

半閉鎖性水域の水質予測に関する研究 (II)

山口県衛生公害研究センター (所長: 宮村恵宣)

溝田 哲・田中 克正・今富 幸也
古谷 誠治・山本 征治・松村 宏Studies on Simulation of Water Qualities
in Semi-closed Water area (II)

Satoshi MIZOTA, Katsumasa TANAKA, Yukiya IMATOMI

Seiji FURUTANI, Seiji YAMAMOTO, Hiroshi MATSUMURA

Yamaguchi Prefectural Research Institute of Health (Director: Dr. Shigenori MIYAMURA)

はじめに

湖沼など、半閉鎖性水域の富栄養化による水質汚濁については、対策が種々講じられている。しかし、いまだ決定的な方策はなく、水質の汚濁は進行しているのが現状である。

水質を保全するという観点からは、人間活動の変化がどの程度水質に影響を及ぼすかを事前に把握し、水質保全と人間活動の調和をはかり、水質の悪化を未然に防止する対策を講じることが必要である。

我々はこのような立場から、前報¹⁾では一の坂ダム湖を対象とした水質予測について報告した。今回は川上ダム湖についてその結果を報告する。

研究方法

1 対象ダム湖

徳山市の北部に位置する富田川水系の川上ダムを選んだ。

このダムは、1962年に多目的ダムとして建設されたもので、1972年に嵩上げ工事が開始され1980年に現在の形で完成したものである。その諸元を表1に、流域の土地利用状況を表2に示す。

2 対象期間

1986年～1989年の4年間としたがうち1987年及

表1 川上ダムの諸元

諸元	内容
位置	徳山市川上
湛水面積 (km ²)	0.62
総貯水量 (千m ³)	13,720
有効貯水量 (千m ³)	13,500
平均水深 (m)	21.8
年間回転数 (回/年)	9.1
集水面積 (km ²)	22.2
流入河川	富田川

表2 川上ダム流域の土地利用状況

全流域面積	市街地	山林	畑	水田
26.09 km ²	17.1%	77.0%	0.5%	5.4%

び1988年の1月から4月のデータがなかったのでこの間は省いた。

3 対象項目及び予測の目標

以下のとおりいずれも前報と同様である。

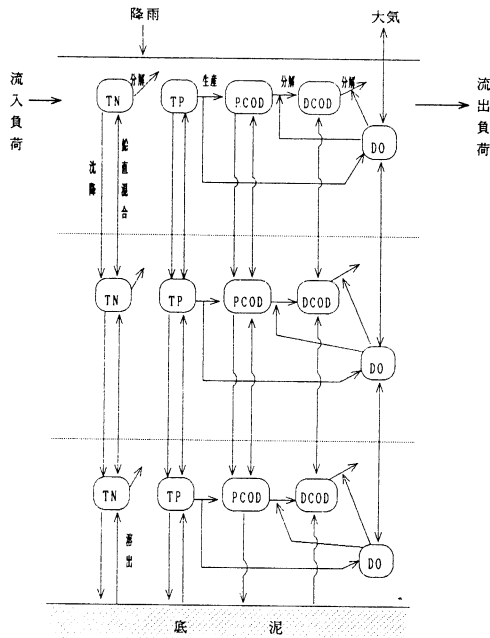


図1 ボックスモデルの構造概念図

(COD, TO, TPモデル)

上層 (0~H^um)

$$V^u \cdot \frac{dC^u}{dt} = C_{in} - V_{out} \cdot C^u + \left[CA^u + q^u \cdot \frac{C^* - C^u}{0.5H_s^1 \cdot H^u} \right] \cdot V^u - SP^u \cdot \frac{SSX^u}{H^u} \cdot V^u$$

$$COD^u = DCOD^u + PCOD^u$$

中層 (H^u~H^u+H^mm)

$$V^m \cdot \frac{dC^m}{dt} = \left[CA^m + q^m \cdot \frac{C^u - C^m}{0.5H_s^1 \cdot H^m} + q^m \cdot \frac{C^l - C^m}{0.5H_s^2 \cdot H^m} \right] \cdot V^m + \left[SP^u \cdot \frac{SSX^u}{H^u} - SP^m \cdot \frac{SSX^m}{H^m} \right] \cdot V^m$$

$$COD^m = DCOD^m + PCOD^m$$

下層 (H^u+H^m~H^u+H^m+H^lm)

$$V^l \cdot \frac{dC^l}{dt} = \left[CA^l + q^l \cdot \frac{C^m - C^l}{0.5H_s^2 \cdot H^l} \right] \cdot V^l + \left[SP^m \cdot \frac{SSX^m}{H^m} - SP^l \cdot \frac{SSX^l}{H^l} \right] \cdot V^l + R \cdot SA$$

$$COD^l = DCOD^l + PCOD^l$$

(DOモデル)

上層 (0~0~H^um)

$$V^u \cdot \frac{dC^u}{dt} = C_{in} - V_{out} \cdot C^u + \left[CA^u + q^u \cdot \frac{C^* - C^u}{0.5H_s^1 \cdot H^u} + KA \cdot \frac{C_{sat} - C^u}{H^u} \right] \cdot V^u$$

中層 (H^u~H^u+H^mm)

$$V^m \cdot \frac{dC^m}{dt} = \left[CA^m + q^m \cdot \frac{C^u - C^m}{0.5H_s^1 \cdot H^m} + q^m \cdot \frac{C^l - C^m}{0.5H_s^2 \cdot H^m} \right] \cdot V^m$$

下層 (H^u+H^m~H^u+H^m+H^lm)

$$V^l \cdot \frac{dC^l}{dt} = \left[CA^l + q^l \cdot \frac{C^m - C^l}{0.5H_s^2 \cdot H^l} \right] \cdot V^l$$

図2 ボックスモデルのモデル式

(1) 汚濁負荷流入量

COD, TN, TPの3項目とした。これらの流入負荷量については実測データが得られないので、流入河川の水質を対象とし、日単位の再現を予測の目標とした。従って、予測結果と実測値の比較も日単位である。

(2) ダム湖の水質

COD, TN, TP, DOの4項目とした。日単位の再現を予測の目標とした。従って、予測値と実測値の比較も日単位である。

4 予測の方法

予測には数理モデルを用いた。前報と同様に、

- (1) ポルートグラフシミュレーションモデル
- (2) ダム湖の水質予測モデル

表3-1 式中の変数・定数

CA	: 各層、各項目の水質変化 (表3-2)
C	: 水質濃度 (g/m ³)
V	: 各層の容量 (m ³)
q	: 鉛直混合係数 (m ² /日)
DCOD	: 溶存態COD (g/m ³)
PCOD	: SS態COD (g/m ³)
SSX	: 各項目のSS態の量 (g/m ³)
TP	= (PCOD · TRC) / 143
TN	= (PCOD · TRC) / 19.7
DCOD = 0	
PCOD = 1.0	
V _{in}	: 流入水量 (m ³ /日) = 流域流入水量 + 降雨量
C _{in}	: 総流入負荷量 (g/日) = 流域流入負荷量 + 降雨からの負荷量
H	: 各層の層厚 (m)
H _s ¹	: H ^u + H ^m
H _s ²	: H ^m + H ^l
SP	: 沈降速度 (m/日) = SPP · SPX ^{T-T_s} (SPX: 1.03)
R	: 溶出量 (g/m ² /日)
TN	: RN1 · exp {RST · (T - T _s)}
RN1	: 0.02 RST: 0.0367
TP	: RP1 · exp {RST · (T - T _s)}
RP1	: 0.003 RST: 0.0367
DCOD	: RC1 · exp {RST · (T - T _s)}
RC1	: 0.01 RST: 0.0367
SA	: 層面積 (m ²)
V _{out}	: 流出水量 (m ³ /日)
V _{in}	: 流入水量 (m ³ /日)
T	: 水温 (°C)
KA	: 再バツ気係数 (m/日) = K ₂ × H ₂ H ₂ : 表層バツ気層厚 (0.5m)
C _{sat}	: 飽和酸素濃度 (g/m ³) = 475 / (33.5 + T) ⁽¹¹⁾ T: 水温

表 3-2 各項目の水質変化 (CA)

$TP : CA = 0$
 $TN : -K_N \cdot C_{IN}$
 $K_N : TN \text{ の減少速度係数 (1/日)}$
 $= K_{IN} \cdot \exp \{ FC \cdot (T - T_s) \}$
 $K_{IN} = 0.0005 \quad FC : 0.0693 \quad T_s : 20^\circ C$
 $C_{IN} : TN \text{ 中の無機態N}$
 $= TN - (PCOD \cdot TRC) / 19.7$
 $TRC : COD \text{ の TOD への変換係数}$
 $= TOD / COD = 2.43 \text{ (実測値より)}$
 $DCOD : -K_{CD} \cdot C_{DCOD} + K_{CP} \cdot C_{PCOD}$
 $K_{CD} : DCOD \text{ 減少速度係数 (1/日)}$
 $= K_C \cdot \exp \{ FC \cdot (T - T_s) \}$
 $K_C = 0.01 \quad FC : 0.0693 \quad T_s : 20^\circ C$
 $PCOD : -K_{CP} \cdot C_{PCOD} + K_P \cdot TOD_P - 0R \cdot K_P \cdot TOD_N$
 $K_{CP} : PCOD \text{ 減少速度係数 (1/日)}$
 $= K_C \cdot \exp \{ FC \cdot (T - T_s) \}$
 $K_C = 0.05 \quad FC : 0.0693 \quad T_s : 20^\circ C$
 $TOD_P : TP \text{ のプランクトン 態への換算濃度 (g/a}^3) \text{ } 143 \cdot TP$
 $TOD_N : TN \text{ のプランクトン 態への換算濃度 (g/a}^3) \text{ } 19.7 \cdot TN$
 $K_P : PCOD \text{ 生産速度係数 (1/日)}$
 $= \mu_T \cdot \mu_1 \cdot \mu_c \cdot \mu_{ax}$
 $\mu_T = \left[\frac{T}{T_s} \cdot \exp \left(1 - \frac{T}{T_s} \right) \right]^2$
 $\mu_1 = \frac{e}{K_s \cdot H} (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0})$
 $\alpha_0 = \frac{1}{1s} \quad , \quad \alpha_1 = \alpha_0 \cdot e^{-K_s \cdot H}$
 $K_s = a + b \cdot PCOD$
 $a = 0.25, \quad b = 0.047$
 $\mu_c = \frac{TN}{K_{an} + TN} \cdot \frac{TP}{K_{sp} + TP}$
 $DO : (K_P \cdot TOD_P / TRC - K_{CD} \cdot C_{DCOD} - K_C \cdot C_{DCOD}) \cdot FOC$
 $FOC : COD \text{ の } O_2 \text{ への換算係数} = 3mgO_2 / mgCOD$

の二つのモデルから成る。

ポルトグラフシミュレーションモデルは、浮田等^{2, 3)}が提案したものであり、原単位法による発生負荷量の予測、汚濁負荷流出タンクモデル及び流出水量予測のタンクモデルとから成る。

ダム湖の水質予測モデルは、図1、2及び表3に示す構造を持つボックスモデルで、文献^{4~9)}を参考にして組み立てた。予測対象項目のうちCODはPCOD (SS態)とDCOD (溶存態)に分けた。

今回対象としたダム湖も、一の坂ダム¹⁾と同様にその水質が過去の調査資料から水平方向には均一として扱え、水深方向は季節的に安定な成層が出来ることがわかっているので、1ボックス3層モデルとした。

5 計算方法

タンクモデル、汚濁負荷流出モデル及びボック

スモデルの計算は、前報で報告した水質予測システムを用いて、いずれもタイムステップ0.25日で行った。降雨量などの入力データは、計算期間分の実測値を用いた。汚濁負荷流出モデルの出力結果は、予測目標を考慮して水質濃度とした。ボックスモデルの流入水質及び流入水量は、ポルトグラフシミュレーションの結果を計算期間分の日データとして用いた。水温、再曝気係数、鉛直混合係数、日射量は月平均値とし、1年分の値を繰り返し用いた。

6 用いた資料

原単位による排出負荷量は、山口県の流域別基本フレーム (1988) を利用した。降雨量及び流入水量の実測データ (日データ) は、ダム管理事務所の測定値¹¹⁾を利用した。実測水質データは、当所が1986~1989年に月1回調査した測定値を用いた。ダム湖の水質は湖心の測定値である。

7 パラメータの設定

ポルトグラフシミュレーションについて、一の坂ダム¹⁾で求めたものの利用を試みたが、かけはなれた結果が得られたので新たに文献値^{4~10)}を参考にし、予測期間の最初の2年間の実測値を再現するように、試行錯誤により決定した。その一部を表4に示す。ボックスモデルについても同様に求め、表5に示した。

表 4 汚濁負荷流出モデルのパラメータ (吸着・脱離速度係数)

	タンク A		タンク BCD		
	K _{A1}	K _{A2}	K _B K _C K _D	r	S C ₀
COD	8.5 (0.02)	0.3 (0.2)	2.5 (0.1)	0.25 (0.05)	1.0 (0.5)
TN	0.05 (0.1)	0.1 (0.3)	0.018 (2.5)	0.015 (0.008)	0.25 (1.0)
TP	6.0 (0.05)	1.0 (0.25)	0.05 (0.1)	0.001 (0.015)	0.2 (0.25)

注: 下段の () 内は一の坂ダムのものである。

表5-1 ボックスモデルのパラメータ
(層厚・生産速度係数等)

上層厚 (m)	4.0
中層厚 (m)	8.0
下層厚 (m)	10.0
上層面積 ($\times 10^6 \text{ m}^2$)	0.62
中層面積 ($\times 10^6 \text{ m}^2$)	0.41
下層面積 ($\times 10^6 \text{ m}^2$)	0.31
沈降速度係数 (m/日)	0.4
最適日射量 ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{日}$)	310
最適温度 ($^{\circ}\text{C}$)	18.0
半飽和定数 (N)	0.02
半飽和定数 (P)	0.005
最大生産速度 (上層)	1.5
最大生産速度 (中層)	0
最大生産速度 (下層)	0

表5-2 ボックスモデルのパラメータ
(鉛直混合係数: $\text{m}^2/\text{日}$)

	上中層	中下層	上中層	中下層
1月	15.5	8.5	7月	0.1
2月	18.5	10.5	8月	0.3
3月	14.5	4.5	9月	3.5
4月	6.5	0.5	10月	4.5
5月	2.5	0.1	11月	8.5
6月	0.5	0.05	12月	12.5

表5-3 ボックスモデルのパラメータ
(水温: $^{\circ}\text{C}$)

1月	上層	中層	下層
1月	10.4	10.2	10.1
2月	8.4	7.9	7.8
3月	7.6	7.3	7.1
4月	13.8	8.8	7.9
5月	17.4	11.8	13.6
6月	21.5	11.2	8.7
7月	19.6	12.3	8.6
8月	27.6	15.3	9.0
9月	25.5	19.0	12.2
10月	21.8	20.6	13.4
11月	16.5	16.1	16.0
12月	13.7	13.6	13.6

表5-4 ボックスモデルのパラメータ
(日射量: $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{日}$)

1月	188	4月	360	7月	349	10月	252
2月	213	5月	345	8月	403	11月	213
3月	266	6月	290	9月	296	12月	112

表5-5 ボックスモデルのパラメータ
(再曝気係数: m/日)

1月	3.5	4月	3.4	7月	1.2	10月	4.3
2月	3.5	5月	1.8	8月	1.3	11月	4.3
3月	3.5	6月	1.0	9月	2.5	12月	4.3

表5-6 ボックスモデルのパラメータ
(初期値: mg/l)

	上層	中層	下層
PCOD	0.2	0.1	0.3
DCOD	1.1	0.9	0.9
TN	0.32	0.33	0.54
TP	0.02	0.042	0.034
DO	9.4	9.4	4.9
COD	2.5	2.4	3.8

結果及び考察

結果を図3~6及び表6, 7に示す。

(1) 流入水量について

計算値と実測値の適合の目安は、前報と同様に相関係数とした。

図3を見ると計算値と実測値の間に大きな違いのみられるところもあるが、相関係数0.89が得られ、全体として満足できる結果と考えられる。

(2) 流入水質について

計算値と実測値の適合の目安は、前報と同様に

表6 流入水質予測結果

	COD	TN	TP
相関係数	0.62	0.75	0.64
実測値の平均値(mg/l)	1.68	0.66	0.033
計算値の平均値(mg/l)	1.28	0.69	0.032
適合範囲の割合 (%)	86.2	100	89.7

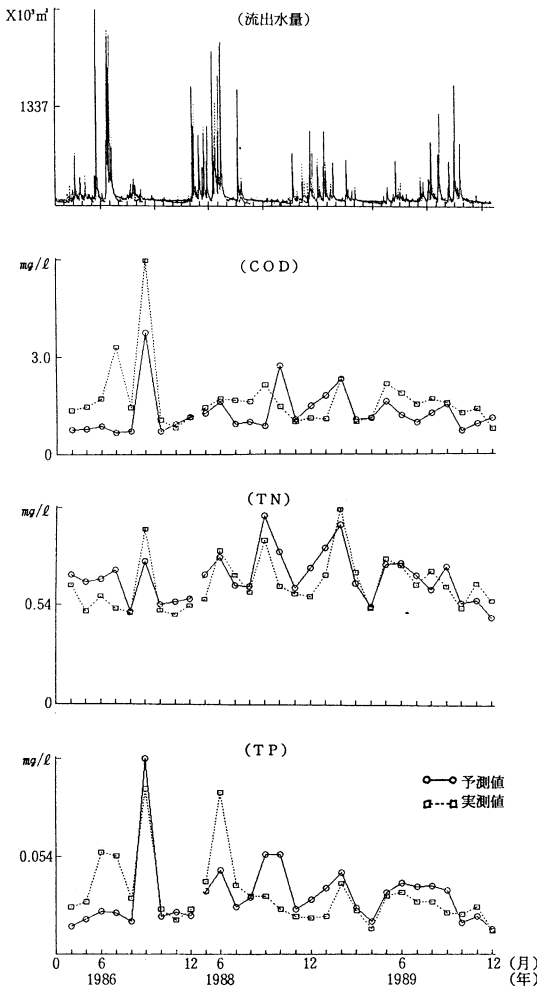


図3 ポルトグラフシュミレーションの結果

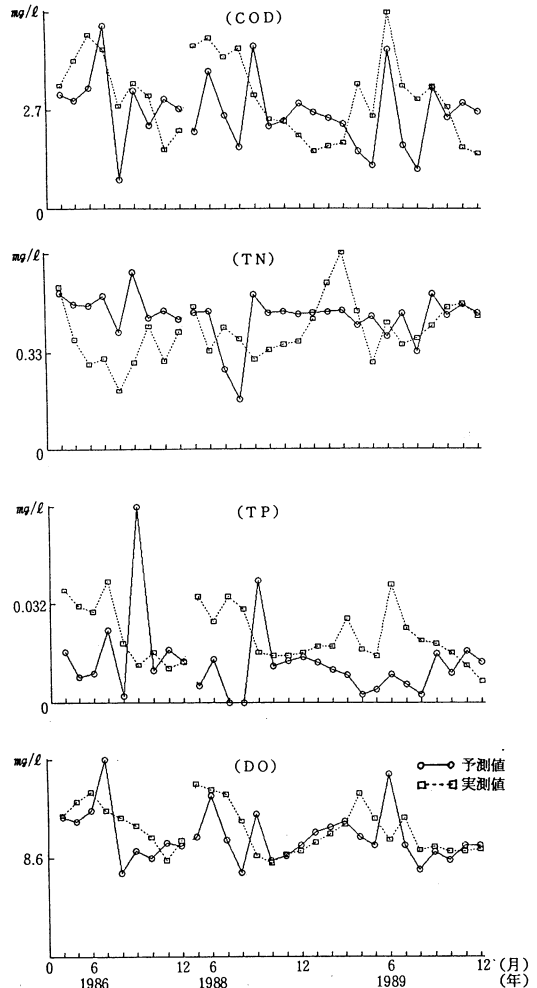


図4 ダム湖の水質予測結果(上層)

表7 ダム湖の水質予測結果

		COD	TN	TP	DO
上層	相関係数	0.31	0.00	-0.27	0.34
	実測値の平均値(mg/l)	3.1	0.40	0.021	11.1
	計算値の平均値(mg/l)	2.7	0.45	0.013	10.5
	適合範囲の割合 (%)	79.3	93.1	48.3	100
中層	相関係数	-0.22	0.10	-0.15	0.88
	実測値の平均値(mg/l)	2.0	0.50	0.017	8.3
	計算値の平均値(mg/l)	2.6	0.55	0.023	7.9
	適合範囲の割合 (%)	93.1	100	51.7	100
下層	相関係数	0.43	0.47	0.45	0.89
	実測値の平均値(mg/l)	2.4	0.81	0.048	5.2
	計算値の平均値(mg/l)	2.2	0.69	0.047	5.4
	適合範囲の割合 (%)	93.1	89.7	72.4	89.7

相関係数と平均値及び次の条件(適合範囲)とした。

$$\text{計算値} \times 0.5 \leq \text{実測値} \leq \text{計算値} \times 2.0$$

これは前報とは少し異なるが、文献¹²⁾を参考にこのようにした。

図3及び表6から、値のレベル及び相関係数ともにもまずまずの結果が得られたと考える。

(3) ダム湖の水質について

適合の目安は、(2)と同じものを用いた。平均値(表7)を見ると、表層と中層のTPを除いて計算値と実測値はほぼ一致している。適合範囲の割合(表7)を見ると、COD・TN・DOはいずれも約80%以上が適合範囲に入っている。TPは、下層で72%と良いが、上層にいくほど悪くなる。

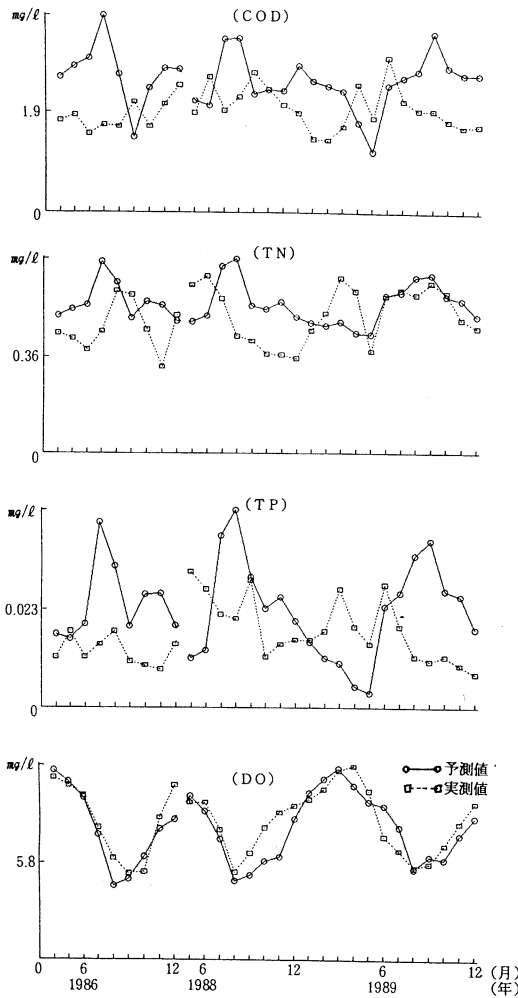


図5 ダム湖の水質予測結果(中層)

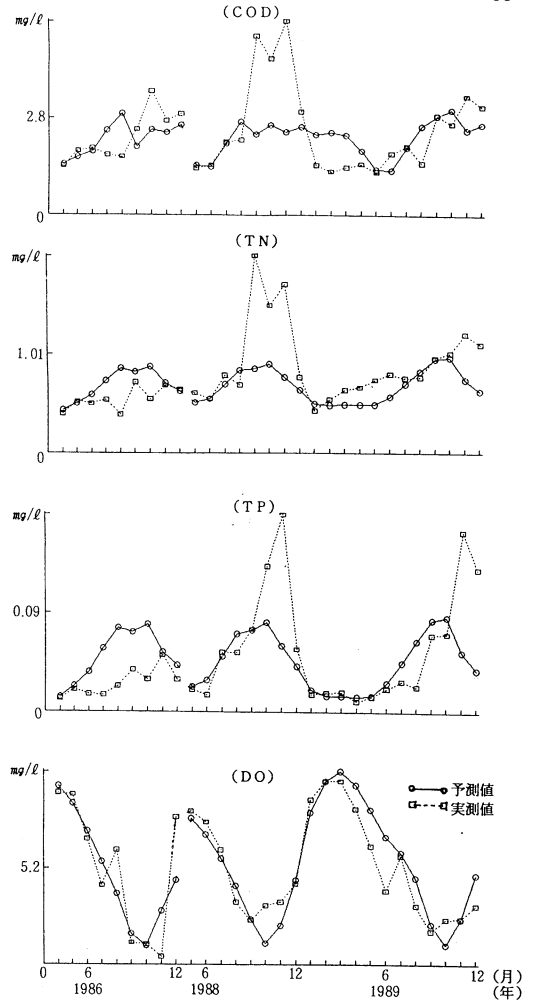


図6 ダム湖の水質予測結果(下層)

相関係数(表7)は、どの項目も満足できるものではないが、下層が一番大きい。以上から、値のレベルはTPを除き、実用的にはほぼ満足できる結果が得られたと考えられる。しかし、変動パターンの再現性は前報と同様に下層を除き満足できる結果ではない。この問題点として、気温、日射量、再曝気係数、鉛直混合係数に月平均値を用いているにもかかわらず日単位の再現を求めたこと、モデルそのものの適合性が考えられる。前者は上層になるほど変動の再現性が悪いことに現れていると思われる。しかし、これらの値を日単位で用いるとすれば、これらの将来予測もしなければならず水質の予測以上に困難である。従って、予測

の目標は月平均値とするのがよいと考えられる。

まとめ

前報で報告した汚濁負荷流入量の予測からダム湖の水質予測までの、一連の半閉鎖性水域の水質予測システムを利用して、川上ダムを対象とした水質予測を試み一応の成果を得た。特に汚濁負荷流入量の予測では満足できる結果が得られた。ダム湖の水質予測では、前報と同様に変動パターンの再現性が悪く、これを実用的なレベルにすることが今後の大きな課題である。

最後に、予測モデル等についてご指導いただいた山口大学工学部教授浮田正夫博士に深謝いたし

ます。また、流入水量などのダムに関する資料を快く提供していただいた川上ダム管理事務所の方々に感謝いたします。

文 献

- 1) 溝田哲, 田中克正, 今富幸也ほか: 山口県衛生公害研究センター業績報告. 11, 83~88 (1990)
- 2) 関根雅彦, 浮田正夫ほか: 衛生工学研究論文集. 22, 103~109 (1986)
- 3) 厚東川水系水質保全対策推進協議会: 専門委員会調査研究結果報告書. 198~207 (1988)
- 4) 浮田正夫, 中西弘ほか: 土木学会論文集, 357 (II-3), 235~242 (1985)
- 5) 山本務ほか: 香川県公害研究センター所報. 12, 29~36 (1987)
- 6) 田中鉄次郎, 沖野外輝夫: 諏訪湖集水域生態系研究第1号. 73~90 (1978)
- 7) 沖野外輝夫ほか: 諏訪湖集水域生態系研究第7号. 63~68 (1981)
- 8) 細見正明, 須藤隆一: 国立公害研究所研究報告. R-117-' 88, 87~107 (1988)
- 9) (社) 日本水質汚濁協会編: 湖沼水質管理指針策定調査. 90~100 (1985)
- 10) 松岡浩爾, 細見正明: 国立公害研究所研究報告. R-20-' 81, 82 (1981)
- 11) 山口県川上ダム管理事務所: 川上ダム管理年表. (1986~1989)
- 12) 奥川光治ほか: 水質汚濁研究. 14 (6), 385~394 (1991)