

富栄養化水域における水質の短期的予測

Short-term Prediction of Water Quality in Eutrophic Waters

大島省吾*・藤田満士**・中津川誠***

By Shogo OHSHIMA, Mitsusi FUJITA and Makoto NAKATSUGAWA

It is commonly thought that eutrophication seldom occurs in water areas, such as rivers and lakes, in snowy cold regions because of the climatic conditions. However, this does not apply to water areas where the nutrient load is high and where the streams have stagnated.

To cope with unusual phenomena in such water areas, such as water bloom, it is necessary to measure water temperatures and observe chlorophyll-a concentrations continuously to make short-term predictions a few day later.

In this report, we try to predict the water quality after a few days using on-line information about chlorophyll-a concentrations from hourly measurements of the water temperature and by using a fluorescence spectrophotometer. Also, the weather forecast of the week and the Kalman filter are applied to the ecosystem model of water quality.

As a result, we confirm that it is possible to predict changes in chlorophyll-a.

Keywords: Short-term prediction of water quality, Chlorophyll-a,
Ecological model, Kalman filter, Weather forecast for a week

1. まえがき

積雪寒冷地の河川や湖沼などの水域は、その気象条件等から富栄養化現象は起こりにくいと考えられてきた。しかしながら、水域周辺から流入する栄養塩負荷が多く、水流の停滞する水域では、富栄養化現象のみられる個所もある。このような水域の適切な水質管理には、水質現象の連続的な観測(監視)、水質現象のメカニズムの解明と水質現象の予測(予測)、水質現象の発生要因の軽減および水質浄化対策(対策)、の3点が重要と考えられる。

多くの水域で行われている水質の定期的観測は、項目にもよるが一般に頻度が少ない。そこで、水質変化の詳細な把握には連続的な観測が望まれる。特に、クロロフィルaについては、著者ら¹⁾²⁾³⁾が蛍光光度計による連続観測を実施してきており、このような手法は富栄養化した水域の水質監視に有効と考える。

ところで、これまでの水質予測では数年先というような長期的視野で現象の推移をみて、それを計画論や各種施策に活用しようとするものが主体であった。この場合、流入量や気象といった各種境界条件の精度から、結果は実現象の予測というよりは、感度分析的な結果として解釈されるものであった。

一方、アオコの異常発生のような水質上の弊害については、管理者がそれをオンライン情報によって監視し、数日前にでもそれを予測できれば有効な対応を行うことが可能と考えられる。そこで、このような実現象予測としての短期的な水質予測を連続観測データを用いたうえで行うことを試みた。この手法の中では熱収支式や、水質のモデリングで一般に用いられている生態系モデル⁴⁾により、水温やクロロフィルa濃度の推算を行った。また、水温計や蛍光光度計から得られる毎時間の実測データから日平均値を求め、カルマンフィルター⁵⁾を用いて計算結果を修正しつつ数日先までの予測をおこなった。この時、境界条件となる気温や日射量は週間天気予報をもとに与えた。

*正会員	北海道開発局開発土木研究所環境研究室	室 員(062)	札幌市豊平区平岸1-3)
**正会員	北海道開発局開発土木研究所環境研究室	副 室 長(062)	札幌市豊平区平岸1-3)
***正会員	工博 北海道開発局開発土木研究所環境研究室	主任研究員(062)	札幌市豊平区平岸1-3)

2. モデル水域の概要

本研究のモデル水域として、石狩川水系千歳川流域にあるネシコシ排水池を設定した。図-1にネシコシ排水池の位置図を示す。ネシコシ排水池は、平成元年までに段階的に掘削が進められ、流下方向に約2,000m、横断方向に約130m、水深約1.5m、勾配1/4500の形状となっている。周辺の土地利用状況は畑地が多く、融雪による出水と灌漑期が一致する春期には栄養塩の流入が大きい。気象概況は、気温は夏期に30℃程度まで上昇し、冬期には-20℃程度まで低下する。降水量は年間1,000mmを越え、7~10月に多い。風速は、年間を通して5m/s以上で、夏期に南より冬期に北よりの風向が卓越している。池内は、水深に対して流下方向の距離が大きく水流が風の影響を強く受けるため、常時、混合状態にある。さらに、火山灰やシルト質を主体とした細粒成分が流入したり巻き上げられたりして水の濁りが顕著である。図-2にネシコシ排水池の観測状況を示す。

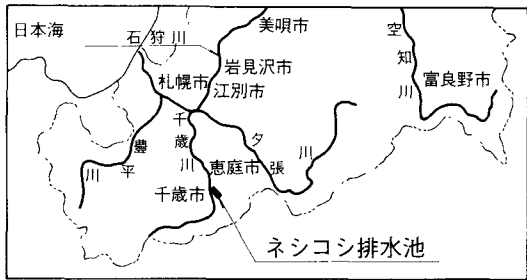


図-1 調査個所の位置

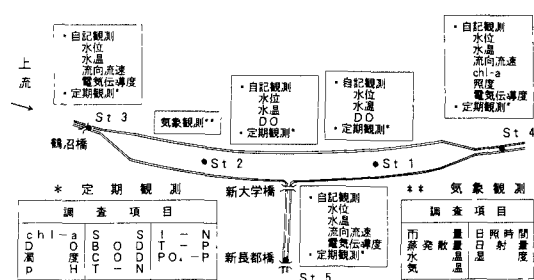


図-2 観測地点の位置と項目の内訳

3. クロロフィルaの連続観測

水域における水質監視には様々な方法があるが、本研究では富栄養化水域における植物プランクトンの変化の監視を中心におこなうことから、蛍光光度計を用いてクロロフィルaの連続観測をおこなった。ここでの観測値は、蛍光光度をクロロフィルaに換算することで得られるもので、定期的に室内分析の結果でキャリブレーションすることにより、植物プランクトンの日周変動を含めた詳細な変化を検出することができる。ただし、このままではクロロフィルの初期分解生成物であるフェオフィチンを含んだ値であるため、定期的にフェオフィチンを測定し、その影響を取り除くことによって精度の高い観測値を得ることが可能となった。図-3に1994年に蛍光光度計で得られたクロロフィルaを室内分析の結果と比較して示す。

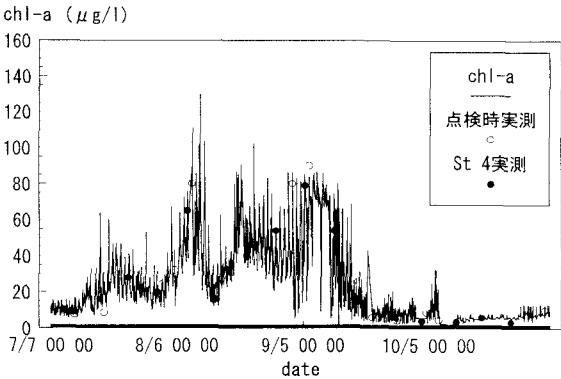


図-3 蛍光光度計による観測結果 (ネシコシ 1994年)

4. 水質のモデリングとパラメータの決定

モデル水域における水質現象のモデリングと、モデルパラメータの決定を各種調査試験結果から行った(6)7)。

4.1 水収支の把握

モデル水域は、大きく2つの流入水路と1つの流出水路で1つの系をなしている。このような水域の水質管理には、まず、水収支の的確な把握が重要と考えられる。そこで、各流入水路に自記水位計とともに自記電磁流速計を併設し、それをもとに流量を推定した。この時、自記電磁流速計のセンサーは、流量観測時のデータをもとに断面平均流速と最も相関の高い位置を選んで設置している。また、事前の測量により水位-容量(H-V)関係を求め、自記水位計を池内2地点に設置し、計測された水位から貯留量を推算している。図-4には、流入入から推定した貯留量と水位-容量関係から推定した貯留量を比較しているが、これから十分な精度で池内の水収支が把握できていることがわかる。

4.2 熱収支の把握

池内の水温変化を把握するため、池内の2カ所に自記水温計を設置し、連続測定を行った。水温計のセンサーは、鉛直方向の温度分布を測定するために、河床から0.2mの位置と、水面から0.2mの位置で水位変動に対応するようにして移動するように設置した。この結果、鉛直方向については水温差はみられず、水平方向には調査地点間(St.1とSt.2)で1~3℃の水温差が確認された。この結果よりモデルの構造を鉛直方向には1層、水平方向には3ボックスに分割した(各ボックス671m×130m)完全混合槽列モデルに決定した。

貯留量(m3)

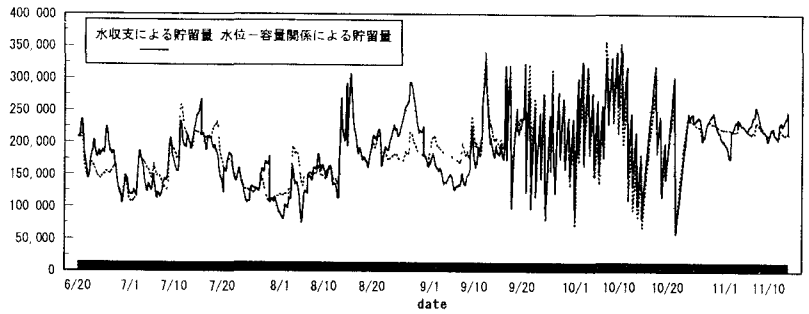


図-4 水収支の観測結果(ネシコシ 1994年)

4.3 水質成分の生成・消滅量の把握

池内の水質変化は図-2に示すように定期観測とともに自記観測をおこない把握した。それとともに、池内の水質成分の生成・消滅量を(1)藻類増殖(AGP)試験や(2)呼吸による藻類消滅試験、(3)光合成によるDO生産量試験、(4)COD物質によるDO消費率試験、(5)底泥物質によるDO消費率試験、(6)有機物分解試験、(7)底泥溶出試験、(8)沈降物試験といった試験をおこない、それらの結果からモデルパラメータを決定している。

このように得られた結果を総合化してモデル化し、水質現象の再現をおこなった。ここで用いたモデルの基礎式を表-1に示す。ここでは式(1)をみたすように水収支(貯留量、流出入量、降雨量、蒸発量)を明らかにし、式(2)、式(3)を数値的に解くことで、それぞれ水温、水質の変化を再現した。式(3)の中の変化項 $S(C)$ は植物プランクトンの増殖、死滅、各水質成分の生産・分

表-1 水収支・熱収支・水質成分収支の基礎式

$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_o + Q_g + A(R - E)/\Delta t \quad (1) \quad \bar{V} \frac{dT}{dt} = Q_i T_i - Q_o T_o + Q_g T_g + \frac{A}{\rho c_w} \phi \quad (2)$	
$\bar{V} \frac{dC}{dt} = L_i - L_o + L_g + \bar{V} F(C) \quad (3)$	
$F(C_{PP}) = (G_P - D_P)C_{PP} - v_P C_{PP}$	$G_P = \beta_S \mu_{max} \left\{ \frac{I}{I_S} \exp \left(1 - \frac{I}{I_S} \right) \right\}^3 \frac{S}{S_s} \exp \left(1 - \frac{S}{S_s} \right) \frac{C_{IN}}{K_{IN} + C_{IN}} \frac{C_{IP}}{K_{IP} + C_{IP}}$
$D_P = R_{PP} \theta_P^{T-20}$	$F(C_{DO}) = K_1(\bar{C}_{DO} - C_{DO}) + K_2(1 - \rho_{KP})G_P C_{PP} - K_3 C_{COD} - \gamma_{DO} \frac{A_s}{V}$
$F(C_{BOD}) = K_{BP} G_P C_{PP} - R_B \theta_B^{T-20} C_{BOD} + R_{WB} \theta_{WB}^{T-20} \frac{A_s}{V} - v_B C_{BOD}$	$F(C_{COD}) = K_{CP} G_P C_{PP} - R_C \theta_C^{T-20} C_{COD} + R_{WC} \theta_{WC}^{T-20} \frac{A_s}{V} - v_C C_{COD}$
$F(C_{SS}) = K_{SP} G_P C_{PP} - v_S C_{SS}$	$F(C_{IP}) = -\beta_P G_P C_{PP} - R_P \theta_P^{T-20} (C_{OP} - \beta_P C_{PP}) + R_{WP} \theta_{WP}^{T-20} \frac{A_s}{V}$
$F(C_{OP}) = \beta_P G_P C_{PP} - R_P \theta_P^{T-20} (C_{OP} - \beta_P C_{PP}) - v_{OP} (C_{OP} - \beta_P C_{PP}) - v_P \beta_P C_{PP}$	$F(C_{IN}) = -\beta_N G_P C_{PP} + R_N \theta_N^{T-20} (C_{ON} - \beta_N C_{PP}) + R_{WN} \theta_{WN}^{T-20} \frac{A_s}{V}$
$F(C_{ON}) = \beta_N G_P C_{PP} - R_N \theta_N^{T-20} (C_{ON} - \beta_N C_{PP}) - v_{ON} (C_{ON} - \beta_N C_{PP}) - v_P \beta_N C_{PP}$	
V 貯留量	Q 流量(下付iは流入, oは流出 qは地下水)
T 水温(下付iは流入, oは流出 qは地下水)	L 負荷量(下付iは流入 oは流出, gは地下水)
R 降雨量	E 蒸発量
A 水面積	ρ 水の密度
c_w 水の比熱	ϕ 大気-水面間の熱フラックス
S 日射量	C_{PP} クロロフィルa濃度
C_{SS} SS濃度	C_{BOD} BOD濃度
C_{COD} COD濃度	C_{IP} 無機態リン濃度
C_{OP} 有機態リン濃度	C_{IN} 無機態窒素濃度
C_{ON} 有機態窒素濃度	C_{DO} 溶存酸素濃度
$\bar{C}_{DO}$ 飽和溶存酸素濃度	β_s 植物のスペース効果係数
μ_{max} 植物の最大増殖速度	T_s 植物増殖の最適水温
S_s 植物増殖の最適日射量	K_{IN} 無機態窒素のMichaelis定数
K_{IP} 無機態リンのMichaelis定数	R_{PP} 20℃におけるchl-a消費率
θ_{PP} R_{PP} に対する温度係数	K_1 再曝気係数
K_2 20℃における光合成によるDO生産率	θ_{DO} K_2 に対する温度係数
K_3 COD物質によるDO消費率	γ_{DO} 底泥によるDO消費率
A _s 底泥面積	ρ_{KP} 植物の光合成速度に対する呼吸数
v 各水質成分の沈降率	R_B 20℃のときのBOD分解率
θ_B R_B に対する温度係数	R_C 20℃のときのCOD分解率
θ_C R_C に対する温度係数	R_P 20℃のときのO-PからI-Pへの変換率
θ_P R_P に対する温度係数	R_N 20℃のときのO-NからI-Nへの変換率
θ_N R_N に対する温度係数	R_{WB} BODの底泥からの溶出量
θ_{WB} R_{WB} に対する温度係数	R_{WC} CODの底泥からの溶出量
θ_{WC} R_{WC} に対する温度係数	R_{WP} I-Pの底泥からの溶出量
θ_{WP} R_{WP} に対する温度係数	R_{WN} I-Nの底泥からの溶出量
θ_{WN} R_{WN} に対する温度係数	K_{BP} 植物中のBODとchl-aの比
K_{CP} 植物中のCODとchl-aの比	K_{SP} 植物中のSSとchl-aの比
β_P 植物中のPとchl-aの比	β_N 植物中のNとchl-aの比

解、底泥からの溶出、底泥への沈降を考慮した、いわゆる生態系モデルを用いて定式化している。計算対象とした水質項目は、クロロフィルa(chl-a)、DO、BOD、COD、I-P、O-P、I-N、O-N、SSの9項目である。与えるデータは、気象データとして気温、湿度、日射量(日照時間)、風速、降雨量の5項目を、水文データとして、流出入量、貯留量を、さらに流出入にともなう水温を与えている。また、水質成分の流入負荷量は定期調査の結果をもとに、負荷量-流量(L-Q)関係式から与えている。

その結果、計算値は観測値の変化傾向を的確に再現できたことから、今回採用したモデルやパラメータが現地の水質現象を捉えるうえで十分妥当な値であることが検証された⁸⁾。

5. 水質の週間予測手法

水質現象の再現性を踏まえ、その短期的予測手法の検討をおこなった。ここでは日平均値に対する再現予測をおこなう。図-5に予測の手順を示す。

5.1 予測手法

予測にあたっては表-1の式(2)が水温、式(3)がクロロフィルaに関する基礎方程式となる。水温予測については、既に報告⁹⁾してあるので以下にクロロフィルaの予測手法を示す。

まず、ボックスkにおける

クロロフィルaの濃度に関する方程式を表-2の式(4)、(5)のようにあらわす。これを式(6)のように一般化し、ボックス構造を考えて、式(7)のようにマトリックス表示する。これは線形式として扱えるので容易に線形カルマンフィルターの適用が可能である。式(8)~(16)はカルマンフィルターの基礎式である。式(7)のような1階線形の微分方程式の解は、時間ステップmに対する漸化式(システム方程式)として式(8)のように与えられる。また、ここでの観測方程式、式(9)では蛍光光度計で連続的に計測されているクロロフィルaに基づく。今回の事例では、流出水路のSt.4で蛍光光度計によりクロロフィルaの実測値が毎正時得られており、その日平均値を最下流のボックス(ボックス3)のオンライン情報として入力することとなる。式(8)に基づく、状態変量伝達方程式(式(12))からいわゆるオフライン値 $C_m(-)$ が算出できる。

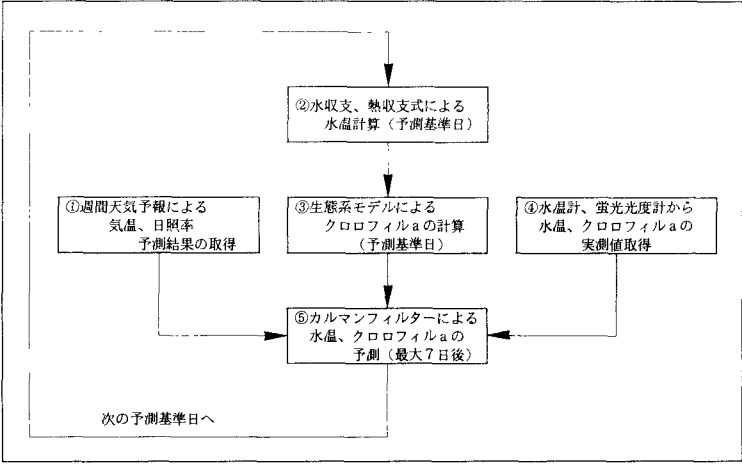


図-5 水温とクロロフィルaの予測手順

表-2 カルマン・フィルターによる chl-a 予測の基礎式

	$\frac{dC_k}{dt} = \frac{1}{V_k} [C_{k-1}Q_{k-1} - C_kQ_k + C_{yk}Q_{yk}] + F(C_k)$	(4)
	$F(C_k) = (G_p - D_p)C_k - v_p C_k$	(5)
	$\frac{dC_k}{dt} = a_k C_{k-1} + b_k C_k + x_k$	(6)
ここで	$a_k = \frac{Q_{k-1}}{V_k} \quad b_k = -\frac{Q_k}{V_k} + G_p - D_p \quad x_k = \frac{Q_{yk}}{V_k} C_{yk}$	
	$\frac{dC}{dt} = AC + X$	(7)
ここで	$C = [C_1 \ C_2 \ C_3]^T \quad A = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$	
システム方程式	$C_m = \Phi_{m-1} C_{m-1} + \Gamma_{m-1} X_{m-1}$	(8)
観測方程式	$z_m = H_m C_m + v_m, \quad H_m = [0 \ 0 \ 1]$	(9)
システム誤差	$E(w_m) = 0, \quad E(w_m w_m^T) = Q$	(10)
観測誤差	$E(v_m) = 0, \quad E(v_m v_m^T) = R$	(11)
状態変量伝達方程式	$C_m(-) = \Phi_{m-1} C_{m-1}(+) + \Gamma_{m-1} X_{m-1}$	(12)
状態変量の誤差分散・共分散の伝達方程式	$P_m(-) = \Phi_{m-1} P_{m-1}(+) \Phi_{m-1}^T + Q$	(13)
カルマンゲイン	$K_m = P_m(-) H_m^T [H_m P_m(-) H_m^T + R]^{-1}$	(14)
状態変量更新方程式	$C_m(+) = C_m(-) + K_m [z_m - H_m C_m(-)]$	(15)
状態変量の誤差分散・共分散の更新方程式	$P_m(+) = [I - K_m H_m] P_m(-)$	(16)

ここで、 C chl-a計算値、 $F(C)$ 生成消滅項、 G_p 生成項、 v_p 沈降項、 Q 流量、 V 貯留量、 D_p 消滅項、 z 観測値、 y 観測値、 v 観測誤差、 Φ 解の係数行列、 w システム誤差、 Q システム誤差分散共分散、 R 観測誤差分散、 P 誤差分散共分散行列、 K カルマンゲイン、 $(-)$ はオフライン値、 $(+)$ はオンライン修正値、下付 m は時間ステップ

これと観測値 z_m に基づき、状態変量更新方程式(式(15))で修正値となるオンライン値 $C_m(+)$ を算出し、それに基づき1日先毎の予測を7日先まで進めていく。オンライン更新の際の修正係数であるカルマンゲイン(式(14))を推定するために必要な状態変量の誤差分散・共分散は式(13)、(16)から与えられる。

5.2 予測の境界条件

ここで、水質予測の際に与える境界条件を整理する。始めに、流量と湿度、風速の実測値を予測開始日に与え、この条件が予測期間中は一定に続くものとした。また、大気水面間の熱フラックスの推定や生態系モデルの境界条件として気温、日射量が必要である。これについては、気象庁より毎日発表されている週間天気予報を利用した。図-6に石狩地方に出された予報日より3日後の気温の予報値と、モデル水域の近傍で観測された実測値の比較図を示す。この相関関係から予報値を当該地域の局所的な気温に換算して与えている。日射量は、八田ら¹⁰⁾の分類にしたがい天気パターンと日照率の関係から推定し、表-3のように予報された天気パターンから日照率を求め、日射量に換算している。このほか、流入水温は気温との相関関係から、流入負荷量は負荷量-流量($L-Q$)関係式から与えている。

6. 水質の予測結果

計算例として、クロロフィルaの変化の傾向など条件が違う1994年と1995年の例で検証した。case1は対象期間が1994年の7~9月の3カ月間で、気温が例年に比べ高いなどの条件で、植物プランクトンの増殖が盛んだったケースである。case2は対象期間が1995年の7~9月の3カ月間で、この期間は1994年の同期間と比べても、気温が低く、日照時間も短いなどの条件で植物プランクトンの増殖はあまりみられなかったケースである。

図-7、図-8にcase1、case2の予測結果を示す。その結果、クロロフィルaの変動が激しい場合は、多少ばらつ

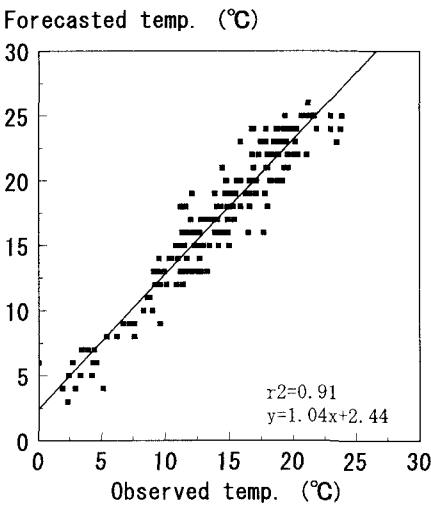


図-6 週間天気予報の気温予報値(3日後)とネシコシの気温実測値の比較

表-3 天気パターン別の日照率の平均値(1989~1991年, 札幌, 八田ら¹⁰⁾)

分類号	天気概況	日照率	分類号	天気概況	日照率	分類号	天気概況	日照率
1	晴	0.771	6	曇	0.264	11	雨	0.059
2	晴一時曇	0.521	7	曇一時晴	0.349	12	雨一時晴	0.269
3	晴後曇	0.507	8	曇後晴	0.366	13	雨後晴	0.346
4	晴一時雨	0.498	9	曇一時雨	0.163	14	雨一時曇	0.145
5	晴後雨	0.468	10	曇後雨	0.106	15	雨後曇	0.103

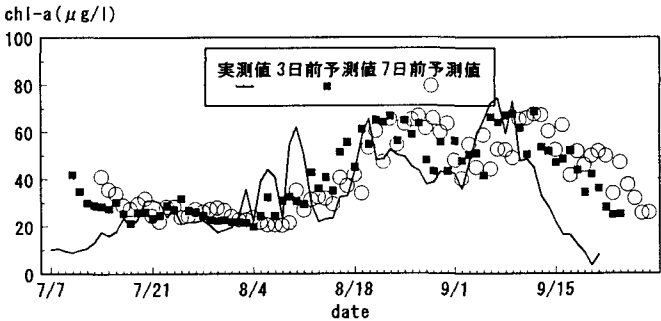


図-7 chl-aの予測結果(case1, 1994年)

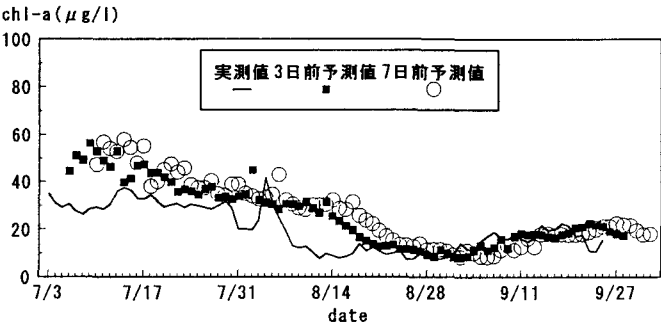


図-8 chl-aの予測結果(case2, 1995年)

きはあるもののその変動傾向を十分予測できている。ただし、流入負荷が卓越して水質変化が見られる場合などは、流入量、負荷量の予測をおこなっていない分精度が落ちている。また、クロロフィルaがそれほど変化しない場合は、今回予測をおこなった最大7日前の予測であっても精度の高い予測結果が得られた。これは内部生産など水質モデルのパラメータを現地調査や室内試験から綿密に決定し、十分にモデルの信頼性を高めておいたことによるものと考えられる。

今回の検証結果からカルマンフィルター理論を用いたクロロフィルaの数日後予測手法は、観測された連続データに基づき、その変動傾向を的確に予測できることが確認された。ただし、境界条件である流入量や負荷量などの不確定要因を、水文学的見地や対象地域の土地利用状態、土質条件などの負荷発生要因の見地から改善していくことが今後の課題と考える。

7. あとがき

本研究で得られた知見を以下に箇条書きにする。

- 1) 蛍光光度計により十分な精度でクロロフィルaの連続観測値が得られる。
- 2) 水質再現モデルにカルマンフィルターを適用し、数日後までの水質(クロロフィルa)予測が可能となった。
- 3) 水質予測の境界条件である気温、日射量の推定に週間天気予報の適用を図った。

本研究の意義としては、蛍光光度計を用いたクロロフィルaの連続観測手法や週間天気予報、カルマンフィルターを用いたクロロフィルaの短期間予測手法が富栄養化水域の水質現象の監視および予測に有効であることが確認できたことにある。

今後、水質成分の負荷量などの不確定要因の精度向上を目指すとともに、実際に現地の蛍光光度計と電話回線などを利用して、オンラインでパソコンに観測値を入力するなどして、リアルタイムでの水質予測に生かしていきたい。これによってアオコの発生や水質上の障害が予知できれば現場での体制づくりにも寄与できると考える。そのためには綿密な事前調査により、水収支、熱収支、現地条件にあった水質変化メカニズムの解明が不可欠であると言える。

参考文献

- 1) 佐藤徳人, 西村豊, 益塚芳雄: 蛍光光度法による藻類監視について, 土木学会北海道支部年次学術発表会論文集, pp.664~669, 第50号, 1994
- 2) 佐藤徳人, 西村豊, 益塚芳雄: 蛍光光度計による河川藻類の現地調査について, 開発土木研究所月報, pp.37~50, No.497, 1994
- 3) 佐藤徳人, 大島省吾: 蛍光光度計による藻類の連続監視について, 土木学会年次学術講演会概要集, pp.1310~1311, 第2部(B), 1995
- 4) 森北佳昭, 天野邦彦: 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, pp.1~109, 第182号-1, 1991
- 5) 星清: 洪水予測システムの基礎的検討(2), 開発土木研究所月報, pp.48~68, No.386, 1985
- 6) 大島省吾, 中津川誠: 停滞性水域における富栄養化の調査方法その1, 開発土木研究所月報, pp.32~37, No.505, 1995
- 7) 大島省吾, 中津川誠: 停滞性水域における富栄養化の調査方法その2, 開発土木研究所月報, pp.30~38, No.506, 1995
- 8) 大島省吾, 中津川誠, 佐藤徳人, 山崎真一, 船木淳悟, 平野令緒, 坂井一浩: 停滞性水路における水質現象の観測と解析, 土木学会北海道支部年次学術発表会論文集, pp.336~339, 第51号(B), 1995
- 9) 藤田満土, 中津川誠: 停滞性水路における水温の数日後予測, 土木学会年次学術講演会概要集, pp.1340~1341, 第2部(B), 1995
- 10) 八田茂実, 西村哲治, 嵯峨浩, 藤田睦博: 融雪流出予測における週間気象予報の利用について, 水工学論文集, pp.141~146, 第37巻, 1993