

貯水池水理に及ぼす地形形状の影響に関する数値解析

岩佐 義朗・椎野 佐昌・松尾 直規・若林 伸幸

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF TOPOGRAPHICAL FEATURE ON RESERVOIR HYDRAULICS

By *Yoshiaki IWASA, Sukeaki SHIINO,*
Naoki MATSUI and Nobuyuki WAKABAYASHI

Synopsis

This paper deals with the numerical simulation study of flow and associated water quality distribution effected by the topographical feature in a reservoir. The mathematical models for the simulations are deduced from the hydrodynamic principles by means of the curvilinear orthogonal coordinate system. They are developed into the numerical models by making use of the integral technique with respect to a block obtained from homogeneous property of the flow field. The numerical simulations concerning the two-directional multi-layered flow in a stratified reservoir are practiced by means of the finite difference method in terms of the staggered schemes. The results obtained through the simulations agree with the knowledge from the past experiences and the usefulness of the proposed procedures is successfully verified.

1. 緒 論

貯水池における地形形状の特徴は、貯留水の水利特性に関係する重要な因子の一つである。例えば、貯水池の規模や長さ、幅、水深などで表わされる流れの場としての概形的特徴は、貯留水に作用する熱、風、流出入水等の影響範囲や程度を規定し、貯水池で生じる流れの形態やその運動学的特徴、すなわち、一方向一層流、一方向多層流、平面一層流、平面多層流のいずれであるかに密接に関係している¹⁾。また、局所的に見た場合には、堆砂段丘の有無などの流入部縦断形状の特徴は、移流熱量を主要因とする水温成層の形成ならびにその変形・破壊過程、さらには懸濁物質や栄養塩等の各種水質物質の流下過程に少なからず影響している²⁾。同様に、平面的な陸地の出入り、水路の湾曲および支川流入部などは、局所的な滞流域や汚濁域を生じさせる要因となり、富栄養化が進んだ貯水池では、そうした所からしばしば水の華や淡水赤潮の発生がみられることが経験的に知られている。

本研究は、以上に述べた貯水池水理に及ぼす地形形状の影響のうち後半の局所的な流れと水質変化に関するものを対象に、それをできるだけ忠実に取り扱ひ得る数値解析法の開発とそれによる実際現象の解析を行い、富栄養化に代表される複雑な水利課題のより明確かつ基礎的な理解を得ようとするものである。

上述の目的を達成するには、貯水池における平面多層流れについて、複雑な幾何形状および流出入等に関する境界条件と対応した運動学的挙動の忠実な再現を行う必要がある。そのための方法には、従来よりデカルト座標系上の直交格子を用いた有限差分法、あるいは多角形網による有限要素法があるが、地形形状の正確な表現、計算精度、計算所要時間等に一長一短があって必ずしも適当な方法とは言えないよう

ある。最近では、一般曲線座標系を用いた有限差分法が開発され、従来の方法による欠点を克服し長所を生かした計算が行われるようになってきたが³⁾、ここで対象とするような平面多層流れに対しては実用上の難点がいくつかあると考えられる。

本研究では、このような従来の解析法の問題点に鑑み、直交曲線座標系を用いた実用的な数値解析法の適用を図ることとする。この方法では、既存の測量資料を用い、各水平面について横断測定の測線およびそれと等間隔で直交する曲線群より成る固定格子網（水深方向に一様）を作成し、各方向の格子数を変えて形状を表現する。これは、水位の季節変動が比較的大きな貯水池の特性に対し、実用上の観点から、水位変動に対応した格子分割をその都度行うことなく流れ場の形状をより容易に表現しようとするものである。

以下に、数値解析に用いる数学モデル、数値計算法および適用結果を順次述べていくことにする。

2. 数値解析モデル

2.1 直交曲線座標系による基礎数学モデルの表示

現実の貯水池における流体の性質ならびに流体運動の特徴より、対象課題に関する基礎数学モデルは非圧縮性流体の連続式、運動量保存式、水温および濃度の収支式、密度に関する状態方程式により記述される⁴⁾。ここで、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を仮定するものとする。貯水池におけるこのような平面多層流れについて、 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、各方向距離に関するメトリック h_1, h_2, h_3 を $\partial h_1/\partial x_3 = 0, \partial h_2/\partial x_3 = 0, \partial h_3/\partial x_1 = 0, \partial h_3/\partial x_2 = 0$ として基礎数学モデルを表示すると次のようである⁵⁾。

[連続式]

$$\frac{1}{h_1 h_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (h_2 u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h_1 u_2) \right) + \frac{1}{h_3} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

[運動量保存式]

• x_1 方向分直

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{u_1}{h_1} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{u_2}{h_2} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{u_3}{h_3} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} = & -\frac{1}{\rho h_1} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(h_2 (\sigma_{x_1} - \overline{\rho u'_1 u'_1}) \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(h_1 (\tau_{x_1 x_2} - \overline{\rho u'_1 u'_2}) \right) \right] + \frac{1}{\rho h_3} \frac{\partial}{\partial x_3} (\tau_{x_3 x_1} - \overline{\rho u'_3 u'_1}) \\ & + \frac{1}{\rho h_1 h_2} \left(\frac{\partial h_1}{\partial x_2} (\tau_{x_1 x_2} - \overline{\rho u_1 u_2 - \rho u'_1 u'_2}) - \frac{\partial h_2}{\partial x_1} (\sigma_{x_2} - \overline{\rho u_2 u_2 - \rho u'_2 u'_2}) \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

• x_2 方向分直

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{u_1}{h_1} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{u_2}{h_2} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{u_3}{h_3} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = & -\frac{1}{\rho h_2} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{1}{\rho h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(h_2 (\tau_{x_1 x_2} - \overline{\rho u'_1 u'_2}) \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(h_1 (\sigma_{x_2} - \overline{\rho u'_2 u'_2}) \right) \right] + \frac{1}{\rho h_3} \frac{\partial}{\partial x_3} (\tau_{x_2 x_3} - \overline{\rho u'_2 u'_3}) \end{aligned}$$

$$+\frac{1}{\rho h_1 h_2} \left(\frac{\partial h_2}{\partial x_1} (\tau_{x_1 x_2} - \rho u_1 u_2 - \overline{\rho u_1' u_2'}) - \frac{\partial h_1}{\partial x_2} (\sigma_{x_1} - \rho u_1 u_1 - \overline{\rho u_1' u_1'}) \right) \dots\dots\dots (3)$$

・ x_3 方向分値

$$0 = -g - \frac{1}{\rho h_3} \frac{\partial p}{\partial x_3} \dots\dots\dots (4)$$

[水温収支式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u_1}{h_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{u_2}{h_2} \frac{\partial T}{\partial x_2} + \frac{u_3}{h_3} \frac{\partial T}{\partial x_3} &= \frac{1}{h_1 h_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (-h_2 \overline{u_1' T'}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (-h_1 \overline{u_2' T'}) \right) \\ &+ \frac{1}{h_3} \frac{\partial}{\partial x_3} (-\overline{u_3' T'}) + H_T \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

[濃度収支式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{u_1}{h_1} \frac{\partial c}{\partial x_1} + \frac{u_2}{h_2} \frac{\partial c}{\partial x_2} + \frac{u_3}{h_3} \frac{\partial c}{\partial x_3} &= \frac{1}{h_1 h_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (-h_2 \overline{u_1' c'}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (-h_1 \overline{u_2' c'}) \right) \\ &+ \frac{1}{h_3} \frac{\partial}{\partial x_3} (-\overline{u_3' c'}) + S_c + P_c \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

[密度に関する状態方程式]

$$\rho = f(T, c) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、各式は平均流に関するものであり、 u_i ($i=1\sim 3$): x_i 方向の速度成分、 T : 水温、 C : 水質濃度、 ρ : 流体密度、 p : 圧力、 g : 重力加速度、 σ , τ : 応力テンソル、 S_c : 濃度に関する沈降項、 P_c : 濃度に関する生産・消費項、 t : 時間、添字' : Reynolds の時間平均操作による平均値からの変動分、 $\overline{\quad}$: 時間平均を示している。なお、水温、濃度に関する分子拡散項は無視している。

2.2 既存の地形形状資料に基づく貯水池分割

数値解析は、対象とする貯水池における各水理量の空間的一様性に基き、それを満たし得る適当な大きさの流体塊（以下ブロックと呼ぶ）について2.1で示した基礎数学モデルを積分展開し、空間平均量に関するモデルに変形することにより進められる。空間的一様性を満たすブロックの範囲については、資料不足で明らかでないのが現状であるが、経験的には、流出入に関する境界条件ならびに貯水池の地形形状との関連が深いと考えられている。したがって、今のところはそれらの特徴に基いてその影響をできるだけ忠実に再現し得るようなブロック分割を行うことが順当であろう。

我国の貯水池の多くは山間峡谷部に在り、細長く水深が深いのがふつうである。従来の貯水池に関する一方向多層流モデルはこうした形状的特徴に関連した水温・濃度の分布特性に基くものである。本研究で対象とする水理現象も同じ流れの場におけるものであるが、スケールのにはより小さなどちらかと言うと局所的な流れの挙動に関係しており、それに見合った空間分割を考えなければならない。このような分割の方法ならびに細分化の程度は、対象とする現象に関する資料が皆無に等しい現状では容易に決められないが、ここでは以下のような考え方で分割を行うことにした⁶⁾。

- (1) 実用上の見地より、分割は既存の測量資料を用いて行う。
- (2) 従来の一方向多層流モデルとの整合性を考慮し、縦断方向（貯水池長さ方向）、横断方向（貯水池幅方向）および鉛直方向（水深方向）を x_1, x_2, x_3 とする直交曲線座標系に従って分割を進める。

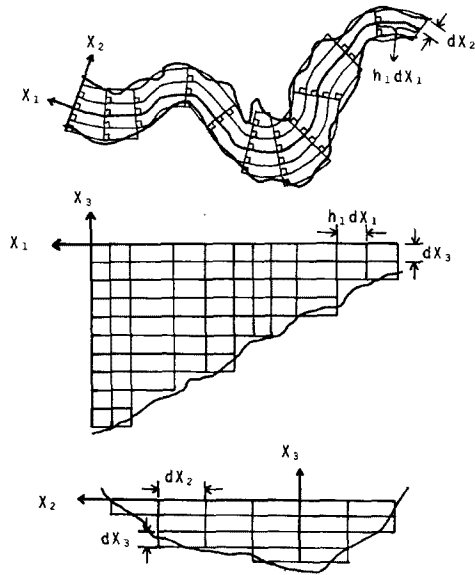


Fig. 1. Conception of reservoir model generated by means of curvilinear orthogonal coordinate system.

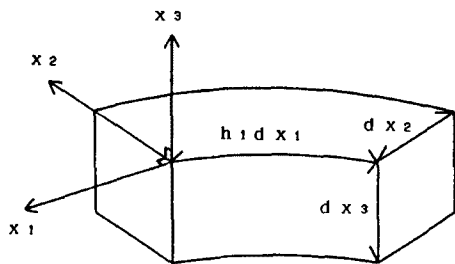


Fig. 2. Control volume used in the simulation.

素のうちから貯水位に応じて計算対象とする要素群（流体ブロック群）を選定し、その位置 (x_1, x_2, x_3) を決める。

Fig. 1 に以上の方法による貯水池分割の概念図を示す。なお、適用例については後に詳しく述べることにする。

2.3 数値解析モデルの表示

2.2 で述べた貯水池分割に従って得られる Fig. 2 に示すようなブロックについてその体積を $dV = h_1 dx_1 dx_2 dx_3$ 、各表面積を $dS_1 = dx_2 dx_3$ 、 $dS_2 = h_1 dx_1 dx_3$ 、 $dS_3 = h_1 dx_1 dx_2$ とし ($h_2 = h_3 = 1$ で一定)、2.1 で示した基礎式 (1)~(6) を体積積分し空間平均操作を行う。このとき、粘性応力を Reynolds 応力に対して無視するとともに Reynolds 応力および水温・濃度に関する乱流拡散フラックスを平均量に関する勾配輸送型で表わせば、数値解析のためのモデル式が以下のように得られる。

(1) 中間層のブロックについて;

[連続式]

- (3) 水位変動に伴う形状変化への対応を容易にするため、横断および鉛直方向のブロック長は一定とし、各方向に関するブロック数を変えることにより対応する。
- (4) ブロック集合によりできるだけ忠実な形状表現となるように細分するが、所要の計算精度、計算時間等との調和も考慮に入れる。

次に、(1)~(4) に基づくブロック分割の手順を述べる。

- (a) 貯水池測量の各横断面について最深部を通る鉛直軸（流心軸とする）を定め、それから左右等間隔に (dx_2 毎に)、また水深方向にも等間隔 (dx_3 毎) に分割線を引いて得られる直交格子網により横断面を近似する。
- (b) 隣合う横断面のなす角度がある値以上の場合、あるいは (a) での横断方向格子数が最上層において異なる場合には、隣合う断面のなす角の 2 等分線上に新たな横断面を内挿する。
- (c) 各水平面において流心点（流心軸と水平面との交点）を通り各横断面に直交する滑らかな曲線ならびにそれと等間隔 (dx_2 毎) の直交曲線群を設定し、平面形状をそれらの曲線格子網で近似する。さらに上述の曲線群に沿う縦断面を定め、その形状を非一様な直方格子網で近似する。
- (d) ここで、流心点を通り横断面に直交する曲線に沿って x_1 を取り流下方向を正とする。 x_2 は任意の横断面において流心点より右岸方向を正とする。 x_3 は流心軸の方向で鉛直上向きを正とする。
- (e) (a)~(d) で定めた各格子面で囲まれた体積要素

$$\frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

[運動量保存式]

• x_1 方向分値

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 u_1 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 u_1 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 u_1 \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ &= - \frac{1}{\rho h dx_1} \left| p \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| \frac{E_{x_1 x_1}}{h_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \right) \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} \\ & \quad + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| E_{x_1 x_2} h_1^2 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{u_1}{h_1} \right) \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| E_{x_1 x_3} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ & \quad + \frac{1}{h_1 dx_2} \left[E_{x_1 x_2} \left\{ \frac{1}{h_1} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + h_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{u_1}{h_1} \right) \right\} - u_1 u_2 \right] \left| h_1 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

• x_2 方向分値

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 u_2 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 u_2 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 u_2 \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ &= - \frac{1}{\rho dx_2} \left| p \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| \frac{E_{x_1 x_2}}{h_1} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right|_{x_{1j}}^{x_{1j+1}} \\ & \quad + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| E_{x_2 x_2} h_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| E_{x_2 x_3} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} \\ & \quad + \frac{1}{h_1 dx_2} \left\{ \frac{E_{x_1 x_1}}{h_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \right) - u_1 u_1 \right\} \left| h_1 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

• x_3 方向分値

$$p = \int_{x_3}^{x_{3s}} \rho g dx_3 \dots\dots\dots (10)$$

[水温収支式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 T \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 T \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 T \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} = \frac{1}{h_1 dx_1} \\ & \quad \left| \frac{D_{Tx_1}}{h_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| D_{Tx_2} h_1 \frac{\partial T}{\partial x_2} \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| D_{Tx_3} \frac{\partial T}{\partial x_3} \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} + H_T \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

[濃度収支式]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| u_1 c \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 u_2 c \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| u_3 c \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} = \frac{1}{h_1 dx_1}$$

$$\left| \frac{D_{\alpha_1}}{h_1} \frac{\partial c}{\partial x_1} \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| D_{\alpha_2} h_1 \frac{\partial c}{\partial x_2} \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left| D_{\alpha_3} \frac{\partial c}{\partial x_3} \right|_{x_{3k}}^{x_{3k+1}} + S_c + P_c \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 $E_{x_1x_1}$, $E_{x_1x_2}$, $E_{x_1x_3}$, $E_{x_2x_2}$, $E_{x_2x_3}$: 各方向に関する渦動粘性係数, D_{Tx_1} , D_{Tx_2} , D_{Tx_3} : 各方向に関する温度拡散係数, $D_{c\alpha_1}$, $D_{c\alpha_2}$, $D_{c\alpha_3}$: 各方向に関する濃度拡散係数であり, また各水理量は空間平均値である。なお, 各式を導くにあたっては, ブロック内およびその表面において各水理量はほぼ一様とみなしている。

(2) 水表面を有するブロックについて;

水表面を有するブロックにおいては, 次式で表示される自由表面での運動学的条件⁷⁾

$$u_{3s} = \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{u_{1s}}{h_{1s}} \frac{\partial H}{\partial x_1} + u_{2s} \frac{\partial H}{\partial x_2} \right) \dots \dots \dots (13)$$

および幾何学的条件

$$\cos_s(x_1, \nu) = -\frac{1}{h_{1s}} \frac{\partial H}{\partial x_1}, \quad \cos_s(x_2, \nu) = -\frac{\partial H}{\partial x_2},$$

$$\cos_s(x_3, \nu) = 1 \dots \dots \dots (14)$$

を用いて各式が変形される。ここに H : 貯水位, 添字 s : 水表面での値である。これらのうち, 連続式, 運動量保存式 x 分値および水温収支式について示せば以下のようである。

[連続式]

$$\frac{1}{h_1 dx_1} \left| k_s u_1 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 k_s u_2 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} + \frac{1}{dx_3} \left(\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - u_{3s-1} \right) = 0 \dots \dots \dots (15)$$

[運動量保存式・ x 分値]

$$\frac{\partial (u_1 k_s)}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| k_s u_1 u_1 \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 k_s u_2 u_1 \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} - \frac{u_3 u_1}{dx_3} \Big|_{x_{3s-1}}$$

$$= -\frac{1}{\rho h_1 dx_1} \left| k_s \rho \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| \frac{E_{x_1x_1} k_s}{h_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \right) \right|_{x_{1i}}^{x_{1i+1}}$$

$$+ \frac{1}{h_1 dx_2} \left| E_{x_1x_2} k_s h_1^2 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{u_1}{h_1} \right) \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} - \frac{E_{x_1x_3}}{dx_3} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \Big|_{x_{3s-1}}$$

$$+ \frac{1}{h_1 dx_2} \left[E_{x_1x_2} \left\{ \frac{1}{h_1} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + h_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{u_1}{n_1} \right) \right\} - u_1 u_2 \right] \Big|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} \dots \dots \dots (16)$$

[水温収支式]

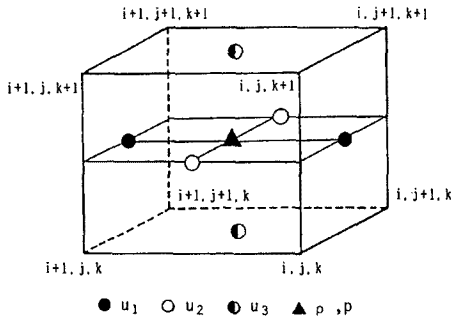


Fig. 3. Locations of variables in terms of staggered scheme for the numerical simulation.

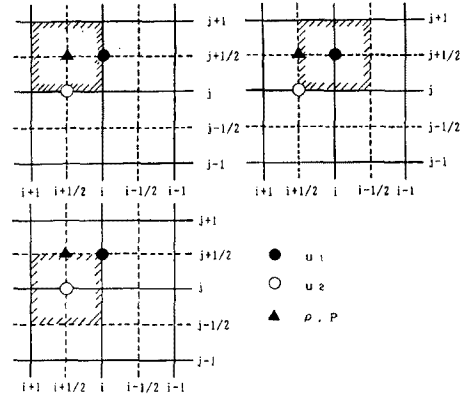


Fig. 4. Locations of variables on finite difference grids of a plane.

$$\frac{\partial(Tk_s)}{\partial t} + \frac{1}{h_1 dx_1} \left| k_s u_1 T \right|_{x_{ij}}^{x_{i,j+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| h_1 k_s u_2 T \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} - \frac{u_3 T}{dx_3} \Big|_{x_{3s-1}}$$

$$= \frac{1}{h_1 dx_1} \left| \frac{D_{Tx_1} k_s}{h_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_{x_{ij}}^{x_{i,j+1}} + \frac{1}{h_1 dx_2} \left| D_{Tx_2} h_1 k_s \frac{\partial T}{\partial x_2} \right|_{x_{2j}}^{x_{2j+1}} - \frac{D_{Tx_3}}{dx_3} \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_{3s-1}} + H_7 k_s \dots \dots (17)$$

ここに、 k_s : 水表面ブロックの厚さと dx_3 との比、添字 $s-1$: 水表面ブロック下側境界面での値、 H : 水表面ブロックにおける平均水位であり、その他の各水理量も空間平均値である。また、運動量保存式 x_2 方向分値、濃度収支式についても (16)、(17) 式と同様に表示される。

3. 数値計算法

数値解析は、2.3 で示した各式を Staggerd Scheme を使って時間的に陽型の階差式に変化し、与えられる境界条件の下で各水理量について数値的に解くことにより進められる。Fig. 3 はこのときの各水理量の計算格子点での配置を示すものであり、また Fig. 4 はそれらの計算を行う格子面をある水平面内について示している。

両図に示した各水理量を求める階差式では、移流項に2次精度の風上差分、拡散項に中央差分を用いることにする。紙面の都合上、以下では u_1 および T に関する階差式を示すにとどめる。まず、 u_1 については、

$$\frac{u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+1} - u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = \frac{1}{h_{i,j+\frac{1}{2}} dx_1} (u_{i-1+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n u_{i-1+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n)$$

$$- u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n + \frac{1}{h_{i,j+\frac{1}{2}} dx_2} (u_{i,j-\frac{1}{2}+c,k+\frac{1}{2}}^n u_{2i,j,k+\frac{1}{2}}^n h_{1j} - u_{i,j-\frac{1}{2}+c,k+\frac{1}{2}}^n u_{2i,j,k+\frac{1}{2}}^n h_{1j})$$

$$- u_{i,j+\frac{1}{2}+d,k+\frac{1}{2}}^n u_{2i,j-1,k+\frac{1}{2}}^n h_{1i,j+1}) + \frac{1}{dx_3} (u_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}-e}^n u_{3i,j+\frac{1}{2},k}^n - u_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}-e}^n u_{3i,j+\frac{1}{2},k}^n)$$

$$- u_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}-f}^n u_{3i,j+\frac{1}{2},k+1}^n) - \frac{1}{\rho h_{i,j+\frac{1}{2}} dx_1} (p_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+1} - p_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+1})$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{h_{i,j+\frac{1}{2}}dx_1} \left[\frac{E_{x_1x_1^{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}} \left\{ \frac{1}{dx_1} (u_{i+1,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n) \right. \right. \\
 & + \left. \frac{u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{dx_2} (h_{i+\frac{1}{2},j+1} - h_{i+\frac{1}{2},j}) \right\} - \frac{E_{x_1x_1^{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{h_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}} \\
 & \left. \left\{ \frac{1}{dx_1} (u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - u_{i-1,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n) + \frac{u_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{dx_2} (h_{i-\frac{1}{2},j+1} - h_{i-\frac{1}{2},j}) \right\} \right] \\
 & + \frac{1}{h_{i,j+\frac{1}{2}}dx_2} \left\{ \frac{E_{x_1x_2^{i,j+1,k+\frac{1}{2}}}}{dx_2} \left(\frac{u_{i,j+\frac{3}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{h_{i,j+\frac{2}{3}}} - \frac{u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{h_{i,j+\frac{1}{2}}} \right) \right. \\
 & - \left. \frac{E_{x_1x_2^{i,j,k+\frac{1}{2}}}}{dx_2} \left(\frac{u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{h_{i,j+\frac{1}{2}}} - \frac{u_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{h_{i,j-\frac{1}{2}}} \right) \right\} + \frac{1}{dx_3^2} \\
 & \{ E_{x_1x_3^{i,j+\frac{1}{2},k+1}} (u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{3}{2}}^n - u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n) - E_{x_1x_3^{i,j+\frac{1}{2},k}} (u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - u_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^n) \} \\
 & \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{h_{i,j+\frac{1}{2}}dx_2} \left[E_{x_1x_2^{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \left\{ \frac{u_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - u_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{h_{i,j+\frac{1}{2}}dx_1} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{h_{i,j+\frac{1}{2}}}{dx_2} \left(\frac{u_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n}{h_{i,j+1}} - \frac{u_{i,j-1,k+\frac{1}{2}}^n}{h_{i,j-1}} \right) \right\} - u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n \right] \dots \dots \dots (18)
 \end{aligned}$$

次に T については、

$$\begin{aligned}
 \frac{T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+1} - T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} & = \frac{1}{h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}dx_1} (u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n T_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n \\
 & - u_{i+1,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n) + \frac{1}{h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}dx_2} (h_{i+\frac{1}{2},j} u_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^n T_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n \\
 & - h_{i+\frac{1}{2},j+1} u_{i+\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}}^n T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n) \\
 & + \frac{1}{dx_3} (u_{3i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^n T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}+e}^n - u_{3i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+1}^n T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}+f}^n) \\
 & + \frac{1}{h_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}dx_1} \left\{ \frac{D_{Tx_1^{i+1,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{h_{i+1,j+\frac{1}{2}}dx_1} (T_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n) \right. \\
 & \left. - \frac{D_{Tx_1^{i-1,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{h_{i-1,j+\frac{1}{2}}dx_1} (T_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n - T_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n) \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{h_{1i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} dx_2} \left\{ \frac{D_{Tx_2^{i+\frac{1}{2}, j+1, k+\frac{1}{2}} h_{1i+\frac{1}{2}, j+1}}}{dx_2} (T_{i+\frac{1}{2}, j+3/2, k+\frac{1}{2}}^n - T_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n) \right. \\
 & \left. - \frac{D_{Tx_2^{i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}} h_{1i+\frac{1}{2}, j}}}{dx_2} (T_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n - T_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n) \right\} \\
 & + \frac{1}{dx_3^2} \left\{ D_{Tx_3^{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+1}} (T_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+3/2}^n - T_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n) \right. \\
 & \left. - D_{Tx_3^{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}}} (T_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n - T_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}}^n) \right\} + H_{Ti+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n \dots\dots\dots (19)
 \end{aligned}$$

また、連続式は中間層ブロックについて、

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{dx_1} (u_{1i+1, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n - u_{1i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n) + \frac{1}{dx_2} (h_{1i+\frac{1}{2}, j-1} u_{2i+\frac{1}{2}, j+1, k+\frac{1}{2}}^n - h_{1i+\frac{1}{2}, j} u_{2i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}}^n) \\
 & + \frac{h_{1i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}}{dx_3} (u_{3i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+1}^n - u_{3i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k}^n) = 0 \dots\dots\dots (20)
 \end{aligned}$$

であり、水表面ブロックにおいては、

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{dx_1} (k_{si+1, j+\frac{1}{2}}^n u_{1i+1, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}}^n - k_{si, j-\frac{1}{2}}^n u_{1i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n) \\
 & + \frac{1}{dx_2} (h_{1i+\frac{1}{2}, j+1} k_{si+\frac{1}{2}, j+1}^n u_{2i+\frac{1}{2}, j+1, k+\frac{1}{2}}^n - h_{1i-\frac{1}{2}, j} k_{si+\frac{1}{2}, j}^n u_{2i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}}^n) \\
 & + \frac{h_{1i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}}{dx_3} \left(\frac{\bar{H}_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}^{n+1} - \bar{H}_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} - u_{3i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k}^n \right) = 0 \dots\dots\dots (21)
 \end{aligned}$$

である。

以上の各式を用いた計算の手順は次のようである。

- (1) (20)式を用いた時間ステップ n の u_1^n , u_2^n の諸値より u_3^n を底面 ($u_3^n=0$ とする) から順に上へ向かって水表面ブロックまで求める。
- (2) (21)式を使って時間ステップ n の諸量より Δt 時間後のステップ $n+1$ における貯水位 \bar{H}^{n+1} を求めるとともに、内挿補間により k_s^{n+1} を計算する。
- (3) (19)式ならび表層ブロックにおける水温の階差式より T^{n+1} を求める。また、同様の階差式を使って C^{n+1} を求める。
- (4) (3) で求めた T^{n+1} , C^{n+1} より密度 ρ^{n+1} を求める。また、この ρ^{n+1} および (2) で求めた \bar{H}^{n+1} より p^{n+1} を計算する。
- (5) (18)式および表層ブロックにおける u_1 の階差式より u_1^{n+1} を計算する。同様にして u_2^{n+1} も求める。
- (6) 時間ステップを進め (1)~(5) の計算をくり返す。

4. 成層型貯水池における流れの数値解析例

4.1 対象域のブロック分割⁶⁾

これまでに述べた数値解析法を成層型貯水池における流れ、すなわち水温成層流について適用し、その結果を考察する。対象とした貯水池は、奈良県宇陀川に位置する室生貯水池であり、ダムからその上流約4.8 kmの地点まで、標高247 mから297 mまでの容積約1560万 m^3 の領域である。

解析にあたって対象領域の分割は、2.2で述べた方法に従って行った。このとき用いた測量資料は、旧河道に沿って200 m間隔で実施されたものであり、以下の解析ではこの横断面に直交する旧河道沿い、すなわち最深部を通る曲線を x_1 軸とし、横断面の方向を x_2 軸としている。分割ブロック群による対象領域の近似表現については、横断方向のブロック幅 dx_2 、兩岸の飛び出し距離および隣合う横断面のなす最大許容角度を種々変えて得られる近似度を比較検討した。また、基礎資料を得る横断面の間隔についても同様の検討を行った。なお、ここで上述の飛び出し距離とは、横断方向に dx_2 毎に分割を進めたとき両端に取り残される長さ(dx_2 の値より小)のことである。また、最大許容角度とは、この値を越えるときには隣合う横断面の間に新たな補間断面を作成するための判定値である。

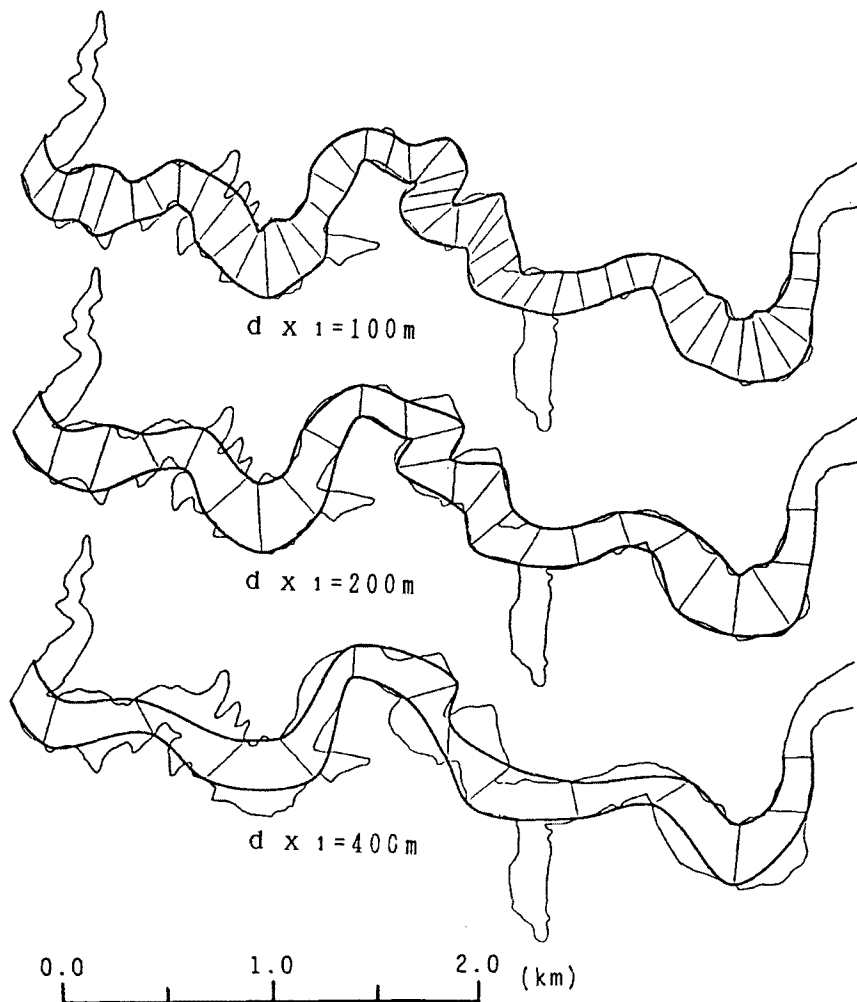


Fig. 5. Comparison of plane views generated from various input data.

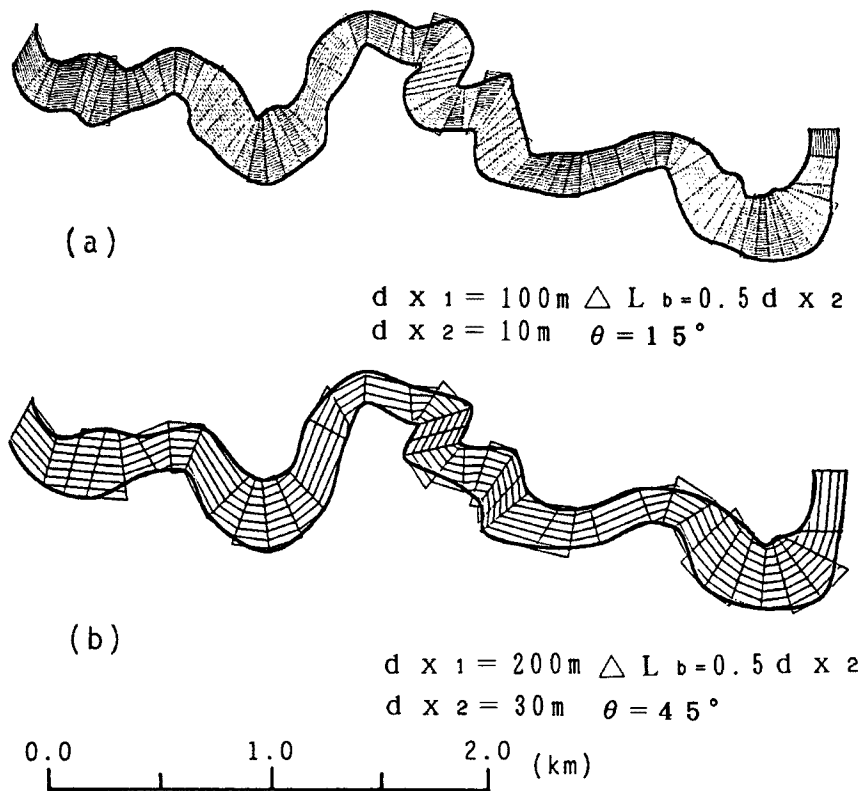


Fig. 6. Comparison of generated plane views used in the simulation study.

Fig. 5, 6 にこうした形状近似に関する比較例を示す。Fig. 5 は基礎資料を入力する横断面の間隔を 100 m, 200 m, 400 m と変えたときに、それらから得られる平面形状と実際のそれとを、標高 297 m の最上位平面で比較したものである。同図より、用いる資料の間隔を小さくするほど現実の形状を良好に近似し得ることがわかる。しかしながらこの例では間隔を 100 m としたときでも支川流入部の入り江などは取り残されており、それらの正確な表現にはより短い間隔の断面資料が必要である。次に Fig. 6 では、前述のブロック幅 dx_2 、最大許容角度 θ および横断面資料の間隔 dx_1 の異なる 2 ケースについて、得られる平面形状を Fig. 5 と同じ面で比較している。同図より、各数値を小さくするほど分割後の形状表現が良好であることがわかる。なお、いずれの場合にも飛び出し距離 ΔL_b は、 $0.5 dx_2$ を越えないようにしているが、そのようにすると近似度が最も良いようである。

以上より、2.2 で述べたブロック分割による貯水池の 3 次元的な形状表現は、上述の例のように分割の際の各種条件を適当に決めれば比較的良好に行い得ると言えよう。しかしながら、こうした分割はあくまで対象とする流れの場の形状表現をできるだけ忠実にいう立場からのものであり、得られたブロック内で取り扱う水理要素の一樣性が満足されているかどうかはまた別の問題である。現状では、対象とする水理要素の一樣性のスケールがデータ不足のため不明であり、この点について今後観測資料の充実を図り明らかにしていく必要がある。数値解析にあたっては、地形形状の忠実な表現と対象水理要素に関する一樣性の両面から満足し得るブロックの大きさを定めなければならないが、今述べたような現状では前者の面からのみ考えざるを得ない。そこで本研究においては、Fig. 5, 6 で示したような検討結果に、計算精度および計算所要時間などの実用上の要求をも合わせて考えた上で、Fig. 6 の (b) 図に示したようなブロック群（水深方向には 2 m 間隔で分割）を用いて以下の解析を進めることにした。

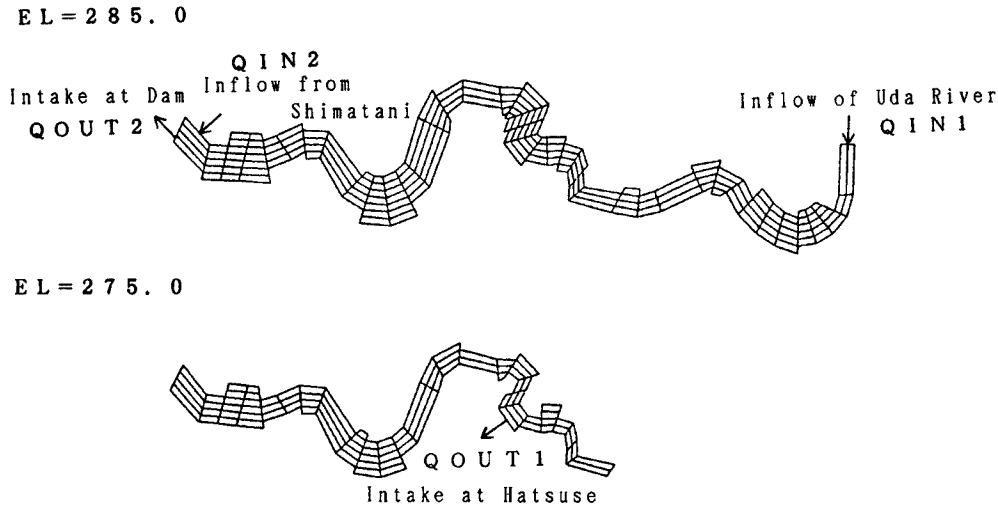


Fig. 7. Locations of inflows and outflows in Muroh Reservoir.

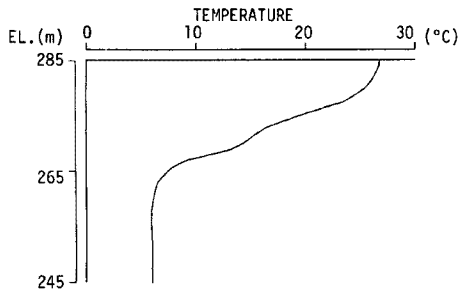


Fig. 8. Initial condition of temperature.

4.2 解析条件

対象とする室生貯水池での主要な流入は、上流端にあたる宇陀川本川の流入、ダム直上流右岸の島谷導水の流入、ダムより約2.4 km上流に位置する初瀬取水塔からの取水、ダム左岸取水口からの常時取水、ならびに洪水時のクレスト放流である。Fig. 7はこれらの流入位置を解析に用いるブロック群について示している。

流出入に関する境界条件は、Fig. 7に示した位置での流出入に相当するブロックにおいて各流量に対応する流速 u_1 および u_2 を設定することにより与えられる。なお、こ

のときの流速分布は、上流端において水深方向に対数分布を仮定する以外はすべて一様とする。また、流入水温および水質濃度についても一様と仮定する。陸地境界、堤体面および底面に対しては、それぞれの面に垂直な方向の流速成分を0とし、non-slip条件を用いる。水温および濃度については、これらの各面において移流、拡散フラックスを0とするとともに、発生、消滅項を考えないことにする。

次に初期条件については、夏季の水温成層場を水深方向にのみ Fig. 8のような分布を与え平面的には一様として、静水状態から計算を開始するようにした。

計算時間間隔 Δt は、C.F.L.条件を満足する範囲で $\Delta t = 1.6$ 秒とした。また渦動粘性係数は

$$E_{x_1x_1} = E_{x_1x_2} = 1.0 \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$E_{x_1x_3} = E_{x_2x_3} = 0.0001 (\text{m}^2/\text{s})$$

とし、それぞれ場所的、時間的に一定とした。また、水温および濃度に関する拡散係数も同様の一定値を与えた。

4.3 解析結果と考察

(1) 水温成層流の平均的挙動について

室生貯水池の夏季水温成層形成期における平常時の平均的流況下で、貯留水の流れについて計算した結果を示したものが Fig. 9 である。このケースでは、宇陀川本川流入量 $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、島谷導水流量 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、初瀬取水流量 $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、ダム取水流量 $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ とし、流入水温は表層水温と等しい 26.8°C を与えている。Fig. 9 では、流入水が主として表水層中央部を貯水池形状に沿うように流下する様子が表わされており、

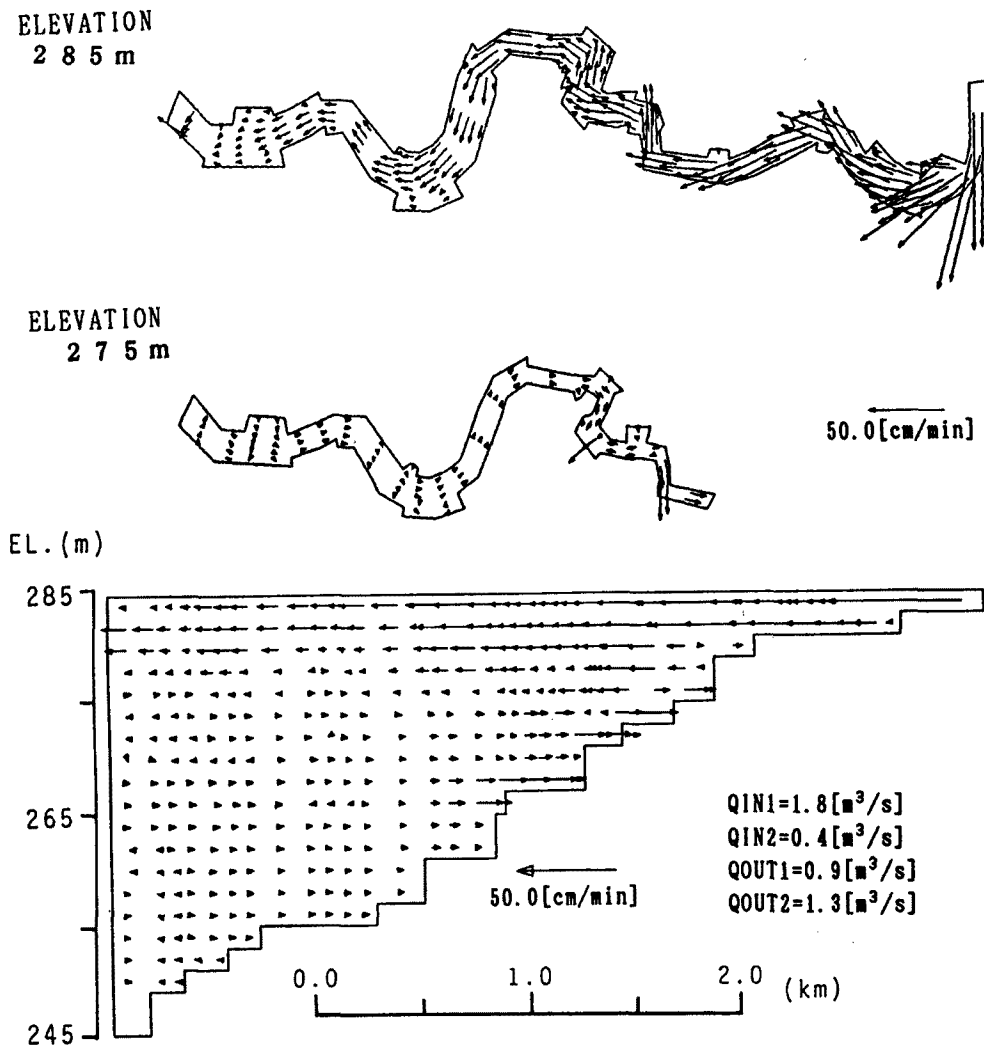


Fig. 9. Simulated results of stratified flows in Muroh Reservoir.
(under the general condition of inflows and outflows)

また、水深が急に深くなる流入部下流においては、表水層の流れに連行される中下層水の逆向きの流れがみられる。標高 275 m の平面においては、その深さにある初瀬取水の影響が顕著にみられ、取水口へ向かう周囲水の流れが表現されている。一方、ダム直上流部では、左岸取水口からの流出と右岸側より流入する島谷導水の影響が流れの向きに現われている。また、平面分布には貯水池幅の変化や湾曲に伴う流れの特徴が、拡幅部沿岸や湾曲部内側での流れの停滞という形で表現されている。以上に述べた計算結果は、実測値がないため検証はできないが、経験的に得られている流れの特徴と定性的にほぼ一致するものと考えて良い。

流出入条件の違いが流れに及ぼす影響については、Fig. 10 に示すケース、すなわち初瀬取水と島谷導水が無いとした場合の平面分布の結果を Fig. 9 のそれと比較すれば明らかである。Fig. 10 では、上述の 2 つの流出入に伴う周囲水の流れがみられず、上下流端での流出入に伴う流れのみが表わされている。

(2) ブロック分割の違いが計算結果に及ぼす影響

Fig. 11 は、100 m 間隔の横断面形状資料に基づきブロック分割を行った場合の結果である。なお、その他の諸条件は Fig. 9 の場合と同じにしている。同図と Fig. 9 とを比較することにより、ブロックの細分

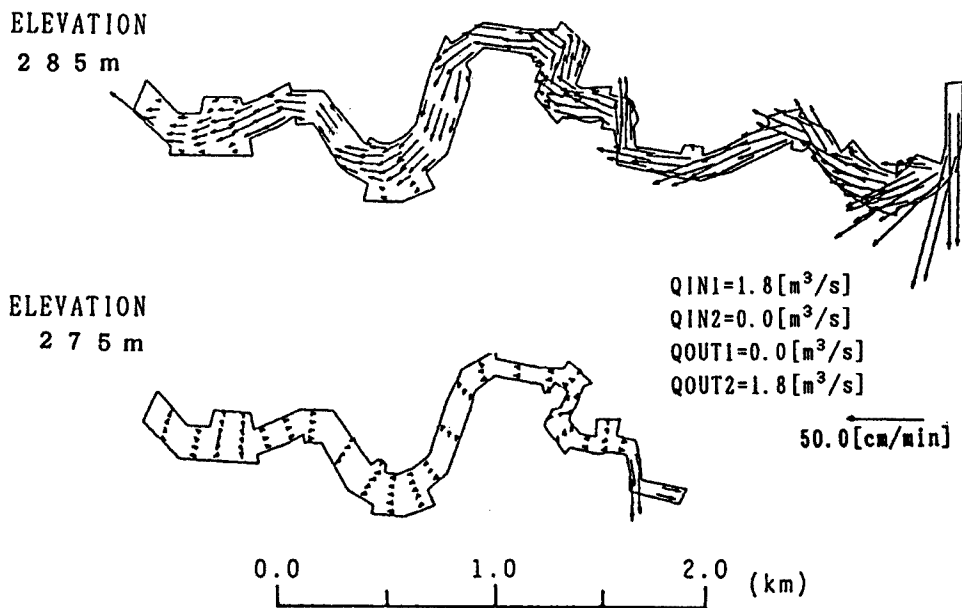


Fig. 10. Simulated results of stratified flows in Muroh Reservoir. (under the specific condition of inflows and outflows)

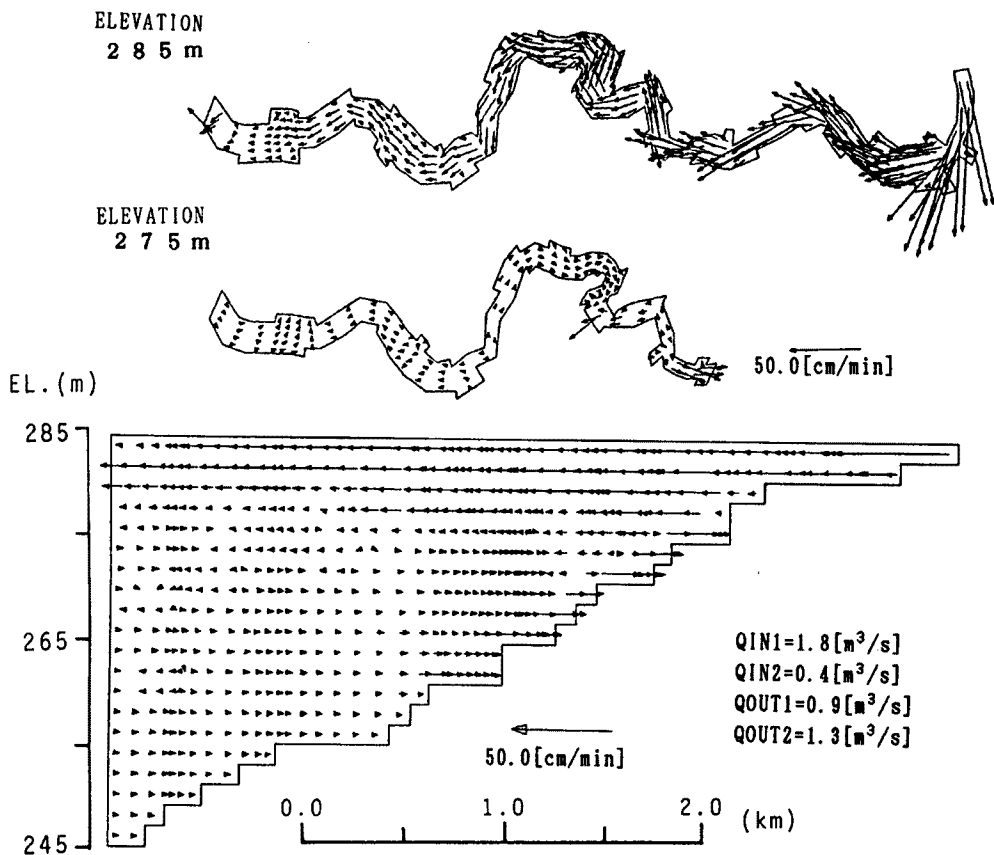


Fig. 11. The results of stratified flows simulated by making use of smaller blocks.

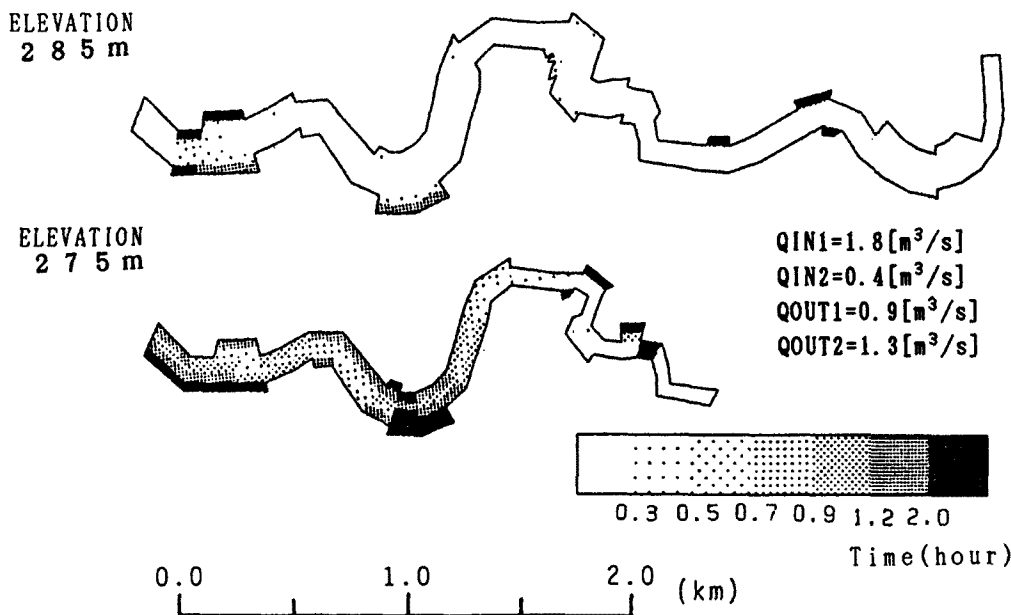


Fig. 12. Simulated distributions of detention time of flows.

化ならびにそれと関連する形状近似の程度が流れの計算結果に及ぼす影響についてみると次のことがわかる。Fig. 11では、上流端下流部左岸の入り江、貯水池中央付近の湾曲部およびその下流の形状をより現実に近い形で表現したブロック群を用いているため、それらの箇所を中心にFig. 9に表わされた流れとは流速の大きさおよび向き共にやや異なる結果となっている。特に、細分化と形状近似の向上により局所的な流れの状況がより詳細に表現されているようである。このように、細分化し形状近似の向上を図ればより詳細かつ忠実な流れの表現が期待できるであろう。ただし、計算所要時間はこのケースの場合でFig. 9の場合の約4倍程度長くなることを覚悟しなければならない。

(3) 水質分布への影響について

Fig. 12はFig. 9に示した流れの計算結果に基づき、各ブロックにおける単位体積当りの滞留時間(= $1 / (u_1 dx_2 dx_3 + u_2 h_1 dx_1 dx_3 + u_3 h_1 dx_1 dx_3)$)を示したものである。同図より、(1)で述べた流れの状況に対応し、沿岸部とくに拡幅部分において、深い層において、また初瀬取水および島谷導水のような横断方向の流入の影響を受ける領域において滞留時間が長くなっていることがわかる。こうした貯留水の滞流は、流入水質濃度の流下および貯留過程や、それらに関連する藻類の大量発生と深い関係があると考えられる。流れの停滞性と水質分布およびその変化との関係については、それに関する実測資料の収集とともにさらに研究を進めなければならないが、Fig. 12に示したような解析結果は、藻類の大量発生等による水質悪化の発生を予想する上で有用な目安の一つとなるであろう。

流入水質の流下過程とそれに伴う濃度分布の状況に関してはFig. 13に示す計算例である程度把握できよう。同図は、濃度0の初期状態から100 mg/m³の濃度流入を上流端より36時間継続した時の分布結果であるが、(1)で述べた湾曲と拡幅に伴う貯留水の流れの特徴を反映した分布状況が、流入部下流域において見いだされる。

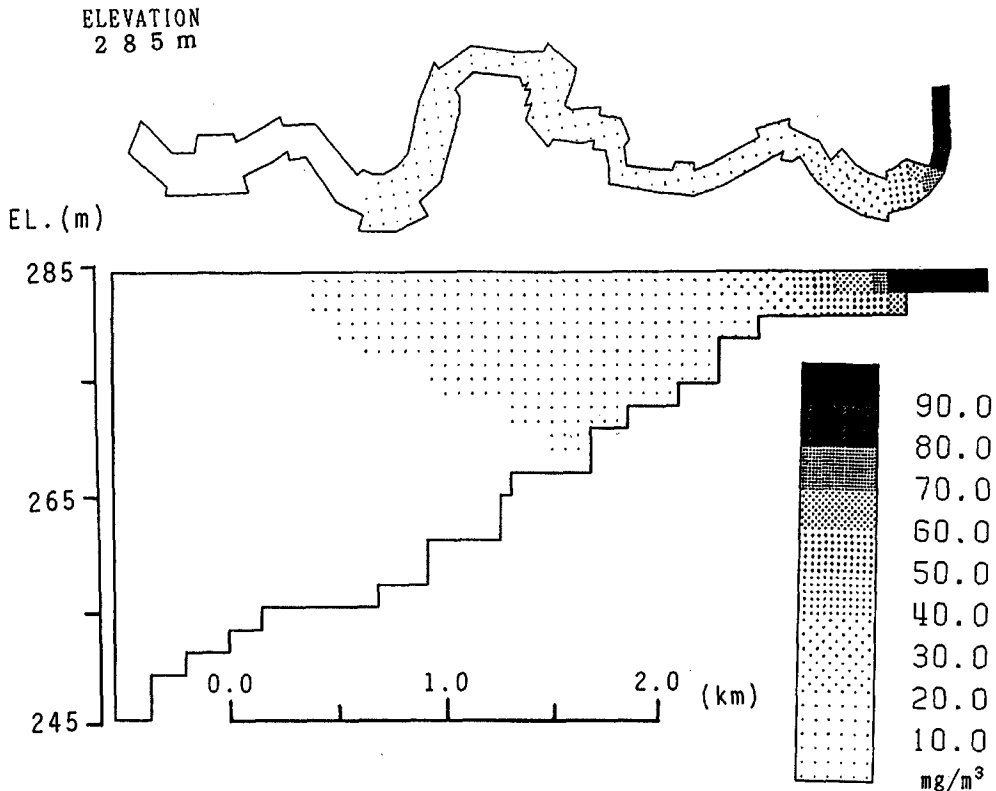


Fig. 13. Simulated distributions of concentration.

5. 結 論

本研究は、貯水池における富栄養化現象等の水理課題を取り扱うにあたり、地形形状が貯留水の流れと水質の挙動に及ぼす影響を把握することを目的として行ったものである。本研究で得られた主要な結果を列挙すれば次のようである。

- (1) 直交曲線座標系を用いた平面多層モデルとその適用を行う際の貯水池分割法ならびに数値計算法を示した。
- (2) 上述のモデル及び分割法による数値解析を実施し、その妥当性および有用性を過去の経験に照らして確めた。
- (3) 貯水池形状が貯留水の流れと水質分布に及ぼす影響を流出入条件によるそれとともに考察し、局所的な滞流域の存在が地形形状の特徴と関係が深いこと、またそれが水の華などの水質問題が発生し易い条件を与えていることを明らかにした。

今後、貯水池分割のより合理的な方法の確立、数値計算法の改善、実測資料の収集整備などを図り、本研究の目的の達成を一層進めて行きたい。

最後に、本研究を行うにあたり、京都大学大学院生である山田哲也君、福井直之君に多大の協力を得たことを記し、両君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗他4名: 河川における水質変化過程の比較研究—(1)貯水池・湖沼における水質変化過程, 文部省科学研究費特定研究(1)研究成果報告書, 1986, pp. 167 - 189.

- 2) 松尾直規・岩佐義朗・綾史郎: 多目的貯水池の水温分布特性とその影響要因, 第27回水理講演会論文集, 1983, pp. 151 ~ 157.
- 3) 岩佐義朗・綾史郎・土屋勉・西内美宣: 一般曲線座標系を用いた流れと水質混合の2次元数値解析, 京大防災研究所年報, 第31号B-2, 1988, pp. 589 ~ 600.
- 4) 岩佐義朗・松尾直規: 貯水池水理の解析モデルとその水温予測への適用, 土木学会論文集第308号, 1981, pp. 59 ~ 68.
- 5) 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方向多層流の数値解析, 水工学論文集, 第34巻, 1990, pp. 629 ~ 634.
- 6) 若林伸幸: 直交曲線座標系を用いた水平2方向多層流モデルの貯水池水理への適用に関する研究, 京都大学修士論文, 1989.
- 7) 岩佐義朗: 開水路流れの基礎理論, 土木学会水理委員会, 1964.