

印旛沼・手賀沼の水質シミュレーションモデルの改良

平間 幸雄

1 はじめに

印旛沼・手賀沼は、湖沼法の指定湖沼となっており、千葉県は、平成13年度に第4期湖沼水質保全計画（計画期間：平成13年度～17年度）の策定を行った。

同計画の策定に当たり、県水質保全課と共同で水質シミュレーションモデルの改良について検討を行ったのでその概要を報告する。

2 結果^{1),2)}

2.1 排出負荷原単位の検討

水質シミュレーションを行うためには、まず流域に排出される汚濁負荷量を推定する必要がある。そのため、水質シミュレーションモデルの検討に先立ち、負荷量の算定に必要なCOD、全窒素、全りん

の排出負荷原単位について検討を行った。

処理水質等の実測調査を行ったが、合併処理浄化槽、単独処理浄化槽ともに3期計画での値と大きな差はなく、また3期計画採用値は他の湖沼での採用値の変動範囲内に入っていてほぼ妥当なものと考えられることから、変更は行わなかった。

面源負荷原単位の内、畑地を例として各湖沼での採用値の分布を図1に示す。これ以外についても、印旛沼・手賀沼の第3期湖沼水質保全計画において採用された原単位の値は、他の湖沼での採用値の変動範囲内に入っており、概ね妥当なものと考えられる。そのため、山林の原単位算定に用いた水質データの一部に畑地の影響を受けているとみられるものがあつたため、それらを除いた以外は、降水量平年値の改訂に伴う面源負荷原単位の更新のみにとどめ、大きな変更は行わなかった。

4期計画で採用された排出負荷原単位の値を表1に示す³⁾。

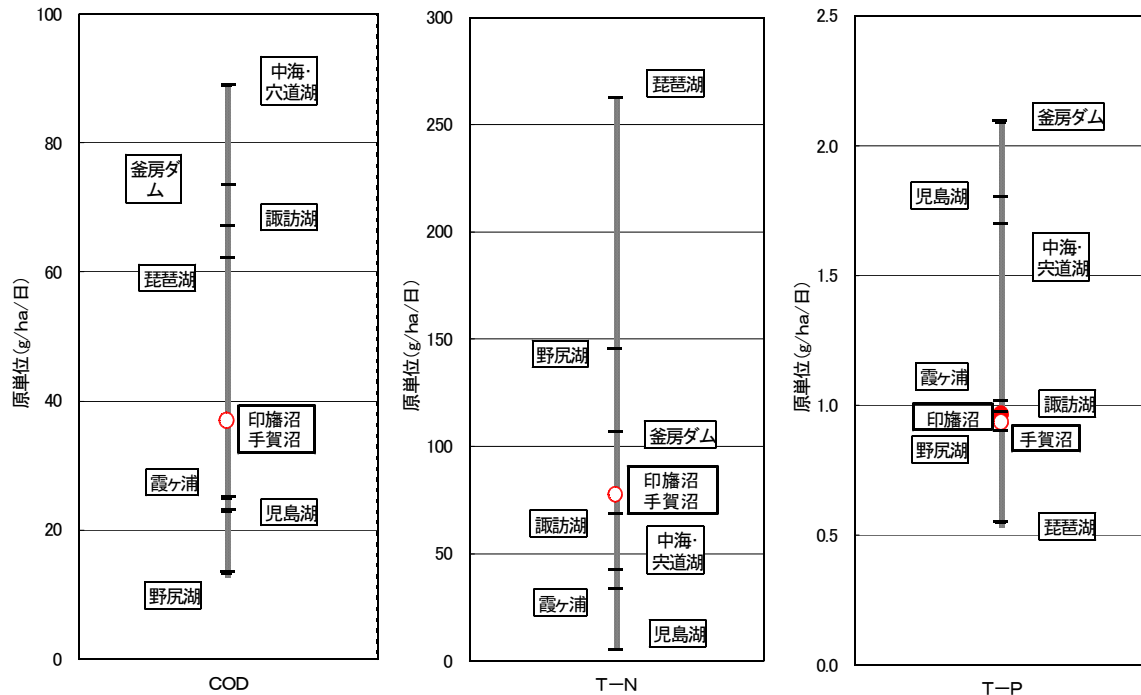


図1 指定湖沼の排出負荷原単位の比較（畑地）

注) 印旛沼・手賀沼のCOD及びT-Nは同値である。

表1 印旛沼・手賀沼の第4期湖沼水質保全計画策定に係る原単位³⁾

区 分			項 目	単 位	COD	T - N	T - P
発 生 原単位	点源	生活系	し 尿	g / 人・日	10.1	9.0	0.77
			雑排水		19.2	3.0	0.40
			合 計		29.3	12.0	1.17
	畜産系	牛・馬	g / 頭・日	530	290	50	
		豚		130	40	25	
排 出 原単位	点源	生活系	合併処理浄化槽	g / 人・日	3.3	6.5	0.67
			単独処理浄化槽		22.3	7.5	0.80
			し尿処理場		19.2	3.0	0.40
			自家処理		19.2	3.0	0.40
		畜産系	牛・馬	g / 頭・日	7.4	4.1	0.70
			豚		2.6	0.8	0.50
	面源	降 雨		g / ha・日	73.4	22.0	0.73
		市 街 地 等			115	33.5	1.70
		山 林			39.9	10.0	0.33
		畑 地	印旛沼		45.0	94.5	1.10
			手賀沼		45.0	94.2	1.04
		水 田	印旛沼		113	30.8	3.42
			手賀沼		125	32.6	3.56

2.2 水質シミュレーションモデルの改良

水質予測の精度を向上させるため、3期計画策定に使用したモデル⁴⁾の改良を行い、4期計画の策定に使用した。主な改良点は以下のとおりである。

- ① 従来、流入水量、気象条件は月平均値を用い、負荷量は導水による負荷を除き年間を通じて一定としていたが、より細かく日単位で設定した。
- ② 空間分割を、従来の5ボックスから、印旛沼では200m、手賀沼では100m間隔の格子でそれぞれ約270及び540のメッシュに細分化した。
- ③ 植物プランクトンの種類を、従来の藍藻、珪藻に緑藻を加え、3種類とした。

今回作成したモデルの概要を以下に示す。

(1) 排出負荷量算定システム

フレームデータ、排出負荷原単位などの編集およびこれらのデータからブロック別（流域別・市町村別）排出負荷量の算出を行うサブシステムである。

(2) 流入水量・負荷量算定システム

本システムは、ブロック別に算出された排出負荷量を流域別に集計し、沼に流入する1日ごとの水量・負荷量を推計するサブシステムである。算出手順の概要は以下のとおりである。

- ① 年間排出負荷量の算出（排出負荷量算定システムによる）

- ② 流達率と年間流入負荷量の設定（流達率は1とする。ただし、河川浄化施設、取水などによる除去負荷量は、排出負荷量から差し引く。）

- ③ 公共用水域水質調査結果からL-Q式（流量と負荷量の関係式）を設定

- ④ 降雨データから日流量の計算（タンクモデルによる；実測値と比較して検証する）

- ⑤ ③と④の結果を用いて日負荷量を計算する。

- ⑥ ⑤で得られた日負荷量合計に対する、②で得られた年間負荷量の比率を求める。

- ⑦ ⑥で得られた比率を補正係数として⑤で得られた日負荷量に乗ずる。

日流量は、印旛沼流域および手賀沼流域をそれぞれ9流域に分割し、各流域ごとに降雨量、蒸発散量から4段タンクモデルを用いて計算を行った。降雨量は佐倉および我孫子の値を用いた。タンクモデルのパラメータは計算結果と河川の流量の実測値を比較して調整した。

(3) モデルの構造

モデルの構造は3期計画策定に使用したもの⁴⁾とほぼ同じであるが、近年、緑藻類が優占する時季がみられるため、植物プランクトンの種類を、従来の藍藻、珪藻に緑藻を加え、3種類とした。

本報告で用いたモデルは、生態系モデルのうちの物質循環モデルである⁵⁾。状態変数としたのは、クロロフィルa（藍藻、珪藻、緑藻）、非生物態COD、非生物態有機態窒素、無機態窒素、非生物態有機態りん、無機態りんの各濃度で、考慮に入れた物

質循環過程は、植物プランクトンの生産、細胞外分泌、呼吸、枯死、および沈降、有機物の分解、有機物の沈降、COD、窒素、りんの底泥からの溶出などである。モデル化した沼内の物質循環過程の概略を図2に、物質収支式を表2に示す。

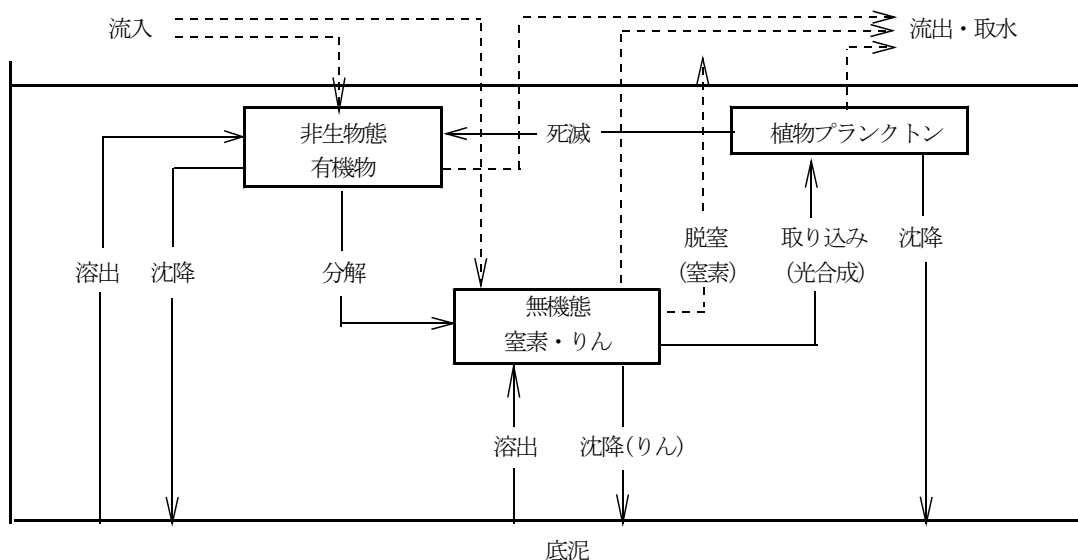


図2 沼内の物質循環過程の概略

表2 物質収支式（移流項を除く）

クロロフィルa	$dchl/dt = -chl \cdot q/V + Pr(1-\epsilon) - kr \cdot chl - kd \cdot chl - v_{pl} \cdot chl/h$
非生物態COD	$dC_o/dt = LC/V - C_o \cdot q/V - \gamma_{C_o} \cdot C_o - v_{C_o} \cdot C_o/h + RC_o/h + (kd \cdot chl + Pr \cdot \epsilon) \cdot \alpha_{Cchl}$
非生物態有機態窒素	$dN_o/dt = LN(1-TN_i)/V - N_o \cdot q/V + (kd \cdot chl + Pr \cdot \epsilon) \cdot \alpha_{Cchl} / \alpha_{CN} - \gamma_{N_o} \cdot N_o - v_{N_o} \cdot N_o/h$
無機態窒素	$dN_i/dt = LN \cdot TN_i/V - N_i \cdot q/V - Pr \cdot \alpha_{Cchl} / \alpha_{CN} + kr \cdot chl \cdot \alpha_{Cchl} / \alpha_{CN} + \gamma_{N_o} \cdot N_o - \gamma_{N_i} \cdot N_i + RN_i/h$
非生物態有機態りん	$dP_o/dt = LP(1-TP_i)/V - P_o \cdot q/V + (kd \cdot chl + Pr \cdot \epsilon) \cdot \alpha_{Cchl} / \alpha_{NP} - \gamma_{P_o} \cdot P_o - v_{P_o} \cdot P_o/h$
無機態りん	$dP_i/dt = LP \cdot TP_i/V - P_i \cdot q/V - Pr \cdot \alpha_{Cchl} / \alpha_{NP} + kr \cdot chl \cdot \alpha_{Cchl} / \alpha_{NP} + \gamma_{P_o} \cdot P_o - v_{P_i} \cdot P_i + RP_i/h$

光合成項	$Pr = \mu_{max} \cdot N_i / (N_i + K_N) \cdot P_i / (P_i + K_P) \cdot f(I) f(T) \cdot chl$	μ_{max} : 最大増殖速度
	$f(I) = (I/I_{opt}) \exp(1 - I/I_{opt})$	K_N : 窒素の半飽和定数
	$f(T) = (T/T_{opt}) \exp(1 - T/T_{opt})$	K_P : りんの半飽和定数
		I : 照度 I_{opt} : 最適照度
		T : 水温 T_{opt} : 最適水温

chl : クロロフィルa濃度 (藍藻 珪藻 緑藻)	α_{Cchl} : 植物プランクトンのCOD/クロロフィルa
C_o : 非生物態COD濃度	α_{CN} : 植物プランクトンのCOD/窒素
N_o : 非生物態有機態窒素濃度	α_{NP} : 植物プランクトンの窒素/りん
N_i : 無機態窒素濃度	kr : 植物プランクトンの呼吸速度定数
P_o : 非生物態有機態りん濃度	kd : 植物プランクトンの枯死速度定数
P_i : 無機態りん濃度	ϵ : 植物プランクトンの分泌量/光合成量
q : 取水量 V : メッシュ体積 h : メッシュ平均水深	

γ_{C_o} : 非生物態CODの分解速度定数	v_{pl} : 植物プランクトンの沈降速度	LC : COD流入負荷量
γ_{N_o} : 非生物態有機態窒素の分解速度定数	v_{C_o} : 非生物態CODの沈降速度	LN : T-N流入負荷量
γ_{P_o} : 非生物態有機態りんの分解速度定数	v_{N_o} : 非生物態有機態窒素の沈降速度	LP : T-P流入負荷量
γ_{N_i} : 脱窒速度定数	v_{P_o} : 非生物態有機態りんの沈降速度	TN_i : T-N流入負荷量のうち無機態窒素の占める割合
RC_o : 非生物態CODの溶出速度	v_{P_i} : 無機態りんの沈降速度	TP_i : T-P流入負荷量のうち無機態りんの占める割合
RN_i : 無機態窒素の溶出速度		
RP_i : 無機態りんの溶出速度		

前述のとおり、空間分割を、従来の5ボックスから、印旛沼では200m、手賀沼では100m間隔の格子でそれぞれ約270及び540のメッシュに細分化した。両沼とも水深が浅いため（平均水深は、印旛沼1.7m、手賀沼0.9m）、1層モデルとした。

沼内での移流・拡散による水質分布の変化を評価するために、水質計算に先立ち、流動計算を行った。流動計算は日単位で行い、各メッシュの平均水深、タンクモデルで計算された河川流量を入力データとした。水質計算は、流動計算で得られた流動場、流入負荷量算定システムで得られた日負荷量および水

温、日射量を入力データとして行った。水温も日単位で設定する必要があるが、公共用水域水質測定計画に基づく調査は月2回に限定されているため、気温と水温の1次回帰式を求め、アメダスによる気温から水温を推定した。日射量については、印旛沼・手賀沼に最も近い観測地点である館野（つくば市）における全天日射量の平均値を用いた。

表2の物質循環パラメータ等は、既存の文献を参考にし、計算結果の実測値再現性を考慮しながら調整した。4期計画の目標値設定に使用した値を表3に示す。

表3 計算に使用したパラメータ等の値

パラメータ等	単位	数 値		
		印旛沼	手賀沼	
μ_{max} (藍藻)	1/日	1.5	1.5	
		(珪藻)	0.6	1.0
		(緑藻)	1.0	1.0
K_N	mg/l	0.10	0.10	
K_P (藍藻)	mg/l	0.005	0.005	
		(珪藻)	0.005	0.020
		(緑藻)	0.005	0.010
T_{opt} (藍藻)	℃	30	28	
		(珪藻)	10	10
		(緑藻)	22	22
I_{opt} (藍藻)	MJ/m ² /日	8	8	
		(珪藻)	4	4
		(緑藻)	6	6
α_{chl}	-	40	40	
α_{CN}	-	9	8	
α_{NP}	-	8	8	
k_r	1/日	0.02exp(0.0693(t-20))	0.02exp(0.0693(t-20))	
k_d	1/日	0.02exp(0.0693(t-20))	0.02exp(0.0693(t-20))	
ϵ	-	0.1	0.1	
γ_{Co}	1/日	0.10exp(0.0695(t-20))	0.05exp(0.0695(t-20))	
γ_{No}	1/日	0.05exp(0.0695(t-20))	0.10exp(0.0695(t-20))	
γ_{Po}	1/日	0.05exp(0.0695(t-20))	0.10exp(0.0695(t-20))	
γ_{Ni}	1/日	0.15exp(0.0695(t-20))	0.06exp(0.0695(t-20))	
v_{pl} (藍藻)	m/日	0.1	0.05	
		(珪藻)	0.5	0.1
		(緑藻)	0.1	0.05
v_{Co}	m/日	1.0	0.5	
v_{No}	m/日	1.0	0.5	
v_{Po}	m/日	1.0	0.5	
v_{Pi}	m/日	1.0	0.1	
R_{Co}	mg/m ² /日	99.0exp(0.0698(t-20))	70.0exp(0.0698(t-20))	
R_{Ni}	mg/m ² /日	32.5exp(0.0698(t-20))	110exp(0.0698(t-20))	
R_{Pi}	mg/m ² /日	5.10exp(0.0698(t-20))	10.0exp(0.0698(t-20))	

注) t : 水温 (℃)

また、これらの値を採用した時の、印旛沼の環境基準点である上水道取水口下および手賀沼の環境基準点である手賀沼中央における再現計算結果の年平均値（または年 75 % 値）を表 4、表 5 に、時系列変化を図 3 に実測値とともに示す。

印旛沼の上水道取水口下では、1997 年度の COD 年 75% 値、96 年度、97 年度の全窒素平均値および 97 年度の全りん平均値で計算値が実測値と比較してやや高い傾向が見られた以外は、よく一致している。季節変化については、印旛沼では夏季に藍藻が増殖し、それに伴って COD、全りん濃度が高まる傾向がみられるが(1995 年, 1998 年, 1999 年, 2000 年)、計算値はこのような傾向を十分には再現できていない。一方、全窒素濃度の季節変化の変動傾向は比較的よく再現されている。手賀沼中央では、1996、97 年度の COD 年 75% 値、99 年度の COD 年平均値、97 年度の全窒素年平均値で計算値が実測値よりやや高く、2000 年度の全窒素年平均値で計算値が実測値より低い傾向が見られた以外は、比

較的よく一致している。季節変化については、一般的に印旛沼より変動傾向がよく再現されているが、一方で 1995 年度後半から 96 年度前半にかけて観測された全窒素、全りん濃度の高い値を十分には再現できていないこと、また 2000 年度後半の COD、全窒素計算値は実測値を下回る傾向があり、導水の効果を過大に評価している可能性があるなどの問題点が指摘される。

3 今後の課題

今回のモデルの改良により、手賀沼では季節変化も含め実測値をかなり良く再現できるようになったが、印旛沼では年平均値レベルではある程度再現性を向上させることができたものの、各水質項目、植物プランクトンの季節変化を満足できる程度に再現するには至っていない。その原因として、複雑な水の流れを十分に表現できていないことが考えられるため、特に水収支に着目し、引き続きモデルの改良について検討する予定である。

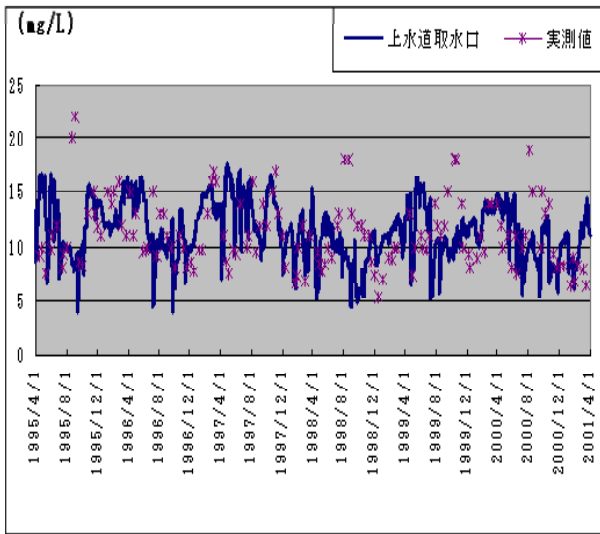
表 4 印旛沼（上水道取水口下）の COD、全窒素、全りん年平均値、年 75% 値の比較（単位：mg/ℓ）

年度	COD(年75%値)		COD(年平均値)		T-N(年平均値)		T-P(年平均値)	
	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値
1995 (H7)	15	14	13	12	2.2	2.1	0.14	0.14
1996 (H8)	14	13	12	11	2.1	1.7	0.14	0.15
1997 (H9)	15	12	12	11	2.5	1.8	0.15	0.13
1998 (H10)	12	12	10	10	1.9	1.9	0.12	0.13
1999 (H11)	14	14	12	12	2.1	1.9	0.14	0.14
2000 (H12)	12	11	11	10	2.2	2.2	0.12	0.12

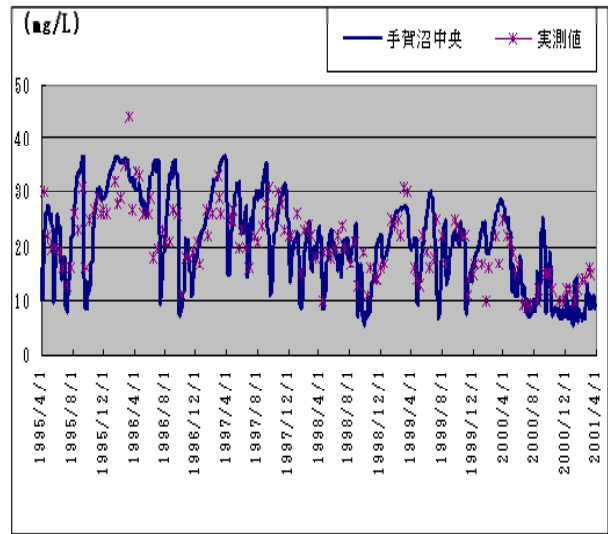
表 5 手賀沼（手賀沼中央）の COD、全窒素、全りん年平均値、年 75% 値の比較（単位：mg/ℓ）

年度	COD(年75%値)		COD(年平均値)		T-N(年平均値)		T-P(年平均値)	
	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値
1995 (H7)	33	29	26	25	4.8	5.3	0.46	0.51
1996 (H8)	33	27	27	24	4.9	4.5	0.45	0.50
1997 (H9)	29	26	24	23	4.8	4.1	0.40	0.43
1998 (H10)	23	22	19	19	3.6	4.0	0.35	0.33
1999 (H11)	24	22	21	18	3.8	3.7	0.36	0.37
2000 (H12)	13	15	12	14	2.6	3.2	0.26	0.26

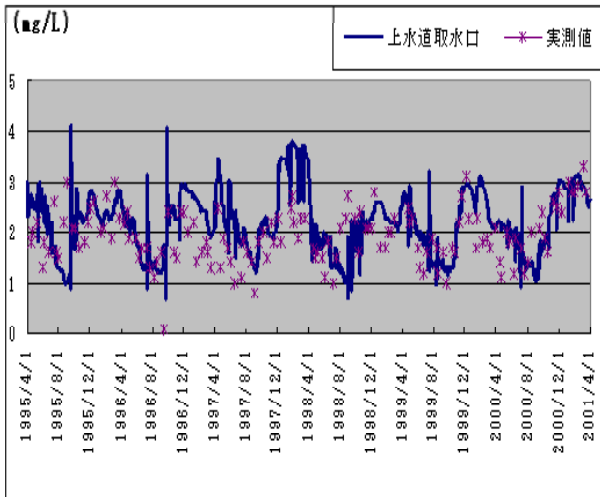
印旛沼COD



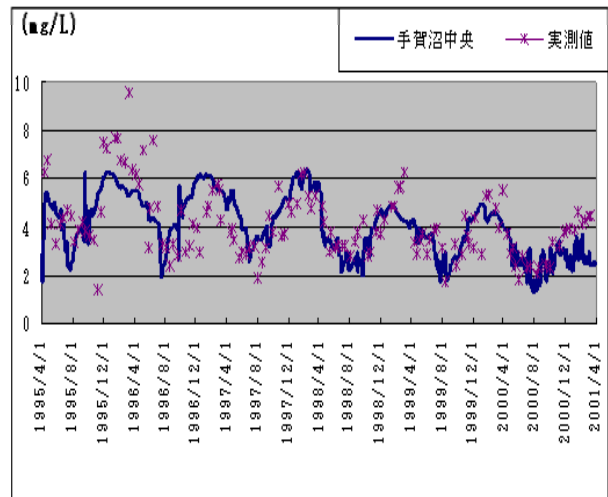
手賀沼COD



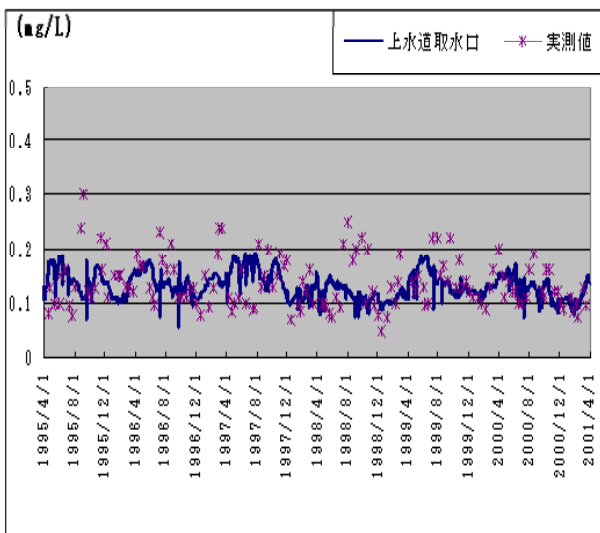
印旛沼T-N



手賀沼T-N



印旛沼T-P



手賀沼T-P

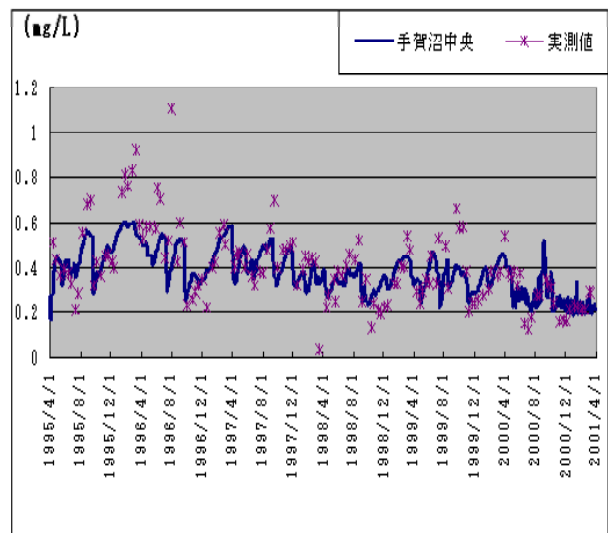


図3 印旛沼・手賀沼の環境基準点におけるCOD、全窒素、全りんの実測値と計算値との比較

謝 辞

本検討の実施に当たり、ご協力いただきました県水質保全課湖沼浄化対策室および国土環境株式会社環境情報研究所の方々に感謝します。

文 献

- 1) 国土環境株式会社：湖沼水質保全計画に係わる水質予測モデルの改良等業務報告書（2001）
- 2) 国土環境株式会社：平成13年度湖沼水質保全計画策定業務報告書（2002）
- 3) 千葉県環境生活部水質保全課：手賀沼・印旛沼に係る湖沼水質保全計画資料（2002）
- 4) 平間幸雄，小林節子：印旛沼・手賀沼の水質予測の試算（2），千葉県水保研年報（平成9年度），59（1998）
- 5) 環境庁：湖沼水質管理指針策定調査（1983）