

湖沼の水質保全対策の効果を評価するための水質予測モデル (I)

—豊田湖の水質予測モデルの評価—

山口県衛生公害研究センター

溝田 哲・今富幸也・田邊 泰*
杉山邦義・前田達男

The Water Quality Prediction Model to Evaluate the Effect of the Water Preservation of Reservoir (I)

—The Evaluation of Water Quality Prediction Model of Toyota Reservoir—

Satoshi MIZOTA, Yukiya IMATOMI, Yasushi TANABE*
Kuniyoshi SUGIYAMA, Tatsuo MAEDA

Yamaguchi Prefectural Research Institute of Health

はじめに

山口県の湖沼の水質保全対策事業の一環として水質調査、結果の解析、水質予測モデルの作成、モデルによる保全対策の評価、保全対策の方向付けという一連の調査研究を行った。これは、我々の調査研究テーマの一つである「水質予測モデルに関する研究」が初めて行政施策に取り上げられ実用化された例である。「我々の水質予測モデル」(「モデル」)は、意志決定の道具として手軽に利用できることを念頭においてパソコン上で作成している。

水質予測モデルに関する研究や現場での利用についてはすでに多くの優れた研究や事例^{1, 2)}があり、モデルの評価などと言うのは今更という感もする。しかし、モデルは水質変化機構を再現するにあたり、「仮定」や「簡略化」を含み誤差を持つものであり、今後得られる知見により修正改訂し成長させていくものとする。また、結果を得るためにはコンピュータが必要でありその性能はコンピュータの性能にも左右される。「モデル」開発当初(4年前)はパソコンで1年間の計算に約30分を要したが、現在は5年間の計算でも3分を要しない。この点においても「モデル」は成長しているといえる。

以上のことやこの調査研究が「モデル」が実用化された初めての例でもあることを考え、「モデル」が水質保全対策策定を支援する道具としてどのような有用性と限界・問題点を持っていたのか改めて「モデル」の側から評価しておくことはこれからの「モデル」作成のために必要であると考え。

調査対象

豊田湖は、山口県西北部(図1)に位置する多目的ダムである。平面形状を図2に示す。流域面積84km²、湛水面積2.6km²、総貯水容量21750×10³m³、最大水深30mで、滞留期間は約50日である。流出口はダムゲートと発電及び維持取水で各々88m、76m、68mの標高であり最深部の標高は64mである。流入河川は3河川で、1日平均流入水量は345.6×10³m³であり、流域の土地利用と排出負荷量は表1、表2のとおりである。

水質調査

1 調査方法

調査は、水質変動の時空間的な構造を把握する事を目的に計画した。調査期間は、1993年4月から1994年3月である。調査項目を表3に示す。水平方向の測定地点は、形状を考慮して流入部3地点(地点3~5)、流出部2地点(地点1と2)の計5地点とした(図2)。流出部の地点2は環境基準点である。水温、pH、溶存酸素(DO)及び流速は、各地点の単位層(2m)毎に測定した(単位層毎の調査)。流速は各地点の流入と流出について測定した。他の水質項目は各地点の上中下の3層について測定した。調査回数及び時期は、単位層毎の調査を四半期に2回の年8回、他は四半期に1回の年4回とした。別に、日間変動の大きさとそのパターンををみるために、通日調査(24時間、2時間毎)を9月に行った。単位層毎の項目は現場用の多項目測定器により測定し、他の項目は実験室に持ち帰り定法により測定した。流速は、超音波流向流速計により船上で測定した。

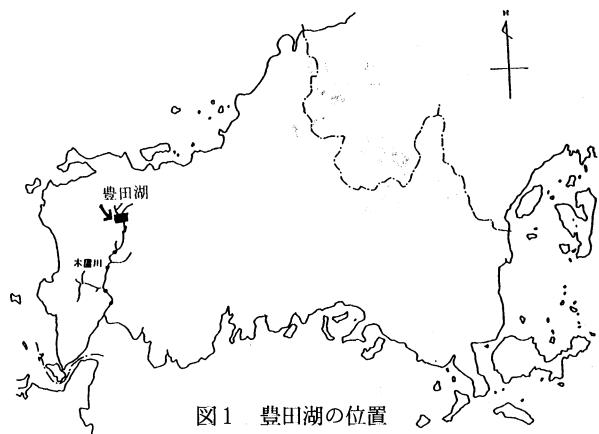


図1 豊田湖の位置

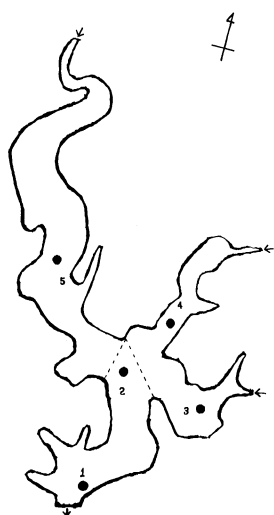


図2 豊田湖の平面形状
(番号：調査地点, 破線：ボックス境界)

表1 豊田湖流域の土地利用 (1992)

	山林	水田	その他の耕地	その他
ha	6777	472	63	1024
%	81.30	5.66	0.76	12.28
	総人口		2259人	

表2 豊田湖の流域排出負荷量 (Kg/日, 1992)

	COD	T-N	T-P
生活系	34.999	9.203	1.094
産業系	4.189	1.340	0.222
畜産系	42.705	14.214	7.507
山林系	198.567	128.763	3.391
耕地 (水田)	57.112	35.872	0.472
耕地 (その他)	0.630	4.788	0.063
その他	10.240	19.456	0.514

表3 水質調査項目

調査区分	調査項目
3層調査	水温, pH, COD, DO, T-N 溶存態-N, T-P, 溶存態-P クロロフィルa
単位層毎調査	水温, pH, DO, T-N
通日調査	水温, pH, DO, T-N 溶存態-N, T-P, 溶存態-P クロロフィルa

2 調査結果

調査結果を表4と図3～図4に示す。水温の空間分布は鉛直一次的で、夏期に成層が見られ冬期には解消されて鉛直方向にも均一となる。その特徴は、表層と流出口付近下部の躍層である。DOの分布も底付近を除けば鉛直一次的である。その特徴は、夏期の表層での過飽和、底層での貧酸素化と冬期の均一化であり水温の分布に沿ったものとなっている。COD, クロロフィルa, T-P, T-Nの鉛直分布はDOの分布に沿っているが、春期の水平分布は場所による差が見られ、上流が高く下流が低い。CODとクロロフィルa及びDOは、夏期にピークを持ち春期と秋期に小さい山を持つ年変化を示す。中層と冬期表層のCODは流入する河川の水質レベル (平均値1.86, 75%値2.3) で湖沼の環境基準を満足している。日間変動は、日平均値に

表4 通日調査結果の概要

調査項目	平均値	最大値	時刻	最小値	時刻
pH	9.5	9.7	15	9.4	1
DO	11.0	12.0	13	8.6	5
COD	3.0	3.4	13	2.7	5
T-P	0.029	0.033	11	0.027	19
T-N	0.367	0.442	13	0.277	19
クロロフィルa	0.024	0.025	11	0.023	1
水温	23.8	24.5	13	23.3	7

(注) pH, 水温の他はmg/L, 水温は℃.

対して平均で10%, 最大で24%, 最小で1%である。日間変動パターンは、どの項目も日中高く夜間に低い傾向がみられる。CODの春から夏のピーク (環境基準を越える部分) は、COD, DO, クロロフィルa, pHの相互関係から、植物プランクトンが増殖する内部生産によるものと考えられる。したがって、水質保全対策の方向としては、内部生産に必要な栄養塩の流入を削減することが有効と考えられる。また、夏期の躍層

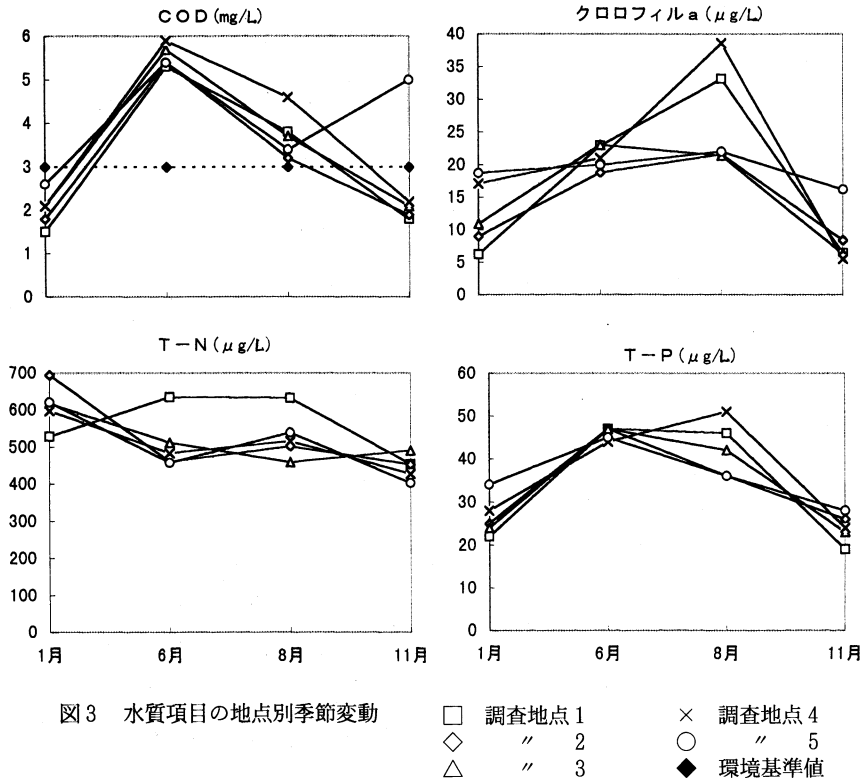


図3 水質項目の地点別季節変動

が表層の水質悪化と底層の貧酸素化をもたらしていると考えられるので、これの解消も有効と思われる。春期の水質の水平分布の不均一性は、流入水量が少なく水温が低い為に、下流表層の栄養塩が不足し内部生産が押さえられている為と推察されるので、表層の栄養塩の削減も有効と考えられる。

水質予測モデル

「モデル」には次の要件が求められる。

- 流域の発生負荷量削減対策効果の予測ができること。
- 湖内での内部生産抑制対策効果の予測ができること。
- 湖内水質の季節変動が予測できること。
- 水質保全対策策定を支援する道具とすること。

1 「モデル」の構造

予測モデルの概要を図5に示す。「モデル」の全体は、流入負荷量を予測するモデルと湖内水質を予測するモデルの2つのサブモデルからなる。湖内水質予測モデルの空間構造は、目的及びダム湖の水平構造(図2)と水質調査結果から2つの流入部を持つ鉛直一次元3ボックス連結モデルとした(図6)。これは、豊田湖を地点3と地点4を1ブロック、地点5を1ブロック、地点1と地点2を1ブロックの3ブロックに分割し、各々のブロックを鉛直一次元モデル¹⁾(図7)としたものである。この鉛直一次元モデルは、安芸・白砂のモデル¹⁾を利用しており水温モデル(電中研モデル¹⁾)を含むものである。

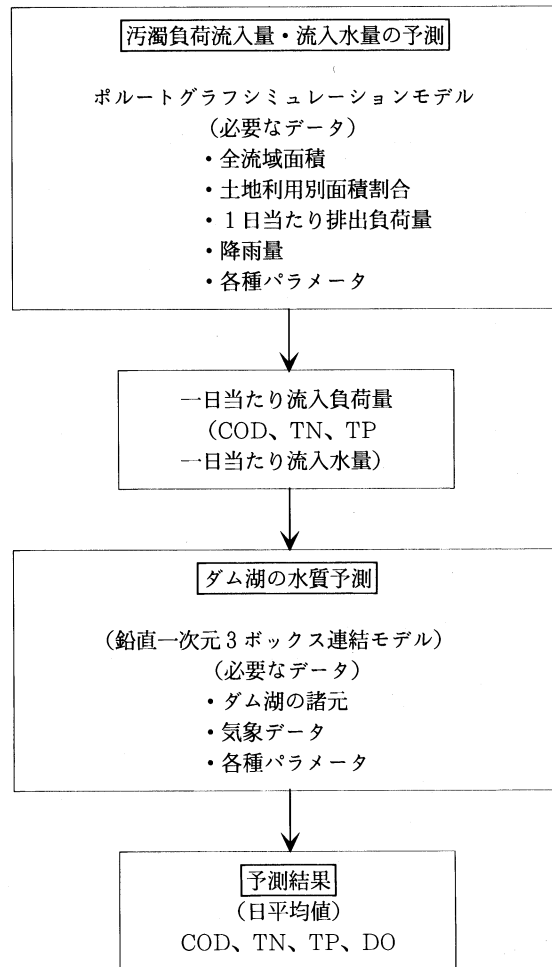


図5 水質予測方法の概念

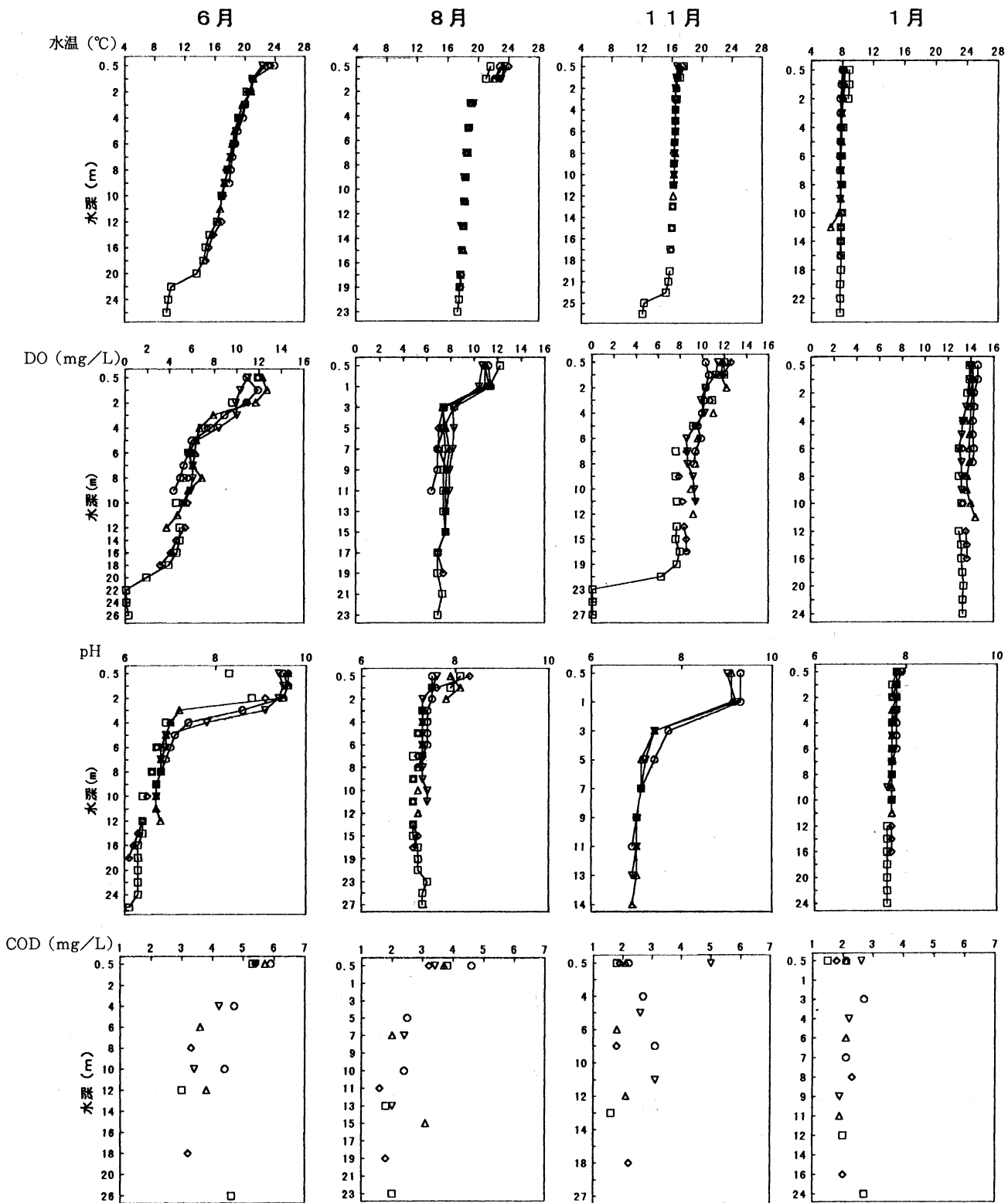


図4 地点別季節別鉛直分布

- | | | | |
|---|--------|---|--------|
| □ | 調査地点 1 | ○ | 調査地点 4 |
| ◇ | " 2 | ▽ | " 5 |
| △ | " 3 | | |

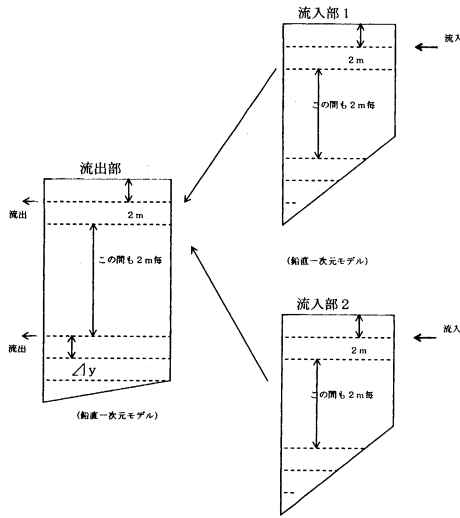


図6 ダム湖水質予測モデルの水平構造

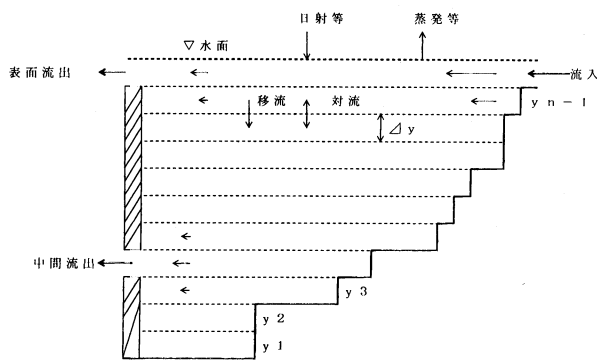


図7 鉛直一次元モデルの概念

水質調査結果から得られたCODの特徴から、「モデル」には内部生産を表現する生物化学的な項が必要と考えられる。そこで、生物化学的な項として、森北・天野のモデル²⁾を参考にして内部生産量を懸濁態のCODで表現する物質循環モデル(図8)を作成した。単位層厚は2m、最大層数を15とした。CODの夏期のピークを抑えるためには、流入栄養塩の削減が有効と考えられることから流入負荷量削減効果を予測する必要がある。したがって、流入負荷量予測モデルとして、浮田らの³⁾ポルトグラフシミュレーションモデルを多流域用に改造して用いた。これらのパラメータの決定は、本調査結果を再現できるよう、文献^{2~4)}を参考に試行錯誤で行った。

ここで水理構造の問題として、ボックス間の移流と表層厚の扱い方の問題がある。鉛直一次元モデルであれば文献¹⁾のモデルをそのまま利用できるが、3ボッ

クスとしたためにボックス間の移流を考慮する必要が生じた。水理調査の結果、流入部から流出部への移流は流出の影響が大きいと推察されたので図9に示すように流出分布と同じとした。したがって、流出中心が流入部の底よりも低い場合には、常時流入部の底に移流の中心がくる。表層は、文献では¹⁾50cm以下になると下層と併合しているところをここでは計算が煩雑になるので図10に示すように単位層厚以下になると下層と併合した。現段階では精度的に实用レベルであると考えているが、生産層をより精度良く表現する必要が生じた場合には实用レベルとは言えず、文献¹⁾のように表層を精密に扱う必要がある。

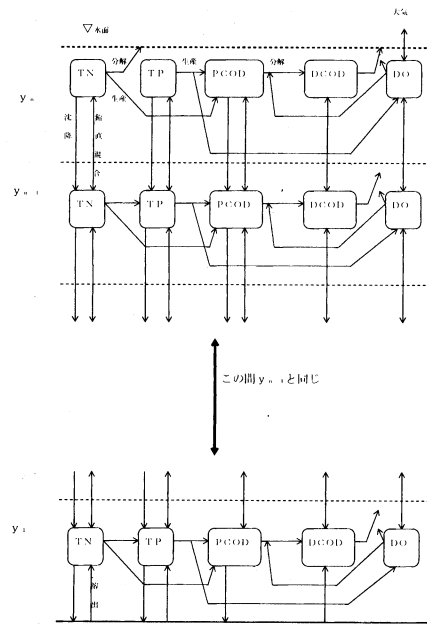


図8 物質循環モデルの概念

生物化学的構造の問題としては、生産、分解、溶出などの物質循環に関わるパラメータに文献値を用いていることがある。底泥からの栄養塩の溶出については、室内実験により得ており、生産分解速度や沈降速度については実験を行っているところであるが、实用レベルの結果を得るまでには至っていない。

2 予測に用いる入力データ

気象が、比較的穏やかと思われる年(1990年)の気象データ⁶⁾及びダム流入流出水量の日データ(ダム管理月報)を用いた。流入水質は、流域モデルの結果を用いた。流入水温は、日単位の実測データが得られなかったので本調査結果と気温とから得た次に示す回帰式を用いた。

$$\text{流入水温} = 5.381 + 0.542 \times \text{気温}$$

$$r^2 = 0.882$$

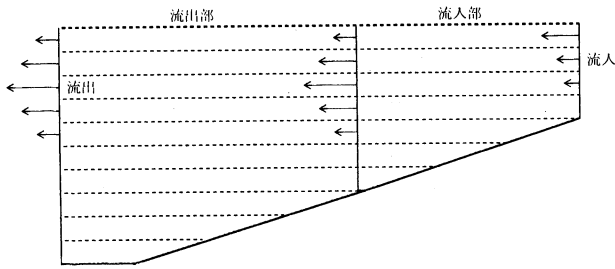


図9 ボックス間の移流の扱い方

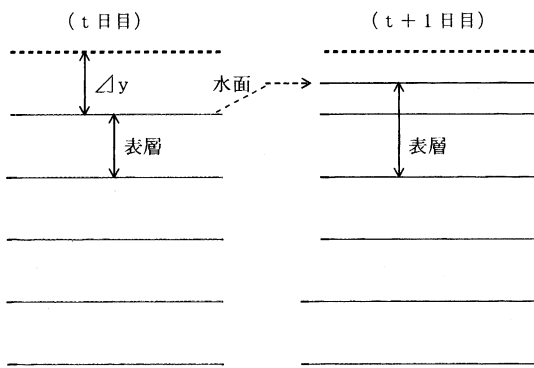


図10 表層の扱い方

流入水量は流域モデルで得られるところを実測値を用いたのは、流出水量を定式化できなかったことによる。流出水量の操作について調査したところ不規則なところが多く、定式化にはさらに詳細な調査と方法論の研究が必要と思われる。将来予測を行うには、予測する期間の気象データ等が必要であるが、モデルの精度を満足する長期の気象を予測することは困難である。したがって、気象現象である降雨を入力データとする流入水量の予測も困難である。ここでは比較的穏やかと思われる年の既存の気象データを用いたが、現時点では穏やかな気象のケース、異常な気象のケースというように、ケース別に予測評価することになると考える。

3 「モデル」の計算

計算法は、文献⁵⁾を参考にした。計算のためのコンピュータプログラムは、パソコン(PC9801RA)上でCコンパイラを用いて作成した。計算時間ステップは、内部生産の時間スケールと安定性を考慮して0.25日に設定した。1年の計算に約30分を要した。1ケースの実用レベルの計算時間は、対策策定のための議論を中

断させない長さである必要があると考える。したがって、1年間の計算に必要な30分は、対策策定を支援するための道具としては実用レベルであるとは言いがたい。本事例においても約80ケースの対策案を示され計算を行ったが、単純計算で40時間を必要としたことになる。計算時間短縮の方法としては、計算時間ステップや空間ステップ(層厚)を大きくとること及び計算方法としての数値解法やコンピュータプログラムの改良と計算機としてのパソコンの性能向上が考えられる。計算時間ステップや空間ステップを大きくとることは、計算法上の問題(計算の発散)や計算精度が悪くなるなどの問題が生じる。数値解法は、計算時間ステップを大きくとれ計算精度の良いADI法や計算精度の良い有限要素法などがあるが、予測の目的から時間ステップは大きくて1日までと考えており、計算時間の短縮はそれほど期待できないと思われる。コンピュータプログラムは、改良の余地はあると考えているが、1ステップの計算時間を1/2にはできないと思われる。計算機としてのパソコンは、現在の飛躍的な性能向上を考えると十分実用レベルになるものと期待できる。ちなみに、現在の1年間の計算所要時間は、当所で最速のパソコンで同じコンピュータプログラムを用いて当初のほぼ1/100である。

4 「モデル」の再現性

蓄積されたデータとしては、環境基準点の常時監視データの他には無く、これも表層データだけである。したがって再現性の検討は、このデータ(1990年から1991年)の季節変動パターンと環境基準点(地点2)を含むボックスの予測値を比較することで行った。その結果を図11に示す。年変動パターンと値のレベル共に全体的にはよく再現できたと考えるが細部を見ると問題もある。

春から夏に表層の値が実測値よりもやや低い傾向が見られ、表層CODは実測では春から秋にピークが見られるが夏期とその他を同時に再現することができていない。また、「モデル」自体の問題の他に検証用データの代表性とデータ量の問題も考えられる。

春から夏に表層が実測値よりも低い傾向は、実測値が水面下約50cmの値であるのに対し予測値が2~4m層の平均値であることによると考えられる。文献¹⁾のように表層を精密に扱えば実用的なレベルになると考える。

表層CODのピークの季節性の再現性の問題は、プランクトン種の変遷によるものと考えられる。プラン

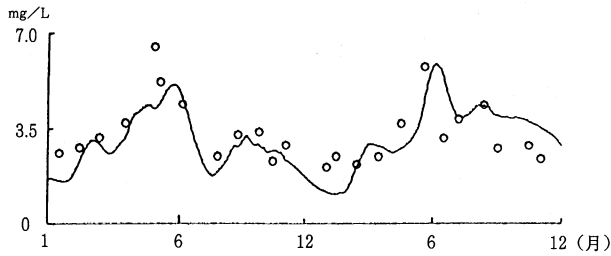


図11 計算結果と実測値の比較 (COD: 環境基準点表層)
○ 実測値 (1990年1月~1991年12月常時監視結果)
— 計算値

クトン種を組み込んだモデルは未だ一般化されたものが無く、その方法論も確立されていない現状では今後の課題と考えている。

検証用の実測データの代表性の問題は、通日調査結果 (表4) から、CODが日平均値に対して±10%程度の日間変動があること、それは±40%になることもあること⁵⁾、計算値が日平均値であることを考えると十分であるとは言えない。このようなデータを用いた検証には、その観測方法、観測回数、観測時期などを考慮した解釈が必要であり、これらを考慮した観測データの蓄積が望まれる。

5 水質保全対策の予測評価と対策の実施

流域対策として流域の排出負荷量の削減と流入河川の直接浄化について、湖内対策として選択放流についての検討を行った。その結果を表5に示す。

ア 流域対策の予測結果

流域からの流出負荷量の削減対策により水質は改善されるがその効果は小さいことが示された。流入河川水の直接浄化は流入栄養塩を直接減らすことになり、その効果は大きく対策として有効であることが示された。そのなかで、CODの削減効果が他に比べて小さいのは、湖内水質の悪化が内部生産によるということを支持する結果であるといえる。ここで、排出負荷量削減対策の効果が小さかったのは、それが主に点源の削減対策であり、負荷量に占める割合の大きい面源 (表2) に対する対策がなかったためと考えられる。これは、排出負荷量削減率が個別の排出区分では30%前後であるのが全排出区分では大きく低下していることから伺える (表5)。

イ 湖内対策の予測結果

内部生産層であり最も水質の悪化する表層水の回転率を上げることが有効であることが示された。ま

た、湖内の鉛直混合を増進することになる常時底層からの放流が有効であることが示された。しかし、いづれも現実に実施する対策としては困難であろうと思われる。

ウ 水質保全対策

以上検討したケースの中において、流域と河川浄化対策を組み合わせたものが効果的で現実的な対策と思われる。流域からの負荷量削減対策としては、当流域には大きな工場などは無く (全排出負荷量の1%前後)、人為的な汚濁負荷源として生活排水がその大部分であるので生活排水対策などが進められている。さらに、その効果を上げるために、直接浄化対策としてヨシの浮礁を貯水池の河川流入部に設置するなどの施策も進められている。

まとめ

1 水質調査

水温の空間分布は鉛直一次元的で、その特徴は夏期の成層と冬期の均一化、表層と流出口付近下部の躍層であった。溶存酸素の分布も底付近を除けば鉛直一次元的で、その特徴は夏期の表層での過飽和、底層での貧酸素化と冬期の均一化であり水温の分布に沿ったものであった。

COD、クロロフィルa、T-P、T-Nの鉛直分布は、溶存酸素の分布に沿っているが春期の水平分布は場所による差が見られた。中層と冬期のCODは、流入する河川の水質レベル (平均値1.86、75%値2.3) で湖沼の環境基準を満足していた。

2 水質予測モデル

流入負荷量予測モデルと湖内水質予測モデルの2つのサブモデルからなる水質予測モデルを作成した。

流入負荷量予測モデルは、関根らのポルトグラフシミュレーションモデル³⁾を多流域用に改訂して用いた。湖内水質予測モデルは、安芸・白砂¹⁾の鉛直一次元モデルを基礎とした鉛直一次元3ボックス連結モデルとした。これに、内部生産項として森北らのモデル²⁾を参考にした物質循環モデルを組み込んだ。これらのパラメータの決定は、本調査結果を再現できるように、文献^{2~4)}を参考にして試行錯誤で行った。

「モデル」の再現性は、年変動パターン及び値のレベルともに良く再現できた。しかし、細部をみると不十分なところもある。したがって、より精度を高めるためには今後更に調査研究をすすめる必要がある。

3 「モデル」の有用性

水質調査結果からは、水質保全対策のために内部生

表5 水質保全対策の水質予測結果(COD75%値)

水質保全対策例	予測結果 (mg/L)
現況 (対策無し)	3.57
排出負荷量の削減	3.41
生活系 COD 46%減 T-N現状, T-P現状	
産業系 COD 27%減 T-N 39%減 T-P 23%減	
畜産系 COD 32%減 T-N 26%減 T-P 31%減	
水田 COD 30%減 T-N 30%減, T-P 30%減	
全排出区分では	
COD 13%減 T-N 7%減 T-P 19%減	
河川直接浄化	
COD 13%減, T-N 7%減, T-P 19%減	2.86
T-N 7%減, T-P 19%減	3.00
T-P 19%減	3.36
選択取水	
標高88m取水	3.28
標高88m取水 (取水量2倍)	2.82
標高76m取水	3.05
標高68m取水	2.86

産を抑制する必要がある。流入栄養塩の削減や湖内対策の必要性が示唆された。しかし、対策の効果の定量的な情報までは得られない。これに対して「モデル」は、流域対策だけでは限界があり、流入河川の直接浄化が効果的であることなどを定量的に示し、湖内対策の選択取水についてもどの方法が効果的かを定量的に示すことができた。対策の効果を示すことは、水理模型実験などでもできるが、相似率の問題や実験装置や計測の問題、データ処理の煩雑さの問題などがあり、多くのケースについて我々の実用的な時間レベルで結果を得ることは困難である。考える。「モデル」にはそのような問題は無く、種々のケースについて容易に結果を得ることができる。このような利点を持つ「モデル」を用いた評価結果を裏付けに、流域対策としての生活排水対策や直接浄化対策としてのヨシ浮礁の設置などの水質保全対策が進められている。

4 「モデル」の問題点

流出水量の定式化の問題は、定式化に馴染まない点もあり今後の課題である。

「モデル」内部の問題として、表層の扱いやボック

ス間の移流の問題と植物プランクトン種の変遷の問題及び生産速度などの決定の問題がある。流動の問題は、現場の実測調査と流動理論のより深い理解とによって実用的なレベルになると思われる。植物プランクトン種の問題は、これを扱ったモデルもみられるが一般化されたものは無く、その定式化は今後の課題である。生産速度などの設定の問題は、実験的に得られるものについては、現在実験中でもあり、精度的に実用レベルになるものと考えているが、全ての条件を満たすような完全性は期待できないと考えている。

計算力の問題として計算法とコンピュータの能力からくる精度と速度の問題がある。数値解法とコンピュータプログラムには工夫の余地はあるが、現時点では飛躍的な改善は望めないと思われる。コンピュータの性能は飛躍的に向上しており、開発当初(約4年前)は1年間の計算に0.25日の時間ステップで約30分かかっていたものが現在では1/100に近い時間で済む。したがって、計算力の問題はパソコンの性能にかかっているとよく、我々の対象とする範囲において計算力の問題はなくなりつつあると思われる。

おわりに

我々の水質予測モデルは、限界と問題点を持ち工夫と改善の余地を残してはいるが、再現性の検討では良好な結果を得ており、少なくとも本事業で求められたものは概ね満足していると考えられる。したがって、「モデル」は、その有用性を考えると、この問題点と限界を十分考慮すれば、水質保全対策策定における支援の道具として利用する意義は大きいと考える。さらに、水質保全対策を支援する道具として、「モデル」をより精度の良いものとするためには、問題点の解決等の研究を進めていくことはもちろんであるが、予測結果がどの程度妥当であったのか、その評価を行うことが重要であると考え。

謝 辞

この調査研究を行うにあたり、モデル等についてご教授いただいた山口大学工学部浮田正夫教授、関根雅彦助教授に深謝いたします。また、ダム管理月報など多くの資料を快く利用させて頂いた木屋川ダム管理事務所の方々並びに調査に協力いただいた当所水質部の皆さんに感謝いたします。

参考文献

- 1) 安芸,白砂 : 電力中央研究所依頼報告, No.74506,
(1974)
- 2) 森北,天野 : 土木研究所報告, 第182号 - 1, 33~
37 (1991)
- 3) 浮田ほか : 土木学会第42回年次学術講演会講演
集, 2, 952~953, (1987)
- 4) 日本水質汚濁研究協会 : 湖沼水質管理指針策定調
査, 昭和58年度環境庁委託業務報告書, (1983)
- 5) 宮永 : 電力中央研究所報告, 研究報告U86015,
17~18, (1987)
- 6) 下関地方气象台 : 山口県気象月報 (西市地区)