

水面熱フラックスの周期的変化にともなう水温成層の応答性状

大阪大学工学部 正員 室田 明 大阪大学工学部 正員 道奥康治
 大林組 正員 中村直人 愛媛県 正員 石井利幸

1. まえがき：水温成層場での鉛直混合過程に関するこれまでの実験成果をもとにして、水面熱収支の一年周期変化にともなう水温構造の応答特性を解析的に検討する。

2. モデルの概要：外的要因としては図-1に示すように周期変化する水面熱フラックス $F(t)$ (鉛直上向きを正とする) と一定の水面摩擦速度 u_* を生起させる風の応力を考える。水温成層は図-2に示すように一様な水温 T_m を有する厚さ h_m の (i) 混合層部と、水温が連続的に変化する下方の (ii) 非攪乱層部からなり、躍層面において ΔT なるジャンプを有する。

水温成層の挙動は熱供給エネルギーの大きさと風の力学的擾乱強度との比によって次の三つの場合に明確に分類される。
 (I) $F(t) < 0$ で熱フラックスの浮力安定効果が風の応力による擾乱効果を抑制し、混合は生じず安定成層化が進行する場合 (受熱初期に相当する)。

(II) $F(t) < 0$ であるが (I) の場合とは逆に風の応力の擾乱効果が熱供給の安定化作用を上回り、ゆるやかに混合が生じ躍層が低下する場合 (受熱後期に相当する)。

(III) $F(t) > 0$ で、自然対流が発生し、熱的擾乱が風の擾乱とともに複合的に作用することによって鉛直混合が誘起される場合 (放熱期に相当する)。

なお、以上の (I) ~ (III) は図-1中の各期間 (I) ~ (III) と対応する。

3. 鉛直混合量の評価法：機械的擾乱と熱エネルギーが複合的に供給される水温成層場での鉛直混合過程に関する著者等の一連の水理模型実験結果¹⁾²⁾より、水温躍層面での混合量 (または混合層の発達速度) dh_m/dt は各々の場合について次のように定式化された。

・ $F(t) < 0$ の場合 (安定な熱フラックスと機械的擾乱が作用する場合 - 受熱期)

$$\frac{dh_m}{dt} = C_w \frac{u_*^3}{\epsilon g h_m} - C_b \frac{u_b^3}{\epsilon g h_m} \quad (1) \rightarrow \text{(I) 及び (II) の場合に適用}$$

・ $F(t) > 0$ の場合 (熱的擾乱と機械的擾乱が複合的に作用する場合 - 放熱期)

$$\frac{dh_m}{dt} = C_w \frac{u_*^3}{\epsilon g h_m} + C_f \frac{u_f^3}{\epsilon g h_m} \quad (2) \rightarrow \text{(III) の場合に適用}$$

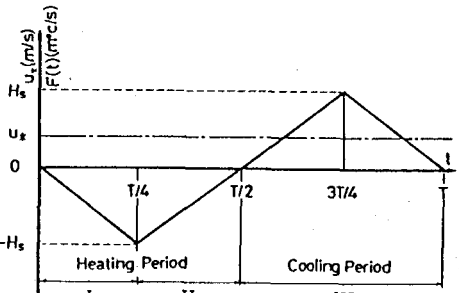


図-1 水面熱フラックス H_s と水面摩擦速度 u_* の経時変化

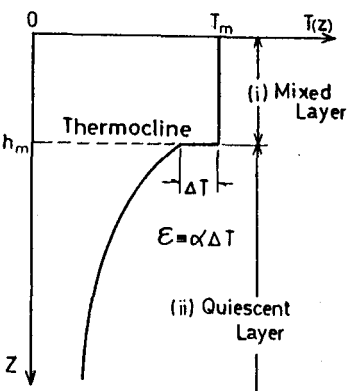


図-2 水温分布の模式図

ここで、 $(C_w, C_b, C_f) = (11.0, 0.36, 0.45)$ であり、すべて著者等の水理実験より客観的に同定したものである。また $u_b \equiv \{-\alpha g F(t) h_m\}^{1/3}$ for $F(t) < 0$, $u_f \equiv \{\alpha g F(t) h_m\}^{1/3}$: 対流速度 for $F(t) > 0$, g : 重力加速度, α : 熱膨張係数, $\epsilon = \alpha \Delta T$: 躍層面での相対密度差 (図-2 参照), である。

4. 計算手法: $t = 0$ において、全層一様水温の初期状態から計算を開始する。(I) の安定成層化が進む場合には混合をとまわず、機械的擾乱効果と熱フラックスによる浮力安定効果がつり合う水深位置に躍層が形成される。したがって、式(1)において $dh_m/dt = 0$ として得られる混合層厚さ $h_m = C_w u_*^3 / \{C_b \alpha g F(t)\}$ により躍層水深が与えられ、成層化にともなう躍層上昇過程が再現される。

(II), (III) の場合はいずれも鉛直混合をとまないうながら躍層が低下するので、各々、式(1)と(2)によって低下速度が与えられる。時々刻々の躍層位置はこれらを時間積分することによって得られる。なお、以上すべての場合について熱保存式が連立して導入され、躍層面での相対密度差 ϵ や混合層水温 T_m が同時に求められる。

5. 結果と考察: 図-3 は躍層位置 (混合層厚さ) $\tilde{h}_m$, 混合層水温 $\tilde{T}_m$, 相対密度差 $\tilde{\epsilon}$ の経時変化を示す。時間も含め各諸量はすべて熱収支量の特性値 H_s ($F(t)$ の振幅) と風応力の代表量 u_* を用いて規準化されている ($\sim$ を冠している) ため各曲線は唯一解をあらわしている。

図-4 の下図は、躍層位置に関する本解析解 (太実線) と自然湖沼での観測³⁾ から得られた等水温線 (細線群) との比較を示す。図-4 の上図のように熱フラックス実測値の回帰から H_s が得られ u_* は計算値が実測値と最も適合するように同定することによって求められる。実測の水温データは以上の H_s と u_* を用いて規準化されている。

本研究を遂行するにあたり実測資料を提供頂いた国立公害研究所村岡浩爾水質土壌環境部長に謝意を表する。

(参考文献)

1) 室田・道奥: 土木学会論文集, 第 369号, 1986.

2) 阪口他: 第42回土木学会年講, 1987, (投稿中)

3) 平田・村岡: 国立公害研究所研究報告, 第69号, 1984.

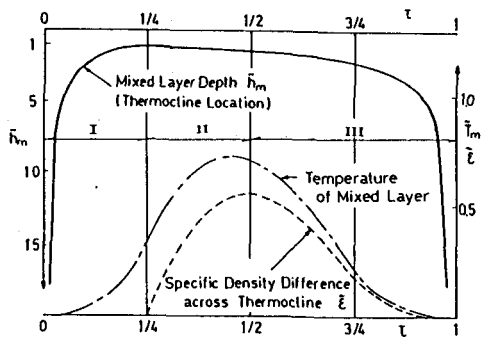


図-3 混合層厚さ $\tilde{h}_m$, 混合層水温 $\tilde{T}_m$, 躍層部の相対密度差 $\tilde{\epsilon}$ の経時変化

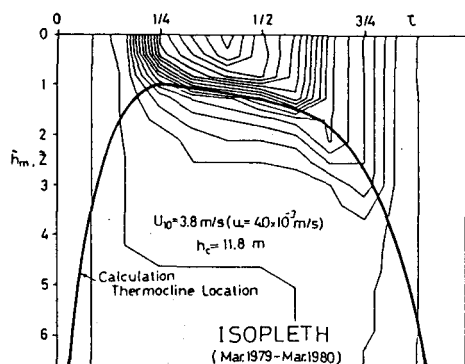
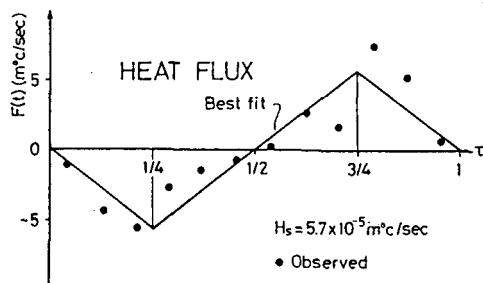


図-4 躍層位置の計算値 (太線) と水温イソプレットの観測値との比較