

水深が浅い湖沼におけるバルク係数の違いが 水温推定結果にもたらす影響 ～印旛沼を例にして～

綿貫 翔^{1*}・山田 正²

¹中央大学理工学研究科都市環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

²中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

* E-mail: akira-xiang@civil.chuo-u.ac.jp

水面における熱収支解析では、顕熱及び潜熱輸送量の計算において、バルク法が一般的に用いられている。しかし、バルク法は一般的に既知な値ではなく、湖沼におけるバルク係数の観測や研究は少ない。さらに、水深が深い湖沼に比べ、浅い湖沼の研究が少ない。そのため、本論文では、水深が浅い湖沼において、バルク係数の違いが水温の推定結果にもたらす影響を検証した。

その結果、広い水面の場合（観測高度よりも水面の長さが100倍ある場合）、大気安定度が中立の海洋における顕熱及び潜熱のバルク係数で水温の推定結果が最も観測値と近くなった。

Key Words : heat budget, bulk coefficient, water temperature, shallow lake

1. はじめに

近年、地球温暖化による気候変動で湖沼の水温が上昇し、生態系や人間活動に影響が出始めている。今後、地球温暖化の進行や気象の極端化が水温に影響を及ぼし、アオコの発生確率の上昇や水利用への影響などが懸念されている¹⁾。そのため、気候変動により、水温変化に伴う影響の発生頻度や程度を知るためには、正確に水温をしる必要がある。

水面における水温の推定では、顕熱及び潜熱輸送量の計算にバルク法が一般的に用いられている。他の手法である傾度法や熱収支ボーエン比法では、最低でも2高度の気象データが必要となり、水面における熱収支解析には不向きである。それに対し、バルク法は地表面粗度もしくはバルク係数が既知の場合、1高度の気象データで計算が可能であるため、鉛直方向に何点も機器が設置し難い水面では、有用な手法である。しかし、地表面粗度もしくはバルク係数は長期観測をしていない限り、一般的ではない。海洋におけるバルク係数は1980から1990年代に多くの観測がなされ、それらの結果を重ね合わせると顕熱及び潜熱におけるバルク係数は大気の安定度が中

立の場合、ある程度、収束することが近藤(1992)によって示されている²⁾が、湖沼における同様な観測・研究は少ない。顕熱及び潜熱のバルク係数は顕熱及び潜熱輸送量の熱交換量を決める重要なパラメータである。

さらに、湖沼において研究が多くなされているのは、水深が深い湖沼であり、水深が浅い湖沼における研究は、水温推定に限らず、非常に少ない。そのため、本論文では、水深が浅い湖沼において、バルク係数の違いが水温推定結果に及ぼす影響を検証する。

2. 計算対象及び計算期間

計算対象は、独立行政法人水資源機構が長期に渡って水温観測を行っている印旛沼の西沼（千葉県、35.73 N）である。水温の観測距離は水面から20 cmである。印旛沼（西沼）は平均水深が約1.7 mであり、面積は約5.3 km²である。湖沼における浅深の明確な定義はないため、田瀬ら(1987)が水深及び温度躍層の位置によって分類した定義³⁾によると、印旛沼は『非常に浅い湖』となる。

計算で用いる気象データは対象地点近くの気象庁観測所を用い、その内、気温、大気圧、水蒸気圧は千葉地上気象観測所、気温、日照時間、風速は佐倉地域気象観測所を用いた。

計算の対象年は、2014年である。

計算時間は日単位であり、使用データは日平均値を用いている。

3. 水面における熱収支

水面における熱収支の概念図は図-1 に示す通りである。これを式に表すと水面における熱収支式は式(1)の通りである。

$$(1 - \text{ref})S^{\downarrow} + L^{\downarrow} = H + lE + G + L^{\uparrow} \quad (1)$$

ここで、左辺は既知量、右辺は推定する水温の関数となっている。左辺第一項の ref はアルベド[-]で0.06の一定値を与え、 $S^{\downarrow}$ は雲を考慮した日平均全天日射量 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ である。第二項は、雲や水蒸気などによる下向きの長波放射量 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ である。右辺第一項と第二項はそれぞれ、顕熱輸送量 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ と潜熱輸送量 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ である。第三項は、水中伝達量 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ である。第四項は水面からの上向き長波放射量 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ である。水中伝達量は新井ら(1974)の式⁴⁾を用い、それ以外は近藤(1994)の式⁵⁾を用いて計算した。

顕熱輸送量及び潜熱輸送量の式は以下の通りである。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (2)$$

$$lE = l \rho C_E U (q_{\text{sat}}(T_s) - q) \quad (3)$$

$$C_E = \beta C_H \quad (4)$$

各項目は以下に示すとおりである。

式(2)の右辺 c_p , ρ , C_H , U , T_s , T はそれぞれ空気の定圧比熱 $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$, 空気密度 $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$, 顕熱のバルク係数[-], 風速 $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$, 推定する水温[K], 気温[K]である。式(3)の右辺 l , C_E , q_{sat} , q はそれぞれ水の気化熱 $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$, 潜熱のバルク係数[-], 飽和比湿 $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$, 比湿 $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ である。式(4)の右辺 β は蒸発係数[-]である。各項目の計算式も近藤の式⁵⁾と同様である。

対象とする地表面は水面のため、蒸発係数は1とした。すると、式(4)は以下で表すことができる。

$$C_E = C_H \quad (5)$$

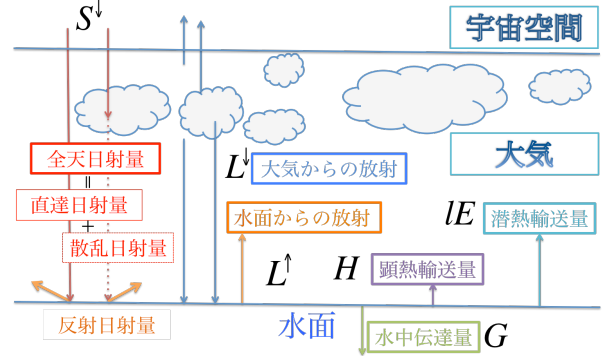


図-1 水面における熱収支の概念図

4. バルク係数

計算で用いる風速は、年間通してみると、約95%が1から5 m/sであり、そのときの水面における顕熱及び潜熱のバルク係数の取り得る範囲は0から 2×10^{-3} の範囲であるため⁶⁾, 0.1×10^{-3} から 2×10^{-3} の範囲で 0.1×10^{-3} ずつバルク係数の値を変化させ、水温を推定した。内嶋(1959), 宮野(2010)によると、バルク係数は大気の安定度に対する依存性が小さいことが、観測結果を元に示されているため^{6) 7)}, バルク係数は年間を通して一定値を与えた。

5. 計算結果

初期条件として、印旛沼における1月1日の2004年から2014年までの日平均水温の平均値 5.5 °Cを用いた。

バルク係数が 0.1×10^{-3} , 1.0×10^{-3} , 2.0×10^{-3} の時の水温推定結果と観測結果を図-2に示す。

バルク係数の値が大きくなるほど、推定する水温は小さくなる。

また、バルク係数が小さいと、推定する水温の年間変動値は大きい。

6. 考察

バルク係数の値が大きくなると、推定する水温が小さくなる理由は、式(1)における顕熱・潜熱輸送量が占める割合が大きくなり、水中伝達量として水中に伝達された(水中に蓄えられてた)エネルギーが小さくなり、その分、顕熱及び潜熱輸送量が増加したからである。

しかし、推定水温結果の減少率は、バルク係数が上昇するにつれ、一定に減少するのではなく、0に漸近するように減少する。その結果を図-3に示す。図-3では、1月1日を1としたとき、任意に抽出した50, 100, 200, 300日目において、バルク係数が 0.1×10^{-3} と 0.2×10^{-3} を用

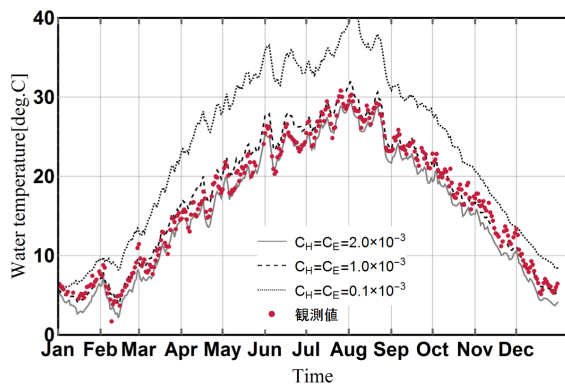


図-2 バルク係数を異なる時の水温推定結果と観測値
(バルク係数はそれぞれ 0.1×10^{-3} , 1.0×10^{-3} , 2.0×10^{-3})

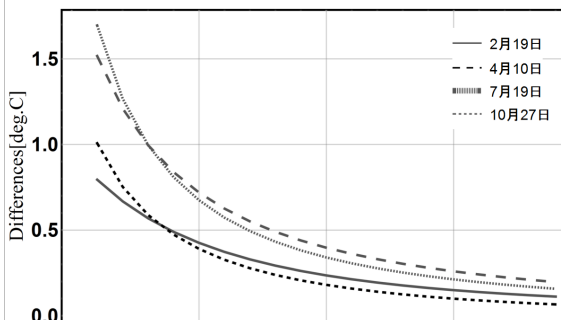


図-3 ある任意の日において、バルク係数を 0.1×10^{-3} ずつ上昇させたときの水温推定結果の減少率
(図の最左端はバルク係数が 0.1×10^{-3} 及び 0.2×10^{-3} のときの水温推定結果の差であり、最右端はバルク係数が 1.9×10^{-3} 及び 2.0×10^{-3} のときの水温推定結果の差である。)

いた場合の水温推定結果の差をバルク係数を 0.1×10^{-3} ずつ増加させた結果である。

また、年間の2乗平均誤差や平均絶対誤差、決定係数、残差が 1°C 以内もしくは 0.5°C 以内の日数から総合的に考えると、観測結果に最も一致するバルク係数の値は 1.2×10^{-3} もしくは 1.3×10^{-3} であった。年間の2乗平均誤差や平均絶対誤差、決定係数、残差が 1°C 以内もしくは 0.5°C 以内の日数はそれぞれ、 $\{1.08, 0.870, 0.984, 214, 124\}$, $\{1.05, 0.858, 0.985, 225, 113\}$ である。

このバルク係数の妥当性の検証として、近藤(1992)によると、海洋のように広い水面の場合(対象とする水面の長さが観測高度よりも100倍大きいとき)、大気安定度が中立の場合、顕熱及び潜熱のバルク係数は以下の通りである。

$$C_E = C_H = \begin{cases} (1.1 \sim 1.2) \times 10^{-3} & (1 < U_{10} \leq 5) \\ (1.2 \sim 1.3) \times 10^{-3} & (5 < U_{10} \leq 30) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 U_{10} は地表面から10m上空の風速 $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ である。近藤の結果と非常に近いことがわかる。

年間を通して、大気安定度を中立として、計算しても年間の水温推定結果に大きな影響を与えないが、春一番や大雪など急激な微気象的な変化のある日における水温の推定結果は、観測値と最低でも 3°C 以上の差があることがわかった。このような天気の場合、大気の安定度が中立でないことは明かであるが、顕熱及び潜熱のバルク係数を大気安定度を考慮した値にしても、正確な水温は推定できず、強風による水面の波立ちによる潜熱輸送量やアルベドの増加や、雪の融解熱による熱量の吸収、流入河川からの熱量の流入など考慮しなければ、これ以上精度向上するのは難しいと考える。

7. まとめ

本論文では、水面における熱収支法において、顕熱及び潜熱輸送量の計算でバルク式を用いた場合、顕熱及び潜熱のバルク係数の違いによって、推定する水温結果にもたらす影響を検証した。

主な知見を以下に示す。

- (1) 対象とする水面の長さが観測高度よりも100倍大きい広い水面の場合、顕熱及び潜熱のバルク係数は海洋におけるバルク係数と類似していることがわかった。
- (2) 顕熱及び潜熱のバルク係数が大きくなるにつれて、水温推定結果は小さくなる。
- (3) 顕熱及び潜熱のバルク係数が大きくなるにつれて、水温推定結果の減少率は小さくなり、0に漸近していく。

参考文献

- 1) 環境省、『気候変動による水質等への影響解明調査』報告、2013年3月。
- 2) 近藤純正：水面のバルク輸送係数、水文・水資源学会誌, Vol. 5, No.3, pp.50-55, 1992.
- 3) 田瀬則雄・池上智祥・古藤田一雄、湖水の熱的構造と湖盆形態—中沼は深い湖沼か?—、筑波の環境研究, 10, 107-111, 1987.
- 4) 新井正・西沢利栄、水温論(水文学講座10)、共立出版, 1974.
- 5) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱数詞—、朝倉出版, 1994.
- 6) 内嶋善兵衛：温水池上における運動量、熱量、水蒸気量の乱流輸送、農林省農業技術研究所、農業技術研究所報告 A 物理統計(7), 1959.
- 7) 宮野愛子：バルク式を用いた湖面におけるフラックスの算出、平成21年度修士(環境科学)学位論文、筑波大学, 2010.