ダム貯水池における 水温予測精度向上のための放射推定

IMPROVEMENTS OF RADIATION ESTIMATIONS FOR A SIMULATION OF WATER TEMPERATURE IN A RESERVOIR

矢島 啓¹・山本 茂友²

Hiroshi YAJIMA and Shigetomo YAMAMOTO

¹正会員 博(工) 鳥取大学大学院准教授 社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)
西オーストラリア大学 Centre for Water Research 特任上級研究員

²学生会員 鳥取大学大学院 社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

The heat budget at water surface is composed of short- and long-wave radiations and latent- and sensible-heats. In this paper we improved the estimation of short- and long-wave radiations that have major effects on the water temperature change in a reservoir by analyzing observed radiation data at Tono Reservoir and simulating water temperature in the reservoir. The results are summarized as follows: 1) we can improve short-wave albedo by an equation that takes solar zenith angle, wind speed, humidity and scattered light ratio as parameters, 2) downward long-wave radiation estimation can be improved by considering not only cloudiness but also air temperature and proper emissivity, 3) the observed emissivity for upward long-wave radiation was 0.99 and 4) the accuracy of the downward long-wave radiation has more effect for improving water temperature estimation in a reservoir than short-wave albedo.

Key Words: short- and long-wave radiations, albedo, water surface, reservoir, water temperature

1. はじめに

水面における熱収支は、短波放射、長波放射、潜熱、顕熱によって構成されており、この中で大きなエネルギーを占めるのは、短波放射、および長波放射である。地球大気の上端で、太陽光に垂直な面に入射する太陽のエネルギーは平均して $1.37 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ (太陽定数) である。そして、地球大気や雲、エアロゾルなどによる散乱・反射・吸収の結果、中緯度帯では最大 $1,000 \text{ W/m}^2$ 以上のエネルギーが地球表面に達する。地球表面の約7割である海面を含む水面に注目すると、水面に達した短波放射は一部が反射し、残りが透過および水に吸収される。この水面に入射する放射と、水面から反射される放射の比はアルベドと呼ばれる。

海面におけるアルベドは、大気と海洋の熱収支を大きく変え大気循環に大きな影響を与えることから様々な研究者による実証研究がなされている。PayneやTaylorらは、太陽の天頂角を用いてアルベドをモデル化した¹⁾²⁾、Hansenらは、風の影響で水面が波立ち短波放射の入射角が変わることでアルベドが小さくなることを考慮したモデルを提案した³⁾。さらにJinらは、天頂角や風速だけでなく、大気のエアロゾルや雲が短波放射を散乱させるこ

とでアルベドに影響を与え、415nmの波長では表層の植物プランクトンによって短波放射が吸収されアルベドが減少することを示した⁴⁾。しかしながら、これらの多くの研究は海面を対象としており、一般に規模の小さな水面である貯水池や湖沼における水温予測計算では、季節的な太陽高度の違いのみを考慮してアルベドを評価することが多い⁵⁾。

一方、水面に達する大気からの長波放射は、気温と水蒸気圧によって増減する。具体的には気温と水蒸気圧が高い場合は増加し、低い場合は減少することが知られている⁶⁾。このことから、気温と水蒸気圧を変数とする複数の下向き長波放射のモデルが提案されている。Silvaは、快晴日のデータを用いて下向き長波放射のモデル化を行った⁷⁾。また、Duarteらは、快晴日と曇天日のデータを解析し下向き長波放射のモデル化を行った⁸⁾。しかしながら、下向き長波放射の推定式は経験式であるため、あらゆる環境で適用可能であるとはいえない。また、ダム貯水池や湖沼での詳細な長波放射の研究はなされておらず、さらに、長波放射の観測自体行われていない場合が多い。そのためダム貯水池の長波放射推定には、国外の研究データから構築された式を用いることが多い⁹⁾。

以上のことから、ダム貯水池や湖沼において精度の高い水温の予測計算を行うにはアルベドの変動を考慮し、

観測地点に合った長波放射の推定式を構築する必要がある。また、ダム貯水池においては、精度の高い水温を予測することで、放流水の水温制御の効果的な運用に繋がると考えられる。そこで、本研究では主な気象要素を水面上で計測している殿ダム貯水池(鳥取市東部に位置)を対象に、実測データを用いて短波アルベドと長波放射の推定式を構築し、その推定精度を評価する。また、推定式の一般性を確かめるために、対象年度を変えて構築した推定式を適用する。さらに、それぞれの構築された推定式を用いて、ダム貯水池における水温予測精度を3次元水理計算モデル(ELCOM)でシミュレーションを行い、放射推定精度が水温予測に与える影響を評価する。

2. 対象ダム貯水池と使用データおよび検討方法

(1) 研究の対象ダム貯水池

殿ダム(北緯35度26分57秒, 東経134度20分32秒)は、国土交通省が鳥取市内に建設し、平成23年度から運用を行っている多目的のロックフィルダムである。湛水面積0.64km², 総貯水容量1240万m³, 有効貯水容量1120万m³, 平常時最高水位(EL 182.8m)における最大水深は約37.8mである¹⁰⁾(図-1参照)。

(2) 使用データ

a) 気象データ

殿ダム完成時から網場付近に設けられたフロート上(図-2)で、風向風速、気温、湿度、気圧、4成分の放射量(短波と長波のそれぞれ上向きと下向き)を10分間隔で観測している。本研究において、予備検討からアルベドにあまり寄与しないことが示唆された風向を除いた、風速、気温、湿度、気圧、4成分の放射量の観測値を解析に使用する。さらに、短波放射が散乱することで、短波アルベドに影響があるため⁴⁾, 全天日射量に対する散乱光の割合も使用する。ただし、この観測値はないため、まず、緯度、月日、気圧などから全天日射量求め、それをもとに湿度や太陽の天頂角から散乱光成分を求める⁹⁾。

また、殿ダムで観測されていない雲量、視程は鳥取地方气象台で3時間ごと(ただし0時は観測されていない)に観測されたデータを使用した。また、雲量0+は0.5、雲量10+は9.5として扱った。

b) 水質データ

気象観測位置から約200m下流の選択取水塔側面において、水面からEL.160mの範囲において、水温、濁度、電気伝導度、Chl.a、溶存酸素、pHの6水質項目を最小1時間間隔で観測している。水質データからは水面の水温と短波アルベドに影響を及ぼすと考えられる濁度、Chl.aを解析に使用する。ただし、気象と水質の観測位置の違いによる差異は小さいと考えられるため、ここ

では位置の違いによる影響を考慮しない。

(3) 放射推定式の検討方法

a) 短波アルベドの推定方法

推定式の構築は、重回帰分析を用いて行う。ただし、多重共線性の問題から、得られたデータ全てを短波アルベドの説明変数とすることはできない可能性がある。この多重共線性に関する指標として、VIF(Variance Inflation Factor)がある。VIFが大きいほど多重共線性の影響があり、一般にVIFが5より大きいと多重共線性の可能性があるとされている¹¹⁾。そこで本研究では、まず、全ての変数のVIFが5以下になるよう多変量解析ソフトSPSS Statistics ver.21を用いて変数の選定を行う。

次に、選定された変数を用いて、式(1a)、式(1b)、式(1c)に示す3の形式による推定式を用いて、短波アルベドの推定式を構築する。

$$a_1 = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i \quad (1a)$$

$$a_2 = \exp(a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i) \quad (1b)$$

$$a_3 = a_1x_1(1-y)^{b_1} + a_2x_2(1-y)^{b_2} + \dots + a_ix_i(1-y)^{b_i} \quad (1c)$$

ここで、 a_1, a_2, a_3 はアルベド、 $x_1, x_2, \dots, x_i$ は天頂角の余弦以外の短波アルベドの説明変数、 y は天頂角の余弦、 $a_1, a_2, \dots, a_i$ と $b_1, b_2, \dots, b_i$ は係数である。

式(1a)は線形型、式(1b)は指数型、式(1c)は全ての項に天頂角の余弦の変数を含むモデルである。これは、天頂角の大きさによって各変数の短波アルベドに与える影響

図-1 殿ダム貯水池の位置

図-2 殿ダム貯水池の気象観測装置

が異なることを反映するためである。

b) 下向き長波放射の推定方法

大気中には温室効果気体があり、水蒸気や二酸化炭素などが長波放射を放出する。また、温室効果気体の中でも長波放射に最も寄与するのは水蒸気である。さらに、水蒸気に比べ、雲は放射量が大きいので雲の効果も考慮した式(2a)、式(2b)が一般的に下向き長波放射の推定式として使用されている⁸⁾。

$$L_{D1} = L(1 + aC^b) \quad (2a)$$

$$L_{D2} = L(1 - C^r) + \delta C^r \sigma T_a^4 \quad (2b)$$

$$L = \varepsilon \sigma T_a^4 \quad (2c)$$

ここで、 L_{D1} 、 L_{D2} は下向き長波放射(W/m²)、 ε は大気の射出率、 T_a は気温(K)、 C は雲量(0-1)、 σ はステファン・ボルツマン定数=5.67×10⁻⁸(W/m²K⁴)、 a 、 b 、 r 、 δ 、は係数である。

さらに、式(2c)の変数である ε は、水蒸気量が多いと黒体放射($\varepsilon=1$)に近づき、水蒸気量が少ないと小さくなる。そのため、 ε は様々な推定式が提案されている。そこで、ダム貯水池に最も適した ε を検討するため、以下の9つの推定式について評価を行う。

$$\varepsilon_1 = 0.605 + 0.048\sqrt{e_a} \quad (3a)^{12)}$$

$$\varepsilon_2 = 1 - 0.261 \exp(-0.000777(273 - T_a)^2) \quad (3b)^{13)}$$

$$\varepsilon_3 = 1.24(e_a/T_a) \quad (3c)^{14)}$$

$$\varepsilon_4 = 0.83 - 0.18 \times 10^{-0.067e_a/10} \quad (3d)^{15)}$$

$$\varepsilon_5 = 0.52 + 0.205\sqrt{e_a/10} \quad (3e)^{12)}$$

$$\varepsilon_6 = 1.723(e_a/10T_a)^{1/7} \quad (3f)^{14)}$$

$$\varepsilon_7 = 0.79 - 0.17 \exp(-0.96e_a/10) \quad (3g)^{16)}$$

$$\varepsilon_8 = 0.7 + 0.0000595e_a \exp(1500/T_a) \quad (3h)^{17)}$$

$$\varepsilon_9 = 0.92 - 0.7 \times 10^{-1.2e_a/10} \quad (3i)^{18)}$$

ここで、 e_a は水蒸気圧(hPa)、 T_a は気温(K)を示す。

推定式の構築は式(2a)と式(2b)の下向き長波放射の推定式2ケースと式(3a)～式(3i)の射出率の推定式9ケースを組み合わせ、合計18ケースの重回帰分析を行い、係数 a 、 b 、 r 、 δ を決定し式の構築を行う。

c) 上向き長波放射の推定方法

上向き長波放射の推定式を式(4)に示す。

$$L_U = \varepsilon_w \sigma T_w^4 \quad (4)$$

ここで、 L_U は上向き長波放射(W/m²)、 ε_w は水面の射出率、 T_w は水面の水温(K)である。上向き長波放射の推定方法は、ダム貯水池で観測された水面の水温と上向き長波放射から、 ε_w の平均値を求める。

d) 精度の検討方法

上に示したa)～c)の各推定式の精度の検討は、各推定値と観測値の比較から、RMSE(残差標準偏差)、AE(絶対誤差)、R²(決定係数)を求めて行う。また、各推定式の

構築は2012年度(2012年4月1日～2013年3月31日)を対象とする。また、構築された推定式の一般性の確認は、2013年度(2013年4月1日～2014年3月31日)を対象とする。さらに、放射推定精度が水温に与える影響を評価するため、構築された各推定式のうち、最も精度が高い推定式について、短波アルベドと下向き長波放射、それぞれ1つずつ選択し水温のシミュレーションを行う。ただし、上向きの長波放射については ε_w を、観測値から得られた平均値に変更し評価することとする。

(4) 3次元水理計算モデルELCOMによる水温計算の方法

水温の再現計算には西オーストラリア大学Centre for Water Researchで開発されたELCOMを用いる。

a) ELCOMの概要⁹⁾

ELCOMは様々な環境外力に応じて変動する成層化された水塊の時間的挙動を解析するために適用される流体力学および熱力学の数値計算モデルである。流れ場の数値計算には、静水圧近似を仮定した非圧縮性流体に対する非定常ナビエ・ストークス方程式を解いている。モデリング過程には大気圧、コリオリ力、潮汐、風によるせん断力、水表面における熱収支、塩分や熱量、その他スカラー量の輸送、流入および流出を含んでいる。以下にELCOMで用いられている短波放射および長波放射に関する式を示す。

・短波アルベド

$$\alpha = 0.08 + 0.02 \sin\left(\frac{2\pi j}{D} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

ここで D は365、 j は1年 j 番目の日を表す。

・短波放射の水深方向への熱輸送

$$S_D(z) = S_{net} \exp(-\eta z) \quad (7)$$

ここで、 S_D は短波放射(W/m²)、 S_{net} は正味の短波放射(W/m²)、 z は水深(m)、 η は熱輸送量に対する消散係数(m⁻¹)である。

ELCOMでは波長ごとに熱輸送量に対する消散係数を設定することができ、波長にはPAR(0.4~0.7μm)、NIR(0.7~2.5μm)、UVA(0.32~0.4μm)、UVB(0.28~0.32μm)の4種類がある。デフォルトでは、PARの消散係数は0.25m⁻¹、NIRの消散係数を1.0m⁻¹、UVAの消散係数を1.0m⁻¹、UVBの消散係数を2.5m⁻¹である。

・長波放射

$$L_{DE} = L(1 + 0.17C^2) \quad (8a)$$

$$\varepsilon_E = 9.37 \times 10^{-6} T_a^2 \quad (8b)$$

$$L_{UE} = \varepsilon_w \sigma T_w^4 \quad (8c)$$

ここで、 L_{DE} は下向き長波放射(W/m²)、 ε_E は大気の射出率、 L_{UE} は上向き長波放射(W/m²)、 ε_w は水面の射出率であり0.96である。

b) 計算条件の設定

計算のための貯水池形状のモデルグリッドは、全領域一様の水平方向に20m、鉛直方向に0.5mとする。また、水温計算において重要なパラメータである光の消散係数は、殿ダム貯水池における現地観測の結果よりPARの消散係数を 0.7m^{-1} に設定し、NIR、UVA、UVBはデフォルトのまま使用した。

水温の再現計算については、放射推定精度による水温予測精度の評価を行うため、ELCOMに入力する放射推定値を変更してシミュレーションを行った。また、計算期間については、成層が生じて発達する2012年5月15日0:00から2012年8月1日0:00までを対象とした。

3. 短波アルベドと長波放射の推定結果

(1) 短波アルベドの推定式の精度結果

多変量解析ソフトSPSS Statistics ver.21を用いて選定された変数は天頂角の余弦、湿度、風速、散乱光の割合であった。これらを用いて作成した重回帰式の精度の検討のため、推定した短波アルベドから求めた短波の正味放射量と観測値を比較した結果を表-1に示す。最も高い精度が得られたのは、式(1c)による回帰式(図-6中の α_3 の推定式参照、 x_1 :湿度(%), x_2 :風速(m/s), x_3 :散乱光の割合(%))であり、RMSEは 8.4W/m^2 、AEは 4.9W/m^2 、 R^2 は0.99であった。また、ELCOMで用いられている推定式である式(6)による結果は、RMSEは 17.4W/m^2 、AEは 11.8W/m^2 であり、式(1c)よりも精度が劣っていた。

(2) 下向き長波放射の推定式の精度結果

構築された下向き長波放射推定式より求めた推定値と観測値を比較した。下向き長波放射の推定式である式(2a)、式(2b)と射出率の推定式である式(3a)～式(3i)の各組合せの推定精度の比較を表-2に示し、精度の高い式の組合せによる推定値と観測値の比較(日平均)を図-3に示す。まず、表-2より式(2a)と各射出率の推定式の組合せのうち、高い精度を得たのは式(2a)と式(3d)を用いた組合せであり、RMSEは 27.4W/m^2 、AEは 23.0W/m^2 、 R^2 は0.76であった(図-3中の L_{D1} 、 ε_4 参照)。同様に、式

表-1 観測値と比較した短波放射の正味放射量推定値の精度結果(赤字は最も精度が高い値)。

短波アルベド推定式	RMSE(W/m ²)	AE(W/m ²)	R ²
式(1a)	9.1	5.2	0.99
式(1b)	8.3	5.3	0.99
式(1c)	8.4	4.9	0.99
式(6)	17.4	11.8	0.99

(2b)の場合は式(3c)を用いた推定値の精度が、最も高くRMSEは 24.5W/m^2 、AEは 19.4W/m^2 、 R^2 は0.80であった(図-3中の L_{D2} 、 ε_3 参照)。

また、ELCOMで採用されている長波放射の推定式である式(8a)と式(8b)から推定した値と観測値の比較から得られた結果は、RMSEは 35.9W/m^2 、AEは 28.9W/m^2 、 R^2 は0.58であり、式(2b)と式(3c)を用いた場合の方が、精度が高いことが確認された(表-2)。

(3) 上向き長波放射の推定式の精度結果

殿ダム貯水池における観測値から求めた水面の射出率の平均値は0.99であった。そこで水面の射出率を0.99としたときの向上き長波放射の推定精度の評価を行った結果、RMSEは 4.9W/m^2 、AEは 3.8W/m^2 、 R^2 は0.98であった。比較のため、現在ELCOMで用いられている水面の射出率0.96として、同様に精度評価をすると、RMSEは 12.4W/m^2 、AEは 4.9W/m^2 、 R^2 は0.98であり、水面の射出率を0.96とするのは、実際の射出率に比べ低い値であることが明らかとなった。

4. 構築した推定式の殿ダムでの一般性の確認

殿ダム貯水池における2013年度のデータを用いて構築した各推定式の一般性を確認した。

推定した短波アルベドから求めた短波の正味放射量と観測された正味放射量を比較した結果を表-3に示す。表-3から、2012年度と2013年度のAE、 R^2 の値に変化は無く、RMSEは2012年度よりも2013年度の結果は 0.1W/m^2 小さいが、ほぼ同程度であった。

同様に下向き長波放射の推定式においても一般性の確認を行った結果を表-3に示し、推定値と観測値の比較

表-2 観測値と比較した下向き長波短波放射推定値の精度結果(赤字は最も精度が高い値)。

L_D ε	式(2a)			式(2b)		
	RMSE(W/m ²)	AE(W/m ²)	R ²	RMSE(W/m ²)	AE(W/m ²)	R ²
式(3a)	30.5	24.3	0.70	24.5	19.4	0.80
式(3b)	30.9	24.8	0.69	25.2	20.1	0.79
式(3c)	33.0	25.9	0.65	24.5	19.4	0.80
式(3d)	27.4	23.0	0.76	27.3	22.5	0.76
式(3e)	36.1	29.2	0.57	25.0	20.0	0.80
式(3f)	33.5	26.2	0.64	24.5	19.4	0.80
式(3g)	28.9	23.9	0.73	26.1	21.3	0.78
式(3h)	31.0	25.9	0.69	25.5	21.3	0.79
式(3i)	36.0	29.1	0.58	28.8	24.1	0.73

図-3 構築した下向き長波放射の推定式のうち精度が高い組合せの式による推定値と観測値の比較(日平均)。

図-4 構築した下向き長波放射の推定式を2013年度の殿ダムに適用した場合の推定値と観測値の比較(日平均)。

表-3 推定式を構築した年と推定式の一般性を確認した年の放射推定値の精度結果。

		年度	RMSE(W/m²)	AE(W/m²)	R²
短波	式(1c)	2012	8.4	4.9	0.99
		2013	8.3	4.9	0.99
下向き長波	式(2a)	2012	27.4	23.0	0.76
	式(3d)	2013	28.5	23.8	0.74
	式(2b)	2012	25.4	19.4	0.80
	式(3c)	2013	25.0	19.3	0.80

(日平均)した図-4をみると、式(2a)と式(3d)を用いた下向き長波放射の推定値の精度は2013年度ではRMSEは1.1W/m²、AEは0.8W/m²増加し、R²は0.02減少しているが、大きな精度の変化はないといえる。また、式(2b)と式(3c)を用いた推定値の精度の比較をみると、2013年度ではRMSEは0.4W/m²、AEは0.1W/m²減少しており、R²に変化はない。

以上より、構築された推定式は、少なくとも殿ダム貯水池においては高い精度を有していることが確認された。

5. 放射推定精度改善による水温予測精度の向上

(1) 放射推定精度と水温予測の結果

水温の再現計算の結果を図-5に示す。まず、図-5から上段の観測値と下段のELCOMで採用されている放射式での再現結果を比較すると、観測値に比べELCOMで採用されている放射式を用いた場合、水温が低いことがわかる(7月の標高180m付近の水温に着目)。これは、ELCOMで採用されている下向き長波放射の推定値は、観測値に比べ小さく推定されていることが原因である(年平均下向き長波放射で比較すると約15W/m²小さい)。しかしながら、本研究で構築した放射式をELCOMモデルに適用した場合(図-5中段)は観測値のコンター図と概ね一致しており、再現性の向上を図ることができた。

(2) 短波・長波放射が水面の水温予測精度に与える影響

水面の水温の再現計算について、本研究で構築した推定式による短波アルベドの推定値のみを適用した場合と下向き長波放射の推定値のみを適用した場合で比較した結果を図-6に示す。

短波アルベドの推定値のみを適用した場合、再現性の改善はあまりみられない。これは、短波放射は水表面を透過する性質をもつため¹⁹⁾水面の水温の再現計算においては影響が小さいためと推測される。一方、水面で吸収される長波放射の推定値のみを適用した場合は大きく再現性の向上がみられた。以上のことから水面の水温計算において、短波のアルベドよりも、長波放射の精度が大きな影響を与えることが明らかとなった。

6. おわりに

本研究では、放射推定精度を改善することで、ダム貯水池における水温の予測精度を向上させることを目的として研究を行った。また、3次元湖沼水理予測モデルELCOMを用いて、放射推定の精度が水温予測に与える影響を評価した。ここで得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 短波アルベドの推定には、季節的な変化だけでなく、太陽の天頂角、風速、湿度、散乱光の割合を変数として取り込むことで、その推定精度を高めることができた。
- (2) 下向き長波放射の推定には、気温のみならず、水蒸気圧を変数として取り込まれている式(3c)を採用することや、式(2b)のような少し複雑な式を採用することで、現在ELCOMで採用されている推定式よりも、観測値との平均誤差を約10W/m²小さくすることができた。
- (3) 上向き長波放射推定のパラメータである水面の射出率を観測されたデータを基に検討し、射出率の年平均値は0.99であった。これは、ELCOMで設定されている射出率0.96よりも高い値であることが明らかとなった。
- (4) 水温予測のシミュレーションでは、本研究において

図-5 ELCOMモデルに適用する放射推定式を変更して行った水温の予測シミュレーションの結果。

最も推定精度の高い放射推定式を用いることで、水温の予測精度を向上させることができた。また、水温の予測精度向上に大きく寄与したのは長波放射の推定精度であり、短波アルベドの推定精度は僅かであることを明らかとした。

以上、本研究では2012年度の殿ダム貯水池を対象に放射推定式の構築と水温の予測計算を行い、水温の予測精度を向上することができた。また、2013年度を対象としても、構築した放射推定式の精度の確認も行うことができた。今後は、他のダム貯水池や湖沼において、本研究で構築された放射推定式の妥当性があるかの確認を行い、水温予測における放射推定式の重要性を再確認していく必要がある。

謝辞: 本研究で使用したデータは国土交通省中国地方整備局鳥取河川国道事務所殿ダム管理支所より提供をいただいた。また、本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発（地域課題分野）の研究助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Payne, R. E.: Albedo of the sea surface, *J. of the Atmospheric Sciences*, 29, pp. 959-970, 1972.
- 2) Taylor, J. P. *et al.*: Studies with a flexible new radiation code. II: Comparisons with aircraft short - wave observations, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, pp. 839-861, 1996.
- 3) Hansen, J. *et al.*: Efficient three-dimensional global models for climate studies: Models I and II, *Mon. Weather. Rev.*, 111, pp. 609-662, 1983.
- 4) Jin, Z. *et al.*: A parameterization of ocean surface albedo, *Geophysical research letters*, 31, pp.1-4, 2004.
- 5) ELCOM Science Manual: http://www.cwr.uwa.edu.au/software/1/CWRDownloads/modelDocs/ELCOM_Science.pdf, 2014.
- 6) Crawford, T. M. and Duchon, C. E.: An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation, *J. of*

図-6 短波アルベドと長波放射の一方の推定式を改良した時の水面の水温の再現計算結果と観測値の比較結果。

Applied Meteorology, 38, pp. 474-480, 1999.

- 7) Silva, R. C.: Estudo do balanço de radiação no pantanal sul matogrossense, *Mestrado em meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos*, 2002.
- 8) Duarte, H. F. *et al.*: Assessing daytime downward longwave radiation estimates for clear and cloudy skies in Southern Brazil, *Agr. Forest. Meteorol.*, 139, pp. 171-181, 2006.
- 9) 近藤純正: 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, pp.31-81, 2010.
- 10) 殿ダム管理支所: 殿ダムの規模, <http://www.cgr.mlit.go.jp/tottori/tono/01dam/scale/index.html> (引用2014-9-10)
- 11) Holder, A. J. *et al.*: Chain melting temperature estimation for phosphatidyl cholines by quantum mechanically derived quantitative structure property relationships, *J. of computer-aided molecular design* 17, 2-4, pp. 223-230, 2003.
- 12) Brunt, D.: Notes on radiation in the atmosphere. I, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 58, pp. 389-420, 1932.
- 13) Idso, S. B. and Jackson, R. D.: Thermal radiation from the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 74, pp. 5397-5403, 1969.
- 14) Brutsaert, W.: On a derivable formula for long - wave radiation from clear skies, *Water Resources Res.*, 11, pp. 742-744, 1975.
- 15) Ångström, A.: A study of the radiation of the atmosphere, *Smithson. Misc. Collect*, 65, pp. 1-159, 1916.
- 16) Garratt, J. R.: Extreme maximum land surface temperatures, *J. of applied meteorology*, 31, pp. 1096-1105, 1992.
- 17) Idso, S. B.: A set of equations for full spectrum and 8 - to 14 - μm and 10.5 - to 12.5 - μm thermal radiation from cloudless skies, *Water resources Res.*, 17, pp. 295-304, 1981.
- 18) Keding, I.: Klimatologische Untersuchung ueber die atmosphaerische Gegenstrahlung und Vergleich vom Berechnungsverfahren anhand langjaehriger Messungen im Oberheintal, *Ber Dtsch. Wetterd.*, 178, 72pp., 1989.
- 19) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, 350pp., 2011.

(2014. 9. 30受付)