6月 9～11月	殻長 35～50mm	2～6年	珪藻、デトリタス	0～6/	0～28/ ～32.5	20.7～37.6/	酸素量 (ml/l) 1/	粒径(mm) 0.125～1.0/ 泥分(%) 80～/30～

生息域の基準値または実験上の適正值/生息域の限界値または実験上の限界値

表-2 アサリおよび植物プランクトンの増減ルール

- 1) 考えているセル内で
 p = 餌 (クロロフィル a) の数, s = アサリの数とする。
- 2) 考えているセルを中心とする 9 個のセル内で
 s_9 = アサリの数
- 3) セル内の個体数の範囲
 $0 \leq p \leq 10, 0 \leq s \leq 5$
- 4) 餌 (クロロフィル a) の変化 (Δp)
 5月と9月: $\Delta p = 3 - s$, 6月~8月
 $\Delta p = 4 - s$, 他の月: $\Delta p = 2 - s$
- 5) アサリの変化 (Δs)
 - ① 季節による変化
 12~2月: $\Delta s = -1$, 7~8月,
 他の月下記②および③に従う
 - ② 競合による変化
 $s_9 < 6, s_9 < 36, p \leq s: \Delta s = -1$
 $6 \leq s_9 \leq 21: \Delta s = 2,$
 $21 < s_9 < 36: (41 - s_9)/20$ の確立で $\Delta s = 0,$
 $(s_9 - 21)/20$ の確立で $\Delta s = 1$
 $\Delta s = 0 \quad 1/20, 2/20, \dots, 14/20, 15/20$
 $\Delta s = 1 \quad 19/20, 18/20, \dots, 6/20, 5/20$
 - ③ 水深による変化
 $h \geq 5: 1/h$ の確立で $\Delta a = 1, (h-1)/h$ の確立で $\Delta s = 0$
- 6) その他
 アサリのランク分け
 $10 \text{ 個体数}/m^2 > 1 \quad 50 > 2 \quad 100 > 3 \quad 150 > 4 \quad 150 \leq 5$
 クロロフィル a ランク分け
 $4mg/l > 1 \quad 6 > 2 \quad \dots \quad 18 > 8 \quad 20 > 9 \quad 20 \leq 10$

計算に用いたアサリおよび植物プランクトンの増減のルールを表-2に示す。なお、計算は1ヶ月をタイムステップとし、アサリ数およびクロロフィルa数の算出を行った。

なお、このモデルで表現している、アサリの数やクロロフィルaの数は実際の量を表しているのではなく、数十~数百を単位としている。したがって、セル内での生物数は、実際の領域内での大まかな平均数を意味している。

(3) 底生動物の計算結果

a) 経月変化

計算を行った結果を図-3(a)~(d)に示す。なお、計算出力は春の3月から始めている。

図-3(a)は、表-2に示すパラメータを用い計算を行った結果である。クロロフィルaの最大値が先に現れ、アサリの最大値が遅れて出現する周期的な変動を示しており、その遅れは、1~2ヶ月程度である。また、アサリおよびクロロフィルaの最大値は、秋季に出現しており、比較的三番瀬の現状を再現している。

アサリ等の二枚貝のへい死や資源の減少、活力低下または活動低下等と関連する要因は、柿野ら⁶⁾によって①低水温または高水温、②塩分の低下、③溶存酸素量の低下、④餌

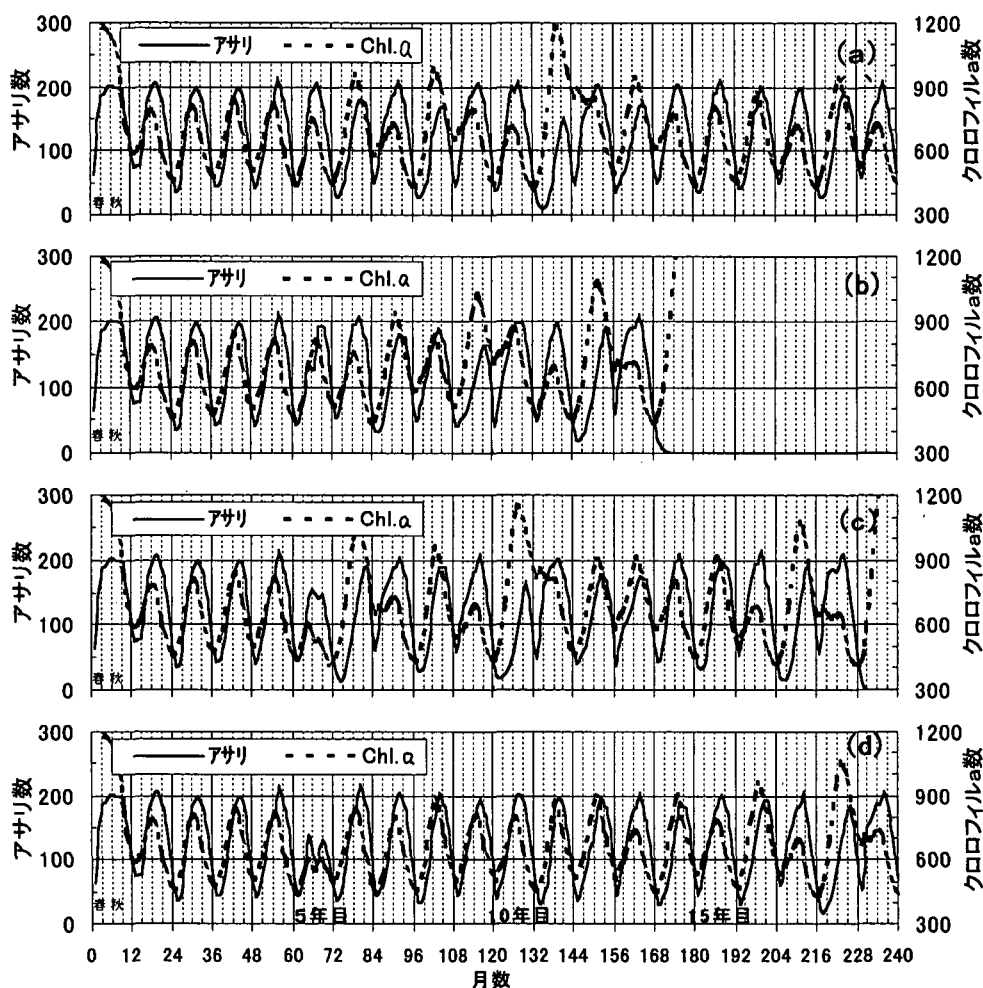


図-3 計算結果 (a)無条件 (b)5年後アサリの減耗 (c)5年後プランクトンの減耗 (d)5年後アサリ・プランクトン減耗

料量の低下、⑤泥分の堆積などを含め16項目が挙げられている。そこで、①夏季における低水温、高水温および青潮による貧酸素水塊など比較的短期的変動の外的インパクトの影響による、アサリの繁殖抑制による減耗、②夏季における低水温などによる植物プランクトンのへい死をそれぞれ仮定し捕食生物および餌生物の減少ルールを計算開始5年目の夏季に与え計算を行いその影響について感度解析によって検討した。

アサリに減耗を与えた場合の経月変化を図-3(b)に示す。アサリは、減耗を与えた5年目の秋季に極小値がみられ、アサリおよびクロロフィルaともに変動しながら推移するが、インパクト後9年目にアサリは死滅する。なお、クロロフィルaの減耗を与えた場合の経月を図-3(c)に示す。クロロフィルaは、同様に減耗を与えた5年目の秋季に極小値を示すとともにアサリも夏季に極小値を示し、インパクト後14年目のアサリの死滅により、増大する結果となった。インパクトを与えた影響は、インパクト後にも続くが、大きな影響は数年後に現れる結果となった。そこで、アサリおよびクロロフィルa共に減耗を与えた場合の経月変化を図-3(d)に示す。減耗を与えた5年目の秋に極小値がみられるが、その後周期的に変動し死滅に至ることはなかった。

このことから、捕食生物および餌生物の共存は、いずれか一方の種の個体数の変動でも不安定となり得るものと考えられる。また、その影響は、インパクトを受けた数世代後に大きく現れるものと考えられる。このことは、湾内の岩礁帯における安定した生物群集において、特定の種を人為的に排除した場合、安定状態が崩れ、優占種が現われ、単純な生

態系へと変化を示す実験にも示されている⁷⁾。しかしながら、実際の水域では、特定の種だけがインパクトを受けることは、まれであるとともに、数種類の生物が捕食生物、餌生物の関係にあり、種の死滅に至ることは少ないと思われる。

b) 水平分布

外的要因の変化によるインパクトを与えない場合のアサリの水平分布を図-4に、外的要因によりアサリが減耗した場合の水平分布を図-5にそれぞれ示す。冬季は2月、春季は5月、夏季は8月、秋季は11月の計算結果をもって示している。

図-4における計算開始5年後の分布においては、春季に分布がまばらとなり、夏季および秋季に密となるような分布がみられた。また、アサリに減耗を与えた場合(図-5)とアサリに減耗を与えない場合の分布は、減耗を与えた場合の夏季の分布は粗となったが、秋季の分布は逆に密となっていた。また、セル内においては、現存量が見られない場所もあるが、秋季までの増殖により分布域を拡大し、その後の減少に伴って分布域を縮小することが伺える。領域内北西部において、比較的現存量が多く、三番瀬における北西部の少ない現存量とは異なっており、現存量を忠実に再現できているとは言えない。これは、領域内北西部の底質の条件が計算に反映されていないためと考えられる。

計算結果では、セル内にアサリが出現しないケースがみられるが、実際の水域では複雑な生態系を形成しており、極端な生物量の増減は抑制されているものと思われる。

以上モデル化によって生物の変動現象を明らかにするためには、2種類の捕食生物や餌生物の捕食やへい死の関

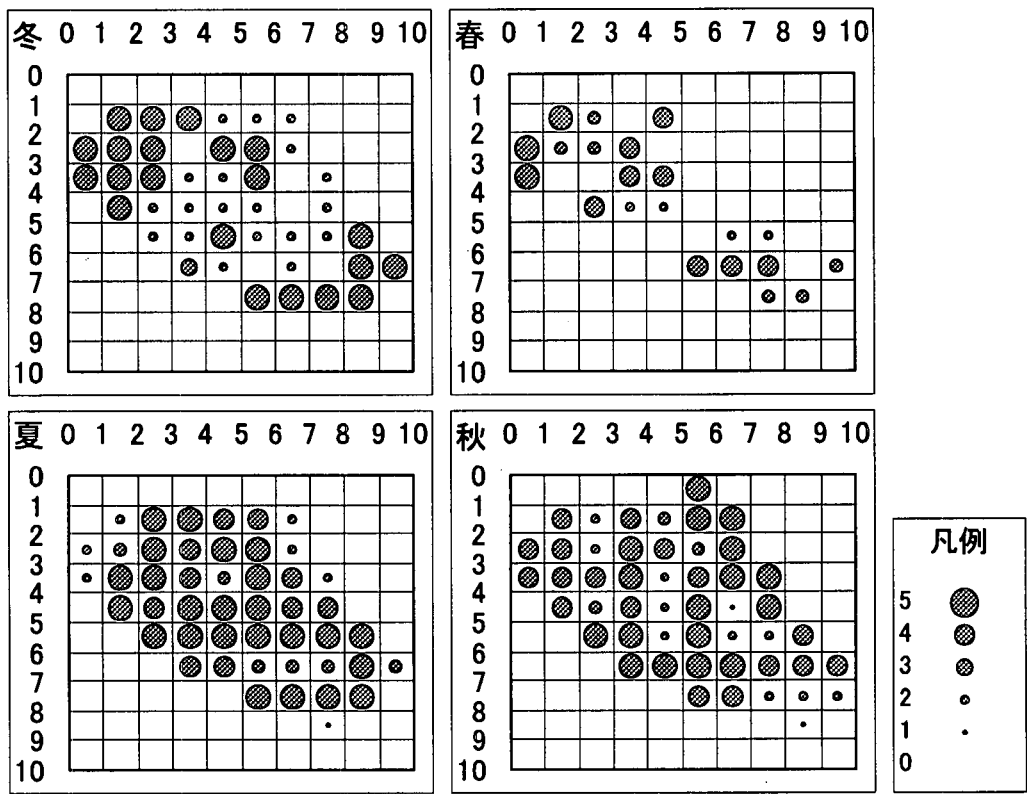


図-4 アサリの水平分布

連だけではなく、栄養塩の変化や数種類の生物の捕食やへい死、さらには、捕食行動に対する消化、探索、追跡、摂餌の諸過程を組み込む必要があると考えられる。その上で、アサリなどの底生生物の生息範囲がどのような環境要因によって決まるかをみきわめ、その上で生物の生息域の拡大・減少を解明する手法が必要であると思われる。

4. おわりに

本研究では、環境の変化による底生動物数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、三番瀬におけるアサリの現存量および水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、底生動物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、競合関係にある個体間の増減あるいは捕食、被捕食の関係にある個体間の消長の増減等を再現することに有効であることや、感度解析により環境因子の変化による底生動物の増殖を予測できることが確認できた。また、気象等のインパクトおよび繁殖抑制を同時に与えることによって個体数が急激に変化することが確認できた。また、システムにより多くの環境因子、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り、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。

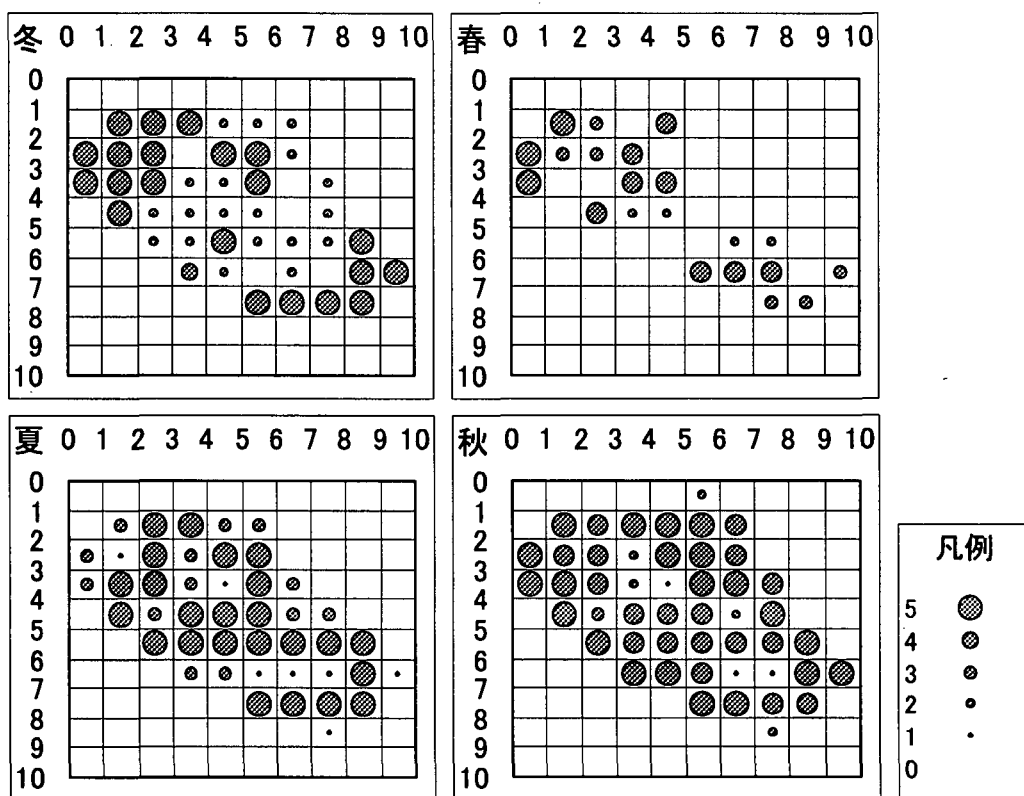


図-5 5年後にアサリの減耗を与えた場合の水平分布

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) 沼田眞, 風呂田利佩: 東京湾の生物誌, 築地書館, 1997.
- 3) 千葉県土木部・千葉県企業庁: 環境の補足調査によって把握した「市川二期地区・京葉港二期地区計画に係る県境の現況について」(要約版), 平成10年9月, 1998.
- 4) 上田完次, 下原勝憲, 伊庭斉志: 人工生命の方法—そのパラダイムと研究最前線—, 工業調査会, 1995.
- 5) 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針編集委員会: 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針 昭和59年度版, 社団法人全国沿岸漁業振興開発協会, pp.293-348, 1985.
- 6) 柿野純, 鳥羽光晴, 兼子昭夫, 深山義文: 東京湾木更津地先における冬季のアサリへい死の特徴, 千葉水研報, No.50, pp.21-30, 1992.
- 7) 木本新作・竹田博清: 群集生態学入門, 共立出版, 1992 (1999.4.19 受付)