

農業用貯水池における水温成層の予測 Thermal Stratification in Reservoirs for Agricultural Use

農林水産省 農業土木試験場 正員 ○加藤 敬

1. 緒言

水深の深い貯水池では、春から夏期にかけて温度成層が形成される。すなわち、表面近くには水深方向に水温がほぼ一様な表水層ができ、その下には水温が急に低くなる温度躍層（変温層）が形成される。躍層の下は水温がほぼ一定ないしは深さとともに徐々に低下する層があり、深水層と呼ばれる。この深水層の水は一般に冬期に冷やされた水であり冷水層となっている。水温成層を模式的に示せば図-1のように表現できる。

農業用水では、低水温は作物に成育障害を生ずる。

このため、成層化した貯水池から取水する場合には表水層の水を選択的に取水しなければならない。この表層取水施設は用水の計画に基づいて施設計画の時点に設計される。このことは、貯水池ができる以前に水温成層の予測がなされねばならないことを示す。

貯水池水温は熱収支の問題としてあつかわれるが、日射による水温成層の形成に関しては Dake & Harleman¹⁾などの研究がある。日射による水温成層の形成では、貯水池内の熱供給分布を知る必要がある。石橋ら²⁾の観測では天候・水質により大きく影響されるとされている。貯水池建設前に水温成層を予測するには、熱供給分布をどのように推定するかが問題となる。

本論文では、地上における日射のエネルギースペクトルと水による光の波長別の吸収係数から鉛直方向の熱供給分布を仮定した。また、鉛直一次元モデルを用い、平均的な気象条件から水温成層の予測を行い、農業用貯水池（月形ダム）の測定水温との比較検討を行った。

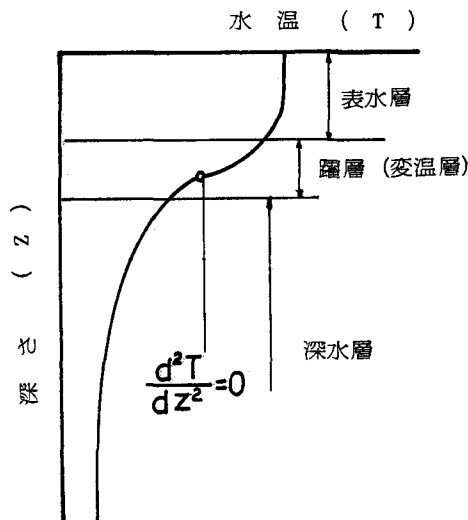


図-1 水温成層模式図

2. 貯水池の熱収支

貯水池における熱供給は、日射および大気輻射であり、熱の流出は大気への逆輻射、蒸発に伴う潜熱と伝導による顕熱がある。

1) 日射による水中への熱供給

水中に入射する光の強さと深さの関係は、光の波長によって異なるが、次の関係がある。

$$I_{\lambda} = I_{\lambda_0} \exp(-\eta_{\lambda} Z) \quad (1)$$

ここに、 I_{λ} : 深さ Z における波長 λ の光の強さ、 I_{λ_0} : 水面における波長 λ の光の強さ、 η_{λ} : 波長 λ の光の吸収係数、 Z : 深さ。

光は水に吸収されて熱に変換される。水への単位体積・単位時間・単位波長あたりの熱供給 H_{λ} は次式で表わされる。

$$H_{\lambda} = -\frac{dI_{\lambda}}{dz} = \eta_{\lambda} I_{\lambda} \quad (2)$$

日射は全波長域の光が含まれている。したがって全波長域を考慮すれば、深さ Z への熱供給量 $\bar{H}_Z$ は次式で示される。

$$\bar{H}_Z = \int_0^{\infty} H_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \eta_{\lambda} I_{\lambda_0} \left(-\eta_{\lambda} Z \right) d\lambda \quad (3)$$

2) 水面での熱損失

水面では蒸発と熱伝導による熱移動と、水面から大気へと大気から水面への輻射の差による損失がある。

$$\phi_L = \phi_e + \phi_c + \phi_{ra} \quad (4)$$

ここに、 ϕ_L : 貯水池表面からの熱損失、 ϕ_e : 蒸発による損失、 $\phi_{ra} (= \phi_{rw} - \phi_a)$: 逆有効輻射、 ϕ_a : 大気輻射、 ϕ_{rw} : 逆輻射

各熱損失式に種々の公式が提案されているが、ここでは次式を使用する。

Rohwer の式

$$\phi_e + \phi_c = (0.000308 + 0.000185 W) \rho (e_s - \psi e_a) \left\{ L_v + C T_s + \frac{269.1 (T_s - T_a)}{(e_s - \psi e_a)} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $\phi_e + \phi_c$ の単位、 $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 、 W : 風速 (m/sec)、 e_s : 表面水温に相当する飽和蒸気圧 (mmHg)、 e_a : 気温に相当する飽和蒸気圧 (mmHg)、 ψ : 相対湿度、 $L_v = 595.9 - 0.54 T_s$: 蒸発の潜熱、 T_s : 表面水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 T_a : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 C : 比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)、 ρ : 水の密度。

$$\phi_{ra} = 0.97 K \left\{ T_w^4 - 0.937 \times 10^{-5} T_a (1.0 + 0.17 D^2) \right\} \quad (6)$$

ここに、 K : Stefan Boltzman 常数 $= 1.171 \times 10^{-8} \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{day K}$ (絶対温度)、 T_w : 表面水温 ($^{\circ}\text{K}$)、 T_a : 気温 ($^{\circ}\text{K}$)、 D : 雲量。

3. 予測モデルの概要

貯水池中の熱拡散は次式のように表わされる。

$$\frac{dT}{dt} = K_z \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{\rho c} \bar{H}_Z \quad (7)$$

ここに、 T : 水温、 t : 時間、 K_z : 内部拡散係数。

上式を差分式で表わし鉛直一次元モデルとした。農業用貯水池では一般に、貯水容量に比べ流入水量は小さく、その水温は気温との相関が強く表層水温に近いものとなるため、ここでは無視した。貯水池からの流出は、表層取水が行なわれ $15 \text{ cm}/\text{day}$ の水位変化に相当する量が取水されたものとした。

水面での熱損失の計算は、岩見沢の気象観測データの月平均値を用い、日射量は札幌の月平均値を用いた。

内部拡散係数は、 $K_z = 1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{sec}^2$ と新井³⁾による観測値 ($10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}^2$ のオーダー) から水深 2 m までは $K_z = 1.14 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}^2$ とした場合について計算を行った。

4. 月形ダム貯水池の水温と水温成層の予測との比較

1) 月形ダム貯水池の水温の特徴

月形ダムは札幌の北約 50 km にある農業用ダムで、貯水量 42.3 万 m^3 、満水面積 0.43 km^2 、堤高 28 m である。水温観測⁴⁾は昭和52年5月～8月に行なわれ、表層から水深 10 m までの11点の水温が測定された。日平均水温は図-2に示される。躍層は5月は不安定であるが6月以降は安定に保たれる。日周期の特徴的なものとして図-3に示すように、日に2回の温度ピークを有する。これは、山風、谷風による吹きよせに起因すると考えられ、その影響深さは 1 m 程度である。岩見沢での風速が $10 \text{ m}/\text{sec}$ 程度の強風時には水深 3 m まで混合が見られるが、成層状態は維持される。

2) 貯水池中の鉛直方向熱供給分布

熱供給の分布は、水中の溶存物質・懸濁物質によって変化する⁵⁾が、水面での日射の反射を無視し、清水を仮定し、図-4の太陽スペクトルと表-1の吸収係数から(3)式によって水深ごとの熱吸収の割合を求めると図-5のようになる。吸収の割合は、水深2 mまでは急激に変化し、それ以下での変化は小さい。吸収係数の大きい赤外域は1~2 mまでに吸収され、深水層へは可視光域(0.4~0.8 μ m)により熱供給される。

月形貯水池における取水開始前の水深別の水温変化は図-6のように水深ごとに異なる。札幌における日射量と図-4から計算される水温上昇量との比較は表-2のように水深1 mを除きほぼ一致が見ら

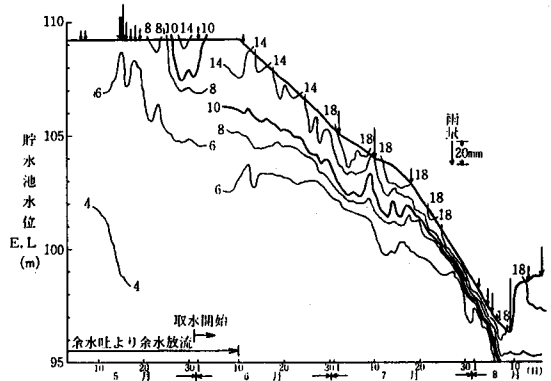


図-2 貯水池水温イソプレット

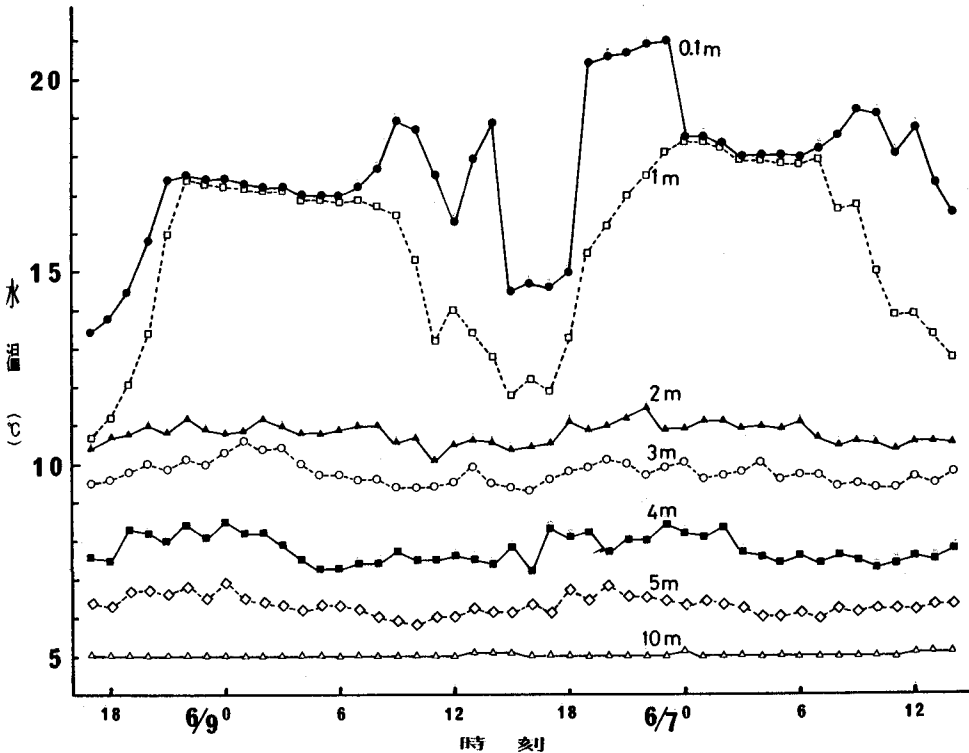


図-3 水温の日周期

れる。水深が深くなるにつけ計算値が大きくなるのは、水面での反射を無視していることと、赤外域に比べ可視光域の反射は相対に大きいことが考えられる。また、水質による影響もあるものと考えられる。

3) 予測水温と観測水温の比較

予測水温の内部拡散係数の違いによる温度分布の差は小さく、内部拡散係数が高い場合には表層部水温が少し高い。観測値との比較では、図-7に示すように表層水温は時間経過にともない差が大きくなる。ま

表一 水による光の吸収率

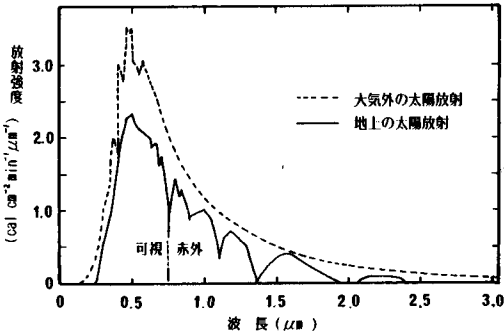
波 長 λ (μ)	吸 収 係 数 η (cm^{-1})	波 長 λ (μ)	吸 収 係 数 η (cm^{-1})
0.186	0.68	0.900	0.169
0.200	0.090	0.995	0.414
0.300	0.015	1.21	1.30
0.415	0.00035	1.40	3.05
0.450	0.00020	1.60	9.2
0.500	0.00020	1.85	12.7
0.550	0.00036	1.90	31.5
0.600	0.0016	2.00	70.0
0.700	0.0055	3.00	73.3
0.800	0.0204	4.50	5.5

表二 水温変化と日射量

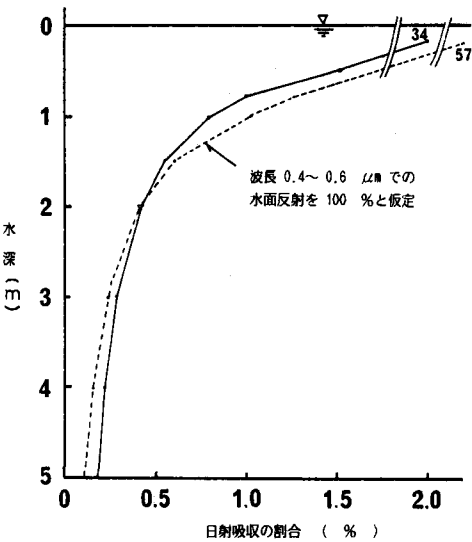
水 深 m	5月15日 水 温 $^{\circ}\text{C}$	5月31日 水 温 $^{\circ}\text{C}$	水温上昇 $^{\circ}\text{C}$	日射吸収の 割 合	日射量からの 計算水温上昇
1.0	5.2	15.3	10.1	0.00083	6.06
2.0	5.4	8.9	3.5	0.00042	3.06
3.0	5.2	7.4	2.2	0.00029	2.12
4.0	4.4	5.9	1.5	0.00023	1.68
5.0	4.6	5.6	1.0	0.00019	1.39

札幌の5月15日～5月31日の間の全天日射量の積算値

$I_0 = 7304 \text{ cal} / \text{cm}^2$



図一四 日射のスペクトル
エネルギー曲線 (Gate, 1962)



図一五 水深10cm当りの
日射吸収の割合

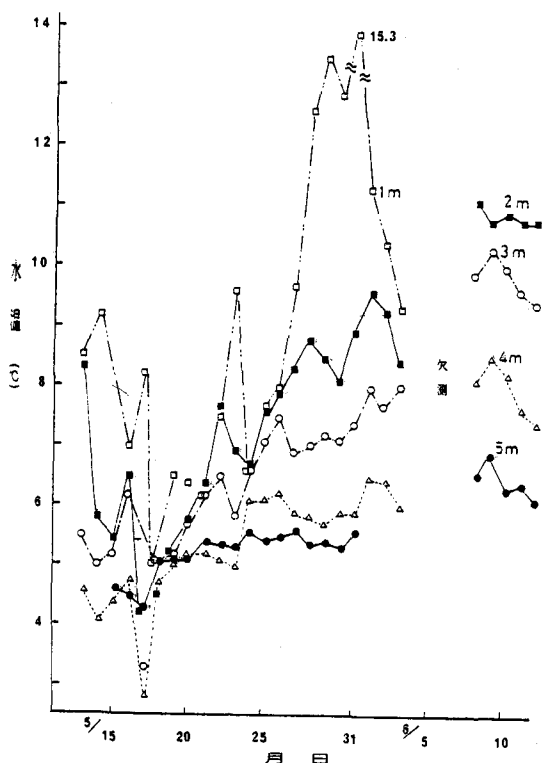


図-6 水深別水温変化

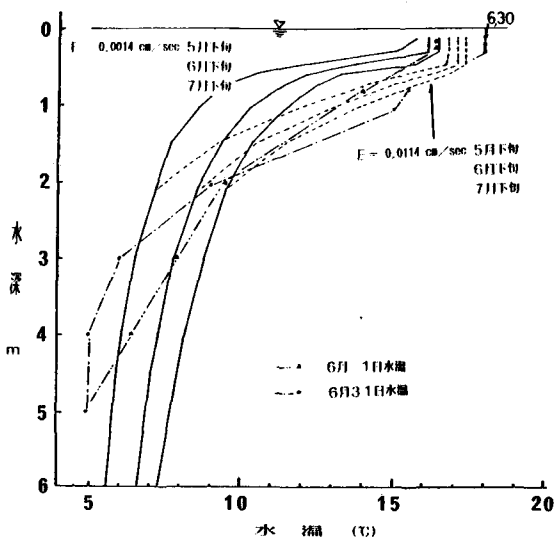


図-7 予測水温と観測水温の比較

た深水層も観測値より少し高くなる。躍層位置は水深1～2mにはば安定している。

熱供給は水深2mまでに急激に変化するが絶対量が大きく、2m以上では変化が小さく絶対量が小さい。また、取水による水位低下が大きいと、躍層の下層への発達速度とはばつりあい、躍層位置が安定すると考えられる。

取水量を変えた計算では、10cm/dayの水位変化では表水層厚は少し増加し、5cmでは発達する。

5. 結 言

月形ダム貯水池水温と予測モデルの水温との比較からつぎのことがみとめられる。

- 1) 日射のスペクトルと波長別吸収係数から求められる熱供給分布は水深3～4mまでは比較的良いが、深水層では過大に見積もられる。
- 2) 表水層水温は、平均的な気象条件からの予測では大きい差を生ずる。
- 3) 躍層位置は計算値と観測値とはほぼ一致する。
- 4) 取水が水位変化に換算で10cm/day以上の場合には、表水層が厚く発達することは期待できない。

参 考 文 献

- 1) Dake, J.M.K. and Harleman, D.R.F.: Thermal stratification in lake, analytical and laboratory studies, Water Resources Reseach Vol. 5, No.2, 1969
- 2) 石橋 毅, 他: 成層型貯水池内の流れと熱収支の現地観測, 第21回水理講演会論文集, 1977
- 3) 新井 正: 農業用ため池(大林池)における水面変化, 熱収支および内部拡散係数について, 水温に関する研究報告I, 河川水温調査会, 1961
- 4) 足立一日出, 村尾重信: 農業用貯水池における水温の特徴, 農土論集84, 1979
- 5) 加藤 敬, 日野幹雄: 日射による成層化および熱収支について, 第25回水理講演会論文集, 1981