

水質シミュレーションモデルに関する研究(第1報)

Studies on Simulation Model of Water Qualities(I)

— 府 中 湖 —

— In Case of Fuchu Lake —

山本 務

藤田 淳二

多田 薫

中野 智

Tsutomu YAMAMOTO Junji FUJITA

Kaoru TADA

Satoru NAKANO

湖沼の富栄養化現象を把握することを目的として、湖沼の水質シミュレーションモデルを作成した。流況モデルについては鉛直2次元モデルとし、物質循環モデルはT-N, T-P, CODの他に $chl-a$, DOを組込んだモデルとした。このモデルを香川県で2番目に大きく、しかも富栄養化が進みつつある府中湖に応用し、現況解析および将来予測を試みた。その結果、湖内における流入T-P及びT-Nの沈降による除去、 $chl-a$ の光合成に伴うCODの内部生産、さらにDOの季節変動等の現象をほぼ再現することができた。また、将来予測については流入負荷のうちT-NとT-Pの濃度をそれぞれ $1/2$ にした場合について計算を行ったが、流入T-P濃度を半減させると湖内のCODは約2 mg/l 減少した。しかし、流入T-N濃度を半減させた場合にはほとんどその効果は現れなかった。このことより、府中湖はりん制限の湖沼であり、富栄養化対策として流入負荷のうちT-Pを減ずる対策がより効果的であることが確認できた。

はじめに

近年、湖沼の富栄養化が問題となってきた。本県には環境基準が定められている湖沼に該当するものはないが、大小合わせて16,304個(61年4月現在)¹⁾の溜池がある。これらの中には、かなり富栄養化が進んでいるものもあり、その対策が急がれている。このため、公害課は62年度より湖沼富栄養化対策事業を計画しているところである。

今回これらの事業に先立ち、湖沼の水質シミュレーションモデルを試作し富栄養化²⁾が進みつつある府中湖(ダム湖)を例に、そのモデル化を試みた。その結果について報告する。また、府中湖の水質変動についても合わせて報告する。

解析方法

1. 解析期間

昭和59年1月～61年12月までの3か年とする。

府中湖及び流入河川等の現地調査の資料がほぼまとまっていることと、水質の濃度変動が比較的大きい年であることを考慮した。

2. 解析項目

COD, T-N, T-P, $chl-a$, DOの5項目とする。

DOは底泥からのCOD, T-N, T-Pの溶出速度に関与する因子として、また $chl-a$ はCODの内部生産に関する因子として選んだ。

3. 解析対象湖沼

モデルとして府中湖を選んだ。

府中湖はその規模、利水目的等の点から本県を代表する湖沼の一つであるが、上流からの栄養塩濃度の高い汚濁負荷が流入しており³⁾、湖水は富栄養化状態になりつつある。

3-1 府中湖の諸元等について

府中湖は昭和42年に綾川の下流をせき止めて造られた湛水面積1.21 km^2 の細長い平地ダム湖で、その利水目的は工業用水(下流の番の州工業地帯へ供給)と農業用水である。府中湖の周辺図と諸元等についてはそれぞれ図1, 表1に示すとおりである。

府中湖への流入河川等については、上流の綾川の他に北条池がある。しかし、北条池からの流入は同池の堰からオーバーフローした水が府中湖へ入ってくることになっているので、雨が少ない季節には綾川からのみの流入となる。なお、北条池の湛水面積は0.376 km^2 、貯水量は1,321,000 m^3 で、県下でも大きい溜池に属する。

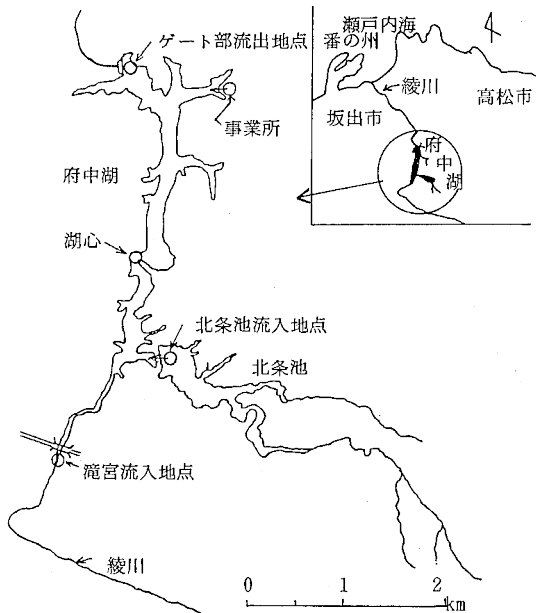


図1 府中湖周辺図

表1 府中湖の諸元等

No	諸元等	府中湖	備考
1	湛水面積	1.21 km ²	
2	湛水距離	5,400 m	滝宮流入地点からゲート部まで
3	有効貯水量	8,000,000 m ³	総貯水量は850万m ³
4	最大水深	25.5 m	ゲート部
5	平均水深	7.0 m	
6	年間回転数	7.3回/年	昭和49年～58年の実測平均値
7	集水面積	122.7 km ²	
8	流入河川等	上流の綾川と北条池の2ヶ所	
9	府中湖に直接排出する事業所	50m ³ /日未満の事業所がゲート部付近に1か所	

府中湖へ直接排出している事業所については表1に示すとおり、小規模のものが1か所あるのみである。

3-2 府中湖の水質変動について

今回、府中湖における水質予測地点を「湖心」としているため、湖心における水質変動について若干の説明を加える。経年変化については図2、経月変化については図3に示すとおりである。なお、湖心とは上流の流入地点である滝宮と、流出地点であるゲート部のちょうど中間に位置する地点である。また、上層とは水面下0.5mを、中層とは湖心での水深(約11~13m)の中間位置を意味する。

3-2-1 経年変化

各項目とも多少の変動はあるものの、濃度が漸増して

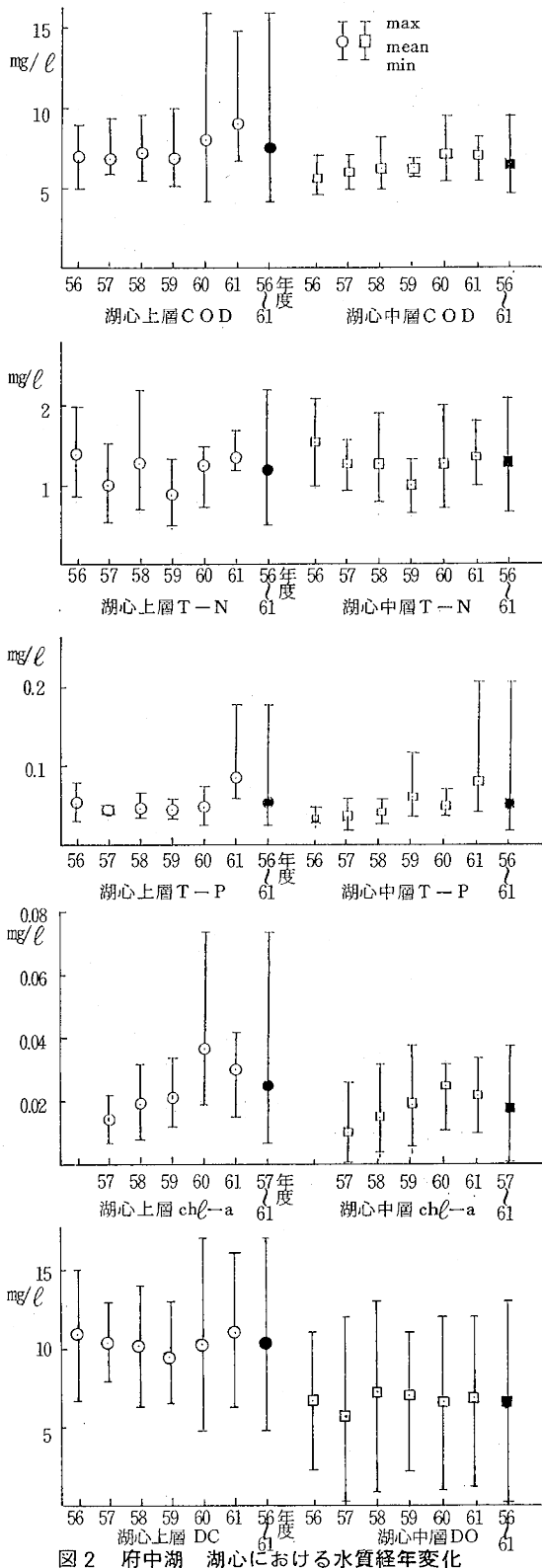


図2 府中湖 湖心における水質経年変化

いる傾向にあり、湖内の汚濁が進行していることがわかる。CODについては56~61年度までの6年間の平均が上層で7.5 mg/l, 中層で6.3 mg/l, T-N, T-Pについては上層, 中層でそれぞれ1.20 mg/l, 1.28 mg/l, 同 0.055 mg/l, 0.053 mg/lを示しており、富栄養化状態にある。一方、T-N/T-P比については上層で21.8, 中層で24.2であるので府中湖の場合、植物プランクトンの増殖についてはT-Pが制限因子となっていることが推測される⁴⁾。

3-2-2 経月変化

図3に示すとおり、COD, DOは毎月調査であるが、T-N, T-P, chl-aについては偶数月のみの調査である。なお、各月の値は56~61年度の6年間のものである。

中層のCODは季節変化がほとんどみられないが、上層のCODは春から夏にかけて高くなっており、上層での内部生産による寄与が大きいことが考えられる。T-Nは上層, 中層とも4月に高濃度現象がみられ、8月には最低濃度となっており、底泥からのDIN(溶存無機態窒素)の溶出と上下混合とが関与していると考えられる。DOについては上層と中層では対照的なパターンとなっており、5月~8月にはかなり強力な温度成層が形成される。

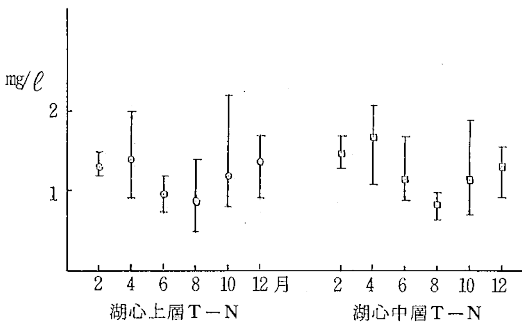
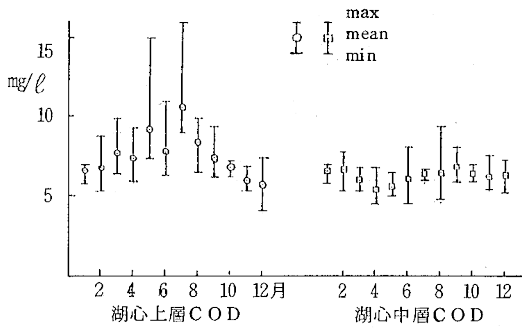
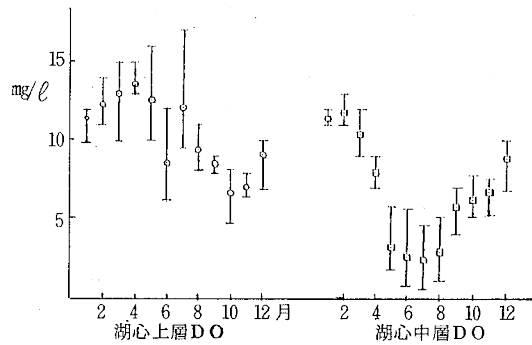
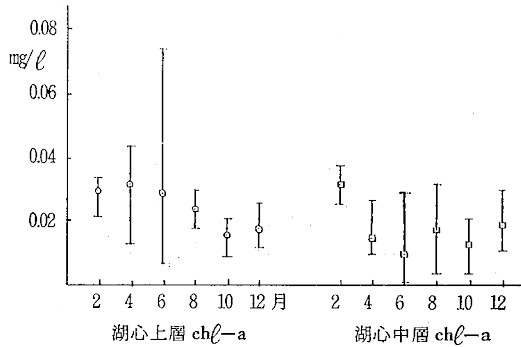
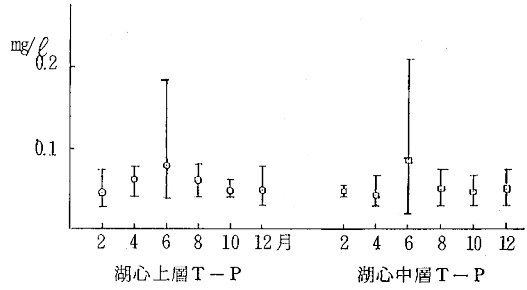


図3 府中湖 湖心における水質経月変化



4. 予測モデル

この種の子測モデル⁵⁾は一般に流況モデルと物質循環モデルの2つに分けられる。

4-1 流況モデル

ダム湖は河川をせき止めて造られるので、河川と溜池の両方の性質を有していると考えられる。このため、ダム湖は一般に細長い形状となるが、流れはほとんど停滞し(府中湖の場合、計算では約4.5m/時となる)、上下混合は上下層の温度差に支配される。また、底泥からの溶出、底泥への沈降も考慮する必要があることから、モデルは図4に示すとおり鉛直2次元モデルとした。なお、鉛直方向の水層は上層と下層の2層とし、底質は1層のみとした。上層の水深は2mの一定とし、下層は湖水量に応じて変化させた。次に、水平方向の分割については、 $n=1\sim 10$ ボックスまで任意に選択できるようにした。

水平方向のボックス間の物質移動は移流のみとし、拡散は取扱わなかった。その他、降雨による負荷は各ボックスへ均等に分配し、事業所の排水による負荷は各ボックス毎に任意に選べるようにした。湖表面水の蒸発⁶⁾、地下浸透、湧水による効果は水質を予測する点で必要な因子ではあるが、モデルの簡略化のため省いた。

以上の様な流況モデルを作成しておけば、溜池、ダム湖のいずれにも適用できる。

今回、府中湖については水平分割数を $n=5$ として予測を行った。従って、湖心は第3ボックスに相当する。また、綾川および北条池からの流入は第1ボックスとし、流出（下流河川への放流水、工業用水、農業用水）は最終（第5）ボックスとした。事業所の負荷はその位置から第5ボックスへ入る。

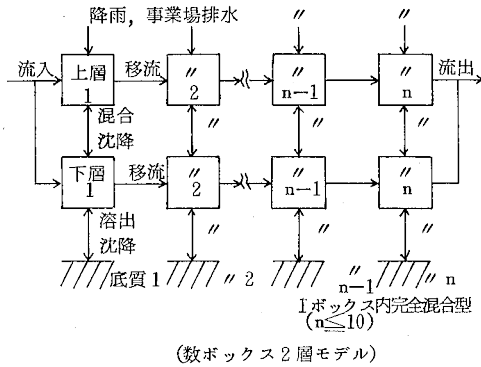


図4 流況モデル

4-2 物質循環モデル

物質循環モデルは一般的なモデルにDOを組込んだものとし、大阪府が作成したモデル⁷⁾を参考とした。図5~7にその循環図を示す。

4-2-1 窒素およびリンの循環と形態の変化

形態は、溶存無機態の窒素・りん (DIN, DIP)、植物プランクトン (chl-aで表す)、デトリタスの3態とし、これらが光合成、枯死、分解等の過程をくり返すとした。沈降については植物プランクトンとデトリタスとし、底質からの溶出については溶存無機態の窒素・りんのみとし、底泥からのまき上げによる効果は考慮しなかった。次に、植物プランクトンの呼吸については、自己分解により窒素は脱窒すると考え循環の系外へ放出するとしたが、りんについてはDIPへフィードバックさせた。

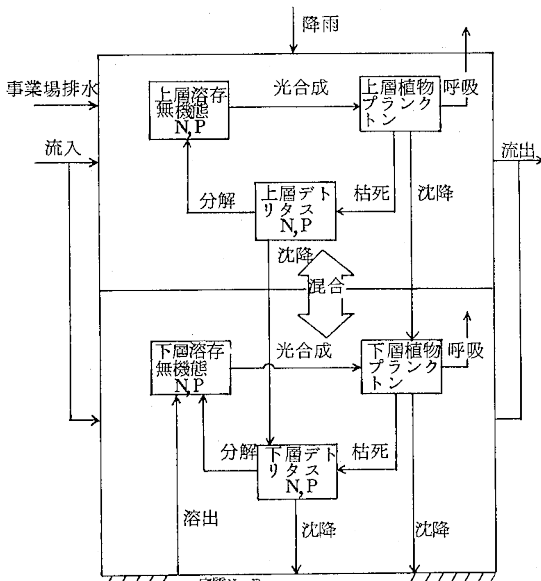


図5 窒素およびリンの循環と形態の変化

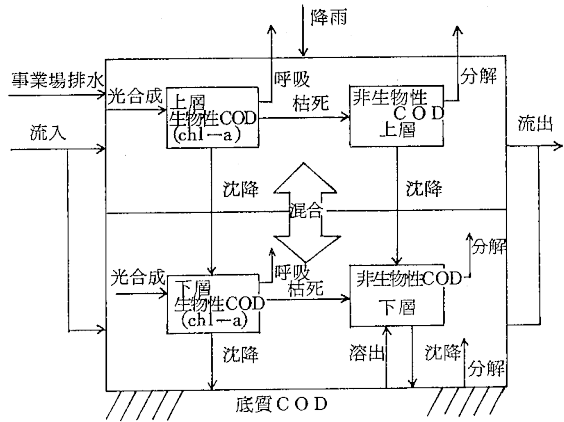


図6 CODの循環と形態の変化

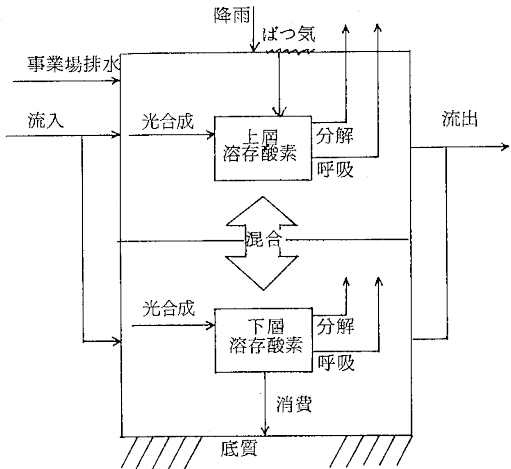


図7 DOの循環

上下混合については、例えば混合係数が50cm/日とした場合、1日に境界層の上下各50cmの層が完全混合するとした。

4-2-2 CODの循環と形態の変化

形態は、生物性COD(chℓ-aで表す)と非生物性COD(図6ではモデル化していないが、これをさらに溶存態CODと懸濁態CODに分けた)の3態とした。生物性CODの呼吸と非生物性CODの分解、さらに底質CODの分解についてはCODがCO₂とH₂Oに分解し系外へ放出されるとした。非生物性CODの沈降については、懸濁態CODのみとし溶存態CODは沈降しないものとした。

4-2-3 DOの循環

DOは光合成により生産され、一方植物プランクトンの呼吸、非生物性CODの分解、さらに底質CODの分解にそれぞれ消費される。なお、上層では湖表面水が風によりばっ気されると考え、上層水が未飽和の時は飽和するとし、逆に過飽和になっていればDOを放出し飽和になるとした。今回のモデルではばっ気される表面水層は5cmとした。

4-3 計算方法

1月は30日、1年は360日とし、59年1月1日から1日ステップで連続計算し61年12月31日までとした。ただし、DOについては光合成によるDOの生産は昼間(日照時間で与えた)のみとしているため、光合成をしない夜間と区別するため昼間と夜間に分けて半日ステップで計算した。次に、湖内の初期濃度については上層、下層、底質とも水平方向の各ボックスはすべて同一濃度とし、上層、下層については58年12月の湖心の水質データを入力した。しかし、底質については実測値が無いので溶出速度係数による推定値を用いた。

計算に用いたパソコンはPC-9801シリーズで、プログラム言語はMS-DOS上のN88BASICを用いた。なお、シミュレーションプログラムについて、計算に必要なデータ、パラメータ等はDATA文等を用いすべて一つのプログラムの中へ入れたため、サイズは約34Kバイトとかなり大きなものとなった。しかし、こうすることによって①データ等のファイルの消失防止、②係数、データ等のチェック時にプログラムをロードすることにより容易に確認、修正が可能となる利点がある。

計算結果はその都度CRTに10日毎に中央ボックスの上層と下層のCOD、T-N、T-P、chℓ-a、DOを表示するようにし、結果の良し悪しを確認できるようにした。すべての計算が終了すれば、必要に応じ水質の結果はLPT[†]又はFDへ出力するようにし、底質におけるCOD、T-N、T-Pの蓄積速度(又は溶出速度、単位はg/m²/日)をLPT

へ出力するようにした。

その他、計算途中でデータがマイナス、例えば底質のCOD等の保存量がマイナスになった時などはCRTにその状況を出力すると同時にビーブ音で知らせるようにした。

ちなみに、今回府中湖について水平分割数を5ヶとし、3年間計算すると約70分で全計算が終了した。

4-4 入力データ

解析に用いる入力データは59年1月から61年12月までである。一覧にして表2に示す。これらのデータはすべてプログラム中のDATA文で入力した。なお、計算精度を高めるため、表中の1~12の項目については1月間隔のデータを比例配分により10日毎のデータに変換して用いた。また、13の降雨量についてはmm/月の単位を1日当りに変換して用いた。次に、14~17の事業所の負荷については、経月変化はあるが経年変化はないものとし1年分のデータのみを入力した。

表2 入力データ一覧

No	名称	単位	入力データの数	データの出所
1	貯水量	m ³	12月×3年	県営水道管理事務所(実測値)
2	総流入量	m ³ /日	"	"
3	総流出量	"	"	"
4	湖心上層水温	°C	"	県公害課(実測値)
5	湖心中層水温	"	"	"
6	流入COD	mg/ℓ	"	県営水道管理事務所および県公害課(実測値, 計算値)
7	流入T-N	"	"	"
8	流入T-P	"	"	"
9	流入chℓ-a	"	"	"
10	流入DO	"	"	"
11	日射量	cal/cm ² /日	"	高松地方気象台(実測値)
12	日照時間	時間	"	AMeDAS 滝宮(実測値)
13	降雨量	mm/月	"	"
14	事業所COD負荷	g/日	12月	県公害課(届出値, 実測値)
15	事業所T-N負荷	"	"	"
16	事業所T-P負荷	"	"	"
17	事業所DO負荷	"	"	"

府中湖への流入負荷(表中の6~10)については、上流河川の綾川の他に北条池からの流入もあるが、流入割合についての実績がないので府中湖と北条池の集水面積の比を用い、加重平均によりあらかじめCOD等の流入負荷濃度を算出しておいた。

次に、流入負荷の形態については次のとおりとし、デトリタスの寄与はないとした。

a 流入COD = (非生物性COD) + (chl-a中のCOD)
 b 流入T-N = (DIN) + (chl-a中のN)
 c 流入T-P = (DIP) + (chl-a中のP)
 なお、各態の配分の割合については、chl-aとCOD、T-N、T-Pの各変換率を用いて計算するようにした。

雨水中の形態については、CODは非生物性COD、T-NはDIN、T-PはDIPで表されるものとし、chl-aの寄与はないものとした。また、雨水中のDO濃度については飽和しているものとした。

事業所からの負荷の形態については雨水のそれらと同様に考えて用いた。

4-5 パラメータ

一覧にして表3に示す。なお、パラメータの値は今回のシミュレーションに用いたものである。値の出所については実測値、文献値^{8)~15)}、あるいは推定により求めた。各パラメータについての説明は省くが、光合成に関する資料は国公研の報告書¹⁶⁾に詳しい。

表3 パラメータ一覧

分類	No	名称	記号	単位	パラメータの値	出所
諸元	1	湖面積	SA	m ²	SA=1,210,000	県営水道管理事務所(公称値)
	2	湖長	LA	m	LA=5,400	"
流入・移流	3	河川からの流入負荷量の上層下層への流入割合(上層の割合)	INRAT	-	TD≤1℃のとき、INRAT=0.5 TD>1℃のとき、INRAT=0.8 TD=TU-TL TU=上層水温(℃) TL=下層水温(℃)	推定値
	4	湖内、上層と下層の水平移流速度比(%)	VRAT	"	VRAT=3.0	"
変換率	5	湖内水COD/chl-a	FCD	-	FCD=50	実測値より算出
	6	" T-N/chl-a	FTN	"	FTN=3	"
	7	" T-P/chl-a	FTP	"	FTP=1	"
	8	流入水COD/chl-a	FCDIN	"	FCDIN=50	湖内水の変換率を採用
	9	" T-N/chl-a	FTNIN	"	FTNIN=3	"
	10	" T-P/chl-a	FTPIN	"	FTPIN=1	"
雨水中の濃度	11	COD濃度	RNCD	mg/l	RNCD=1.5	実測値の平均
	12	T-N濃度	RNTN	"	RNTN=0.7	"
	13	T-P濃度	RNTP	"	RNTP=0.02	"
	14	DO濃度	RNDO	"	RNDO=475/(33.5+TU)	文献値(Gamesonの式)
鉛直混合係数	15	上・下層間の鉛直混合速度	EX	m/日	4月~8月のとき、EX=0.05 3月、9月のとき、EX=0.3 1月~2月、10月~12月のとき、EX=0.8	上下層の水温差より推定
大気・水層混合係数	16	大気からのDOの溶解速度(ばっ気速度)	AIR	m/日	AIR=4.32×0.05 (表層のばっ気層厚=0.05m)	文献値
温度係数	17	上層温度係数	FTU	-	FTU=TU/27	実測値より算出
	18	下層温度係数	FTL	"	FTL=TL/27(基準温度=27℃)	"
DO飽和率	19	上層DO飽和率	RDOU(L)	-	RDOU(L)=COU(L)/MDOU	計算値
	20	下層DO飽和率	RDOL(L)	"	RDOL(L)=COL(L)/MDOL COU(L)=上層のDO濃度 COL(L)=下層のDO濃度 MDOU=475/(33.5+TU) MDOL=475/(33.5+TL) L=1~5ボックス	"
底質からの溶出速度	21	COD溶出速度	RCD(L)	g/m ² /日	RCD(L)=RCD×√FTL×(MDOL-COL(L))/MDOL+RCDF	文献値
	22	DIN溶出速度	RNH(L)	"	RNH(L)=RNH×√FTL×(MDOL-COL(L))/MDOL+RNHF	"

分類	No	名称	記号	単位	パラメータの値	出所
	23	DIP 溶出速度	RPO (L)	g/m ² /日	$RPO(L) = RPO \times \sqrt{FTL} \times (MDOL - COL(L)) / MDOL + RPOF$ $RCD = 0.1 \quad RCDF = 0.04$ $RNH = 0.005 \quad RNHF = 0.004$ $RPO = 0.003 \quad RPOF = 0$ ただし、MDOL - COL (L) < 0 のとき $RCD(L) = RCDF$ $RNH(L) = RNHF$ $RPO(L) = RPOF \text{ とする}$	文献値
呼吸速度	24	上層呼吸速度	APU (L)	1/日	APU (L) = AP * FTU * RDOU (L)	文献値
	25	下層呼吸速度	APL (L)	"	APL (L) = AP * FTL * RDOL (L) AP = 0.02	"
枯死速度	26	上層枯死速度	DPU	1/日	DPU = DP * FTU	文献値
	27	下層枯死速度	DPL	"	DPL = DP * FTL DP = 0.15	"
沈降速度	28	上層デトリタス沈降速度	GDZU	m/日	GDZU = 0.25	文献値
	29	下層デトリタス沈降速度	GDZL	"	GDZL = 0.25	"
	30	上層植物プランクトン沈降速度	GCHU	"	GCHU = 0.05	"
	31	下層植物プランクトン沈降速度	GCHL	"	GCHL = 0.05	"
分解速度	32	上層非生物性COD分解速度	KCDU (L)	1/日	KCDU (L) = KCD * FTU * RDOU (L)	文献値
	33	下層非生物性COD分解速度	KCDL (L)	"	KCDL (L) = KCD * FTL * RDOL (L)	"
	34	底質COD分解速度	KCDB (L)	"	KCDB (L) = KCDL (L) KCD = 0.025 ただし、MDOL - COL (L) < 0 のとき、KCDB (L) = 0	"
	35	上層デトリタス中N分解速度	KDNU (L)	"	KDNU (L) = KDN * FTU * RDOU (L)	"
	36	下層デトリタス中N分解速度	KDNL (L)	"	KDNL (L) = KDN * FTL * RDOL (L) KDN = 0.025	"
	37	上層デトリタス中P分解速度	KDPU (L)	"	KDPU (L) = KDP * FTU * RDOU (L)	"
	38	下層デトリタス中P分解速度	KDPL (L)	"	KDPL (L) = KDP * FTL * RDOL (L) KDP = 0.025	"
その他	39	上層非生物性COD中の懸濁態CODの占める割合	RDPU	-	RDPU = 0.2	推定値
	40	下層非生物性COD中の懸濁態CODの占める割合	RDPL	"	RDPL = 0.25	"
光合成速度	41	上層光合成速度	PHU (L)	1/日	$PHU(L) = KK \times \sqrt{FTU} \times \sqrt{FRU(L)} \times SPU(L) \times \frac{DIN1}{(KN + DIN1) \times (KP + DIP1)}$	文献量
	42	下層光合成速度	PHL (L)	"	$PHL(L) = KK \times \frac{1}{2} \times \sqrt{FTL} \times \sqrt{FRL(L)} \times SPL(L) \times \frac{DIN2}{(KN + DIN2) \times (KP + DIP2)}$	"
		比増殖速度定数	KK	"	KK = 1.2	
		上層消散係数	EZU (L)	-	EZU (L) = (16.2 * CCHU (L) + 1.3) * HU	
		下層消散係数	EZL (L)	"	EZL (L) = (16.2 * (CCHU (L) + CCHL (L)) / 2 + 1.3) * HA	
		上層日射量に関する係数	FRU (L)	"	FRU (L) = SR * (1 - exp(-EZU (L))) / 365 / EZU (L)	
		下層日射量に関する係数	FRL (L)	"	FRL (L) = SR * (1 - exp(-EZL (L))) / 365 / EZL (L)	
		上層スペース効果	SPU (L)	"	SPU (L) = exp(-3.85 * CCHU (L))	
		下層スペース効果	SPL (L)	"	SPL (L) = exp(-3.85 * CCHL (L))	
					DIN1 = 上層DIN濃度 (µg/l), DIP1 = 上層DIP濃度 (µg/l) DIN2 = 下層DIN濃度 (µg/l), DIP2 = 下層DIP濃度 (µg/l) KN = 0.1 (µg/l); Michaelis 定数 KP = 0.02 (µg/l); PのMichaelis 定数 CCHU (L) = 上層chl-a 濃度 (µg/l) CCHL (L) = 下層chl-a 濃度 (µg/l) HU = 上層水深 (m), HA = 全水深 (m) SR = 日射量 (cal/cm ² /日)	

4-6 物質収支

各態の変化量に関する基礎式は次のとおりである。なお、分けられるが、ここではまとめて1日分の変化量としてお、⑦のDOの式については、昼間の式と夜間の式とに表した。

① 非生物性COD量 (g) (上層非生物性COD:DCU, 下層非生物性COD:DCL)

$$\text{上層: } d(\text{DCU})/dt = (\text{流入}) + (\text{植物プランクトンの枯死}) - (\text{下層への沈降}) - (\text{分解}) - (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{降雨}) + (\text{事業所})$$

$$\text{下層: } d(\text{DCL})/dt = (\text{流入}) + (\text{植物プランクトンの枯死}) - (\text{底質への沈降}) - (\text{分解}) + (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{上層からの沈降}) + (\text{溶出})$$

② DIN量 (g) (上層DIN:DNU, 下層DIN:DNL)

$$\text{上層: } d(\text{DNU})/dt = (\text{流入}) + (\text{デトリタスの分解}) - (\text{光合成}) - (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{降雨}) + (\text{事業所})$$

$$\text{下層: } d(\text{DNL})/dt = (\text{流入}) + (\text{デトリタスの分解}) - (\text{光合成}) + (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{溶出})$$

③ DIP量 (g) (上層DIP:DPU, 下層DIP:DPL)

$$\text{上層: } d(\text{DPU})/dt = (\text{流入}) + (\text{デトリタスの分解}) - (\text{光合成}) - (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{降雨}) + (\text{事業所}) + (\text{呼吸によるフィードバック})$$

$$\text{下層: } d(\text{DPL})/dt = (\text{流入}) + (\text{デトリタスの分解}) - (\text{光合成}) + (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{溶出}) + (\text{呼吸によるフィードバック})$$

④ デトリタス中のN量 (g) (上層デトリタス中のN:ZNU, 下層デトリタス中のN:ZNL)

$$\text{上層: } d(\text{ZNU})/dt = (\text{流入}) + (\text{植物プランクトンの枯死}) - (\text{下層への沈降}) - (\text{分解}) - (\text{上下混合}) - (\text{流出})$$

$$\text{下層: } d(\text{ZNL})/dt = (\text{流入}) + (\text{植物プランクトンの枯死}) - (\text{底質への沈降}) - (\text{分解}) + (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{上層からの沈降})$$

⑤ デトリタス中のP量 (g) (上層デトリタス中のP:ZPU, 下層デトリタス中のP:ZPL)

$$\text{上層: } d(\text{ZPU})/dt = (\text{流入}) + (\text{植物プランクトンの枯死}) - (\text{下層への沈降}) - (\text{分解}) - (\text{上下混合}) - (\text{流出})$$

$$\text{下層: } d(\text{ZPL})/dt = (\text{流入}) + (\text{植物プランクトンの枯死}) - (\text{底質への沈降}) - (\text{分解}) + (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{上層からの沈降})$$

⑥ 植物プランクトン (chl-a) 量 (g) (上層 chl-a:CHU, 下層 chl-a:CHL)

$$\text{上層: } d(\text{CHU})/dt = (\text{流入}) + (\text{光合成}) - (\text{枯死}) - (\text{呼吸}) - (\text{下層への沈降}) - (\text{上下混合}) - (\text{流出})$$

$$\text{下層: } d(\text{CHL})/dt = (\text{流入}) + (\text{光合成}) - (\text{枯死}) - (\text{呼吸}) - (\text{底質への沈降}) + (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{上層からの沈降})$$

⑦ DO量 (g) (上層DO:OU, 下層DO:OL)

$$\text{上層: } d(\text{OU})/dt = (\text{流入}) + (\text{光合成}) - (\text{呼吸}) - (\text{分解}) + (\text{表層のばっ気}) - (\text{上下混合}) - (\text{流出}) + (\text{降雨}) + (\text{事業所})$$

$$\text{下層: } d(\text{OL})/dt = (\text{流入}) + (\text{光合成}) - (\text{呼吸}) - (\text{分解}) - (\text{底質での消費}) + (\text{上下混合}) - (\text{流出})$$

⑧ 底質中のCOD量 (g) (BC)

$$d(\text{BC})/dt = (\text{非生物性CODの沈降}) + (\text{植物プランクトンの沈降}) - (\text{溶出}) - (\text{分解})$$

底質中のN量 (g) (BN)

$$d(\text{BN})/dt = (\text{デトリタスの沈降}) + (\text{植物プランクトンの沈降}) - (\text{溶出})$$

底質中のP量 (g) (BP)

$$d(\text{BP})/dt = (\text{デトリタスの沈降}) + (\text{植物プランクトンの沈降}) - (\text{溶出})$$

以上の式を用い1日ステップで、各ボックス毎に各態の現存量を計算し、濃度に変換する。

$$\text{a) 上層COD濃度}(\text{mg/l}) = (\text{DCU} + \text{CHU} \times \text{FCD}) / \text{VU}$$

$$\text{下層COD濃度}(\text{ " }) = (\text{DCL} + \text{CHL} \times \text{FCD}) / \text{VL}$$

$$\text{b) 上層T-N濃度}(\text{ " }) = (\text{DNU} + \text{CHU} \times \text{FTN} + \text{ZNU}) / \text{VU}$$

$$\text{下層T-N濃度}(\text{ " }) = (\text{DNL} + \text{CHL} \times \text{FTN} + \text{ZNL}) / \text{VL}$$

$$\text{c) 上層T-P濃度}(\text{ " }) = (\text{DPU} + \text{CHU} \times \text{FTP} + \text{ZPU}) / \text{VU}$$

$$\text{下層T-P濃度}(\text{ " }) = (\text{DPL} + \text{CHL} \times \text{FTP} + \text{ZPL}) / \text{VL}$$

$$\text{d) 上層chl-a濃度}(\text{ " }) = \text{CHU} / \text{VU}$$

$$\text{下層chl-a濃度}(\text{ " }) = \text{CHL} / \text{VL}$$

$$\text{e) 上層DO濃度}(\text{ " }) = \text{OU} / \text{VU}$$

$$\text{下層DO濃度}(\text{ " }) = \text{OL} / \text{VL}$$

VU=上層1ボックス当りの水量 (m³)

VL=下層1ボックス当りの水量 (m³)

次に、底質への蓄積速度 (又は溶出速度) については、3年間の平均として出力させた。式については次に示す。

$$\text{f) 底質COD蓄積速度}(\text{g/m}^2/\text{日}) = (\text{最終BC量} - \text{初期量}) / \text{SBOX} / \text{M}$$

$$\text{底質T-N蓄積速度}(\text{ " }) = (\text{最終BN量} - \text{初期量}) / \text{SBOX} / \text{M}$$

$$\text{底質T-P蓄積速度}(\text{ " }) = (\text{最終BP量} - \text{初期量}) / \text{SBOX} / \text{M}$$

SBOX=1ボックス当りの湖面積 (m²)

M=計算日数 (日)

式f)から、値がプラスであれば蓄積、マイナスであれば溶出していることを表す。

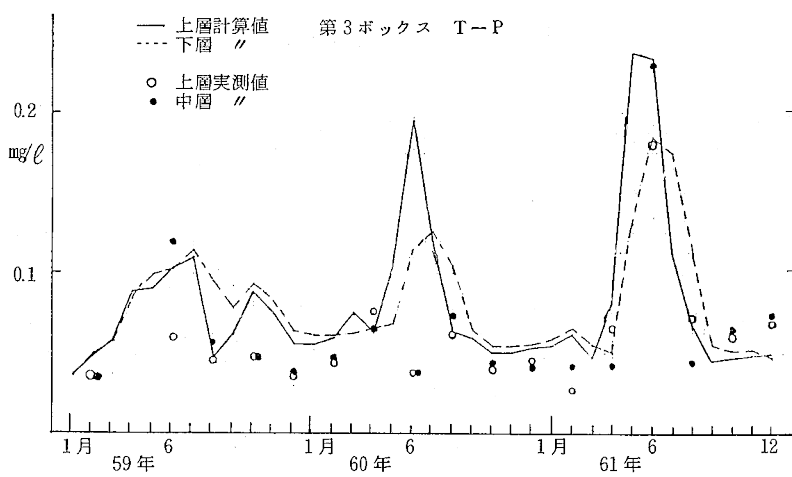
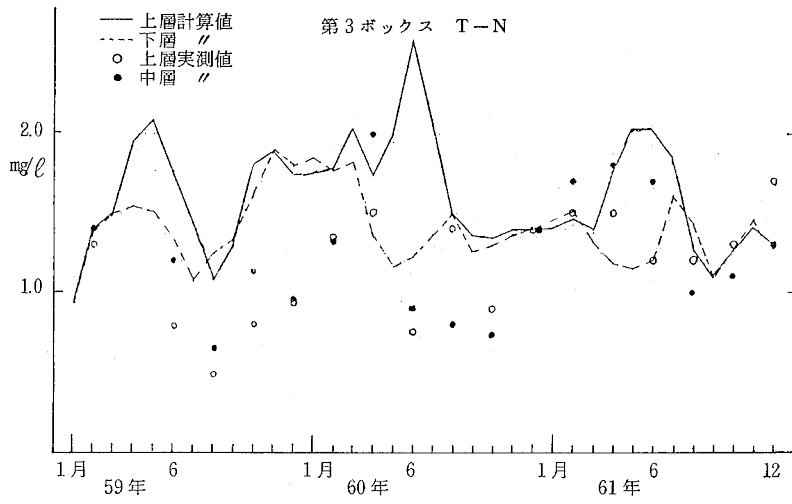
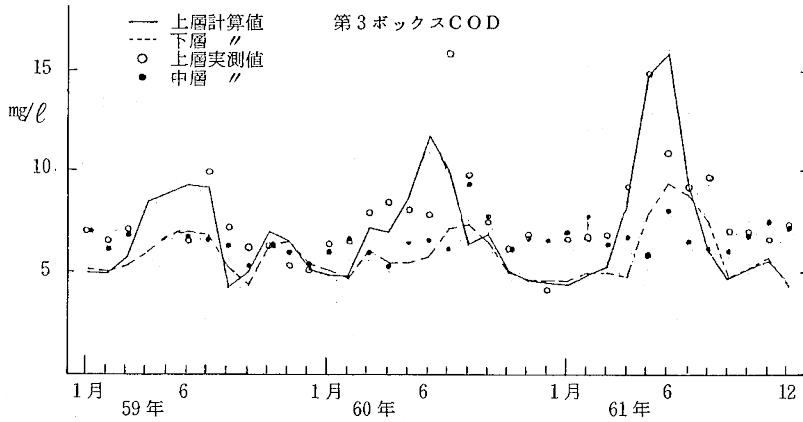


図8 シミュレーション結果

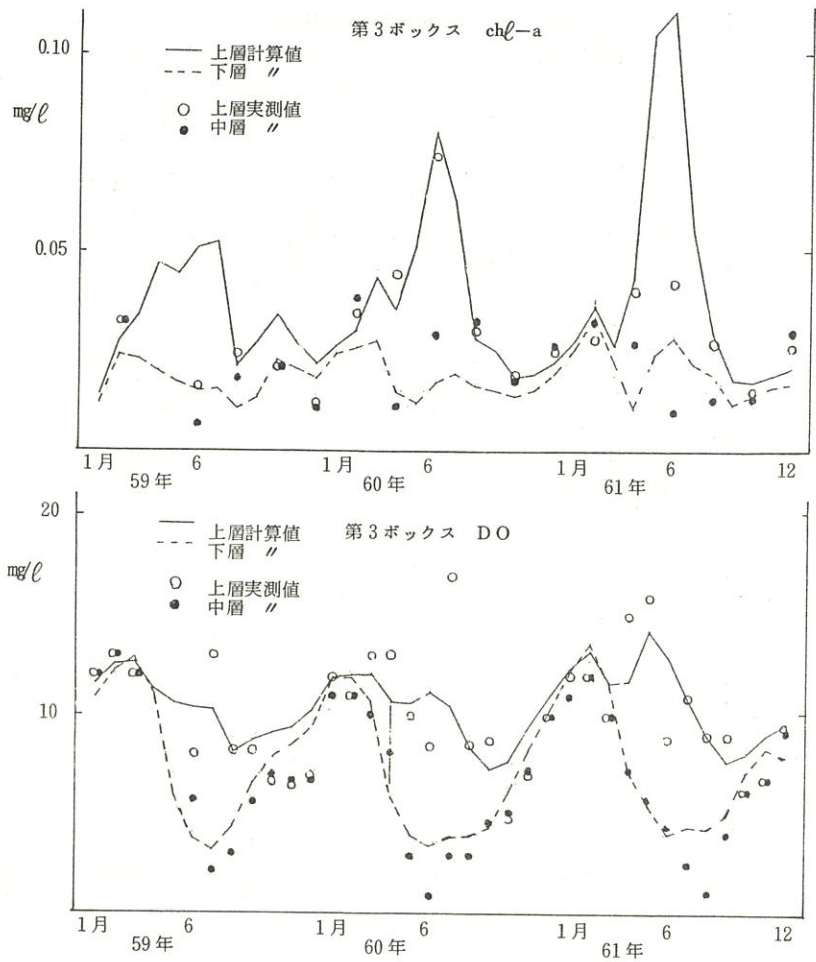


図8 シミュレーション結果

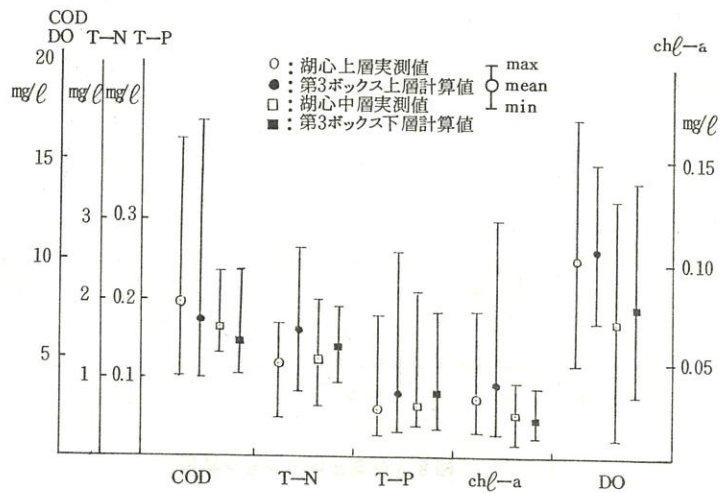


図9 3年間の実測値と計算値の比較

結果および考察

3年間のシミュレーション結果のうち、第3ボックスの上層と下層について湖心の実測値と対比させ、各項目別に濃度変化をグラフ化し、図8に示す。また、同結果をまとめたものを図9に示す。

次に、計算値と実測値を比較するうえで大切な因子である流入負荷濃度（綾川と北条池の加重平均値）の変化については図10に示す。

実測値をいかに精度良く再現できるか、これがシミュレーションモデルの最大の課題である。しかし、実測値に限ってみても、流入地点あるいは湖心における現地調査の回数は月1回（又は2月に1回）程度であり、とても実際の現象を忠実にとらえているとはいいがたい面がある。特に夏期における植物プランクトンの急激な消長を正確に把握することは困難である。また、流入負荷についても月1回の測定値がその月を代表する結果となり、シミュレーション結果に大きな影響を与えることになる。しかし、現実にはこれ以上の詳しい資料が得られないので、多少のリスクが伴うが今回のシミュレートに用いたデータによる計算結果について以下述べる。

3年間のシミュレートのうち、61年が比較的再現性の良い結果が得られており、特に同年6月頃の高濃度現象の再現性が良い。しかし、60年6月頃についてはT-N、T-Pの再現性が悪く、実測値に対し計算値がかなり高い値となっている。次に、各項目別に検証すると、CODについては実測値と比べ計算値がやや低く見積られているが、実測値の変動をほぼ再現していると考えられる。T-Nについては逆に計算値が高くなっており、特に59～60年にかけて再現性が悪い。T-PはT-N程ではないが

計算値がやや高くなっている。しかし60年6月以外は良好な結果が得られている。chl-aについてはややバラツキがあるものの、ほぼ現象をとらえていると思われる。DOについては夏期の成層期における下層の濃度が実測値に比べ2mg/l程高くなっている点を除けば、良好な再現性を示している。

図9より、3年間の実測値、計算値の平均値を比較すると、5項目のうち計算値が実測値よりも低かったのはCODのみで、他はすべて計算値が高くなっていた。CODは主に流入水の負荷と湖内の内部生産による負荷との合計量で表される。このことから、計算値のCOD濃度を高くし実測値濃度に近づけるにはchl-aの生産を大、すなわち光合成速度を大にすればよい。しかし、この弊害としてchl-a、DOの濃度が高くなるが、chl-aについては枯死速度を大とし、DOについてはDOの消費速度を大とすればよい。また、T-N、T-Pについては光合成等により形態の変化はあるが絶対量の変化は少ないと考えられるので、現在、光合成速度等に関するパラメータ式を検討しているところである。

今回、水平方向のボックス数を $n=5$ としているので、湖内の濃度が各ボックスでどの程度になっているかを検討した。図11に各項目別にボックス毎の濃度を示す。なお、図中の「流入」は実測による流入負荷濃度を示す。湖内の実測値については第3ボックスに相当する湖心（上層、中層）の他に、第5ボックスに相当するゲート部（ただし、COD、T-P、DOのみで、採水層は2m層と9m層の2層）の資料^{17)~19)}もあるのでそれぞれ図中に記入しておいた。

一般的に、池はダム湖、溜池いずれの場合でも、一種の天然の巨大な沈殿槽と考えることができるので、内部

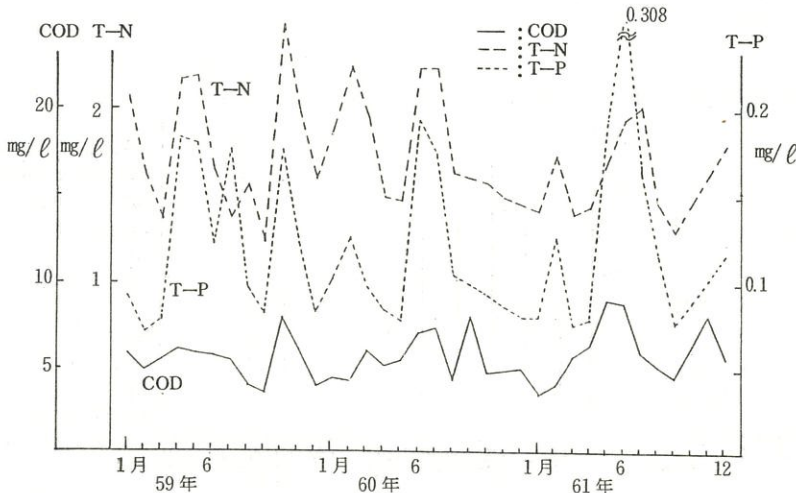


図10 加重流入負荷濃度

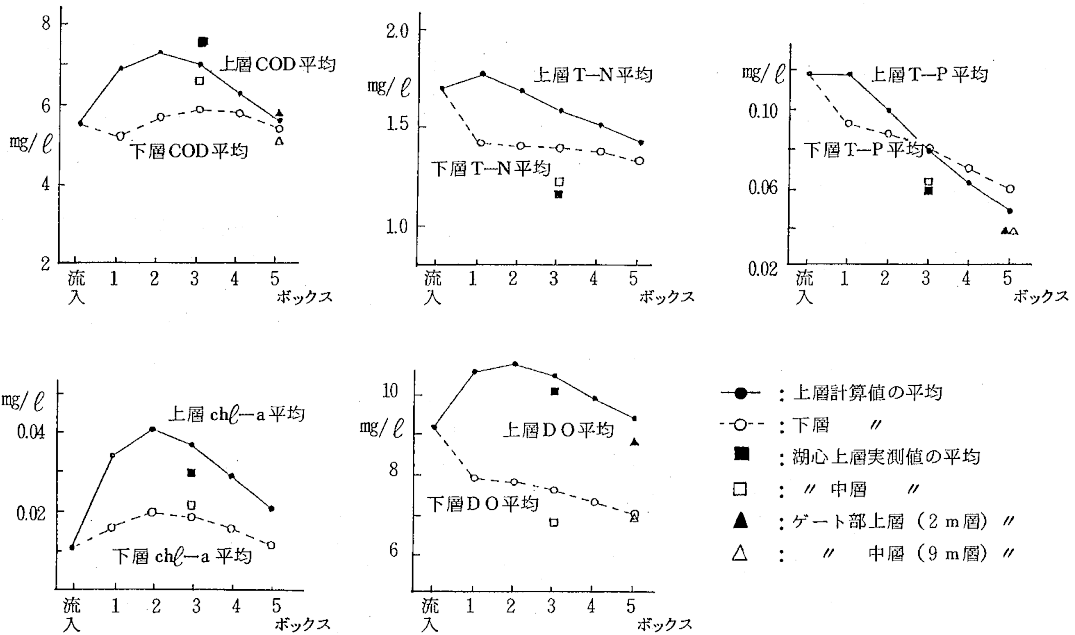


図11 各ボックスにおける濃度推移 (3年間の平均)

生産を伴わないT-N, T-Pは程度の差はあるものの流下方向のボックスになるにつれ、底質への沈降効果等により濃度は減少する。一方、内部生産を伴うCOD, 必然的にchl-a, DOは流下方向に対して山型の濃度分布を示すことになる。今回のシミュレーション結果によればこれらの現象を十分表現していると考えられる。事実、第3ボックスと第5ボックスに相当する湖心とゲート部での計算値と実測値を比較すると、COD, T-P, DOのいずれも実際の現象を再現している。このことより、府中湖は巨大な沈澱槽であるといえる。では、どの程度汚濁物質が府中湖底へ沈澱しているかを表したものが図12である。

図12は3年間の計算結果から底質への蓄積速度を求め

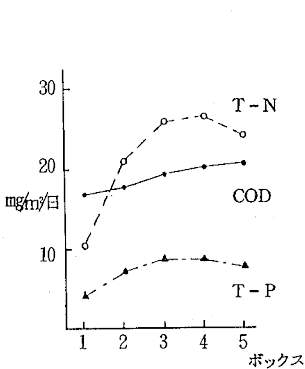


図12 底質への蓄積速度

たグラフである。いずれの項目も第1ボックスで最小となっているが、必ずしも第5ボックスで最大とはならず、T-NとT-Pは第4ボックスで最大となっている。次にこれらの蓄積速度はモデル中のデトリタス、植物プランクトンが底質へ沈降することによる効果のみをとらえており、実際的な現象である大気降下物の沈降効果、底質からのまき上げに伴う底泥の流下方向への移流等による効果は含まれていないので、各ボックスにおける底質のCOD等の濃度とは必ずしも一致しないと考えられる。また、T-Nの蓄積速度がCODの蓄積速度より大きいことについては、CODは底質からの分解を考慮しているがT-Nについては脱窒の効果を加えていないことが挙げられる。これらのことについてはモデルを検討するうえで

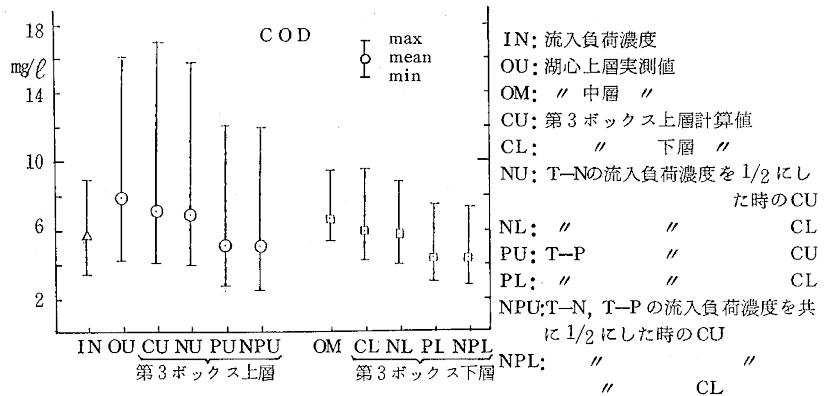


図13 将来予測の結果

今後の課題としたい。

府中湖を造ったことにより、綾川下流の水質がどのように変化したかを検討した。図11, 12を参考にすると、T-N, T-Pは沈澱効果により、よりきれいな水となって放出されていると考えられ、CODについても湖内での内部生産によるプラスの効果はあるものの、結局沈澱効果により流入水とほぼ同じ濃度にまで下って放出されていることになる。従って、下流の綾川へはT-N, T-P濃度の低い水が放出されることになり、これが瀬戸内海の水質を保全する意味においても大切なダム湖であると考えられる。

シミュレーションモデルは一般にパラメータ等が多く複雑なモデルになりがちである。できる限り少ない因子で現象を再現できることが好ましい。そこで、一例として、降雨による効果と、湖内へ直接排出している事業所の効果を取除いた場合に結果がどの程度変化するかを調べた。まず、降雨の効果を除いた場合COD等に及ぼす効果は0~1%であった。事業所についてはほとんど0%であった。このことより、現モデルから事業所に関するパラメータ等を省いても結果には影響を与えないと考えられる。しかし、降雨については、現モデルでは降雨量に応じて負荷が加わるとしているが、実際には大気からの降下物は降雨に関係なく常に降ってくるので、ダスト、シャー等で調査された大気降下物量に関する資料を用いれば、その効果はもう少し高くなると考えられる。

シミュレーションの最終目的とでもいえる将来予測について若干の検討を試みた。今回のモデルではT-Nの再現性が十分ではなかったが、とりえず流入負荷濃度を変化させた場合、湖内のCOD濃度がどの程度変化するかを調べた。条件として、気象、水象等に関するパラメータ等は59~61年のものをそのまま用い、流入負荷濃度のうちT-NとT-Pの濃度を半分にした場合について予測を行った。結果については図13に示すとおり、T-Pの流入濃度を半減させると湖内のCODはかなり低くなり、上層で2 mg/l、下層で1.5 mg/lそれぞれ減少した。一方、T-Nを半減させた場合は湖内のCODはほとんど減少しなかった。また、T-NとT-Pの両方を同時に半減させた場合については、T-Pを半減させた時とほとんど同じ結果が得られた。これらのことから、府中湖はりんが制限因子となっていると考えられる。湖内のCODを下げる一手法として、流入負荷のうちCOD自身もそうであるが、りんの負荷を下げるのが大切であろう。その他、底質からの溶出速度を小さくした場合についてもその効果を予測することが可能であるが、今後の課題としたい。

ま と め

湖沼の富栄養化対策の一助として、水質シミュレーションモデルを作成し、県下で2番目に大きい府中湖を例にそのモデル化を試みた結果、次のことがわかった。

1. T-Nの再現性は十分ではなかったが、その他のCOD, T-P, $chl-a$, DOについてはほぼ満足できる結果が得られ、3年間の変動を再現できたと考える。
2. 計算結果より、府中湖は巨大な沈澱槽と考えられ、平均で1日当り、CODで22.7 kg, T-Nで26.0 kg, T-Pで8.6 kgの各汚濁負荷物質を除去していることになる。
3. モデルの感度解析の一例として、降雨による負荷と事業所からの直接排出による負荷をゼロにした場合、解析結果にはほとんど影響を及ぼさないことが確認できた。
4. 現モデルを用いて将来予測を試み、その結果流入負荷のうちT-Pの濃度を下げることにより、湖内のCODは低くなるのが確かめられ、府中湖はりん制限のダム湖であることがわかった。

次に、今後のモデル全般に関する課題として、①T-Nの再現性を良くすること、②大気からの降下物による負荷量の寄与を検討すること、③さらにパラメータのうち実測が可能なものは調査すること等が挙げられよう。

当報告書が62年度より実施される湖沼富栄養化対策事業遂行の一助となれば幸いである。

終りに、モデルを作成するに当たり、流況モデルについては県営水道管理事務所の嘉屋康夫、小蓑雅也両氏に、物質循環モデルについては大阪府公害監視センターの水質検査課の皆様にお世話になった。心から感謝致します。

文 献

- 1) NHK松山放送局：四国ものしりブック，P 9 (1987)
- 2) 山岸宏，沖野外輝夫：湖沼の汚染，P 8，築地書館(1974)
- 3) 藤井裕士，多田薫，大森利春，他：香川県公害研究センター所報，9, 53 (1984)
- 4) 長野県：諏訪湖の富栄養化に関する研究，P 42 (1982)
- 5) 環境庁水質保全局：湖沼の窒素及び磷に係る水質予測マニュアル，P 18 (1985)
- 6) 土屋巖，白井邦彦：国立公害研究所研究報告 (R-6-79)，6, 23 (1979)
- 7) 田中秀穂，望月京司：大阪府公害監視センター所報，8, 103 (1985)
- 8) 環境庁：底質汚濁改善対策調査—淡水域— (1983)
- 9) 文部省：環境特性にもとづく閉鎖性水域の総合的環境保全対策 (環境科学研究報告書B 240-S 909)，(1985)
- 10) 名古屋市公害研究所：溜池における富栄養化の基礎的研究 (1985)
- 11) 安藤晴夫，菊地幹男，津久井公昭，他：東京都環境科学研究所年報，69 (1986)
- 12) 安藤晴夫，曾田京三：東京都環境科学研究所年報，101

(1987)

13) 土山ふみ, 成瀬洋児, 安藤良, 他: 名古屋市公害研究所報, 14. 67 (1984)

14) 栃木県公害研究所水質部: 栃木県公害研究所年報, 9 55 (1985)

15) 国立公害研究所: 第2回富栄養化問題シンポジウム—モデルと評価— (B-18-81), (1981)

16) 相崎守弘, 津野洋, 須藤隆一, 他: 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (R-1-77), P 67 (1977)

17) 香川県水道局: 水質試験年報, 10. (1984)

18) 香川県水道局: 水質試験年報, 11. (1985)

19) 香川県水道局: 水質試験年報, 12. (1986)