

洪水流入の影響を考慮した 一次元貯水池流動モデルDYRESMの検討

IMPROVEMENT OF DYRESM IN CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF INFLOW INTO A RESERVOIR

矢島 啓¹・吉川 栄²・稲若孝治³

Hiroshi YAJIMA, Sakae KIKKAWA and Takaharu INAWAKA

¹正会員 博(工) 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 西谷技術コンサルタント株式会社 都市・環境部 (〒682-0025 鳥取県倉吉市八屋354-1)

³非会員 国土交通省 中国地方整備局 殿ダム工事事務所 調査設計課長
(〒680-0151 鳥取県岩美郡国府町宮下1221)

It has become very important to predict water temperature profiles correctly for simulating water quality in a reservoir. A one-dimensional water temperature simulation model called DYRESM, developed by CWR at the University of Western Australia is one of the famous models which is widely used all over the world. However, this original model has been developed for reservoirs with flat hydrographs and low peak discharges. Consequently, we cannot apply this model to Japanese reservoirs, which are characterized by sharp hydrographs and high peak discharges. Therefore we improved the model in its layer mixing scheme by considering the high inflow discharge energy characteristic of Japanese reservoirs. The comparison of simulated results with observed data showed that this improvement made progress towards the accuracy of long-term simulations.

Key Words : DYRESM, water temperature, dam reservoir, inflow dynamics, layer mixing.

1. はじめに

ダム貯水池における冷水, 長期濁水化および富栄養化の問題に対応するため, 観測による現象の把握とともに様々な数値解析モデルの開発・改良が行われてきた。貯水池の水質予測計算モデルは, 大きく分けてボックスモデル, 1次元モデル, 2次元モデル, 3次元モデルの4つに分類できる。ボックスモデルは, 湖水の混合が十分期待できるときに湖を一つのボックス (あるいは連結したボックス) として取り扱い, マクロ的な水質予測を行うものである。1次元モデルは, 貯水池内の水平方向の一樣性が認められる場合, 貯水池を鉛直方向の層に分割し, 長期的かつ平均的な水質変化を把握するものである。この種の計算モデルとしてMITモデル¹⁾が有名である。2次元モデルは, 貯水池を鉛直・縦断方向に分割し, 長期的な水質かつ貯水池の縦断的な水質変化を解析できる。3次元モデルは, 貯水池を鉛直・縦断・横断方向に区切り, 貯水池内のあらゆる地点における水質を3次元的に評価することができる。現在, この3次元モデルによる研究²⁾が盛んとなっている。しかしながら, 現時点での3次元モデルは計算負荷の観点から, 数週間程度まで

の計算にとどまっており, ダム貯水池における環境予測評価のように10年程度の計算が要求される場合には, 1次元あるいは2次元モデルが使用される。この時, 計算モデルの次元が上がるほど計算精度が高くなるように思えるが, 貯水池形状やモデルパラメータに関して得られる情報等を十分考慮しないと, 1次元より2次元モデルの予測精度が悪くなる可能性もある。

本研究では, 貯水池における選択取水設備等の運用計画を策定する上で, 様々な想定ケースに基づいた長期間の計算を短時間に精度良く行うことができる水質予測モデルの開発を目指している。そのため, 計算時間の観点から, 1次元モデルが有利であると考えられる。世界的に適用実績がある1次元水質予測モデルとして, 西オーストラリア大学Centre for Water Research (CWR)で開発されたDYRESM (DYnamic REservoir Simulation Model) が挙げられる³⁾。このモデルは, 20年以上も前に開発され, 現在も精力的に改良が行われている。DYRESMは, 同じくCWRで開発された水圏生態系モデルCAEDYMを併用することで, 貯水池の長期的な生態系を含んだ水質解析が可能である。しかしながら, このDYRESMは道奥らが指摘しているように⁴⁾, 洪水時の流入密度流による

鉛直混合過程が考慮されていないため、日本のようにハイドログラフが先鋭で大きなピーク流量特性をもつ流入河川がある貯水池では、水温を正確に予測することができない。そこで、この現象をモデル化した変更をオリジナルのDYRESMコードに加えることにより、長期の貯水池における水質予測計算を、短時間で精度良く行うことを目指す。

2. 流動モデルDYRESMの適用に関する検討

(1) DYRESMの概要

DYRESMは、貯水池内は、水平方向より鉛直方向の変化が支配的であり、水平方向の各層は同じ性質を持っているという仮定にもとづいている。また、計算における各層の厚さは一定ではなく、水温勾配や、流入・流出に伴う貯水池内水塊の増減に応じて、層厚が適宜、拡大・縮小、生成・消滅するラグランジェ型のモデルである。そのため、不要な細かい離散化を必要としない点で優れている⁵⁾。

DYRESMでは、風による水表面でのせん断力、不安定成層の解消、各層の流速差によるせん断力の3つのメカニズムにより表層からの鉛直混合が行われる。また、深水層での内部混合は、Lake数の関数として表現される。さらに、貯水池内への洪水流入は、過去の観測からパラメータの同定を行った連行現象としてモデル化されている。これらの詳細は、ユーザーマニュアル及びサイエンスマニュアルとして、CWRのウェブサイトにて公開されている⁶⁾。なお、本モデルでは、水温に伴う密度変化のみを対象とし、濁質による影響は考慮していない。

(2) 河川流入による鉛直混合過程のモデル化

本研究では、洪水時の時間変動をより精度良く再現するため、境界条件として与える流入出力の入力時間間隔を日単位から時間単位に変更するとともに、河川流入による流速を簡易的に算定し、オリジナルのDYRESMで考慮されていない流入密度流による鉛直混合過程をモデル化する。以下にDYRESMの基礎式を示すとともに、本研究における改良点を述べる。

a) 表層混合過程

1次元貯水池水理解析モデルの多くは、鉛直方向の混合拡散効果をモデル化する場合、リチャードソン数の関数として渦動拡散係数を評価することが一般的である⁷⁾。DYRESMにおける鉛直混合過程は、エネルギー保存則に基づいた乱流モデルが適用され、隣接する2層を混合するために必要なエネルギー $E^{(req)}$ と、2層を混合するのに利用できるエネルギー $E^{(avail)}$ （オリジナルモデルでは、風応力によるエネルギーのみ考慮）を比較し、 $E^{(avail)} > E^{(req)}$ となる場合に表層から順に2層を混合する。本研究では、図-1に示すように、オリジナルモデルで表される

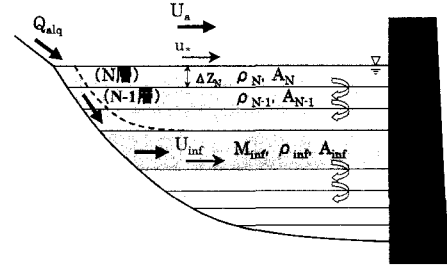


図-1 河川流入による鉛直混合のモデル化

式(2)の右辺第1項の風応力による鉛直混合エネルギー E_{wind} に加えて、右辺第2項に示す河川流入による鉛直混合エネルギー E_{inf} を組み込む改良を行った。

各エネルギーは、それぞれ次のように表されている。

$$E_i^{(req)} \begin{cases} = \eta_k \Delta K_i + \eta_p \Delta P_i & (\Delta P < 0) \\ = \eta_k \Delta K_i + \Delta P_i & (\Delta P \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$E^{(avail)} = \underbrace{\eta_s \rho_N A_N u_*^3 \Delta t}_{E_{wind}} + \underbrace{1/2 \cdot C_{mf} M_{inf} U_{inf}^2}_{E_{mf}} \quad (2)$$

$$\Delta P = g \{ (M_i + M_{i-1}) \zeta_{i-1} - (M_i \zeta_i + M_{i-1} \zeta_{i-1}) \} \quad (3)$$

$$\Delta K = -\frac{1}{2} \frac{M_i M_{i-1}}{M_i + M_{i-1}} (U_i - U_{i-1})^2 \quad (4)$$

ここで、 ΔP : 2層混合後のポテンシャルエネルギーの変化量、 ΔK : 2層混合後の運動エネルギーの変化量、 η_p : ポテンシャルエネルギーの効率係数、 η_k : 運動エネルギーの効率係数、 η_s : 風応力の水面摩擦係数、 ρ_N : 表層の密度、 A_N : 水表面積、 u_* : 風の摩擦速度、 Δt : 計算時間間隔、 C_{mf} : 河川流入による鉛直混合エネルギーの効率係数、 M_{inf} : 河川流入水の質量、 U_{inf} : 河川流入水の流速、 g : 重力加速度、 M_i : 第*i*層の質量、 ζ_i : 第*i*層の質量重心高、 U_i : 第*i*層の流速である。なお、 U_{inf} の算定については、簡易的に連続式を用いて与える。

$$U_{inf} = Q_{alq} / A = Q_{alq} / Bh \quad (5)$$

ここで、 Q_{alq} : 毎秒あたりの流入量(表層密度流では河川流入量を用い、下層密度流では河川流入量に式(11)で示す連行にともなう増加量 ΔQ_{alq} を加えた値の Q_{alq}' を用いる)、 A : 流下断面積、 B : 流下幅、 h : 流入密度流の層厚である。ただし、流下幅 B については、道奥ら⁴⁾による1次元モデルにおける湖盆地形の評価法を用い、式(6)により与える。

$$B = \sqrt{2B_s/L_s} \sqrt{A_N} \quad (6)$$

ここで、 B_s : ダム堤頂長、 L_s : 常時満水位の流下方向の貯水池長である。また、流入密度流の層厚 h の算定において、表層密度流の場合は、高野ら⁸⁾の理論を用いて式(7)で与え、下層密度流の場合は、Imbergerら³⁾の理論を基に式(8)による潜入後の連行による影響を考慮した水平貫入点での密度流の厚さを用いた。

$$h = \sqrt{\frac{2kqK_H}{\pi gb} \left(\frac{\rho_s}{\Delta \rho} \right)} \quad (7)$$

$$h = 1.2E \cdot s + h_0 \quad (8)$$

$$h_0 = \{(2Q_{alq}^2 R_m) / (g' \tan^2 \alpha)\}^{1/5} \quad (9)$$

$$g' = g(\rho_{mf} - \rho_N) / \rho_{mf} \quad (10)$$

$$\Delta Q_{alq} = Q_{alq} \{(h / h_0)^5 - 1\} \quad (11)$$

ここで、 k ：定数(=5/4)， q ：単位幅当りの流入量， K_H ：水平渦動粘性係数， b ：河川幅の1/2， ρ_s ：貯水池最深部の密度， $\Delta\rho$ ：貯水池最深部と流入水の密度差， ρ_{mf} ：流入水の密度， h_0 ：潜入点での密度流の厚さ， α ：河川断面を三角形と仮定した時の中心角の1/2， s ：表層からの傾斜距離， E ：連行係数， R_m ：バルクリチャードソン数である。 E と R_m は、それぞれ式(12)，(13)により表される。

$$E = (C_k C_D^{3/2} + C_s) / \{R_m + 10(C_k C_D^{3/2} + C_s)\} \quad (12)$$

$$R_m = (4E + 5C_D / \sin \alpha) / (5 \tan \phi - 8/3E) \quad (13)$$

ここで、 C_k ， C_s ：形状係数(=2.2， $=1 \times 10^{-4}$)， C_D ：河床の摩擦係数， ϕ ：河床勾配である。

また、流入密度流の貫入層においては、その下層との流速差に起因する鉛直混合過程をモデル化するため、式(4)における ΔK の算定に用いる U_i に式(5)で推定した U_{mf} を加えるよう変更した。

b) 深水域における混合過程

水温躍層下の深水域における乱流拡散による内部混合は、貯水池底部から躍層界面に向かって、次のように計算される。

$$v_{IMi} = f v_i \quad (14)$$

ここで、 v_{IM} ：第 i 層から第 $i+1$ 層に移動するボリューム， f ：混合係数， v_i ：第 i 層の体積である。 f は次のように表される。

$$f = \frac{200 N_i^2 K_M \Delta t}{L_N N_{MAX}^2 \{(\delta_i + \delta_{i+1}) / 2\}^2} \quad (15)$$

ここで、 N_i ：第 i 層のバラントバイサラ振動数， K_M ：熱の拡散係数， N_{MAX} ：バラントバイサラ振動数の最大値， δ_i ：第 i 層の厚さ， L_N ：Lake数である。

本研究において、式(15)に用いるパラメータ L_N の算定では、流入密度流による影響を考慮するため、式(16)の右辺の分母第2項をオリジナルの式に追加した。

$$L_N = \frac{(z_g - z_0) M g (1 - z_T / z)}{A_N^{3/2} (1 - z_g / z) \rho_0 u_*^2 + A_N^{1/2} (z_g - z_{mf}) \rho_{mf} Q_{alq} U_{mf}} \quad (16)$$

ここで、 z_g ：貯水池水体の体積重心高， z_0 ：貯水池水体の質量重心高， M ：貯水池水体の質量， z_T ：水温躍層高， z ：貯水池の水深， ρ_0 ：基準密度， z_{mf} ：流入水の重心高である。

3. 土師ダム貯水池における検証計算

(1) 土師ダム貯水池の概要

本研究で対象とする土師ダムは、広島県の北部に位置

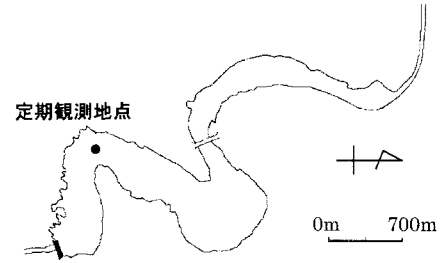


図-2 土師ダム貯水池の平面図

する堤高約50m，堤長約300m，総貯水量4700万 m^3 の規模を有する多目的ダムである。洪水調節，灌漑用水の補給，都市用水の供給並びに発電を目的とし，昭和49年に完成した。図-2に土師ダム貯水池の平面図を示す。流域面積は307.5 km^2 ，湛水面積は2.8 km^2 の中規模な貯水池である。水深はダムサイト付近で約25mと比較的浅く，湖盆地形は縦断方向に約6km，横断方向に約350mの河川型で蛇行形状を有している。放流設備としてクレストゲート，オリフィスゲートがあり，取水設備として発電用取水口，選択取水設備が設置されている。選択取水設備からの取水は，通常表層取水(水面下2～5m)を原則としている。

土師ダム貯水池では，ダム管理開始後から河川流入部，ダム湖心(上層，中層，下層)にて月に1回の定期観測が実施されている。モデルの検証にはこの観測値を用いた。

(2) 検証計算対象年の選定

検証計算は，ダム管理開始後における「渇水年」と「洪水年」を対象に行い，各年で変動する気象条件や流況に対して水温分布の再現性を検討する。本研究においては，渇水年として1994年，洪水年として1997年(300 m^3/s 程度の中規模洪水が4回)，1999年(1,000 m^3/s 程度の大規模洪水が1回)の出水形態の異なる3年を選定した。図-3に各年における土師ダムの日流入量と平均貯水容量に対するその割合を示す。

この図から，1997年の中規模の洪水においては，日流入量が平均貯水容量の60%以上にも達している。また，1999年6月末の大規模洪水においては，日流入量が平均貯水容量の160%程度に達していることが分かる。従って，中規模以上の洪水が発生するときには，貯水池内の水温成層は容易に破壊される可能性が高いと考えられる。

(3) 検証計算条件の検討

検証計算に必要な気象データ(気温，日射量，雲量，湿度，風速)は，基本的に土師ダム管理所において観測されたデータを用いるものとする。ただし，観測項目として不足するもの及び検証の対象年によっては観測されていないデータについては，近傍の広島地方気象台(土師ダムの南約35km)の観測値を適宜補正して土師ダムにおけるデータに変換し計算に用いた。

まず，各年において土師ダムゲート操作記録に記載さ

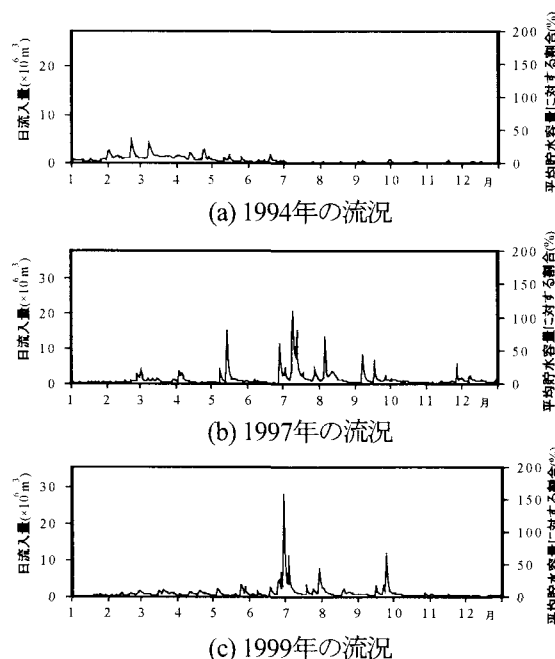


図-3 日流入量と平均貯水容量に対する割合

れている流入量を用いて予備的な計算を行ったところ、1年間の計算後には、計算による貯水位が実測より3～4m低くなった。そこで、次式(17)による流入量の逆推定を行った。ただし、蒸発量は予備計算で得られた結果を用いた。

$$(\text{流入量}) = (\text{貯水量変動量}) + (\text{流出量}) - (\text{降水量}) + (\text{蒸発量}) \quad (17)$$

流入水温については、土師ダム流入地点で毎月1回実施されている水質調査結果の水温と土師ダムでの気温(1994・1997年は推定値)の各3日の日平均(当日、前日、前々日)の回帰式より推定した。また、計算初期値については、毎月1回の定期観測データのうち、各年の1月の観測値を、1月1日0時の値として用いた。なお、計算における最小層厚は0.5m、最大層厚は2.0mとし、計算時間間隔を1時間とした。

(4) 改良DYRESMIによる検証計算結果

検証計算は、選定した3年を対象にオリジナルモデル(河川流入による鉛直混合を考慮しない場合)と改良モデル(河川流入による鉛直混合を考慮した場合)のそれぞれで行った。図-4にオリジナルモデルと改良モデルによる水温鉛直分布の計算結果と観測値を比較したものを示す。また、図-5には、計算に用いる入力データの実測値が充実していた1999年の水温分布の季節変化を示す。

図-4(a)～(c)に示すように1994年については、点線で表されるオリジナルモデルと実線で表される改良モデルを比較すると、10月を除いてあまり相違はみられない。これは、今回の改良は洪水流入による影響をモデル化したため、1994年のような渇水年では、その違いがほとんど表れないためである。季節的な変動をみると、オリジナ

ルモデル・改良モデルともに、受熱期となる6月から10月の水温成層形成時における水温分布の様子、その後、冬季にかけて水温が再び鉛直方向に一樣となっていく様子も再現できている。1997年については、オリジナルモデルの場合、5月下旬の下層において8℃程観測値に比べ計算結果が低く、また、夏季においては10℃以上低い値となっている。これに対して改良モデルでは、5月・6月の下層で2～3℃の差異が認められるが、6月末から8月にかけての中規模洪水時の洪水流入による鉛直混合エネルギーの働きで、深層水の混合及び下層での水温上昇が起こり、その結果、精度良く水温分布が再現できている。1999年については、オリジナルモデルの場合、6月末の洪水前までは比較的再現できているが、その後は1997年同様、下層の計算結果の値が10℃以上低く、再現性が劣っていた。また、オリジナルモデルでは、図-5(a)に示すように、洪水後も水温躍層が維持されているが、改良モデルでは、同図(b)に示すように、6月末の大規模洪水時の鉛直混合により水温躍層が破壊される様子が良く再現できている。

以上のように、改良モデルにおいては、検証対象年とした3年を通じて、河川流入による鉛直混合エネルギーを考慮することにより貯水池内の水温予測精度が大きく向上していることが明らかとなった。

4. 河川流入が鉛直混合過程に与える影響

(1) 洪水流入による鉛直混合エネルギーの相対評価

河川流入が鉛直混合過程に与える影響を検討するため、 E_{wind} と本研究で組み込んだ E_{mf} を比較した結果を図-6に示す。この図より、計算を行った3年を通じて平水時には E_{wind} が卓越していることが分かる。渇水年である1994年では、通年で E_{wind} が E_{mf} に比して大きく、河川流入が貯水池内に与える影響が小さいことが分かる。洪水年である1997年及び1999年は、洪水時の E_{mf} が著しく増大している。1997年の中規模洪水時(5月14日、6月28日、7月9日、8月5日)には、 E_{wind} の年平均値約 $6 \times 10^5 \text{ J}$ に対して約30倍以上に相当する $1.8 \sim 3.9 \times 10^7 \text{ J}$ 程度のエネルギーが発生し、貯水池内の鉛直混合を促していると考えられる。また、1999年6月末の大規模洪水においては、約 $1.2 \times 10^8 \text{ J}$ の膨大な E_{mf} となっており、これは年間の総鉛直混合エネルギーの約30%に相当する。

このように、洪水時に貯水池内で発生する鉛直混合エネルギーは、平水時において支配的な風応力に比べ非常に大きく、貯水池内の水温を再現するのに欠くことのできない要素であると考えられる。

(2) 洪水特性・風況が鉛直混合エネルギーに与える影響

ここでは、1999年6月末の大規模洪水時のハイドログラフをもとに、洪水特性や風況が鉛直混合エネルギーに

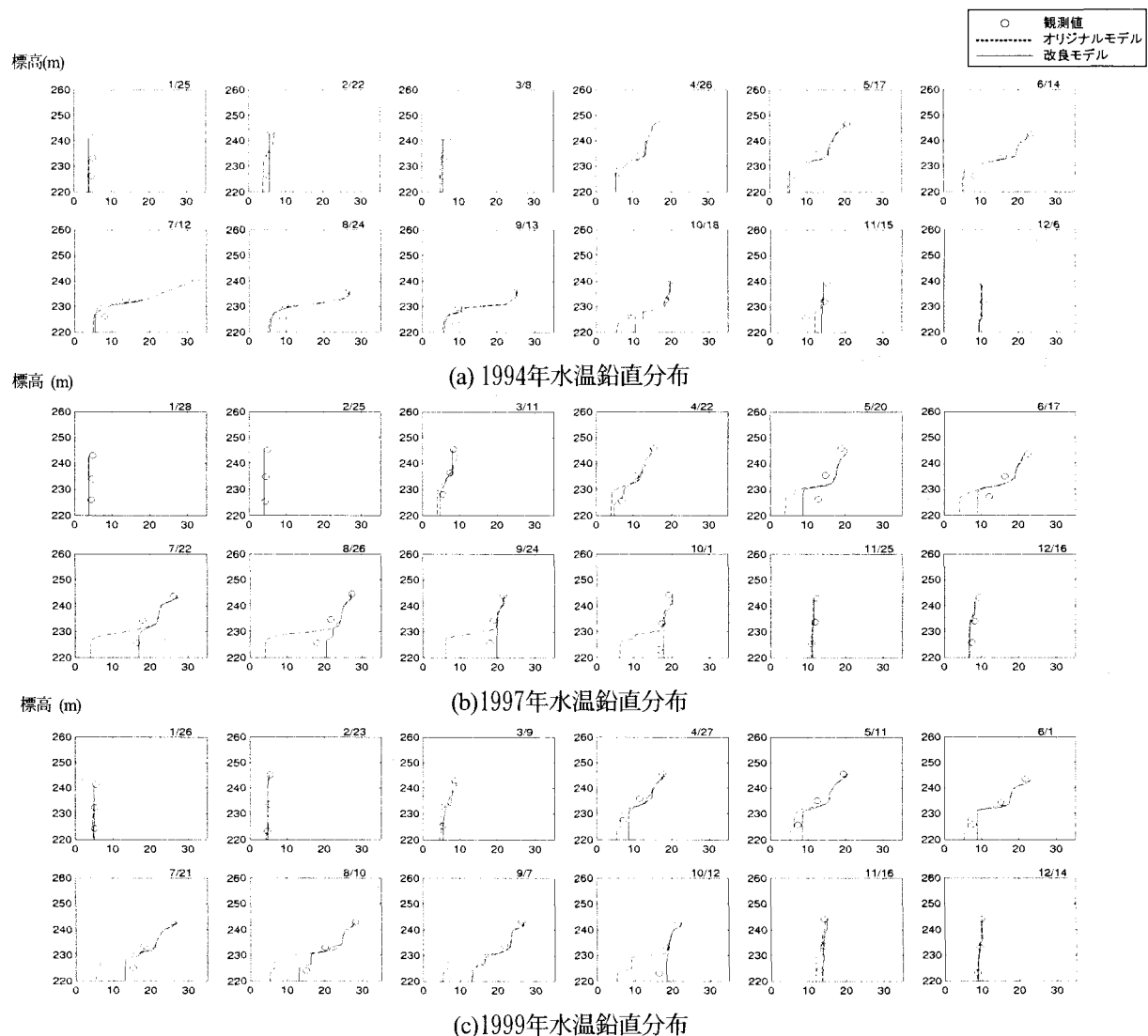


図-4 計算結果と観測値による水温鉛直分布の比較

与える影響を評価する。

まず、洪水特性の影響を調べるために、6月29日から6月30日の2日間の実績流量（ピーク流量は $1007.9\text{m}^3/\text{s}$ 、平均流量は $219.0\text{m}^3/\text{s}$ ）を基本とし、実績流量の1/2、実績流量の1/5と流入量を変化させるケースを設定し、また、それらの流量を日平均した値で平坦化するケースも設定する。さらに、風況による影響を調べるために、 5m/s と 10m/s の一定風速を与えるケースを設定した。計算の初期値には、検証計算による洪水時直前の値を用い、放流・取水量は実績流量を基本とし、洪水流量を減じるときには、それらも同じ割合で減じて使用した。

計算を行った各ケースの計算条件及び鉛直混合エネルギーに関する計算結果を表-1に示す。ここで示す各鉛直混合エネルギーは、計算期間(2日間)の合計値である。表-1において風速が等しくても E_{wind} に差が生じている。これは、ケースごとに貯水池への流入・流出量に差があるため、水表面積が変化し、風によるせん断応力が変化するからである。

Case 1の結果をみると、大規模な出水時には、洪水流

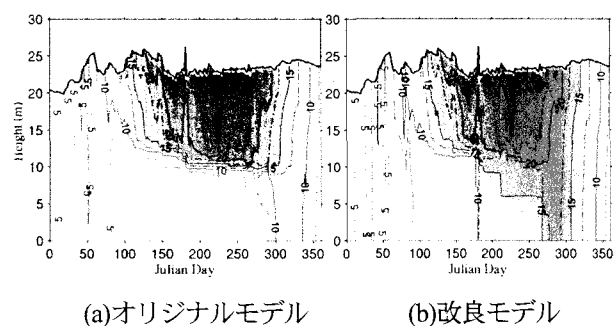
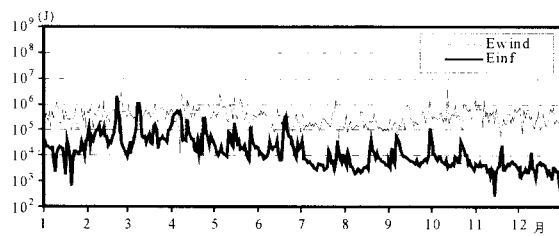
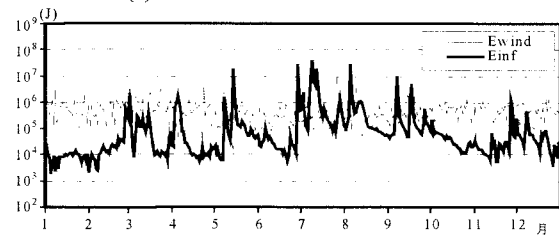


図-5 1999年の水温再現結果

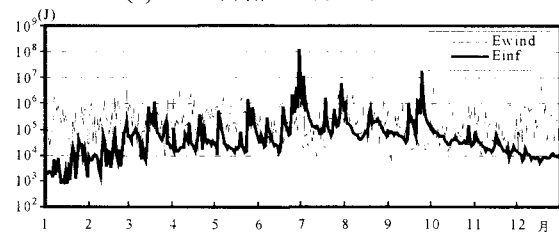
入による鉛直混合エネルギーが風速 5m/s による鉛直混合エネルギーの20.6倍と計算上無視のできない巨大なエネルギーを生成している。また、風速 10m/s の強風が2日継続したCase 7の場合でも1.61倍となり、洪水流入の影響が大きいことは明らかである。一方、オリジナルのDYRESMでは日流量を計算条件として用いているが、Case 1～3とそれに対応したCase 4～6を比較すると、流量規模にかかわらず、日流量を用いた E_{avg} が実績洪水波形に対して半分程度のエネルギーの評価となることが分



(a) 1994年鉛直混合エネルギー



(b) 1997年鉛直混合エネルギー



(c) 1999年鉛直混合エネルギー

図-6 貯水池内の鉛直混合エネルギー

かる。

以上のことから、日本のような洪水流出特性を持つ流入河川がある貯水池にDYRESMを適用するときには、洪水流入による鉛直混合エネルギーを算定しなければ、正確に水温を予測することができなく、その算定には、日流量ではなく時間流量データを用いる必要があることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究では、1次元貯水池流動モデルDYRESMに河川流入による鉛直混合過程を導入し、土師ダム貯水池において出水形態の異なる3年を対象に水温再現の検証計算を実施した。特に、鉛直混合エネルギーの評価という点から、モデル改良効果を検討した。ここで得られた成果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 日本のように比較的貯水容量が小さく、先鋭な流出特性を持つ流入河川がある貯水池においては、従来、DYRESMに考慮されていなかった河川流入による鉛直混合拡散効果をモデル化した場合に精度良く長期間の水温分布を再現できる。また、このとき出水形態にかかわらず、同一パラメータで計算を行うことができる。
- 2) 洪水流入による鉛直混合エネルギーが成層破壊に及ぼす影響は大きく、精度の高い水温予測には、時間流量を用いて鉛直混合エネルギーを評価する必要がある。

また、今後の課題として、次のようなことがあげられ

表-1 洪水時の鉛直混合エネルギーの比較

Case	ハイドログラフ		風速 (m/s)	E_{inf} ($\times 10^6$ J)	E_{wind} ($\times 10^6$ J)	$\frac{E_{inf}}{E_{wind}}$
	洪水 波形	流量				
1	実績	実績	5	116.7	5.7	20.58
2	〃	1/2	〃	32.4	5.0	6.46
3	〃	1/5	〃	4.7	4.7	1.01
4	一定	実績	〃	60.1	6.1	9.88
5	〃	1/2	〃	14.9	5.2	2.85
6	〃	1/5	〃	2.5	4.8	0.53
7	実績	実績	10	103.2	64.1	1.61
8	〃	1/2	〃	26.2	56.7	0.46
9	〃	1/5	〃	3.9	52.7	0.07

る。すなわち、本研究における洪水時の貯水池内挙動のモデル化には、簡易的に評価する流速を使用しているため、実現象と比べて妥当であるか判断ができない。今後は、他ダムにおける再現計算も行い、その結果からDYRESMの再現性・有効性について検討し、モデル化の妥当性について論じたいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省中国地方整備局土師ダム管理所には、多大な便宜を図って頂いた。また、本研究で用いたDYRESMの改良については、西オーストラリア大学Imberger教授、Imerito氏を始めとするCWRの諸氏と討議するとともに、数々の有益なご助言を賜った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Huber, W.C., D.R.F. Harleman and D.J.Ryan : Temperature Prediction in stratified reservoirs, Proc. ASCE, vol.98, HY-4, pp.645-666, 1972.
- 2) 例えば、梅田信、横山勝英、石川忠晴、銭新、高橋迪夫:セケ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に冠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.
- 3) Imberger, J. and Patterson, J.C. : A dynamic reservoir simulation model-DYRESM, Transport Models for Inland and Coastal Waters, Ed.H.B.Fischer, Academic Press, pp.310-361, 1981.
- 4) 道奥康治、松尾昌和、香川健一、斉藤敦:貯水池の富栄養化にともなう熱塩成層のモデル化, 水工学論文集, 第47巻, pp.1237-1242, 2003.
- 5) 道奥康治:閉鎖性水域の環境水工学の歩みと展望, 水工学に関する夏期研修会講義集Aコース, 2002.
- 6) <http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin/model/dyresm1d/index.html>
- 7) 矢島啓、道上正規、檜谷治、宇田康弘:浅い汽水湖における密度成層破壊の数値解析, 水工学論文集, 第44巻, pp.993-998, 2000.
- 8) 宇野木早苗:沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.420-421, 2001.

(2004.9.30 受付)