

## ニューラルネットワークによる植物プランクトン現存量変動の予測

横田源弘<sup>†</sup>, 平 雄一郎, 森元映治

### Prediction of Standing Stock Variation for Phytoplankton using Neural Networks

Motohiro Yokota<sup>†</sup>, Yuichiro Taira and Eiji Morimoto

**Abstract** : This study develops a prediction method for a phytoplankton standing stock (chlorophyll-a and diatomaceous cell number) in a fish farm using data obtained from experiments for bottom sediment improvement (environmental monitoring research) in the Katada Culture Farm in Ago Bay, Mie prefecture. Results show that the fluctuation of a phytoplankton standing stock from the surface layer (a depth of 0.5 m) to the bottom layer (a depth of 0.5 m on the bottom face) can be estimated using a neural network whose inputs are water depth, water temperature, salinity, dissolved oxygen, pH, chemical oxygen demand, hours of sunshine, and respective amounts of precipitation and mean air temperature.

**Key word** : Neural network, Prediction, Biomass, Phytoplankton, Chlorophylls, Diatoms

#### はじめに

沿岸海域の生態系問題において、自然・生物環境のモニタリングと環境予測技術の開発は重要な研究テーマである。本研究は閉鎖性内湾漁場で、現地観測における計測データを用いて湾内の植物プランクトンの現存量（クロロフィル-a量と珪藻類の細胞数）を表層から底層までカバーできる予測手法を検討したものである。

閉鎖性内湾では、栄養塩の陸域からの汚染負荷により、植物性プランクトンの基礎生産に起因する有機懸濁物が増加し、海底への多量の有機物の堆積をまねいてきた。有機物の堆積により底泥からは栄養塩が溶出し、海域の富栄養化の二次的な原因になる。さらに、有機堆積物が分解される過程で多量の溶存酸素を消費することが海域の貧酸素の原因ともなっている。また嫌気的な環境下の有機物分解過程において硫化物が発生するなど、底生生物や底魚の生息にとって好ましくない環境となっている。漁場によっては春から初夏にかけて水温の上昇に伴い植物プランクトンの活性が上がり、赤潮の発生が確認されている。赤潮を引き

起こすプランクトンの中には、養殖魚介類を斃死させる毒性を有するものもあり、その動向が注視されている。

一般に、自然・生物環境の解析には流動モデルの運動方程式、連続方程式および拡散方程式ならびに生態系モデルの移流拡散方程式等による数値解析が用いられる<sup>1,2)</sup>。しかし、モデルに含まれる各種拡散係数等の決定に問題があること、多大の計算時間と計算機メモリーを必要とし実務ではコスト面が問題となる<sup>1~3)</sup> ことなどその導入が容易でない場合も多い。ニューラルネットワークモデルでは、既知の入力と出力を教師データとして学習することで、他の入力値に対する出力を推定できる<sup>3~6)</sup>。非常に複雑な現象でも入出力間の特性の記述が可能である<sup>3)</sup> こと、感度解析が容易に行える<sup>3~5)</sup> ことから、ニューラルネットワークは海域の生態系の解析や生物の異常発生の予測など種々の予測・解析への利用が期待されている<sup>3~6)</sup>。

ニューラルネットワークを利用した生態系環境評価手法については、例えば「沿岸域環境テレメトリーを用いたニューラルネットワークによる植物プランクトン群集密度変動のリアルタイム予測の試み」<sup>4)</sup> や「琵琶湖南湖におけ

2007年9月18日受付。Received September 18, 2007.

水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

<sup>†</sup> 別刷り請求先 (corresponding author) : yokota@fish-u.ac.jp

るアオコの発生予測<sup>5)</sup>等の研究が散見されるが、底層までをカバーした植物プランクトンの細胞数変動の予測が可能かは不明である。

植物プランクトンの群衆密度変化を支配する環境要因としては、水温、塩分、日射量、湾口での東西流速（内部急流、湧昇流）および栄養塩状態が支配的であることがわかってきた<sup>7)</sup>。また、細胞数変動予測には、少なくとも、水温、塩分、溶存酸素、日射量、降水量、気温を入力する必要があり、これに流速トレンドを追加すると予測精度が向上することがわかった<sup>4)</sup>。近年、湾奥での赤潮の発生予測には栄養塩状態が大きな支配要因となっている<sup>4)</sup>。しかしながら、流速や栄養塩データを表層から底層まで常時観測することは難しく、底層までの予測を目指す本システムには適していない。そこで、本研究ではこれらの情報を除外した環境要因観測データを用いた植物プランクトンの現存量の予測を試みる。なお、水素イオン濃度指数と化学的酸素要求量を選定した理由は、漁場環境において観測が容易で、これらのデータの不足を補完できる情報と考えたからである。

## ニューラルネットワークモデル

ニューラルネットワークの概要については以下の通りである<sup>8)</sup>。

一般に $N$ 層の階層型ニューラルネットワークは、入力層（第1層）、中間層（第2～ $(N-1)$ 層）、出力層（第 $N$ 層）から構成される。さらに、各層は複数個のユニットから構成される。ここでは、第 $i$ 層における第 $j$ 番目のユニットをユニット $ij$ と表記する。第 $i$ 層において、ユニット $ij$ の状態変数を $z_{ij}$ 、出力変数を $y_{ij}$ とすれば、第 $i$ 層のモデルは次式で記述される。

$$z_{ij} = \sum_k w_{ijk} y_{(i-1)k} + \theta_{ij}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} \tanh(\beta z_{ij}) & \text{if } i \neq N \\ z_{ij} & \text{if } i = N \end{cases}$$

ただし、 $w_{ijk}$ は第 $(i-1)$ 層ユニット $k$ から第 $i$ 層ユニット $j$ への結合の重みを与える係数（結合荷重）、 $\theta_{ij}$ はユニット $ij$ のしきい値、 $\beta$ はシグモイド関数（双曲線関数）の傾きを変更する形状パラメータである。上式から、前層の出力に結合荷重を乗じることにより、各層の状態が決定されることがわかる。また、状態の双曲線関数を出力とすることにより、ニューラルネットに非線形性を与えている。なお、双曲線関数の出力範囲は $-1 \sim 1$ であるから、最終層（出

力層）の出力には双曲線関数を用いていない。さらに、結合荷重は実データである教師データ $d_j$ にモデル出力 $y_{Nj}$ が一致するよう次式の学習則（誤差逆伝播法）で調整される<sup>9)</sup>。なお、学習終了後（調整後）には結合荷重は固定される。

$$w_{ijk}(h+1) = w_{ijk}(h) - \eta \delta_{ij} y_{(i-1)k} + \alpha \Delta w_{ijk}(h)$$

$$\Delta w_{ijk}(h+1) = -\eta \delta_{ij} y_{(i-1)k}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} y_{ij} - d_j & \text{if } i = N \\ \tanh'(z_{ij}) \sum_m w_{(i+1)mj} \delta_{(i+1)m} & \text{if } i \neq N \end{cases}$$

ただし、 $\eta$ は学習係数、 $\alpha$ はモーメント係数、 $h$ は学習回数である。なお、しきい値 $\theta_{ij}$ も上式と同様な学習則で調整される。上式第1式の右辺第3項はモーメント法に基づく慣性項であり、学習効率を改善するために付加されるものである。

本研究で予測に用いたニューラルネットワークは、Fig. 1に示すように、入力層、出力層、および2層の中間層を持つ4層構造の階層型ネットワークである。なお、中間層が1層であれば、そのニューラルネットは十分な関数近似能力を有するという知見を踏まえて、まず中間層を1層として学習を試みたが、多大なユニット数になることが予想された。そこで、中間層を2層に増加させたとき、比較的少ないユニット数で学習可能であることがわかった。このような試行錯誤により、中間層とそのユニット数を決定した。ノード間のシナプス結合の重み( $W_1, W_2, W_3$ )は学習のプロセス間で繰り返して調整される。学習法としては誤差逆伝播法<sup>9)</sup>を用い、中間層（2層ともに）のユニット数を48（現存量予測）、50（感度解析）、学習係数を0.002～0.007（現存量予測）、0.08（感度解析）、モーメント係数を0.8（現存量予測）、0.08（感度解析）、シグモイド関数（双曲線関数）の形状パラメータを0.0004～0.0006（現存量予測）、0.2（感度解析）に設定した。ニューラルネットの重

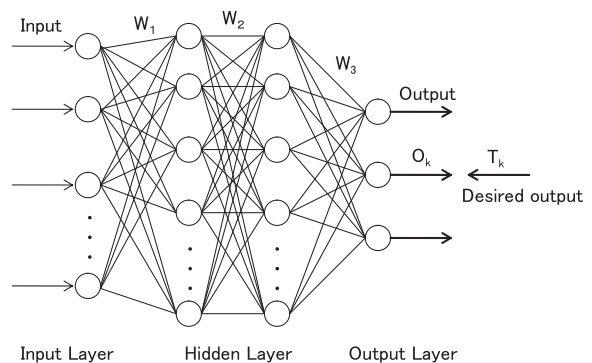


Fig. 1. Four-layer perceptron model

みの初期値は、 $-0.0001$ から $0.0001$ までの乱数に設定した。学習に関しては、種々の設定パラメータに対する多数の予備実験を行い、最小と思われる誤差を決定し、その誤差を学習終了の基準に設定した。なお、学習効率向上のためにデータのスケール変換を行っているが、参考までにその誤差は $1 \times 10^{-6}$ であった。計算プログラムにはC言語を用いた。

### 植物プランクトンの現存量予測

本研究では、三重県科学技術振興センター発行の「平成14年度閉鎖性内湾漁場改善対策調査研究事業報告書」<sup>10)</sup>のデータベースを入力データとしたニューラルネットワーク

による植物プランクトン現存量予測（赤潮予測）の現地適用性の検討を行う。具体的には、英虞湾（三重県）の湾奥に位置している片田真珠養殖漁場（以下、片田養殖漁場という）である。英虞湾全体図と湾奥に位置する片田養殖漁場の観測地点の位置をFig. 2に示す。図中において、選定された2観測地点の場所はSt. 2とSt. 4である。

入力変数は海中の各層（表層、水深2m層、底層）ごとに、降水量、平均気温、日照時間、水深、水温、塩分、溶存酸素量、水素イオン濃度指数、および化学的酸素要求量とし、一方出力変数はクロロフィル-a量 [ $\mu\text{g/l}$ ] と1 [ml]中の珪藻類の細胞数 [cells/ml] とした。植物プランクトンの現存量予測においては、観測地点St. 2の観測データによる学習の後、観測地点St. 4の予測を試みた。なお、

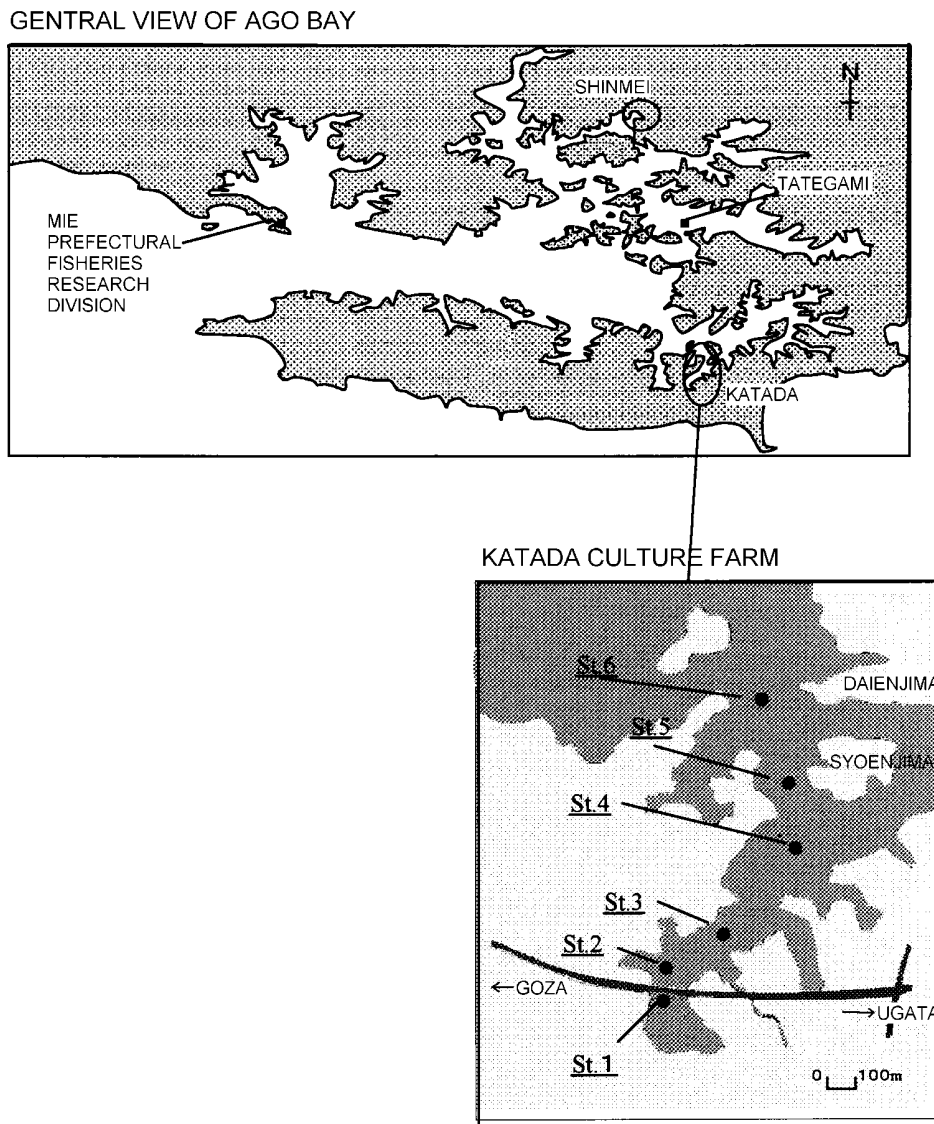


Fig. 2. Observation stations of Katada Culture Farm in Ago Bay

本研究ではその逆も試行し、モデルの妥当性を検討した。また、感度解析においては、解析の対象である入力（変動させる入力）以外は各平均値（St. 4の水深2m層の一部データ）を用いた。

### 予測結果

上記の環境要因を用いて構築したニューラルネットワークモデルでのクロロフィル-a量の予測値と観測値の時系列を各層（表層、水深2m層、底層）ごとにFig. 3に示した。同様に、珪藻類の細胞数の予測値と観測値の時系列を各層ごとにFig. 4に示した。Fig. 5およびFig. 6には、学

習結果後の予測値と観測値との相関図をクロロフィル-aと珪藻類の場合について、それぞれ示した。

まずFig. 3とFig. 5のクロロフィル-aの場合、底層における予測性には課題が残るが、表層から中層のレベルおよび変動傾向は、概ね良い精度で観測値を推定できているのがわかる。学習結果後の予測値と観測値との相関係数は0.655~0.788で、珪藻類の結果と比較すると若干落ちる（Table 1参照）。一方Fig. 4とFig. 6の珪藻類の場合、表層から底層まで細胞数の高低に依らず、レベルおよび変動傾向は比較的良好な精度で観測値を表現できている。予測結果と観測値との相関係数は0.779~0.940で高かった

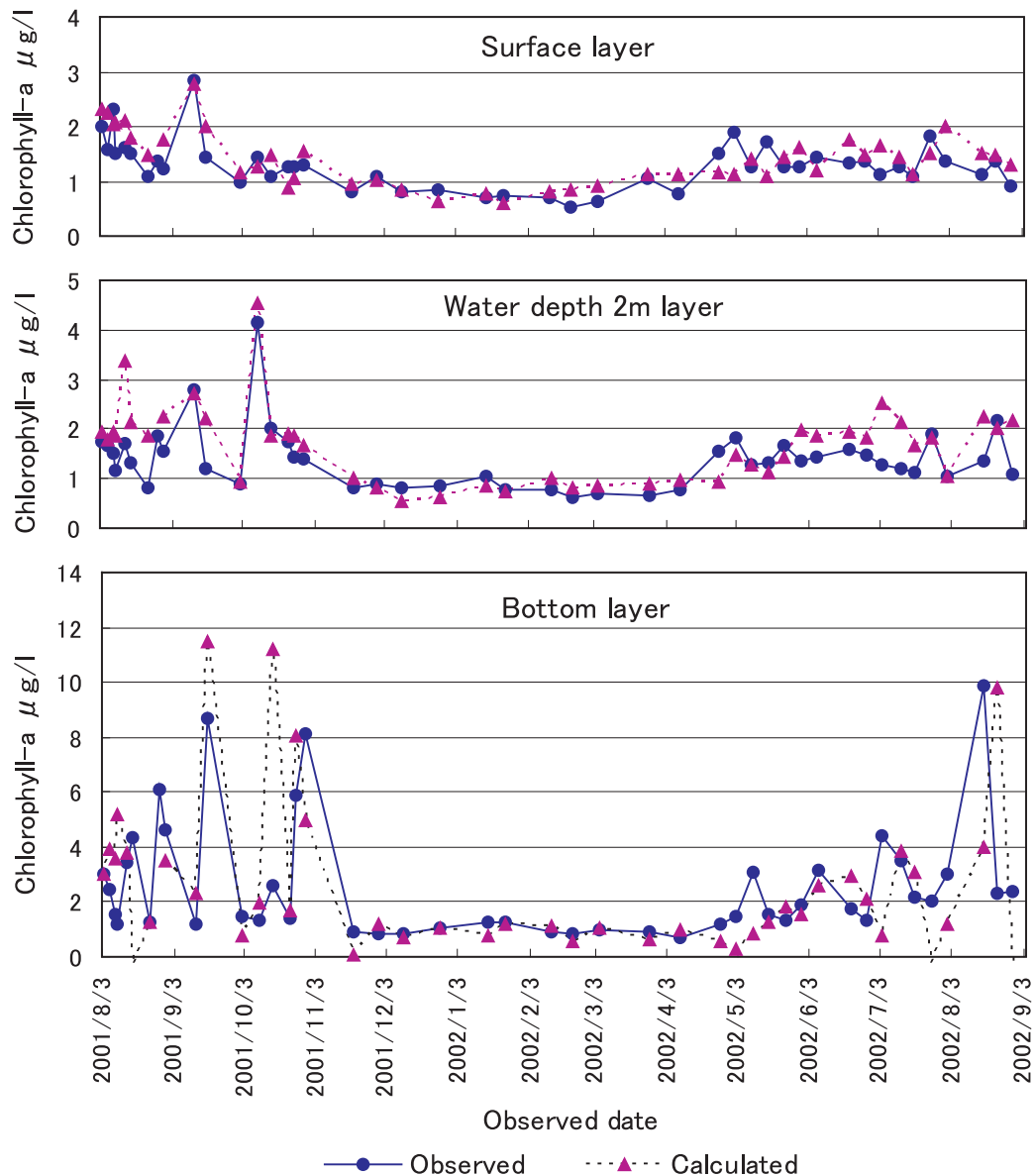


Fig. 3. Predicted results for chlorophyll-a

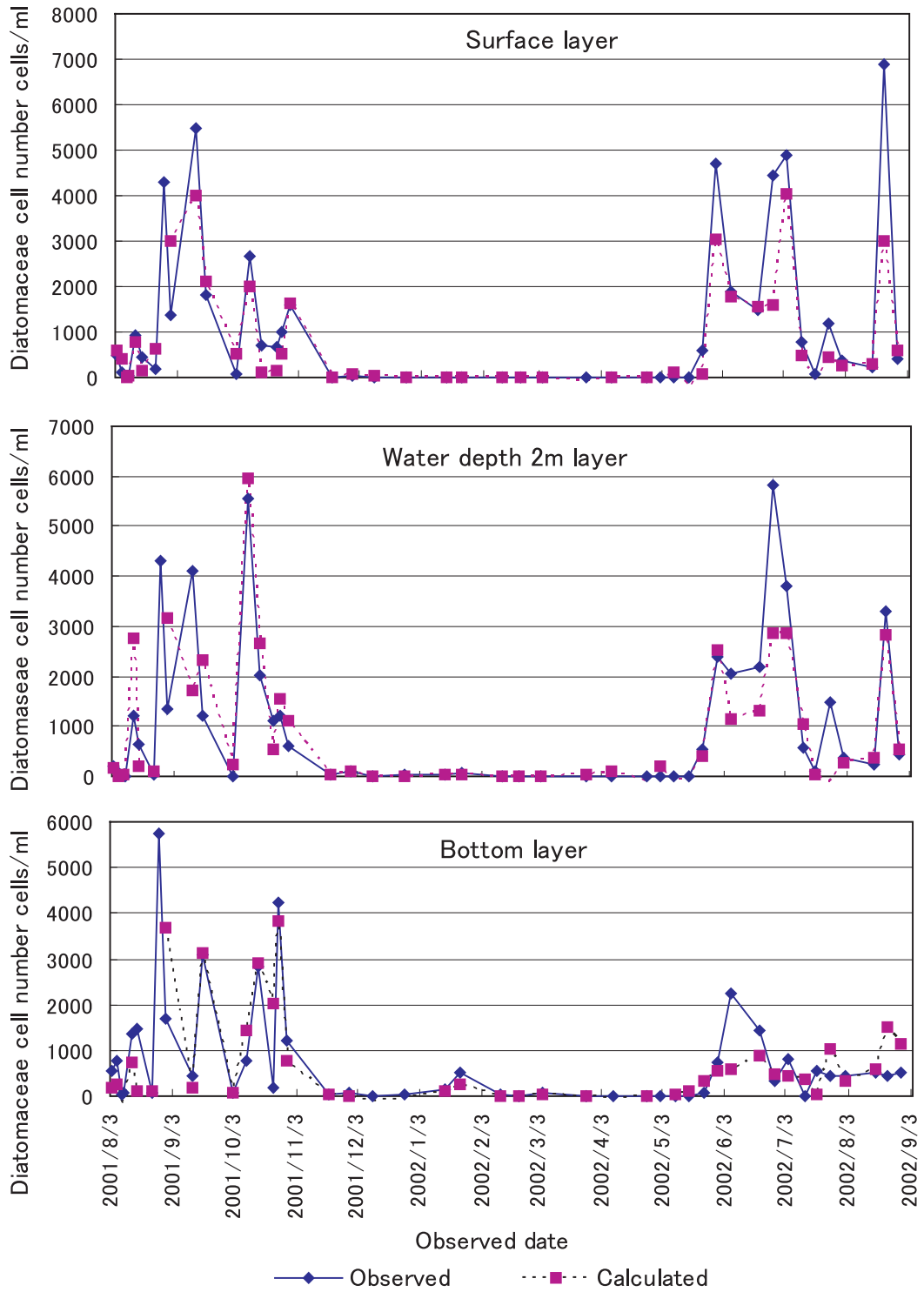


Fig. 4 . Predicted results for diatomaceae

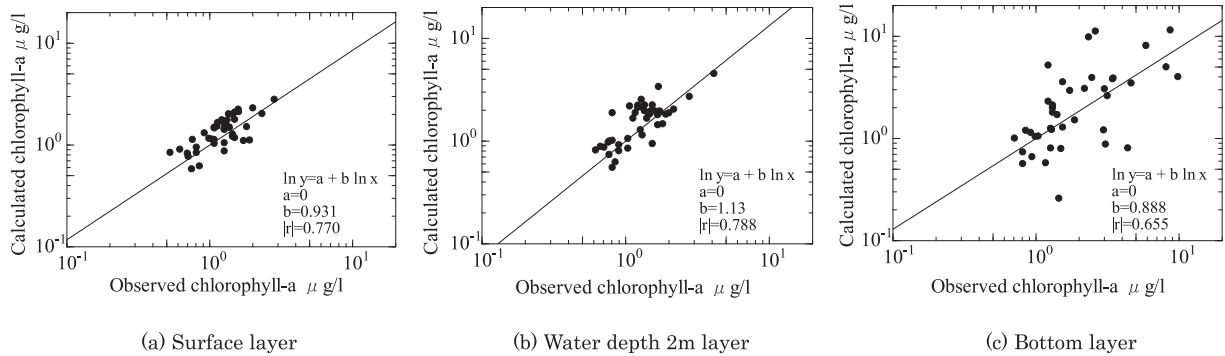


Fig. 5. Correlation between observed and calculated chlorophyll-a

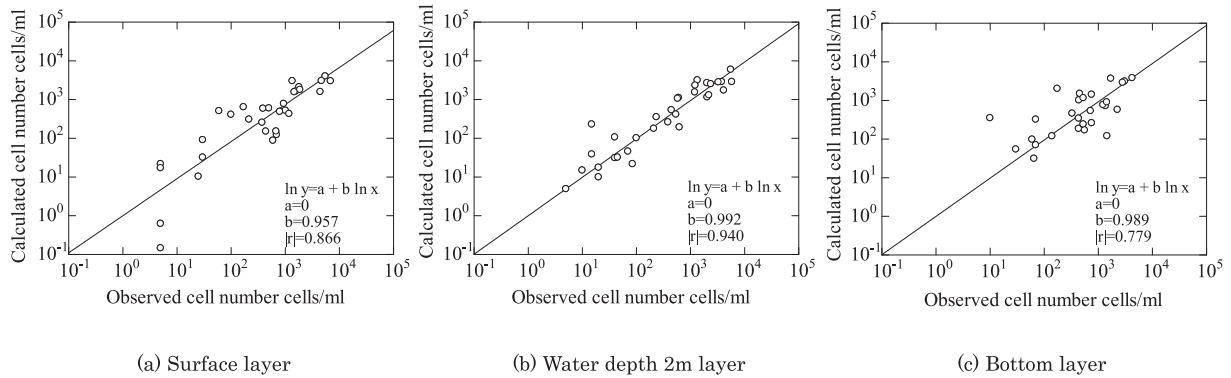


Fig. 6. Correlation between observed and calculated cell numbers for diatomaceae

(Table 1 参照)。特に水深 2 m 層では相関係数は 0.940 で高い精度で適合している。

これらの結果から、採用したモデルやパラメータは現地クロロフィル-a や珪藻類を捉えるうえで妥当なものであり、今回の解析手法が植物プランクトンの現存量予測に有効であることが確認された。

### 感度分析

構築したニューラルネットモデルの特性を評価するために、感度解析を実施した。学習データは St. 4 の水深 2 m 層のデータを採用した。理由は、前述のように水深 2 m 層は比較的高い精度で適合したためである。その方法は小林<sup>3)</sup>

の方法と同様で、環境要因ごとに平均値を求め、特定の環境要因の値を出現範囲内で種々変更することによってクロロフィル-a と珪藻類がどのように変化するかを検討した。ここで、クロロフィル-a や珪藻類が高いケースはその後の変化が消滅時に近いことも考えられることから<sup>3)</sup>、それらが低いケース（クロロフィル-a と珪藻類のデータ範囲がそれぞれ 0.81~1.91 [ $\mu\text{g/l}$ ], 40~630 [cells/ml] のデータ)の結果を重点に整理した。Fig. 7 にはクロロフィル-a の結果を、また Fig. 8 には珪藻類の結果をそれぞれ示した。

まず降水量の変化に対する植物プランクトン（クロロフィル-a と珪藻類細胞数）の変動は、降水量の増加とともに両者は大きく増加している。この理由として、降水量が上昇すると陸域からの窒素、リンなどの栄養塩が湾内に流入するためと考えられる。平均気温の変化に対する変動については、クロロフィル-a の場合平均気温 25℃ 過ぎに極小値がみられるが、珪藻類では平均気温が 25℃ 付近から細胞数が急激に上昇する傾向がある。日射量の変化に対するクロロフィル-a と珪藻類細胞数の変動は、日照時間が

Table 1. Correlation coefficient between observed and calculated values

	Surface layer	Water depth 2m layer	Bottom layer
Chlorophyll-a	0.770	0.788	0.655
Diatomaceae	0.866	0.940	0.779



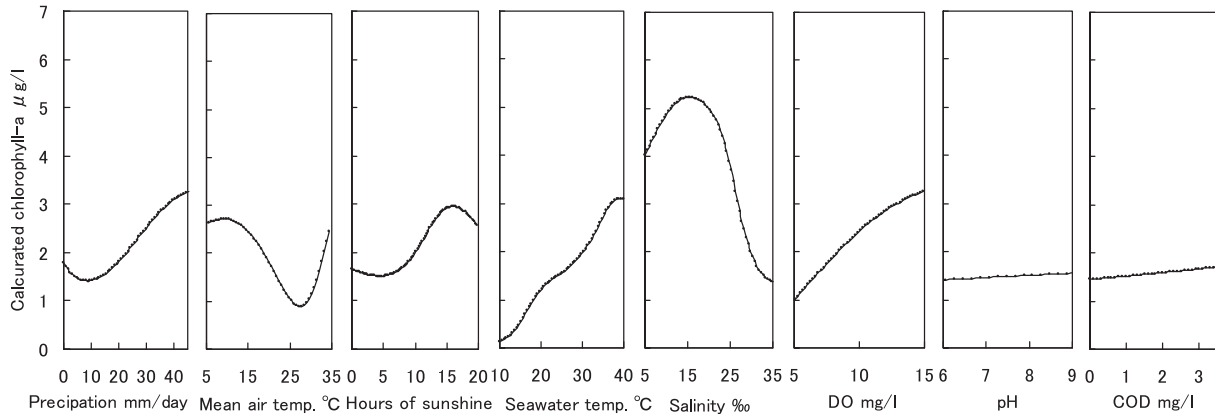


Fig. 7. Results of sensitivity analysis for chlorophyll-a

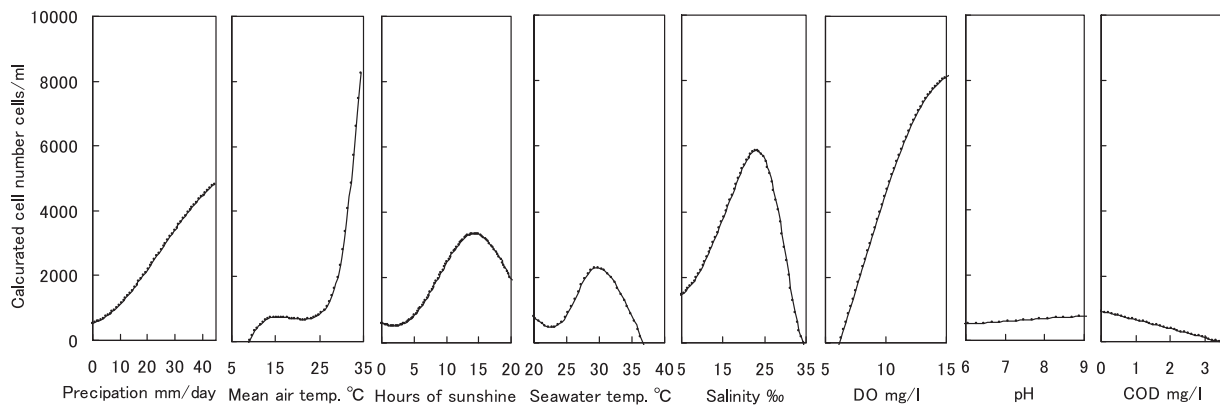


Fig. 8. Results of sensitivity analysis for diatomaceae

5時間を境にこれらは大きく増加するが、15時間を過ぎると逆に低下している。植物プランクトンが増加するには5時間以上の日照時間が必要であると言える。日照時間の増大は熱エネルギーとして水温の上昇と植物プランクトンの光合成に使われ、増殖を助長する結果であると考えられる。酸素生産者として植物プランクトンが海水中の溶存酸素量増加に強く関わることになる。水温の変化に対するクロロフィル-aの変動は水温の上昇とともに増加傾向にあるが、珪藻類細胞数は水温が25℃付近から上昇し30℃前後で最も高くなる傾向がある。塩分の変化に対するクロロフィル-aおよび珪藻類の変動は塩分がそれぞれ15 [%] および22~23 [%] 前後で最も高くなる傾向がある。文献によると塩分に対する増殖応答は植物プランクトンの種類によって異なり、天然海水より低い濃度が増殖に適している<sup>11,12)</sup>との報告がある。溶存酸素量DOについては、DOの増加とともに植物プランクトンは増加する傾向がある。これは藻類の盛んな光合成による酸素生産が伺われる。特に

溶存酸素量の増加とともにクロロフィル-aが上昇する理由は、光合成による酸素生産および大気からの再曝気が水中の有機物の酸素消費を上回ったためと考えられる。水素イオン濃度指数pHについては、pHの上昇とともに植物プランクトンは増加する傾向がある。大貝ら<sup>13)</sup>は珪藻の増殖とpHの関係を調べたところ、*M. nummuloides*が7.5~9.0、*A. longipes*が6.5~8.0で増殖量が多かったが、8.3以上になると増殖量は次第に減少したと報告している。最後に化学的酸素要求量CODに対する植物プランクトンの変動については、CODの上昇とともにクロロフィル-aは増加傾向にあるが、珪藻類細胞数は減少傾向にある。有機物量の指標であるCOD増加は植物プランクトン増加を意味するから理解できる。一方珪藻類減少傾向の理由は植物プランクトンの優占種が変化する（例えば珪藻類と競合する種が優占種となり珪藻類が減少する）ため、珪藻類が他の藻類よりも微小生物などの餌料として摂食されるためなどが考えられる。

## おわりに

英虞湾内の片田真珠養殖漁場における底質改善実証実験（環境モニタリング調査）データを採用して、漁場内における植物プランクトンの現存量（クロロフィル-a量と珪藻類の細胞数）を予測する手法を検討した。水深、水温、塩分、溶存酸素量、水素イオン濃度指数、化学的酸素要求量、日照時間、降水量、平均気温に関するデータを入力変数とするニューラルネットワークモデルで植物プランクトンの現存量変動予測が表層（水深0.5m層）から底層（底面上0.5m層）まで予測可能であることを示した。また、感度解析を行ったところ、降水量や日射量、塩分の影響が大きいなど、これまでに得られた植物プランクトンの生態学的知見とほぼ一致する結果が得られ、各環境要因の寄与度を明らかにした。

## 謝 辞

調査資料の使用を快く許可して頂いた三重県農水商工部および三重県科学技術振興センター水産研究部の関係者各位に謝意を表す。

## 付録. 解析データの概要

解析に用いた閉鎖性内湾漁場の調査データは、三重県科学技術振興センターが発行した「平成14年度閉鎖性内湾漁場改善対策調査研究事業報告書」<sup>10)</sup>のうちから、比較的均質にデータがそろっている英虞湾内の片田養殖漁場（Fig. 2参照）の2地点での水質とプランクトンの調査データ1年分を採用した。図中において、選定された2観測地点の場所はSt. 2とSt. 4である。各観測点の水深はSt. 2は4～5[m]、St. 4は7～8[m]であった。調査期間は平成13年8月から始まり、原則月2回以上の頻度で綿密に平成14年9月まで調査が実施された。

気象データとして、気象庁が公表している調査期間中の片田養殖漁場近辺のデータ（平均気温、降水量、日照時間）を採用した。

海域環境のモニタリング（水質・プランクトン調査）として、各観測点において表層（水深0.5m層）、水深2m層、および底層（底面上0.5m層）での水温、塩分、溶存酸素DO、水素イオン濃度指数pH、化学的酸素要求量COD、クロロフィル-a量、植物プランクトン（珪藻類）が調査された。調査結果<sup>10)</sup>によると、水温は各測点で7.5～31.1[℃]で推移し、表層水温は8月上旬に最高値となった。塩分は、

各観測点の表層、水深2m層および底層でそれぞれ15.2～34.4 [%]、24.8～34.6 [%]、30.7～35.6 [%]の範囲で推移し、表層では台風通過等による大量の降雨により各観測点の表層で15～16 [%] 台にまで大きく低下した。水深2m層や底層の塩分は比較的安定しており、水深2m層でほぼ30 [%] 以上、底層では32 [%] 以上を維持していた。溶存酸素量は、表層で4.3～10.0 [mg/l]、水深2m層で2.6～10.2 [mg/l]、底層で0.5～10.3 [mg/l]の範囲で推移し、各観測点とも大きく変動していた。水素イオン濃度指数pHは各観測点において概ね7.9～8.3の範囲で推移していた。クロロフィル-a量は各観測点において0.5～12.5 [μg/l]の範囲で推移していた。植物プランクトンとの関係については優占種である珪藻類の変動と傾向はすべての層で良く一致していたが、表層と水深2m層ではクロロフィル値とプランクトンの細胞数は必ずしも対応していなかった。化学的酸素要求量は、各観測点とも0.5～1.5 [mg/l]の範囲で推移し、各層で類似した変動傾向がみられた。植物プランクトンは珪藻類が大雨の後に増加する傾向がみられた。渦鞭毛藻類では、平成14年に有害プランクトンであるヘテロカプサ・サーキュラリスカーマが7月上旬から8月下旬に認められた。

## 文 献

- 1) 平野敏行監修：沿岸の環境圏。（株）フジ・テクノシステム、東京、669-723（1998）
- 2) 中田喜三郎、堀口文男、田口好浩一、瀬戸口泰史：沿岸海域の3次元生態—流体力学モデル。公害資源研究所彙報、13、119-134（1983）
- 3) Tohara Y, Hiramatsu K: Application of Multi-Layered Perceptron Model to the Estimation of Chlorinity Variations in a Tidal River. *Proc. ECOSSET' 95*, 429-434（1995）
- 4) 朴 容佑, 山下隆男：沿岸域環境テレメトリーを用いたニューラルネットワークによる植物プランクトン群集密度変動のリアルタイム予測の試み。海岸工学論文集、49、土木学会、986-990（2002）
- 5) Kobayashi T: A Prediction for Water Bloom in the Southern Part of Lake Biwa. *Proc. 9th Int. Conf. Conservation & Management of Lakes*, 361-364（2001）
- 6) 国土環境株式会社i-net Vol. 2 : <http://www.metocean.co.jp/new/inet/vol2/vol2-wr-nyuralnetwork2.htm>
- 7) 吉岡 洋, 芦澤重厚, 高山知司, 田中祐志：夏季田辺



- 湾における内部急潮による海水交換. 海岸工学論文集, 45, 土木学会, 456-460 (1998)
- 8) 坂和正敏, 田中雅博: ニューロコンピューティング入門. 森北出版, 東京, 1-48 (1997)
- 9) Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J: Learning Representations of Back-Propagation Errors. *Nature*, 323, 533-536 (1986)
- 10) 三重県科学技術振興センター: 三重県科学技術振興センター特定プロジェクト研究事業「平成14年度閉鎖性内湾漁場改善対策調査研究事業報告書」. (2003-9)
- 11) Tanaka N, Sugiyama M, Ohwada K: Ecological Studies of Phytoplankton in Ago Bay with Special Reference to the Relation between Growth and Salinity. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 30(1), 1-10 (1983)
- 12) 大貝政治, 松井敏夫, 石田祐幸: 珪藻 *Melosira nummuloides* (DILLWYN) AGARDH, *Achnanthes longipes* AGARDHの増殖に及ぼす環境諸要因の影響. 水大校研報, 32, 83-89 (1984)