

ニューラルネットワークを用いた閉鎖性海域における 化学的酸素要求量の変化予測

横田源弘[†], 平 雄一郎, 森元映治, 江副 覚, 小川和雄

Prediction of Chemical Oxygen Demand Variation in an Enclosed Sea Area using Neural Networks

Motohiro Yokota[†], Yuichiro Taira, Eiji Morimoto, Satoru Ezoe and Kazuo Ogawa

Abstract : This study develops a prediction method for a chemical oxygen demand 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 chemical oxygen demand from the surface layer (a depth of 0.5m) to the bottom layer (a depth of 0.5m on the bottom face) can be estimated using a neural network whose inputs are water depth, water temperature, salinity, dissolved oxygen, pH, chlorophyll-a, hours of sunshine, and respective amounts of precipitation and mean air temperature. When the sensitivity analysis was carried out to clarify the contribution of each environmental factor for the chemical oxygen demand, it was affected considerably by weather conditions (hours of sunshine, precipitation, water temperature, etc.), salinity, and chlorophyll-a.

Key Words : Neural network, Prediction, Water quality, Chemical oxygen demand, Enclosed sea area, Sensitivity analysis

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。前報¹⁾では、閉鎖性内湾漁場で現地観測データを用いて植物プランクトンのニューラルネットワーク解析を行い、植物プランクトン変化の予測モデルを構築した。引き続き、本報では海域の水質汚濁指標の一つである化学的酸素要求量CODの変動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。

閉鎖性海域での有機物汚濁の原因は、河川を通じて陸域から流入する有機物のほかに、海域内で主として植物プランクトンの増殖によって生産される、いわゆる内部生産有機物(内部生産COD)に由来する。閉鎖性海域の湾岸域では、利水、水産資源供給の場などとして経済的価値を持つだけでなく、自然環境および生活環境としても多様な価値

を持つ²⁾。海域での環境評価項目は数多くあるが、このうち水質やそれによる生態系破壊の社会・経済的影響を適正に評価する必要がある²⁾。海域の水環境の保全・管理を効果的に行うためにも、対象海域の水質変化機構を正しく評価しておく必要がある。

わが国の水質問題で最も重要な項目は化学的酸素消費量である³⁾。従って水質評価モデルとしてはCODの内部生産を含めたCODモデル(言い換えると、植物プランクトン生物量を予測するモデル)、すなわち生態系モデル^{3,4)}が必要不可欠である。水質の解析には水の流れを規定する運動方程式と連続式および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³⁻⁶⁾。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⁴⁻⁶⁾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

2008年4月14日受付。Received April 14, 2008.

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

[†] 別刷り請求先 (corresponding author): yokota@fish-u.ac.jp

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^{6~9)}。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⁶⁾こと、感度解析が容易に行える^{6~8)}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^{6~9)}。

ニューラルネットワークを利用した水質予測手法については、例えば「多層パーセプトロンモデルによる河川感潮域の塩素量解析」⁶⁾や「閉鎖性水域における水質変化の予測に関する研究」⁵⁾等の研究が散見されるが、底層までをカバーしたCODの変動予測が可能かは不明である。西田ら⁵⁾の研究では、環境要因として当日を含めて3日分の日雨量と当日の最大時間雨量、そして月平均水温の5種類の実測データを与えているが、さらに入力情報に関して水温、日射量などの導入を検討したいと述べている。また、朴・山下⁷⁾は植物プランクトンの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を明らかにした。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¹⁰⁾。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化学的酸素要求量CODの変動予測を試みる。なお、水素イオン濃度とクロロフィル-a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¹¹⁾。

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)、 θ_{ij} はユニット ij のしきい値、 β は双曲線正接シグモイド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、状態の双曲線正接シグモイド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、双曲線正接シグモイド関数の出力範囲は $-1 \sim 1$ であるから、最終層(出力層)の出力には双曲線正接シグモイド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_i 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¹²⁾。なお、学習終了後(調整後)には結合荷重は固定される。

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

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

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

ただし、 η は学習係数、 α はモーメント係数、 h は学習回数である。なお、しきい値 θ_{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。

本研究で予測および感度解析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

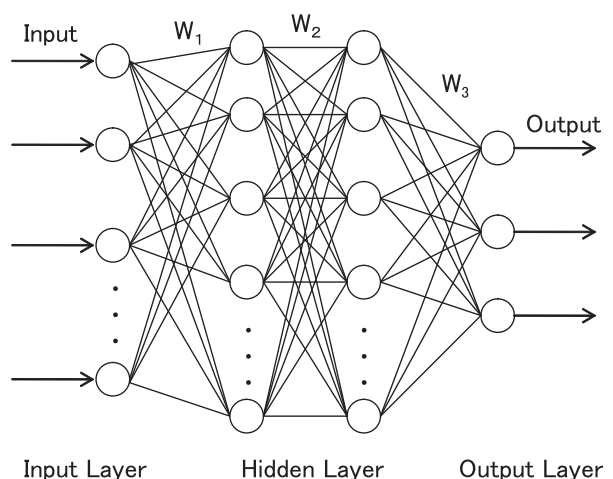


Fig. 1. Four-layer perceptron model

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ワーク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を用いた。ニューラルネットワークの設計パラメータについては、中間層(2層ともに)のユニット数を50、学習係数を0.08、モーメント係数を0.08、双曲線正接シグモイド関数の形状パラメータを0.2に設定した。また、ニューラルネットワークの重みの初期値を、 -0.0001 から 0.0001 までの乱数に設定した。なお、与えた乱数のパターンによっては、重みが局所解に収束することがあったから、これを回避するために各実験で異なる乱数のパターンを用いている。学習の終了条件に関しては、種々の設計

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。参考までに、その最小誤差になるまでの学習の回数は、表層の予測のとき8168回、水深2m層の予測のとき9185回、底層の予測のとき4615回、感度解析のとき4784回であった。なお、底層よりも表層・水深2m層のデータが複雑に変化しているため、学習回数に差がでたものと考えられる。計算プログラムにはC言語を用いた。

化学的酸素要求量の変動予測

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」¹³⁾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化学的酸素要求量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である。英虞湾全体図と湾奥に位置する片田真珠養殖漁場の観測地点の位置をFig. 2に示す。図中にお

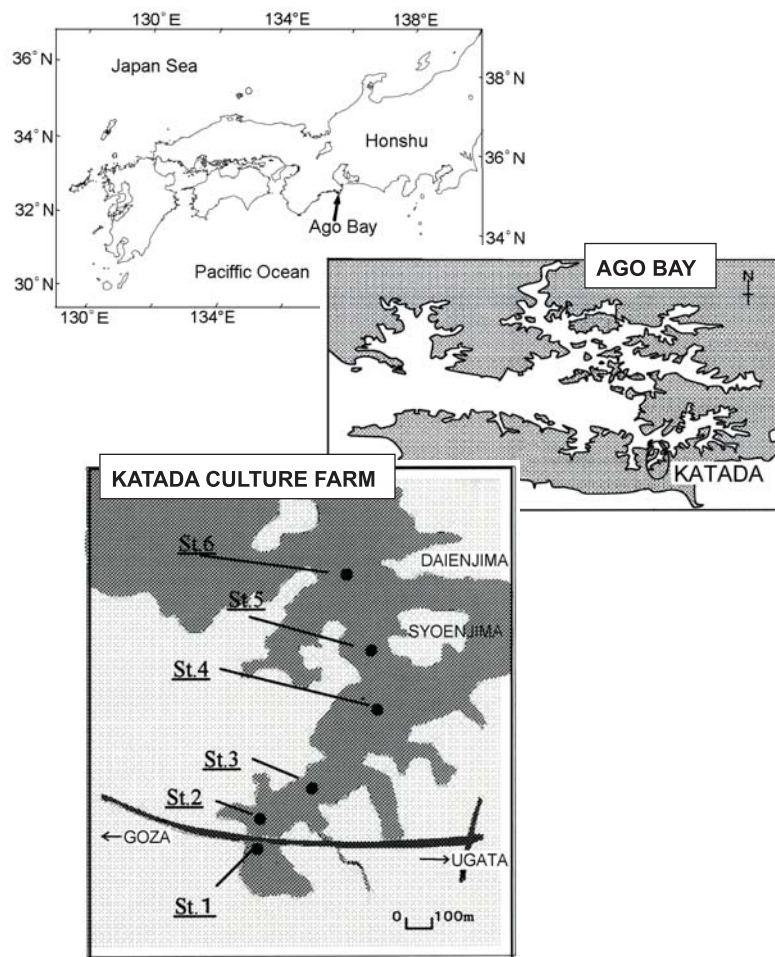


Fig. 2. Observation stations of Katada Culture Farm in Ago Bay

いて、選定された2観測地点の場所はSt. 2とSt. 4である。各観測地点の水深はSt. 2は4~5[m], St. 4は7~8[m]である。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¹⁴⁾。

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, 水素イオン濃度およびクロロフィル-a量とし、一方出力変数は化学的酸素要求量CODとした。化学的酸素要求量の予測においては、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。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化学的酸素要求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。Fig. 4には、学習結果後の予測値と観測値との相関図を化学的酸素要求量について示した。

これによると、表層から底層までCODの高低に依らず、レベルおよび変動傾向は比較的良い精度で観測値を表現できている。学習結果後の予測値と観測値との相対二乗平均平方根誤差(Normalized relative root mean square error: E)は0.786~1.087で、表層のそれは0.786で予測は良好と言えないが、底層<水深2m層<表層の順に向上した(Table 1参照)。底層と水深2m層の予測は観測値の平均値と等しい程度の意義しか有しないが、全般的に見ると化学的酸素要求量の濃度が1[mg/l]程度の場合分析誤差が大きいことも問題点の1つである。特に問題となる5月か

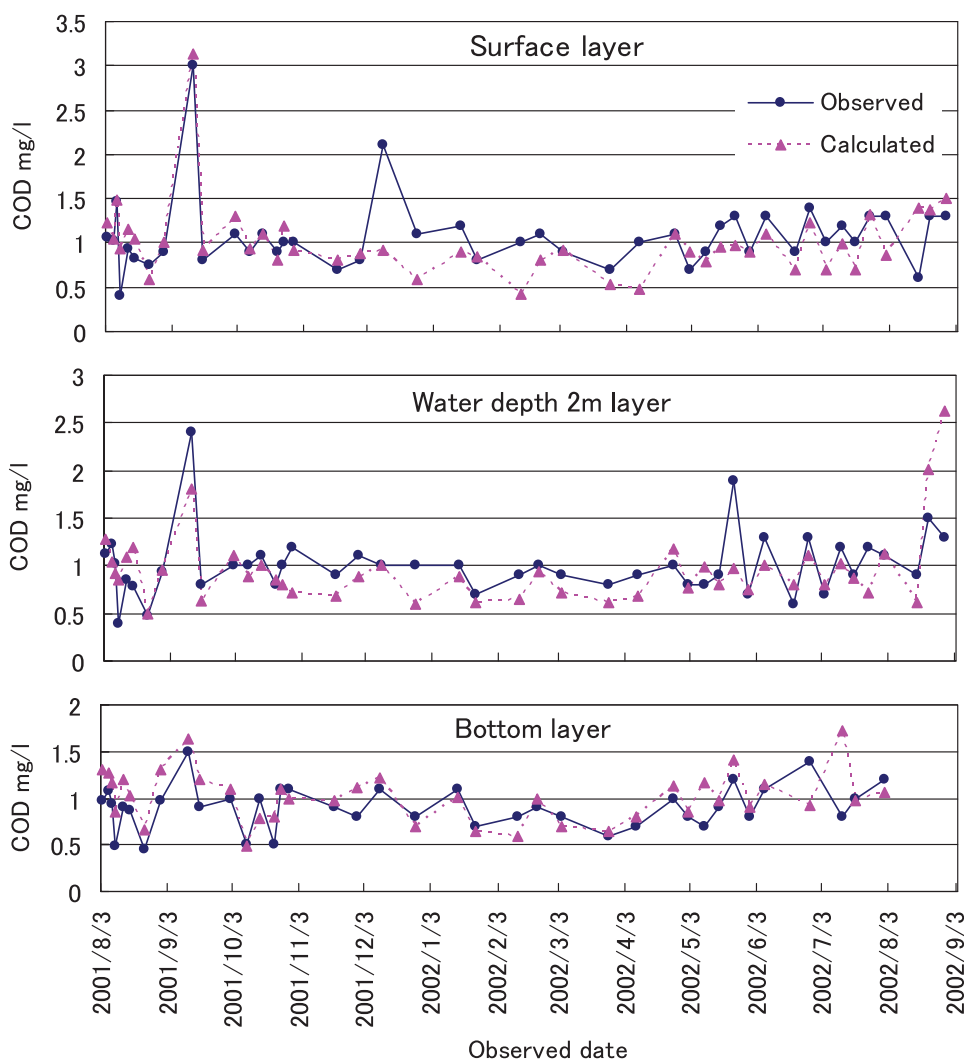


Fig. 3. Predicted results for chemical oxygen demand

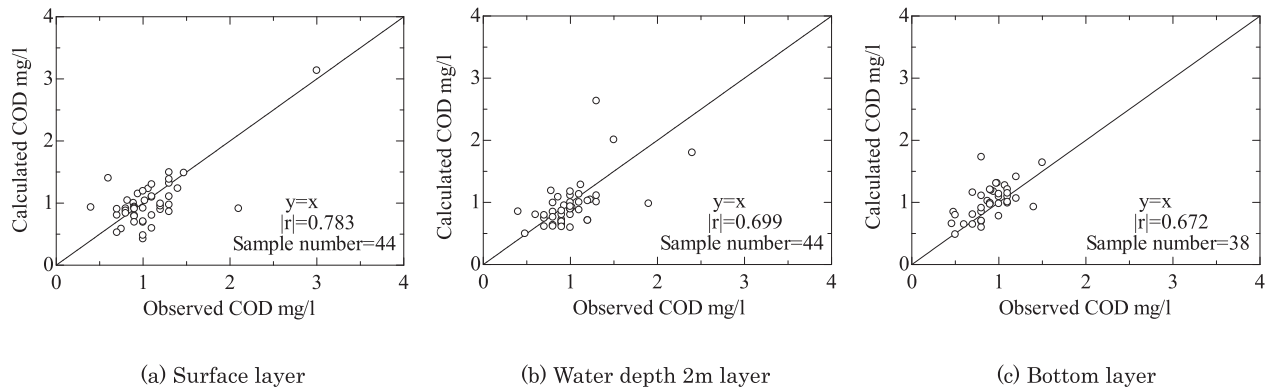


Fig. 4. Correlation between observed chemical oxygen demand and calculated one

Table 1. Normalized relative root mean square error E and correlation coefficient r between observed values and calculated ones

	Surface layer	Water depth 2m layer	Bottom layer
E	0.786	1.012	1.087
r	0.783	0.699	0.672

Notes:

$$E = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}}{\sigma}$$

Here, x : observed value, y : calculated value

σ : standard deviation of observed values

ら10月の1.5~3.5 [mg/l] の場合概ね良い精度で推定できていると判断する。

これらの結果から、採用したモデルやパラメータは現地の化学的酸素要求量を捉えるうえで妥当なものであり、今回の解析手法が化学的酸素要求量の変動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ワークモデルの特性を評価するために、各入力因子が出力に与える影響を以下の感度解析によって調べた。学習データはSt. 4の水深2m層のデータを採用した。その方法は前報¹⁾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化学的酸素要求量がどのように変化するかを検じた。ここで、化学的酸素要求量が高いケースはその後の変化が低下することも考えられるから、化学的酸素要求量が低いケース(データ範囲が0.4~0.9 [mg/l] のデータ)の結果を重点に整理した。Fig. 5には

その結果を示した。

まず降水量の変化に対する化学的酸素要求量CODの変動は、降水量の増加とともに増加するが、ピーク後減少している。解析結果からは多降水の場合降水量とCODとは負の相関関係であることを示している。この理由として、CODは河川を通じて陸域から流入するものと、海域内で生産されるものがある。内部で生産されるCODは植物プランクトンによる有機物である。内部生産CODは窒素、リンなどの栄養塩や汚濁水の滞留時間によって影響を受けることになる。滞留時間が長い湾内ほど内部生産CODが大きいと考えられる。湾内の滞留には降水量が大きく影響するから、少降水量の場合は一時的にCODの増加をもたらすが、多降水の場合にはCODが湾外へと流出すると考える。このような振る舞いは水域の地形、潮汐、陸水、風などに強く依存する。文献¹⁵⁾によると、一般的には降水量が大きくなると汚濁負荷量は増加する傾向を示すが、必ずしも降水量と汚濁負荷量とが比例関係にはならないこと、また降り始めの雨中の汚濁物質の濃度は高い。

平均気温の変化に対するCODの変動は、気温が20℃前後でCODが最も高くなる傾向にある。日射量の変化に対するCODの変動は、日照時間が10時間付近に極小値が見られるが、10時間を超えるとCODは増加傾向に転じている。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(内部生産CODの増加)する結果であると考えられる。一方、極小傾向が現れたのは、光が強すぎると逆に植物プランクトンの光合成が阻害される性質(光阻害)がある⁴⁾ためであろう。水温の変化に対するCODの変動は水温の上昇とともに増加傾向にある。この理由として、水温の上昇は植物プランクトンの増殖を助長する結果と考える。つまり、植物プランクトンの最大成長速度は水温に依存することは古くから知られ

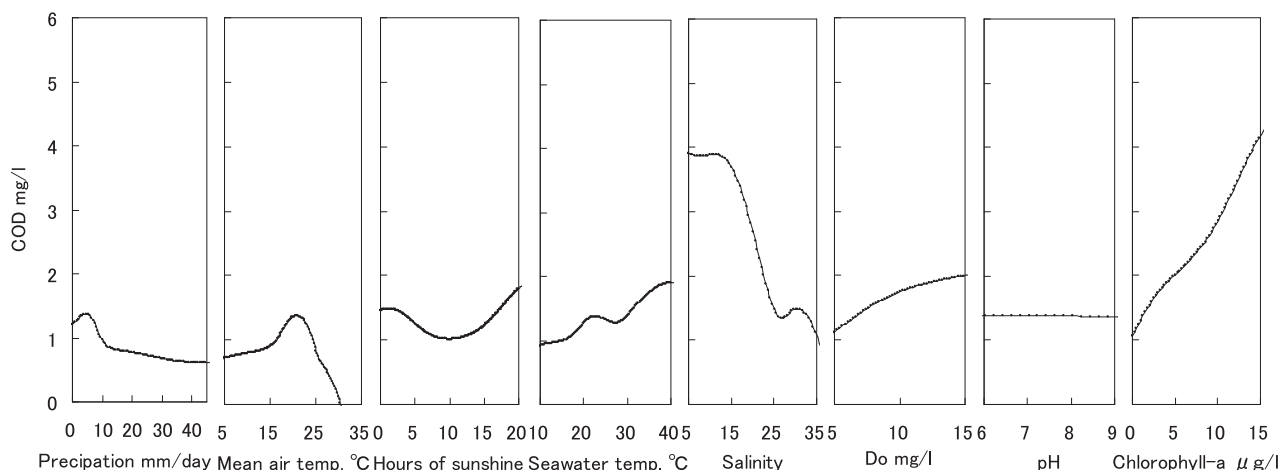


Fig. 5. Results of sensitivity analysis for chemical oxygen demand

ている¹⁶⁾。

塩分とCODの関係は、負の相関が見られる。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^{17,18)}との報告がある。溶存酸素量DOとCODの関係は正の相関が見られる。これは藻類の盛んな光合成による酸素生産が伺われる。特に光合成による酸素生産および大気からの再曝気在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pHとCODの関係は、pHが6～9程度ではCODには大きな影響は現れていない。水質汚濁防止法によると排出水のpHは海域では5.0以上9.0以下とされている。大貝ら¹⁸⁾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。このことは、光合成によって水中の炭酸ガスが消費されて、pHがアルカリ側に変化すると珪藻の増殖は抑制されること（内部生産CODの低下）を意味する。最後に、クロロフィル-aと化学的酸素要求量CODとの関係は正の相関が見られる。クロロフィル-aを湾内一次生産の指標と考えれば、クロロフィル-aの増加に伴うCODの増加は内部生産CODの増加の効果を表している。

おわりに

英虞湾内の片田真珠養殖漁場における環境モニタリングデータを採用して、漁場内における化学的酸素要求量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、クロロフィル-a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

トワークモデルで化学的酸素要求量の変動予測が表層（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、気象条件（日照時間、降水量、水温など）、塩分、クロロフィル-aの影響が大きいなど、これまでに得られた化学的酸素要求量の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

本研究を遂行するにあたり、三重県科学技術振興センター並びに気象庁のホームページから公開されているデータを利用して頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 1) 横田源弘, 平 雄一郎, 森元映治: 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. 水大校研報, 56, 251-259 (2008)
- 2) 武下俊二: プロジェクト研究紹介 閉鎖性海域における水界生態系機構の解明及び保全に関する研究. 国立環境研究所ニュース 11(4), <http://www.nies.go.jp/kanko/news/11/11-4/1-4-03.html>
- 3) 中田喜三郎, 田口浩一: 沿岸生態系モデリング. 平野敏行 (監修), 沿岸の環境圏. 株式会社フジ・テクノシステム, 東京, 669-696 (1998)
- 4) 松梨順三郎, 池田有光, 海老瀬潜一, 中田喜三郎: 環境流体汚染. 森北出版株式会社, 東京, 165-231 (1996)
- 5) 西田 渉, 野口正人, 松田良寛, 岡崎久典: 閉鎖性水

- 域における水質変化の予測に関する研究. 長崎大学工学部研究報告, 35(65), 108-113 (2005)
- 6) Tohara Y, Hiramatsu K: Application of multi-layered perceptron model to the estimation of chlorinity variations in a tidal river. *Proceeding of ECOSET '95*, 429-434 (1995)
- 7) 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, 986-990 (2002)
- 8) Kobayashi T: A prediction for water bloom in the southern part of Lake Biwa. *Proceeding of 9th ILEC*, 361-364 (2001)
- 9) 国土環境株式会社 i-net Vol. 2: <http://www.metocean.co.jp/new/inet/vol2/vol2-wr-nyuralnetwork2.htm>
- 10) 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, 456-460 (1998)
- 11) 坂和正敏, 田中雅博: ニューロコンピューティング入門. 森北出版株式会社, 東京, 1-48 (1997)
- 12) Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J: Learning representations of back-propagation errors. *Nature*, 323, 533-536 (1986)
- 13) 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)
- 14) 気象庁: ホームページ資料. (2006)
- 15) 大塚耕司: 汚濁負荷/汚濁負荷量. 大阪湾新社会基盤研究会 (編). 海域環境創造事典 (改訂版). 株式会社沿岸域環境研究所, 大阪, 71 (1996)
- 16) Eppley R W: Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish Bull*, 70, 1063-1085 (1972)
- 17) 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)
- 18) 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)