ダム貯水池の洪水時放流操作による濁質挙動への影響

EFFECT OF FLOOD OUTLET OPERATION OF A DAM ON BEHAVOIR OF SUSPENDED SEDIMENT IN THE RESERVOIR

柴田光彦¹·梅田信²·田中仁³

Mitsuhiko SHIBATA, Makoto UMEDA, Hitoshi TANAKA

¹ 学生会員 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
 ² 正会員 博(工) 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
 ³ フェロー会員 工博 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

Most of water quality problems in reservoirs are associated with inflow load from the watershed during flood events. One of these problems is long duration of high turbidity. In recent years, several trials of flexible dam operation for environmental improvement have been made. In this study, we tried to evaluate effects of changing flood water outlet operation for discharging inflow load, especially first flush, efficiently. For this purpose, a numerical model combined with a reservoir hydrodynamic and particle tracking model was developed, and this model was verified through comparison with field data during flood. Effect of dam operation changes were evaluated in terms of sediment particle discharge ratio by using the model and it was observed early discharge had an effect to some extent.

Key Words: dam operation, numerical simulation, fine suspended sediment

1.はじめに

ダム貯水池の水質は,洪水時に多量の負荷(濁質及 び栄養塩)が流入することによって,大きな影響を受 けることが多い.濁水長期化や富栄養化現象などが, 典型的なものである.これらの問題への対策等につい ては,かなり以前(例えば文献^{1),2}など)から近年(文 献³⁾⁻⁶⁾など)まで,様々な視点から検討がなされてき た.濁水・富栄養化現象の対策には,種々のものがあ るが,湖内対策としては,貯水池内の流動制御による ものが有力とされている.例えば,選択取水設備⁵⁾⁶⁰ や曝気循環施設²⁾⁴⁾が挙げられる.このような水質保全 施設は,現在では多くのダムに設置され,適切な運用 を行うことにより,一定の効果が上がっているようで ある⁷⁾.しかし,このような湖内対策のみで完全に解 決することが難しいのも事実であろう.これは,水を 貯留するというダムの機能の裏返しであるとも言える.

一方,ダムの貯水運用をより柔軟に行って水質保全 を行おうという試みもなされている.例えば,貯水池 の水位低下(いわゆる干し上げ)^{8,9}が挙げられる.こ れは,利水(かんがい)の必要性が小さい冬季に,ダ ムの水位を低下し湖底(底泥)を干し上げて,アオコ を抑制する手法である.この場合,ある程度の長期間 にわたって水位を低下させ,底泥を空気や日光にさら しておかないと効果が小さいと考えられるため,数ヶ 月に渡る比較的長期的な貯水池運用に基づく水質対策 と言える.

しかし,冒頭に述べたような洪水時の水質への影響 については,運用を変更して貯水池の環境保全を考慮 するという検討は、ほとんどなされていない。例えば, 微細土砂の補足率に対する洪水流量のカット率を変化 したときの影響を調べたもの¹⁰など,堆砂対策を主と して見られる程度である.洪水時には,治水が最優先 されるという当然の事情があるからである.しかし, 従来行われてきた降雨予測情報をダム操作に活用する ^{11),12}という発想から,さらに,洪水時の放流操作を変 更して,洪水時および洪水後の水質改善に活かせない かと検討した試み¹³も一部に見られる.これらの事例 のように,新たな施設を構築せずに,既存の操作や運 用を見直すことで,環境改善の効果が期待できれば, 事業費を抑えるという点からも望ましいと考えられる.

これらの背景を踏まえ,本研究では,洪水時の放流 操作と流入濁質の排出効率の関係についての検討を行 った.なお,濁質(微細な土砂などの懸濁物質)に着 目したのは,以下のような考えからである.洪水初期 には,都市河川で顕著なファーストフラッシュとして 知られるように,河川や流域に沈殿,堆積していた易



掃流性の物質が一気に放流してくる.貯水池に流入し たこのような濁質をできるだけダムの下流へ排出する ことは,濁水や富栄養化の対策としての効果が期待で きる.これに加え,近年注目される問題に,環境ホル モン¹⁴や薬剤耐性菌¹⁵⁾などが挙げられる.これらは, 河川中に放出されると微細土砂に付着して河道内を移 動していると考えられている.そのため,水源として のダム貯水池を考えた場合,洪水初期の負荷をできる だけ排出する運用が望ましいと考えられる.

本研究では,既往の研究により開発された貯水池内 流動モデル¹⁰と,これに連動したラングランジュ的手 法による濁質挙動解析モデルの開発を行った.そして, この解析モデルを用いて,出水時の放流操作(放流時間 帯の変更)による濁質挙動の特性の違いについて検討 を行なった.

2.対象ダム

本研究では,東北地方に位置する X ダム¹⁷⁾を検討対 象とした.X ダムは流域面積が 172km²,総貯水容量 3.1×10⁷m³の中規模な貯水池である.貯水池の平面図を 図-1 に示す.

このダムにおいて,現地観測が2001年8月22日の 台風通過で生じた洪水時に実施された.観測項目は流 入水(地点 A)の採水・分析及び貯水池内の地点1にお ける水質(水温,濁度)の鉛直分布計測である.

詳細な観測結果は文献¹⁷⁾を参照していただきたいが, ここではシミュレーション上重要な結果のみを示して おく.まず,洪水時流入・放流の時系列の観測結果を 図-2 に示す.これは上から流入水・放流量,流入 SS 濃度・放流 SS 濃度の時系列を示した.発電放流は表 層放流(水面下 2.5m)であり,洪水の際にはオリフィ スゲート(EL.230.0m)より放流されている.流入量及 び放流量は後述する貯水池流動モデルの境界条件に用 いていて,濁質追跡モデルにおいても,粒子の投入の 条件設定の際に流入水の SS 濃度を用いた.なお,図 -2より,本研究の対象洪水はファーストフラッシュが あまり明確に生じていないが,本論文では,洪水初期 の流入負荷をファーストフラッシュとして指示する.

3. 検討方法

- (1) 解析モデルの概要
- a) 貯水池流動モデルの概要

本研究では,流動モデルは梅田ら¹⁶の鉛直2次元モデ ルを用いた.基礎方程式は連続式,ブシネスク近似し た運動方程式,k-e 乱流モデル式,水温と濁度の輸送 方程式からなる:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D(Bu)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{l} B \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} B \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{B\partial p}{\partial x} + \frac{\mathbf{t}_{z}}{n_{s} \cdot n_{y}} \quad (2)$$

$$\frac{D(Bw)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{n}_{L} B \frac{\partial w}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial z} (\mathbf{n}_{eff} B \frac{\partial w}{\partial z}) \quad (3)$$

$$= -\frac{\mathbf{r} B \partial p}{\mathbf{r} \partial z} + Bg \, \mathbf{d} + \frac{\mathbf{t}_{z}}{n_{s} \cdot n_{y}} \quad (3)$$

$$\frac{D(Bk)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{n}_{L} B \frac{\partial k}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial z} (\mathbf{n}_{eff} B \frac{\partial k}{\partial z}) \quad (4)$$

$$= BP_{r} - Bg \, \frac{\mathbf{n}_{eff}}{\mathbf{s}_{l}} \frac{\partial}{\partial z} + B\mathbf{e} + \frac{F_{k}}{n_{s} \cdot n_{y}} \quad (4)$$

$$\frac{D\mathbf{e}}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{n}_{L} B \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\mathbf{n}_{eff}}{\mathbf{s}_{e}} B \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial z})$$

$$= C_{1} B \frac{\mathbf{e}}{k} P_{r} - C_{2} B \frac{\mathbf{e}^{2}}{k} + B \mathbf{e} + \frac{F_{e}}{n_{s} \cdot n_{y}}$$
(5)

$$\frac{D(BT)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} (\boldsymbol{n}_{L} B \frac{\partial T}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial z} (\boldsymbol{n}_{eff} B \frac{\partial T}{\partial z}) = \frac{\boldsymbol{r} \boldsymbol{f}}{\boldsymbol{r} \boldsymbol{C}_{w}}$$
(6)

上記において,

$$P_{r} = v_{t} \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^{2} \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^{2} \right]$$
(7)

$$v_{eff} = v + v_t = v + \frac{C_u k^2}{e}$$
(8)

$$v_L = 0.01(\Delta x)^{\frac{4}{3}}$$
 (9)

$$\boldsymbol{d} = \frac{\boldsymbol{r}_r - \boldsymbol{r}(T)}{\boldsymbol{r}_r} \tag{10}$$

ここで, k: 乱れエネルギー, e: 粘性散逸率, d: 相 対密度差, T: 水温, g: 重力加速度, t_i : i 方面に働く 河床面せん断応力, p: 圧力, n: 動粘性係数, n_i : 鉛直方向の渦動粘性係数, n_L : 水平方向の渦動粘性係 数, Δx : x 軸の空間刻み, $n_s \cdot n_y$: 側岸部に垂直な単 位ベクトル n_s と横断方向の単位ベクトル n_y の内積であ る. また, C_1 , C_2 , C_μ , s_k , s_e は k-e 乱流モデルの標 準値を採用した.

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_m = 0.09, \mathbf{s}_k = 1.0, \mathbf{s}_a = 1.3$$
 (11)

これらの基礎方程式を有限体積法により離散化し,圧力補正は SIMPLE 法により行なっている.

b) 粒子計算モデルの概要

本研究では, 微細な懸濁粒子の挙動を解析するため に, ラグランジュ的な解析モデルを用いた.この理由 は,オイラー的手法に比べて, 濁質挙動の詳細(例え ば, 流入時間帯別の濁質の動き)を把握しやすいから からである.用いたのは, Ross and Sharp les¹⁸⁾の酔歩モ デルを基本としたものである.彼らによる基礎方程式 は次のとおりである.

$$z_{n+1} = z_n + K'_{z}(z_n)\Delta t + w_p\Delta t + R \Big[2K_{z} (z_n + K'_{z}(z_n)\Delta t/2)\Delta t/r \Big]^{\frac{1}{2}}$$
(12)

ここに, z_n : 粒子の鉛直位置, K_z : 鉛直拡散係数, K'_z : $\partial K_z / \partial z$, w_p : 沈降速度, R: 平均0の一様乱数(-1 R 1), r: R の分散, Δt : 時間ステップである.

このように Ross and Sharples¹⁸の検討では,鉛直拡散 と沈降のみを扱ったものである.そこで,本研究モデ ルにおける懸濁粒子の鉛直方向の運動は式(12)に移流 項を加えて,式(13)のように表す.また,水平方向の 式は沈降項を取り除き,移流項を加え,式(14)のよう に表記される.

$$z_{n+1} = z_n + K'_{z}(z_n)\Delta t + (w + w_p)\Delta t + R \Big[2K_{z} (z_n + K'_{z}(z_n)\Delta t/2)\Delta t/r \Big]^{1/2}$$
(13)

$$x_{n+1} = x_n + K'_x(x_n)\Delta t + u\Delta t + R \Big[2K_x(x_n + K'_x(x_n)\Delta t/2)\Delta t/r \Big]^{1/2}$$
(14)

ここに, x_n : 粒子の水平位置, K_x : 水平拡散係数, K'_x : $\partial K_x / \partial x$, w: 鉛直方向の流速, u: 水平方向の 流速である.

式(13)の意味は, Δt 時間後の粒子の変位が乱流拡散 を示す決定論項 $K_z \Delta t$ と乱数項 $R[2k \Delta t / r]^{1/2}$ と沈降項 $w_p \Delta t$ 及び移流項 $w \Delta t$ の和で表現されるとするもの である.本研究では,拡散係数を流動モデル(k-e 乱 流モデル)で求めた渦粘性係数と連動して与えた.拡 散係数が空間的に一様でない場合,拡散係数の空間微 分を含む決定論項と乱流項とで扱う必要があることか ら,Ross and Sharples¹⁸⁾に倣い,式(13),(14)のような表 現を採用した.また,酔歩モデルでは,生成した乱数 の性質が計算結果に大きな影響を及ぼす.また,乱数 生成法に Mersenne Twiste¹⁹⁾を用いた.

c) 計算粒子の濁質としての取り扱い

前節の計算粒子は,個数がSS(濁質)の質量に対応するものとした取り扱いをした.そのため,SS(質量濃度)と粒子(数)の換算は,式(15)のように行なった.

$$C = \frac{k_c \cdot N}{V} \tag{15}$$

ここに, C: SS 濃度, N: 粒子数, V: 水の体積, k_c : 定数である.計算結果を出力する時に, このような換 算を流動計算の格子単位で行なった.したがって, そ の際には,式(15)の各量は,計算格子中の濃度や粒数, 体積を示すことになる k_c は粒子数と SS 質量の関係す る係数であり,本研究では,経験的に k_c を 5.0× 10^5 と した.さらに,後述する解析モデルの検証時には,湖 内の実測値として得られている濁度と比較する必要が ある.そこで,宮永・安芸²⁰⁾により,式(16)に示した 濁度,SS 濃度及び粒径の関係式を用いて,計算結果を SS 濃度から濁度への換算を行なった.

$$T_b = \frac{1}{K_T \cdot d^m} \cdot C \tag{16}$$

ここに, T_b :濁度[度],d:粒径[µm],m:定数, K_T : 定数である.本研究では,宮永・安芸²⁰⁾に基づき, m=1.00, $K_T=0.625$ とした.

また 河川からの流入 SSの条件を与えるときには, 式(17)と図-2 で示した流入 SS 濃度が対応するように 設定した.

$$N = \frac{3600 \cdot Q_{in} \cdot C_{in}}{k_c} \tag{17}$$

ここに, *N*:粒子投入数, *Q_{in}*:流入量[m/s], *C_{in}*:流入 SS濃度[mg/l]である.

濁質の沈降速度については,本貯水内で実測した濁 度の鉛直分布の時間変化(分布系のピーク深度の低下 速度)から推定した値(1.00×10⁶m/s)を与えた. 濁水 挙動に対して混合粒径の影響が大きいことが知られて いるが,本研究では,放流効果の基礎的検討を目的と しているため,単純化して単一粒径の扱いとした.こ れに加えて,このダムを対象とした既往検討で提案さ れた確率的沈降¹⁰というモデル化も組み合わせて計算 を行なった.ただし,本研究は SS を濃度の輸送では なく,粒子として扱っているので,既往のモデルと同 様の扱いができない . そこで , 本研究では , 文献 ¹⁰の 濁質沈降実験を参考に,粒子の確率沈降の速度を与え た.この実験では,SS 濃度が指数関数的に減少をし, 100mg/1から 10mg/1に減少するのに約 800時間要した. したがって,1時間後も粒子が浮遊している確率qは, $q^{800} = 0.10$ となる.これを解くと,q=0.9971である. そこで,粒子計算では,1時間ごとに粒子1個につき 擬似乱数 (値は 0~1)を生成して, 0.9971 より大きい ときには,文献¹⁶⁾に倣い,沈降速度が 5.62×10²m/s

(2) 対象洪水と検討ケース

2001年の8月の洪水をもとに,計算モデルの検証を 行なった上で,検討ケースを設定した.藤田ら¹³の三 春ダムを対象にした検討では,治水や利水を含めた現 行の操作ルールをかなり厳密に踏まえた条件設定がな されているようである.本研究では,実績洪水におけ る放流時系列を時間的に変化させただけの条件とした. このような単純な条件設定で,放流時間帯の変化によ り流入濁質の湖内流動及び排出効率の変化を調べるこ とを目的とした.設定した条件は次のとおりである.

まず,図-2に示した現地観測データに基づき,現行 方式(8月 22日 19時オリフィスゲートより放流開始) を基準として,放流開始時期を1,3,6時間前倒しし たケースと3時間遅らせたケースの4ケースについて 検討を行なった.放流時間を早めるケースが多いのは, 1 章で述べたように,洪水初期のファーストフラッシ ュの排出を重要視しているためである.これらの実績 流入・放流量に基づくケースに加えて,洪水の規模を 大きい場合を想定して , ピーク流入量を 400m³/s とし た場合についても検討を行なった.実績洪水の流量規 模は,安芸・白砂の ²¹⁾を求めると,0.34の小規模洪 水であった.そこで,0.5をこえる程度の中規模洪水に ついても検討した .(なお , >1 の大規模洪水は水温 成層が破壊する可能性があり,検討に適さないと判断 した)流入 SS 濃度は実測値より与えた.現実的には, 流量の増加に伴って, SS 濃度も増加するはずである. しかし,流量 濃度関係を得るための十分なデータが ないため、本研究では簡略的な仮定をした。

検討対象期間は,モデル検証と予測検討とで分けた. 検証計算は洪水開始する前日の8月21日から貯水池内 での濁度分布を実測した9月4日までの約2週間とし た.それに対し,放流効果を調べる予測検討は,終了 時点を流入量が概ね平常時まで低下する8月25日0 時までとした。図-3に中規模洪水のケースの流入量と 基準とする放流量(8月22日19時オリフィスゲート より放流開始)の時系列を示した.この場合において も,1,3,6時間前倒ししたケースと3時間遅らせた ケースの4ケースについて検討を行なった.

検討結果の整理は,粒子計算の平均滞留時間及び放流,堆積の比率をピーク前(8月22日18時まで)と ピーク後(8月22日19以降)の別にまとめた.

4.計算結果・考察

(1) 解析モデルの検証

計算格子は水平方向に 200m, 鉛直方には 1mとし, 時間ステップはΔt =30[s]とした.計算の初期条件とし て,水位はダム管理所における実測値を用いた.水温 分布は,8月22日16時の地点1における実測値を貯 水池内に水平一様分布で与えた.流入量・放流量につ いてはダムの管理記録を元に与えた.また,流入水温 及び流入SS濃度は測定値を用いた. 粒子の挙動計算 の時間ステップは $\Delta t_p=2[s]$ とした.また上流端からの 粒子投入の時間間隔は1時間とした.図-4に粒子計算 モデルによる濁度の計算結果を示す.濁水層の中心で あるEL.230~220mの濁度分布の変動はよく再現でき たと言える.ただし,計算期間中盤において,水面付 近でシャープなピークが出ており,計算結果が濁度を 過大に評価している.この理由は,オリフィスゲート (EL.230m)からの取水による影響及び流動モデルと の組み合わせによる鉛直拡散係数の再現性の問題と考 えられる.

(2) 放流形式による濁質挙動の検討

a) 実績洪水に基づくケース

表-1,図-5にそれぞれ,粒子の平均滞留時間及び放 流,堆積の比率を示した.なお,これらの図表では濁 質粒子の流入時間について洪水期間中の流量ピークの 前後に分けて,整理した.なお,図-5中の全体比とは, 集計期間の総流入粒子数(濁質負荷量)に対する放流 または堆積の比率である.したがって,放流と堆積の 和が1に満たない分は,湖内で浮遊していることにな る.さらに基準比とは,全体比をそれぞれの現行方式 の値で割ったものである.表-1及び図-5より,放流時 間を1時間前倒すことにより,ピーク前の粒子(濁質) が現行方式に比べて,放流粒子の滞留時間が短く,下 流河川へ放流される粒子が 6.4%ほど多いことが分か る.したがって,実績程度の洪水の規模では,ファー ストフラッシュの排出量についてあまり大きな効果が 得られないと考えられる.





図-6 中規模洪水における粒子の状態別比率

表-1 実績洪水における放流粒子の平均滞留時間

放流方式	平均滞留時間[hr]	
	ピーク前	ピーク後
6時間前倒し	12.15	19.13
3時間前倒し	10.16	16.18
1時間前倒し	10.62	15.20
現行方式	10.99	14.57
3時間遅 れ	13.72	16.88

表-2 中規模洪水における放流粒子の平均滞留時間

放流方式	平均滞留時間[hr]	
	ピーク前	ピーク後
6時間前倒し	7.74	15.17
3時間前倒し	8.04	13.40
1時間前倒し	9.54	12.26
現行方式	10.73	13.73
3時間遅れ	14.50	15.16

また,実績洪水のように小規模な洪水では,流入量の 増大とほぼ同時に放流を開始する方式(6時間前倒し)に は,ファーストフラッシュの放流を改善する効果はなく, むしろ現行方式よりも悪化している.これは濁水がダム サイト付近に到達する時刻にはオリフィスゲートからの 放流が終了しているためだと考えられる.

b) 中規模洪水のケース

表-2,図-6にそれぞれ、粒子の平均滞留時間及び放流, 堆積の比率を示した.表-2,図-6より,基準(8月22 日19時放流開始)に比べて,6時間前倒したケースでは, ピーク前の放流粒子の比率が34.7%ほど増加していて, なおかつ平均滞留時間が短縮していることから,ファー ストフラッシュの排出に大きな効果があると言える.流 入粒子全体としても,6時間前倒したケースは基準ケー スに比べて,放流粒子の比率が9.1%増加している.した がって,このケースでは,ファーストフラッシュを排出 することにより,洪水全体で流入した濁質の貯留を減ら す効果があると言える. 本ケースのような中規模洪水では,流入ピークを迎え てから放流する方式(基準ケース)ではなく,流入量の増 大とほぼ同時に放流を開始する方式(6時間前倒し)が 貯水池内の水質面の改善にある程度の効果が期待できる と考えられる.

本検討では,6時間前倒したケースが濁質制御の観点 から最善の放流方式と言える.これは実績洪水に基づく ケースに比べ,流量が大きいために,濁水のダムサイト への到達が早くなったためであると考えられる.

5.おわりに

本研究では,ラグランジュ的手法の濁質挙動を解析す る粒子計算モデルの開発を行なった.さらに,モデルを 用いて,放流操作による水質改善(特にファーストフラ ッシュの排出)の検討を行なった.本論文の結論は以下 の通りである.

本研究で開発したラグランジュ的手法の濁質挙動解 析モデルを Xダム¹⁷⁾の湖内濁度の実測値を用いて,モ デルの再現性の検証を行い 概ね良好な結果が得られた.

粒子計算モデルを用いた放流操作による水質改善の 検討を行なった結果,中規模の洪水において,流入量の 増大とほぼ同時に放流を開始する方式によって,洪水前 半の流入負荷を排出することにより,貯水池内の水質改 善にある程度効果が期待できると考えられる.

降雨予測により,洪水調節に必要な放流量を把握でき る可能性がある.また,貯水池内の濁度モニタリングに より,濁質制御する上で,より効果的な放流開始時期を 見積もることができる可能性があると考えられる.現実 の貯水池操作において,これらを組み合わせることで, 治水操作を最優先としておきながらも,より効果的水質 制御が可能と言える.

なお,本論文の検討結果を一般化する上では,課題が 多い.まず挙げられるのは,対象とした洪水が一波形の みであること,ダムの運用条件を現実的に加味すること など,検討条件に係わることである.上述の通り,治水 が多目的ダムの運用では最優先事項である.そこで,水 質と治水などの複合的な条件下での最適運用手法の検討 も必要となってくると考えられる.つぎに挙げられる課 題としては,粒子計算モデルの精度向上(混合粒径への 対応などを含む)である.

参考文献

- 1) 中村昭,今村瑞穂,横道雅己:多目的ダム貯水池における濁 水長期化調査,水理講演会論文集,第24巻,pp.259-264,1980.
- 2) 小島貞男: カビ臭対策としての湖水人工循環法の経験, 用水 と廃水, Vol.26, pp837-844, 1984.
- 3) 工藤勝弘,河上智行,山田正:ダム貯水池におけるフォルミ ディウムとかび臭,水文・水資源学会誌 第17巻4号, pp.331-342,2004.

- 4) 梅田信,宮崎貴紅子,富岡誠司:曝気式循環施設により生じる 貯水池内流動の現地観測,土木学会論文集,775,pp55-68,2004.
- 5) 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.
- 6) 牧野育代, 寶 馨, 立川康人: 流入河川の水質特性と冷水対策が貯水池水質に及ぼす影響,水工学論文集,第 50 巻, pp. 1369-1374,2006.
- 7) 岡村幸弘:ダム貯水池における水質保全施設の運用方法,河川, No.713, pp.45-48, 2005.
- Baldwin, DS: Effects of exposure to air and subsequent drying on the phosphate sorption characteristics of sediments from a eutrophic reservoir, *Limnology and Oceanography*, vol41, pp.1725-1732, 1996.
- 9) 佐藤宏明,天野正秋:浅い貯水池の水位低下・干し上げに伴う2-MIBへの影響-渡良瀬貯水池を例にして-,応用生態工学,Vol.10,pp.141-154,2007.
- 10)角哲也,高田康史,岡野眞久:ダム貯水池における洪水時 の微細土砂流動特性と捕捉率に関する考察,河川技術論文集, 第9巻, pp353-358, 2003.
- 竹内邦良:降雨予測の精度と予備放流方式の効果について、 水工学論文集,第34巻, pp.73-78,1990.
- 12) 國方美規義,端野道夫:洪水調節用ダムにおける n 時間先 予測降雨・流量・貯水量の条件付き確率分布関係について, 水工学論文集,第37巻, pp.57-62, 1993.
- 13)藤田光一,長野幸司,小路剛志:地球規模水循環変動に対応 する水管理技術に関する研究,平成17年度国土技術政策総合 研究所年報,pp.110-111,2005.
- 14) 関根正人,大内良二:環境ホルモン物質の河道内貯留に関 する基礎的研究,水工学論文集,第50巻,pp.1187-1192.
- 15) Pruden A, R Heatherstorteboom and D Carloson: Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies inNortherm Colorado, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.40, pp.7445-7450, 2006.
- 16) 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,Vol.48, pp.1363-1368,2004.
- 17) 梅田信,富岡誠司:ダム貯水池における洪水時微細土砂の
 流下過程について、河川技術論文集、第9巻 pp.359-364,2003.
- 18) Ross, O. N. and Sharples J.: Recipe for 1D Lagrangian particle tracking models in space-varying diffusivity, *Limnology and Oceanography:methods*, Vol.2, pp289-302, 2004.
- 19) Matsumoto, M. and Nishimura T.: Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudoorandom number generator, ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation, Vol.8, pp.3-30, 1998.
- 20) 宮永洋一,安芸周一: 濁質粒度が貯水池濁水現象に及ぼす 影響について,土木学会論文報告集,第296号,pp49-59,1980.
- 21) 安芸周一,白砂孝夫:貯水池の流動形態と水質,水理講 演会論文集,第18巻,pp.187-192,1974.

(2008.9.30受付)