

水理学的条件の異なるダム湖における水温分布の再現計算*

東北大学大学院工学研究科 落合雄太

東北大学大学院工学研究科 梅田 信

1. はじめに

気候変動の影響は世界的に顕在化しつつあり、様々な分野への影響が懸念されている。IPCC 第4次評価報告書によると、世界平均地上気温は1906年から2005年までの100年間で0.74°C上昇している¹⁾。気象庁によると、日本の年平均気温は2009年までの100年間で1.13°C上昇している²⁾。長期間の観測より、地球温暖化は確実に進行していることがわかる。将来の気温上昇に関して、IPCC 第4次評価報告書では、世界平均地上気温は100年間で約1.8度から約4.0度まで上昇することが予測されている¹⁾。

特に水資源に対しては、生活用水や飲料水の供給に対する影響だけでなく、農業、産業、健康などの多くの分野に対しても影響が現れると考えられる。そのため、水資源に対する温暖化の影響を検討しておくことは重要である。一方、ダム湖は日本における水道水源のほぼ半分を担っている。しかし河川などとは異なり、閉鎖的な物理環境をもつため、ダム湖で生じた水質悪化の影響は解消されにくいと考えられるため、水質悪化が顕著になる前に予測しておく必要がある。

貯水池に対する気候変動の影響の一つとして水温上昇が予測される。湖内の水温上昇により、藻類の増殖が増大や藻類種構成や優先種の変化が生じ、アオコ等の水質問題が増加する可能性がある³⁾。気候変動の影響として、貯水池の水温成層の長期化も推測される。水温成層により貯水池内の鉛直混合が阻害され、下層では貧酸素化やリンなどの蓄積が生じ、貯水池内の水質悪化が懸念される。そこで気候変動による貯水池の水温変化の予測が必要である。

近年では、水理解析モデルに将来の気候条件を予測する数値気候モデルなどの結果を入力することにより、ダム湖に対する気候変動の影響を予測する研究が取り組まれている（例えば、浜口ら⁴⁾、Komatsu et al⁵⁾）。しかしながら、これらの研究は単一のダム湖を対象として行われている場合が多く、複数を対象とした研究は稀である。そこで本研究では、全国的な多数のダム湖を対象として、水理解析モデルを用いた。気候変動による水質変化の予測を行うことを目標としている。本研究より、温暖化に対して脆弱な地域等の条件あるいは貯水池の特性を示すことができる可能性がある。このような目標に対する第一段階として、本稿では、今後用いるダム湖水温の解析モデルの再現性について検討した結果を示す。

2. 検討方法

本研究では鉛直1次元の解析モデルによる水温分布の再現性を検討する。図-1に計算の流れを示す。貯水量の収支式は以下の式で表される。

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

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。(1)式により水面の位置が計

*Numerical simulation of water temperature distribution in the dam with different hydrological conditions by Yuta Ochiai, Makoto Umeda

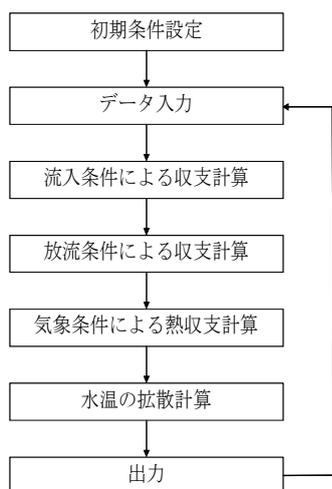


図-1 計算の流れ

算される。

気象条件により生じる水面での熱収支 S は以下の式で表される。

$$S = (1 - a_r)\beta\varphi_0 - \varphi_e - \varphi_c - \varphi_{ra} \quad (2)$$

ここで、 a_r は水面反射率、 β は水面吸収率、 φ_0 は日射量 (Kcal/m²/day)、 φ_e は蒸発による熱損失 (Kcal/m²/day)、 φ_c は伝導による熱損失 (Kcal/m²/day)、 φ_{ra} は有効逆輻射 (Kcal/m²/day) である。

蒸発および伝導による熱損失 $\varphi_e + \varphi_c$ は以下の式で表される。

$$\varphi_e + \varphi_c = (0.000308 + 0.000185W)\rho(e_s + \Psi e_a) \left\{ L_v + CT_s + \frac{269.1(T_s - T_a)}{(e_s - \Psi e_a)} \right\} \quad (3)$$

ここで、 W は風速 (m/s)、 e_s は表層水温に相当する飽和蒸気圧 (mmHg)、 e_a は気温に相当する飽和蒸気圧 (mmHg)、 Ψ は相対湿度、 L_v は蒸発の潜熱 (Kcal/Kg)、 T_s は表層水温 (°C)、 T_a は気温 (°C) である。 e_s 、 e_a 、 L_v は以下の式で与えられる。

$$e_s \text{ (hPa)} = 6.112 \exp\left\{ \frac{17.67T_s}{T_s + 243.5} \right\} \quad (4)$$

$$e_a \text{ (hPa)} = 6.112 \exp\left\{ \frac{17.67T_a}{T_a + 243.5} \right\} \quad (5)$$

$$L_v = 595.9 - 0.54T_s \quad (6)$$

有効逆輻射 φ_{ra} は以下の式で表わされる。

$$\varphi_{ra} = 0.97k \left\{ T_w^4 - 0.937 \times 10^{-5} \times T_a^6 (1.0 + 0.17C_d^2) \right\} \quad (7)$$

ここで、 k は Stefan Boltzman 定数 (Kcal/m²/day/K)、 T_w は表面水温 (K)、 T_a は気温 (K)、 C_d は雲量である。標高 y に到達する輻射熱 φ_y は次式を用いた。

$$\varphi_{ys} = (1 - \beta)\varphi_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\} \quad (8)$$

ここで、 η は減衰係数 (m⁻¹) である。パラメータはそれぞれ一般に用いられる値、 $a_r : 0.06$ 、 $\beta : 0.5$ 、 $\eta : 0.5$ を用いた。

各層毎の水温は以下の拡散方程式により表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{A} \frac{\partial^2 AT}{\partial z^2} \quad (9)$$

ここで T は水温、 K は拡散係数、 A は各層の面積である。

本研究では、国土交通省が管理する多目的ダムを対象とする。検討対象とするダムを選定するために、表-1 に示すように常時満水位貯水容量と回転率で、それぞれのダムを A~F に分類した。常時満水位貯水容量は

表-1 常時満水位貯水容量と回転率によるダム湖の分類

		常時満水位貯水容量	
		5000 万 m ³ 未満	5000 万 m ³ 以上
回 転 率	10 未満	A	B
	10 以上 30 未満	C	D
	30 以上	E	F

表-2 対象ダムと対象年

対象ダム	地域	分類	平均的な流況年	洪水期に出水が多い年	洪水期に出水が少ない年
辺野喜ダム	沖縄	A	平成4年	平成3年	平成2年
川治ダム	関東	B	平成2年	平成10年	平成8年
早明浦ダム	四国	B	平成9年	平成11年	平成8年
石淵ダム	東北	C	平成13年	平成10年	平成8年

5000 万 m³ 未満, 5000 万 m³ 以上で分類した. 回転率は, 10 未満, 10 以上 30 未満, 30 以上で分類した. 回転率 10 未満の湖沼では水温成層がほぼ形成され, 回転率 10 以上 30 未満の湖沼では水温成層が形成される可能性があり, 回転率 30 以上の湖沼では水温成層はほぼ形成されない. D, E, F に分類されるダム湖が非常に少ない. そこで今回は A, B, C に分類されるダム湖を対象とした. 表-2 にモデルの計算で対象としたダム湖と計算象年をまとめる. 対象としたダムについて, 平均的な流況の年, 洪水時に出水が多く, 出水による攪乱の影響が大きいと考えられる年, 洪水期に出水が少なく, 熱収支の影響が大きいと考えられる年を対象として, それぞれ 3 年の検証計算を行った.

初期水位, 水温鉛直分布は各ダムの対象年における 1 月の観測データを用い, SS 鉛直分布は湖内全層一様に 0mg/l とした. 水理条件 (流入量, 放流量) は各ダムの管理所のデータを用いた. 流入水温は過去数年の調査により得られた以下の流入水温 T_m と 3 日移動平均気温 T_a の関係式により設定した.

$$T_m = aT_a + b \quad (10)$$

ここで, a, b は定数である. 川治ダム, 早明浦ダム, 辺野喜ダムにおける流入 SS は以下の流入量 Q との関係式により設定した.

$$SS = cQ^d \quad (11)$$

ここで, c, d は定数である. 石淵ダムにおける流入 SS は以下の L-q 式より水質負荷量 L を算出し, 設定した.

$$L = eq^f \quad (12)$$

ここで, e, f は定数, q は比流量 (m³/s/km²) である. それぞれのダムにおける定数を表-3 から表-6 にまとめた. それぞれのダム管理所で計測されたデータまたは気象庁のデータを用いた. 鉛直のメッシュ間隔は $\Delta z = 0.5\text{m}$, 時間ステップは $\Delta t = 3600\text{s}$ とした.

表-3 定数 (辺野喜ダム)

a	b	c	d
0.83	3.2732	10.204	0.4153

表-4 定数 (川治ダム)

a	b	c	d
0.6096	3.9838	1.3905	1.2792

表-5 定数 (早明浦ダム)

a		b		c		d	
1月~8月	9月~12月	1月~8月	9月~12月	$Q < 30\text{m}^3/\text{s}$	$Q \geq 30\text{m}^3/\text{s}$	$Q < 30\text{m}^3/\text{s}$	$Q \geq 30\text{m}^3/\text{s}$
0.682	0.588	2.273	6.573	4.00	0.25	0.12	0.93

表-6 定数 (石淵ダム)

a			
胆沢川		前川	
非融雪期	融雪期	非融雪期	融雪期
0.679	0.68	0.68	0.674

b					
胆沢川			前川		
非融雪期		融雪期	非融雪期		融雪期
2.483		0.602	2.798		0.944
e					
胆沢川				前川	
非融雪期		融雪期		非融雪期	融雪期
$q < 0.1\text{m}^3/\text{s}$	$q \geq 0.1\text{m}^3/\text{s}$	$q < 0.1\text{m}^3/\text{s}$	$q \geq 0.1\text{m}^3/\text{s}$	80	4.81
16.2	233	5.67	61		
f					
胆沢川				前川	
非融雪期		融雪期		非融雪期	融雪期
$q < 0.1\text{m}^3/\text{s}$	$q \geq 0.1\text{m}^3/\text{s}$	$q < 0.1\text{m}^3/\text{s}$	$q \geq 0.1\text{m}^3/\text{s}$	2	1.41
1.43	2.59	1.15	2.18		

3. 計算結果

図-3 に各ダムの洪水期に出水が多い年の1ヶ月ごとの水温鉛直分布の計算結果を示す。1年を通して計算結果は概ね実測値と一致するような結果となった。夏期にはいずれの対象ダムにおいても、水温成層が形成される可能性がある。水温成層が形成される場合、水温躍層の位置をうまく再現することが出来なかった。本解析モデルでは、湖水の流動を十分に表現しきれないため、大きな出水を含む場合、水温躍層の位置に誤差が出やすい結果となったと考えられる。

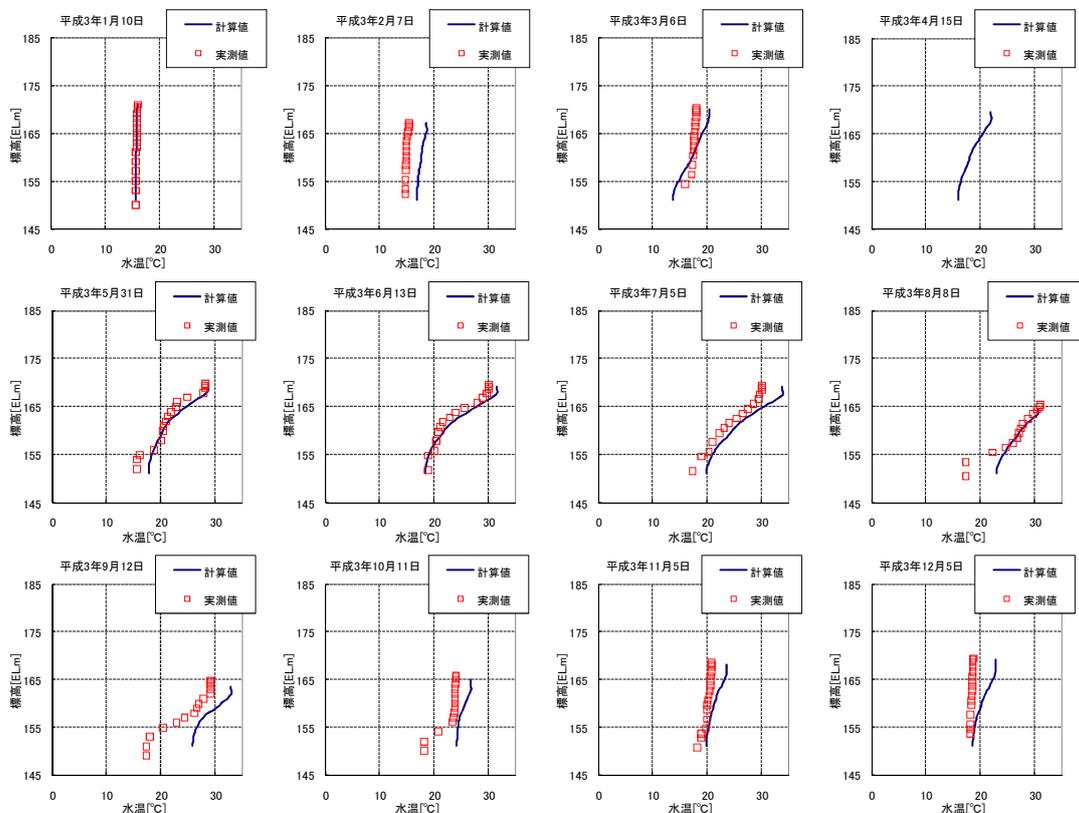


図-3(a) 水温鉛直分布 (辺野喜ダム, 平成3年)

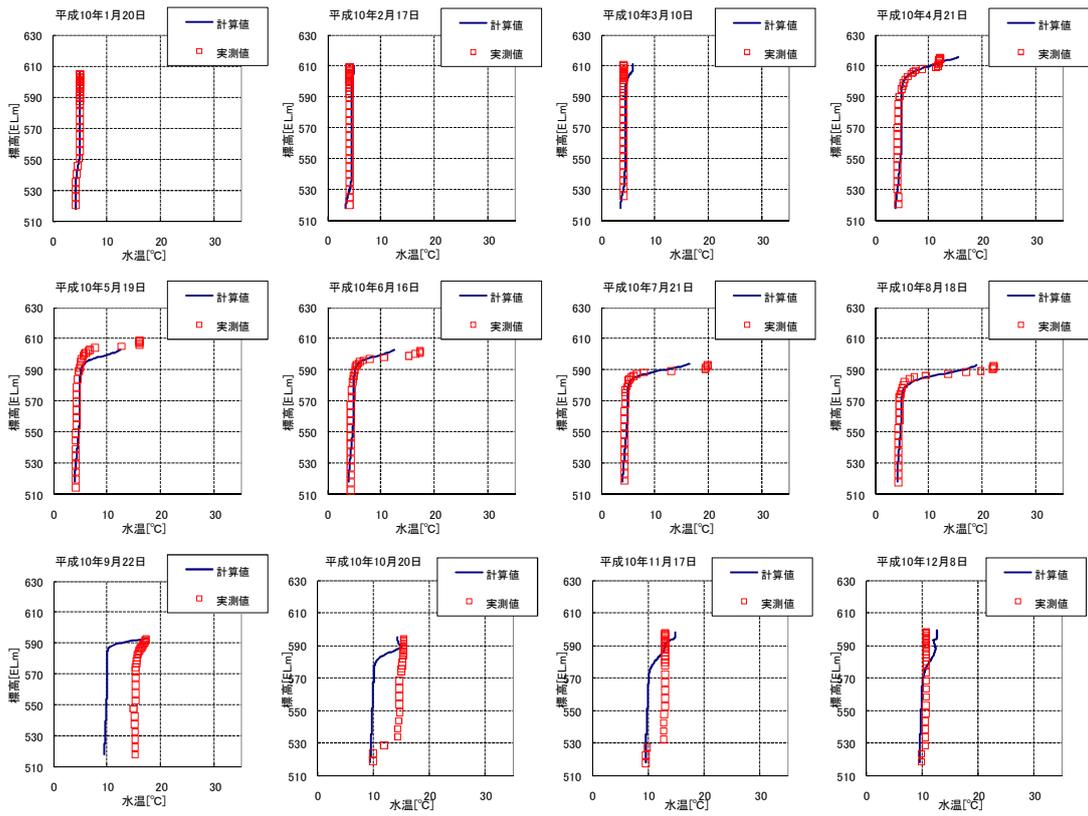


図-3(b) 水温鉛直分布 (川治ダム, 平成10年)

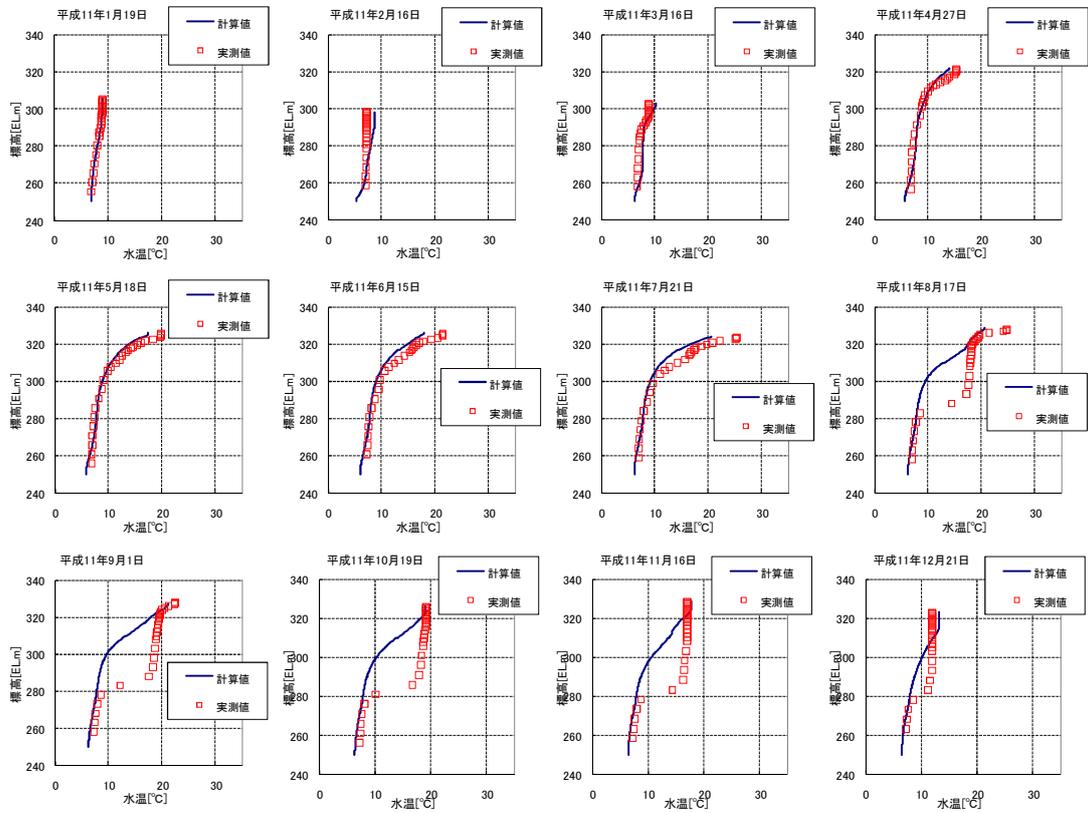


図-3(c) 水温鉛直分布 (早明浦ダム, 平成11年)

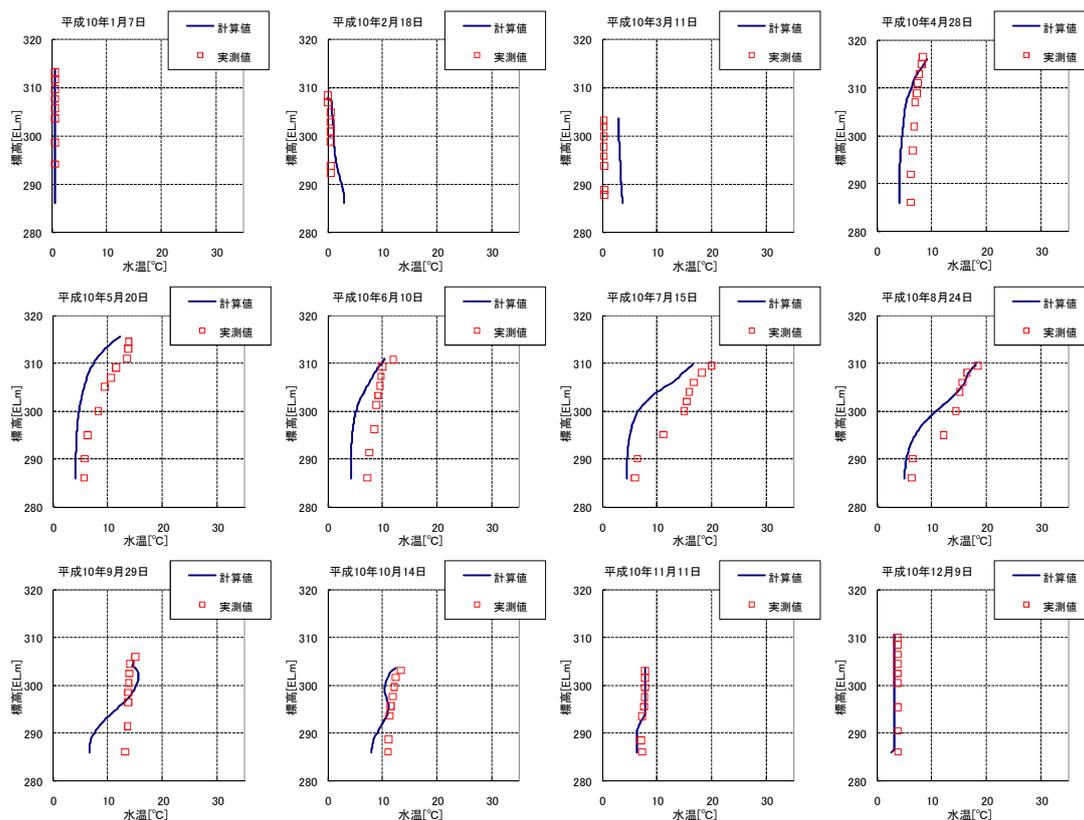


図-3(d) 水温鉛直分布 (石淵ダム, 平成10年)

4. まとめ

条件の異なる4つのダム湖を対象として鉛直水温分布の再現計算を行った。結果はどのダム湖においても、1年を通して概ね実測値を一致した。本研究の水温予測モデルが鉛直水温分布の予測手段として用いることができることを示した。しかしながら大きな出水を含む場合、湖水の流動を十分に表現しきれないため、水温躍層の位置がうまく再現することができなかった。今後はモデルを改良し、水温躍層の再現する必要がある。

謝辞：本研究は、環境省の環境研究総合推進費（S-8-1（3））の支援により実施された。

参考文献

- 1) 環境省：IPCC第4次評価報告書 統合報告書 概要，2007。
- 2) 気象庁：日本の年平均気温，http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/an_jpn.html
- 3) 梅田信，富岡誠司：貯水池における水質環境要素と藻類増殖の関係，水工学論文集，第51巻，pp.1373-1378，2007。
- 4) 浜口俊雄，小尻利治，森英祐：ダム貯水池モデルを組み込んだ流域環境評価モデリング，京都大学防災研究所年報，第51号B，pp737-pp747，2008。
- 5) Eiji Komatsu, Takehiko Fukushima, Hideo Harasawa：A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality，ECOLOGICAL MODELLING，209，351-336，2007。