

平面多層モデルによる貯水池の富栄養化現象の数値解析

Numerical Simulation of Eutrophication Phenomena
in a Reservoir by means of Plane Multi-layered Model

松尾直規*・岩佐義朗**・椎野佐昌***・山田哲也****

(By Naoki MATSUO, Yoshiaki IWASA, Sukeaki SHINO and Tetsuya YAMADA)

This paper deals with the numerical simulation study of eutrophication phenomena coupled with hydraulic behaviours of stored waters in a stratified reservoir by means of plane multi-layered model. This model is deduced from the hydrodynamic principles by making use of curvilinear orthogonal coordinate systems according to the geometrical features in the flow field. The case study in Muroh Reservoir is made and the results obtained through the simulations are discussed with successful verifications of the proposed procedures.

Keywords: numerical analysis, eutrophication, plane multi-layered flow

1. はじめに

本研究は、貯水池における富栄養化現象とそれに寄与する貯留水の水理学的挙動について、平面多層モデルによる数値解析を実施し、その結果を考察するものである。貯水池における水の華や淡水赤潮の発生に代表される富栄養化現象は、複雑な幾何形状ならびに流入に関する境界条件に対応した貯留水の運動特性と密接に関連しており、しばしば局所的な変化を示すことが経験的に知られている。したがって、その本質を理解し、富栄養化に対する有効な対策を樹立するためには、貯留水の流れの運動、水温および各種水質濃度の3次元分布とその変化を再現し、藻類の異常発生に関わる水理条件その他をより詳細かつ定量的に明らかにすることが必要であり、本研究の目的もこの点にある。

数値解析は、直交曲線座標系を用いた平面多層モデル¹⁾の適用を図ることにより進める。このモデルは、貯水池の幾何形状の特徴とそれに応じた各種水理要素の空間的一様性に基いて開発されたものであり、複雑な境界条件に対応した水理現象を忠実に詳細に取り扱うことが可能である。²⁾なお、解析対象は室生貯水池であり、出水に伴う栄養塩の流入があった後に、藻類の発生が生じた一連の現象を追跡している。

*正会員 工博 中部大学助教授 工学部土木工学科 ***正会員 (株)四電技術コンサルタント
(〒487) 春日井市松本町1200 (〒761-01) 高松市屋島西町2109-8
正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 **学生員 京都大学大学院工学研究科
(〒606) 京都市左京区吉田本町 (〒606) 京都市左京区吉田本町

2. 数値解析モデル

2. 1 基礎方程式

貯水池の多くは、蛇行する旧河道に沿って細長く伸びる平面形状を有し、そこでの流れはほぼ水平で上流から下流へ向かうものが卓越している。また、流れは変化が緩慢な乱流であり、ブシネスク近似に加え、水深方向には静水圧分布が成立するものとみなされる。このような貯水池の幾何形状ならびに流体運動の特徴に鑑み、 x_1 、 x_2 を水平面内に、 x_3 を鉛直方向にとる直交曲線座標系を設定し、既存の測量資料に基く図-1のような貯水池分割の下で、水の連続式、運動量保存式、水温および水質濃度の収支式を各コントロール・ボリュームについて展開すると、貯水池水理に関する平面多層モデルが以下のよう

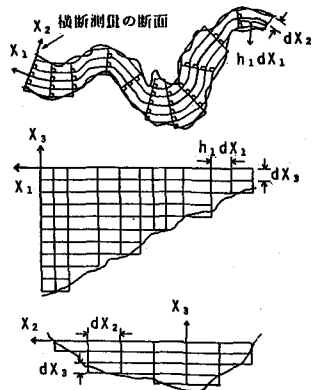


図-1 座標系と貯水池分割

$h_2 = h_3 = 1$ としている。

(1) 連続式

$$\frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} = 0 \quad (1)$$

(2) x_1 方向の運動量保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 u_1 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 u_1 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 u_1 \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ = - \frac{1}{\rho h_1 dx_1} \left| p \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| \frac{E_{x_1 x_1}}{h_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \right) \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} \\ + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| E_{x_1 x_2} h_1^2 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{u_1}{h_1} \right) \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| E_{x_1 x_3} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ + \frac{1}{h_1 dx_2} \left[E_{x_1 x_2} \left(\frac{1}{h_1} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + h_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{u_1}{h_1} \right) \right) - u_1 u_2 \right] \left| h_1 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} \end{aligned} \quad (2)$$

(3) x_2 方向の運動量保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 u_2 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 u_2 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 u_2 \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ = - \frac{1}{\rho dx_2} \left| p \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| \frac{E_{x_1 x_2}}{h_1} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} \\ + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| E_{x_2 x_2} h_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| E_{x_2 x_3} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ + \frac{1}{h_1 dx_2} \left(\frac{E_{x_1 x_1}}{h_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \right) - u_1 u_1 \right) \left| h_1 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} \end{aligned} \quad (3)$$

(4) x_3 方向の運動量保存式 (静水圧分布の仮定)

$$p = \int_{x_3}^{x_{3s}} \rho g dx_3 \quad (4)$$

(5) 水温収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} | u_1 T |_{x_{1i}^{i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} | h_1 u_2 T |_{x_{2j}^{j+1}} + \frac{1}{dx_3} | u_3 T |_{x_{3k}^{k+1}} \\ = \frac{1}{h_1 dx_1} | \frac{D_{Tx_1}}{h_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} |_{x_{1i}^{i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} | D_{Tx_2} h_1 \frac{\partial T}{\partial x_2} |_{x_{2j}^{j+1}} + \frac{1}{dx_3} | D_{Tx_3} \frac{\partial T}{\partial x_3} |_{x_{3k}^{k+1}} + H_T \end{aligned} \quad (5)$$

(6) 水質濃度収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} | u_1 c |_{x_{1i}^{i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} | h_1 u_2 c |_{x_{2j}^{j+1}} + \frac{1}{dx_3} | u_3 c |_{x_{3k}^{k+1}} \\ = \frac{1}{h_1 dx_1} | \frac{D_{cx_1}}{h_1} \frac{\partial c}{\partial x_1} |_{x_{1i}^{i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} | D_{cx_2} h_1 \frac{\partial c}{\partial x_2} |_{x_{2j}^{j+1}} + \frac{1}{dx_3} | D_{cx_3} \frac{\partial c}{\partial x_3} |_{x_{3k}^{k+1}} + S_c + P_c \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、各式は中間ブロックに関するものである。式中の各記号の説明は紙面の都合上省略するので、文献1)を参照されたい。

2. 2 富栄養化に関する水質モデル

ここでは、藻類を珪藻類、藍藻類、および緑藻類その他の3種に大別し、それぞれの現存量と対応するクロロフィルa濃度を主要な指標とする水質モデル³⁾の適用を図ることとする。その他の水質指標には、各藻類量の変化に関係するものとして、動物プランクトンの体積密度に対応する炭素濃度、栄養塩である無機態及び有機態の窒素、リンを取り上げるとともに、一般的な有機汚濁指標としてのCOD濃度を加える。

各水質指標に関する生態学的変化過程の定式化にあたっては、次のように考えている。

- 1) 各藻類の増殖率に対する水温の影響は、最適増殖水温を考慮した高温阻害型の表示⁴⁾を適用し、その他の各種変化率に及ぼす水温の影響は、高温阻害を考えない指数関数形で表わす。
 - 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示する。
 - 3) 増殖率に対する栄養塩濃度の影響ならびに捕食率についての飽食効果を、Monod型の関数で表示する。
- また、増殖率に対する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。

以上の概念の下で作成された富栄養化に関する水質モデルを表示すれば、次のようである。

・各藻類 (i=1:珪藻類, i=2:緑藻類その他, i=3:藍藻類) に関するクロロフィルa濃度

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{P_i}}{\partial t} = F(C_{P_i}) - \frac{1}{dx_3} | C_{P_i} \cdot w_{C_{P_i}} |_{z=z_k^{k+1}} + G_{C_{P_i}} \\ - R_{C_{P_i}} \theta_{C_{P_i}}^{(T-20)} C_{P_i} - G_{z_i} \end{aligned} \quad (7)$$

・動物プランクトンに関する炭素濃度

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F(Z) + \sum_i \alpha_i a_{z_i} G_{z_i} - R_z \theta_z^{(T-20)} Z \quad (8)$$

・無機態窒素濃度

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_I}{\partial t} = F(N_I) - \sum_i \beta_N G_{C_{P_i}} + R_N \theta_N^{(T-20)} \left(N_0 - \sum_i \beta_N C_{P_i} - \gamma_N Z \right) \\ + \sum_i \beta_N (1 - a_{z_i}) G_{z_i} \end{aligned} \quad (9)$$

・有機態窒素濃度

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_0}{\partial t} = & F(N_0) - \frac{1}{dx_3} \left[(N_0 - \gamma_N Z) \cdot w_{N_0} \Big|_{z=z_k}^{z=z_k+1} + \sum_i \beta_N G_{C_{P_i}} \right. \\ & \left. - R_N \theta_N^{(T-20)} \left(N_0 - \sum_i \beta_N C_{P_i} - \gamma_N Z \right) - \sum_i \beta_N (1 - a_{z_i}) G_{z_i} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

・無機態リン濃度

$$\frac{\partial P_I}{\partial t} = F(P_I) - \sum_i \beta_P G_{C_{P_i}} + R_P \theta_P^{(T-20)} \left(P_0 - \sum_i \beta_P C_{P_i} - \gamma_P Z \right) + \sum_i \beta_P (1 - a_{z_i}) G_{z_i} \quad (11)$$

・有機態リン濃度

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_0}{\partial t} = & F(P_0) - \frac{1}{dx_3} \left[(P_0 - \gamma_P Z) \cdot w_{P_0} \Big|_{z=z_k}^{z=z_k+1} + \sum_i \beta_P G_{C_{P_i}} \right. \\ & \left. - R_P \theta_P^{(T-20)} \left(P_0 - \sum_i \beta_P C_{P_i} - \gamma_P Z \right) - \sum_i \beta_P (1 - a_{z_i}) G_{z_i} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

・COD濃度

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = F(C_0) - \frac{1}{dx_3} \left[C_0 \cdot w_{C_0} \Big|_{z=z_k}^{z=z_k+1} + f_P G_{C_P} - f_L C_0 \right] \quad (13)$$

ここに、

$$G_{C_{P_i}} = S_{P_i} \cdot R_{G_i} \left\{ \frac{T}{T_{f_i}} \cdot \exp \left(1 - \frac{T}{T_{f_i}} \right) \right\}^{n_i} \cdot \frac{I_z}{I_{s_i}} \exp \left(1 - \frac{I_z}{I_{s_i}} \right) \cdot \frac{N_I}{K_{N_I} + N_I} \cdot \frac{P_I}{K_{P_I} + P_I}$$

$$S_{P_i} = \exp(-\mu_s C_{P_i})$$

$$I_z = I_0 \cdot \exp\{-\eta(Z_S - Z)\}$$

$$\eta = \eta_0 + \mu_n \sum_i C_{P_i}$$

$$G_{z_i} = d_i \frac{K_{C_{P_i}}}{K_{C_{P_i}} + C_{P_i}} \cdot C_{P_i} \cdot Z$$

ここで、 $F(c_i)$ は、各種水質濃度($c_i = C_{P_i}, Z, N_i, N_0, P_i, P_0, C_0$)に関する移流及び分散項である。

なお、上式の各記号の説明は文献3)に譲り、ここでは紙面の都合上省略する。

3. 数値解析結果とその考察

2. で示した富栄養化解析のための平面多層モデルを室生貯水池に適用し、貯留水の流れ、水温及び各種水質濃度の変化を追跡した。対象期間は1983年8月15日～9月7日の24日間であり、この期間において与えられる流出入条件および気象条件の下で計算を進めた。このときの数値計算法は、staggered schemeにおいて移流項に風上差分、拡散項に中央差分を用いた陽解法であるが²⁾、濃度計算では、時間方向に2ステップのRunge-Kutta法を用いている。

初期条件は、流速が計算開始日の流量に対する予備計算より得られた定常値、水温および濃度は実測値

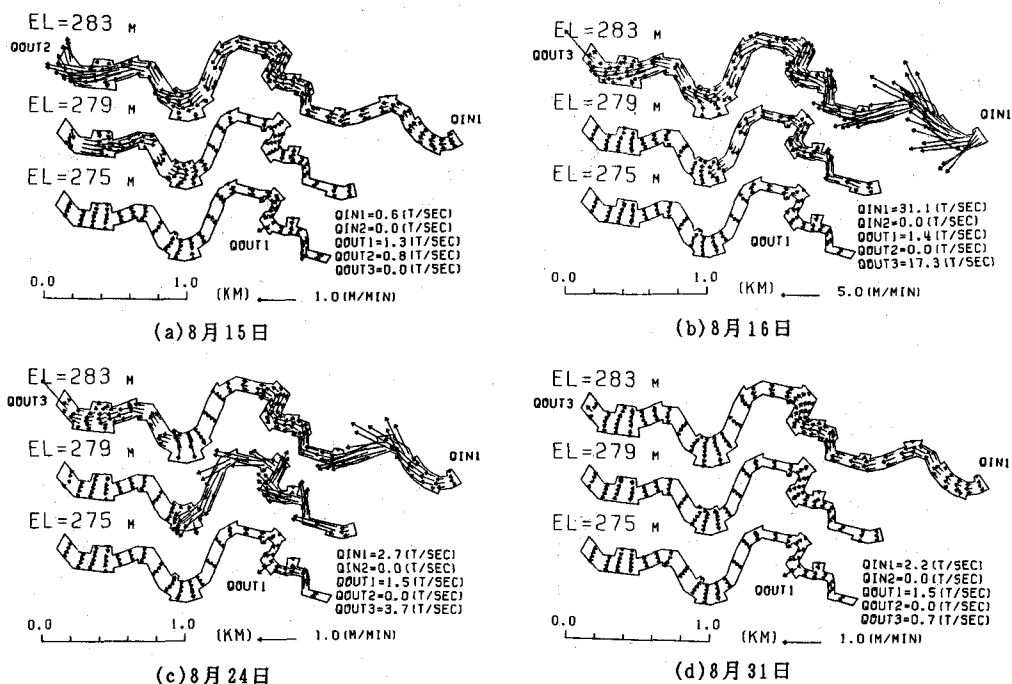


図-2 流速分布の計算結果

に基く一様分布とした。境界条件は陸地境界で水、温度、濃度の出入りは無いものとしてnon-slip条件を与えるが、水表面では日射その他の気象要因による熱変換を考えている。貯水池分割は、200m毎の測量資料に基いており、水深方向には2m、幅方向には30mの一定間隔をとっている。計算時間間隔は、流速・水温に関しては $\Delta t=1.5$ 秒としたが、時間短縮を図るため濃度計算については出水時に $\Delta t=30$ 秒、平常時は $\Delta t=300$ 秒とした。

得られた計算結果のいくつかを図-2～図-5に示す。まず、図-2より得られる流れの特徴を列挙すると次のようである。

a) 出水前の8月15日には、初瀬取水口(図中のQOUT1、EL. 275m層のダム上流約2.4km地点)よりの流出量が相対的に大きく、表層水を除くと、その上下流において取水口へ向かう流れが顕著にみられ、下流端では、流下した表層水が一部反転して取水口の方へ向かう様子が表わされている。なお、流速値はいずれも1m/min以下の極めて緩やかな流れである。

b) 出水時の8月16日は、流速値が流入部の大きいところで約20m/minとなり、深水層を除く中水層から表水層にかけて流入水がダム洪水吐(図中のQOUT3)へ向かって1～5m/minの速度で流下していく状況が表現されている。このときには、もはや初瀬取水口からの取水による影響はその近傍でしか見られない。

c) 出水が終了した後は、流速値のレベルは出水前のそれに戻ると同時に、平常時における流れの状況を示す。8月24日の結果では、流入水の温度が表層水のそれよりも2℃程度低いために、流入水が6～8mの層に潜り込む形で流下し、ダム上流約1kmの拡幅部で幅方向の循環を生じて一部が表層を上流側に、その他がダム方向へ流下するような流れとなっている。なお、上述したような流入水の潜り込みは、出水時も含めて、流入部の水深が急に深くなるあたりで生じており、貯水池の縦断形状がその位置に影響を及ぼしているものと考えられる。

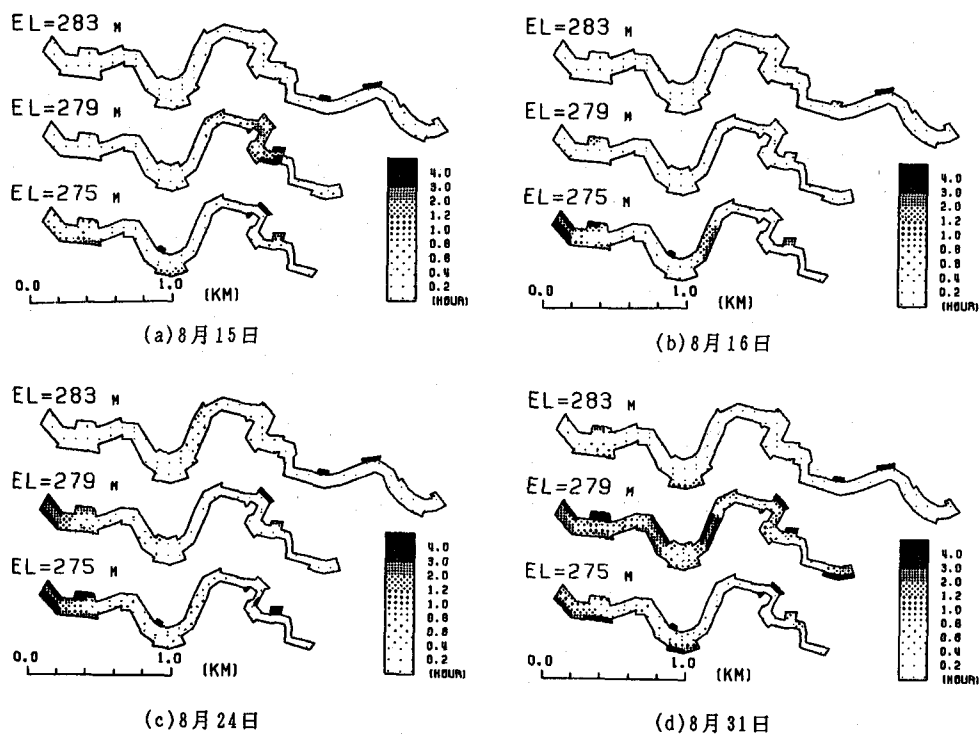


図-3 滞留時間の計算結果

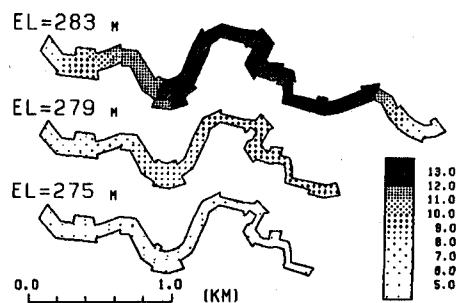
次に上述した流速分布の計算結果に基づき、各時刻における単位体積当りの滞留時間の分布を示した図-3より流れの滞流域に関して次のような特徴が見いだされる。

イ) 平常時では、表層(EL=285m)についてみるといずれも余り変わりが無く、入り江を除けば滞流域はみられない。表水層の深いところ(EL=279m)から中水層(EL=275m)については、下流端境界としてのダムと初瀬取水口からの取水の影響が顕著である。例えば、初瀬取水の影響が大きな8月15日の結果では、表層での流れと取水口へ向かう中水層での流れに挟まれた標高279mの層で、取水口地点近傍に停滞域が生じる。一方、洪水後の8月24日、8月31日の結果では、初瀬取水口からダムにかけての区間において滞留時間が長くなる傾向がみられ、流れが緩やかな後者ではその傾向がより顕著に現われている。

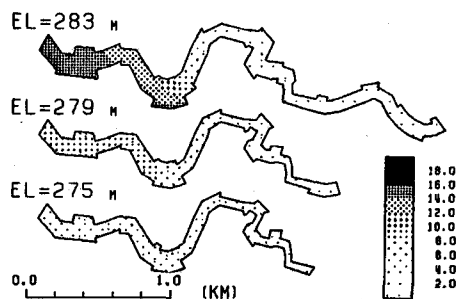
ロ) 出水時の8月16日の結果では、表水層での流れの停滞は潜り点近傍の入り江を除けばみられない。

以上に述べた流れの挙動に関する特徴との関連より、各種藻類量に相当するクロロフィルa濃度の総和についての平面分布を示した図-4をみると次のようである。出水前に初瀬取水口地点周辺の表水層にあった $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度の濃度塊が、出水の流入により貯水池外へ流出した後に、初瀬取水口からダムにかけての区間において、徐々に表層での生産が活発化し、9月7日には約 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ に高濃度塊が水深2~6m層に出現していることがわかる。出水後におけるこのような藻類発生は、対象とした室生貯水池をはじめ他の貯水池でもしばしば経験していることである。出水に伴う栄養塩の流入が、こうした藻類発生の最大の要因であると考えられるが、流れの運動学的挙動ならびに関連する水温分布の変化過程もそれに寄与するところは大きい。例えば、流れの挙動を反映した図-3の滞留時間の分布特性と比べてみると、出水後の初瀬取水口からダムにかけての滞流域とクロロフィルa濃度の増大を生じた水域とがほぼ一致しており、藻類の生産に流れの停滞性が密接に関係していることが推察される。

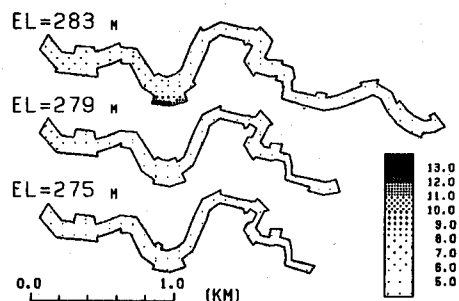
また、出水時において、貯水池中央部の左岸側入り江に出水前の高濃度塊が取り残されているのがみら



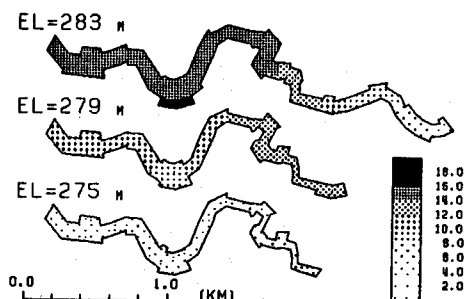
(a) 8月15日



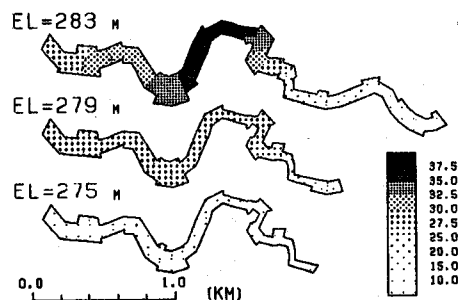
(b) 8月16日



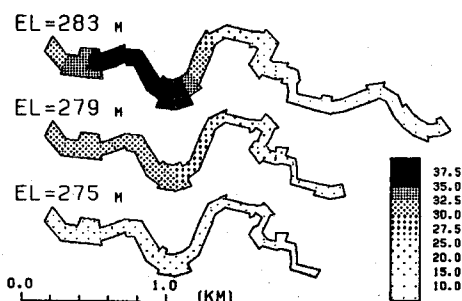
(c) 8月17日



(d) 8月24日



(e) 8月31日



(f) 9月7日

図-4 クロロフィルa濃度分布の計算結果

れるが、図-2 (c) に示した8月24日の流れの挙動を考えると、この部分に残された藻類が出水後に増殖し、それが上下流域の表水層に移流拡散された結果が同日のクロロフィルa濃度分布になっていると考えられる。なお、8月15日～8月16日にかけて、また8月31日～9月7日にかけての高濃度域の下流への移動については、図-2 (b) あるいは (d) から得られる貯留水の平均的な移流速度が、それぞれ1.5km/日、0.15km/日程度であることを考えると、その間の流下距離1.5kmおよび1.0kmは各図より得られるそれらとほぼ一致するようである。すなわち、移流により高濃度域が下流方向へ移っていく様子が表わされているものと考えられる。

最後に、図-5より対象期間内における実測値と計算値の比較を、水温とクロロフィルa濃度について行くと、水温については計算値と実測値は概ね一致しているのに対し、クロロフィルa濃度は9月7日の湖心における再現性が極めて良いことを除くと定性的にはともかくとして定量的には表層での計算値に問題が残る。しかしながら、栄養塩の流入条件や生物生産の実態など、不確定あるいは不明な点が少なく

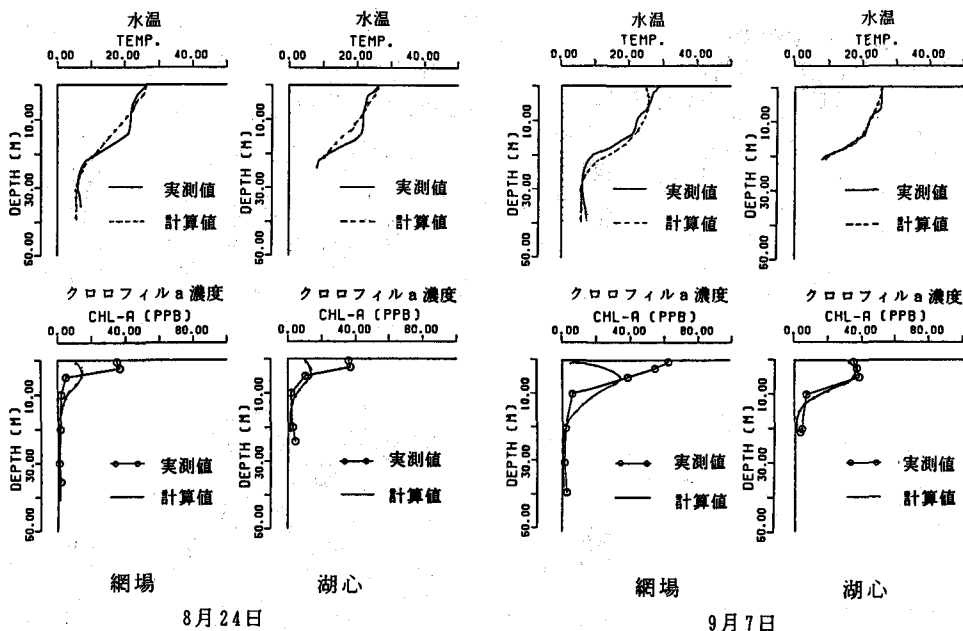


図-5 実測値と計算値との比較

いことを考えれば、この程度の差異はやむを得ないであろう。

4. おわりに

直交曲線座標系による平面多層モデルを適用した貯水池の富栄養化の数値解析によって、モデルの現象再現性が一応検証されると同時に、出水時とその後の期間における流れの挙動、ならびにそれと密接に関連した各種水質濃度の変化が詳細に考察され、いくつかの興味深い結果が得られた。これらの知見は、従来の解析法では得られなかったものであり、本解析手法の有用性を示すものと言えよう。

最後に、本研究を進めるにあたり、多大の協力を頂いた京都大学大学院生福井直之君に感謝するとともに、文部省科学研究費（一般研究(c)、代表者：松尾直規）の援助を受けたことを記しておく。

参考文献

- 1) 松尾直規・岩佐義朗・椎野佐昌・若林伸幸：直交曲線座標系を用いた2方向多層流れの数値解析, 土木学会水工学論文集, 第34巻, pp. 629~634, 1990.
- 2) 岩佐義朗・椎野佐昌・松尾直規・若林伸幸：貯水池水理に及ぼす地形形状の影響に関する数値解析, 京都大学防災研究所年報, 第33号B-2, pp. 305~321, 1990.
- 3) 渡辺浩太郎：曝気循環に伴う貯水池水質改善効果に関する研究, 京都大学修士論文, 1987.
- 4) Ikeda, S., Y. Inoue and S. Iwai: Multispecies of Planktons and Nutrients Model of Lake Eutrophication., A Simulation Study in Lake Biwa, State-of-the Art in Ecological Modelling, Vol. 7, pp501~526, 1978.