

貯水池における濁水現象の将来予測に関する研究*

東北大学 工学部 建築・社会環境工学科 安松 陸史

東北大学 大学院工学研究科 梅田 信

1. はじめに

近年、気候変動の影響により局所的豪雨が頻発するようになり、貯水池内の濁度の上昇や高濁度現象の長期化が問題となっている。いくつかの地域では、集中豪雨により濁度が短期間に急激に上昇した結果、浄水施設の処理能力が追いつかず断水が起こるなどの問題も顕著になりつつある。このようなことを踏まえると、特に水源となっている貯水池における濁水現象の発生状況に関する将来予測を行うことは、今後の安定した水供給の実現のために必要である。ところで、貯水池内での濁質挙動は、水温成層の状態によって大きな影響を受けることが知られている。また流入水に含まれる浮遊懸濁物質(SS)の沈降速度は粒度や濁質の組成によって異なると考えられているが、これを考慮に入れた予測計算は難しい。そこで本研究では鉛直一次元モデルを用いて、気候変動下における将来の貯水池内の水温構造の変化を考慮した貯水池内濁水現象に関する将来予測を行った。

2. 研究対象地域の概要

秋田県にある皆瀬ダムを対象とした。皆瀬ダムは秋田県雄勝郡に位置し、雄物川の支川である皆瀬川上流部のダム湖である。総貯水容量は $3.16 \times 10^7 \text{m}^3$ である。皆瀬ダムの平面形状を図1に示す。皆瀬ダムでは、オリフィスゲート及びクレストゲート(2門)から放流を行っている

ほか、シリンダーゲート(最低飲み口 E.L.224m)を通して発電用の取水も行っている。発電用水は、灌漑期(5月10日~9月6日)では表層取水(水深2.5m)、非灌漑期は最低飲み口で取水している。

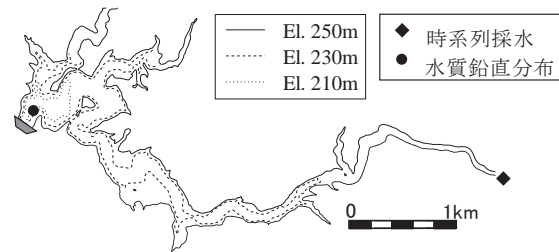


図-1 対象貯水池

3. 解析方法

貯水池の水質に関する数値シミュレーションは、1970年ごろから盛んに行われている。精度やパラメータ数、計算量が異なる様々な手法が開発されてきたが、それらは貯水池内空間の分割の仕方により、ボックス・一次元・二次元・三次元に大別できる¹⁾。これらのモデルは扱える現象や精度が異なるため、数値解析を行う際は、対象とする現象や計算負荷量に応じて使い分ける必要がある。本研究では貯水池を一定の厚さの層を積み重ねたものと考え、鉛直方向の

*Study on prediction of turbidity in reservoirs under future environmental changes, by Rikushi Yasumatsu, Makoto Umeda.

みの変化を考慮する鉛直一次元モデルを採用したが、これは、貯水池内の水温分布は水平方向に一様であり、濁度分布も水平方向への変化に対して鉛直方向への変化が卓越するという見解に基づいた。

鉛直一次元モデルの計算フローについて述べる。まず、初期条件として計算開始時の水位と、各層の水温、濁質を設定する。その後、タイムステップごとの流入量、放流量、気象条件を基に水温、濁質の鉛直拡散計算を行った。なお、タイムステップは60秒とした。

モデルの基礎方程式について、まず、貯水量の収支式は以下の式で表される。

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.1)$$

ここで、 V は貯水量 (m^3)、 Q_{in} は流入量 (m^3/s)、 Q_{out} は放流量 (m^3/s) である。(2.1) 式および皆瀬ダムの貯水量と貯水位の関係より水面の位置が計算される。

各層の水温、濁質の変化は以下の式(2.2)の拡散方程式によって表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K_z}{A} \frac{\partial^2 AT}{\partial z^2} + S \quad (2.2)$$

ここで、 T は水温 ($^{\circ}C$)、 K_z は各層の拡散係数 (m^2/s)、 A は各層の面積 (m^2) である。 S は生成項で、流入出に伴う収支および気象条件から受ける熱収支 ϕ_s を表す。 ϕ_s は、以下の式(2.3)で表される。

$$\phi_s = (1-r)b\phi_I - \phi_L - \phi_e - \phi_c \quad (2.3)$$

ここで、 r は水面の反射率、 b は水面吸収率、 ϕ_I は下向き短波放射量 (日射量) (W/m^2)、 ϕ_L は長波放射量 (W/m^2)、 ϕ_e は潜熱輸送量 (W/m^2)、 ϕ_c は顕熱輸送量 (W/m^2) である。

SSの動きについては、式(2.2)に表した拡散に加えて、沈降および湖底への堆積を考慮する必要があるため、以下の式で表現した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w_{sf} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{K_z}{A} \frac{\partial^2 AC}{\partial z^2} + S_{inout} + S_{sed} \quad (2.4)$$

ここに、 C は各層のSS (mg/L)、 w_{sf} は堆積せずに下層へ移動するSSの沈降速度 (m/s)、 S_{inout} は流入出にともなうSSの収支を表す。 S_{sed} は湖底への堆積による湖水中からのSSの減少を表す項で、以下の式(2.5)で表される。

$$S_{sed} = \frac{Cw_{sd}}{A} \frac{\partial A}{\partial z} \quad (2.5)$$

ただし、 w_{sd} は堆積するSSの沈降速度 (m/s) である。SSの沈降速度の与え方に関しては、密度成層した湖水中における浮遊懸濁物質の沈降挙動について、単純な方法による表現が困難であるということが従来指摘されており、本洪水を対象とした計算においても、実測された鉛直分

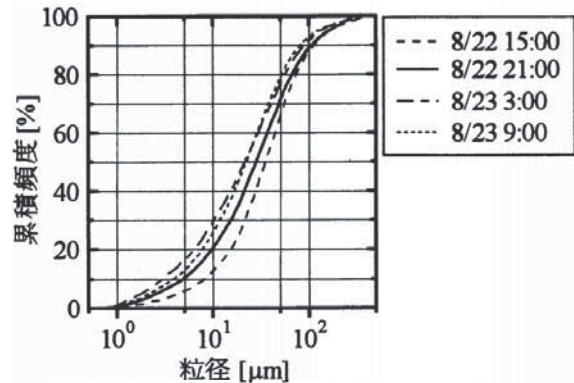


図-2 洪水時の流入地点における濁質の
粒度組成 (梅田ら、2004)

布の変動を十分に表現することが難しかった。そこで、本検討では、湖水中を浮遊している間の沈降速度と堆積する際の沈降速度に異なった値を仮定することで、実測された変動を経験的に再現する方法を採った。浮遊している際の SS の沈降速度 w_{sf} については、水温躍層上での SS の沈降速度が遅いということが経験的に知られている。そこで、現地で計測された濁水の鉛直挙動をもとに、 $w_{sf} = 3.80 \times 10^{-8}(\text{m/s})$ と設定した。一方、堆積する SS の沈降速度 w_{sd} については、流入水の粒度組成の分析結果(図 2)から、ストークスの沈降速度式(2.6)を用いて設定した。その際、流入してくる SS を粒径の大きさに応じて 3 グループに分け、小さい方から $2.87 \times 10^{-6}(\text{m/s})$, $7.17 \times 10^{-5}(\text{m/s})$, $1.15 \times 10^{-3}(\text{m/s})$ の三つの代表沈降速度を設定した。

$$w_{sd} = \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{18\mu} d^2 \quad (2.6)$$

ここで、 ρ_s , ρ_w はそれぞれ SS 密度 (kg/m^3), 水の密度 (kg/m^3), g は重力加速度 (m/s^2), μ は粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), d は SS の粒径 (m)である。図 2 の粒径軸を三区間に等分し、それぞれの区間の中間値を各グループの代表粒径とした。

次に、将来予測の手法について述べる。地球温暖化により平均気温が上昇すると、貯水池への流入水の水温も上昇し、その結果水温躍層の水深が変化することが指摘されている。また、濁質の鉛直分布と水温躍層には深い関係があることが知られている。以上のことから、本検討では地球温暖化が進行した将来の気候条件を想定して、水温、SS の貯水池内挙動の解析を行った。IPCC の第五次報告書では、放射強制力の大きさに応じた複数のシナリオを用意し、それぞれのシナリオについて将来予測がなされた結果が示されている。本論文では、2100 年以降にも放射強制力の上昇が続く「高位参照シナリオ」(RCP8.5)を想定し、貯水池の水環境に関する将来予測を行った。東京大学などが開発している全球気候モデル MIROC(Model for Interdisciplinary Research on Climate)で RCP8.5 シナリオについて将来の気候変化を解析した結果によると、東北地方においては、2050 年ごろまでに平均で約 2.1°C 気温が上昇することが示されている。このことから、本検討では、現在に比べて気温が 2.1°C 上昇する条件を設定して解析を行い、既往の気象条件による解析結果との比較検討を行った。

基準条件のシナリオとして、前章で解析モデルの再現を検討した洪水が発生した 2001 年の実績条件を設定した。これについては、皆瀬ダムの近傍におけるアメダスの気象データおよび皆瀬ダムの実績流入量、放流量を用いて 2001 年の 1 月 1 日から 12 月 31 日までの解析を行った。水瀬ダムでの実績の流入量、貯水位の時系列データを図 3, 図 4 に示した。将来条件としては、基準条件に対して気温の上昇のみを仮定した条件を設定した。貯水池への濁質流入負荷量は、東北地方の 3 つのダム(皆瀬ダム, 三春ダム, セヶ宿ダム)において発生したいくつかの洪水時における流量と濁質の実測データをもとに比流入量を用いた LQ 式(2.7)を作成し、SS の流入時系列を推定した。

$$L = 734.89Q'^{2.0047} \quad (2.7)$$

ここで、 L は比負荷量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{L}/\text{km}^2$), Q' は比流入量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)であるので、

$$L = \frac{CQ}{A}$$

と表される。ここに、 C は濁質 (mg/L), Q は流入量 (m^3/s), A は流域面積 (km^2)である。

また流入河川の水温については過去の皆瀬ダムにおける採水データを用いて、気温からの推定式を作成した。これが将来の気温上昇時にも同じ関係であると仮定し、将来条件における流入水温を推定した。

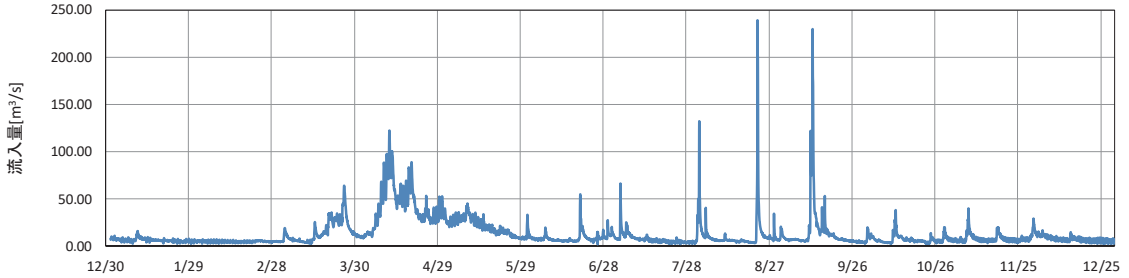


図 3 2001 年流入量時系列データ

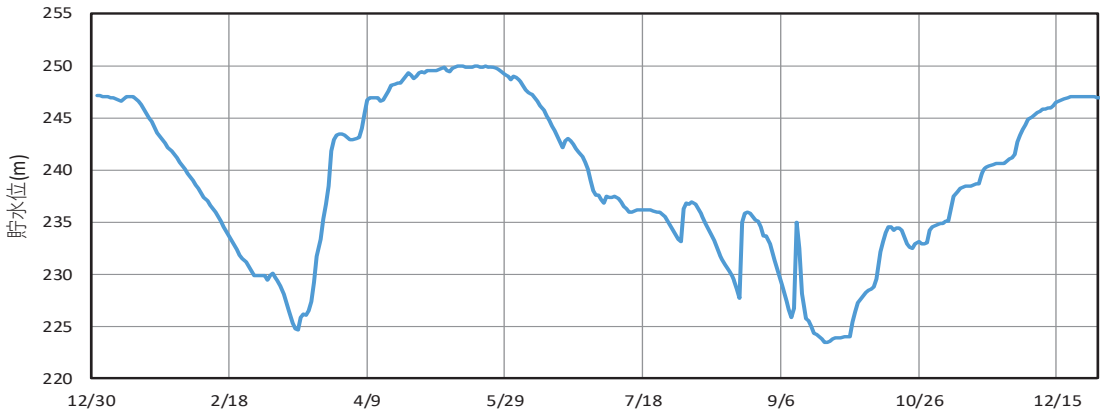


図 4 2001 年貯水位時系列データ

4. シミュレーションモデルの再現計算

鉛直一次元モデルの再現性検証は、2001 年 8 月 22 日に発生した洪水を対象として行った。なお、対象とした洪水時の流入・放流水の採水と分析が梅田ら¹⁾によって行われており、本研究でもこのデータを使用した。その現地観測データを、図 5、図 6 に示した。

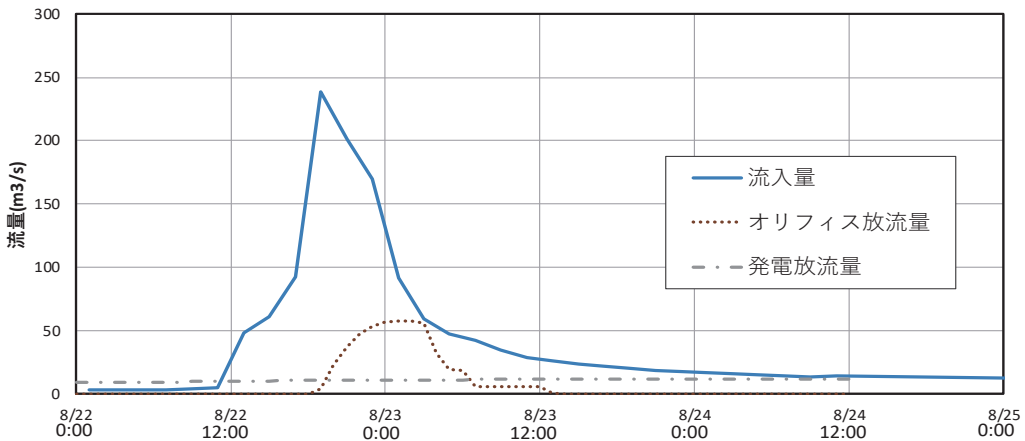


図 5 洪水時流入・放流量時系列データ

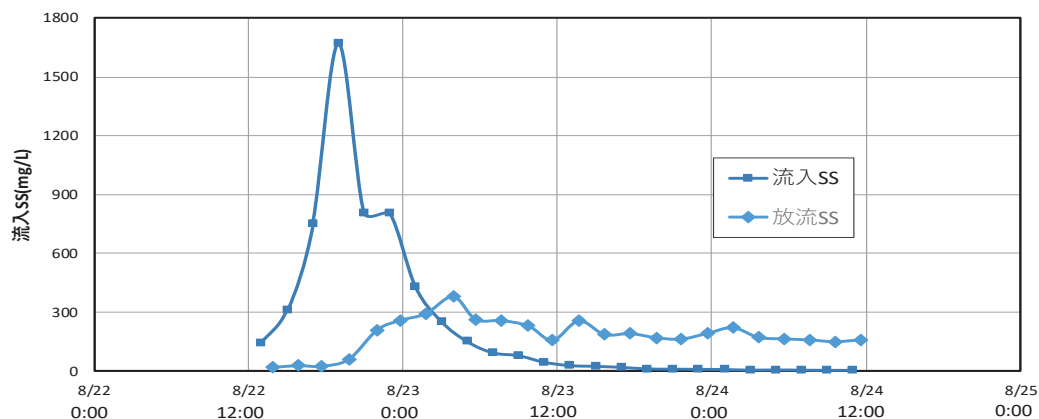


図 6 洪水時流入・放流量時系列データ

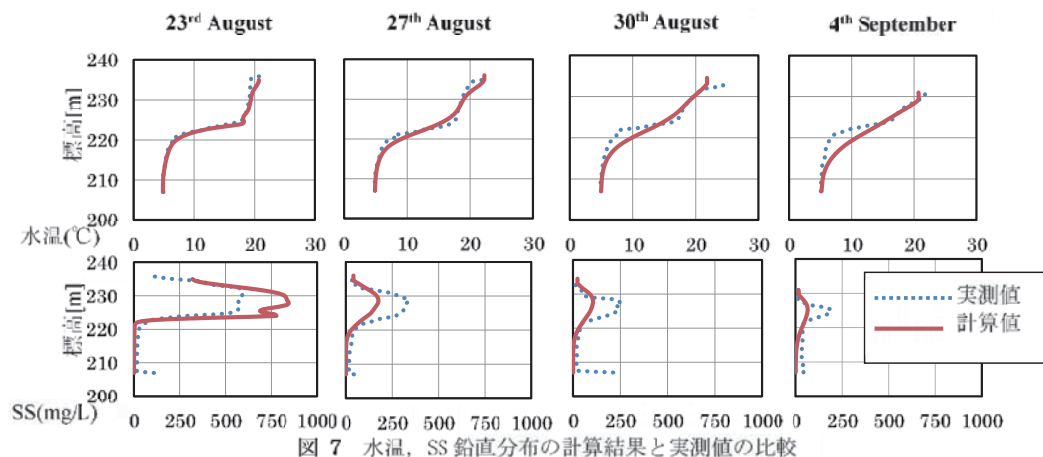


図 7 水温、SS 鉛直分布の計算結果と実測値の比較

再現計算の結果を図 7 に示した。図 7 から、水温の鉛直分布については、良好な精度で再現できているといえる。一方、SS の清澄化過程については、実測値と計算値で誤差が生じていることが読み取れる。しかし、SS が最大になる水深については実測値とよく一致していることから、将来予測を行った際に重要となってくる、鉛直分布の概形の現状と将来との差を考える上では十分だと判断し、将来予測を行った。

5. 将来予測

基準条件および将来条件における計算結果を図 8 に示す。将来条件では、基準条件に比べて同標高地点で水温が 0.5°C ~ 1.5°C 程度上昇しており、変化は表層に近い方が大きかった。本解析では、数値拡散の影響により水温躍層がかなり鈍った形状となっているものの、温暖化影響下では水温躍層の位置が下がるということも示唆される。一方で、濁質の鉛直分布と、洪水後の清澄化過程については、温暖化による影響はほとんど見られなかった。

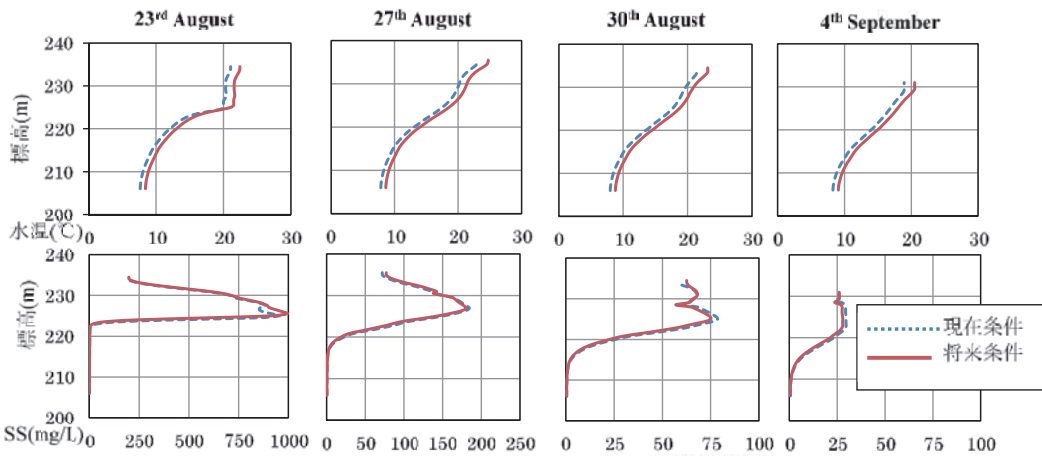


図 8 現在条件と未来条件における水温、SS鉛直分布の比較

6. 考察

本論文では、貯水池における水温と濁質の鉛直分布を、鉛直一次元モデルにより解析し、温暖化による影響について検討した。将来条件としては、平均気温が 2.1°C 上昇した条件を仮定し予測計算を行った。その結果、貯水池内水温は 0.5°C ～ 1.5°C 程度上昇したが、濁質の鉛直分布には気温、水温の上昇の影響は小さかった。これは、今回の検討では温暖化による気象条件の変化として気温上昇のみを考慮しており、日射量など水温の鉛直分布に影響を与えるその他の要素を考えていないということ、また、降雨量について温暖化の進行に伴って無降雨期間の長期化や集中豪雨の強度増加が予測されているが、これらについて考慮していないため、流入量の入力値が現在条件と将来条件で変化していないことが原因であった可能性もある。そのため今後の研究において、気象条件に関して全球気候モデルなどを用いてより正確な将来の条件を設定することで、解析の精度向上を目指す必要がある。

謝辞：本研究は、文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の援助を受けて実施された。記して謝意を表す。

7. 参考文献

- 1) 国土交通省湖沼技術研究会：湖沼における水理・水質管理の技術 資料集，第 4 章 湖沼の水理・水質解析技術，2007.
- 2) 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，pp1363-1368, 2004.