

合流部を有する貯水池での富栄養化シミュレーション

Mathematical Simulation of Man - Made Eutrophications in Reservoirs with Contluent Rivers

中部大学工学部 正員 松尾直規

京都大学工学部 正員 岩佐義朗

1. はじめに

貯水池の富栄養化は様々な側面を有しているが、なかでも各種の生物環境的障害と関係の深い植物プランクトンの異常発生ならびにそれに関連する各種水質現象は重要な研究課題の1つである。この課題の解明には生態学的過程のみならず種々の関連要素、すなわち貯水池を取り巻く人為的・自然的環境境界条件、貯水池の幾何形状を含む地形形態の特徴ならびに貯水池の水理・水文特性などとの関係を、比較的小さな時間・空間スケールに応じてできるだけ忠実に取り扱うことが必要であり、またそうでなければ実際現象の正しい理解とそれに基く技術的対策手段の樹立は期待できない。

このため、著者らは従来よりこの課題について、貯水池水理の立場からのアプローチを行い、関連する主要な水質指標の変化を解析・予測するための数学モデルの開発ならびにその実際への適用を進めてきた。^{1)~3)}本報告は、そうした研究の1つとして、合流部を有する貯水池、すなわち貯水池内において支川の合流がありその上流方向へも本川筋同様背水域が広がっているような貯水池を対象に、富栄養化シミュレーションを実施した例について述べようとするものである。

2. 富栄養化シミュレーションのための数学モデル

著者らは既に、貯水池における水理・水質要素の力学的特徴ならびに既存資料より得られる範囲内での各要素の時間的・空間的分布特性に基いて、富栄養化に関連する主要な水質指標の変化をそれに寄与する貯留水の運動及び水温の挙動と同時に取り扱う1次元多層流モデルを開発している。ここでは、この既存のモデルを、合流部を有する貯水池の幾何形状に合わせて適用することを試みるとともに、その生態学的過程に関するモデルの一部を改良して実際現象の解析を進める。

すなわち、対象とする貯水池を、図-1の例に示すように分割し、各分割要素について水の連続式、運動量保存則、水温収支則ならびに以下に述べる各種水質指標の濃度収支則を適用する。このとき、合流部の分割要素についての取扱いが問題となるが、ここでは本川の流下方向に対する支川の合流角度（図-1に示す θ ）を考慮して運動量保存則の適用を図るとともに、各収支則においては支川水の流入に伴う項を付加することにより計算を進める。⁴⁾

種々の植物プランクトンを中心とする一次生態系の動力学的過程に係る要素は様々であり、それらの関与の度合いは各水域毎に異なるのがふつうである。このため、富栄養化シミュレーションにおいて対象とする水質指標についても様々の考え方があるが、本解析では、従来より比較的那の評価が定まっておリしかも実測資料が存在する主要な7つの指標、すなわち種々の植物プランクトン量に関する平均値を表わすものとしてのクロロフィルa濃度、同じく動物プランクトンに關しての炭素濃度、栄養塩である無機及び有機態の窒素、リン濃度、ならびに一般的有機汚濁指標としてのCOD濃度を取り扱うことにする。

これらの水質指標間の生態学的過程における関係は

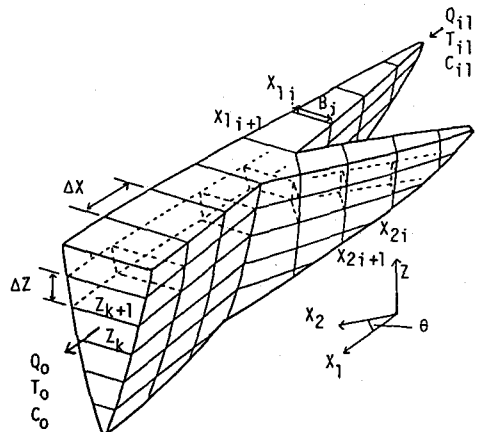


図-1 合流部を有する貯水池の分割

その重要度及び時間的変化のスケール等に関する従来の知見に基き、図-2に示すようなものを考えることにし、具体的には次のように表現する。

1)増殖率や呼吸率など、各種水質濃度の生産・消費率に及ぼす水温の影響を指標関数で表わす。

2)増殖率に対する日射の影響を、強光阻害を考慮した指数関数形で表現する。なお、このとき植物プランクトンの存在による光の消散効果をクロロフィルa濃度の関数として導入する。

3)増殖率に対する栄養塩の影響を、無機態窒素及びリンに関してMonod型の関数で表わす。

4)増殖率に対しスペース効果をクロロフィルa濃度の関数として導入する。

5)捕食率については飽食効果をMonod型の関数を用いて導入する。

以下に、上述した数学モデルを示す。まず、合流部を除く分割要素については、水の連続式、運動量保存則及び水温収支則が従来のものと同じであることからそれらを省略し、各種水質指標に関する濃度収支則のみを示すことにする。それらは、中間層の分割要素について次のようである。

・クロロフィルa濃度；

$$\frac{\partial C_P}{\partial t} = F(C_P) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |C_P \cdot W_{C_P} \cdot A|_{z_k}^{z_{k+1}} + G_{C_P} - R_{C_P} \theta_{C_P}^{(T-20)} C_P - G_Z \quad (1)$$

・炭素濃度（動物プランクトン個体密度）；

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F(Z) + \alpha_{aZ} G_Z - R_Z \theta_Z^{(T-20)} Z \quad (2)$$

・無機態窒素濃度；

$$\frac{\partial N_I}{\partial t} = F(N_I) - \beta_N G_{C_P} + R_N \theta_N^{(T-20)} (N_0 - \beta_N C_P - r_N Z) + \beta_N (1 - a_Z) G_Z + \frac{E_{N_I}}{\Delta z} \quad (3)$$

・有機態窒素濃度；

$$\frac{\partial N_O}{\partial t} = F(N_O) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |(N_0 - r_N Z) \cdot W_{N_O} \cdot A|_{z_k}^{z_{k+1}} + \beta_N C_P - R_N \theta_N^{(T-20)} (N_0 - \beta_N C_P - r_N Z) - \beta_N (1 - a_Z) G_Z \quad (4)$$

・無機態リン濃度；

$$\frac{\partial P_I}{\partial t} = F(P_I) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |P_I \cdot W_{P_I} \cdot A|_{z_k}^{z_{k+1}} - \beta_P G_{C_P} + R_P \theta_P^{(T-20)} (P_0 - \beta_P C_P - r_P Z) + \beta_P (1 - a_Z) G_Z + \frac{E_{P_I}}{\Delta z} \quad (5)$$

・有機態リン濃度；

$$\frac{\partial P_O}{\partial t} = F(P_O) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |(P_0 - r_P Z) \cdot W_{P_O} \cdot A|_{z_k}^{z_{k+1}} + \beta_P C_P - R_P \theta_P^{(T-20)} (P_0 - \beta_P C_P - r_P Z) - \beta_P (1 - a_Z) G_Z \quad (6)$$

・COD濃度；

$$\frac{\partial C_O}{\partial t} = F(C_O) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |C_O \cdot W_{C_O} \cdot A|_{z_k}^{z_{k+1}} + f_P \cdot G_{C_P} - f_C \cdot C_O + \frac{E_{C_O}}{\Delta z} \quad (7)$$

ここに、

$$G_{C_P} = S_P \cdot R_G \cdot \theta_G^{(T-20)} \frac{I_{Z_k}}{I_S} \exp(1 - \frac{I_{Z_k}}{I_S}) \cdot \frac{N_I}{K_{N_I} + N_I} \cdot \frac{P_I}{K_{P_I} + P_I} \cdot C_P$$

$$G_Z = d \cdot \frac{K_{C_P}}{K_{C_P} + C_P} \cdot C_P \cdot Z$$

$$S_P = \exp(-\mu_S C_P), \quad I_{Z_k} = I_0 \exp\{-\eta(z_s - z_k)\}, \quad \eta = \eta_0 + \mu_\eta C_P$$

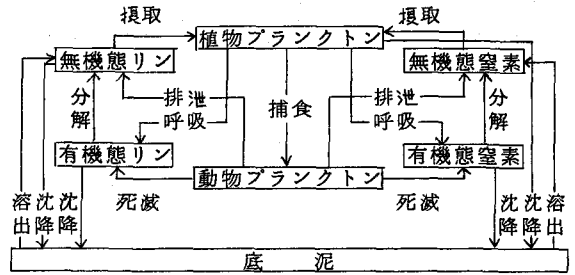


図-2 生態学的過程における各種水質指標の関係

また、 $F(C_P)$, $F(Z)$, $F(N_I)$, $F(N_O)$, $F(P_I)$, $F(P_O)$, $F(C_O)$ は各水質濃度に関する移流項及び分散項を示すものであり、例えばクロロフィル a 濃度 C_P については次のようである。

$$F(C_P) = -\frac{1}{A} |C_P u B|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |C_P w A|_{z_k}^{z_{k+1}} + \frac{1}{A} |D_{CX} B \frac{\partial C_P}{\partial x}|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} |D_{CZ} A \frac{\partial C_P}{\partial z}|_{z_k}^{z_{k+1}} \quad (8)$$

式中の記号は、 G_P : 植物プランクトンの増殖による C_P の生成率、 G_Z : 動物プランクトンの捕食による C_P の消滅率、 T : 水温、 R_G , R_{C_P} , R_Z , R_N , R_P ; それぞれ $T = 20^\circ\text{C}$ における C_P の生成率係数、同じく呼吸率 (死滅率) 係数、 γ の死滅率係数、窒素及びリンの無機化 (分解) 係数、 θ_G , θ_{C_P} , θ_Z , θ_N , θ_P ; それぞれ R_G , R_{C_P} , R_Z , R_N , R_P に対する温度補正係数、 K_{N_I} , K_{P_I} , K_{C_P} ; N_I , P_I , C_P に関する Michaelis 定数、 d : 捕食係数、 S_P ; スペース効果係数、 a_Z ; 同化係数、 d : 植物プランクトン中の炭素量とクロロフィル a 量との比、 β_N , β_P ; 植物プランクトン中のクロロフィル a 量と窒素量、リン量との比、 r_N , r_P ; 動物プランクトン中の炭素量と窒素量、リン量との比、 E_{N_I} , E_{P_I} , E_{C_O} ; N_I , P_I , C_O の溶出フラックス、 W_{C_P} , W_{N_O} , W_{P_I} , W_{P_O} , W_{C_O} ; C_P , N_O , P_I , P_O , C_O に関する沈降速度、 I_{Z_k} : 標高 Z_k における日射量、 I_S : 最適日射量、 I_0 : 水表面における日射量、 η : 日射の水中減衰係数、 μ_S , μ_η ; 比例定数、 f_P ; クロロフィル a の COD 換算係数、 f_C ; COD の分解係数、 A : 分割要素の水平断面面積、 Δz : 分割要素の厚さ、 B : 貯水池幅、 x, z : 流下方向及び水深方向距離、 u, w : x, z 方向の流速成分、 D_{CX} , D_{CZ} ; x, z 方向の濃度分散係数、 x_i, x_{i+1} ; $x = x_i, x_{i+1}$ における値を示す、 z_k, z_{k+1} ; $z = z_k, z = z_{k+1}$ における値を示す、 z_S : 水表面における標高である。

つぎに、合流部について示せば以下のようである。

・水の連続式;

$$|u_1 B|_{x_{1g}}^{x_{1g+1} \Delta z} + |w A|_{z_k}^{z_{k+1}} - (u_2 B)_{x_{2g}} \Delta z = 0 \quad (9)$$

・流下方向の運動量保存則;

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{1}{A} |u_1 u_1 B|_{x_{1g}}^{x_{1g+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} |u_1 w A|_{z_k}^{z_{k+1}} = & -\frac{1}{A} \left| \frac{p}{\rho} B \right|_{x_{1g}}^{x_{1g+1}} + \frac{1}{A} |D_{mx1} B \frac{\partial u_1}{\partial x}|_{x_{1g}}^{x_{1g+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} |D_{mz} A \frac{\partial u_1}{\partial z}|_{z_k}^{z_{k+1}} \\ & - \frac{\cos \theta}{A} \left| \frac{p}{\rho} B \right|_{x_{1g}}^{x_{1g+1}} + \frac{\cos \theta}{A} (u_2 u_2 B)_{x_{2g}} - \frac{\cos \theta}{A} (D_{mx2} B \frac{\partial u_2}{\partial x})_{x_{2g}} \end{aligned} \quad (10)$$

・水深方向の運動量保存則 (静水圧分布);

$$p = \int_{z_k}^{z_S} \rho g dz \quad (11)$$

・水温収支則;

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{A} |Tu_1 B|_{x_{1g}}^{x_{1g+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} |Tw A|_{z_k}^{z_{k+1}} = & \frac{1}{A} |D_{Tx1} B \frac{\partial T}{\partial x}|_{x_{1g}}^{x_{1g+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} |D_{Tx2} B \frac{\partial T}{\partial z}|_{z_k}^{z_{k+1}} \\ & + \frac{1}{A} (Tu_2 B)_{x_{2g}} - \frac{1}{A} (D_{Tx2} B \frac{\partial T}{\partial x})_{x_{2g}} + H \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 x_1, x_2 ; 本川及び支川の流下方向距離、添字 $g, g+1$; 合流部上流側及び下流側境界面での値を示す、 θ ; 合流角度、 u_1, u_2 ; x_1 及び x_2 方向の流速成分、 p ; 圧力、 ρ ; 流体密度、 g ; 重力加速度、 D_{mx1} , D_{mx2} , D_{mz} ; それぞれ x_1, x_2, z 方向の運動量分散係数、 D_{Tx1} , D_{Tx2} , D_{Tx} ; x_1, x_2, z 方向の温度分散係数、 H ; 気象要因による温度増加率である。

なお、各種水質濃度の収支則についても、移流項及び分散項を水温収支則と同様に表示すれば良く、それ以外は、(1)~(7)式のモデルがそのまま用いられることになる。

3. 適用例とその考察

2. に示した数学モデルを、図-3 に示すような幾何形状を有する一庫貯水池に適用し、各種水質濃度の変化に関する数値シミュレーションを実施した。同貯水池は総貯水容量 $3,330 \text{ 万 m}^3$ の成層型貯水池であり、本川である一庫大路次川と支川の田尻川が流入している。なお、両河川の流域面積比は $68:32$ である。貯水池内では図に示すような地点で水温及び各種水質濃度の鉛直分布に関する観測が行われており、また各河川

の流入地点でも流入水に関するそれらの値が測定されている。以下にこの貯水池を対象としたシミュレーションの概要を示す。

(1) 数値計算法

2. で述べた数学モデルを Staggerd Scheme を用いた up - wind difference 法によって差分式に変形し、流速・水位の値を前進差分法で交互に求めると同時に、水温及び各種水質濃度に関しては 2 ステップの Runge-Kutta 法を用いて計算を進める。合流部においても、図-4 に示すように計算点を配置することにより同様の計算が進められる。なお、計算法の詳細は著者らの文献¹⁾を参照されたい。

(2) 境界条件

水表面、底面及び流入端における境界条件は従来と同様であるが、流入端での条件は本川及び支川のそれぞれについて与えることになる。このとき流量に関しては、上述した流域面積比に応じてそれを配分する。また、水温及び各種水質濃度は、各流入端での実測値に基き、それぞれ気温及び流入流量との相関関係より推定したものを用いる。

(3) その他の計算条件

計算期間は昭和57年10月1日～昭和58年9月30日の1年間とし、各水質濃度の初期条件には計算開始日に最も近い昭和57年10月4日の実測値を与えた。

貯水池の分割要素の大きさは、対象とする水質指標の空間的一様性に基いて決められなければならないが、その詳細な実測資料がないことから、ここでは過去の経験及び実用上の観点より、 $\Delta x = 500$ m、 $\Delta z = 2$ m とする。

各種分散係数の値には Reynolds 相似を仮定し、流入流量の一次関数として与える。水深方向の値は平常時 $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーとなるよう設定し、流入方向のそれはその 10^4 倍とした。

また、各水質濃度の生態学的変化に関する係数値は、既存資料より得られる値の範囲内で調整した。

(4) 計算結果の例とその考察

得られた結果を実測値と比較して示した例が図-5～8である。図-5は、図-3に示した基準地点における最上層の水温及び各種水質濃度の時間的変化であるが、水温、クロロフィル a 及び無機態窒素濃度の計算値が実測値と比較的良好な一致を示しているのに対し、無機態リンは、流出入水に伴う変化が支配的となる冬季に実際より高く、植物プランクトンによる摂取が卓越する夏季にはその逆の結果となっている。また COD 濃度は実測値より全般に低く、動物プランクトンを表わす炭素濃度は極めて低い値のためほとんど図に現われていない。無機態リン及び COD については流入濃度の推定精度や植物プランクトンの増殖に伴う変化率の値に問題を残していると考えられるが、炭素濃度の結果に関しては実測資料が全くないことから現段階では評価することができない。

図6～8は、昭和58年5月～8月にかけての水温成層期における各水質観測地点での鉛直分布例であるが、図-7及び8の例にみられる水温の不一致を除けば、上述した時間的変化に関する場合とほぼ同じことが言えよう。水温分布に関する不一致は、それ以前に生じた出水時における変化の違いを反映したものであり、流れ及び水温の挙動の再現に問題を残しているようである。この場合、流入水の温度や分散係数の値など不確定要素に関するものの他に、分割要素の大きさ、さらにはここで用いた数学モデル及び計算法にもその原因が考えられ、今後それらについてさらに検討を進めなければならない。また、図-7及び8において

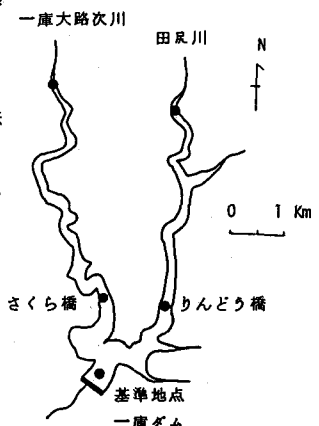


図-3 対象貯水池の概要

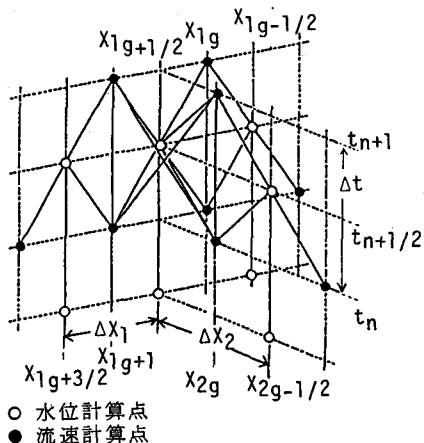
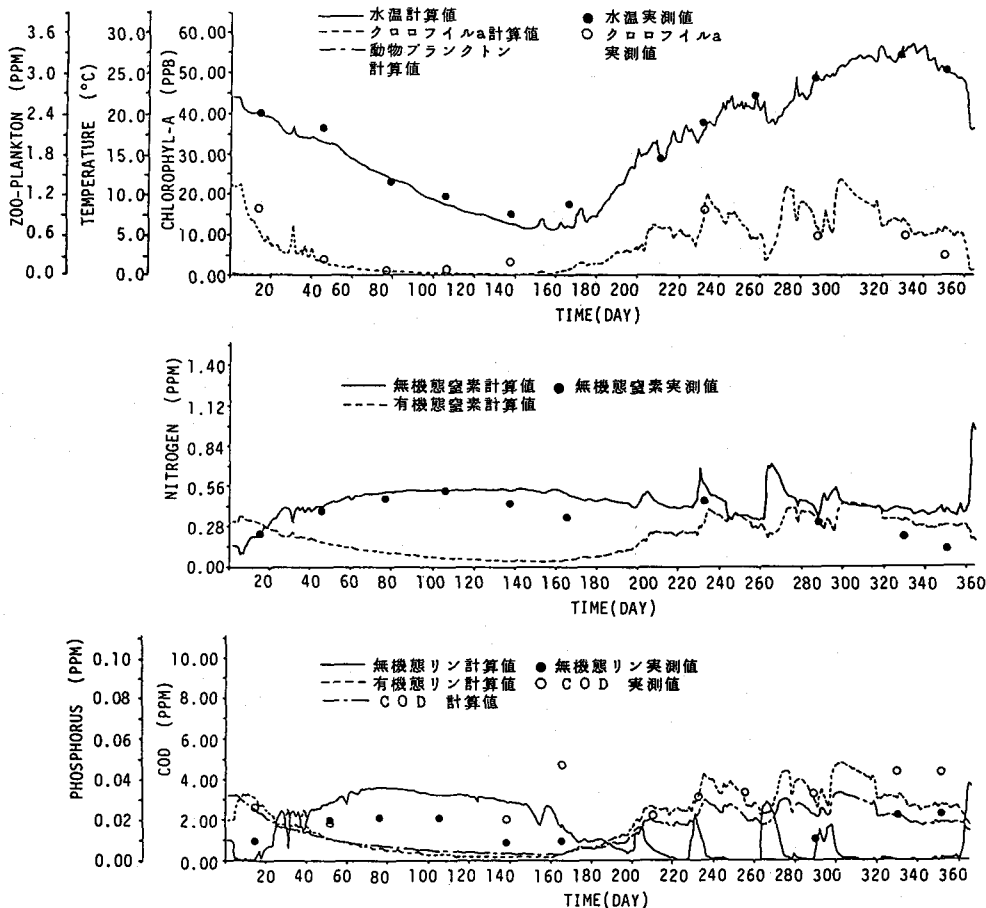
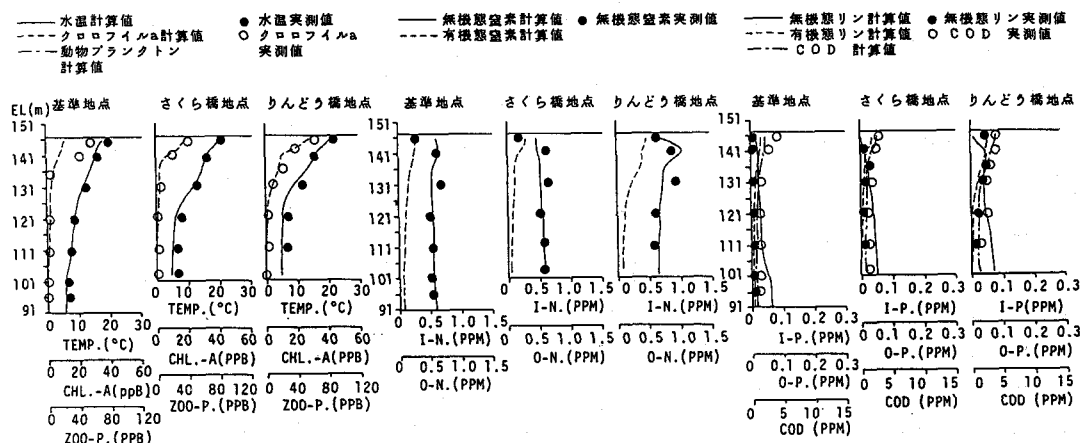


図-4 合流点における計算点の配置

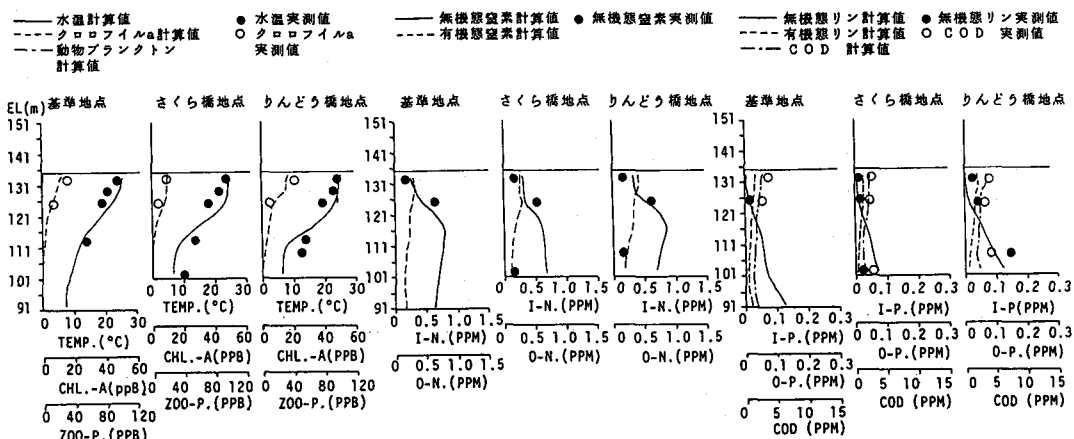
れる深水層での無機態窒素・リンに関する不一致は、底泥からの溶出の設定値に起因すると考えられ、窒素についてはそれをかなり過大に見積っているようである。なお、いずれの例においても、3地点の場所的な違いは余り顕著でなく、幾何形状の影響は明らかでない。



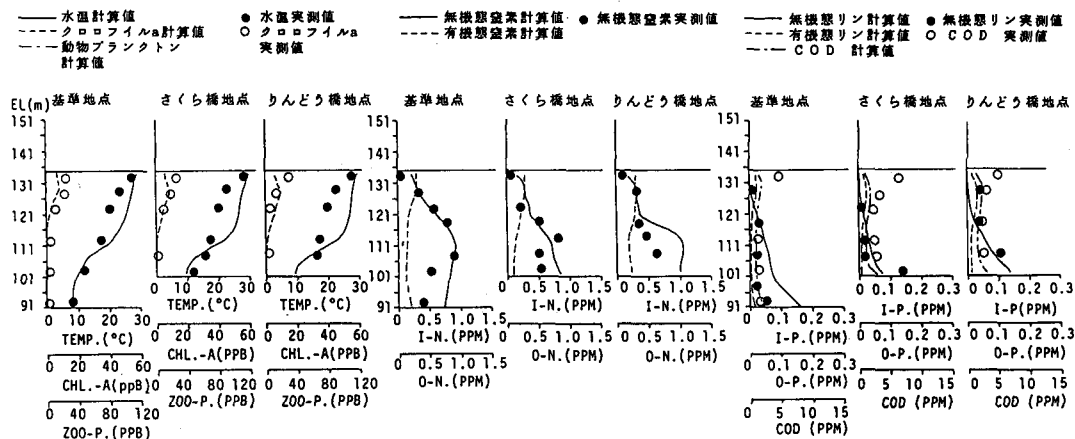
図一五 水温及び各種水質濃度の時間的変化に関する再現例



図一六 水温及び各種水質濃度の鉛直分布に関する再現例 (昭和57年5月20日)



図一 水温及び各種水質濃度の鉛直分布に関する再現例 (昭和58年7月15日)



図一 水温及び各種水質濃度の鉛直分布に関する再現例 (昭和58年8月26日)

4. 結語

本研究では、合流部を有する貯水池での富栄養化現象を2.で述べたような1次元多層流モデルを用いて解析した。その結果、いくつかの問題点を残してはいるが、実用上は十分な精度で水温及びクロロフィルa濃度などの変化が再現された。問題点としては、流入濃度や生態学的過程における各種変化率などのように、実測資料の不備及び基礎的知見の不足に伴う不確実要素に起因するものが多いが、貯水池分割法を含め厳密には3次元的な現象を1次元多層流モデルで取り扱うことにより生ずる問題、計算技術に関するもの、水質指標とその生態学的変化の選択に関するものなど、シミュレーションのためのモデルならびにアルゴリズムについてさらに検討を要する問題もある。今後ともより一層の検討を進め、2次元多層流モデルの開発を含めて富栄養化シミュレーション法の確立を図っていきたい。

参 考 文 献

- 1) 岩佐・松尾・兪; 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
- 2) 松尾・岩佐; 貯水池における水理特性の変化とその予測, 第24回水理講演会論文集, 1980
- 3) 岩佐・松尾・森北; 貯水池における富栄養化の数値解析, 京都大学防災研究所年報第24号-B, 1981
- 4) 松尾・岩佐・川那部; 合流部を有する貯水池の水理解析法とその適用について, 第37回年講概要集, 1982