

◆ 特集：既設ダム有効利用のための技術開発 ◆

貯水池の水質予測手法

櫻井寿之* 箱石憲昭** 柏井条介***

1. はじめに

貯水池の水質に関する主要な問題としては、冷水放流や温水放流等の放流水温の問題、出水後の濁水長期化の問題、富栄養化の問題が挙げられる。

これらの問題に対して、貯水池内での対策として選択取水設備、曝気循環施設、流動制御フェンス等が挙げられ、これらの施設規模や運用方法を検討するためには水質を予測するツールが必要になる。

また、新設ダムでは、建設前に環境影響評価を行い、これらの問題が顕在化する可能性を検討し、問題がある場合はその対策を講じることになっている。この検討においても、水質を予測するツールが不可欠である。

ツールとしては、対象となる現象の規模が大きく、境界条件となる項目も多いため、模型実験等による対応は困難であり、多くの場合、数値シミュレーションが用いられる。

そこで、本稿では、貯水池の水質予測モデルの概要を示し、計算を実施するに当たって留意すべき境界条件・計算条件の設定方法を示す。また、具体例の一つとして、土木研究所で開発したモデルの概要と計算事例を紹介し、最後に今後の課題について言及する。なお、本稿では、水質項目の内、植物プランクトンの増殖等の生物学的な作用が関係する問題は、取り扱わず、物理的な作用が支配的な水温、濁度の予測手法について議論する。

2. 水質予測モデルの概要（水温・濁度）

一般に貯水池の水温・水質予測には数値シミュレーションモデルが用いられる。数値シミュレーションモデルは計算機の進歩とともに発展してきており様々な手法やモデルが提案されている。研究レベルでは、3次元モデルを用いて、貯水池を対象とした高度なモデルによる解析が行われている^{1), 2)}。一方、貯水池全体を解析の対象とする貯水池計画や放流水質に関する問題の対策検討等の実務においては、長期的な予測には鉛直1次元モデルが用いられることが多く、水質の縦断変化の

検討が必要な場合に鉛直2次元モデル（図-1参照）が用いられ、計算労力の大きい3次元モデルが用いられることはまれである。

濁水長期化問題等への対策検討では出水時の流動を再現することが重要であり、出水時には貯水池の流動は時間的な変化が大きく水平方向に一樣ではないため、少なくとも縦断的な変化を再現する必要がある。

そこで、本稿では、計算労力とのバランスも考慮し、貯水池全体の縦断的な流動と水質の再現が可能な鉛直2次元モデルについて言及する。

鉛直2次元モデルの中にも様々なモデルが存在する。モデルを特徴づける主要な項目としては、①計算格子とそれに伴う数値計算法、②圧力の取扱い、③自由水面の取扱い、④渦動粘性係数（拡散係数）の取扱いおよび⑤熱収支の取扱いが挙げられる。以下に各項目についての概要を示す。

①については、計算格子の作成の容易さと物質収支及び熱収支の保存のしやすさから直交格子を用いた有限体積法が実務ではよく用いられる。

②については、静水圧の仮定を用いた静水圧モデルと用いない非静水圧モデルがあり、非静水圧モデルの方が現象をより忠実にモデル化しているが、一般に計算負荷が大きくなる。貯水池規模の現象を想定して両者のモデルによる計算結果の流動、水温分布、濁度分布を比較したところ³⁾、計算結果に大きな差は認められず、構造物周辺や取水口周辺などの動圧が卓越する局所的な流動は別として、貯水池の大局的な流動の計算では静水圧の仮定による影響は小さいと考えられる。

③については、水面に蓋をしたような固定境界

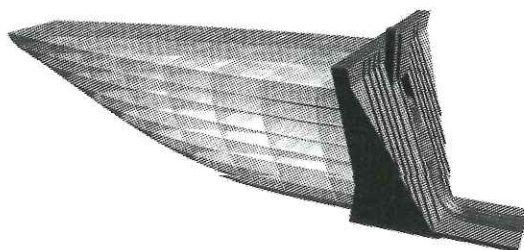


図-1 鉛直2次元モデルのイメージ

とするモデルと、水面変動を考慮したモデルがある。水面変動を考慮した方が現象をより忠実にモデル化できるが、計算が不安定になりやすく計算負荷は大きくなりやすい。

④については、流動の乱流拡散現象を何らかの仮定を用いてモデル化する必要がある。流体力学の分野では主要な研究テーマであり、多くの研究成果から様々なモデルが提案されているところであるが、実務レベルの貯水池の水質計算では、渦動粘性係数を一定値と仮定する単純な手法や、密度成層の影響を簡易に取り入れるために渦動粘性係数をRichardson数の関数とする手法などが従来よく用いられてきている。また、近年では、局所的な乱れの状態を渦動粘性係数に反映できる乱流モデルが用いられる場合もある。これらの手法について、②と同様に計算結果を比較したところ、流量が大きくなるほど手法による結果の差が認められ³⁾、様々な流量規模の現象を取り扱う場合には乱流モデルの適用が望ましいと思われる。

⑤については、貯水池の計算においては、後述するような安芸ら⁴⁾のとりまとめた経験式が用いられる場合が多い。

具体的なモデルの一例として、土木研究所で開発しているモデルの概要を紹介する。なお、式等の詳細については、文献⁵⁾を参照していただきたい。

基礎方程式は、連続式、流下方向運動方程式、静水圧の式、熱の輸送方程式および粒径別SS濃度の輸送方程式からなり、流体の密度は水温とSS濃度の関数とし、濁質粒子の沈降速度の算定にはRubeyの式を用いている。

渦動粘性係数の算定には2方程式の乱流モデルであり様々な流れ場で適用されている標準型 $k-\varepsilon$ モデルを用いている。これにより、乱れエネルギー k と乱れエネルギー散逸率 ε の二つの輸送方程式が基礎方程式に加わる。

熱の輸送方程式における大気と水塊の熱交換については、安芸ら⁴⁾のとりまとめた経験式を参考に、輻射、熱伝導、蒸発および有効逆輻射による熱フラックスを考慮して水面及び水中へ伝わる熱フラックスを算定している。

数値計算法としては、上記基礎式の変数を直交座標系のスタッガード格子に配置し、非定常項に関してはオイラー陽解法を用いて離散化し、空間に関しては基礎式を有限体積法によりコントロールボリュームで積分することにより離散化している。その際、水表面に接するコントロールボリューム

ムでは自由水面の運動学的条件を用いて積分し、水面形の計算を行っている。なお、基礎式の移流項の離散化には1次精度風上差分を用いている。

3. 境界条件・計算条件の設定方法

貯水池の水質予測計算に必要な境界条件及び計算条件は多岐にわたり、全ての条件を精度よく与えるための観測データが十分に得られない場合も多く、条件設定に近似や仮定が必要となることがある。また、こうした事情がモデルの再現性の検証や精度の評価を困難にしている一因となっている。ここでは、主要な境界条件や計算条件を設定するに当たっての留意事項を筆者らの経験に基づき記述する。これらの事項は様々な条件の実際の貯水池を対象とした計算において日々改良され、改善されていくものと考えられ、研究者、実務者の皆様のご指摘やご意見をいただけたら幸いである。

3.1 計算格子

計算格子は、対象とする期間で最大となる貯水位までを含んだ領域で作成し、通常、流下方向に数十～数百m、鉛直方向に数十cm～1m程度の格子間隔で設定されることが多い。各格子にその地点での幅（または体積）を与えることになるが、貯水池の $H-V$ （貯水位－容量曲線）と合わせるために幅の値が補正される場合もある。ただし、 $H-V$ 曲線に合わせることを優先しすぎて不合理な横断面形状とならないように注意が必要である。有限体積法を用いている場合には、底面に一つの計算格子が凸形状に配置されていると、周囲の水塊との物質の出入りが不合理に少なくなるため、二つ以上とする等の対応が必要である。

3.2 流動に関する条件

上流端の水位、流量（流速）、下流端の水位、流量（流速）が境界条件の候補となり、例えば前述の土木研究所のモデルでは、上下流端の流量を与えて、上流端及び下流端を含めた水面形が出力されることになる。上流端については、境界条件を与える位置を固定すると貯水位の変動に伴って上流端の流水断面積が変化し流速が増減するため、貯水位の変動に伴って境界条件を与える位置を変化させる等の対応が望ましい。また、下流端の流速の条件については、鉛直方向と比較して流下方向の格子間隔が大きいため、各放流設備や取水設備の特性を踏まえて、密度勾配による流動層厚を考慮して流速の鉛直分布を設定することで水温・濁度分布の再現性が向上する場合がある。

3.3 熱収支に関する条件

熱収支に関しては、気象条件として、気温、日射量、湿度、風速、雲量を時系列で与えることが多く、これらに風向が加わる場合もある。なるべく貯水池に近い観測地点のデータを用いることが望ましい。また、風速に関しては、観測条件と用いている熱交換の式における定義（例えば水面からの高さ等）との整合に注意が必要である。また、水面反射率、水面吸収率、減衰係数等のパラメータについては、検証計算により同定される場合が多い。

重要な境界条件である流入水温については、時間間隔の実測データがあれば理想的であるが、無い場合には、定期観測データを用いて気温との相関式を作成し、これにより設定されている。

3.4 濁質に関する条件

濁質に関しては、粒径区分を設定して、各区分に代表粒径（代表沈降速度）を与え、各区分の流入SS濃度を時系列で与える。粒径区分は、多くなるほど計算負荷が増加することになり、実務の計算例では、4または5区分、多くて10区分程度が用いられている。SS濃度については、出水時の流入量、濁度、SS濃度、粒度分布の観測データから、各区分の流量とSS濃度の相関式を作成して与えられる。出水時の観測データが十分でない場合が多く、精度良い条件設定のためには、観測データの蓄積が望まれる。代表粒径または沈降速度の設定については課題があることが指摘されており⁶⁾、5章に後述する。

4. 計算事例

モデルの再現性を示す事例として、前述の土木研究所で開発したモデルによる計算例を紹介する。関東地方の利根川水系鬼怒川に建設されている川治ダム貯水池を対象に、貯水池内の年間水温変化を再現した計算と出水時の水質変化を再現した計算の事例である。

川治ダム貯水池の概要を図-2に、諸元を表-1に、計算条件を表-2に示す。なお熱収支に関するパラメータの値は、既往文献⁴⁾を参考にして、水面反射率 α : 0.06、水面吸収率 β : 0.5、減衰係数 η : 0.3m^{-1} を設定した。

年間水温変化に関する計算期間は2002年8月14日～2003年7月24日のほぼ1年間であり、時系列の条件として、気象、流入量、放流量、流入水温のデータを1時間間隔で与えた。気象、流入量、放流量に関しては、ダム管理所の観測データを使

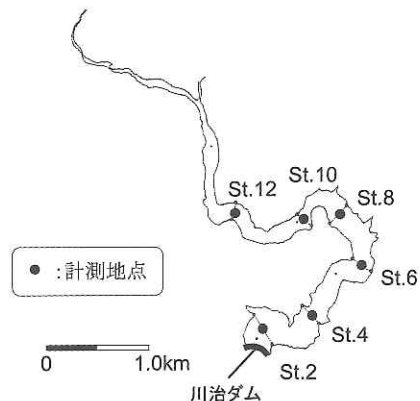


図-2 川治ダム貯水池平面図

表-1 川治ダム貯水池諸元

竣工年	1983年
流域面積	323.6km ² ※1
湛水面積	2.2km ²
計画高水流量	1800m ³ /s
常時満水位	EL.616m ※2
制限水位	EL.594m ※3
総貯水容量	83,000,000m ³
計画堆砂容量	7,000,000m ³
堤 高	140m
天端標高	EL.619m
堤頂長	320m
年回転率	1.36 ※4

※1: この内、川俣ダムの流域面積179.4km²

※2: サーチャージ水位と等しい

※3: 制限期間は7月1日～9月30日

※4: 1988～1998年の流入量と常時満水位時の貯水池容量から算出

表-2 川治ダムの年間水温変化の計算条件

項 目	設定内容
計算時間間隔	4 sec
現象を再現する期間	2002年8月14日～2003年7月24日
流下方向格子間隔	176m～263m
流下方向格子数	41個
鉛直方向格子間隔	1m
鉛直方向格子数	101個
マンニングの粗度係数	$0.03\text{m}^{-1/3}\text{sec}$
初期流速	0m/s
圧力の取扱い	静水圧
渦動粘性係数	標準型k-εモデル

用し、流入水温については、小型水温計（MDS-T: アレック電子製）を用いて貯水池上流のモニ

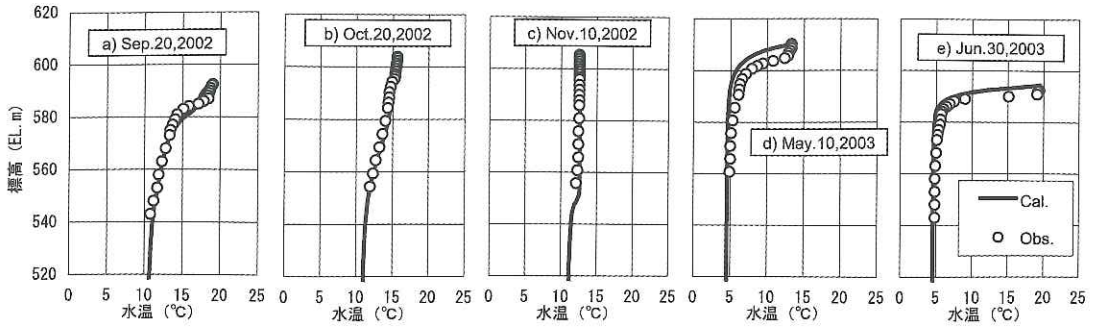


図-3 川治ダムの年間水温変化の計算結果と観測値の比較

タリングポイントにて10分間隔で計測したデータを用いた。この計算期間の流入量については、2002年10月1日～2日にかけて、ピーク流量500m³/sの大規模な出水が生じている。それ以外の期間では、15m³/s以下の流入量で大きな変化はない。

貯水池直上流における水温鉛直分布の計算結果を現地観測値と比較して図-3に示す。比較した年月日は出水の前後と年間の水温変化の概要が把握できるように選定した。出水の前後のa)、b)をみると、出水により水位が上昇し、表層水温の低下、成層の水温勾配の減少が認められる。秋から冬にかけてのb)、c)では、表層水が大気との熱交換により冷却され密度が増し鉛直方向に循環することによって、水温成層が消滅している。春から夏にかけてのd)、e)では、太陽からの日射の増加と気温の上昇により水温躍層が発達していく過程が認められる。以上のような年間の水温鉛直分布の変化について、計算結果は観測値を比較的良好に再現していることが確認される。

出水時の水質変化に関しては、2002年10月の台風21号による出水⁷⁾を対象に計算を行ったものである。出水時の貯水位、流入量、放流量の時系列を図-4に示す。この出水のピーク流量は540m³/s、貯水池回転率は0.3(洪水直前の貯水容量を基準とした場合)であった。また、この出水は川治ダムの非洪水期に発生したため、常用洪水吐きであるコンジットゲートからの洪水放流操作は行われず、表面取水設備による0.5m³/sの放流のみが実施されていた。そのため流入水のほとんどは貯水池に貯留され、水位は約10m上昇している。

計算対象期間は約50時間であり、流入濁質以外の計算条件を表-3に示す。流入濁質については粒度分布を5区分とした。粒度分布については、採水分析の結果を示した図-5をみると出水のピー

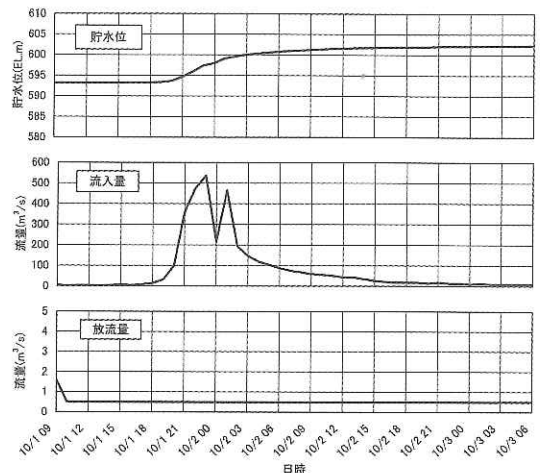


図-4 川治ダムの出水の概要

表-3 川治ダムの出水の計算条件

項目	設定内容
計算時間間隔	1 sec
現象を再現する期間	2002年10月1日12時 ～2002年10月3日14時
流下方向格子間隔	88m～132m
流下方向格子数	55個
鉛直方向格子間隔	1m
鉛直方向格子数	101個
マンニングの粗度係数	0.03m ^{-1/3} sec
初期流速	0m/s
圧力の取扱い	静水圧
渦動粘性係数	標準型 k-ε モデル

ク前とピーク後で異なっているため、図-6に示すように図-5の番号1、番号2～6の平均値の2パターンを基準とし、洪水ピーク時までを図-6 a)で代表させ、洪水ピーク以降を図-6 b)で代表させた。初期水温・SS分布には2002年9月19日の貯水池内の観測結果を用いた。

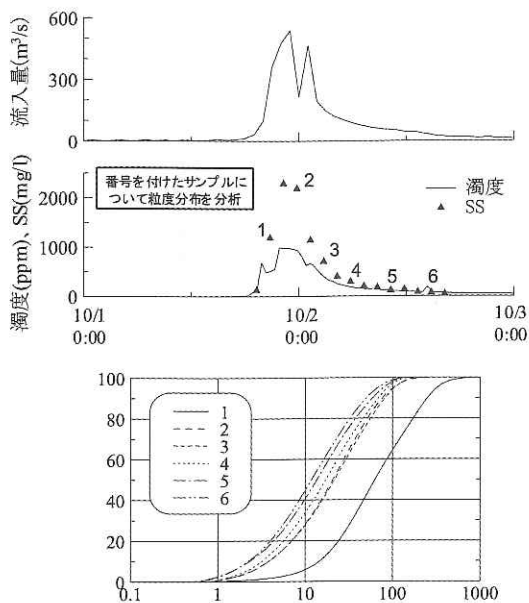


図-5 洪水時流入水のSS、濁度および粒度分布の時間変化

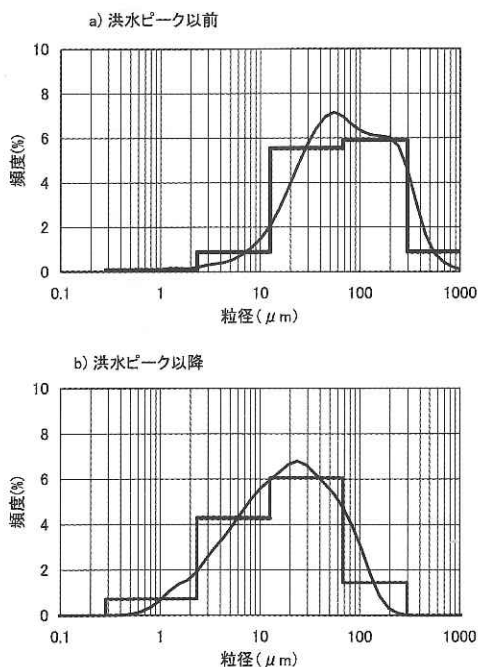


図-6 計算に用いた粒度分布

境界条件としては、上流端で観測データを基に流量に見合った一様流速と流入水温、SS濃度を与えた。なお底面まで沈降したSSの再浮上は考慮していない。

図-7に計算結果と観測結果の比較を示す。比較に用いた観測結果は洪水直後の縦断分布である。

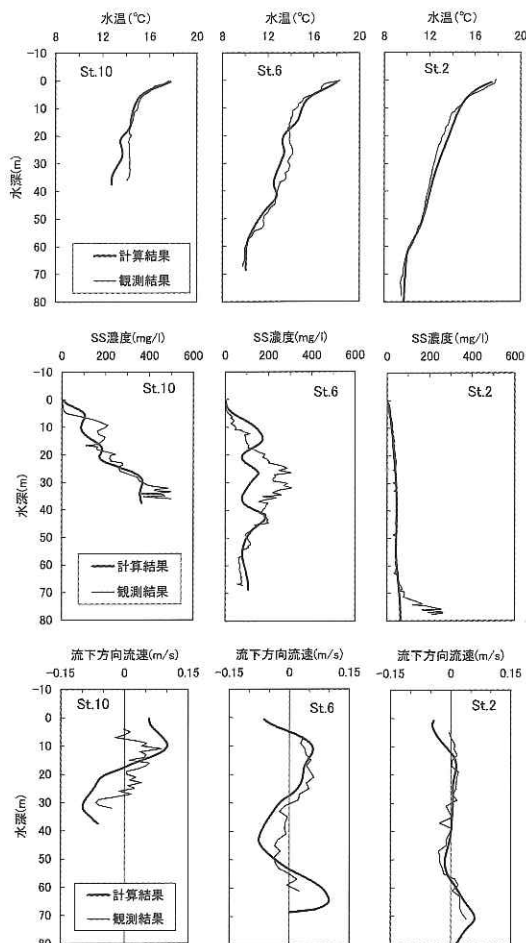


図-7 川治ダム出水時の計算結果と観測結果の比較

なお観測時刻が地点毎に30～60分程度異なるので各地点の観測結果とほぼ同時刻の計算結果を比較した。また、濁度は別途求めた現地のSS-濁度の関係式からSS濃度に換算されている。

SSに着目すると、再現性は十分とは言えないものの、濃度の大きさは概ね再現されていた。また観測結果と同様にSt.6付近までしか濁水の侵入はみられず、現象の特徴は概ね再現されている。粒度分布の流入条件を適切に設定することによって、出水時の水温と濁質濃度を概ね再現できることが確認された。

5. 今後の課題

現状では、環境影響評価等での貯水池の水質予測において、類似ダムでの現地観測データを基に使用するモデルの検証を行っている。濁水長期化等の問題の検討では、出水時の流入量の立ち上が

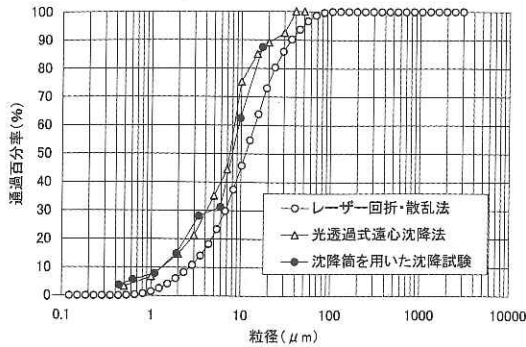


図-8 K貯水池の底泥を用いた粒度分布分析結果

りから低減までをカバーした粒度分布を含む観測データが求められる。しかしながら、こうしたデータが十分でない場合や、新たにデータ収集するための労力が大きい等の問題がある。そこで、モデルの検証作業の労力軽減と精度を確保するために、信頼できる検証用のデータセットの整備が望まれる。

実際の検証計算事例の中には、水温や濁質の分布の再現性が低いケースがみられる場合があり、モデルの改良や条件設定のための観測方法や分析・整理方法の改善を図ることが望まれる。条件設定の課題の一例として、濁質の粒度分布が挙げられる。従来、粒度分布については、手法が簡便なことから、採水試料をレーザー回折・散乱法により分析し、これによって得られた粒径からStokes式、Rubey式等を用いて沈降速度を算定してシミュレーションに用いている。しかしながら、こうした沈降速度式は粒子が球形であることを前提に導かれており、実際の土粒子が球形とは限らない。また、図-8に示すように、濁水長期化で問題となる数ミクロン程度以下の粒度分布がレーザーと他の沈降現象を利用して計測した結果が異なる場合があり、粒度分布（沈降速度分布）の適

切な調査方法、条件設定方法の確立が求められる。

なお、本稿で示した水質予測モデルのプログラムについては土木研究所の著作物として登録され、目的に応じて有償または無償（研究目的の場合）での貸出を実施しており、関心のある方は著者までご連絡いただきたい。

参考文献

- 1) 梅田 信、横山勝英、石川忠晴、銭 新、高橋迪夫：セキ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
- 2) 米山 望、井上素行：三次元数値解析による揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法、土木学会論文集, No.684, II-56, pp.127-140, 2001.8
- 3) 櫻井寿之、柏井条介：貯水池流動鉛直2次元モデルにおけるモデルレベルによる計算結果の比較、ダム工学, Vol.15, No.2, pp.106-119, 2005.06
- 4) 安芸周一、白砂孝夫：貯水池流動形態のシミュレーション解析、発電水力, No.134, pp.37-50, 1975
- 5) 櫻井寿之：貯水池放流水の水温と濁度の制御に関する研究、土木研究所報告, No.204, pp.1-42, 2006.3
- 6) 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, 713号, pp.38-44, 2005.12
- 7) 鈴木伴征、櫻井寿之、柏井条介：川治ダム貯水池の洪水時濁水現象、水工学論文集、第48巻, pp.1357-1362, 2004.2

櫻井寿之*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水工研究グループ河
川・ダム水理チーム主任研究員
Toshiyuki SAKURAI

箱石憲昭**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水工研究グループ河
川・ダム水理チーム上席研究員
Noriaki HAKOISHI

柏井条介***



独立行政法人土木研究所企画部
研究企画監（前 つくば中央研
究所水工研究グループ河川・ダ
ム水理チーム上席研究員）
Josuke KASHIWA