

ニューラルネットワークとカルマンフィルタを組み合わせた 植物プランクトン群集密度変動リアルタイム予測

朴 容 佑*・山下 隆 男**

本研究は、田辺湾における自然環境遠隔計測データ（沖合観測塔テレメトリー）および内湾養殖筏テレメトリーを共同収録し、これを用いて内湾の自然・生態環境モニタリングシステムを構築するとともに、湾内の植物プランクトン細胞数のリアルタイム予測を実務レベルで実施する手法を検討した。水温、塩分、溶存酸素、太陽放射量、降水量、気温に関するテレメトリーデータを入力変数とするニューラルネットワークとカルマンフィルタを組み合わせたモデルで植物プランクトン細胞数変動予測がある程度可能となり、これに湾口部での海底面流速トレンドの代わりに表層と底層水温差を追加すると予測精度が向上することを示した。

1. 緒 言

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実務的環境予測技術の開発、観測データの総合的収録システム構築は重要な研究テーマである。

和歌山県、田辺湾を研究サイトとして、ここでの海域環境モニタリングの共同観測（京都大学防災研究所、近畿大学水産研究所）は、1998 年から始まり 5 年間を経過している（田中ら、1998；朴・山下、2002）。田辺湾は 5 km 四方の 3 辺を陸に囲まれた内湾であるが、西側境界は紀伊水道に接しており黒潮の影響を強く受けている。ここでの海水交換機構と湾奥での赤潮発生予測を目的として、高潮観測塔と養殖筏による自然環境テレメトリーの定点観測と、移動観測点での自然・生物環境の観測が週に 1 回の間隔で実施されている。前者は通年、後者は 7—9 月のコア観測期間に実施されている。図—1 に移動観測点とテレメトリー観測点（■）を示す。観測船による 3 次元水質計測データ、植物プランクトン群集密度計測データ、近畿大学湾内養殖筏環境テレメトリーデータおよび、田辺・中島高潮観測塔の気象・海象観測データを用いて、海域環境と植物プランクトン群集密度変動との関係を明確にするために主成分分析を行い、これらの相互作用特性を明確にする。さらに、主成分分析の結果に基づいて、ニューラルネットワークとカルマンフィルタとを組み合わせた方法で植物プランクトン細胞数のリアルタイム変動予測を試み、この方法の現地適用性の検討を行う。

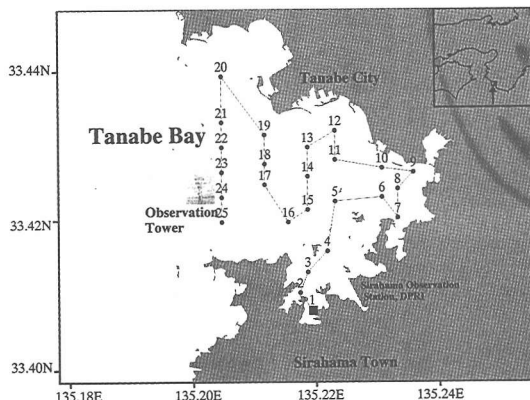
2. 田辺湾現地海域モニタリングデータの主成分分析

1998 年から実施してきた海域環境のモニタリングおよび植物プランクトン細胞数変動の観測の結果、太平洋に開口している田辺湾の海水交換は、夏季には、潮汐流、内部急潮（黒潮流動に起因する外洋水の周期的な進入）、

および北風による鉛直循環流である沿岸湧昇流の 3 機構により促進されることが明確にされている（吉岡ら、1998）。また、ここでの植物プランクトン細胞数の変動特性には、水温、塩分、太陽放射量、湾口での東西流速成分および栄養塩状態が制限環境要因であり、それらの相互関係も研究されている（朴・山下、2002）。

ここでは、主成分分析により植物プランクトンと環境要因との相互を評価する。評価に用いた項目は、水温鉛直分布、塩分、気温、太陽放射量、降水量、溶存酸素、流れの西東成分、栄養塩、植物プランクトン（全種類、渦鞭毛類、珪藻類）である。調査対象期間は 1998—2001 年の夏季コア観測期間で図—1 に■印で示す観測点 1 でのデータを用いる。田辺湾の環境要因と植物プランクトン変動を総合的に評価するため、多変量解析の主成分分析を実施する。有意性の検定は Kendall の p 検定を用いる。

表—1 は 1998—2001 年間に田辺湾で観測された環境要因と植物プランクトンの主成分分析からの相関係数の結果を示す。表中の太い数字は相関係数が 5 % 水準で有意なデータを示す。また、W.T. : 水温、A.T. : 気温、S.



図—1 田辺湾における海象・気象、海域環境の観測点（■：夏 一日一回水質計測データ、植物プランクトン群集密度計測点）

* 正会員 工博（株）ハイドロソフト技術研究所

** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

表一 1998-2001 年間に田辺湾で観測された環境要因と植物プランクトンの相関係数

	W.T.	Slinity	A.T.	S.R	Rain	D.O.	Currents	NO ₂	NO ₃	NH ₄	PO ₄	SiO ₂	Total phy.	Dinoflag.	Diatoms
W.T.	1														
Salinity	-0.182	1													
A.T.	0.329	0.120	1												
S.R	0.030	0.000	0.277	1											
Rain	0.036	0.102	-0.138	-0.317	1										
D.O.	-0.231	0.131	-0.052	0.182	-0.118	1									
Currents	0.208	-0.157	0.112	-0.011	0.019	-0.294	1								
NO ₂	-0.75	-0.256	-0.474	-0.138	0.030	-0.096	-0.012	1							
NO ₃	0.404	0.095	0.541	0.063	0.006	-0.200	0.100	-0.163	1						
NH ₄	0.418	-0.115	0.233	0.037	-0.017	-0.431	0.158	0.050	0.354	1					
PO ₄	0.428	-0.078	0.382	0.128	-0.027	-0.420	0.163	-0.128	0.515	0.549	1				
SiO ₂	-0.088	-0.272	-0.236	-0.026	-0.163	-0.101	0.034	0.364	-0.199	0.096	-0.059	1			
Total phy.	-0.096	0.099	0.033	0.090	-0.096	0.287	-0.270	-0.248	-0.119	-0.180	-0.204	-0.320	1		
Dinoflag.	-0.027	0.251	0.409	0.025	0.028	0.062	0.014	-0.431	0.285	-0.032	0.038	-0.187	0.062	1	
Diatoms	-0.128	0.115	-0.041	0.016	-0.125	0.277	-0.319	-0.194	-0.130	-0.191	-0.187	-0.250	0.827	0.019	1

R：太陽放射量，Rain：降水量，D.O.：溶存酸素，Currents：流れの東西方向の底層流トレンド，Total phy.：全植物プランクトンの細胞数，Dinoflag.：渦鞭毛藻類の細胞数，Diatoms：珪藻類の細胞数，NO₂，NO₃，NH₄，PO₄，SiO₂は海水中の無機態栄養塩である。

主成分分析を用いてこれらの観測データを解析した結果，植物プランクトンの群集密度変化と環境要因と相関関係として，以下のようなことが明確にされた。

(1) 図-2は主成分分析より得られた植物プランクトンと環境要因との関係を示してあり，横軸は第1成分，縦軸は第2成分である。1998年から2001年までの植物プランクトン種の密度を用いた対応分析は，第1軸で全変動の22%を説明できたに過ぎないが，珪藻類は左に，右には赤潮構成種の渦鞭毛藻類が位置した。

(2) 渦鞭毛藻類と環境要因の相関関数(r)としては，気温(r=-0.409)，NO₃(r=-0.431)，珪藻類に関する項目では，水温(r=-0.128)，塩分(r=0.115)，溶存酸素(r=0.227)，流れの東西成分(r=-0.319)，

栄養塩(-0.131以下)と高い相関を示した(表一)。

田辺湾における植物プランクトンの変動に影響する物理的・化学的要因を分類し，その要因の大きさを基にして田辺湾水域を対象としたリアルタイム予測モデルを構築し，植物プランクトンの増殖量を推定する。そのため複雑な混合水域を再現できるリアルタイム予測モデルの開発，水温，塩分，溶存酸素，観測塔での太陽放射量，降水量，気温，および湾口での表層・底層水温のテレメトリデータを用いて各種生物変動要因を把握する。

3. 植物プランクトンのリアルタイム予測

田辺湾における環境要因観測データを用いた植物プランクトンの細胞数のリアルタイム予測を試みる。近年，田辺湾奥部においては海水が浄化傾向にあり，湾奥部の観測点でも富栄養状態が継続することが少なくなりつつある。このため湾奥での赤潮の発生予測には栄養塩の状態が制限要因となっていることが考えられるが，リアルタイムの赤潮発生予測には栄養塩データを用いることは実用的ではないので，この情報を除外した環境要因観測データのみを用いて予測を試みる。すなわち，入力変数として水温，塩分，溶存酸素，日射量，降水量，気温，出力変数は1ml中の渦鞭毛藻類と珪藻類の細胞数とした。1998~2001年の観測データによる学習の後，2002年の予測を行った。ここでは，入力変数として水温，塩分，溶存酸素，太陽放射量，降水量，気温，出力変数は1ml中の渦鞭毛藻類と珪藻類の細胞数とした。図-3に示すように，1998~2001年の観測データによる学習の後，2002年のリアルタイム予測を試みる。

(1) ニューラルネットワークの概要

用いたニューラルネットワークは，入力層と出力層の間をシナプス結合の重みで結んで構成している3層の階層型ネットワークで，ノード間のシナプス結合の重み(W, Z)は学習プロセス間で繰り返して調節される。各中

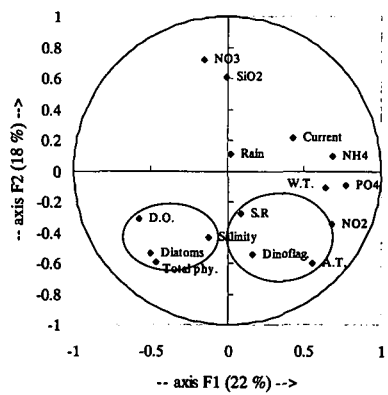


図-2 主成分分析より得られた植物プランクトンと環境要因との関係。

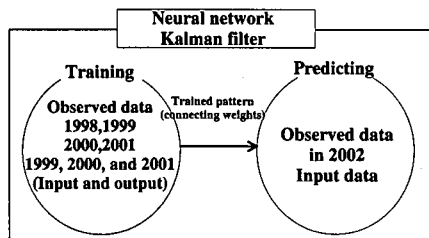


図-3 2002年の植物プランクトン予測の学習と予測過程の模型図

間層（入力層）及び出力層（中間層）は微分可能なシグモイド活性化関数 $f(x)$ を用いて非線形入出力を可能にしている。学習アルゴリズムは結合強度を誤差伝播のアルゴリズムで計算する（Rumelhart ら, 1986）が、ユニットとは、人間細胞（ニューロン）の人工的なモデルである。詳細は朴・山下（2002）を参考にされたい。

（2）カルマンフィルタの概要

本研究では、システム挙動を ARMA (autoregressive moving average) モデルで近似できる場合を仮定し、カルマンフィルタによる植物プランクトン細胞数 ($Y(k)$) とニューラルネットワークによる予測植物プランクトン細胞数 ($Z(k)$) の関係を式 (1) のように示す。

$$Y(k) = aX(k-1) + bX(k-2) + cZ(k) + dZ(k-1) \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 $X(k-1)$ は 1 日前の観測された植物プランクトン、 $X(k-2)$ は 2 日前の観測された植物プランクトン、 $Z(k)$ はニューラルネットワークによる現予測植物プランクトン、 $Z(k-1)$ はニューラルネットワークによる 1 日前の予測植物プランクトンの数である。係数 a, b, c, d の初期値は学習過程で設定し、カルマンフィルタによる予測後に更新する。

カルマンフィルタの状態方程式及び空間方程式はそれぞれ次のようになる。

$$X(k) = A(k)X(k-1) + w(k) \quad \text{.....(2)}$$

$$Y(k) = C(k)X(k) + v(k) \quad \text{.....(3)}$$

ここに、 $X(k-1)$ は m 次元状態ベクトル、 $Y(k)$ は p 次元観測ベクトル、 $w(k)$ は白色雑音、 $v(k)$ は観測雑音、 $A(k)$ は遷移行列、 $C(k)$ は $p \times m$ 観測行列である。 $A(k)$ と $C(k)$ の要素は時間 k のみの確定関数とする。さらに雑音ベクトル $w(k)$ と $v(k)$ は平均値 0 のガウス白色雑音で、その共分散行列は σ^2 である。

予測ステップは

$$Xh(k|k-1) = A(k)Xh(k) \quad \text{.....(4)}$$

$$P(k|k-1) = A(k)^T P(k-1) A(k) \quad \text{.....(5)}$$

$$Yh(k) = C(k)Xh(k|k-1) \quad \text{.....(6)}$$

になる。

推定ステップは

$$G(k) = \{1 + c(k)P(k|k-1)C(k)^T\}^{-1} \quad \text{.....(7)}$$

$$Xh(k) = Xh(k|k-1) + [P(k|k-1)C(k)^T G(k)] \cdot \{Y(k) - Yh(k)\} \quad \text{.....(8)}$$

$$P(k) = P(k|k-1) - P(k|k-1)C(k)^T G(k)C(k)P(k|k-1) \quad \text{.....(9)}$$

になる。

ここに、 $G(k)$: カルマンゲイン、 $P(k)$: 誤差共分散行列、 $Y(k) - Yh(k)$: 観測値と推定値の差になる。

4. リアルタイム予測の検討

本研究では、朴・山下（2002）の計算過程及び結果を参考して、ニューラルネットワーク中間層は 1 層、ユニットの数は 15 個とした。シグモイド関数の形状パラメータは 3、学習定数は 0.2、モーメント係数は 0.8 値を用いた。また、結合強度の初期値は 0-1 の乱数で与えた。学習回数は最大回数を 100,000 回に設定して、教師信号と出力値の差が 0.001 になるまで学習による結合強度の変更を行った。

入力変数として、水温、塩分、溶存酸素、太陽放射量、降水量、気温、湾口の表層と底層水温を選び、出力変数は 1 ml 中の渦鞭毛藻類と珪藻類の細胞数とした。(a) 1998 年と 1999 年、(b) 2000 年と 2001 年、(c) 1998~2001 年の観測データを用いて、それぞれ学習した後、2002 年の予測を行う。

図-4 は入力データとして湾口の水温を入れなかった場合で、学習データを部分的に使って計算した結果 (a) 及び (b) のケースでは、1998~2001 年の学習データを用いた (c) のケースの計算結果の予測精度が向上し、ニューラルネットワークのみを使用するより、カルマンフィルタを併用するによって予測値の精度が上がる事がわかる。

図-5 は入力データとして田辺湾口における表層と底層の水温差を考慮した場合で、入れなかった場合より精度が向上しているが、このケースも 1998~2001 年の全学習データを用いて、ニューラルネットワークとカルマンフィルタを併用する場合が計算の予測精度が向上している。

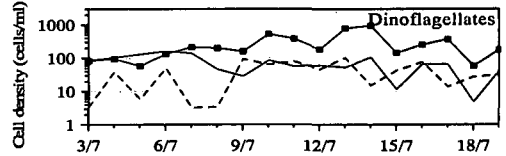
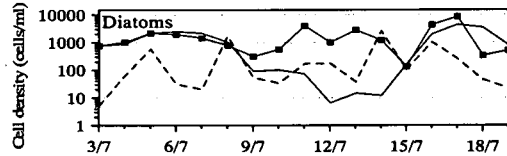
これにより、細胞数変動予測には、少なくとも、水温、塩分、溶存酸素、太陽放射量、降水量、気温を入力する必要がある、これらが湾への海水進入情報であると考えられる。湾口の表層と底層の水温差を追加すると、予測精度が向上することがわかる。

本モデルの導入によって、田辺湾における植物プランクトン細胞数変化の経時変化の予測がある程度可能となった。今後、湾内養殖環境テレメトリーから水温、

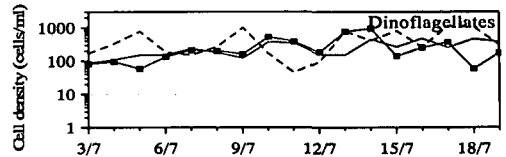
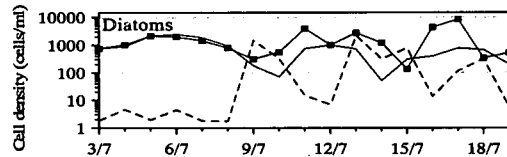
塩分、溶存酸素のデータを、太陽放射量、降水量、気温、および表層-底層水温差データを入力変数とするニューラルネットワーク予測にカルマンフィルタを併用するシステムを図-6のような形で運用し、実務レベルでの予測を行う。図-6では、田辺湾にある自然環境のモニタリングステーションで観測されたデータを用いて、リアルタイムの植物プランクトン予測システムを示してい

る。データはテレメトリーにより白浜観測所にある観測データベースシステムに保存する。予測方法としてはデータベースの容量、速度などによってカルマンフィルタのみ、ニューラルネットワーク及びニューラルネットワークとカルマンフィルタとを併用する方法を選択する。予測結果はテレメトリーで送信されてくる。観測値と比較して、次の予測に用いる。

a) 学習データ(1998,1999)



b) 学習データ(2000,2001)



c) 学習データ(1998~2001)

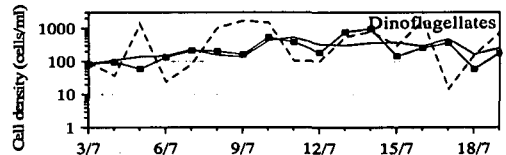
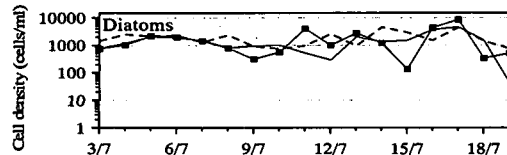
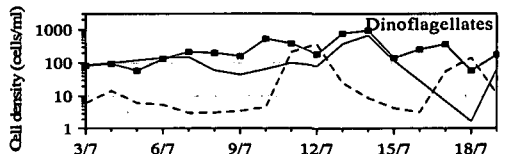
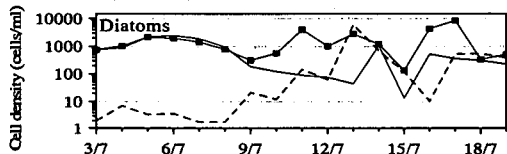
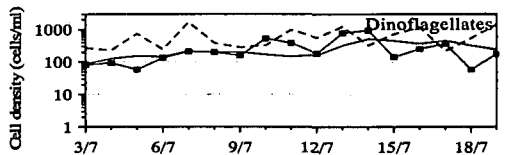
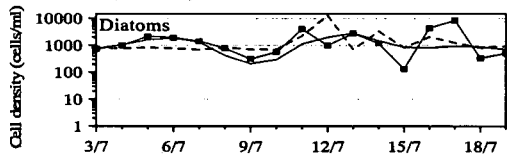


図-4 2002の植物プランクトンの予測値と観測値の比較。6つの入力データ(水温、塩分、気温、降水量、太陽放射量及び溶存酸素)を考慮することで予測した(—■—:観測値, ---:ニューラルネット, —:ニューラルネットワークとカルマンフィルタを組み合わせ)。

a) 学習データ(1998,1999)



b) 学習データ(2000,2001)



c) 学習データ(1998~2001)

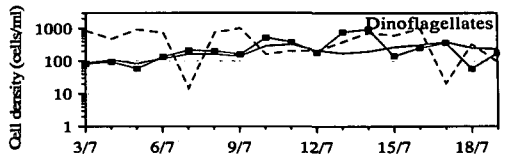
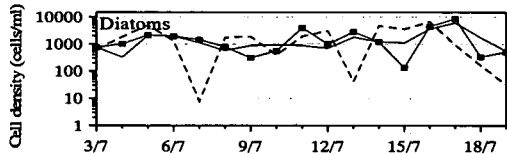


図-5 2002の植物プランクトンの予測値と観測値の比較。入力データ(湾口の表層と底層の水温差、水温、塩分、気温、降水量、太陽放射量及び溶存酸素)を考慮することで予測した(—■—:観測値, ---:ニューラルネット, —:ニューラルネットワークとカルマンフィルタを組み合わせ)。

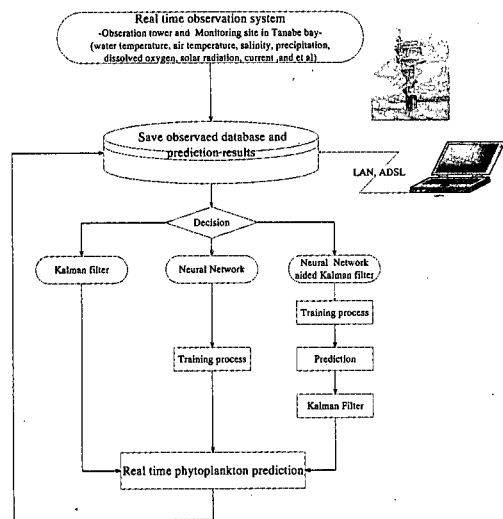


図-6 ニューラルネットワークとカルマンフィルタを組み合わせたリアルタイム植物プランクトン予測システムの模式図。

クロロフィル-aや栄養塩情報がテレメトリー入力できるようになれば、このシステムを用いて予測精度がさらに向上するはずである。

5. 結 語

田辺湾で観測された環境要因及び植物プランクトンの主成分分析を行った結果、栄養塩(PO_4 , SiO_2 , NO_2 , NO_3 , NH_4)は制限要因であることは十分考えられるが、これを入力変数に含めない場合でも、植物プランクトン細胞数変動予測がある程度可能なことがわかった。以上をま

とめると以下のようにある。

(1) 対象海域(湾奥)での水温、塩分、溶存酸素、太陽放射量、降水量、気温、および湾口での表面水温のテレメトリーデータを入力変数とするニューラルネットワークが、植物プランクトン細胞数変動予測の最適な予測結果を示す。

(2) さらに、2日前までの観測データとニューラルネットワークによる予測データを用いたカルマンフィルタを併用することで、予測値が安定し精度が向上する。学習期間は最も長い4年間が最適な予測結果となる。

(3) ニューラルネットワークとカルマンフィルタを組み合わせた田辺湾のリアルタイム植物プランクトン予測システムの模式図を提案した。

なお、本研究は科学研究費補助金(地域連携推進研究費(2), 11792015)の研究成果の一部である。

参 考 文 献

- 片山 徹(1986): 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店。
- 田中祐志・芹澤重厚・吉岡 洋・山下隆男・加藤 茂・山根 猛・土井 崇・菅原 亘(1999): 田辺湾における海象, 水質およびプランクトン個体数の観測: TOO+WAP 98, 防災研年報, 第42号B-2, 1999, pp. 415-420。
- 矢川元基(1992): ニューラルネットワーク, 塔風館。
- 吉岡 洋・芹澤重厚・高山知司・田中祐志(1998): 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, 第45巻, pp. 456-460。
- 朴 容佑・山下隆男(2002): 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, 第49巻, pp. 986-990。
- Rumelhart, D. E., G. E. Hinton, and R. J. Williams (1986): Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, Vol. 323, pp. 533-536。