

ダム貯水池の水温成層に関する鉛直 2 次元数値解析

ANALYSIS ON THERMAL STRATIFICATION IN A RESERVOIR USING A VERTICAL 2-DIMENSIONAL MODEL

池上 迅¹, 梅田 信²
Jin IKEGAMI, Makoto UMEDA

¹正会員 修 (工) (株) 日水コン 河川事業部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 4-7-107 日水コンアクア 21 ビル)

²正会員 博 (工) (財) ダム水源地環境整備センター (〒102-0086 東京都千代田区麹町 2-14-2 麹町 NK ビル)

(現: 国立大学法人 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

We investigated numerical simulation method for analysis of thermal stratification in dam reservoirs using a numerical model based on the laterally averaged vertical 2-dimensional assumption. The main subjects discussed in this paper are effects and influences of boundary conditions. The simulation model is applied to the Shichikashuku Reservoir, and methods of providing boundary condition are discussed on the following two effects: 1) wind stress (wind-induced current) and 2) flow profile near water intakes. The model with these effects from the boundaries can more properly reproduce the thermal stratification behavior than that neglecting the effects.

Key Words: dam reservoir, thermal stratification, selective withdrawal, wind stress

1. はじめに

貯水池の水環境を考える上で、貯水池内の水温成層構造は最も重要な要素である。例えば、夏季の表層水温上昇(浅い成層の発達)が植物プランクトンの増殖をもたらすことがある^{1),2)}。また季節成層の発達が、底層の貧酸素化や放流水の冷水現象や温水現象に結びつき、生態系等の自然環境への影響が懸念されることがある。

近年、環境問題への関心の高まりから、環境影響予測の検討が、ダムの建設や湛水の前に盛んに行われている。その結果、実務面における予測検討事例が、飛躍的に増えた。多数の検討により分かったことの一つに、水温成層の変化(発達から破壊)の再現計算には、予想以上の難しさがあることが挙げられる。水温構造の変動は、化学的、生物的要因がほとんど関与しない物理的な現象であるため、水温成層のシミュレーションは、他の水質変化過程に比べ、単純で容易だと思われていた。しかし、対象とする貯水池で、多様な水文条件を含む比較的長期間(10年程度)の実測結果に計算結果を整合させることに、労力を要する場合がある。このようなことから、水温の予測シミュレーションの精度向上は、未だに重要な技術課題であると、実務技術者の間で認識されている³⁾。

本論文では、現在の実務で多用されている鉛直二次元解析の精度向上を目的とした検討の成果について紹介を

する。従来、貯水池の水理解析モデルは、鉛直一次元⁴⁾、鉛直二次元^{5),6)}、三次元^{7),8)}のモデルが開発されており、近年は、計算機の発達により高次の解析も行いやすくなっている。一方、実務上の解析では、限られた資源(時間、計算機)の中で、長期間の予測計算や多数の検討ケースを解析する必要がある。そのため、計算の精度と負荷の釣り合いを考慮したモデルの選定が必要となる。

その結果、実務では一次元多層流モデル⁹⁾(静水圧近似を施した鉛直二次元解析)が標準的に活用されている。これに対して、筆者らは精度向上を目的として、非静水圧解析及び k-ε乱流モデルを取り入れた鉛直二次元モデルを開発した¹⁰⁾。このモデルは、鉛直渦拡散係数の算定に経験的なパラメータの設定が少ないことなど、計算精度に加えて、汎用性・一般性の向上というメリットがある。この利点は、解析の方法や結果について対外的な説明を行う際に重要な役割を果たすと考えられる。

より高精度なモデルが、近年も継続的に開発されている状況であり、いくつかの事例^{10),11)}では、上記の効用が現れていると考えられる結果が得られている。しかし、たとえ高精度なモデルであっても、結局のところ計算結果は境界条件の与え方次第で、実現象に対する再現性は大きく変わってくる。したがって、モデルによる解析の一部として、影響する現象をどのような形で境界条件として取り込む必要があるのかということについて、知見

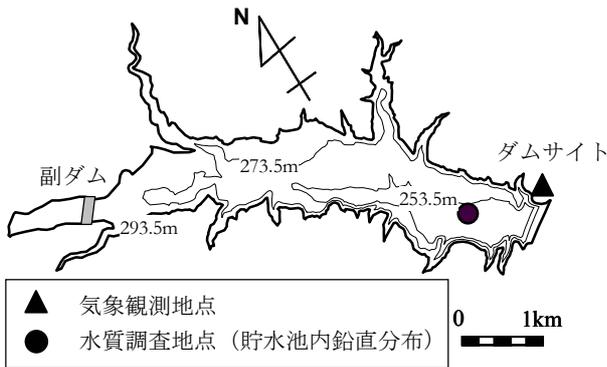


図-1 セツケ宿ダムの貯水池平面図と観測地点. 常時満水位における湖岸線 (EL293.5m) と 20m 間隔の等深線を示した.

を取りまとめることが重要だと考えられる.

本論文では、鉛直二次元モデルの解析における、水面に作用する風応力の影響と取水口付近の流動層の影響という2つに関して影響を検討した. ただし、これらは本研究で新たに開発した成果というものではなく、むしろ再発見という類の改良点である. しかし、従来見落とされていたと思われるような場面に影響が現れており、本論文で報告した. その概略は、つぎの2つである.

まず冬季から春先に現れた風応力の影響が、水温成層発達後までの計算結果に差を生むことが分かった. また、取水口付近の流動層は、洪水流入後の水温躍層の低下に影響していることが分かった. 本論文では、セツケ宿貯水池における観測及び計算結果に基づき取りまとめた.

2. 解析の対象及び方法

(1)対象ダム及び貯水池の概要

セツケ宿貯水池は、図-1 に示すよう比較的単純な形状をしている. 湛水面積 4.1km^2 、湛水延長 5km 、有効貯水量 $99.5 \times 10^5\text{m}^3$ 、最大水深約 45m といった諸元である.

セツケ宿ダムの洪水調節は、オールサーチャージ方式である. ダムの取水設備は三つある. 洪水吐は、敷高 $\text{EL}285.0\text{m}$ の常用放流設備と敷高 $\text{EL}293.4\text{m}$ の非常用放流設備が設置されている. また、利水放流のための選択取水 (表面取水) 設備が設置されている. 常時の放流量は $5 \sim 15\text{m}^3/\text{s}$ 程度である. さらに、ダムサイトから約 500m 上流の左岸側に上水取水設備 (任意水深の選択取水設備) が設置されている. 取水量は $1 \sim 3\text{m}^3/\text{s}$ である.

貯水池の上流端には、貯砂ダムがある. 流域面積にして約 8 割を占める白石川と横川からの流入河川水は、この副ダムを経由する (図-2 参照) ことになる. 貯水池の流域面積は 237km^2 である. 流域は、白石川流域 (131km^2)、横川流域 (53km^2) および貯水池へ直接流入する残流域 (合計集水面積 53km^2) の3つに分けられる.

(2)解析対象時の水文、気象条件

本研究で着目する現象は2つある. 一つは、年間変動としての水温成層の発達と破壊である. もう一つは、洪



図-2 セツケ宿ダム流域と観測地点

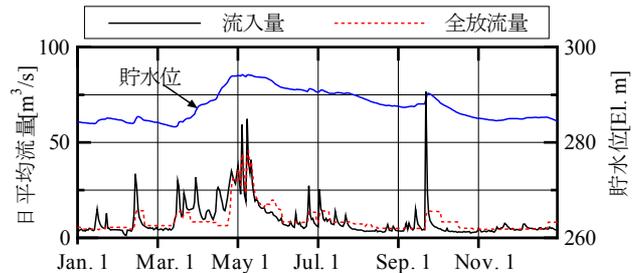


図-3 1996年の貯水池運用条件 (日平均値)

水時の水温躍層の挙動 (低下) である. 本論文で示す検討対象期間は、前者が 1996 年の通年とし、後者が 1998 年の 8 月から 9 月にかけての洪水時とした. それぞれの検討対象期間における水文条件 (ダム流入量、放流量、貯水位) を図-3 と図-4 に示す.

1996 年は、梅田ら⁷⁾の検討で対象とした、やや小規模な出水が秋に見られるが、概ね平均的な流況の年である. 一方 1998 年は、夏から秋にかけて、比較的規模の大きな洪水が連続して発生した. 1ヶ月半程度の中に、 $361\text{m}^3/\text{s}$ 、 $204\text{m}^3/\text{s}$ 、 $422\text{m}^3/\text{s}$ という時間ピーク流量の洪水であった. この時の運用上の特徴に、流入した濁水の深度に合わせて選択取水 (表面取水) 設備の開度を大きくし、濁水の早期排出を狙った運用をしたことが挙げられる.

図-5 は、図-4 と同期間の貯水池内の水温鉛直分布を時系列で示したものである. 測定方法は次の通りである. 測定地点は、図-1 に●印で示した貯水池下部部の水質観測点とした. ここに水深 0m (水面) から水深 30m まで 2m 間隔で、水温計 (OnSet 社製, StowAway Tidbit) を設置した. 測定間隔は、 30 分である. また、洪水が頻発したことから、この期間に $1 \sim 2$ 週間に 1 回程度の頻度で、ACL-1180 (アレック電子 (株) 製) 用いて、水温の鉛直分布を測定した. 第 4 章で示すモデルの検証には、測定頻度が密であるため、このデータを用いている.

図-5 において、出水後に間隔が広がっている等水温線から判断すると、3 回の洪水のいずれのときも、流入水温が $16 \sim 17^\circ\text{C}$ 程度であり、水温躍層の上側へ流入していることが分かる. この期間内で特徴的と思われる水温の挙動は、1 回目の洪水流入後に見られる躍層低下である. 8 月 7 日に洪水が流入したことを契機に、躍層の低下が直線的に進行している. この躍層低下は、2 回目の洪水 (8 月 30 日) が流入し終えた頃に落ち着いている. 洪水

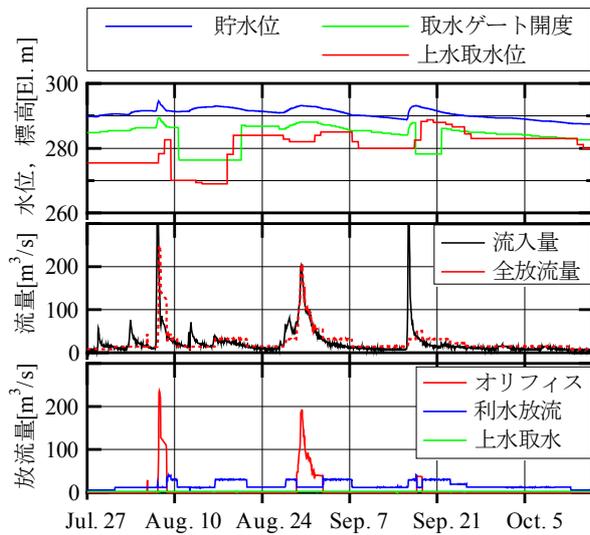


図-4 1998年洪水期間の貯水池運用条件 (時間値)

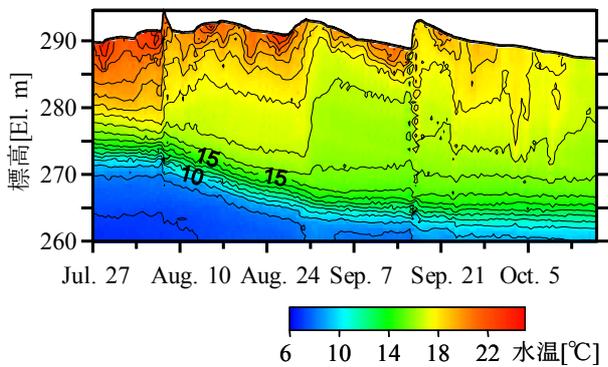


図-5 1998年洪水期間の貯水池内水温変動

流入により躍層の低下や破壊が生じる場合、通常は洪水流入最中の短時間で発生する現象である。また8月30日以降に、水温躍層の下側である標高263m付近より下層の水温が徐々に上昇し始めていることも分かる(特に3回目の出水の9月16日以降により顕著となる)。このように、この洪水期間は、通常とやや異なる水温構造の変化が見られる。

七ヶ宿貯水池の気象条件の特徴は、強風が吹き下ろす頻度が高いことが挙げられる。図-6に、検討対象全期間(平成5年から14年の10年間)について、月別の平均風速を整理した。冬季には、平均的に強い風が吹いており、2月には約5m/sもの値を示している。さらに、図-7には平均風向の発生頻度を方角別に示した。風速の特徴に加えて、北西から西北西という貯水池の流軸方向に風が吹き下ろす頻度が高い。

(3) 数値解析モデルの概要

本研究で用いた解析モデルの基礎式は、3次元の基礎方程式(連続式、ブシネスク近似した運動方程式、k-εモデル式、水温とSSの輸送方程式)を横断方向に積分した鉛直2次元の方程式である。これらの基礎方程式を有限体積法で離散化し、SIMPLE法により解いた。流速に関する壁面境界条件は、鈴木ら¹²⁾に倣って与え、乱流エネルギー k と散逸率 ϵ は、壁関数法を用いて与えた。以

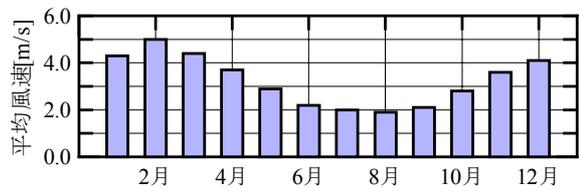


図-6 七ヶ宿ダムの月別平均風速 (H.05~H.14)

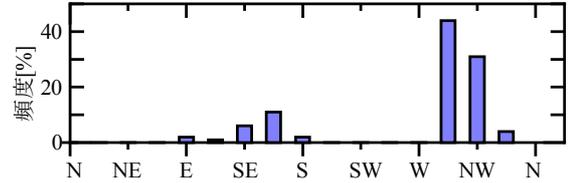


図-7 七ヶ宿ダムの日最多平均風向 頻度分布

上に関しては、梅田ら¹⁰⁾によるモデルと同様である。

気象条件により生じる水面での熱収支 ϕ [W/m^2]は、日射により受ける熱量(全天日射量, ϕ_1)、長波放射 ϕ_L 、潜熱 ϕ_e 、顕熱 ϕ_c について、

$$\phi = (1-r)b\phi_1 - \phi_L - \phi_e - \phi_c \quad (1)$$

として与えた¹¹⁾。ここに r = 水面の反射率、 b = 水面吸収率である。このうち、長波放射 ϕ_L はSwinbankの式、潜熱・顕熱 $\phi_e + \phi_c$ はRohwerの式などの経験式⁹⁾から算出した。また、水面を透過した日射の水深方向での熱伝達は、Lambert-Beerの法則に基づき、

$$\phi_z(y) = (1-r)(1-b)\phi_1 \exp(-\kappa y) \quad (2)$$

とした。ここに、 ϕ_z = 水深 y [m]における日射量 [W/m^2]、 κ = 減衰係数である。

計算領域は、副貯水池と本貯水池の両者を設定し、それぞれについて計算メッシュを作成した。副貯水池は、流下方向のメッシュ幅 Δx を100m、鉛直方向のメッシュ幅 Δz を1mとした。本貯水池は、 Δx を200mとしたが、 Δz は副貯水池と同様の1mとした。

3. 境界条件の設定

(1) 流入条件

流入量は、ダム貯水位と放流量から推定されるダム流入量のほか、白石川(関地点)と横川(萩崎地点)のそれぞれで計測されている。そこで、貯水池上流端からの流入量は、これら2河川の合計流量を与えた。

流入水温は、図-2に示した2地点(関地点、萩崎地点)における1時間間隔の測定値を用いた。ただし、全対象期間の測定ではないため、欠測期間については、ダムサイト地点で観測された日平均気温との相関式を作成し、推定した値を用いた。この場合は日平均水温を求めて与えることになる。推定式は、決定係数の大きいものを考慮した。その結果、両河川とも、当日の日平均気温および前3日間の平均気温の重相関式を作成して用いた。相関式の決定係数は、白石川0.932、横川0.908であった。両河川は貯水池流入直前で合流しているため、計算には、両者の流量比で重み付け平均した水温を与えた。

(2)気象条件

式(1)の水面における熱収支（長波放射 ϕ_e 、潜熱・顕熱 $\phi_e+\phi_o$ ）を求めるために、気象条件として気温、湿度、風速、日射量、雲量が必要となる。七ヶ宿ダムでは、ダムサイト左岸側のダム管理所において、気温、湿度、風向風速、日射量が計測されているので、これらの日平均値を用いて与えた。雲量は、ダム地点よりもっとも近傍の気象観測地点である福島気象台の観測値を用いた。なおダム管理所のデータに欠測があった場合は、福島気象台またはアメダス（白石観測所）のデータを用いた。

(3)水面の風応力

既存の貯水池の水理モデルでは、湖水流動の起動力として重要な吹送流の影響を考慮するため、鉛直2次元モデル¹³⁾、3次元モデル^{8), 11)}とも、風応力を考慮しているものは多い。一方で水温成層の季節的な変動を解析する場合には、湖面風の影響が大きい（風自体が平均的に強くない）ことも多い。その場合、鉛直方向の渦動粘性係数の値をRichardson数の関数¹⁴⁾などにより経験的に与えるパラメータに丸め込んで考慮することもある。

本研究の対象貯水池では、図-6に示したように風速の年周期変動が顕著である。ただし、風速が大きいのは、主として循環期である冬季であるので、水温成層の構造にはあまり影響を及ぼさないとと思われるかもしれない。しかし、この時期は成層強度が微弱で、浅い水深に躍層が存在する時期であるため、かえって風による混合が生じやすいことも予想される。そのため、風速の季節変化が、水温成層の発達過程に影響を及ぼす可能性が高い。

そこで、本研究では梅田ら⁷⁾に倣い、水面での風応力 τ_s の条件及び乱れエネルギー k の生成条件を次式により求めた。そして、ダム主流軸方向流速成分 u 、および k の水面メッシュにおける生成項として、運動方程式および k の輸送方程式に対して考慮した。

$$(v_i + \nu) \frac{\partial u}{\partial z} = (U_*^2)_x \quad (3)$$

$$P_r = \frac{\tau_s^2}{\rho_w^2 \nu_i} = \frac{U_*^4}{\nu_i} \quad (4)$$

ここに、 ν_i は渦動粘性係数、 $(U_*^2)_x$ は、風応力のダム主流軸方向成分、 $P_r=k$ の生成項である。また風応力の絶対値は、次の式から求めた。

$$\rho_w U_*^2 = C_D \rho_a U_{10}^2 \quad (5)$$

ここに、 U_{10} =10m 高風速[m/s]、 C_D =水面の抵抗係数である。ここでは、ダム管理所（図-1の▲地点）で計測されている観測記録に基づいて与えた。また ρ_a は空気の密度[kg/m³]、 ρ_w は水の密度[kg/m³]である。抵抗係数 C_D の値については、これまでに種々の値が提案されている¹⁵⁾。本研究では風速の関数としている Wu ¹⁶⁾の式を採用した。

$$C_D = 0.5 \times 10^{-3} U_{10}^{0.5} \quad (6)$$

なお、梅田ら⁷⁾の検討は3次元解析であったのに対し、本研究は鉛直二次元解析である。そのため、風応力の貯水池横断方向成分については、無視することになる。し

かし対象貯水池には、北西から西北西の風、つまり貯水池の上流から流下方向に吹き下ろす風が吹く頻度が非常に高いという特徴がある（図-7参照）。したがって、この貯水池は風向（風応力）についても、鉛直二次元の考え方が比較的うまく適用できる対象と考えられる。

(4)取水口付近の流動層厚と流速分布

水温（密度）成層が形成されている貯水池から取水をすると、一般に取水口の深さ幅よりも広い範囲に取水流動層が形成される¹⁷⁾。この流動層の厚さと層内の流速分布が、貯水池内の水温成層の低下や混合に影響を及ぼしていることが予想される。前章で概略を述べた既往の解析モデルでは、この影響を考慮せずに放流口における流速を与えていた。本研究では、放流（下流端）境界条件として流動層の影響を加味した。

流動層の層厚と流速分布は、既往の研究成果から、つぎのようにモデル化される。流動層厚 η [m]は、選択取水数 G を用いて次式のように表される¹⁷⁾。

$$\eta = \left(\frac{Q}{G\theta\sqrt{g\delta_z}} \right) \quad (7)$$

ここに、 Q =流量[m³/s]、 g =重力加速度[m/s²]、 θ =取水口の開口角（有効流入角）[rad]である。本貯水池では、実際の取水設備形状から上水取水設備を 2π とし、それ以外（常用・非常用洪水吐、利水放流施設）を $\pi/2$ とした。また δ_z =密度勾配であり、取水口（流出点）の密度を ρ_o 、流出点から z [m]離れた位置の密度を ρ_z としたとき、

$$\delta_z = (\rho_o - \rho_z) / (\rho_o z) \quad (8)$$

で表される。なお、選択取水数 G の値は、表層取水の場合には0.324、中層取水の場合には0.134という値が実験的に得られている¹⁸⁾。さらに堀田ら¹⁹⁾と同様、高須・宮脇²⁰⁾などの実験結果に基づく取水塔の形状（ピア一の張り出し）を考慮した補正を行った。実験¹³⁾では、張り出し長 P と取水幅 L の比 (P/L) が大きくなるにつれ、流動層厚が大きくなる結果が得られている。七ヶ宿ダムの P/L 値は、非常用洪水吐が0.474、常用洪水吐が0.822である。文献²⁰⁾に示された図から、 $P=0$ の時の流動層厚と当該ダムの P/L に対する流動層厚を読みとり、その倍率（1.16および1.27）を式(7)から得られた流動層厚に乗じた。流動層内の流速分布は、ガウス分布を仮定（例えば文献⁴⁾）し、

$$u(z) = u_{max} \exp \left[-\frac{(z - z_{out})^2}{2(\eta/3.92)^2} \right] \quad (9)$$

で与えることができる。ここに u_{max} =放流流速の最大値、 z =鉛直座標、 z_{out} =放流口の位置（標高）である。なお、ここでは分布全体の95%が流動層内に収まるとして、標準偏差を $\eta/3.92$ で与えている。

成層している貯水池からの取水による流動層の効果は、鉛直一次元モデル⁴⁾では通常考慮されている。一方、鉛直二次元モデルに対しては、考慮されないことが多くな

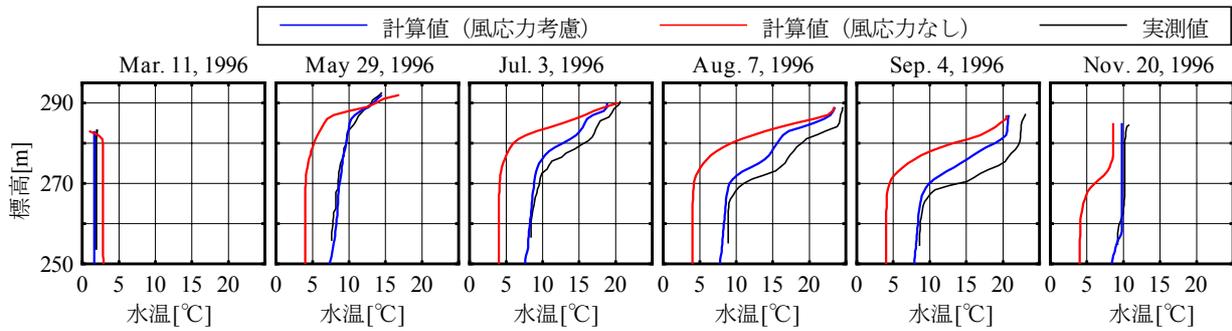


図-8 1996年の貯水池内水温分布の計算結果

ったようである。初期の鉛直二次元モデル^{17),18)}では、運動方程式を直接解いていないため、基本構造は一次元モデルと同様であった。そのため、上述のような選択取水公式等を用いて貯水池内の流動条件を決定する必要があり、流動層の考慮が必須だったと考えられる。

その後、運動方程式を解析するモデルが開発されるようになった^{5),6)}。この時点で、流動層の条件を与えないモデルとなったようである。例えば岩佐ら⁵⁾のように取水口高さ内での静水圧の差から生じる流速分布を与えるような条件設定である。

こうした理由として、運動量の解析をしているので、取水流動層厚を考慮しなくても2次元流速分布が計算結果として得られるようになった⁶⁾ためと推測される。しかし、これは貯水池内の全体的な流動である。通常、水平方向には数百m単位で解析メッシュの幅がとられるのに対し、取水口付近の急変流的な流動の空間スケールは数十mから100m程度である。そのため、筆者らの作成したような非静水圧の流動モデル¹⁰⁾でも考慮することが難しいと考えられる。そのため、鉛直二次元モデルとはいえ、選択取水公式等による流動層の厚さ及び取水口付近の流速分布を考慮する必要があると考えられる。

4. 検証計算の結果

(1) 風応力の効果 (1996年の計算結果)

図-8に1996年を対象とした検証計算結果を示す。計算は、実測値で水温分布の初期条件を与えるよう、水温分布が測定された1996年1月30日から開始した。

本計算モデルで経験的に与える必要があるパラメータは、式(1)、(2)に現れている熱収支(短波放射の受熱)に関連する r, b, κ がある。本研究では、文献⁹⁾を参考に $r=0.06, b=0.5, \kappa=0.5$ を設定した。なお、これらの値は、筆者らがこれまでに実施したいくつかのダムにおける計算でも、適当な値であると確認している。また、潜熱・顕熱項に対して、文献⁹⁾と同様に、定数(0.6)を乗じて熱量の補正を行った。その他のパラメータに $k-\epsilon$ 乱流モデルに関連するものがあり、標準値²³⁾を採用した。

3月11日の時点で、風応力を考慮した計算結果と実測値は、約 2°C で全層一様に混合した状態となっており、よく一致している。それに対し、風応力を考慮しない計

算結果は、水面(EL.283.5m)付近でのみ冷却が進み、弱い逆成層が形成されている。このように、水面風による水面の擾乱を考慮しない場合、冬季の大循環や冷却混合が正しく評価されない可能性があることが、注意点に挙げられる。

成層期に入ってから、風応力の有無により大きな差が生じている。この差の原因は、次の2つがあると考えられる。一つは、上述したとおり、循環期から弱い成層が形成し始めた頃に、全層的な循環が生じることによって熱収支の差が、この時期まで持続しているためである。もう一つの差は、吹送流による躍層の低下である。図-8では、風応力の有無により、7月以降に躍層の位置に差が出ている。

本研究の対象フィールドでは、冬から春にかけて平均的に強い風が吹いている(図-6参照)。図-8の計算結果で示されるように、この風の影響が、冬季の放熱や春季の受熱などの水温成層形成過程に影響していることが分かる。特に、3月、5月の計算結果を見ると、春の受熱期初期に水面で得られた熱が、風による混合により底層まで伝達されるという効果が顕著である。

なお、風応力を考慮した場合でも、実測値と多少の差が生じている。特に、7月から8月にかけては、分布形が類似しているものの、熱収支が合っていないように見える結果となっている。ただし数値計算上は、水温を含むすべての基礎式について、誤差が0.05%以下になることを収束判定条件とし、時間進行している。

(2) 取水口付近の流動層厚と流速分布 (1998年の洪水時の計算結果)

図-9に1998年の洪水発生期間(7月27日から10月15日)の計算結果を示す。図-5で示したように、8月7日の洪水後に徐々に躍層が低下する現象が生じている。これは、通常見られるような、洪水流入時の連行による躍層低下ではないと考えられる。そこで、取水口(洪水吐、利水取水口の全て)について、流動層厚及び層内の流速分布による影響を検討した。

その解析結果が図-9である。8月30日に生じた2つ目の洪水以降、実測値とは徐々に差が開くという誤差がみられるものの、躍層の低下傾向は比較的表现できるようになった。ただし、今回対象としたような、様々の要因がある現地のデータから、再現性をきっちりと評価する

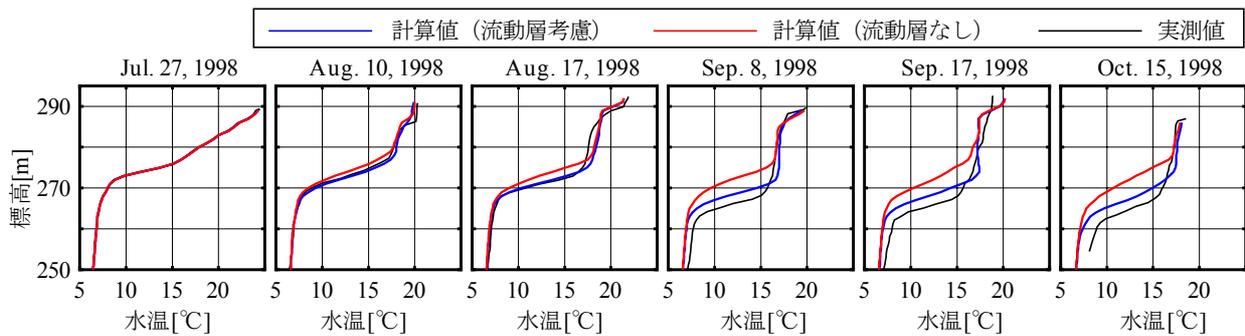


図-9 1998年に生じた洪水期間の貯水池内水温分布の計算結果

ことは難しく、評価方法は今後の課題と考えている。

5. おわりに

本論文では、貯水池の水環境を考慮する際に、最も重要な水理環境要素である水温成層の解析方法について、取りまとめた。本研究で得られた主要な結論は、つぎの2点である。

- 1) 冬季に強風が多発する対象貯水池では、水面風による混合の影響が、成層強度の小さい循環期から受熱期に入る時期の間に生じる。この影響は次の循環期まで継続する。これは、水面における風の作用を考慮することで、再現計算でもある程度表現できた。
- 2) 非静水圧の鉛直二次元モデルによる流動解析を行う場合でも、密度成層からの取水により生じる流動層の影響を境界条件として考慮する必要がある。特に放流量が大きい出水時には流動層厚も拡大するため、躍層低下に対する解析結果に影響する可能性がある。

なお本論文は、セヶ宿貯水池という一現地を対象にした検討である。そのため、設定した条件式やパラメータの汎用性については、より広範な条件での検討も必要であると考えられる。

謝辞：本論文の作成において、国土交通省セヶ宿ダム管理所並びに東京工業大学石川忠晴教授には観測データの提供等便宜を図って頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Oliver, R.L. and Ganf, G.G.: Freshwater Blooms, in "The Ecology of Cyanobacteria" (Ed. Whitton, B.A. and Potts, M.), pp.149-194, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.
- 2) Nagayoshi, G., Umeda, M., Izumi, Y and Okano, M.: A study on the operation of an aeration destratification system as a measure for controlling algal bloom and musty odors, *International Conference on Large Dams (ICOLD) Congress*, Barcelona, 2006.
- 3) 柏井条介：ダム貯水池の水温・水質予測の一般化に向けて、*河川*, No.713 (2005-12月号), pp.38-48, 2005.
- 4) Huber, W. C., Harleman, D. R. F. and Ryan, P. J.: Temperature prediction in stratified reservoirs, *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 98, HY4, pp.645-666, 1972.
- 5) 岩佐, 松尾, 遠藤：洪水時における貯水池の成層破壊について、*京大防災研究所年報*, 第20号B-2, pp.259-270, 1977.

- 6) 森北佳昭：貯水池流れと水温・濁度の二次元数値解析モデル、*水理講演会論文集*, 第30巻, pp.521-526, 1987.
- 7) 梅田 信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭 新, 高橋迪夫：セヶ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション、*土木学会論文集*, No.656 / II-52, pp.255-268, 2000.
- 8) Hodges, B.R. et al.: Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake, *Limnol. Oceanogr.* Vol. 45(7), pp.1603-1620, 2000.
- 9) 岩佐義朗編著：数値水理学, 丸善, 1995.
- 10) 梅田 信, 池上 迅, 石川忠晴, 富岡誠司：ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析, *水工学論文集*, 第48巻, pp.1363-1368, 2004.
- 11) 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.
- 12) 鈴木伴征, 石川忠晴, 銭 新, 工藤健太郎, 大作和弘：利根川河口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*, vol.23, pp.624-637, 2000.
- 13) Cole, T.M. and S. A. Wells: "CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged hydrodynamic and water quality model, Version 3.1" *Instruction Report EL-2002-1*, US Army Engineering and Research Development Center, 2002.
- 14) 松尾直規, 山田正人, 宗宮 功：貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係, *水工学論文集*, 第40巻, pp.575-580, 1996.
- 15) 石川忠晴, 鶴谷広一, 富所五郎, 福嶋武彦：湖面に作用する風応力の検討(中間報告)：*水理講演会論文集*, 第30巻, pp.763-768, 1986.
- 16) Wu, J.: Wind stress and surface roughness at air-sea interface, *J. Geophys. Res.*, Vol.74, pp.444-454, 1969.
- 17) 日野幹雄, 大西外明：密度成層流におよぼす point sink の高さの効果, *土木学会論文報告集*, 第163号, pp.39-48, 1969.
- 18) 白砂孝夫, 宮永洋一, 坂田昌弘, 赤崎俊夫：貯水池の水質現象(1), *電力土木*, No.178, pp.79-88, 1982.
- 19) 堀田哲夫, 東海林光, 山下芳浩, 陳 飛勇, 伊藤英夫：選択取水設備の取水性能と水質への影響に関する一考察, *ダム工学*, Vol.15, pp.28-36, 2005.
- 20) 高須修二, 宮脇千晴：選択取水設備の機能比較, *ダム技術*, No.35, pp.15-23, 1989.
- 21) 白砂孝夫, 宮永洋一：貯水池内の濁度の二次元解析, *土木学会年次学術講演会概要集*, Vol.32, 第2部門, 1977.
- 22) 岩佐義朗ほか：貯水池内の水温成層予測法について, *京大防災研究所年報*, 第18号B, pp.565-573, 1975.
- 23) Launder, B. E. and D. B. Spaulding: The numerical computation of turbulent flow, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol.3, pp.269-289, 1974.

(2006. 9. 30 受付)