土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_775-I_780, 2013.

3次元貯水池数値流動モデル"TITech-WARM"の開発と釜房貯水池への適用

DEVELOPMENT OF A NEW 3D NUMERICAL WATER RESERVOIR FLOW MODEL "TITECH-WARM" AND APPLICATION TO THE KAMAFUSA LAKE

中村恭志[1]・戸田真仁[2]・渡部一人[3]・石川忠晴[4]
Takashi NAKAMURA, Masahito TODA, Kazuto WATANABE and Tadaharu ISHIKAWA

[1]正会員 理博 東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科（〒226-8502横浜市緑区長津田町4259番）
[2]学生会員 工学 東京工業大学大学院修士課程 総合理工学研究科（〒226-8502横浜市緑区長津田町4259番）
[3]非会員 工修 東日本旅客鉄道株式会社 設備部（〒151-0053東京都渋谷区代々木2-2-2）
[4]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（〒226-8502横浜市緑区長津田町4259番）

A new 3D numerical flow model named as TITech-WARM is developed. The model is specialized to calculate the water flow in water reservoirs. To restore spatial structure of water temperature precisely, the model is developed based on the CIP-Soroban method. While the CIP scheme is employed as an advection solver to avoid numerical diffusion error, a new adoptive mesh system 'Soroban mesh' is adopted. To estimate a time development of water temperature, heat exchanges between water surface and atmosphere are modeled with the Swinbank and Rohwer equations. Furthermore, to take account of aeration processes utilized in many reservoirs, the model is combined with a vertical 1D double plume model. The developed model is applied to the Kamafusa water reservoir. Through comparisons with field observational data of water temperature and flow, it has been found that the model has the capability to restore the flow structure well.

Key Words : *TITech-WARM, 3D Numerical Flow Model, Water Reservoir, CIP-Soroban, Aeration*

１．序論

貯水池は社会的基盤として大きな役割を果たしている．その水環境を健全に管理・運用する為，貯水池内流動を詳細に把握可能な数値流動モデルが近年求められている．地形が複雑に変化する貯水池の解析には三次元流動モデルが有効である．近年の計算機の発展に伴い，三次元モデルによる貯水池流動解析が広く行われるようになってきている[1),2),3),4)]．しかし，それら多くはσ格子系を採用するため，水平水温成層の非物理的拡散や，水深に応じて格子点数を変化させられないなどの難点が示唆されている[4)]．一方，超低数値拡散誤差の移流計算法として，新しい動的適合格子であるSoroban格子法と高精度補間法であるCIP法を組み合わせたCIP-Soroban法がYabeらにより提案されている[5)]．中村らは汽水域塩水密度流を対象として，この計算法を使用した三次元CIP-Soroban汽水域流動モデルを近年提案している[6),7)]．Soroban格子では，格子点数と位置の自由度が向上し，動的適合により数値拡散誤差を抑制して急峻な密度界面を正確に再現可能となることから，従来モデルの難点を回避した高精度貯水池流動モデルを実現できる可能性がある．本研究ではCIP-Soroban汽水域モデルに日射・気温などにより変化する水温成層状態の計算モデルを導入して，新たに三次元貯水池流動モデル（Tokyo Institute of Technology-WAter Reservoir Model；TITech-WARM）を開発した．また，多くの貯水池では夏期の水温成層の緩和と水質維持の為，深層から気泡を放出し湖内流動を強制的に駆動する曝気循環装置が導入・運用されている．そこで，鉛直一次元曝気プルーム解析と三次元流動解析を連成させることで，曝気装置を流動モデルに導入することを試みた．曝気装置が導入されている宮城県釜房貯水池を対象として検証計算を行った．検証データ入手のため夏期に流動観測を行うとともに，水温・流速観測結果と再現計算の結果とを比較してモデルの有効性を確認した．

２．TITech-WARM

開発したモデルはCIP-Soroban汽水域モデルを元に，水温成層形成と曝気過程を新たに取り込んだものである．以下概要を述べる．計算方法など詳細は文献[5),6),7)]を参考にされたい．

(1) Soroban格子

図-1にSoroban格子の概念図を示す．以下のように格

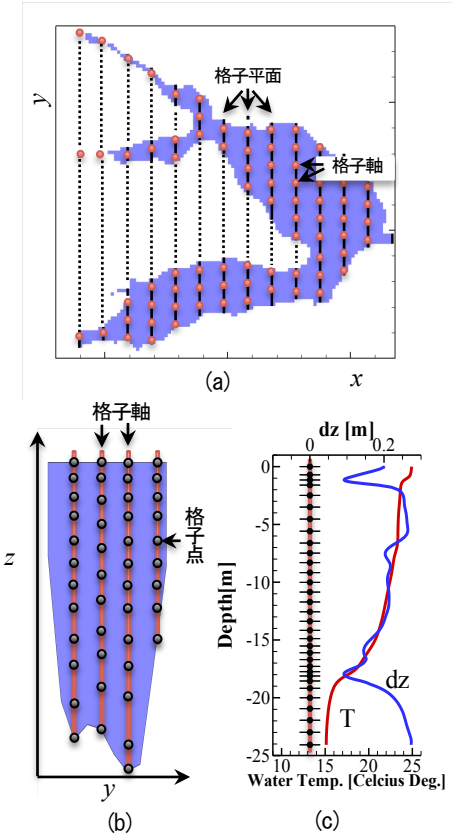


図-1　Soroban格子の配置概念図．(a) 格子平面と格子軸，(b) 各格子平面上での軸配置，(c) 軸上での計算格子点動的配置．

子平面・軸・点が階層的に格子系を構成する．x方向に垂直な複数のy-z平面(格子平面)を設定する（**図-1 (a)**）．各格子平面上には鉛直方向に伸びる格子軸（**図-1 (b)**）を配置する．最後に各格子軸上に格子点を配置し，その上で流速等物理量が計算される．格子平面・軸は計算開始時に設定するが，個数と位置は自由に設定可能である．一方，格子点は各時間ステップにおける成層位置に応じて動的に再配置される．各軸上でモニタ関数

$$M=\sqrt{1+A\left|\partial\rho/\partial z\right|} \tag{1}$$

を鉛直密度分布から推定することにより，水温変化の大きい躍層位置を検出し，その付近に格子点を集中的に配置する[6),7)]．Aは格子の集中度合いを規定する定数である．後述の検証計算における格子点配置の様子を**図-1 (c)** に示す．左側黒丸が格子点の鉛直位置を，青線が格子点の鉛直間隔を示している．平均格子間隔が20cmである一方，水温躍層（水深18m）及び日成層（水深2m）付近では格子間隔は7cm程度と集中配置されている．

(2) 基礎方程式

基礎方程式として以下の3次元非圧縮k-ε乱流方程式を用いる．

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt}=-\frac{\nabla p}{\rho}+\frac{\partial}{\partial x}\nu_H\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\nu_H\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\nu_{eff}\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial z}+\mathbf{F} \tag{2}$$

$$\frac{Dk}{Dt}=P_k+G_k-\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x}\frac{\nu_H}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\frac{\nu_H}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\frac{\nu_{eff}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z} \tag{3}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt}=\left(C_1P_k-C_2\varepsilon+C_1(1-C_3)G_k\right)\frac{\varepsilon}{k}+\frac{\partial}{\partial x}\frac{\nu_H}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\frac{\nu_H}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\frac{\nu_{eff}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial z} \tag{4}$$

$$\frac{DT}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x}\frac{\nu_H}{\sigma_T}\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\frac{\nu_H}{\sigma_T}\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\frac{\nu_{eff}}{\sigma_T}\frac{\partial T}{\partial z}-\frac{\phi_{Heat}}{\rho C_W} \tag{5}$$

$$\nabla\cdot\mathbf{u}=0 \tag{6}$$

$$P_k=\nu_{eff}\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right\},\quad G_k=\frac{g}{\rho}\frac{\nu_{eff}}{\sigma_t}\frac{\partial\rho}{\partial z}$$

$$\nu_{eff}=\nu_{mol}+\nu_{turb}=\nu_{mol}+C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon},\quad \nu_H=0.01\times D^{4/3}$$

ここで，x及びyは水平方向座標，zは鉛直方向座標であり，$\mathbf{u}=(u,v,w)$は流速ベクトル，$\mathbf{F}=(0,0,-g)$は重力加速度を表す．k,εは乱流エネルギーと散逸率，ν_{mol}とν_{turb}は水の分子粘性と乱流粘性係数，pは圧力，Tは水温である．水平方向の粘性係数ν_Hは水平方向の代表格子幅Dからリチャードソン4/3乗則を用いて求めたものを使用した．係数C_1，C_2，C_3，C_μはk-εモデルの標準値を使用した[6),7)]．ϕ_{Heat}は日射等による水温Tの生成項，C_wは水の比熱である．ρは水の密度でありUNESCO式[8)]により水温から決定した．解法は汽水域3次元CIP-Sorobanモデルと同様の手順で行う[6)]．時間分割法に基づき式(2)~(5)を移流項とそれ以外の項に分離し，移流項はCIP法を用いた空間3次精度の補間により計算される．その後，移流項以外の項についてSoroban格子上での差分近似を行い時間発展が計算される．以上の流速，水温，乱流諸量の計算に加え，水面位置$h(t,x,y)$の時間発展を次式に従い陰的に計算する．

$$\partial h/\partial t+\partial m/\partial x+\partial n/\partial y=0 \tag{7}$$

ここでm，nはx，y方向へ線流量であり，式(2)により計算された流速から以下のように見積もられる．

$$m(t,x,y)=\int_b^h u\,dz,\qquad n(t,x,y)=\int_b^h v\,dz \tag{8}$$

ここで$b(x,y)$は湖床高である．

(3) 熱収支／風応力の計算

水温の輸送方程式(5)において，生成項ϕ_{Heat}として大気と水の間の熱収支を考慮する必要がある．梅田の研究[9)]を参考に生成項ϕ_{Heat}を考慮した貯水池鉛直2次元モデルを筆者らは先に開発し，七ヶ宿貯水池で水温成層形成の良好な再現性を確認している[10)]．そこで，本モデルでも同様のモデル化を行うこととした．即ち，水面上でのϕ_{Heat}は，短波日射ϕ_I，長波放射ϕ_L，潜熱ϕ_e・顕熱ϕ_cフラックスから$\phi_{Heat}=(1-r)b\,\phi_I-\phi_L-(\phi_e+\phi_c)$のように考慮した．ここに$r$と$b$は水面反射率及び水面吸収率であ

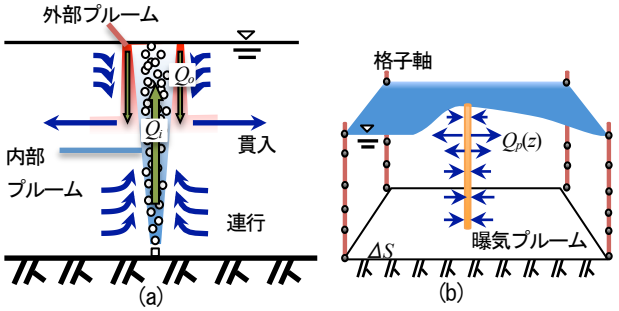


図-2　曝気モデル概念図．(a) Doubleプルームモデル，(b) 流動モデルと曝気プルームモデルの連成．

る．長波放射 ϕ_L 及び潜熱・顕熱フラックス($\phi_e+\phi_c$)は夫々Swinbank式[11]及びRohwer[12]式を用いて，気温・雲量・風速及び湿度等の気象条件から見積もることとした．また，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 $\phi_{Heat}=(1-r)(1-b)\,\phi_I \exp(-d/\eta)$ を用いて計算することとした．ここで d は各格子点の水面からの距離，η は減衰長である．水面上に働く風応力は10m高度風速 $\mathbf{U}=(U_x,U_y)$ からバルク輸送係数 C_d を用いて以下の様に求め，流速の水面上境界条件とした．

$$\tau_x = C_d\rho_a U_x|\mathbf{U}|,\quad \tau_y = C_d\rho_a U_y|\mathbf{U}| \qquad (9)$$

ここで ρ_a は空気密度で，C_d はKondo式[13]から推算した．

(4) 曝気過程の計算

Asaeda[14]らは定常水平密度成層における鉛直1次元曝気モデルとしてDoubleプルームモデルを提案している．図-2(a)に示すように，底層より放出された気泡群は周辺水を連行することにより上昇する内部プルームを形成する．連行された重い底層水は，負の浮力により運動量を失うか，水面に達した後下降する外部プルームとなる．最終的には外部プルームは同一密度となる付近で周辺水へ水平貫入する．Doubleプルームモデルでは鉛直密度分布を入力として，保存式を満たすように半径・流速・浮力の鉛直分布が計算され，内部・外部プルーム夫々の鉛直方向体積流量 Q_i, Q_o を計算できる．

一方，曝気によるプルームの水平的広がりは，貯水池流動を解析する計算格子の一般的な水平間隔 (数十m～数百m)に比べ小さく，図-2(b)の様に流動計算の格子内部に含まれることになる．このような局所的なプルームの影響を流動計算に反映させるため，鉛直２次元モデルへ曝気を導入した梅田[9]の研究を参考にDoubleプルームモデルと3次元流動モデルを連成させる．各時間ステップにおける取扱いは以下の様に行う．まず，流動モデルから曝気装置上方の水温鉛直分布を補間により求め，これを入力としてDoubleプルームモデル解析を行う．次いで，プルームによる周辺水の連行と周辺水への貫入を図-2(b)に示すように計算格子内部での仮想的な吸込み・湧出しと考え，プルームからの水深1m当り湧出流量 Q_p を Q_i, Q_o を用いて

$$Q_p(z)=\left(-\frac{d}{dz}Q_i(z)+\frac{d}{dz}Q_o(z)\right) \qquad (10)$$

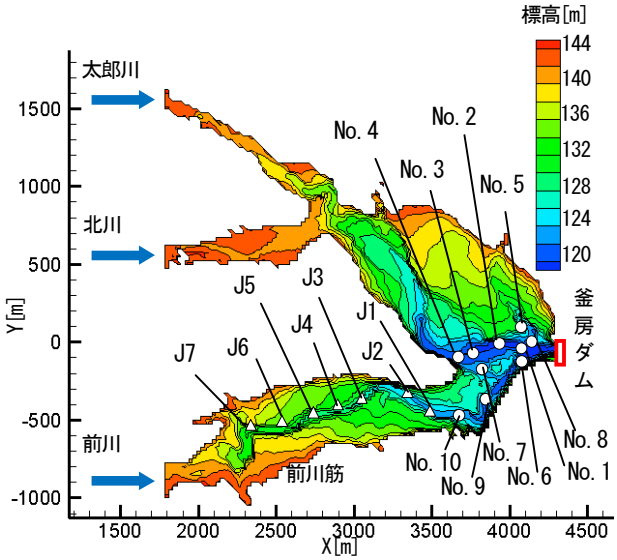


図-3　釜房貯水池の地形図．白丸で曝気装置(No. 1～10)の位置を，三角で2010年現地観測の測定位置(J1～7)を示す．

と計算する．これを水平方向面積 ΔS で割ることで平均湧出量とし，曝気装置を含む計算格子の内部領域では非圧縮条件(6)に代えて，

$$\nabla\cdot\mathbf{u}=Q_p/\Delta S \qquad (11)$$

を連続条件式として満足するように流速場を更新し，曝気プルームの影響を流動モデルへ反映させる．

３．釜房貯水池への適用

釜房貯水池の再現計算に適用し，現地観測結果と比較する．図-3に計算で使用した湖底標高分布を示す．国土交通省釜房ダム管理所より提供いただいた音響測深データ（水平解像度5m，2011年）を基に地形データを作成した．図-3白丸に示すように，夏期には計10台の散気方式曝気装置が運用されている．

主として流速場の検証データを得るため，2010年8月27日に移動観測を図-3三角で示す7地点（J1～7）について行い，船上からADCP（ADCP Instruments製，1200kHz）と多項目水質計（JFEアレック製，AAQ1182）により流速及び水温の鉛直分布を計測した．ただし2010年夏期は貯水位が夏期制限水位を3m下回るほどの渇水年であり，水温躍層が湖底付近にまで低下するなど特殊な年であった．そこで典型的な水位で推移した2007年8月についても再現計算を行い，ダムサイトでの水温鉛直分布データと比較して水温成層の再現性を検証することとした．

計算期間は2007年8月1日～8月31日，及び2010年8月26日～28日とした．図-3に示すように座標系を選び，x 方向に垂直に格子平面を Δx =25mの等間隔とし，格子軸の間隔も Δy =25mと等間隔とした．各軸上の格子点数は計算開始時水深において平均格子間隔が20cmとなるよう軸ごとに決定した．流入河川の前川，北川，太郎川については観測流量及び水温の時間データを境界条件として使用し，ダムからの放流量は実績時間データから設定し，

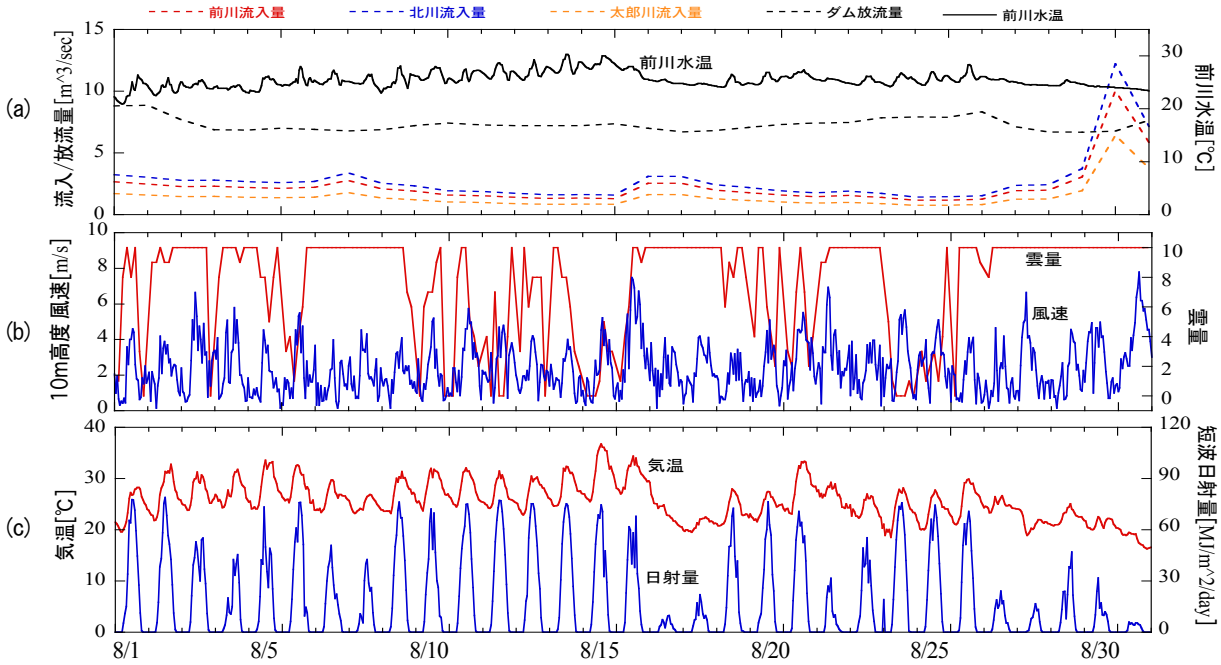


図-4　2007年の計算に用いた(a)流入/放流量, (b)雲量・風速, (c)気温・日射量.

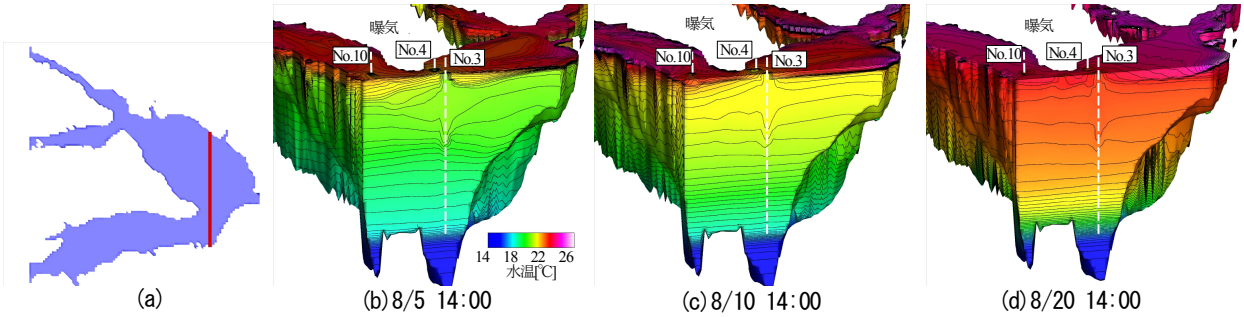


図-5　2007年夏期の計算結果(水温分布). (b)～(d)は図(a)赤線で示す断面で切取った部分について示している.

実際の放流施設の位置を参考に下流端において水深2.85mまでの上層放流とした．熱収支計算に関わる気象データは，全天日射量・雲量は気象庁仙台測候所の時間データを使用し，それ以外の気温・風速・風向はダムサイトで観測された時間データを使用した．計算時間刻み幅ΔtはCFL数が0.5以下となる様に各ステップで決定した．大凡Δt = 30secであった．釜房貯水池から南西25km付近にある七ヶ宿貯水池では，過去に同様の熱収支モデルを用いた鉛直2次元解析が行われ，水温成層の形成が良好に再現されることが確認されている[10]．そこで，熱収支モデルにおける各定数値は七ヶ宿貯水池での計算[10]で用いられた値を参考に，r = 0.03, b = 0.3, η = 3mとした．ダムサイトにおける鉛直水温分布の測定結果を初期水温分布として湖内一様に与えた．なお，実際のプログラムではMessage Passing Interface (MPI) ライブラリを用いて並列化されており，自作PCクラスター(Core i7 975 3.33GHz, 6台)を用いることで計算対象31日間を4日間の計算で終了している．

(1) 2007年8月1日～8月31日の計算結果

図-4に計算で用いた流入/放流量と気象条件の時間変化を示す．流入水温は三つの流入河川で大きな差異は見られなかったことから，**図-4(a)**に前川の流入水温のみを示した．

図-5に水温分布の計算結果を示す．成層構造を明瞭に示すため曝気装置（No.3, 図中白破線）を通過する断面でダムサイト付近の一部を切取っている．

図-6には全計算期間を通じたダムサイトにおける水温鉛直分布の時間変化を示す．**図-6(a)**は観測結果を，**図-6(b)**は計算結果を示している．**図-6(a)**の観測結果は午後2時での1日ごとの観測結果から図化しており，**図-6(b)**の計算結果は15分毎の計算結果から図化している．**図-6(b)**の計算結果では，日中と夜間の気象条件の変化に応じた水温の日変化が見られる．計算期間の曝気放出水深は大凡18mであり，**図-6(b)**に示すように曝気プルームが存在しない18m以深は計算期間を通じ14℃程度の低温水塊が保持され強い水温躍層が存在し続けている．一方，曝気プルームの貫入水深は大凡水深3m付近であった．**図-5(b), (c)**に示すように上昇する気温・日射量により貯水池上層に高水温層が形成されるが，曝気装置付近では貫入の生じている水深付近を中心に鉛直混合が促進され，**図-6(b)**に示すように18m以浅の水温が一様化していく様子が計算で再現されている．また，比較

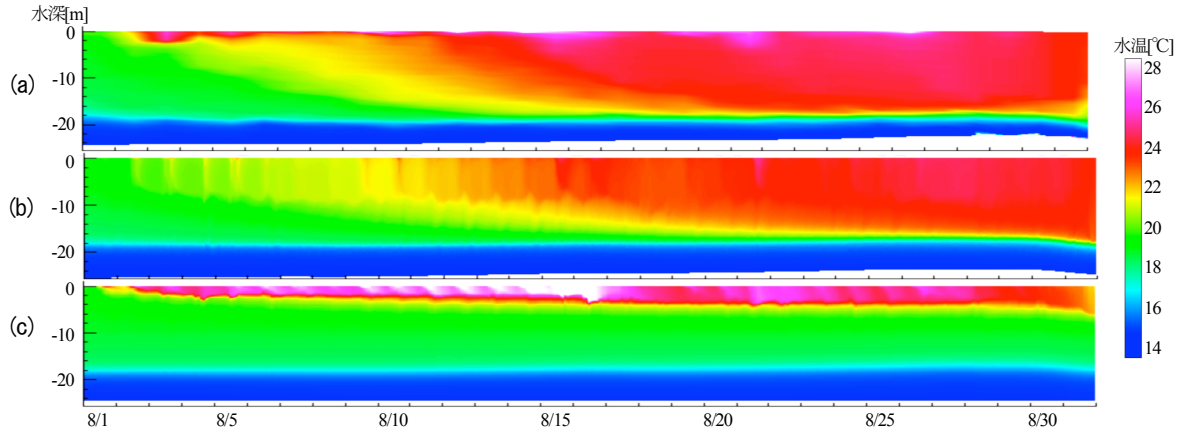


図-6　2007年夏期のダムサイト鉛直水温分布の時間変化．(a) 観測結果，(b) 計算結果，(c) 曝気装置を考慮しない場合．

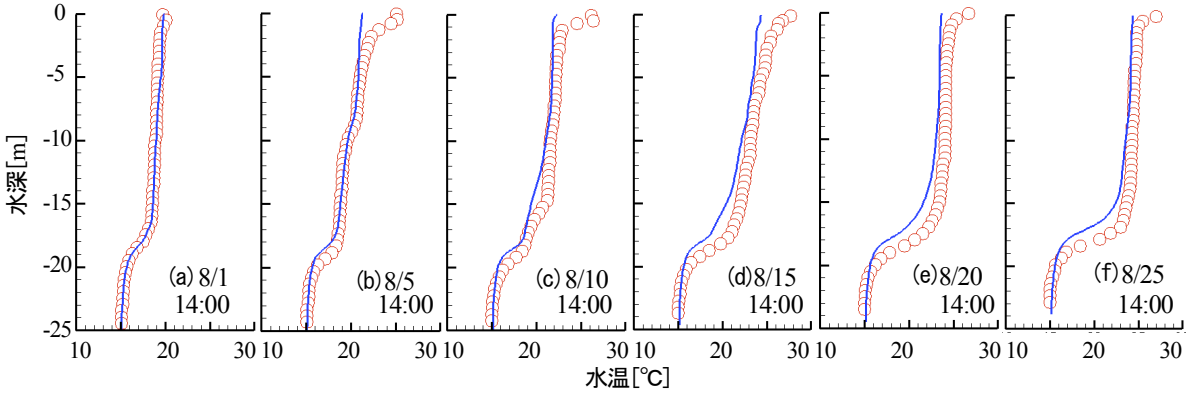


図-7　2007年夏期のダムサイトでの水温鉛直分布の比較．図中丸印は観測結果を，青実線は計算結果を示す．

の為，曝気装置を一切考慮しない場合についても計算を行った．その結果を図-6 (c) に示す．曝気を考慮し無い場合には，表層2m以浅に高水温層が保持され続け図-6 (a) や図-6 (b) に観られるような水温の一様化は観られない．このことから，曝気による鉛直混合の促進が釜房貯水池での水温鉛直分布に大きな影響を与えていることが確認できる．

次に定量的な比較のため，図-7にダムサイトにおける水温鉛直分布の計算と観測結果との比較を示す．概ね計算結果は観測結果を良く再現している．その一方，図-7 (b) ～ (f) に示すように，水深1m以浅では水温が最大で5℃程度低く計算されており，水面極近傍での水温上昇の再現性には問題があることが分かる．本モデルには熱収支と曝気モデルに多くのパラメータを含んでいる．熱収支に関するr, bなどのパラメータには過去に実施した七ヶ宿貯水池での水温成層解析で用いたものを使用している．図-7に示すように，18m以浅の高水温層の平均的な水温上昇は1℃程度のずれで比較的良く再現されていることから，総量として熱収支は現実と大きく異なっていないと推察される．一方，曝気モデルにおける連行係数の値などはAsaeda[14]らが推奨している値をそのまま使用した．しかし，鉛直2次元モデルに本モデルと同様のアプローチで曝気モデルを導入した梅田らの研究[9]では，Asaeda[14]らの推奨値では水温鉛直分布の再現性が良くないことが指摘されている．特に，Asaeda[14]らの推奨値では水面近傍での外部プルームによる周辺水の連行流量が

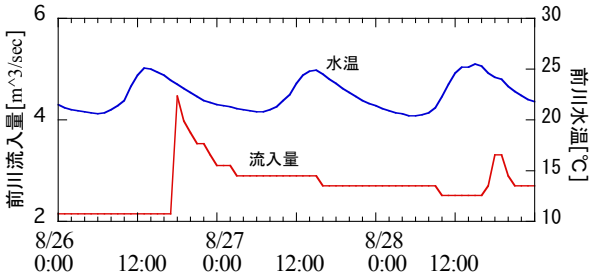


図-8　2010年の計算における前川流入量及び水温．

大きすぎるとしている．今回の計算でも，水面近傍での曝気による連行とそれによる鉛直混合が過大に計算された結果，図-7 (b) ～ (f) に示す水深1m以浅での水温上昇が再現されなかった可能性がある．熱収支と曝気モデルのいずれにせよ，水面近傍での再現性を高めるには，更なるパラメータ値のキャリブレーションが必要だと考えられる．

(2) 2010年8月26日～8月27日の計算結果

流動計算の再現性を検討するため，2010年8月27日に前川筋にて実施した流速観測結果との比較を行った．この年は渇水の為，貯水池内水温は大凡27℃で一様であった．一方，図-8に示すように，河川からの流入水温は夜間で20℃，日中でも25℃以下と貯水池より低温であり，観測が行われた8月27日の前夜には降雨により小規模の出水が観測されている．そのため観測日には，河川から流入した低水温塊は湖底付近を選択的に流下していくと

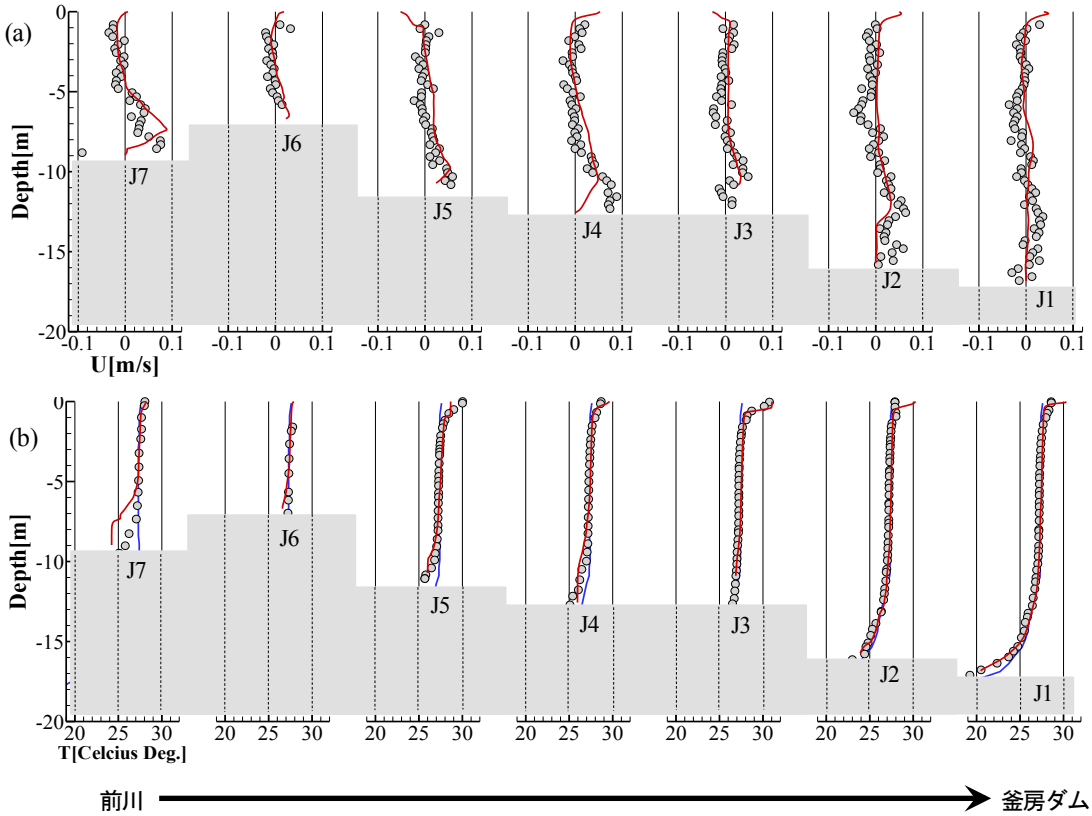


図-9　2010年の計算結果と現地観測結果との比較．(a)澤筋(旧河道)方向の流速分布，(b)水温鉛直分布．観測結果を円で示し，計算結果を赤線で示す．図(b)の青線は初期条件の水温分布を示す．

予想される．図-9にはJ1～J7の観測点における流速・水温鉛直分布の観測と計算結果の比較を示す．低水温流入水塊に伴い湖底付近で下流側への流速が生じ，水温が初期分布より低下している様子が確認でき，密度差に起因する流速と水温分布の傾向を概ね再現している．

4．結論

水温成層と曝気装置を考慮可能な3次元貯水池流動数値モデルを開発し，釜房貯水池での現地観測結果と比較した．水温ならびに流速分布について比較した結果，開発したモデルが水温成層の形成と，密度差に起因する流動現象を良好に再現可能であることを確認した．

謝辞：本研究は東京工業大学，いであ，環境調査技術研究所，建設環境研究所，建設技術研究所，ダム水源地環境整備センター，東京建設コンサルタント，日水コン，日本工営，パシフィックコンサルタンツ，三井共同建設コンサルタントの共同研究の成果である．ここに記し感謝申し上げる．また，国土交通省東北地方整備局釜房ダム管理所からは貴重な測量・観測データの提供を受け，2010年の現地観測では観測船の提供など多大なご助力を賜った．ここに深く感謝申し上げる．

参考文献

1)Yamashiki, Y., Matsumoto, M., Tezuka, T., Matsui, S., Kumagai, M. : three-dimensional eutrophication model for lake biwa and its application to the framework design of transferable discharge permits, *Hydrological Processes*, **17**, pp.2957-2973, 2003.
2)矢島啓，吉川栄，石黒潤：選択取水方式がダム貯水池の長期・短期の水質保全に与える影響に関する研究，水工学論文集, **50**, pp.1375-1380, 2006.
3)丸谷靖幸，中山恵介，堀松大志，鰻目淑範，米元光明: 網走湖における密度界面に対する風応力と河川流入の影響評価，水工学論文集, **54**, pp.1393-1398, 2010.
4)Cheng, D., Stone, M. and Li, Y.: Hydrodynamic modeling of lake Mead under changing water levels, *Desert Research Institute Technical Report,* 2009.
5)Yabe, T., Mizoe, H., Takizawa, H., Moriki, H., Im, H. N., Ogata Y.: Higher-order schemes with CIP method and adaptive Soroban grid towards mesh-free scheme, *J. Compt. Phys.,* **194**, pp.57-77, 2004.
6)中村恭志，石川忠晴: CIP-Soroban法に基づく汽水域3次元数値流動モデルの開発,水工学論文集, **54**, pp.1441-1446, 2010.
7)許暁飛，中村恭志，小林侑，小島崇，石川忠晴: CIP-Soroban三次元流動モデルによる利根川感潮域塩水流動解析，水工学論文集, **56**, pp.1555-1560, 2012.
8)UNESCO: The Practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980, *Tech. Pap. Mar. Sci.*, **36**, pp.25, 1981.
9)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, **49**, pp.1165-1170, 2005.
10)小島崇，中村恭志，石川忠晴: 水温成層を考慮した貯水池流動解析に向けたCIP-Soroban法に基づく鉛直2次元数値流動モデルの開発，水工学論文集, **52**, pp.1039-1044, 2008.
11)Swinbank, W.C.: Long-wave radiation from clear skies, *J. Roy. Meteor. Soc*, **89**, pp.330-348, 1963.
12)Rohwer, C.: Evaporation from Free Water Surface, U.S. Department of Agriculture, *Technical Bulletin*, No.271, 1931.
13)近藤純正: 水環境の気象学，朝倉書店, 1994.
14)Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech*, **249**, pp.35-57, 1993.

(2012. 9. 30受付)