水温成層を考慮した貯水池内流動解析に向けた CIP-Soroban法に基づく鉛直2次元数値流動 モデルの開発

DEVELOPMENT OF A VERTICAL 2D CIP-SOROBAN SOLVER FOR A WATER FLOW WITH FLUCTUATIONS IN WATER TEMPERATURE IN A RESERVOIR

小島崇1·中村恭志2·石川忠晴3 Takashi KOJIMA, Takashi NAKAMURA and Tadaharu ISHIKAWA

1学生会員 東京工業大学大学院 博士課程 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番G5-3) 2正会員 博(理) 東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科 (同上) 3フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (同上)

A new vertical two-dimensional numerical solver for a water flow in a reservoir is proposed. In the proposed solver, for a precise representation of small fluctuations of water surface and arbitrary curved bottom of lake, CIP-Soroban method is employed. While advections are solved with a low numerical diffusion error by using Constrained Interpolated Profile (CIP) method, by using Soroban mesh system that enable to rearrange computational mesh points freely such as a Japanese abacus, the model can solve a time evolution of water surface and density flow with a high spatial resolution. In order to apply the method to a density current in a water reservoir, a three-dimensional k- ε turbulent flow model is averaged in a direction crossing a reservoir and a set of averaged two-dimensional equations are derived. These two-dimensional governing equations are combined with the heat balance equations and time evolution of a water temperature is solved. The proposed numerical model is applied to the Shichigasyuku reservoir. It can restore a time evolution of a water temperature distribution reasonably.

Key Words: CIP-Soroban method, Numerical simulation, Density flow, Reservoir.

1. 序論

貯水池は水資源や水産業などへの利用で重要な役割を 果たしており、近年では水質の変化や生物への影響を把 握・管理する必要性が認識され始めている. 日射や風な どの気象条件や河川からの流入・流出状況など時々刻々 変化する要因に対する水域全域における流動の変化を詳 細に把握するためには、多大な労力を必要とする現地観 測を補完する数値シミュレーションモデルが有効である. しかしながら貯水池などの停滞性水域の管理に供する数 値モデルには、自由水面や湖床の空間形状の微小な変化 とそれによる流動変化を良好に再現することに加え、水 温などに起因する密度成層現象を詳細に計算可能である 事が必要とされている. さらに、水温成層などの季節あ るいは経年的に変化する現象を扱う場合には長時間を対 象とした計算が必要となるため、計算にかかる時間が十 分に短い(低計算負荷)ことも数値モデルには求められ

ている.

このような要請を満足する計算モデルとして、著者ら は先に河川汽水域を対象として、CIP-Soroban法と内部 境界条件法とを組み合わせた鉛直二次元密度流解析モデ ルの提案を行っている¹⁾. このモデルでは、河川等のよ うに主流方向に比べ横断方向の空間スケール(河道幅) が十分に小さい場合には横断方向への流速・物理量の変 動は無視し得るとして、三次元流動方程式を河道横断方 向に積分して河道幅の変化を考慮した鉛直二次元方程式 を導出し、これを基礎方程式として解くことにより計算 負荷の少ない密度流解析モデルを実現している. さらに, 基礎方程式の解法には、差分法の高精度流体解法である Constrained Interpolated Profile (CIP)法を用いるとともに、 矢部らによって近年提案された計算格子配置の新手法で あるSoroban格子法²⁾を用いて密度成層界面付近に格子点 を集中させることで、数値拡散誤差の非常に少ない、詳 細な密度成層の記述が可能な解析モデルを実現している.

一方、山間部には縦断方向スケールに比べて横断方向

スケールの比較的小さな貯水池が多く存在し,河川汽水 域と同様の鉛直二次元数値モデルで高速な数値計算を実 現できる可能性がある.そこで本研究では上述のような 地形条件を持つ貯水池を適用対象として想定し,CIP-Soroban法に基づく鉛直二次元密度流モデルを貯水池に おける水温成層を伴う水流動解析に適用してその有効性 について検討を行うこととした.その際には,日射によ る水温成層の形成と,山間部における山からの吹き降ろ しの風の効果を考慮するため,新たに熱収支計算モデル と風応力モデルを導入し,日射量や湿度等の気象データ に基づき水温変動を計算し得るように拡張した.開発し たモデルは宮城県の七ヶ宿貯水池に適用し,夏期を含む 半年間に渡る長期の再現計算を行い,観測結果との比較 により計算モデルの有効性を検討した.

2. 基礎方程式

(1) 基礎方程式の鉛直二次元近似

基礎方程式には、河川汽水域に対する鉛直二次元モデ ル¹⁾と同様に、三次元の連続式、運動方程式、水面の移 流方程式、 $k - \varepsilon$ 乱流方程式、及び水温の輸送方程式を 貯水池横断方向に積分する事で導出される、横断方向に 平均化された鉛直二次元の基礎方程式を用いる. xを貯 水池内主流方向の座標、zを鉛直上向きの座標とし貯水 池の幅をB(x,z)とおくと、x及びz方向の平均流速 u(t,x,z)及びw(t,x,z)、乱流エネルギーk(t,x,z)及び散 逸率 $\varepsilon(t,x,z)$ 、水温T(t,x,z)に対する以下の鉛直二次元 基礎方程式が導かれる³⁴.

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bw)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_L B \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} B \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{S}{B} \tau_x$$
(2)

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_L B \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} B \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{S}{B} \tau_z - g$$
(3)

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_L B \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_k} B \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P_r + G - \varepsilon + \frac{S}{B} F_k$$
(4)

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_L B \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_{\varepsilon}} B \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_r - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{S}{B} F_{\varepsilon}$$
(5)

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_L B \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_T} B \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\phi}{\rho C_w}$$
(6)

$$V_{eff} = V_{mol} + V_t = V_{mol} + C_{\mu} k^2 / \varepsilon, \quad V_L = 0.01 (D_x)^{4/3}$$

$$P_r = v_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right], \quad G = \frac{v_{eff}}{\sigma_T} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

ここに $D\lambda/Dt = \partial\lambda/\partial t + u\partial\lambda/\partial x + w\partial\lambda/\partial z$ であり, p(t, x, z) は水圧, v_{mol} 及び v_t は各々水の分子粘性係数 と渦粘性係数を表す. $k - \varepsilon$ モデルに関する定数は,標 準値⁵ $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_{\mu} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$ 及び,福島の研究⁶を参考にして $\sigma_T = 0.8$ を採 用した.また,水平方向の渦粘性係数 v_L はリチャード ソンの4/3乗則に基づきx方向の代表格子幅 D_x を用いて 与えることとした. $\rho(t,x,z)$ は水の密度であり以下の関 係式により水温から決定した.

 $\rho = -5.984 \times 10^{-3} T^2 + 3.452 \times 10^{-2} T + 999.9 \ kg/m^3$ S(x,z) はx-z 平面の単位面積あたりの側岸面積であり, τ_x, τ_z, F_k 及びF_c は夫々側岸部からのx及びz 方向の応 力と乱流の生成項である.本研究では τ_x, τ_z, F_k 及びF_c は鈴木らの研究³と同様に与えることとした.式(6)にお ける $\phi(t,z)$ は日射及び放射等を通じた水塊への熱量の授 受を表す熱収支項であり, C_w は水の熱容量である.

以上の式(1)~(6)に従い流速,乱流量及び水温の時間 発展を計算するとともに,位置 *x* における水面高さ *h*(*t*, *x*)の時間変化を以下の式に基づき計算する.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u_{surf} \frac{\partial}{\partial x}\right)h = w_{surf}$$
(7)

ここで, u_{surf} 及び w_{surf} は水面における流速 $u_{surf} = u(t, x, h(t, x))$ 及び $w_{surf} = w(t, x, h(t, x))$ である.

(2) 熱収支計算

熱収支に関連する各種気象条件は貯水池の各位置にお いて一様であると仮定し、熱収支項 $\phi(t,x,z)$ の計算は梅 田らの研究ⁿを参考に以下のように行った.水面上での 熱収支 $\phi = \phi_{surf}$ は全天日射量 $\phi_I(t)$,長波放射 $\phi_L(t)$,潜 熱 $\phi_e(t)$ 及び顕熱 $\phi_c(t)$ を用いて与えられるとし、rを水 面反射率、bを水面吸収率として以下のように計算した.

 $\phi = \phi_{surf} = (1-r)b\phi_I - \phi_L - (\phi_e + \phi_c)$ (8) 各熱損失分に対しては,経験式であるSwinbank式及び Rohwer式を用いて,気温,雲量,10m風速,及び湿度等 の気象データから見積もることとした⁷⁾.水面下におけ る熱収支は透過した日射のみを考え,Lambert-Beerの法 則に基づき水深d = h - zにおける熱収支項 $\phi = \phi_d$ を以 下のように計算した.

 $\phi = \phi_d = (1-r)(1-b)\phi_l \exp(-\eta d)$ (9) ここに η は減衰率であり,日射の透過長を $2m(\eta = 1/2 m^{-1})$ とした.

(3) 風応力

風応力に伴う水面での乱流エネルギーの生成作用として、水面上の計算格子点についてはエネルギー生成項 P_r に風による寄与分 $(U^*)^4/v_T$ を付加することとした. ここで U^* は摩擦速度であり、水面上高度10mでの風速 U_{10} の観測値から推定した⁷⁾.一方、本モデルは鉛直二 次元モデルであるため、横断方向の風の作用を考慮する ことはできない.しかし、山間の貯水池における風向は 概ね谷線に沿っており、また横断方向のフェッチは短い 事から、その作用は比較的小さいものと考えられる.そ こで本研究では貯水池主流方向(x)に対して摩擦速度 U_x^* を用い、水面境界条件として以下の式を設定した.

$$v_{eff}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) = \frac{U_x^*}{\left|U_x^*\right|} \left(U_x^*\right)^2 \tag{10}$$

このような取扱いの簡略化は、鉛直二次元モデルでは 不回避であるが、その誤差については、今後検討してい きたいと考えている.

3. 計算モデル

本研究で開発した鉛直二次元数値モデルの計算手順は 水温計算と風応力計算を除き,先に河川汽水域を対象と して開発した数値モデルと概ね同一である.そこで,具 体的な計算手順等は先の報告¹⁾に譲ることとし,ここで はその特徴について簡単に紹介を行うこととする.

開発した鉛直二次元流動モデルでは、「内部境界条件 法」の考え¹⁾に従い、以下に示す「内部境界条件」を水 面及び湖床面上において課しつつ、水塊内部に加え水面 上及び湖床面下における流動を基礎方程式(1)~(7)に従 い計算する.

(a)動力学的条件:

 $p_{surf} = p(t, x, h(t, x)) = 0$ (11) (b)運動学的条件:

$$u_n \equiv -\frac{\partial b}{\partial x}u(t, x, b(x)) + w(t, x, b(x)) = 0$$
(12)

ここで、b(x)は湖底面の高さであり、貯水池の幅が B(x,b(x)) = 0となるz座標を表している.

基礎方程式(1)~(7)の計算には、矢部らによって提案 されたCIP-Soroban法を用いる²⁾.この手法では、空間三 次精度を持つCIP補間により数値拡散誤差を抑えた高精 度移流計算を行うことに加え、自由な格子配置を可能と するSoroban格子法を組み合わせることに特徴がある. Soroban格子法では、図-1に示すように、貯水池の主流 x方向に計算格子軸を配置し、その軸上に計算格子点を 配置する.計算格子軸を配置し、その軸上に計算格子点を 配置する.計算格子点は各計算時間ステップにおいて各 計算軸上で自由に再配置できる手法となっている.各計 算ステップにおいて、水面h(t,x,z)と湖底面上に格子点 が必ず一致するように再配置を行うことで、「内部境界 条件」式(11)及び(12)、さらには水面上における熱収支 項 ϕ_{surf} を容易に導入することが可能となっている¹⁾.ま た、水塊内部における格子点はモニタ関数*M*

$$M = \sqrt{1 + \alpha} \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| + \beta \left| \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|$$
(13)

を用いて水温と熱収支項の鉛直方向の変動の大きな領域 を各計算ステップにおいて検出し, *M* を図-1に示すよ うに鉛直方向に等面積に分割することにより,自動的に 水温躍層と熱収支項の変動の大きな水面付近に格子を集 中配置することが可能となっている.これにより,少な い計算格子点でも水温成層の数値拡散を避けられ,水面 近傍の領域で指数関数的に変化する熱収支項の計算を精 度良く計算可能になると期待できる.なお,式(13)にお ける*α*, *β*は格子の集中度合いを規定する定数であり,本 研究ではそれぞれ1000,1を与えた.



4. 検証計算

(1) 計算条件

開発した貯水池モデルを実際の貯水池内流動解析に適 用し、現地観測結果との比較により検証を行う.比較的 直線的な形状を持ち、貯水池側岸方向からの河川流入を 持たない宮城県の七ヶ宿貯水池を適用対象として設定し た.図-2に七ヶ宿貯水池の等深線図を示す.ロックフィ ル式の七ヶ宿ダムによる総貯水量10⁸トンの人造湖であ る.上流端には副ダムが設置されている.池上らは、同 貯水池に鉛直二次元流動モデルを適用した結果を報告し ている⁸⁾.ただし彼らの計算法は従来の直交格子による SIMPLE法を用いた有限体積法であり、本モデルとは大き く異なっている.

計算期間は1996年4月1日から同年10月7日までの約半 年間について行い,水温鉛直分布のモニタリング観測が 行われた5月1日から10月7日について計算結果の検討を 行うこととした.計算領域は副ダムから七ヶ宿ダムの約 3.8kmとし,澪筋に沿って x 座標を設定した.貯水池の 主軸は,梅田が曲線座標で三次元計算を行った際のグ リッド設定⁹⁾を参考にして設定した.この軸上に,図-2 に白丸で示す等間隔(Δx=100m)にSoroban軸を39本設置 した.またモニタリング観測が行われた x = 3.2km 地点 の格子軸上において仮に格子点を等間隔に配置した場合 に鉛直格子幅が梅田の計算⁹と同程度($\Delta z = 80 cm$)となるよう、全ての格子軸上に計算格子点を各々55点配置することとした.

上流端では観測値である水温,水位を境界条件として 与えると共に,水深方向に主流方向流速*u*が一様である と仮定し,観測流入量から主流方向流速*u*の境界条件を 設定した.ただし,副ダムからの越流流入を考慮して水 面から水深3*m*までのみ流入するとした.

下流端には七ヶ宿ダムが存在するが,主に図-2の三角 で示した地点で表層水の選択取水が行われているため, 七ヶ宿ダムが存在する計算領域下流端(x = 3.8km)と 流出部が一致しない.そこで便宜的ではあるが,平水時 には表層3mの水を放流するように七ヶ宿ダムが運用さ れていることから,観測された取水量をダム位置におけ る水深3mまでの断面積で除して見積もった平均流速を 計算領域下流端の水深3mまでの表層部分に課すことと した.熱収支計算に必要な気象データは,雲量について はアメダスデータを,その他の気温,湿度,全天日射量 等は七ヶ宿ダムにおける観測結果を日平均したものを使 用することとした.計算に用いた気象条件と流入,流出 条件を図-3に示す.時間刻み Δt は全ての格子点上で CFL数が0.3を下回る様各時刻において設定したが,概ね $\Delta t \approx 10sec$ であった.

なお、約半年間(190日間)の計算に要した時間は高々6 日程度であり、計算対象とした時間の1/30程度で計算を 行えている(CPU:Pentium 4 3.8GHzを使用). 三次元 流動モデルでは横断方向にも格子点を配置する必要があ るため、鉛直二次元モデルに比べて横断方向へ配置する 格子数倍の計算量(時間)がおおよそ必要となる. 過去 に梅田がSIMPLE法に基づく三次元流動計算を同貯水池 に対して実行した研究⁹⁰では、計算対象期間の1/2程度 (CPU:AMD Athlon 1GHzを使用)の時間を計算に必要と することが報告されており、計算機の演算速度が改善さ れていることを差し引いても、鉛直二次元モデルを用い ることによる計算の高速化の効果が確認できる.

(2) 計算結果

図-2に示す澪筋上 x = 3.2km 地点において1996年5月1 日から同年10月7日において水温鉛直分布の定点観測を 行った. 観測はサーミスタチェーンを用いて行い,水深 2mから水深30mまで2m間隔で観測を行っている.

図-4(B)に観測地点における水温鉛直分布の時系列変 化の計算結果を示す.図-4(A)に示した観測結果につい ては水面下2mまでの観測欠損部を黒抜きで示している. 6月から夏期の9月までの受熱期を含め、気温と流入水温 の上昇に伴う表層水温の上昇及び水温成層の形成が計算 により再現されている.特に表層水温が最大値を迎える 8月から9月までの夏期では、計算された水温成層の最大 水温と層厚は24℃及び15m程度となっており観測結果と 良好な一致を示していることが確認できる.図-4及び 図-3中に破線(d) で示した9月23日以降に,水温成層厚の 急激な増加が計算と観測結果ともに見られるが,これは 台風による200トン弱の大規模出水により混合が促進さ れたためであると考えられる.また,図-3に示した風速 の時系列データと比較することにより,強風時における 風応力に起因する鉛直混合の促進と,水温成層厚の増大 が再現されていることが確認できる.

図-5には観測地点における水深30mまでの水温の鉛直 平均値の時系列変化を示す. 図-5赤線で示した計算結果 と黒線で示した観測結果とは概ね良好な一致を示してい る.しかし6月上旬~7月上旬及び9月下旬以降で、約 1℃程度の誤差が生じている.この原因として2つの要 素が考えられる. 一つは外部との熱の授受に関する式の 誤差である.この計算の時間間隔は水理計算と同様に概 ね10sとしているが、このような短時間での熱収支計算 の精度は現地実験などで十分調べられてはいない. もう 一つは鉛直混合計算の誤差である.表層に蓄積されてい る熱量が貯水池深層に輸送されると、そのまま表層に留 まっている場合に比較して総熱量の保存される割合が高 くなる. そのような誤差をもたらす一つの要因として, 下流端での境界条件の与え方が考えられる.実際,図-4 及び図-5で用いている水温データは貯水池下流端にかな り近い地点(x=3200m)のものである。下流端付近の成層 状態は取水塔や洪水吐からの放流の影響を受けるが、そ れらの施設は横断面内の一部に設置されている. これに 対して鉛直二次元計算では、流出口が全幅に渡っている として計算せざるを得ない. このため、特に下流端に近 い領域では混合層の算定が実際と異なる可能性がある. ただし、このことについては、例えば同条件において三 次元計算と二次元計算の結果を比較するなどの検討を経 て結論すべきであり、今後の課題であるといえる.

図-6には、図-3及び図-4に破線で示した(a)7月10日、 (b)7月13日, (c)7月14日, 及び(d)9月23日における水温 及び流速の縦断分布図を示す.風が弱い(a)7月10日では 貯水池内での水流動は穏やかであり、表層付近に17℃程 度の安定した水温成層が形成されている. 河川からの流 入水温は約15℃程度で冷たいために、表層付近の高温な 水温成層と深部の低温水塊との間の水深15m付近へ中層 貫入する様子が計算されている. また, 同日は図-3に示 すように気温と日射量が一時的に低くなっており、それ に伴い図-6(a)の水温分布図に示すように水面付近で低 水温層が形成されている. この低水温層は水深1m以下 という極浅い領域にも関わらず、Soroban格子を用いて 水面付近に格子を集中させることで鮮明に計算可能と なっている. 図-6(a)の2日後の図-6(b)では、下流への 風速7mを超える強風により水送流が水面付近に生じ、吹 き寄せによる水温成層界面の傾きと風下側での成層厚の 増大が再現されている.翌14日には風が再び弱まること により、図-6(c)に示すように、表層付近には成層界面 の傾きを復元するため上流に向かう流れが生じ、それに





連行された循環流が水温成層下貯水池深部でも生じてい ることが計算されている.さらに図-6(d)に示すように, 200m³/s弱の大規模台風出水があった9月23日では流入時 の運動量及び風による水送流の影響から水面付近の極浅 い表層を流入水が勢いよく流れる様子がSoroban格子を 用いることで鮮明に計算されている.

(3) Soroban格子による格子点集中配置の検証

Soroban格子による格子点集中配置の有効性を検証するため、同一の格子点数を用いて、式(13)における係数 $\delta \alpha = \beta = 0$ として格子点を各格子軸上で等間隔に配置した場合(以下、等間隔格子)についても計算を行った.

計算結果を図-4(C)及び図-5青線で示す.また,6月24日 における観測地点での水温鉛直分布の計算結果を図-7に 観測結果とともに示す.図-7(a)に示すようにSoroban格 子法を用いて水温躍層と水面付近に格子点を集中させた 場合には、鉛直方向の格子幅は $\Delta z \cong 30 cm$ 以下にするこ とが可能となっており、観測結果に見られる急峻な水温 変動を再現可能となっている.一方、等間隔格子を用い た場合には格子幅は $\Delta z \cong 80 cm$ 程度となり、図-7(b)に 示すように同一の格子点数を使用しているにも関わらず 数値拡散誤差により水温躍層を正確に表現することがで きていないことが確認できる.



図-6 (a)7月10日, (b)7月13日, (c)7月14日, 及び(d)9月23日における水温及び流速の縦断分布. 湖底面以下及び水面上の水 塊以外の領域は, 左列の水温分布では黒抜き, 右列の流速分布では青抜きで示している.

5. 結論

水温成層を伴う貯水池内流動解析に向けて,CIP-Soroban法に基づき熱収支計算を連立した鉛直二次元数 値流動モデルを開発した.鉛直二次元モデルを使用する ことにより計算の高速化を実現し,CIP-Soroban法を用 いることで数値拡散誤差を押さえた計算結果を得ること を実現した.七ヶ宿貯水池を対象として半年間の長期間 再現計算を試みた.現地観測結果との比較の結果,本モ デルにより気象データから水温成層の形成や水温変化を 良好に計算可能であること,またそれに伴う流動現象を 再現可能であることを確認した.特にSoroban格子の持 つ格子点を任意の領域に集中可能である利点を用いて水 面や密度界面など流動現象に重要な領域の空間解像度を 局所的に向上させることで,流動の詳細な空間構造まで 計算可能であることを確認した.

参考文献

- 中村恭志,小島崇,石川忠晴: CIP-Soroban法による河道幅を 考慮した汽水域二次元数値モデルの開発,水工学論文集,第 50巻, pp.805-810, 2006.
- Yabe, T., Mizoe, H., Takizawa, K., Moriki, H., Im, H. and Ogata, Y.:Higher-order schemes with CIP method and adaptive Soroban grid towards mesh-free scheme, *J. Comput. Phys.*, Vol.**194**, pp.57-77, 2004.
- 3) 鈴木伴征,石川忠晴, 銭新,工藤健太郎,大作和弘:利根川河 ロ堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動,水環境学会誌,



第**23**巻, pp.624-637, 2000.

- Ishikawa, T., Suzuki, T., Qian, X.: Hydraulic study of the onset of hypoxia in the Tone River estuary, *J. Environmental Eng.*, Vol.130, pp.551-561, 2004.
- 5) 銭新: 霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換,東 京工業大学大学院学位論文, 1998.
- 6) 福嶋祐介: 乱流モデルによる傾斜壁面密度噴流の解析, 土木 工学論文集, Vol.399, pp.65-74, 1988.
- 7) 梅田信:曝気循環を考慮した貯水池内流動に関する数値解析 モデルの構築と検証,水工学論文集,第49巻pp.1165-1170, 2005.
- 池上迅,梅田信:ダム貯水池の水温成層に関する鉛直2次元 数値解析,水工学論文集,第51巻 pp.1349-1354,2007.
- 9) 梅田信:貯水池に流入する洪水時の三次元流動解析,東京工 業大学博士論文,2001.

(2007.9.30受付)