

水温成層の形成におよぼす水深、熱的・力学的外因の影響

Effect of Depth, Heat Flux and Mechanical Stirring upon Thermal Structure in Lakes

神戸大学工学部 道奥康治 Kohji MICHIOKU  
 神戸大学大学院 角湯克典 Katsunori KADOYU

The annual cycle of surface heat exchange process and thermal structure in lakes were examined by performing a model analysis. The annual variation of the meteorological conditions were described in terms of annually varying equilibrium water temperature as a single harmonic sinusoidal function of time. The water temperature field was expressed by using an integral mixed-layer model and its stratification and destratification processes were evaluated by our developed entrainment laws. The present analysis enables us not only to get the thermal structure solution but also to analyze the surface heat flux or heat balance of the water body. We found dimensionless parameters which govern the annual variation patterns of thermal structure as well as surface heat exchange. Using these parameters, classification of thermo-dynamic phase in lakes was performed, in which three categories of lakes, i.e. stratified lakes(or thermo-dynamically deep lakes), moderately-mixed lakes and well-mixed lakes(or thermo-dynamically shallow lakes), are found. *Keywords* : thermal stratification, lake dynamics, heat flux

1. はしがき

湖沼・貯水池など内陸部の停滞水域における水温成層構造の季節的発達・消滅過程は、水文学的・気象学的条件のような外的条件のみならず、水域自身の条件—特に熱容量すなわち水域規模—によって大きく支配される。同一の外的条件下にあっても、浅い湖沼においては水温成層は形成されにくく、深い湖では季節的水温成層が発達しやすい。また、水面—大気間—の一年間の熱交換量は、浅い水域ほど小さい。逆に、同一の水深規模の水域でも、水面加熱による成層形成作用と風応力外乱による鉛直混合作用の相対的比率によって水温成層が発達しやすい水域とそうでない水域に分かれる。以上のように、季節～年スケールでみた場合の湖沼における熱収支量、水温成層特性を支配する要因としては、おおよそ、(1)熱的—外的条件、(2)力学的—外的条件、(3)水域規模、の三者に絞られる。なお、水温構造の季節的変遷を議論する場合には鉛直一次元的熱輸送過程が重要であり、水域規模として水域の水平スケールよりもむしろ水深が重要である。本研究ではこうした三つの支配要因に着目して水温構造年周変化を支配するパラメーターを導出し、成層構造の形成条件・熱収支量とこれら支配パラメーターとの関係を明らかにすることを目的とする。

2. 平衡水温を用いた水面熱収支量の評価法<sup>1)</sup>

通常、水温解析を行なう場合、熱収支量は既知のものとして与えられるが、実際には潜熱・顕熱交換量や水面からの逆輻射量などのように未知数である表層水温の関数項を含む。したがって、同一の気象条件下においても水深規模によって表層水温ひいては熱収支量が異なり、水温構造におよぼす水深規模の影響を議論する場合には、熱収支量が既知のものとして水温解析を行なうことはできない。そこで、本研究においては気象学的諸因子を平衡水温によって集約的に表現し、水温成層のみならず熱収支量の年周期変化も同時に解析する方法をとる。

水面での熱輸送成分は、①外的気象条件によって支配されるものと、②水表面水温が関係するもの、とからなる。熱輸送量をバルク公式によって評価し、総熱収支量 $Q_N$ が $Q_N=0$ となる条件より②に含まれる水面水温すなわち平衡水温 $T_s$ と②に含まれる各種気象量との間の関係式を求める。これより気象量を $T_s$ で表わして線形化すると、水面熱収支量が次式のように表わされる。

$$Q_N = K(T_s - T_a) \quad (1)$$

ここで、 $K=4\varepsilon\sigma\Delta^3+h+s\beta$ ：熱交換係数、 $\varepsilon$ ：水面の射出率(0.97)、 $\sigma$ ：ステファンボルツマン係数(11

$.7 \times 10^{-8} (\text{cal/cm}^2 \text{day}^\circ\text{C}^4)$ ),  $\Delta = 273 (\text{°C})$ ,  $h, s$ : 各々顕熱・潜熱輸送に関する伝達係数,  $\beta = de/dT$ : 飽和蒸気圧曲線 ( $e \sim T$ ) の微係数, である。

以上の中で  $s, h, \beta$  は厳密には定数係数ではないが, 気象条件に対する敏感な関数ではないので, 本解析で要求する精度の範囲内においては定数とみなすことができる。ここでは, 内島の研究報告<sup>2)</sup>などに基づいて  $s = 11.6 (\text{cal/cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$ ,  $h = 4.8 (\text{cal/cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{°C})$ ,  $\beta = 0.9 (\text{mmHg/°C})$  とおく。

### 3. 水温構造の解析方法

#### (1) 水域の力学的・熱学的エネルギー収支の年周変化

水面に供給される力学的・熱学的エネルギーの一年周期変化を模式的に示せば図-1 のようになる。すなわち, 風応力による力学的エネルギー  $W$  は断続的, 不規則に作用する。逸散量  $E$  も考慮した力学的エネルギーの有効量 ( $W + E$ ) は水域内の鉛直混合を促進し, 正の運動エネルギーを供給する。一方, 水面熱収支にともなって供給される浮力エネルギー  $B_I$  は一年の周期で変化する。受熱期の間は浮力安定効果によって鉛直混合を抑制し,  $B_I < 0$ , 放熱期においては熱対流によって鉛直混合を促進し,  $B_I > 0$  となる。以上のエネルギーの総和  $B_{II} = (W + E) + B_I$  (図-1 の斜線部分) が水温構造の変化に対して有効に働き, 内部ポテンシャルエネルギーとして蓄積される。以上のことをまとめると, 一年間の湖沼の熱力学的位相は次のように分類される。

##### (I) 受熱前期:

躍層が深い位置にあり, 浮力安定効果が風応力の擾乱効果を上回り, 有効エネルギー  $B_{II} < 0$  となる。これによって水温成層化がすすみ, 鉛直混合は生じない。

##### (II) 受熱後期:

躍層が浅くなり, 風応力の擾乱効果が浮力フラックスの安定化作用を上回り, 弱い鉛直混合が生ずる期間。

##### (III) 放熱期:

冷却による自然対流によって生ずる熱的擾乱と風応力の力学的擾乱がともに鉛直混合を促進する期間。

以上の各期間に対して以下のように積分成層模型を適用し, 水温解析を行なう。

#### (2) 水温解析法<sup>3)</sup>

水温分布は先の解析と同じく図-2 のように (a) 水温  $T_m$ , 厚さ  $h_m$  を有する混合層, (b)  $\Delta T$  なる水温ジャンプをもつ水温躍層部, (c) 連続的に成層化した  $T_i(z)$  の水温分布をもつ深水層, からなるものとする。 (I) ~ (III) の各期間に対する連行則を適用して混合層の発達速度  $dh_m/dt$  を評価し, 系内の熱保存則と連立させて解けば, 時々刻々の水温分布の解が得られる。解析の詳細は文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

なお, これまでの解析においては海洋のように無限水深水域を対象としており, 常にどこかの水深位置に躍層が存在する成層状態を対象としてきた。しかし, ここでは有限の水深をもつ水域を対象としており, 連行則から得られる躍層深さ  $h_m$  と水深  $H$  との大小関係を調べて,  $h_m < H$  の時は成層状態での水温解析を行い,  $h_m > H$  の場合は水域全体が一様水温の状態水温が変化するとして解析を行なう。

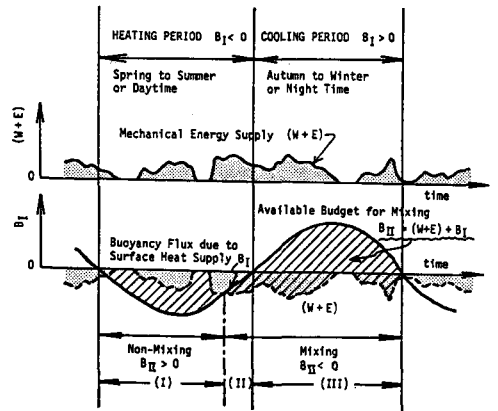


図-1 水域へ出入りする熱学的・力学的エネルギー収支の模式図

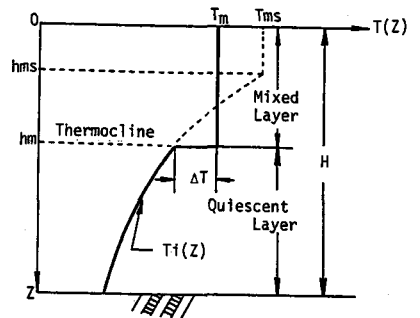


図-2 水温分布モデル

(3) 外的条件の与え方 (図-3 参照)

平衡水温 $T_0$ は水温の形で表わした外的気象条件である。ここでは季節変化を次式および図-3のように平衡水温の正弦変化によって表わす。

$$T_0 = \Delta T_0 \sin(\omega t + \phi) + T_{0a} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta T_0$ : 平衡水温の振幅、 $\omega = 2\pi/365(1/\text{day})$ ,  
 $t$ : 時間 (day),  $\phi$ : 位相遅れ時間,  $T_{0a}$ : 年平均平衡水温、である。

式(1)の $T_0$ としては混合層水温 $T_m$ を用いる。また、 $\rho c$ で除した形の水面熱フラックス $F(t)$ は

$$F(t) = Q_N / \rho c = k(T_0 - T_m), \quad (\text{ここで、} k = K / \rho c) \quad (3)$$

によって与えられる。

風応力については断続的かつ不規則である。ここでは

一年を通して等価な力学的擾乱に対応する一定の風応力摩擦速度 $u_*$ を図-3のように与える。

以上のようにして所定の $u_*$ と $\Delta T_0$ の条件の下に、水温構造の年周変化を解析する。その際、式(3)からわかるように熱収支量は水温解析の解 $T_m$ の関数でもある。式(2)中の位相遅れ角 $\phi$ については、一年間に出入りする総熱収支量が0となるような熱サイクル条件を満足するように決定される(図-3で示されるように $t=0$ と $365(\text{day})$ において $T_0 = T_m$ すなわち $F(t) = 0$ となるような $\phi$ が得られるまで水温年周変化の解析を繰り返す)。これによって、図-3の下段に示すような水面熱収支量の解が水温構造の解とともに得られる。なお、 $t=0$ において $F(t) = 0$ すなわち $T_0 = T_m$ とし、かつ $T_m(t=0) = 0$ (初期において全水深にわたり一様に水温が0とする)としているので $\phi$ が定まれば $T_{0a}$ は $T_{0a} = -\Delta T_0 \sin(\phi)$ として自動的に決定される。

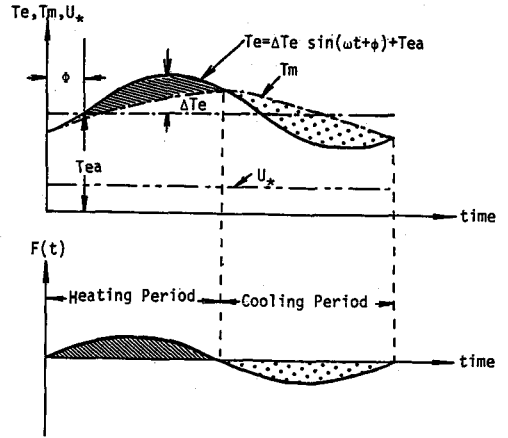


図-3 外的条件の与え方

4. 基礎方程式の無次元化と支配パラメーターの導出

(1) 無次元化

熱的外因に関して $\Delta T_0$ 、力学的外因に関して $u_*$ 、時間の代表量として $1/\omega$ を考え、さらに鉛直混合量・熱保存則に関する基礎方程式群を考慮すれば次のような代表物理量が導出される。

【長さ】  $h_0 = C_w u_*^3 / C_b \alpha g k \Delta T_0$ ,    【時間】  $t_0 = 1/\omega$ ,    【温度】  $T_0 = \omega C_w u_*^3 / C_b \alpha g k^2$     (4)

ここで、 $\alpha$ : 熱膨張係数,  $g$ : 重力加速度,  $C_w = 11.0$ : 風応力による連行効率をあらわす経験係数,  $C_b = 0.356$ : 安定な浮力束の混合抑制効果をあらわす実験定数、である。

以上の代表量を用いて本解析で用いる主要な基礎式と諸量を無次元化すると以下ようになる(各無次元量に $\sim$ を冠する)。

● 水面熱収支量 :  $\tilde{F}(t) = F(t) / \omega h_0 T_0 = (k / \omega h_0) (\tilde{T}_0 - \tilde{T}_m) = \Delta \tilde{T}_0 (\Delta \tilde{T}_0 \sin(\tilde{t} + \phi) + \tilde{T}_{0a} - \tilde{T}_m)$     (5)

ここで、 $\tilde{T}_0 = T_0 / T_0$ ,  $\tilde{T}_m = T_m / T_0$ ,  $\tilde{T}_{0a} = T_{0a} / T_0$ ,  $\tilde{t} = \omega t$ ,  $\Delta \tilde{T}_0 = \Delta T_0 / T_0$ 、である。

● 貯熱量 :  $\tilde{S} = \frac{1}{T_0 h_0} \int_0^H T(z) dz = \int_0^{\tilde{H}} \tilde{T}(\tilde{z}) d\tilde{z} = \tilde{T}_m \tilde{h}_m + \int_{\tilde{h}_m}^{\tilde{H}} \tilde{T}_i(\tilde{z}) d\tilde{z}$     (6)

ここで、 $\tilde{S} = S / T_0 h_0$ : 無次元貯熱量,  $\tilde{z} = z / h_0$ ,  $\tilde{T}(\tilde{z}) = T(z) / T_0$ ,  $\tilde{T}_i(\tilde{z}) = T_i(z) / T_0$  (底層の連続成層部の無次元水温),  $\tilde{H} = H / h_0$ : 全水深 $H$ の無次元量,  $\tilde{h}_m = h_m / h_0$ : 無次元混合層厚さ、である。

● 熱保存式 :  $d\tilde{S} / d\tilde{t} = \tilde{F}(\tilde{t})$

● 受熱時の混合速度の無次元表示 :

$$\frac{d\tilde{h}_m}{d\tilde{t}} = \frac{C_b \Delta \tilde{T}_0^2}{\Delta \tilde{T}_0 \tilde{h}_m} \{ 1 - \tilde{h}_m \cdot \sin(\tilde{t} + \phi) - \frac{\tilde{T}_{0a}}{\Delta \tilde{T}_0} \tilde{h}_m + \frac{\tilde{T}_m}{\Delta \tilde{T}_0} \tilde{h}_m \} \quad (7)$$

ここで、 $\Delta \tilde{T}_0 = \Delta T / T_0$ : 躍層部での水温ジャンプ $\Delta T$ の無次元量。

●放熱時の混合速度 $\tilde{h}_m$ の無次元表示 :

$$\frac{d\tilde{h}_m}{d\tilde{t}} = \frac{C_b \Delta \tilde{T}_0^2}{\Delta \tilde{T}_0 \tilde{h}_m} \left[ 1 - \frac{C_r}{C_b} \tilde{h}_m \left\{ \sin(\tilde{t} + \phi) + \frac{\tilde{T}_{0,a}}{\Delta \tilde{T}_0} - \frac{\tilde{T}_m}{\Delta \tilde{T}_0} \right\} \right] \quad (8)$$

ここで、 $C_r=0.45$ は熱対流による進行効率をあらわす実験定数である<sup>3)</sup>。

(2) 支配パラメーター

式(4)~(8)より次の二つの無次元量が支配パラメーターとなることがわかる。

☆  $\Delta \tilde{T}_0 = \Delta T_0 / T_0 = (C_b \alpha g k^2 \Delta T_0) / (\omega C_w u^3)$  : 平衡水温の無次元振幅であり、水温構造変化におよぼす熱学的一外的条件(熱収支量)と力学的一外的条件(風応力)の貢献度の比をあらわす。 $\Delta \tilde{T}_0$ が大きいほど「力学的一外的条件よりも熱学的一外的条件の貢献度が大きい湖」であることをあらわす。

☆  $\tilde{H} = H/h_0 = (C_b \alpha g k^2 H) / (\omega C_w u^3)$  : 無次元全水深であり、 $\tilde{H}$ が大きいほど「力学的に深い湖」であることをあらわす。

5. 水温構造年周変化の解析

(1) 前解析との比較

著者らは前に、水面熱収支の年周期変化を計算条件として与えて、無限水深水域での水温成層の解析を行った。図-4に本解析(実線)と前解析(一点鎖線)との比較を示す。本解析で得られる熱収支量の解は前解析において用いた三角形分布の熱収支量変化とほぼ同様である。また、混合層水温 $\tilde{T}_m$ 、混合層厚さ $\tilde{h}_m$ についてともによく一致しており、本解析で水温構造・水面熱収支量の年周変化特性を再現できることが確認される。

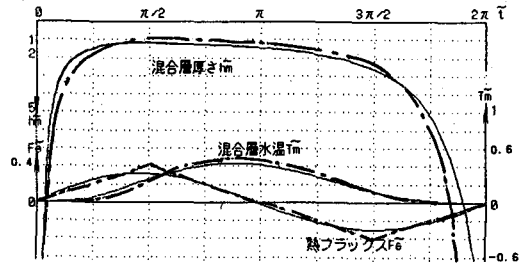


図-4 前解析値(一点鎖線)と本解析値(実線)との比較

(2) 湖沼における水温観測値との比較

図-5に規模の異なる三種類の湖の水温観測値と本解析との比較を示す。各図とも上段が表層混合層水温 $T_m$ 、下段が等水温線の観測値(細線群)と本解析による躍層位置 $h_m$ (太線)の計算結果を表わす。現時点では一年を通しての等価な $u$ の値を客観的に定める手だてがないので、ここでは受熱最盛期の躍層位置について実測値と計算値が一致するような $u$ を与えている。その値を同図中に併記しているが、現地で発生し得る範囲の合理的な大きさとなっている。

6. 成層特性におよぼす支配パラメーターの影響

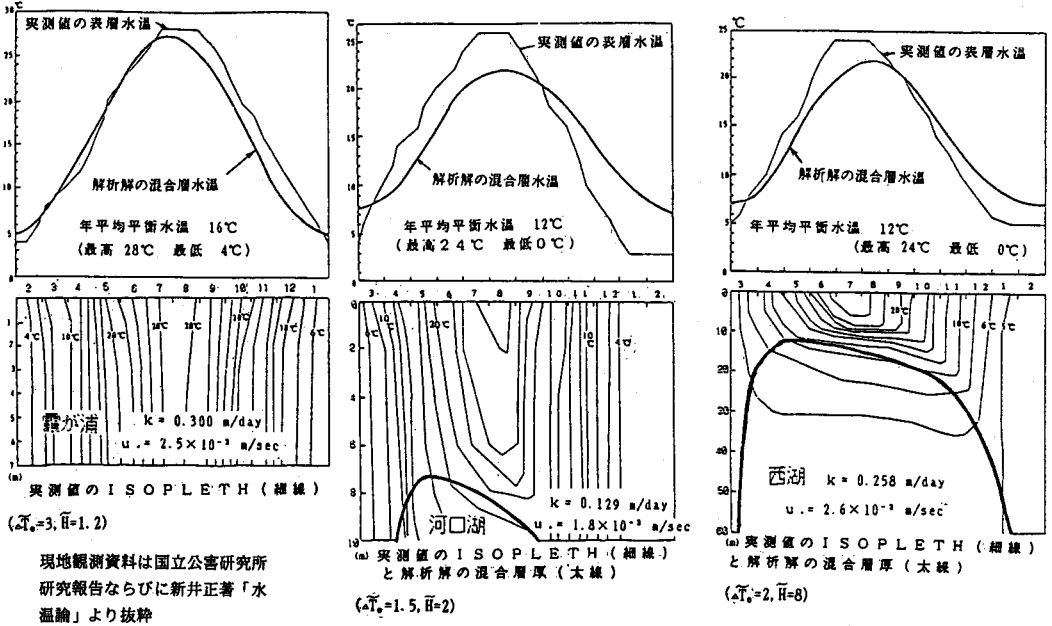
4.(2)において導出された二つのパラメーター、 $\Delta \tilde{T}_0$ と $\tilde{H}$ が成層特性におよぼす影響について検討する。図-6は等水温線(各図の上段)、熱収支量 $\tilde{F}(\tilde{t})$ (下段の実線)および表層水温 $\tilde{T}_m$ (下段の点線)の年周期変化をいくつかの $(\tilde{H}, \Delta \tilde{T}_0)$ の組合せに対して示したものである。 $\tilde{H}$ が大きいほど成層が形成されやすく、 $\Delta \tilde{T}_0$ の影響は主として総熱収支量あるいは混合層水温の大きさにあらわれている。同図より水温成層の年周期変化形態を以下の三種類に分類することができる。

- ① 一年を通して成層が形成されない混合型の水域。→ [M-型] と称する。
- ② 成層が形成されるが、加熱フラックスが小さくなった受熱期後半において成層が破壊され、一様に混合する水域→ [MS-型]
- ③ 成層が形成され、放熱期において大循環を生ずる水域→ [S-型]

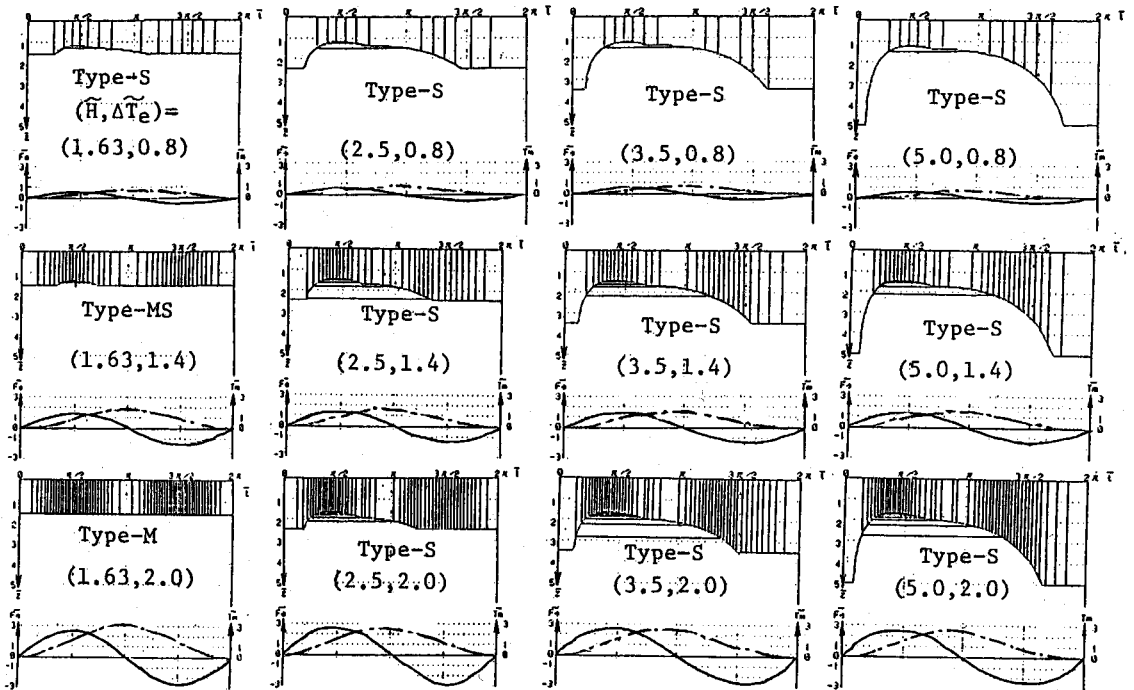
図-7はこれらのカテゴリーを支配パラメーター $\tilde{H}$ と $\Delta \tilde{T}_0$ の関数として表現したものである。同図中の曲線群は躍層の維持時間 $t$  ( $0 \leq \tilde{t} < 2\pi$ )の等値線を $\tilde{H} \sim \Delta \tilde{T}_0$ 平面上であらわしたものである。いくつかの湖の躍層維持時間も数字によって併記している。同図から、 $\Delta \tilde{T}_0$ よりもむしろ $\tilde{H}$ の方が成層特性により大きく

影響することがわかる。また、本解析は実際の湖沼の成層特性を良好に捉えている。

図一八は混合層水温 $\tilde{T}_m$ の最大値 $\tilde{T}_{m, \max}$ を $\Delta\tilde{T}_e$ と $\bar{H}$ の関数として示したものである。この場合は $\bar{H}$ よりもむしろ



図一五 異なるタイプの湖沼における水温年周変化の実測値と解析値



図一六 等水温線 (上段図)、表層水温 $\tilde{T}_m$  (下段点線) および水面熱フラックス $\tilde{F}(t)$  (下段実線) 年周変化形態におよぼす ( $\bar{H}, \Delta\tilde{T}_e$ ) の影響

パラメーター $\Delta\tilde{T}_e$ の影響の方が大きい。湖沼の実測値も概ね解析結果の傾向と一致しており、本解析の妥当性が裏付けられる。

図-9は貯熱量 $\tilde{S}$ 、表層水温 $\tilde{T}_m$ 、水温場のポテンシャルエネルギー $\tilde{P}$ 、水温成層の力学的安定度をあらわす力学的ポテンシャルエネルギー $\tilde{D}_v$ の年周変化の履歴曲線を数種の $(\tilde{H}, \Delta\tilde{T}_e)$ の組合せに対して示したものである。 $\tilde{D}_v$ は $\tilde{H}, \Delta\tilde{T}_e$ とともに増加するが、 $\tilde{P}$ や $\tilde{S}$ は $\tilde{H}$ にはあまり影響されず、主として $\Delta\tilde{T}_e$ に依存して増加することがわかる。

### 7. むすび

本研究では水域規模のスケールとして水深をとっている。厳密には、吹送距離と関連する湖の水平スケールをも考慮して風応力の力学的擾乱効果の中にも含めるべきことも考えるべきであろう。しかし、吹送距離が重要となるような大規模水域を対象とする場合は、さらにコリオリ効果や水平循環流など三次元現象をも考慮に入れる必要があり、その場合には、本解析のような明快な解析を行なうことは不可能である。

本研究は鉛直一次元過程が成立する程度の中小規模水域を対象としている。

また、逆列成層、結氷なども含めた水温・熱収支解析を今後行なわなければならないと考えている。

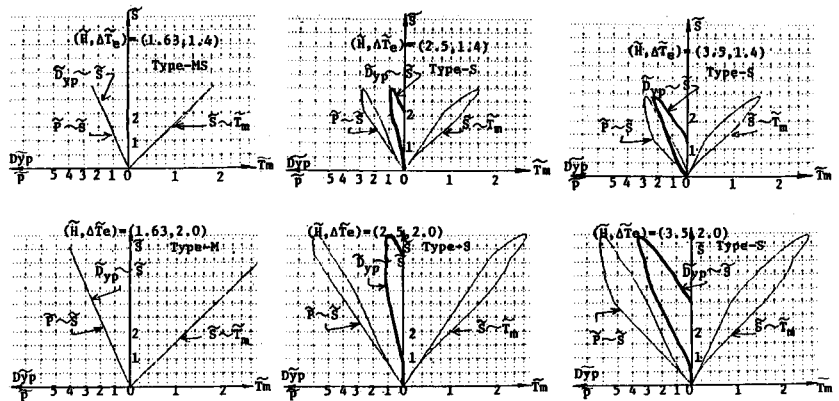


図-9 貯熱量 $\tilde{S}$ 、混合層水温 $\tilde{T}_m$ 、ポテンシャルエネルギー $\tilde{P}$ 、力学的ポテンシャルエネルギー $\tilde{D}_v$ の年周期履歴特性

### 参考文献

- 1) Tetzlaff, G.: The Daily Cycle of the Water Temperature of A Shallow Lake, "Hydrodynamics of Lakes", edited by Graf, W.H. and Mortimer, C.H., Elsevier Sci. Publ. Comp., pp.325-330, 1979.
- 2) 内島善兵衛: 温水池の熱収支および水温上昇の研究, 農業技術研究所報告A第7号, pp.13~21, 1959.
- 3) 室田明・道奥康治・阪口進一: 停滞水域の水温構造年周変化に関する考察, 第32回水理講演会論文集, pp.263~268, 1988.
- 4) 室田明・道奥康治: 機械的擾乱と熱的擾乱が共存した密度成層場での鉛直混合に関する研究(その2), 第30回水理講演会論文集, pp.697-702, 1986.

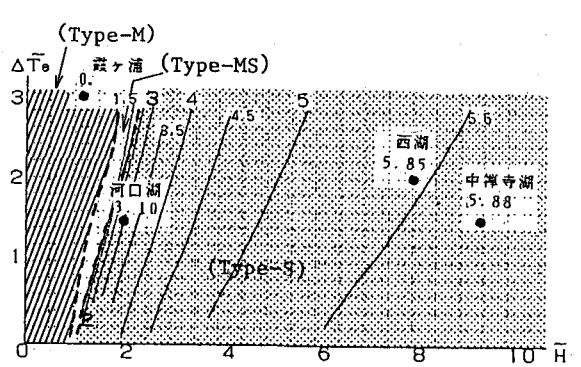


図-7  $\Delta\tilde{T}_e$ と $\tilde{H}$ による水温成層特性の分類

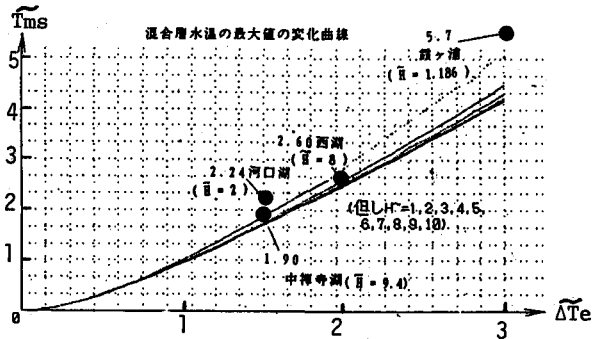


図-8 混合層水温の最大値 $\tilde{T}_{ms}$ と $\Delta\tilde{T}_e, \tilde{H}$ との関係