

ダム・湖の受熱期の水温鉛直プロファイルの簡易な推定法について

秀 島 好 昭*

1. はじめに

ダムの水温鉛直分布の把握は、農業利用面からは温水取水の方法の判断に、また、水質保全面からも重要な事項である。ダム・湖の水温鉛直分布は、年間の受熱期・放熱期・循環期を通じて、その形状が変化する。利水ダムの規模や水利用形態（流入量・流出量）に応じて水温分布が複雑に変化することを理由に、水温分布の推定法として熱力学・運動力学的なアプローチが一般には難しい。これらに関して近年では、現地調査資料に基づく運動学的な熱交換過程の考察¹⁾、湖への流入および河川への流出時の水温変化予測に適用性のある計算モデル²⁾など報じられている。また一方では、日平均気温・日照時間および日平均風速の気象資料を使って、受熱期の水温鉛直分布を推定する手法が既報³⁾されているので、ここに資料としてその内容を報じた。

2. フィールド調査

調査したToダム（流域面積8.7km²、有効貯水量263万m³）は北見近郊に位置し、この湖央地点において1991～1994年の受熱期に水温の鉛直分布を計測した。計測は、受熱期（およそ5～8月の間）と放熱期の一部（8月以降10月まで）の間に毎年数回行い、水深10mまでは0.5～1m毎、それ以深から湖底までは、約2m毎に水温計測を行なった。観測期間中の93年の冷夏、94年の猛暑が特徴としてあげられる。

3. 水温の状況

受熱期には、図1の概要のように水温成層が形成される。すなわち、湖の表層には比較的高温の躍層が形成・発達し、底部には水温の低い恒水温帯が年間を通して存在し（通年利水のダムや自然湖）、それらの境界には遷（漸）移帯（本資料でこう称する）がみられる。湖面からの受熱や熱循環を理由に、湖底でもわずかに夏期から秋期にかけて水温が上昇するものの、ほぼ恒温とみなせ、北海道内では約4～5℃を示すようである。日平均気温の移動平均値（一週間平均、

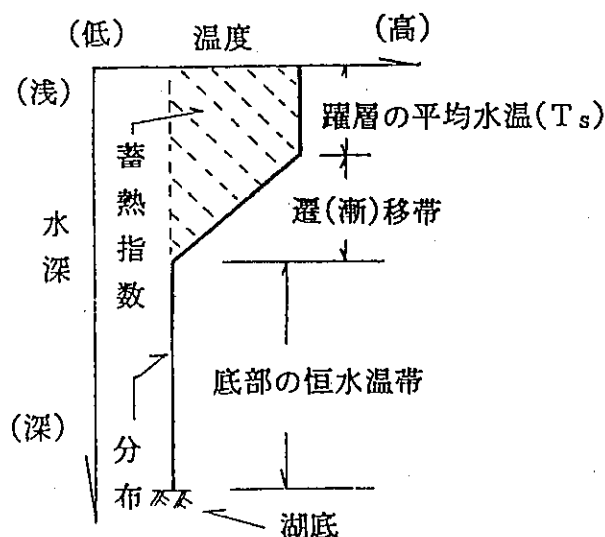


図1 水温の鉛直プロファイル概要

T_M ）と躍層の平均水温（ T_s ）の関係を1991～1992年の資料を使って図示したものが図2である。図2では、前述のように湖底の恒水温を5.09℃と定めたため、気温も水温も5.09℃をとる直線で回帰した。観測値は、ほぼ回帰した直線に沿って散布している。図に式を併記したように、推定値と観測値の差の2乗和の根を標本数で除したものを誤差とすると、約0.5℃であり、両者に良い符合が得られている。

1991～1992年では、移動平均した気温を使った躍層の平均水温の推定が良好なことから、この推定式を1993～1994年に応用したものが図3である。すなわち、異なる水利用年での適合性を調べたものである。回帰係数を固定しても、図3のように躍層の平均水温の推定値と観測値はほぼ1：1の線に沿って散布する。このときの推定誤差を前述と同様に示せば、約0.6℃であり、推定精度は高いと判断される。図4には、1991～1992年の遷（漸）移帯の温度勾配（図1参照）を整理した。すなわち、躍層の平均水温と底部恒水温との差（ T_D ）を遷移帯の長さで除したものを遷移帯の水温の鉛直勾配（ G_T ：単位は℃/m）とし、その値と T_D の関係を示している。図4の回帰式は、 T_D が0

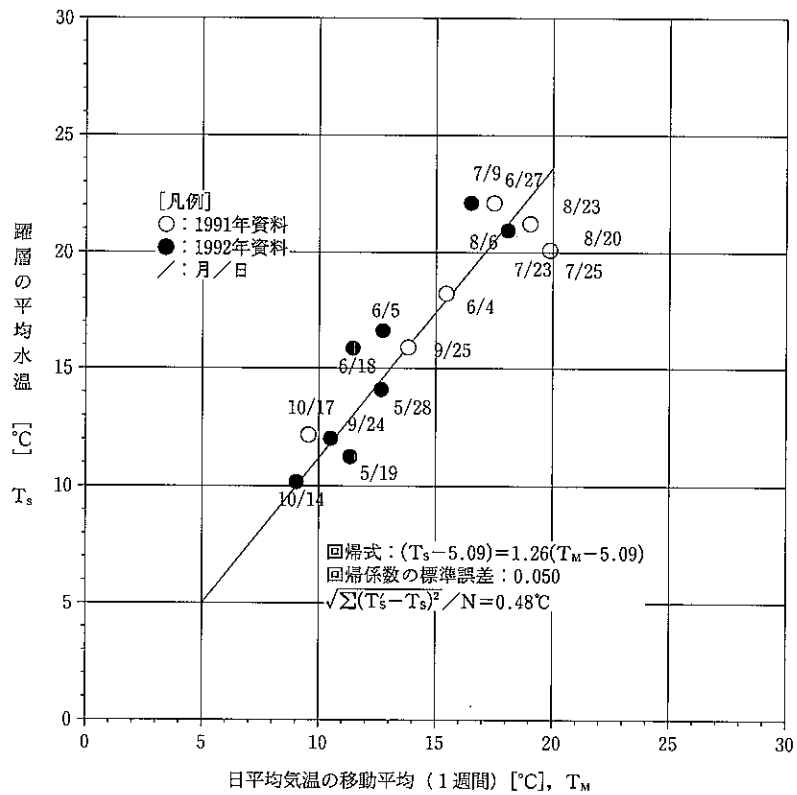


図2 日平均気温の移動平均値と躍層の平均水温の関係

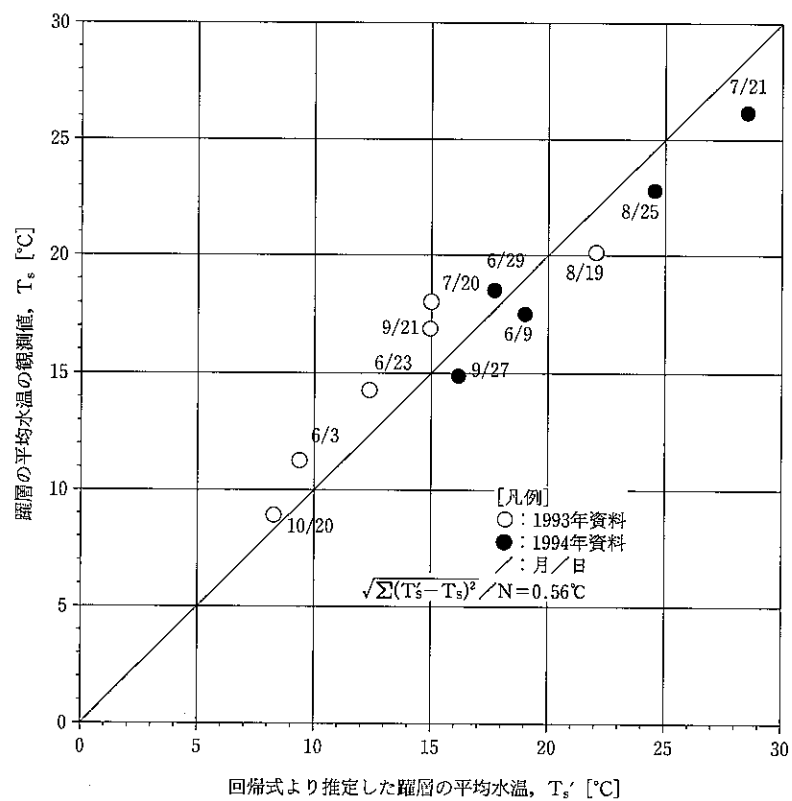


図3 躍層の平均水温の推定精度

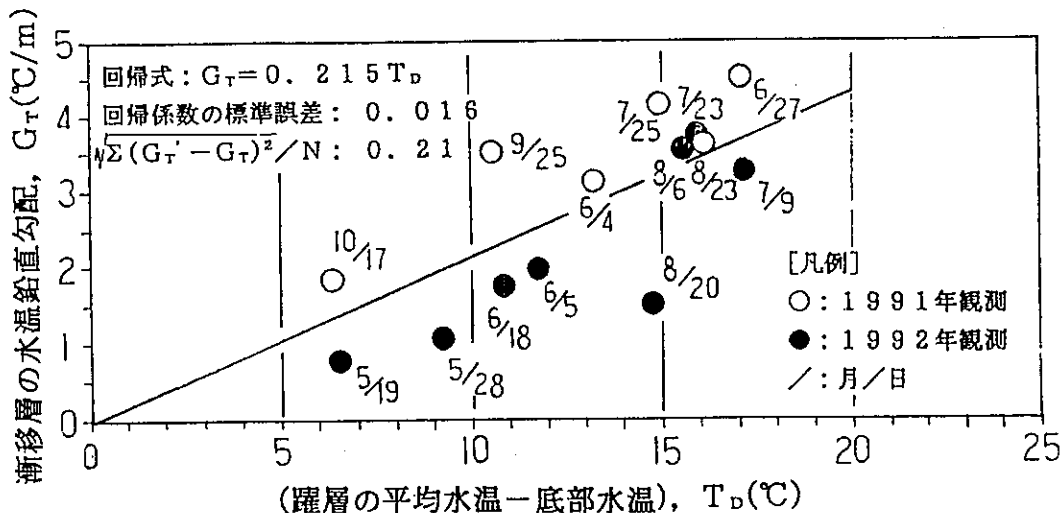


図4 T_D と G_T の関係

で G_T も0となる原点をとるものとしたが、観測値はほぼ回帰した直線に沿って散布する。

回帰係数は、0.215が得られた。1993～1994年について、観測した躍層の平均水温と底部水温を原資料に、先の回帰式に代入して推定した遷移帯の水温勾配の推定値と同観測値の比較をしたところ、両者はほぼ1:1の線に沿って散布することを確認した。

4. 水温鉛直分布の算定法

前節の観測値の統計的判断から、①躍層の平均水温が日平均気温の移動平均値から推量できること、②遷移帯の温度勾配も T_D (躍層の平均水温と底部水温との較差) から同様に推量できることが示唆された。水温成層のプロファイル決定には、残りは①躍層の水深、②遷移帯の長さ、あるいは③図1に示した蓄熱量を意味する蓄熱指数 (本資料でのみ呼称した) のいずれかが必要であり、これが気象要素から推量できれば、気象要素のみから水温鉛直分布が算定できる。本節では③の蓄熱指数について検討した。いま、湖面をとおしての受熱は、太陽輻射と大気からの熱伝達であ

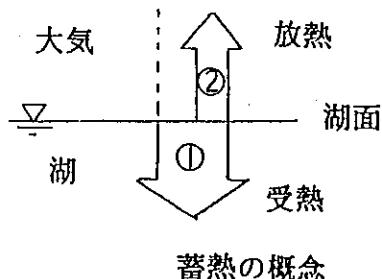


図5 蓄熱の概念

る。図5を参照に、二次元的 (水深方向と時間) に蓄熱の状況を考察してみる。すなわち、ダム・湖への流入・流出にともなう熱量を無視して検討する。

図5に示す放熱は、大気と表層水温の差およびシアとしての風速の両者の積に比例するものと考えられる。すなわち、前述の図2に示されるように受熱期においては、大気の日平均温度は表層水温より低いことから、主に大気への放熱を示すことになる。一方、湖面への受熱は太陽輻射に基づくと考えられる。この項の大きさは、日射量で表されるが、①地点によっては気象原簿に無いものがある、②日射量が日照時間から推量できることを理由に、日照時間により受熱量が関

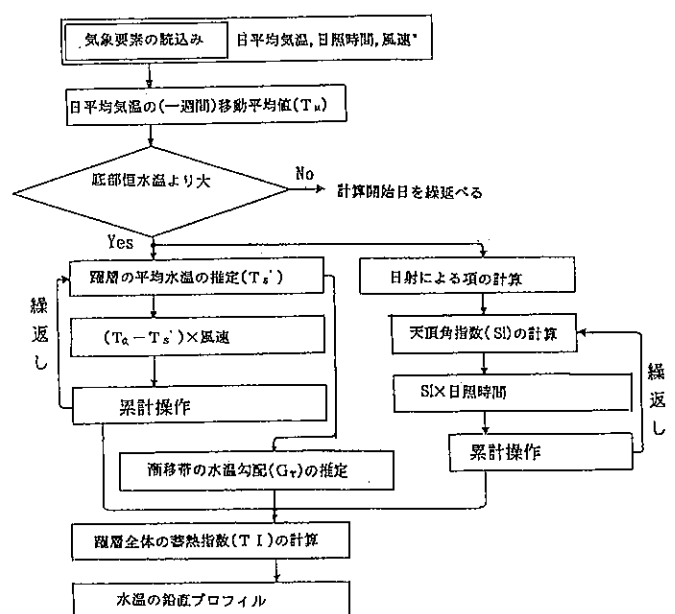


図6 受熱期の水温鉛直分布の推定フロー

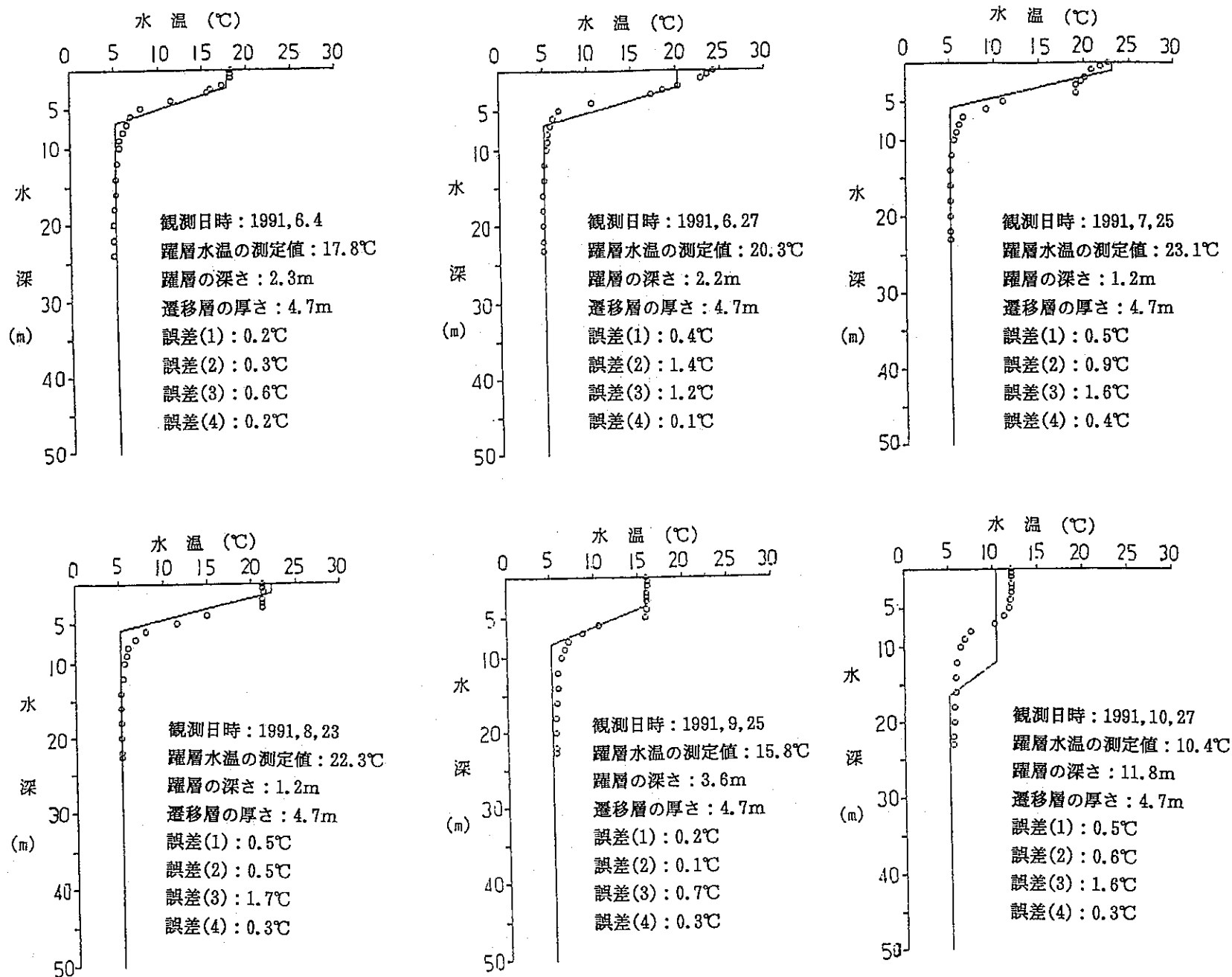


図7 水温の鉛直分布の観測値と計算値の比較 (1991年)

係づけられると考える。これらを式に表現すると以下のようである。

$$TI = \sum_{i=1}^m (a_1 \cdot f(T_a, T_s, W)) + \sum_{i=1}^m (a_2 \cdot f(SI, S_t)) \quad \cdots (1)$$

ここに、 TI ：解析日までの蓄熱指数 [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}$]、
 a_1, a_2 ：回帰係数、 T_a ：日平均気温 [$^{\circ}\text{C}$]、
 T_s ：表層水温(躍層の平均水温) [$^{\circ}\text{C}$]、
 W ：日平均風速 [m/s]、
 SI ：天頂角 (θ) による補正係数で、 $SI = \cos(\theta)$ 。すなわち、太陽が観測地点の真上を通る場所や日では、 $SI = 1$ であり、 $0 \leq SI \leq 1$ 。 S_t ：日照時間 [h]、
 m ：解析日までの累積であり、初期日は底部の恒水温より、大気の日平均気温が高くなる日。

(1)式の詳細は、次のように書き改められる。

$$TI = \sum_{i=1}^m (a_1 \cdot (T_a - T_s) \cdot W) + \sum_{i=1}^m (a_2 \cdot SI \cdot S_t) \quad \cdots (1)'$$

1991年の観測資料(6回の水温鉛直分布の測定結果)から、(1)'式の回帰係数を求めると、 $a_1 = 0.201$ 、 $a_2 = 0.319$ が得られた。また、解析結果によれば、(1)'式の右辺第一項の風速(W)を除いても、うまく水温の鉛直分布が推量できる。

図6には、具体的な計算フローを示した。図6のように、最初は①日平均気温、日照時間および日平均風速の3要素の入力であり、次に②日平均気温の移動平均値の計算である。この計算により、蓄熱が始まる起日が検討できる(移動平均値を採用した理由には、前述の躍層水温との関係の他に、日平均気温の単純使用では、寒暖の変化によりこの起日が判断しづらい点も理由にある)。(1)'式右辺一項の計算として以下、③日平均気温の移動平均値を使って毎日の躍層の平均水温を推定し、(日平均気温の観測値-毎日の躍層の平均水温の推定値)×(日平均風速の観測値)の累計を解析日まで求める。右辺二項の計算では、④毎日の天頂角を計算し、その指数(SI)を求め、日照時間と天頂角指数との積の累計を解析日まで計算する。⑤これらの累計値に、それぞれの回帰係数を乗じて総和すれば、躍層全体の蓄熱指数(TI)が算出できる。一方、⑥解析日の躍層の平均水温は推定できていることから、底部恒水温との差(T_b)より遷(漸)移帯の水温勾配が算出できる。

⑦以上により、解析日のi)躍層の平均水温、ii)遷移帯

の水温勾配およびiii)蓄熱指数が推量できたので、後は幾何学的に水温の鉛直プロファイルが決定される。

(1)算定結果

前述の算定法に基づく結果と観測値との比較事例を、図7に示した。図の○印が観測値であり、実線が計算値(便宜上、50m深度として計算)である。図7の水温の鉛直分布の観測値と計算値により符合が得られている。

一方、放熱期あるいは循環期に相当する10月中旬のものでは符合が悪い。(図7に併記した註記のものは、躍層の深さと遷移層の厚さはそれぞれ計算値である。また、誤差(1)~(4)とは、順に①全観測資料の観測値と計算値の差の2乗の総和を求め、その平方根を資料数で除した値、②計算した躍層の範囲に入る水温の観測値と計算値について同様に求め、その範囲に該当する資料数で除した値、③計算した遷移層の範囲に入る観測値と計算値について②と同様に求めた値、④計算した底部恒水温帯に含まれる資料について同様に定めた誤差を示している。)

計算値と観測値について、4ヵ年を調べると、ほぼ実用的な符合が確かめられた。

5. おわりに

観測資料を基に、受熱期の水温成層の発達状態を気象の3要素(日平均気温、日照時間および日平均風速)から推定する手法が提案されている。この手法は、実用的な精度を有するものと判断するが、今後は次の点について改良を検討する必要がある。

①本文で示した回帰定数は水使用(ダム運用)の固有定数と考えられ、その実態に合わせた最適な回帰定数を選べば、さらに計算値の符合に向上が期待できる点。

②推定法を系統的に一瞥すると、成層を壊すような水の出入りあるいは風雨が発生した場合の再現ができないなどの不備がある点である。

参考文献

- 1) 大谷守正；北海道における湖水の流動とその要因、水文・水資源学会誌第8巻2号、pp. 231~239 (1995)
- 2) 近藤純正；河川水温の日変化(1)計算モデル、水文・水資源学会誌第8巻2号、pp. 184~196 (1995)
- 3) 秀島好昭ら；ダム・湖の受熱期の水温躍層の推定法、第44回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集、pp. 114~119 (1995)
- 4) 例えば、太陽エネルギー入門；Sol Wieder著(押田 勇雄訳)、啓学出版、pp. 28~29 (1983)



秀島 好昭*

開発土木研究所
農業開発部
農業土木研究室長

(博士工学)

*

*

*