

高濃度濁水の流入が見られるダム貯水池 における実務的使用を想定した数値モデル の構築に関する基礎的検討

BASIC STUDY ON MODELING OF TURBIDITY CURRENT IN DAM RESERVOIRS AIMING FOR PRACTICAL APPLICATIONS

鶴田泰士¹・梅田信²

Yasushi TSURUTA and Makoto UMEDA

¹正会員 博(工) ㈱建設技術研究所 (〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

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)

In this study, observations were performed in a dam reservoir where the phenomenon of turbidity density current occurred. Continual monitoring at the inflow-rivers and the center of the reservoir was conducted. Measurements were also done in the reservoir during a flood. As a result, behavior of high density turbidity current with a reversed stratification of water temperature was captured. Characteristics of the current were as follows: Muddy water plunges into a lower layer of the reservoir due to density difference. The influence of turbulence was, on the other hand, small in the surface layer in spite of the large-scale flood.

To this flood, two types of simulation model were applied: One was a 2-D hydrostatic-based model widely used in environmental assessments of dam construction in Japan, and the other was a 2D non-hydrostatic k- ϵ turbulence model. As a result, the latter model reproduces both turbidity and water temperature well.

Key Word: Turbidity current, Dam Reservoir, Numerical modeling

1. はじめに

濁水長期化は出水後もダムから高濃度の放流が継続する現象であり、我が国におけるダム貯水池の水環境影響を考えるうえで重要な課題の1つである。

近年、ダム建設に伴う環境影響評価や既設ダムの水質保全検討において、数値シミュレーションを用いた現象の再現と対策案の検討が行われている。こうした実務的検討では、10年程度の長期間を効率よく計算する必要があり、種々の近似を施した比較的計算負荷の小さいモデル(例えば1), 2)が非常に有効となっている。

しかし、大規模出水時の貯水池内濁水挙動の再現性については、課題となっており、予測モデルの信頼性を十分に示すことができない場合もある。

こうした現状に対して、実務的使用を目指したより精緻なモデルの開発も試みられており³⁾、良好な成果を上げている。しかし、種々の近似を施した比較的計算負荷の小さいモデルに代えて、より精緻なモデルを導入するメリットについては十分に示されていないように思われる。この背景の1つには、濁質負荷等の流入境界条件に

誤差が含まれているケースが多く、数値モデルの精度まで踏み込んで議論しにくいことがあると考えられる。

そこで、本研究では、流入河川による境界条件に起因する誤差を極力小さくした条件で計算を行い、出水時の濁水挙動特性に対して、より精緻なモデルが有効性を発揮するか否かの把握を試みた。

まず、高濃度の濁水が流入するダム貯水池における現地観測を実施した。その結果、水温成層の逆転現象を伴う、高濃度濁水の挙動を捉えることができた。また、この出水について、①国内のダム建設に伴う環境影響評価等に広範に用いられている一次元多層流モデルと、②k- ϵ 乱流モデルを用いた非静水圧鉛直二次元モデルの2種類の数値モデルを用いて、再現結果を比較した。

2. 現地観測

(1) 観測方法

本研究で対象としたのは、北海道内に位置する流域面積約400km²、総貯水容量約9,000万m³のダム貯水池である。

当該ダムにおいて、自動観測によるモニタリングを行うとともに、貯水池内の出水時観測を実施した。自動観測装置は、図-1に示すとおり、主要な流入河川（2河川）と貯水池内の湖心に配置した。湖心では、上層・中層・下層の鉛直3点に配置した。いずれの観測点においても、計測対象は水温・濁度の2項目である。

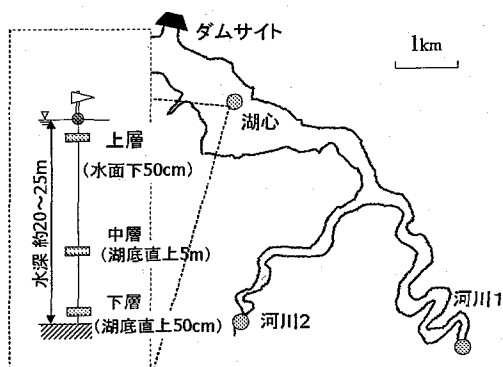


図-1 自動観測計の配置

層・下層の鉛直3点に配置した。いずれの観測点においても、計測対象は水温・濁度の2項目である。

上記の観測は平成17年6月から翌年3月まで継続的に実施した。この期間中の8月22日に日本列島南岸に停滞した前線上に発達した低気圧に伴う出水が生じたため、貯水池内湖心において、水温・濁度の鉛直分布の変化を時間的に追う観測を実施した。本研究では、出水時の貯水池内における濁水挙動を対象としているので、以降はこの出水について検討を進めていく。

(2) 観測結果

図-2 に流入河川および貯水池内の水温・濁度の変化と貯水池の運用（流入量、放流量、貯水位）を共に示す。

ダム流入量は8月22日午前8時付近でピーク（約800 m^3/s ）を迎えている。洪水規模（または洪水時回転率、総流入量÷総貯水量）は0.47であり、一般には中規模とされる出水である。流入河川では、流量ピークとほぼ

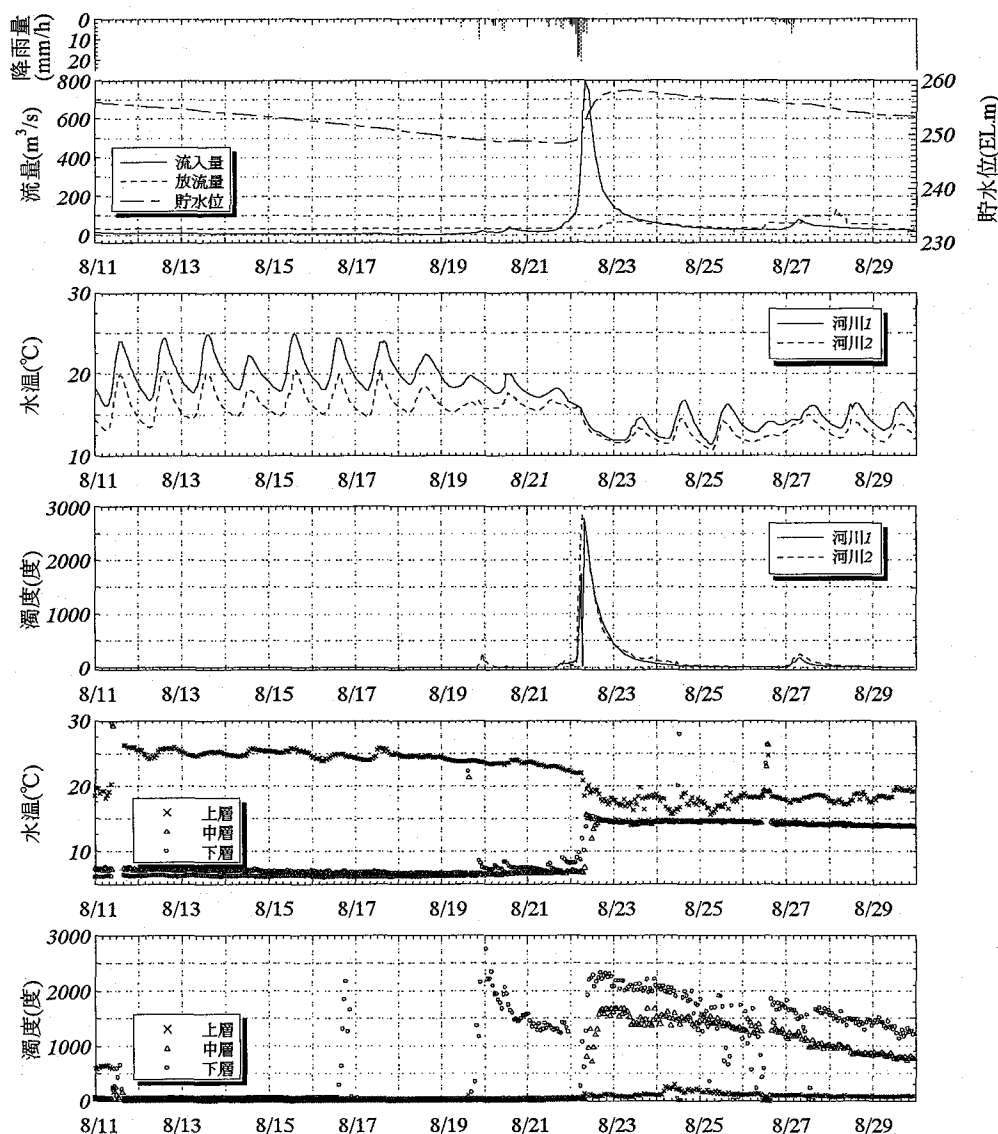


図-2 流入河川および貯水池内の水温・濁度変化と貯水池運用

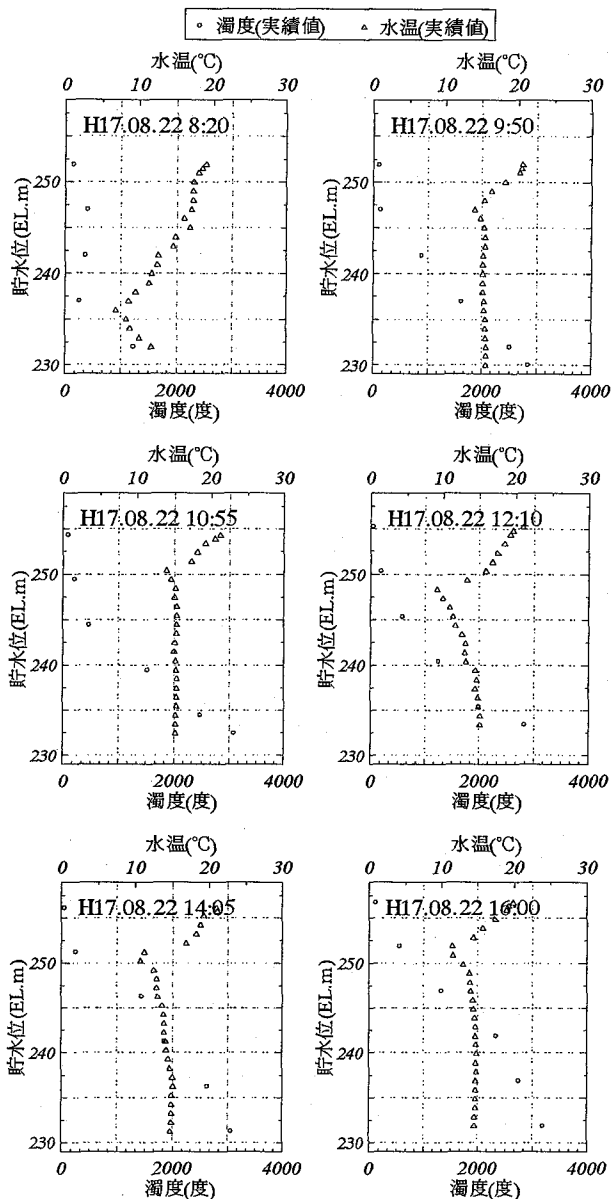


図-3 貯水池湖心の水温・濁度鉛直分布

同時刻に濁度のピークが現れており、3000度近くまで至っている。また水温は流量増加とともに低下し、出水後期には、12℃程度になっている。

貯水池内においては、中層・下層で最大1500～2000度の高濁度が観測された。また、出水後も1000度を越える濁度で推移する様子が見られる。一方、表層の濁度は中層・下層に比べると低く、出水時も最大で150程度、出水後は100度未満の値で推移した。なお、貯水位が徐々に低下する期間（～8月21日）は、目立った出水がないにも関わらず、貯水池下層でかなり大きな濁度の上昇が見られる。これは、貯水池末端で堆積した微細土砂が露出し、流入河川の水流による浸食・巻き上げ等により、再懸濁したものと考えられる。しかし、現時点で詳細は明らかではない。

図-3は、出水時における貯水池湖心での水温・濁度の鉛直分布である。貯水池内では1000度を越える高濁度の濁水塊が密度差により貯水池下層に潜り込む下層密

表-1 検討対象モデルの比較

	α モデル	β モデル
渦動粘性係数の算定の関数 ¹⁾	Richardson数の関数 ¹⁾	k- ϵ 乱流モデル
圧力解法	静水圧分布を基本	SIMPLE法
水面勾配	なし	近似的に考慮

度流が生じている。それとともに、貯水池内の水温分布は急激な変化を示している。出水初期（8:20）では出水前の水温分布が、概ね残存しているが、すでに下層では洪水濁水が流入し、水温が上昇している様子が見える。下層で濁水塊の浸入段階（9:50）になると、EL.245m以深の分布が15℃程度で一様化している。その後、さらに濁水の浸入が進む（12:10）と、EL.245～250m付近において10℃近くまで水温が低下し、水温成層が上下逆転する様子が見られた。

上記のような濁水浸入による貯水池内での水温・濁度の変化は、主に水深5m以深で顕著である一方、表層付近は、水温及び濁度がそれぞれ約20℃及び約100程度のまま著しい変化は見られなかった。

3. 数値シミュレーション

前章に述べた現地観測により、流入河川からの濁質負荷を把握した条件下で、高濃度濁水の流入を伴う出水を観測することができたことから、この出水を対象に数値シミュレーションにより濁水挙動の再現を試みた。

(1) モデルの概要

本研究では、出水時の濁水挙動特性の再現にあたり、より精緻なモデルを導入することの有効性を確認するため、以下の2つのモデルにより動作及び再現性を検討した。使用する数値モデルは、① 国内のダム建設に伴う環境影響評価等に広範に用いられている一次元多層流モデル（以下、 α モデルと呼称）と、② k- ϵ 乱流モデルを用いた非静水圧鉛直二次元モデル（以下、 β モデルと呼称）と2種類とした。

α モデルは、松尾・岩佐による一次元多層流モデル¹⁾、²⁾を基本として開発したものである。基礎方程式として、水平方向の運動方程式、連続式及び水温とssの輸送方程式である。一方、 β モデルは、梅田ら³⁾が開発した洪水時の濁水流動を主要な目的としたモデルである。基礎方程式は、 α モデルの方程式系に加え、鉛直方向の運動方程式及びk- ϵ 乱流モデル式を連立して解いている。

両モデルの主な相違点は、表-1に示す通り⁴⁾であり、鉛直方向の渦動粘性係数あるいは渦拡散係数の算定方法や圧力解法、水面勾配の取り扱いなどが異なっている。

なお、同じ時間ステップで計算しても、 β モデルの方が数十倍の時間を要し、計算負荷は高いものとなる。

（CPUがEfficeonTM8800、1.6GHzのPCを用いて、

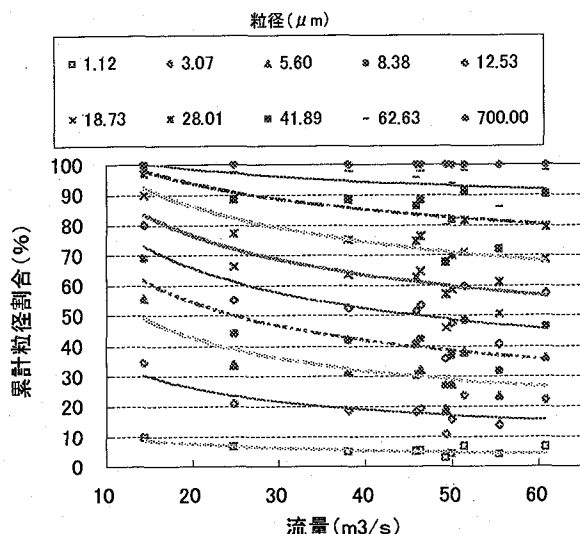


図-3 流量と粒度分布の関係 (河川1)

本論文の対象洪水を計算するのに、 α モデルが約15分、 β モデルが約6.5時間という計算時間であった)

(2) 計算条件

出水時濁水挙動特性の再現性に対して、純粹にモデル性能上の影響を議論できるようにするため、境界条件は、可能な限り実績値に基づいた設定を行い、誤差の抑制を図った。

流入河川の水温およびssは、図-2に示した自動観測結果に基づいて与えた。ここでssは濁度から換算しており、その換算方法は、筆者の1人が当該ダム流域のss・濁度データを用いて検討した、濁質の粒度分布を考慮した換算式を使用した⁵⁾。ただし、当該出水時の流入濁質の粒度分布は観測できなかったことから、既往の出水時調査結果に基づいて整理した。流入河川の流量と粒度分布の関係は、図-4の通りである。計算では、ssを10粒径群に分類し、別途行った沈降法による粒度分析により、各群に代表沈降速度を設定した。表-2に各粒径群の粒径範囲と代表沈降速度を示す。気象条件には、気温、湿度、日射量、風速、雲量を与えるが、雲量以外はダムサイトでの観測記録から1時間間隔で与えた。また、雲量はダムサイトでの観測記録がないため、近傍の気象観測所での日平均値を与えた。

以上の条件で、出水(8月22日)を含む平成17年8月11日~29日の計算を行った。初期条件は静止状態とし、水温・濁度分布は、8月11日の湖心における観測結果に基づいて与えた。計算時間ステップは両モデルとも60秒とした。

(3) 計算結果

図-5に貯水池湖心での水温・濁度の鉛直分布の再現結果を示す。左側が α モデルの、右側が β モデルの結果である。

高濃度の濁水による密度流については、実務検討で広

表-2 濁質の粒径区分と代表沈降速度

	①	②	③	④	⑤
粒径(μm)	0~1.1	1.1~3.1	3.1~5.6	5.6~8.4	8.4~12.5
沈降速度(m/日)	0.02	0.3	1.8	4.1	9.1

	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
粒径(μm)	12.5~18.7	18.7~28.0	28.0~41.9	41.9~62.6	62.6~
沈降速度(m/日)	20.3	45.4	101.4	226.7	506.9

く用いられている α モデルでは、流量ピーク時では下層ほど高濃度となる濁度分布を再現できているが、その後、濁度が急激に低下してしまう。また、実績に比べて表層へ濁度が拡散する傾向があり、全体として"なまった"分布となる。水温分布についても、出水の影響により鉛直混合が生じ、表層も含めて一様化する傾向が見られた。それに対して、 β モデルでは、高濃度濁水の潜り込みが概ね良好に再現されている。また、表層への濁度の拡散が抑えられ、実績に近い濁度分布となった。また、水温分布の著しい変化も比較的良好に追えている。

また、図-6に湖心の上・中・下層における水温・濁度の時間変化を示す。上段が α モデルの、下段が β モデルの結果である。こちらも β モデルの方が、濁度・水温共に再現性が高いことが分かる。水温・濁度の時間変化について、主に出水後に注目して見ると、次のようなことが言える。

α モデルでは、出水後の表層水温が実績よりも低めに推移する傾向が見られる。また、中層および下層の水温も同様に低い。一方、 β モデルでは、出水後の表層水温は比較の実績に近い。また、中層および下層の水温の再現性は良好である。また、中層・下層で見られる高濃度の継続については、 α モデルでは、出水時から中層・下層の濁度が低下するものの、濁度が高濃度(500程度)で継続する様子は実績と類似している。 β モデルでは、出水後しばらくは実績と同程度の高濃度が継続するが、8月26日から27日にかけて急に低下してしまう。 β モデルで見られる上記の計算結果は、同時期に生じた小出水(低濁度)の流入水温が13℃程度であり、15℃程度の中層・下層に侵入してきたため、それまで滞留していた濁水がフラッシュされた可能性がある。 α モデルでは、小出水発生前の中層・下層の水温が12℃程度(実績よりも低い)であったため、小出水が表層へ侵入し、中層・下層の高濃度濁水は維持されたものと考えられる。

また、こうした高濃度の継続には放流設備によって生じる流れと濁質の沈降の微妙なバランスが影響している可能性もあり、下流端の流速境界条件の与え方等について、今後検討していく余地もあると考えられる。

なお、出水前に見られる濁度上昇については、両モデルとも再現できていない。この現象は、前に述べたよう

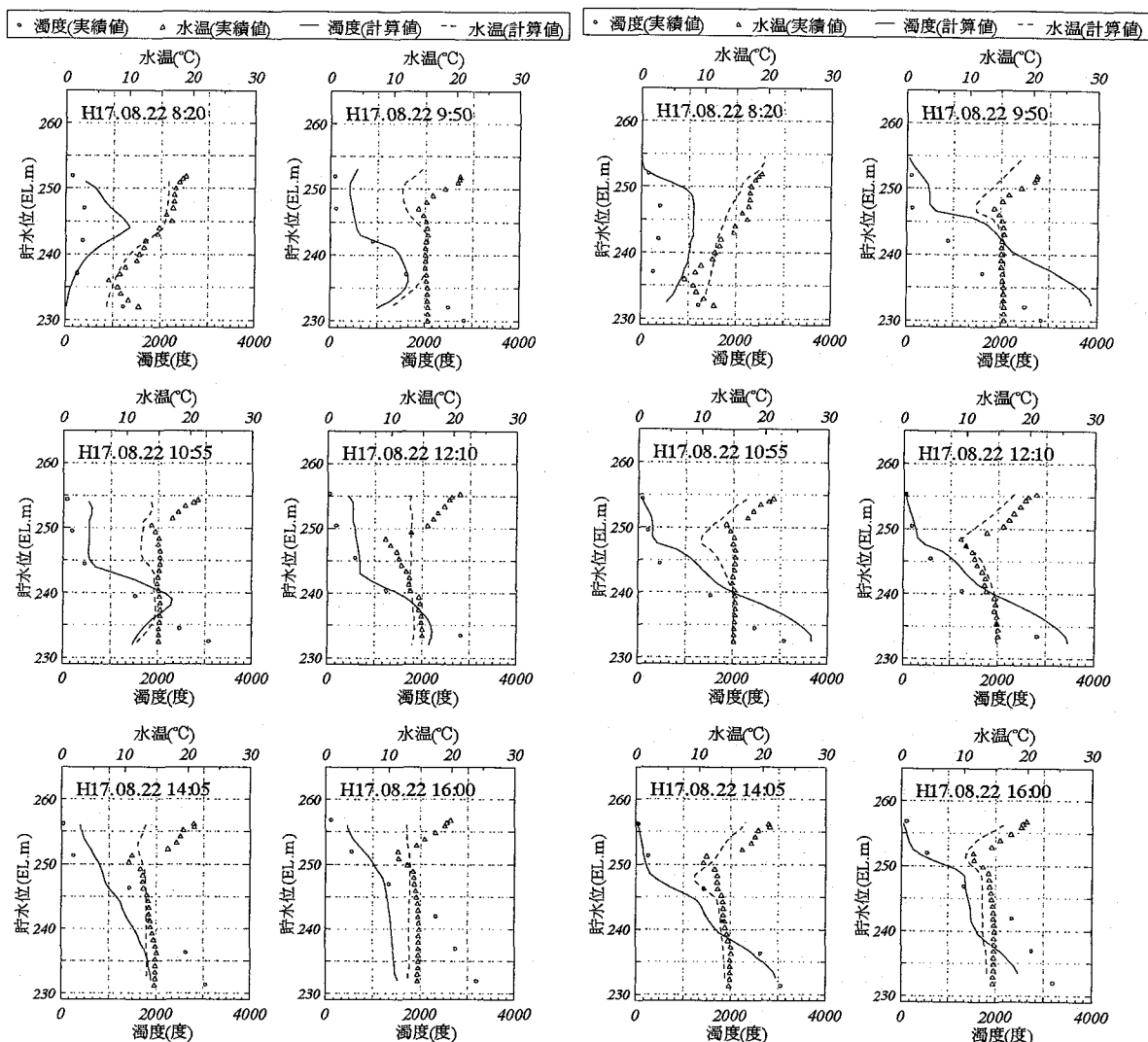


図-5 貯水池湖心における水温・濁度鉛直分布の再現結果 (左: α モデル, 右: β モデル)

に、貯水池末端に露出した微細堆積土砂が河川の水流によって浸食等を受け、まとまって再懸濁した可能性があるが、本検討では両モデルともこうした不確定要素の大きな現象のモデル化はしておらず、別途メカニズムを含めて調査・解析を行っていきたい。なお、急な濁度上昇は下層（河床より5m未満）でしか見られておらず、その濁質量は出水時の流入河川による濁質負荷量と比べて小さいため、出水時の濁水挙動特性への影響は小さいと考えている。また、両モデルとも出水前に表層水温が実績以上に低下する傾向が見られた。これは、初期条件の影響とも考えられる。

4. おわりに

本研究では、実務的検討において、貯水池内の濁水挙動特性を再現するにあたり、より精緻なモデルを導入することの有用性を把握することを目的とし、以下の検討を行った。

出水時の境界条件の誤差を極力抑えるために、高濃度

の濁水流入が見られるダム貯水池において、流入河川および貯水池内での自動連続観測と、出水時の貯水池内観測を組み合わせた調査を行い、水温成層の逆転現象を伴う、高濃度濁水の挙動を捉えることができた。この出水について、① 国内のダム建設に伴う環境影響評価等に広範に用いられている一次元多層流モデル (α モデル) と、② $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた非静水圧鉛直二次元モデル (β モデル) の2種類の数値モデルを用いて、再現結果を比較した。その結果、 α モデルでは、濁水が表層へ及び、成層を破壊する傾向となるが、 β モデルでは、貯水池下層への潜り込み、表層付近の成層構造の温存傾向等、観測で捉えられた濁水挙動の特徴を再現できた。

これは、鉛直方向の渦動粘性係数あるいは渦拡散係数の算定方法や圧力解法、水面勾配の取り扱いなどにおける、両モデルの相違が要因と考えられ、少なくとも、今回の観測で得られた、水温成層の逆転を伴うような高濃度濁水の挙動特性については、こうしたモデルの相違が良好な解を与える可能性があるものと考えられる。なお、今回解析対象としていない濁水の密度流への影響が小さい出水については、必ずしもその限りとは言えない。ま

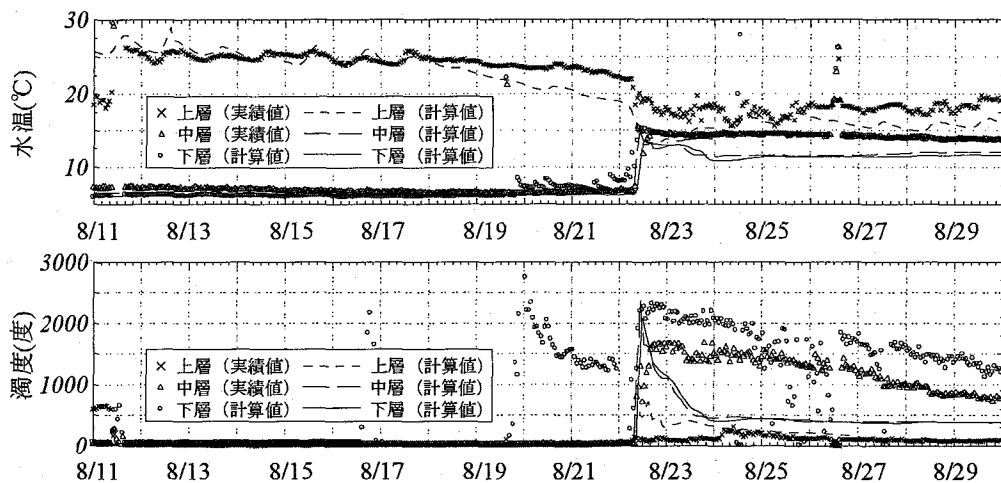


図-6(1) 貯水池湖心における水温・濁度変化の再現結果 (α モデル)

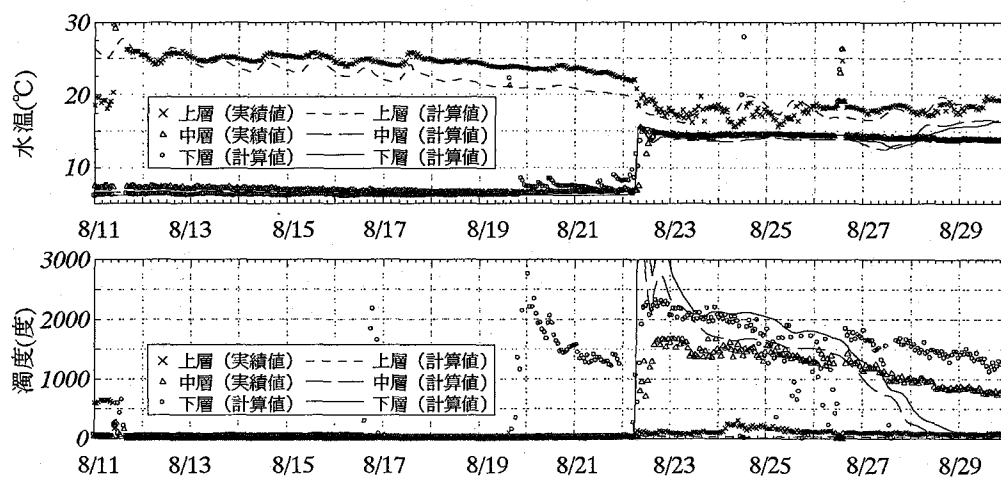


図-6(2) 貯水池湖心における水温・濁度変化の再現結果 (β モデル)

た、平水時については、本研究の中でもまだ解明すべき現象があり、モデルの相違の影響を評価できる結果は得られていない。これらは、今後の課題と考えている。

なお、上記の現象の再現性と共に、実務的検討への適用にあたっては、計算負荷の課題がある。その点で、 β モデルは α モデルに比べ、デメリットを有している。近年のダム建設に伴う環境影響評価や既設ダムの水質保全検討において、数値シミュレーションを用いた現象の再現・対策案の検討では、多様な水文条件を含む長期間を対象として、計算を実施することが求められている。また、濁水対策についても、選択取水設備等によって水温成層の発達を制御して対策とするためには、出水に至るまでの非出水時のシミュレーションも重要な意味を持っている。出水時の高濃度濁水の挙動特性の再現に対して β モデルが有効である、本研究での対象ダムであっても、計算負荷の大きな β モデルのみで対応すると、計算時間と労力が大きい。一方、 α モデルは出水時の再現性に不十分な点があるものの、非出水時を含めた年間の水温成層の再現性には、比較的良好な精度が得られることが、多くの検討で確かめられている。また、計算負荷は β モデルと比べるとはるかに小さい。

今後の本研究の方向性として、両モデルそれぞれの長所・短所を相互に補うため、平常時の計算には α モデルを用い、出水時には β モデルに切り替えるようなハイブリッド式モデルの構築も考えている。その成果が得られた際には、追って報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 松尾直規, 岩佐義郎: 合流部を有する貯水池での富栄養化シミュレーション, 水理講演会論文集, 第29巻, 359-364, 1985.
- 2) 岩佐義朗編著: 数値水理学, 丸善, 1995.
- 3) 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.
- 4) 梅田信, 富岡誠司: ダム貯水池における洪水時濁水シミュレーションモデルの開発, 平成14年度ダム水源地環境技術研究所所報, pp.3-17, 2003.
- 5) 鶴田泰士, 尾島亮太, 陳飛勇, 堀田哲夫: 現地調査データを用いた粒径分布を考慮した濁度-SS関係の検討, 第61回土木学会年次講演会講演概要集, 2005.

(2007.4.5 受付)