

殿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の研究

鳥取大学大学院工学研究科 学生会員 ○山本 茂友
鳥取大学大学院工学研究科 正会員 矢島 啓

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、および長波放射の放射エネルギーである。水面に入射する短波放射と水面から反射される短波放射の比はアルベドとよばれ、様々なパラメータによる影響で変動する¹⁾。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²⁾。しかしながら、ダム貯水池や湖沼における水温予測計算等において、アルベドは一定値や季節による太陽高度の違いを考慮しただけの推定式が用いられることが多い。また、長波放射については日本国内のダム貯水池や湖沼においても、国外の観測データから構築された推定式がよく用いられる。したがって、ダム貯水池や湖沼において精度の高い水温計算を行うためには、短波のアルベドの変動を考慮し、国内の観測データを用いた長波放射の推定式を構築すべきである。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のアルベドと長波放射のそれぞれについて推定式を構築する。さらに構築した推定式を用いて、実際のダム貯水池における水温予測精度を3次元数値計算モデル(ELCOM)で評価する。

2. 殿ダム貯水池の概要

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 年度から運用を行なっている多目的のロックフィルダムである(図-1)。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(図-1)³⁾。

図-2 に示す網場付近に設けられたフロート上で4成分の放射量(短波と長波のそれぞれ上向きと下向き), 風向風速, 湿度, 気温, 気圧を10分間隔で観測している。また, 気象観測位置から約200m下流の選択取水塔の前面において, 水面からEL160m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時間間隔で計測している。本研究で使用したデータは, 気象データから風速, 気温, 湿度, 気圧, 4成分の放射量, 水質データから水面における水温, 濁度, Chl.aである。

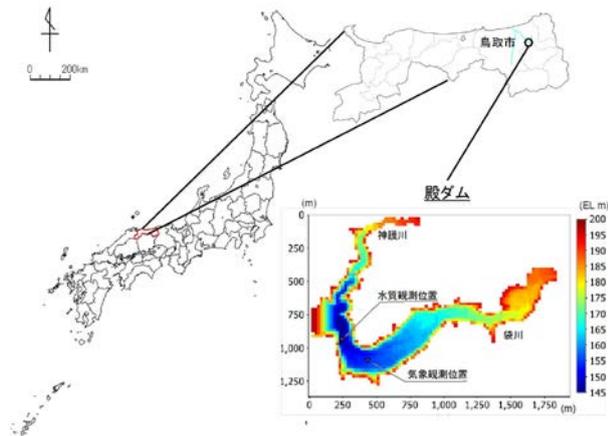


図-1 殿ダム貯水池の位置



図-2 殿ダム貯水池の気象観測装置

3. 検討方法

短波アルベドの推定は、重回帰分析を用いて推定式の構築を行う。しかしながら、得られたデータ全てをアルベドの説明変数とすることはできない。なぜなら、多重共線性の問題が生じるからである。多重共線性とは説明変数の間に強い相関が存在する場合、有効な推定結果が得られないなどの症状が生じることである。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。よって本研究では全ての変数のVIFが5以下になるまで変数の選定を行う。

選定した変数から、式(1-1)、式(1-2)、式(1-3)に示す形の推定式を用いて、短波アルベドの推定式を構築する。式(1-1)は線形型の回帰モデル、式(1-2)は指数型の回帰モデル、式(1-3)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がアルベドに与える影響が異なることが従来の研究成果¹⁾で明らかであるため、このモデルを設定した。

次に、下向き長波放射の推定に用いる放射式を式(2-1)、式(2-2)に示し、放射式の変数である大気の射出率9個を式(3-1)～式(3-9)に示す。これらの放射の推定式2ケースと射出率の推定式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推定式の構築を行う。

精度の検討においては、各推定値と観測値の比較から、精度の評価ができる指標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、構築された推定式のうち精度の最も高い推定式を、短波アルベドと下向き長波放射、それぞれ1つずつ選択した上で、水温の再現計算を行う。

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3次元数値計算モデルELCOMを用いる。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減衰係数の設定は、PARの減衰係数を0.7m⁻¹、NIRの減衰係数を1.0m⁻¹、UVAの減衰係数を1.0m⁻¹、UVBの減衰係数を2.5m⁻¹に設定した。さらに、再現計算の

<p>(1) 短波アルベドの推定式</p> $\alpha = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i \dots\dots\dots (1-1)$ $\alpha = \exp(a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i) \dots\dots\dots (1-2)$ $\alpha = a_1x_1(1-y)^{b_1} + a_2x_2(1-y)^{b_2} + \dots + a_ix_i(1-y)^{b_i} \dots\dots\dots (1-3)$ <p>ここで、αはアルベド、x_1, x_2, \dots, x_iはアルベドの変数、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。</p>	<p>(3) 大気の射出率の推定式^{4),5)}</p> $\epsilon_1 = 0.605 + 0.048\sqrt{e_a} \dots\dots\dots (3-1)$ $\epsilon_2 = 1 - 0.261\exp(-0.000777(273 - T_a)^2) \dots\dots\dots (3-2)$ $\epsilon_3 = 1.24(e_a/T_a) \dots\dots\dots (3-3)$ $\epsilon_4 = 0.83 - 0.18 \times 10^{-0.067e_a} \dots\dots\dots (3-4)$ $\epsilon_5 = 0.52 + 0.205\sqrt{e_a} \dots\dots\dots (3-5)$ $\epsilon_6 = 1.723(e_a/T_a)^{1/2} \dots\dots\dots (3-6)$ $\epsilon_7 = 0.79 - 0.17\exp(-0.96e_a) \dots\dots\dots (3-7)$ $\epsilon_8 = 0.7 + 0.000595e_a \exp(1500/T_a) \dots\dots\dots (3-8)$ $\epsilon_9 = 0.92 - 0.7 \times 10^{-1.2e_a} \dots\dots\dots (3-9)$ <p>ここで、e_aは水蒸気圧(hPa)、T_aは気温(K)を示す。</p>
<p>(2) 長波放射の推定式²⁾</p> $L_D = L(1 + aC^b) \dots\dots\dots (2-1)$ $L_D = L(1 - C^r) + \delta C^r \sigma T_a^4 \dots\dots\dots (2-2)$ $L = \epsilon \sigma T_a^4 \dots\dots\dots (2-3)$ $L = \epsilon_w \sigma T_a^4 \dots\dots\dots (2-4)$ <p>ここで、L_Dは下向き長波放射(W/m²)、ϵは大気の射出率、ϵ_wは水面の射出率、σはステファン・ボルツマン定数=5.67×10⁻⁸(W/m²K⁴)、T_aは気温(K)、Cは雲量に関するパラメータ、a, b, r, δは係数である。</p>	<p>(4) ELCOMで採用されている推定式</p> $\alpha = 0.08 + 0.02 \sin\left(\frac{2\pi j}{D} + \frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots (4-1)$ $L_{DE} = L(1 + 0.17C^2) \dots\dots\dots (4-2)$ $\epsilon_E = 9.37 \times 10^6 T_a^2 \dots\dots\dots (4-3)$ <p>ここでDは365、jは1年j番目の日を表すパラメータ、L_{DE}はELCOMでの下向き長波放射(W/m²)、ϵ_EはELCOMでの大気の射出率である。</p>

期間については、2012年5月4日に袋川から50m³/sの流入があり以降の水温計算に問題が生じ、また、8月以降に水深1m~5mの範囲で水温の計算に誤差が生じる(選択取水の設定が影響していると考えられるが原因は不明)ため、2012年5月15日0:00から2012年8月1日0:00までで検討を行うこととした。

4. 短波アルベドと長波放射の検討

短波アルベドの推定式構築のために変数の選定を行った。その結果、湿度(%), 天頂角の余弦, 風速(m/s), 散乱光の割合(%)を説明変数とし、式(1-1)~式(1-3)に示した3パターンの重回帰分析を行った。

精度の検討は、推定したアルベドから求めた短波の正味放射量と観測から得られた値を比較した。また合わせて、現在ELCOMで採用されているアルベドの推定式(式4-1)による検討も行った。得られた結果を表-1にまとめる。式(1-3)は最も精度の高い結果を得られた式であり、RMSEは8.4W/m², AEは4.9W/m², R²は0.99であった。式(4-1)から得られた結果は、RMSEは17.4W/m², AEは11.8W/m²であり、式(1-3)により再現性の向上を図ることができたといえる。

下向き長波放射の検討は、推定した下向き長波放射と観測された下向き長波放射を比較した。下向き長波放射の推定式である式(2-1)と射出率の推定式である式(3-3)を用いた推定値が最も精度が高く、RMSEは29.2W/m², AEは24.5W/m², R²は0.72であった(表-2)。さらに、ELCOMで採用されている長波放射の推定式である式(4-2)と射出率の推定式である式(4-3)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55.5W/m², AEは45.3W/m², R²は0.61であった。

精度の改善性を確認するため、観測された下向き長波放射と構築した推定式(式(2-1), 式(3-3))とELCOMで採用されている推定式(式(4-2), 式(4-3))を用いた下向き長波放射推定値の比較を図-3に示す。

図-3から、ELCOMで採用されている推定式と比較して、本研究で構築した推定式は再現性が向上したことがわかる。また、ELCOMで採用されている推定式では、年間を通して推定値が観測値を下回る傾向があり、特に、秋から冬にかけては推定値が低くなっている。ELCOMで採用されている大気の射出率推定式である式(4-3)には含まれていない水蒸気圧のパラメータが、本研究で採用した大気の射出率推定式である式(3-3)に含まれている。よって、下向き長波放射の推定においては、気温に加えて水蒸気圧を下向き長波放射の変数として取り込むことで精度の向上が期待できると推測される。

また、水面からの上向き長波放射を検討した結果、観測された上向き長波放射と表層の水温を用いて式(2-4)から求めた水面の射出率の平均値は0.99であり、ELCOMで用いられている射出率0.96より大きいことが明らかとなった。

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)

	RMSE(W/m ²)	AE(W/m ²)	R ²
式(1-1)	9.1	5.2	0.99
式(1-2)	8.3	5.3	0.99
式(1-3)	8.4	4.9	0.99
式(4-1)	17.4	11.8	0.99

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

式(2-1)	RMSE(W/m ²)	AE(W/m ²)	R ²
ε ₁	29.9	25.3	0.71
ε ₂	36.6	30.9	0.56
ε ₃	29.2	24.5	0.72
ε ₄	29.7	25.1	0.71
ε ₅	29.9	25.1	0.71
ε ₆	29.4	24.8	0.72
ε ₇	31.2	26.1	0.68
ε ₈	49.5	39.9	0.20
ε ₉	32.4	27.4	0.66

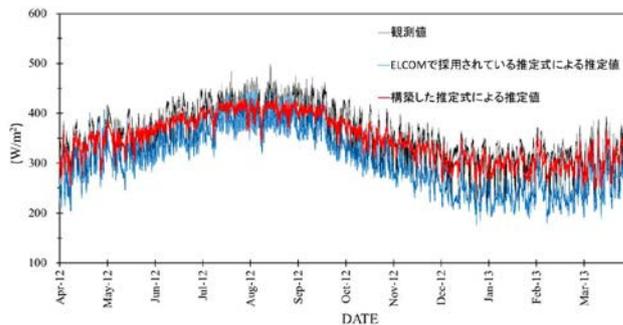


図-3 下向き長波放射の観測値と推定式による下向き長波放射の推定値の比較

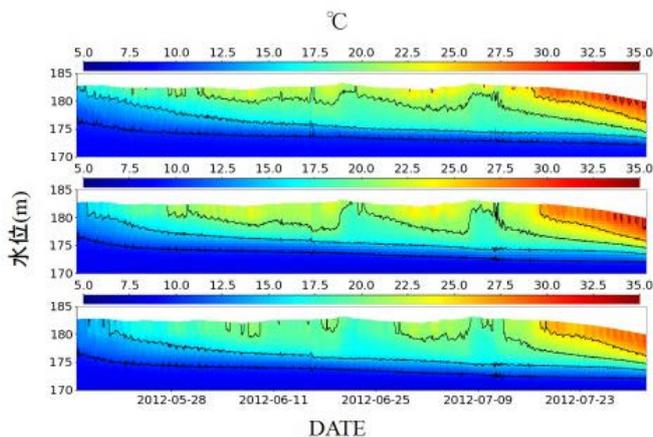


図-5 縦軸に水位，横軸に日付をとった水温のコンター図，上段は観測値による放射量，中段は本研究の放射量推定値，下段は ELCOM で採用されている放射式での放射量推定値を用いた結果

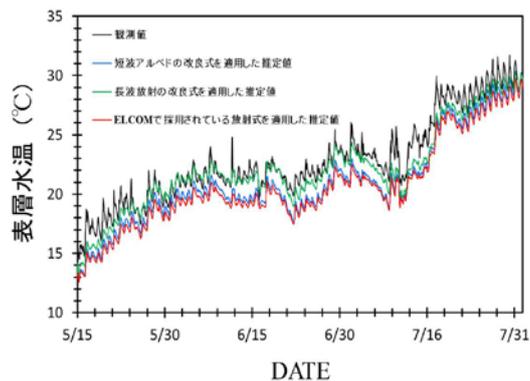


図-6 短波と長波の一方の推定式を改良した時の表層水温の再現計算結果と観測値の比較結果(参考のため改善前の結果も示す)

5. 水温の再現結果

水温の再現計算の結果を図-5 に示す。まず、図-5 から上段の観測値の図と下段の ELCOM で採用されている放射式での推定値の図を比較すると、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。これは、ELCOM で採用されている下向き長波放射の推定値は、観測値に比べ低く推定していることが原因である。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といえる。

次に、表層水温の再現計算を、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⁶⁾表層水温の再現計算においては影響が小さいと推測される。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。以上のことから表層における水温計算において、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

本研究を通して、短波放射のアルベドや長波放射の推定式を検討し、現在 ELCOM で採用されている推定式よりも再現性の良い推定式を構築することができた。また、水温の予測精度については長波放射が水温の再現性に大きく影響を与えていることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Jin, Z. et al., 2004. A parameterization of ocean surface albedo, *Geophysical research letters*, 31, pp.1-4.
- 2) Duarte, H. F., Dias, N. L. and Maggionto, S. R., 2006. Assessing daytime downward longwave radiation estimates for clear and cloudy skies in Southern Brazil, *Agricultural and forest meteorology*, 139, pp. 171-181.
- 3) 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 2014-3-10).
- 4) Brunt, D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere. I, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 58, pp. 389-420.
- 5) Idso, S. B., 1981. 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 research*, 17, pp. 295-304.
- 6) 近藤純正, 2011. 水環境の気象学, 朝倉書店.