

貯水池における富栄養化の数値解析

岩佐 義朗・松尾 直規・森北 佳昭

HYDRAULIC ANALYSIS OF EUTROPHICATION IN A RESERVOIR BY MEANS OF NUMERICAL METHOD

By *Yoshiaki IWASA, Naoki MATSUO and Yoshiaki MORIKITA*

Synopsis

This paper deals with the mathematical procedure of simulation for the eutrophication in reservoirs. The previous simulation models for the eutrophication process have been reviewed and the mathematical model developed by the authors is evaluated through numerical comparisons with the previous ones. The mathematical model of higher level and the numerical simulation technique are explained and their sophisticated application to the Muroh Reservoir is also made. The obtained results are discussed in view of hydraulic aspect.

1. 緒 言

貯水池における富栄養化は、水利用の高度化や多様化が進んだ今日、水産上や景観上の障害のみならず、浄水場でのろ過閉塞、水道水の異臭味などを生じさせるものとして問題とされ、冷水及び濁水長期化とともに、緊急に対策を要する重要な環境研究課題の一つとなってきた。このため、比較的古くからその研究が行なわれていた陸水学や生態学の分野のみならず、水工学の分野でも工学的観点から富栄養化に関する各種の調査研究ならびに解析が鋭意進められるようになったが、定性的なこととはともかくとして、定量的には未だその実態さえ十分に把握されているとはいえないのが現状である。

著者らは、こうした貯水池における富栄養化の課題に対し、数年来水理学的立場からのアプローチを試み、水理解析法に基づく数学モデルの開発とその実際への適用に関する研究を進めてきた^{1)~3)}。その結果、富栄養化に関係する各種水質要素の変化とそれに寄与する流れの運動学的挙動ならびに水温分布とを同時に取り扱う解析モデルを開発するとともに、その妥当性や有効性をいくつかの実例によって明らかにしてきた。

本研究は、これらの一連の研究成果を従来の富栄養化モデルと比較しながらまとめるとともに、富栄養化現象をより詳細かつ忠実に取り扱う数値解析の実施とその結果について述べたものである。すなわち、これまでの解析では不十分な面があった各種水質要素の空間的变化とそのスケールに対する取り扱い、とくに流れ方向の変化について検討し、そのスケールに応じた貯水池分割を行うと同時に、生物学的生産・消費に関する数学モデルの改良を試みてその結果を評価するとともに、得られた結果に基づいて、富栄養化過程における各種の水質挙動と流れの運動学的挙動及び水温分布との関係を水理学的に考察する。

2. 富栄養化解析に関する従来の研究

2.1 従来の富栄養化解析モデル

貯水池を含め湖沼、内海等の閉鎖水域における富栄養化の問題は、陸水学、生態学の分野では比較的古くより取り扱われ、その実態把握と関係する主要素の抽出、さらにはそれら要素間の関係についての調査研究が行われていた⁴⁾。また、それらの研究成果あるいは経験的な事実に基づき、主要な水質要素を対象にその変化を解析するための数学モデルもいくつか作成されている。これらのモデルは、経験的または巨視的なブ

ラック・ボックス型モデル⁵⁾と、対象水域を一つまたは数個の完全混合域とみなし、それに対して植物プランクトンを中心とする低次生態系の動的平衡を近似した動力学的モデルとの二つに大別されるが、それらの大半は、水質の生物学的・化学的变化に重点が置かれたものであり、移流・拡散による水理的变化や、各種変化に寄与する流れの運動及び水温の挙動に関する取り扱いは無視されるか、あるいは極めて単純化されたものに過ぎなかった。

こうした生態学的モデルには、湖沼、内海等を対象にしたものが多いが、貯水池を対象とするものでは、例えば1ボックスの井上のもの⁶⁾、2層あるいは3層に水平分割した合田・海老瀬のもの⁷⁾、Anderson等のもの⁸⁾がある。ところが、貯水池は湖沼に比べ貯水容量に対する流出入量が比較的大きく、流出入に伴う移流熱量及び物質量が貯水池内の水温及び各種水質濃度変化に直接または間接的に大きく影響するため、貯水池を対象としたこの種のモデルによる現象再現には問題となる点が少なくない。

このため最近では、貯留水の流れの運動学的挙動や水温変化を取り扱った水理モデルに各種水質濃度の変化に関するモデルを組み合わせ、これらを連立して解くことによって、実際現象をより忠実に再現しようとするモデルがいくつか提案されてきた。そのなかには、M. I. T. モデルを応用した Marcofsky-Harlemanのもの⁹⁾、Orlob-Selna モデルを用いた Chen-Orlobのもの¹⁰⁾、Park-Schmidt モデルを用いた Schnoor-Fruhのもの¹¹⁾、W. R. E. モデルを用いた Baca. et al.のもの¹²⁾などがあり、わが国では前々報に報告した著者らのモデル¹⁾、電研モデルを応用した宮永らの解析例¹³⁾がある。いずれも上述したような流れの場の挙動が求められるため、その水質変化への寄与をより正しく反映した結果が期待されるが、いくつかの問題点も残されている。その一つは、著者らのモデルを除くと、流れの運動学的挙動の表現に運動量保存則を用いることなく、各種の選択取次式を代用しているため、その挙動を厳密に解くことができないことである。二つ目は、Baca. et al. 及び著者らのモデルを除き、各種水質濃度の変化を水平層分割による一次元モデルで取り扱っている点である。貯水池における水質観測資料によれば、富栄養化に関係する各種水質濃度は、水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化することがわかっており、水深方向の変化のみを取り扱う一次元モデルでは、それらの分布を十分に明らかにすることはできないと考えられる。

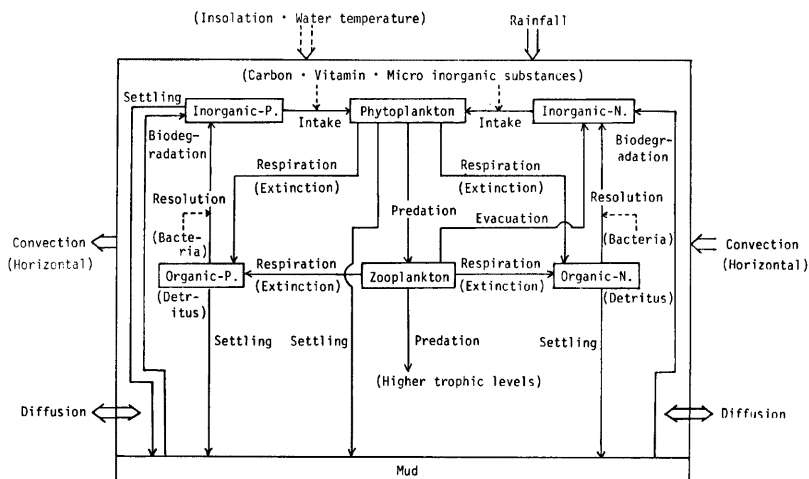


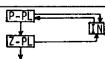
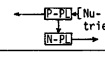
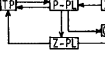
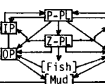
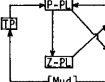
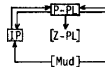
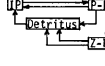
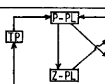
Fig. 1. Mechanism of change of eutrophication indicators in view of phytoplankton population dynamics in control volume

以上、従来の富栄養化解析モデルを概括し、水理学的観点よりその問題点について述べたが、以下、生物学的生産・消費に関する取り扱いについてまとめてみよう。

前に述べたように、富栄養化に関係する各種水質濃度の生物学的生産・消費に関するモデルは、植物プランクトンを中心とする低次生態系の動的平衡を、種々の仮定のもとで単純化し、近似的に表現したものである。言うまでもなく、実際のこうした変化機構は極めて複雑であり、今なお不明な点が少なくない。したがって、その詳細に立ち入って議論することはできないが、従来のモデルに表現されたその一般的な概念を示すと、**Fig. 1** のようであらう。

従来の富栄養化に関する生物学的生産・消費モデルは、Riley¹⁴⁾に代表されるように、**Fig. 1** に示された

Table 1 Simulation models of eutrophication

No.	Researchers	Indexes, Bi	Mathematical modelling			Investigated area (waters)	Division of space	Period of calculation
			Equations	Hydraulic process	Biological process			
1	Ditro et al ¹³⁾ (1971)	P-PL Z-PL IN	$\frac{\partial Bi}{\partial t} = [IO] + [PC]$	[IO]		Estuary of San Joaquin River	Some blocks involving a measuring site	2 years ($\Delta t=1$ day)
2	Inoue ⁴⁾ (1975)	P-PL Z-PL	$\frac{\partial Bi}{\partial t} = [PC]$	Not considered		Amagase Reservoir	Some blocks deviding by one microcosmo	1 month ($\Delta t=1$ day)
3	JSCE ¹⁴⁾ (1975)	P-PL Z-PL IN ON TP (except P in plankton)	$\frac{\partial Bi}{\partial t} = [IO] + [PC]$	[IO]		Lake Biwa	Some blocks (One layer blocks in southern part, two layers blocks in northern part)	3 years ($\Delta t=0.1$ day)
4	Jørgensen ¹⁷⁾ (1976)	P-PL Z-PL IN ON IP OP	$\frac{\partial Bi}{\partial t} = [IO] + [S] + [PC]$	[IO] [S]		Lake Glumse	One box	1 year ($\Delta t=1$ ~a few days)
5	Somiya et al ¹⁵⁾ (1978)	P-PL Z-PL IN ON TP	$\frac{\partial Bi}{\partial t} = [IO] + [S] + [PC]$	[IO] [S]		Southern part of Lake Biwa	One box	3 years ($\Delta t=0.1$ day)
6	Tsuno et al ¹⁶⁾ (1979)	P-PL (Algae) IN IP	$\frac{\partial Bi}{\partial t} = [IO] + [S] + [PC]$	[IO] [S]		Takahamairi Bay in Lake Kasumigaura	Horizontally divided three blocks	1 year ($\Delta t=1$ day)
7	Kishi & Nakata ¹⁸⁾ (1978)	P-PL Z-PL TP Detritus (OP)	Hydraulic model $\frac{\partial Bi}{\partial t} = [C] + [D] + [PC]$	Unsteady tidal flow model (Simulated by FDM) [C] [D]		Mikawa Bay	Unknown	Unknown
8	Iwasa & Matsuo et al ¹¹⁾ (1979)	P-PL Z-PL IN ON TP	Hydraulic model of reservoir dynamics in view of thermal aspect $\frac{\partial Bi}{\partial t} = [IO] + [C] + [D] + [S] + [PC]$	Prediction model of reservoir dynamics in view of thermal aspect [IO] [C] [D] [S]		Muroh Reservoir	Deviding by a block ($\Delta x=1$ km, $\Delta y=1$ m)	1 year (Δt =tens or hundreds of minutes)
Notations P-PL : Phytoplankton Z-PL : Zooplankton IN : Inorganic Nitrogen ON : Organic Nitrogen IP : Inorganic Phosphorus OP : Organic Phosphorus TP : Total Phosphorus [IO] : Inflow and Outflow Terms [PC] : Production and Consumption Terms by Biological Process [S] : Settling Terms [C] : Convection Terms [D] : Dispersion or Diffusion Terms								

いくつかの水質要素から最も支配的なもの一つを選び、その変化のみを取り扱う単変数生産・消費型モデルと、Ditro ら¹⁵⁾に代表されるように、そのうちの二つ以上の水質変化を連立して取り扱う多変数動力学的モデルの二つに大別される。これらはさらに、解析対象とする水質要素やその変化に関する各種因子の影響に関する数学的表現の違いにより細分されるが、一方では、それらに関していくつかの共通点ももっている。

そこで、こうした従来のモデルの共通点と相違点を明らかにするため、多変数動力学的モデルのいくつかの例に著者らのモデルを加え、種々の観点より整理したものが **Table 1** である。また、**Table 1** に挙げたすべてのモデルで解析対象とされている植物プランクトン現存量（あるいはクロロフィルa 濃度）の生産・消費項に関するモデル表現を整理すると **Table 2** のようである。

Table 1 及び **Table 2** より得られる主な点を要約すると次のようである。

- 1) 解析の対象となる水質の主要素は、植物プランクトン現存量（通常クロロフィルa 濃度を指標とする）であり、この増減に関係する動物プランクトン量（炭素濃度）及び各種形態の窒素、リン濃度がこれに加わる。
- 2) 各水質要素の変化は、移流項、拡散項、沈降項及び生産・消費項のすべてを考慮して表現されることもあるが、拡散及び沈降項は省略されることが少なくない。
- 3) 生産・消費項は **Fig. 1** に示したような概念図により表現されるが、そのすべてを考慮することはまれで、さらに単純化されることが多い。
- 4) 生産・消費項を構成する各種の変化率は、各濃度に対する一次反応の形で表現されることが多く、また、それらの係数は、水温及び日射のような物理的因子に対しては一次比例型あるいは高温阻害、強光阻害を考えた指数型の関数で表現され、栄養塩ならびに植物プランクトン濃度などの化学的・生物学的因子に対しては Monod 型の関数が用いられるのがふつうである。
- 5) 岸・中田のモデル²⁰⁾及び著者らのもの¹⁾を除くと、対象水域は一つあるいは数個の完全混合域とみなされるため、そのなかでの水質分布は取り扱われない。また、解析期間は、比較的時間スケールの長い季節

Table 2 Simulation models of phytoplankton population dynamics

No.	Researchers	Growth rate			Respiration rate	Predation rate (Death)	Reference
		Temperature	Light intensity	Nutrients			
1	Ditro et al (1971)	P	E	M(P)	P(temperature)	$P\left\{\frac{Z-PL}{\text{concentration}}\right\}$	
2	Inoue (1975)	P	P	M(P)	P(temperature)	$P\left\{\frac{Z-PL}{\text{concentration}}\right\}$	
3	JSCE (1975)	P	E	M(N&P)	P(temperature)	$P\left\{\frac{Z-PL}{\text{concentration}}\right\}$	
4	Jørgensen (1976)	E	E	M(N, P&C)	E(temperature)	E(temperature) **	Reference1
5	Somiya et al (1978)	P *	M	M(N&P)	P(temperature)	$P\left\{\frac{Z-PL}{\text{concentration}}\right\}$ **	
6	Tsuno et al (1979)	P	E	M(N&P)	P(temperature)	P(temperature)	Reference2
7	Kishi, Nakaŧa (1978)	—	E	M(P)	constant	$P\left\{\frac{Z-PL}{\text{concentration}}\right\}$ **	Reference1
8	Iwasa, Matsuo et al (1979)	P	E	M(N&P)	P(temperature)	$P\left\{\frac{Z-PL}{\text{concentration}}\right\}$ **	
Notations		E(temperature); Exponential function of (temperature) P(temperature); Proportional function of (temperature) M(N); MONOD type function of (N) *; Considering a correction of temperature to diatmaee **; Considering saturation effect reference1; Death rate is constant reference2; Space effect to growth rate is expressed as decreasing function (exponential type) to phytoplankton concentration					

的变化を対象とすることが多いため、1年間あるいはそれ以上の期間とするのがふつうであるが、計算時間間隔は計算の安定条件による制約等から1日以下に細分される。

1)～5)に述べたことは、Table 1に挙げたモデルに関するものではあるが、その他のモデルについてもほぼ同様のことがいえよう。

2.2 貯水池水理モデルとその富栄養化解析への応用

2.1で概括した従来の富栄養化解析モデルの特徴及び問題点と、そのなかで示した著者らのモデルの概要を比較することにより、著者らのモデルの特徴と意義が理解されよう。すなわち、著者らの富栄養化解析モデルは、富栄養化に関する各種水質要素を含む流れとしての性質ならびにその濃度分布の特徴に基き、流体力学原理を出発点に貯水池を水深方向及び流れ方向に分割した体積要素について展開されたものであるとともに、従来無視されてきた運動量保存則を用いて流れの運動学的挙動を表現したものであり、従来のモデルの問題点の解消を図ると同時に、現実の姿をできるだけ忠実に表現した点にその意義がある。いいかえれば、水温及び濁度解析に用いたと同じ貯水池水理モデルを、生物学的生産・消費を伴う富栄養化の問題に適用したことである。

2.1で取り上げたモデルは、この貯水池水理モデルを応用した最初のものであり、室生貯水池への適用によってその妥当性、有効性が実証されている¹⁾。また、その後の解析により、このモデルの性質ならびに各種環境境界条件及び各種パラメータの変化に対する応答特性が調べられ、その結果が評価されると同時に、生物学的生産・消費に関するモデルについての検討が行われた³⁾。その主な結果を要約して述べると、次のようである。

- 1) 分散による水質変化は他の要因によるものに比べ数オーダー小さく、また、流出入に伴う水質変化への直接的影響も、洪水時を除くと、生産・消費によるものに比べかなり小さい。しかし、生産・消費による水質変動とそれに関係する栄養塩量等を伝播するという意味では、移流及び沈降は生産・消費と同程度に重要である。
- 2) 流入に関する境界条件の影響は、表水層及び貯水池上流部など、移流効果が大きなところに現われる。一方、底泥からの栄養塩の溶出による影響は深水層に限られ、水温成層が発達している期間では、表水層での生物学的生産にはほとんど関係しない。
- 3) 生物学的生産・消費に関する各種パラメータの値は計算値に大きく影響するが、とくに植物プランクトンの増殖率、呼吸率、捕食率に関するものが重要である。また、日射及び水温の変動はこれらに大きく影響するため、計算精度の向上には、その影響をできるだけ正しく表現する必要がある。
- 4) 解析に用いる流れ方向及び水深方向への分割値、 Δx 及び Δy の値は、濁度解析の場合と同様、 $\Delta x = 1000\text{m}$ 、 $\Delta y = 1\text{m}$ 程度にとれば実用上支障はないが、より詳細かつより忠実に現象を明らかにするために、さらに小さな値を用いなければならない。

以下では、以上に述べたこれまでの研究成果に基づき、生物学的生産・消費に関するモデルの改良を試みるとともに、それを用いて、室生貯水池を対象により詳細な解析を実施した結果について述べていくことにする。

3. 富栄養化解析法

3.1 生物学的生産・消費に関するモデルの改良

2.で述べた著者らのこれまでのモデルでは、各種水質濃度の生物学的生産・消費に対する水温の影響をすべて水温に比例するという形で表現していた。また、植物プランクトンの増殖率に関して、津野ら¹⁹⁾が導入しているスペース効果や、従来より指摘されている浮遊粒子による光の消散効果を考慮に入れていなかった。このため、このモデルを用いた現象再現の結果では、各種水質変化の時間的・空間的変化の傾向を概ね再現するという点では問題はなかったが、細部では計算値と実測値との不一致がいくつかみられた。

そこで、これらの不一致部分の改善を図り、より精度良く実際現象を再現するために、2.2 の3)に述べたような考察結果に基づいて、生物学的生産・消費に関するモデルを次のように変更した。

- 1) 水温に比例する関数形では、低温期及び低温域での生産活動を過小評価する傾向があるため、この点を考慮して水温による影響を指数関数形で表わす。
- 2) 植物プランクトン個体密度の増大に伴う増殖率への影響を津野らと同様の形で考慮する。
- 3) Fig.2 に示すような、クロロフィルa 濃度（植物プランクトン濃度）と透明度との関係から、浮遊粒子（この場合はクロロフィルa 濃度で代表する）による光の消散効果を考慮する。

3.2 富栄養化解析のための数学モデル

以上の点を改良した結果得られる数学モデルは次のようである。

- (1) 水の連続式；

$$\left| u \cdot B \right|_{x_i}^{i+1} \cdot dy + \left| v \cdot A \right|_{y_n}^{n+1} + q_b = 0 \cdots (1)$$

- (2) 運動量保存則 x 分値；

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{1}{A} \left| u \cdot u \cdot B \right|_{x_i}^{i+1} - \frac{1}{A \cdot dy} \left| u \cdot v \cdot A \right|_{y_n}^{n+1} - \frac{1}{A \cdot dy} u_b \cdot q_b - \frac{1}{A} \left| \rho \cdot B \right|_{x_i}^{i+1} \\ & + \frac{1}{A} \left| D_{mx} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \cdot B \right|_{x_i}^{i+1} + \frac{1}{A \cdot dy} \left| D_{my} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \cdot A \right|_{y_n}^{n+1} \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

- (3) 運動量保存則 y 分値；

$$p = \int_y \rho g \, dy \cdots \cdots (3)$$

- (4) 水温収支則；

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{1}{A} \left| T \cdot u \cdot B \right|_{x_i}^{i+1} - \frac{1}{A \cdot dy} \left| T \cdot v \cdot A \right|_{y_n}^{n+1} - \frac{1}{A \cdot dy} T_b \cdot q_b \\ & + \frac{1}{A} \left| D_{Tx} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot B \right|_{x_i}^{i+1} + \frac{1}{A \cdot dy} \left| D_{Ty} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot A \right|_{y_n}^{n+1} + H \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

- (5) 濃度収支則

- ・クロロフィルa 濃度；

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = F(C_p) - \frac{1}{A \cdot dy} \left| C_p \cdot v_b \cdot c_p \cdot A \right|_{y_n}^{n+1} + G_{c_p} - R_{c_p} \cdot \theta_{c_p}^{(T-20)} \cdot C_p - G_s \cdots \cdots (5)$$

- ・動物プランクトン濃度（炭素濃度）；

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F(Z) + \alpha \cdot a_z \cdot G_s - R_z \cdot \theta_z^{(T-20)} \cdot Z \cdots \cdots (6)$$

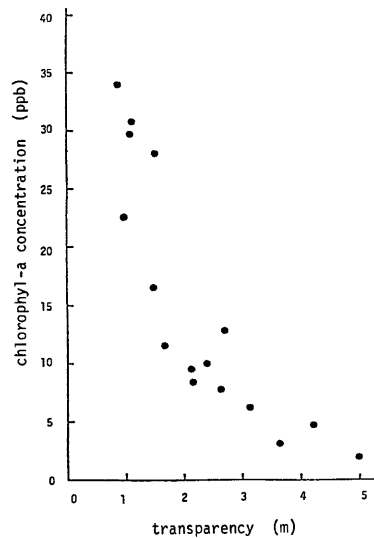


Fig. 2. Chlorophyll-a concentration expressed in terms of transparency depth

・総リン濃度；

$$\frac{\partial P_h}{\partial t} = F(N_h) - \frac{1}{A \cdot dy} \left| P_h \cdot v_{o, P_h} \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} + \frac{L_{P_h}}{1000 \cdot dy} \dots\dots\dots (7)$$

・無機態窒素濃度；

$$\frac{\partial N_I}{\partial t} = F(N_I) - \beta \cdot G_{C_p} + R_N \cdot \theta_N^{(T-20)} \cdot (N_o - \beta \cdot C_p - \gamma \cdot Z) + \beta \cdot (1 - a_s) \cdot G_s \dots\dots\dots (8)$$

・有機態窒素濃度；

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_s}{\partial t} = & F(N_s) - \frac{1}{A \cdot dy} \left| N_s \cdot v_{o, N_s} \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} + \beta \cdot G_{C_p} - R_N \cdot \theta_N^{(T-20)} \cdot (N_o - \beta \cdot C_p - \gamma \cdot Z) \\ & - \beta \cdot (1 - a_s) \cdot G_s \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned} F(c) = & -\frac{1}{A} \left| c \cdot u \cdot B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot dy} \left| c \cdot v \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot dy} c_p \cdot q_b \\ & + \frac{1}{A} \left| D_{ix} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \cdot B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot dy} \left| D_{iy} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} \dots\dots\dots (10) \\ (c = & C_p, Z, P_h, N_I, N_s) \end{aligned}$$

$$G_{C_p} = S_p \cdot R_p \cdot \theta_p^{(T-20)} \cdot \frac{I_i}{I_i} \cdot \exp(1 - \frac{I_i}{I_i}) \cdot \frac{N_I}{K_{N_I} + N_I} \cdot \frac{P_h}{K_{P_h} + P_h} \cdot C_p \dots\dots\dots (11)$$

$$G_s = C_s \cdot \frac{K_{C_p}}{K_{C_p} + C_p} \cdot C_p \cdot Z \dots\dots\dots (12)$$

であり、また、

$$S_p = \exp(-\mu_p \cdot C_p) \dots\dots\dots (13)$$

$$I_i = I_o \cdot \exp\{-\eta \cdot (y_i - y)\} \dots\dots\dots (14)$$

$$\eta = \eta_0 + \mu_\eta \cdot C_p \dots\dots\dots (15)$$

である。

なお、式中の記号は、 R_p , R_{C_p} , R_s , R_N ；それぞれ $T=20^\circ\text{C}$ におけるクロロフィル a 生成率、同じく消滅率、動物プランクトン濃度消滅率、窒素変換率、 θ_p , θ_{C_p} , θ_s , θ_N ；上述の各変換率に対する温度係数、 S_p ；スペース効果係数、 μ_p , μ_N ；定数であり、その他のものについては、既に報告している通りであるため¹⁾、ここでは省略する。

3.3 数値解析法

(1)～(9)式を与えられた境界条件及び初期条件のもとで数値解析することにより、貯水池内における流速、水温及び各種水質濃度の分布とその変化が求められることになる。数値解析は Runge-Kutta 法を用いて時間方向に順次計算を進めるが、空間的には、従来の水温及び濁度解析の場合と同様に、流速の計算点と各濃度の計算点とを交互に配置した形のものが用いられる。この方法では Δt を適当に（安定条件を満たすように）選ぶことにより、比較的容易に安定な計算を進めることができる。なお、こうした計算法の詳細については既報¹⁾を参照されたい。

また、以下に述べる実際の数値解析にあたっては、水面勾配（(2)式の右辺第4項）を省略し、流れを単純化した計算法を用いるが、これによる障害は実用上ほとんどないことがわかっている¹⁾。

4. 室生貯水池における解析結果とその考察

4.1 計算結果と実測値との比較

(1)～(9)式に示した数学モデルを、木津川支川宇陀川中流部に位置する室生貯水池に適用し、富栄養化の数値解析を実施した。計算期間は昭和52年1月25日～10月31日までの約9ヶ月間である。室生貯水池の概要ならびに解析に用いた境界条件及び初期条件は既報¹⁾の通りであるが、 Δx , Δy の値については、2.2. の4)に述べたこと、すなわち、Fig. 3 のクロロフィルa 濃度分布の実測例に示されるような流れ方向への水質変化のスケール、さらにはそれに関係する貯水池の幾何形状を考慮して、 $\Delta x=200$ m, $\Delta y=1$ m とした。また、 Δt は生産・消費項に関する安定条件と移流・分散項に関する安定条件を別々に求め、そのうちの厳しい方の条件を満足するように与えた。なお、(5)～(9)式の生産・消費項に関する各係数値は、過去の経験から Table 3 に示すように定めた。

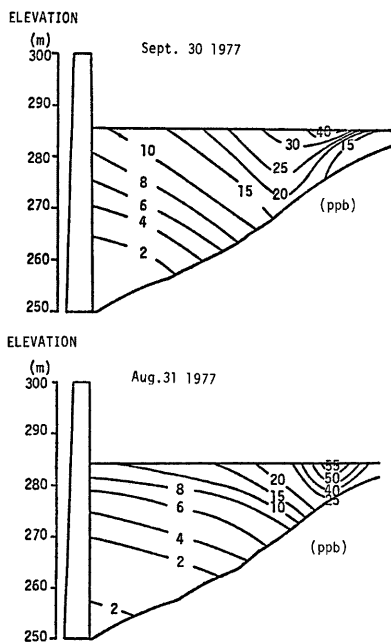


Fig. 3. Distribution of chlorophyll-a concentration in the Muroh Reservoir

Table 3 Parameter values in simulation processes of eutrophication

notation	parameter value
R_T	0.919 (1/day)
R_{Cp}	0.0957 (1/day)
R_Z	0.0383 (1/day)
R_N	0.027 (1/day)
θ_T	1.05
θ_{Cp}	1.05
θ_Z	1.05
θ_N	1.05
α	0.05 (ppm-c/ppb-chl a)
β	0.01 (ppm-N/ppb-chl a)
γ	0.2 (ppm-N/ppm-Z)
K_{Cp}	60 (ppb)
K_{NI}	0.1 (ppm)
K_{Ph}	0.01 (ppm)
I_s	460 (cal)
C_g	0.25 (1/ppm $^{\circ}$ C day)
a_Z	0.6
$v_{o,Cp}$	0.3 (m/day)
$v_{o,Ph}$	0.3 (m/day)
$v_{o,No}$	0.3 (m/day)
μ_s	0.0385
η_o	0.2
μ_n	0.001

以上の諸条件のもとで得られた時間的変化の結果を最下流部最上層で実測値と比較したものが Fig. 4 である。また、各水質濃度の分布結果を濃淡図で表わし、これを実測値による等濃度線図と比較した例が Fig. 5～7 であり、このときの流速分布の計算値を示したものが Fig. 8 である。Fig. 4 より、計算値は、洪水後の6月末～7月の期間を除いて実測値といずれも概ね一致していることがわかる。しかし、従来の解

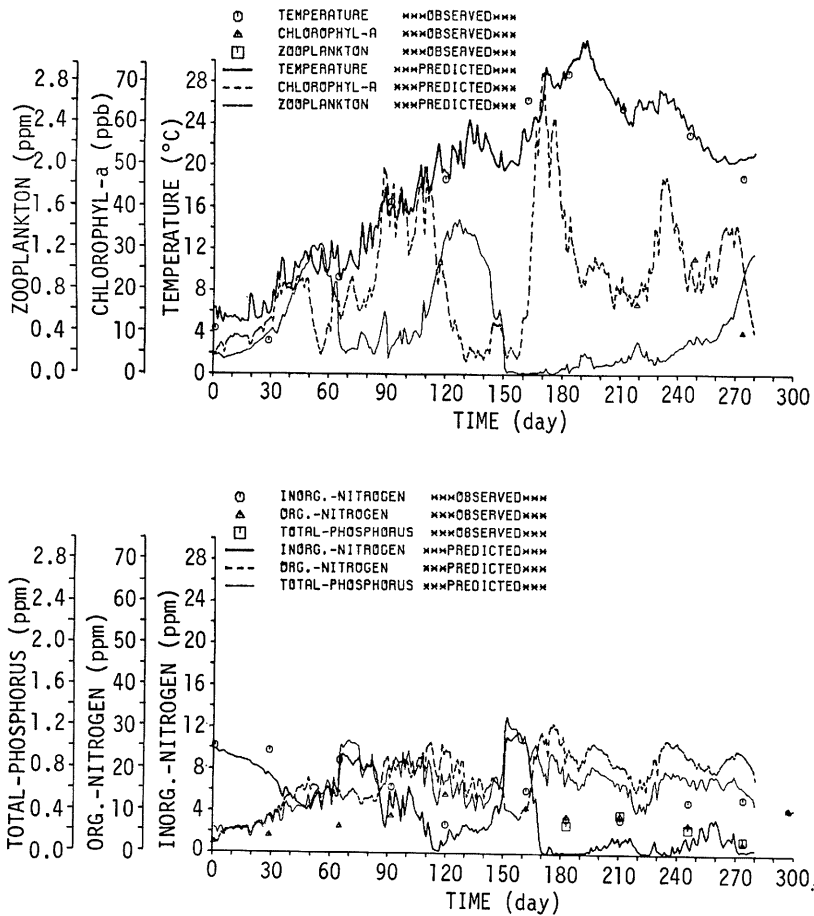


Fig. 4. Estimation of temporal change of eutrophication indicators in the Muroh Reservoir

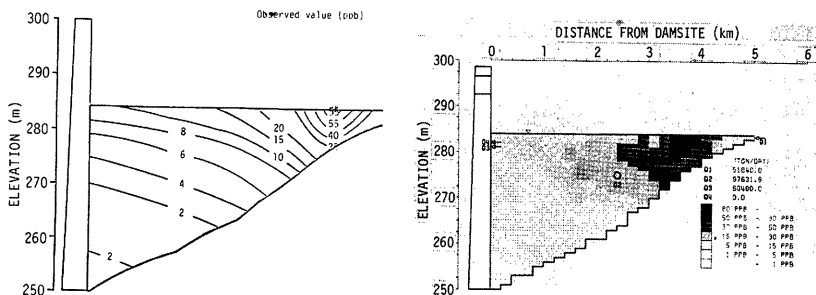


Fig. 5. Estimation of distribution of chlorophyll-a concentration in the Muroh Reservoir (Aug. 31, 1977)

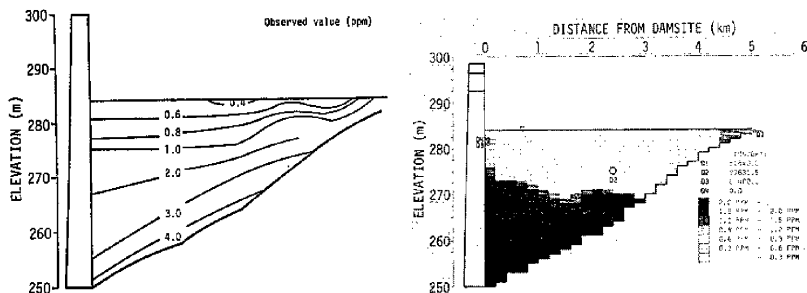


Fig. 6. Estimation of distribution of inorganic nitrogen concentration in the Muroh Reservoir (Aug. 31, 1977)

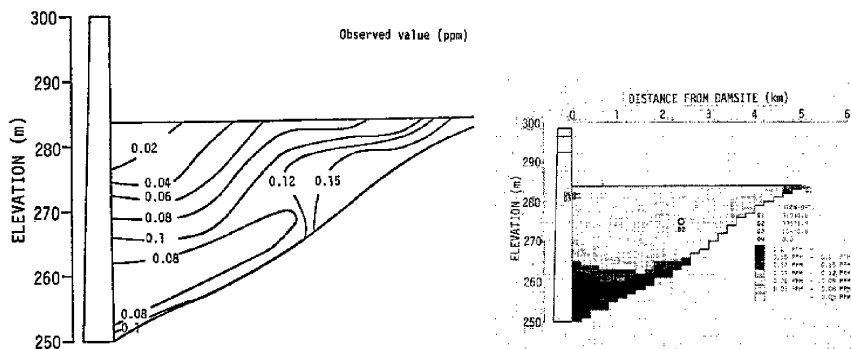


Fig. 7. Estimation of distribution of total phosphorus concentration in the Muroh Reservoir (Aug. 31, 1977)

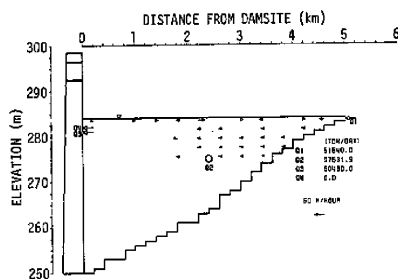


Fig. 8. Velocity distribution calculated in the Muroh Reservoir (Aug. 31, 1977)

析結果と余り大差はなく、上述したような不一致点の問題は依然として残されている。

つぎに、Fig. 5～Fig. 7に示した各水質濃度分布についてみると、計算結果はいずれも実際の分布傾向を比較的良好に再現しているといえよう。具体的には、クロロフィルa濃度が上流端よりやや下流の表水層で高濃度となり、その上下流及び水深方向へは濃度が徐々に低下していく様子や、無機態窒素及び総リンが流入部ならびに深水域で高濃度を示す傾向が、十分に説明されている。

以上より、(1)～(9)式のモデルを用いて前述したような諸条件のもとで数値解析した結果は、水温及び各種水質濃度の時間的・空間的变化を少なくとも定性的には十分に、また定量的にもほぼ満足し得る範囲内で再現するものであるといえよう。

4.2 解析結果に基づく富栄養化現象の考察

Fig. 5～Fig. 7 に示した結果は、水温成層や有光層の深さばかりでなく、Fig. 8 に示したような流出入水による流れの運動学的挙動ならびに流入栄養塩類の分布、さらには貯水池の複雑な幾何形状を反映したものである。そこで、これらの結果と Fig. 8 に示した流速分布の計算結果に基づいて、貯水池における富栄養化、とくに各種水質濃度の分布特性とそれに関係する流れの挙動とについて考察を進める。

Fig. 5～Fig. 7 の結果は、安定した水温成層が標高270～275 mの位置に形成されていた平常時の例であるが、まず、Fig. 8 より、このときの貯留水の流れについて述べると次のようである。

室生貯水池では、ダムでの表層取水（図中の Q_3 ）に加え、貯水池中央付近に設置された取水口から水道用水の取水（ Q_2 ）が行なわれているため、その影響によって、上流側では流入水が表層水を連行しながら取水口のある水深にまで拡がる形で表水層内を流れるのに対し、下流側ではダム取水口へ向かう流れの速度が減じられ、一部で逆に上流側へ向かう流れがあらわれている。また、下流側では、表面付近を除くと流速は極めて小さく、深水層内での水はほぼ停滞している。

Fig. 5～Fig. 7 に示した各水質濃度の分布は、こうした流れの特徴を反映していると考えられる。すなわち、流入した窒素、リンは水道用取水口の上流側表水層に移流、拡散されるが、それより下流側への輸送はこの取水による影響によって妨げられ、また貯水池底より溶出する窒素、リンも、上流側では表水層内に輸送されるが、下流側では深水層内にとどまり表水層へ運ばれることはほとんどないことが表わされている。このため、取水口より上流側の表水層では豊富な栄養塩の供給を背景に、植物プランクトンの増殖が活発化し、その結果、クロロフィルa濃度の高濃度域が形成されることが Fig. 5 に示されていると考えられる。また、Fig. 5 では、高温かつ日射が十分な表面付近で最も高い濃度となることも示されている。一方、この取水口よりダムにかけては、クロロフィルa濃度は比較的低く、Fig. 8 に示した流速分布を反映した分布形状となっていることがわかる。すなわち、この領域では栄養塩の供給が十分でないため植物プランクトンの増殖は余り活発化せず、むしろ移流による物質移動量に支配されていると考えられる。こうしたクロロフィルa濃度の分布特性、すなわち生物学的生産に関する空間的特徴は、流入した比較的高濃度の窒素が上流部表水層でほとんど消費され、それより下流にはほとんど供給されないことを示した Fig. 6 の結果からも理解されるであろう。

以上は、水温成層が存在する平常時での、富栄養化関連要素の分布特性について述べたものであるが、洪水時及びその後の期間や冬の循環期では、これとはかなり様子が異なってくるであろう。洪水時には、移流による物質移動が支配的となり、その移動量自体も流入負荷量の増大に伴って大きくなるため、窒素及びリンの栄養塩が表水層全域にわたって供給され、それが、その後の生物学的生産に大きく影響することが予想される。例えば、Fig. 9 は昭和52年6月の洪水後の計算例であるが、このときのクロロフィルa濃度の分布は Fig. 5 に示したものとは異なり、表水層全域にわたって高濃度層が形成されていることがわかる。一方、循環期においては、対流による水深方向の混合によって、深水層の高濃度の栄養塩が表水層へ回帰され、それが春期における植物プランクトンの増殖に関係するといわれている。しかしながら、これらの期間におけるそうした現象に関する観測は十分でなく、その実態すら明らかでないのが現状であり、その解明は

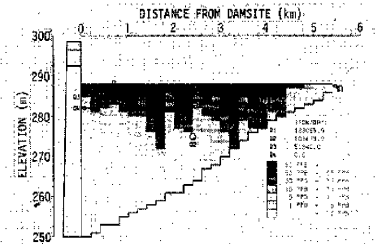


Fig. 9. Distribution of chlorophyll-a concentration calculated in the Muroh Reservoir after a flood encroachment (Jul. 9, 1977)

今後の課題であろう。

5. 結 言

本研究では、富栄養化に関する従来の数学モデルを整理するとともに、著者らのこれまでの研究成果をまとめ、その意義について述べた。さらに、その成果に基いて富栄養化に関係する各種水質要素の生物学的生産・消費に関するモデルの改良を試み、それを用いて、室生貯水池を対象に従来より詳細な数値解析を実施し、その結果を実測値と比較すると同時に、水理学的に考察した。

得られた成果を要約すると次のようである。

- 1) 富栄養化に関係する従来のモデルを分類整理するとともに、それらの特徴と問題点を明らかにした。
- 2) 貯水池水理の解析法に基く富栄養化解析モデルを明らかにするとともに、その実際への適用により、水質濃度の時間的・空間的变化を概ね再現しうることを実証した。
- 3) 室生貯水池における数値解析結果より、平常時の各種水質濃度分布特性と流れの運動学的特徴との関係を明らかにした。

最後に本研究を行なうにあたり、観測資料の提供をいただいた建設省木津川上流工事事務所の各位に謝意を表すとともに、作図等に御協力いただいた京都大学工学部河川工学研究室の大学院生ならびに学生諸君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗・松尾直規・俞朝夫：貯水池水理の数値解析法とその適用について、京都大学防災研究所年報，第22号-B，1979. 4
- 2) 仏原肇・岩佐義朗・松尾直規：貯水池水理モデルによる富栄養化のシミュレーション，第34回土木学会年次学術講演会概要集，1979
- 3) 森北佳昭・岩佐義朗・松尾直規：貯水池における富栄養化シミュレーションに関する考察，第35回土木学会年次学術講演会概要集，1980.
- 4) 例えば，津田松苗：陸水生態学，共立出版，1974.
- 5) 例えば，Vollenwider, R. A.; Advances in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrophication, New, 1st Ital, Idrobio, Vol. 33, 1976.
- 6) 建設省近畿地建淀川ダム統合管理事務所：昭和49年度宇治川汚濁調査報告書，1975，pp. 55～84.
- 7) 合田健・海老瀬潜一：水質の変化とその予報に関する研究（成層流における水質変化について）：第9回衛生工学研究討論会講演論文集，1973，pp. 208～216.
- 8) Anderson, D. R. et al: Water Quality Modelling of Deep Reservoirs, Jour. of Water Pollution Control Federation, 1976.
- 9) Marcofsky, M. and Harleman, D. R. F.: A Predictive Model for Thermal Stratification and Water Quality in Reservoirs, MIT Report 134, 1971.
- 10) Chen, C. W. and Orlob, G. T.: Predicting Quality Effects of Pumped Storage, Jour. of ASCE, Vol. 98, PO-1, 1972, pp. 65～75.
- 11) Schnoor, J. L. and Fruh, E. G.: Dissolved Oxygen Model of a Short Detention Time Reservoir with Anaerobic Hypolimnion, Water Resources Bulletin, AWRB, Vol. 15, No. 2. 1979, pp. 506～518.
- 12) Baca, R. G. et al: A Generalized Water Quality Model for Eutrophic Lakes and Reservoirs, Battele Pacific Northwest Labs. Report for U. S. EPA, 1974.
- 13) 宮永洋一・安芸周一・秋元保・斉藤茂：貯水池内における濁度及び栄養塩の挙動の数値解析，第22回水理講演会論文集，1978，pp. 119～124.
- 14) Riley, G. A.; Theory of Food-Chain Relations in the Ocean. "The Sea." pp. 438～463, H. N.

- Hill, Ed. Interscience, New York, 1963.
- 15) Ditoro, D. M., O'Connor D. J. and Thomann, R. V.: A Dynamic Model of Phytoplankton Population in the Sacramento-San Joaquin Delta, *Advances in Chemistry Series*, Vol. 106, 1971, pp. 131~180.
- 16) 土木学会：琵琶湖の将来水質に関する調査報告書, 1975.
- 17) Jørgensen, S. E.: A Eutrophication Model of Water Systems, *Ecological Modelling*, Vol. 2, No 2, 1976.
- 18) 宗宮功・海老瀬潜一・奥川光治：琵琶湖南湖におけるプランクトンと栄養塩類の挙動, 衛生工学研究シンポジウム講演論文集, 1978, pp. 58~62.
- 19) 津野洋・相崎守弘・合田健：霞ヶ浦高浜入における藻類増殖のシミュレーションに関する研究, 国立公害研究所報告第6号, 1979, pp. 273~280.
- 20) 岸道郎・中田喜三郎：内湾低次生態系のシミュレーションと問題点, *海洋科学*, Vol. 10, No. 10, 1978, pp. 796~806.