

II-137 結氷・逆列成層過程を考慮した湖の水温構造解析

神戸大学工学部 正員 道奥 康治
建設省土木研究所 正員 角湯 克典

1. はじめに：

湖における逆列成層の形成・消滅，結氷過程を考慮して，水面熱収支と水温構造の年周期変化を解析する．気象条件や湖の水深スケールなど熱収支過程を支配する特性量と，春期／秋期における大循環の有無，正列・逆列成層形成の如何，結氷の有無との関係などを明らかにする．

2. 水温・熱収支の年周変化と解析方法：

湖における水温成層の1年間のサイクルは，おおよそ表-1のようになる．温帯湖

・熱帯湖はこの各過程のいずれかあるいは全てを経る．解析においては，気象量の季節変化を平衡水温 T_e によって集約的に記述する．次式のように， T_e を季節の正弦関数で与え，水面での熱フラックス $F(t)$ を熱交換係数 k を用いて表現する¹⁾．

$$T_e = \Delta T_e \cdot \sin(\omega t - \phi) + T_{e,0}, \quad F(t) = -k(T_e - T_s) \quad (1)$$

ここで， $\omega = 2\pi/365(\text{day})$ ， ϕ ：Phase Lag(rad)， ΔT_e ， $T_{e,0}$ (°C)：平衡水温の振幅と平均値， T_s ：表面温度，である．なお， $F(t)$ は受熱時において $F(t) \leq 0$ と定義する．熱交換係数 k に関しては，各種の熱収支公式などに基づいて $k=0.45(\text{m/day})$ を得ている¹⁾．これを，K貯水池における熱収支観測値と比較すると図-1のようになり，合理的な値であることが確認できる．力学的な混合の駆動力である風応力に関しては，通年で一定の等価摩擦速度 u_e を与える．水温成層の形成と鉛直混合過程に関しては，図-2のような積分混合層モデルによる鉛直一次元解析によって記述する¹⁾．正列成層および逆列成層の場合に対して同じ連行則を用いる．結氷時においては，図-2に示すように氷内の温度分布を線型と仮定し，氷厚 δ と氷表面温度 T_s の時間変化が次式のように記述される²⁾．

$$d\delta/dt = C_p F(t)/L \quad (2)$$

$$T_s = \begin{cases} -\rho C_p \delta F(t)/\kappa_i & (\text{凝固過程：} F(t) \geq 0) \\ 0 & (\text{融解過程：} F(t) \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで， C_p ：水の定圧比熱， L ：水の凝固（融解）熱， κ_i ：氷の熱伝導係数，である．

4. 支配パラメーター

連行則，熱保存式，境界条件などのモデル式より次の4つの支配パ

表-1 1年間の水温成層の変遷（例：正列・逆列成層がともに形成され結氷する場合）

略号	水温成層場で進行する現象	熱収支	成層の種類
①	春期の大循環	受熱	正列成層
H S	正列成層の形成	↓	↓
H M	正列成層で受熱しながら混合が進行	↑	↓
C	正列成層で放熱しながら混合が進行	↓	↓
②	秋期の大循環	放熱	逆列成層
C S	逆列成層の形成	↑	↑
I C	結氷が進行（放熱）	↓	↑
I H	融解が進行（受熱）	↑	↑
C M	逆列成層で混合が進行	↓	↑
③	春期の大循環	受熱	正列成層

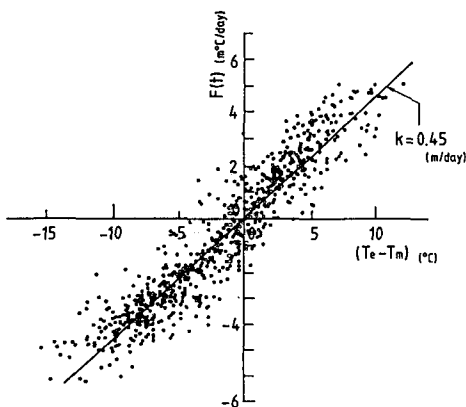


図-1 熱フラックス $F(t)$ と $(T_e - T_s)$ の関係

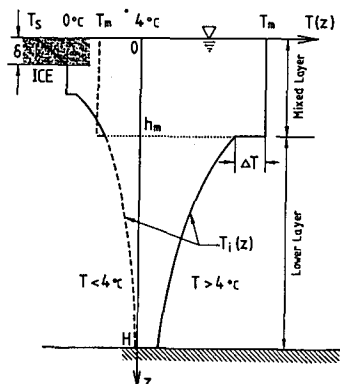


図-2 混合層モデル（右側：正列成層時
左側：逆列成層および結氷時）

ラメーターが導出される。(a) $\tilde{H} = (C_b \alpha g k \Delta T_o / C_w u_*^3) \cdot H$: 熱的・力学的水深スケール, (b) $\tilde{T}_{o,s} = (C_b \alpha g k^2 / \omega C_w u_*^3) \cdot T_{o,s}$: 無次元化された年平均平衡水温〔[受熱フラックス] / [風の擾乱強度]〕, (c) $\Delta \tilde{T}_o = (C_b \alpha g k^2 / \omega C_w u_*^3) \cdot \Delta T_o$: 無次元化された平衡水温の振幅〔[熱フラックスの年較差] / [風の擾乱強度]〕, (d) $\tilde{T}_0 = (C_b \alpha g k^2 / \omega C_w u_*^3) \cdot T_0$: 結氷条件に関するパラメーター〔[4(°C)] / [温度代表量]〕。

ここで, C_b, C_w : 連行則に含まれる定数, α : 熱膨張係数の代表値, $T_0=4(^{\circ}\text{C})$, である。

5. 解析結果

種々の観測に基づけば, 上記のパラメーターはおおよそ, $0 \leq \tilde{H} \leq 20$, $0.5 \leq \tilde{T}_{o,s} \leq 2.5$, $4 \leq \Delta \tilde{T}_o \leq 6$, の範囲にある。また, $\tilde{T}_0$ は広く変化せず, ここでは $\tilde{T}_0=1$ の場合についての結果を示す。($\tilde{H}, \tilde{T}_{o,s}, \Delta \tilde{T}_o, \tilde{T}_0$)=(6.0, 1.5, 5.0, 1.0)の場合に対する氷厚 δ , 混合層厚 $\tilde{h}_m$, 表層温度 $\tilde{T}_s$ (結氷時以外では混合層水温 $\tilde{T}_m$ に等しく, 結氷時は氷上面の温度に等しい), 熱収支量 $\tilde{F}(\tilde{t})$ の年周変化の解析例を図-3に示す。($\tilde{H}, \tilde{T}_{o,s}, \Delta \tilde{T}_o$)を上記の範囲で変化させた場合のパラメーター解析の結果を図-4, 5にあらわす。図-4は($\tilde{T}_{o,s}, \tilde{T}_0$)=(1.5, 1.0)で($\tilde{H}, \Delta \tilde{T}_o$)を変化させた場合, 図-5は, ($\Delta \tilde{T}_o, \tilde{T}_0$)=(5.0, 1.0)で($\tilde{H}, \tilde{T}_{o,s}$)を変化させた場合に各々対応し, 成層構造の変化パターン(表-2参照)や結氷の有無(表-3参照)を領域別に表示している。

図-3 年周変化の解析例(混合層厚 $\tilde{h}_m$, 混合層水温 $\tilde{T}_m$, 熱フラックス $\tilde{F}(\tilde{t})$, 氷厚 δ)

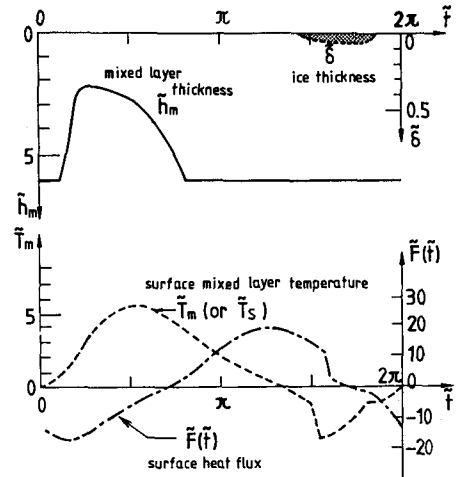


図-3 年周変化の解析例(混合層厚 $\tilde{h}_m$, 混合層水温 $\tilde{T}_m$, 熱フラックス $\tilde{F}(\tilde{t})$, 氷厚 δ)

表-2 水温成層の年周変化パターンによる分類

略号	名称	現象の進行(表-1参照)	水温成層のパターン
M ₁	完全混合型	①→②→(IC→IH)→①	1年を通して水温成層は形成されずに完全に混合している。
M ₂	受熱混合型	①→HS→HM→②→(IC→IH)→①	受熱期に正列成層が形成され, 受熱期の間に風応力の擾乱効果によって混合する。
S ₁	正列成層型	①→HS→HM→C→②→(IC→IH)→①	受熱期に正列成層が形成され, 秋の放熱期に混合・大循環を起こす。放熱期においては逆列成層が形成されず, 一様に混合している。
S ₂	正逆列成層型	①→HS→HM→C→②→CS→(IC→IH)→CM→①	受熱期に正列成層が形成され, 秋の放熱期に大循環を起こす。放熱期においては逆列成層が形成され, 春に再び大循環が生ずる。

表-3 結氷の有無による分類

略号	名称	説明
NF	無氷型	結氷しない。
FR	結氷型	結氷する。

参考文献

- 1) 道奥・角湯: 水工学論文集, 第34巻, pp.175-180, 1990.
- 2) Shen, H.T. and Chiang, L.A.: J. Hydraulic Engin., Proc. ASCE, Vol.110, No.7, pp.958-971, 1984.

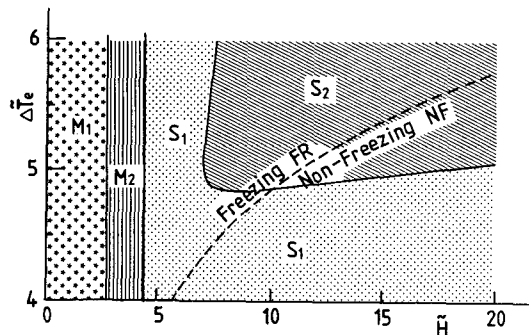


図-4 ($\tilde{H}, \Delta \tilde{T}_o$)平面上での水温成層形態の分類と結氷の有無 ($(\tilde{T}_{o,s}, \tilde{T}_0)=(1.5, 1.0)$ の場合)

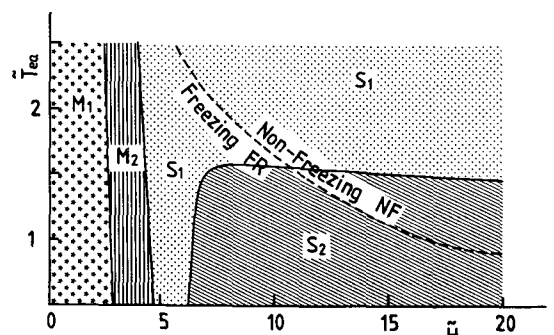


図-5 ($\tilde{H}, \tilde{T}_{o,s}$)平面上での水温成層形態の分類と結氷の有無 ($(\Delta \tilde{T}_o, \tilde{T}_0)=(5.0, 1.0)$ の場合)