

19. ダム湖における鉛直水温分布の季節変動

青木 一真^{1*}・山田 朋人²

¹北海道大学大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

²北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

* E-mail: narokesoro01@eis.hokudai.ac.jp

水深の深いダム湖は夏季における水温成層の形成や、冬季における鉛直循環など、湖水中の水温構造を季節を通じて変化させている。アオコの増殖や、湖底の貧酸素化、冷水放流などの問題の発生は、表面水温の上昇による密度成層の長期化や、冬季に鉛直循環が発生しないことなど、水温鉛直分布の変化が大きな影響を及ぼす。本研究では全国における観測データの分析や、鉛直次元の水温水質モデルによる計算を用い、全国のダム湖の水温構造や季節的な循環、水質の特徴とその将来変化を評価することが目的である。本稿ではその第一段階として十勝ダムで水温モデルを適用した結果を示す。

Key Words : water temperature, thermocline, heat budget, reservoir

1. はじめに

湖やダム湖は気温や風速、日射などの気象条件の影響を受け、湖水中の水温構造を時々刻々と変化させている。水深の深いダム湖は、春から夏にかけて表面付近に水温がほぼ一様な表水層を形成し、その下には水温が急に低下する温度躍層が存在する。さらにその下層には年間を通じて水温が安定した深水層が存在する。このような水温分布の状態を水温成層と呼ぶ。秋から冬にかけて表面付近の水温が深水層の水温より低下することで、表層と湖底で水が入れ替わる全層循環が発生する。このような水温の鉛直分布の季節変化は、湖水環境に影響を及ぼす。例えば気温上昇による成層の長期化はアオコの増殖、湖底の貧酸素化や、嫌気化によるリンの溶出が顕著になるなどの水資源管理上の問題に繋がる。そのためダム湖は将来、地球温暖化の影響による気象条件の変化により、水温構造の変化や、水質問題が増加することが懸念される。梅田ら¹⁾は全国の37ダムを対象とし、重回帰分析により作成した過去の表層水温とその勾配、クロロフィルa濃度の関係式により、将来では全国的に表層水温の上昇と富栄養化が進行する可能性を示した。本研究は全国における観測データの分析や、鉛直次元の水温分布、水質モデル

による過去や将来の計算を用い、全国におけるダム湖の水温構造や季節的な循環、水質の将来変化を評価することが目的である。本稿ではその第一段階として十勝ダムにおける水温観測データと、鉛直次元の水温解析モデルを適用した結果を示す。

2. 研究手法

(1) 水温解析モデルの概要

鉛直次元の水温解析モデルは主に、水中での水温の拡散現象を計算する熱拡散方程式と、湖面での熱の貯熱量を推定する熱収支式で構成される。

湖面における熱収支は次式で表される。

$$(1 - ref)S \downarrow - (\sigma T_s^4 - L \downarrow) = H + lE + G \quad (1)$$

ここに、 ref : 湖面のアルベド、 $S \downarrow$: 湖面に到達する短波放射量 [Wm^{-2}]、 T_s : 湖面水温 [$^{\circ}C$]、 $L \downarrow$: 湖面に到達する大気からの長波放射量 [Wm^{-2}]、 σT_s^4 : 湖面からの上向きの長波放射量 [Wm^{-2}]、 H : 顕熱輸送量 [Wm^{-2}]、 lE : 潜熱輸送量 [Wm^{-2}]、 G : 貯熱量 [Wm^{-2}] である。短波放射量、長波放射量の推定は近藤の推定式²⁾を用いた。また、式(1)の潜熱量 H 及び顕熱量 lE は次のバルク式により推定した。

$$H = c\rho C_H u (T_s - T_a) \quad (2)$$

$$lE = l\rho C_E u (q_s - q_a) \quad (3)$$

ここに、 c : 空気の比熱[Jkg⁻¹K⁻¹]、 l : 水の気化についての潜熱[Jkg⁻¹]、 ρ : 空気の密度[kgm⁻³]、 u : 風速[ms⁻¹]、 T_a : 気温[K]、 q_s : 湖面温度の飽和比湿[kgkg⁻¹]、 q_a : 大気の比湿[kgkg⁻¹]、 C_H 、 C_E はそれぞれ顕熱及び潜熱のバルク係数[-]である。本研究では、近藤の式³⁾を用い、大気の安定度を考慮して顕熱及び潜熱のバルク係数を計算した。

鉛直一次元の水温の拡散方程式を Henderson-Sellers⁴⁾を参考に次式で示す。研究では陰解法を用いて拡散方程式の数値計算を行った。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ A(K_m + K) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} - \frac{1}{Ac_w \rho_w} \frac{\partial A I}{\partial z} \quad (4)$$

ここに、 $T=T(z,t)$: 水温[°C]、 t : 時間[s]、 z : 深さ[m]、 $A=A(z)$: 深さ z における湖面積[m²]、 c_w : 水の比熱[Jkg⁻¹K⁻¹]、 ρ_w : 水の密度[kgm⁻³]、 $K=K(z,t)$: 渦動拡散係数[m²s⁻¹]、 K_m : 分子拡散係数[m²s⁻¹]である。渦動拡散係数 K は、Henderson-Sellers⁴⁾を参考に、密度成層がない中立状態での渦動拡散係数 K_0 を評価し、次に温度成層時の乱れの抑制の効果を評価することで計算した。 $I=I(z,t)$ は日射による湖中の熱フラックス[Wm⁻²]であり、次式のように湖水中では指数関数的に減少する。

$$I(z,t) = (1-\beta)(1-ref)S \downarrow e^{-\eta z} \quad (5)$$

ここに、 β : 短波放射のうち水面近傍で吸収される割合、 η : 消散係数[m⁻¹]である。

(2) 解析の条件

対象ダムは北海道の十勝川本流の上流部に位置する十勝ダムである。観測データは国土交通省のダム諸量データベースにおける1993年から2020年までの月に1回程度の観測データを用いた。水温解析モデルは2019年から2020年までの2年間を対象とし、計算に使用する気圧、湿度は帯広測候所の観測データを用い、気温、日照時間はアメダスのぬかびら源泉郷の観測データを用いた。風速についてはアメダスの新得、鹿追、駒場、上士幌の4地点の平均値を使用した。鉛直方向の格子間隔は0.5m、計算時間ステップは3600秒とした。

3. 結果

図-1に6月における、1993年から2020年までの水温の鉛直分布の観測結果を重ね合わせた図を示す。6月は成層状態の傾向が進み、水深30m付近よりも表層近くの方が水温の年ごとのばらつきが大きく水深0.1mでは最大値と最小値で約8°Cの差があった。図-2は2020年7月14日における水温の鉛直分布の観測結果と計算結果である。計算結果と比較して観測結果は、水深5mから15mにかけての温度躍層での水温の変化が緩やかであり、15mより深いところでは観測結果の方が水温が高い。

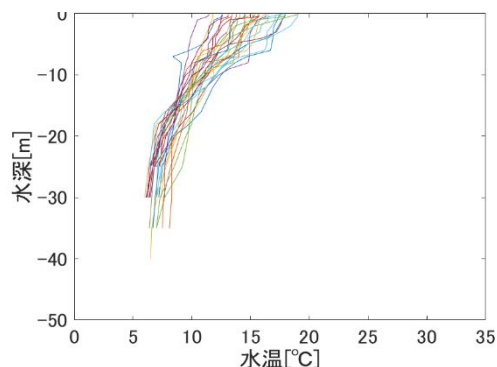


図-1 十勝ダムにおける1993年から2020年の6月の水温の観測結果を重ね合わせた図

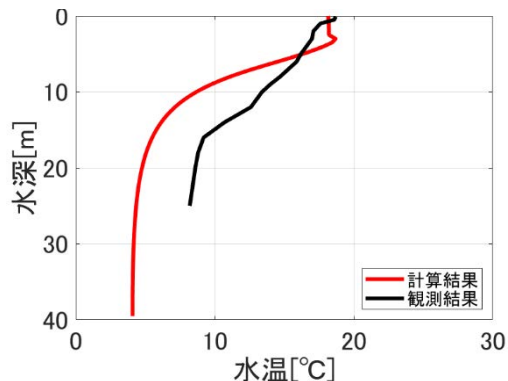


図-2 十勝ダムにおける2020年7月14日の観測データと計算結果を重ね合わせた図

4. まとめ

本研究の水温モデルは対流による混合や、植物プランクトンによる光の消散係数への影響など、考慮していない要素がある。今後はこれらの要素をモデルに導入し、どのようなダムで水温構造を説明可能か、ダムの特徴とモデルの要素を考察、整理しつつ、全国規模、かつ複数年にわたる長期計算を行うことでダム湖の全国的な水温構造や季節的な循環、水質の特徴を明らかにすることが目標である。

謝辞：本研究は JSPS KAKENHI Grant Number 22H01594、統合的気候モデル高度化研究プログラムの助成を受けた。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) 梅田信, 落合雄太: 気候変動による国内のダム湖水質への影響評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 68, No.5, I_127-I_135, 2012
- 2) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994
- 3) Kondo J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-layer meteorology*, Vol. 9, pp. 91-112, 1975
- 4) Henderson-Sellers, B.: New formulation of eddy diffusion thermocline models, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 9, Issue 6, pp441-446, 1985