

温帯湖の密度成層特性と熱サイクル

Density Stratification and Thermal Cycle
in Temperature Zone Lakes

道奥康治*

By Kohji MICHIOKU

In lakes and reservoirs we can gain high contrast of temperature differences between impounded waters and air as well as between surface and deep layer waters. They could be available for power generation, once we succeeded in developing efficient thermal power generation systems. As a feasibility studies for utilization of lakes thermal energy, the authors performed an analysis to describe density structure and annual thermal cycles in temperature zone lakes. In the analysis, winter stratification situations as well as freezing phase are successfully formulated, while they have never been considered in any lake models so far.

Keywords: winter stratification, lake temperature, ice formation,

1. はしがき

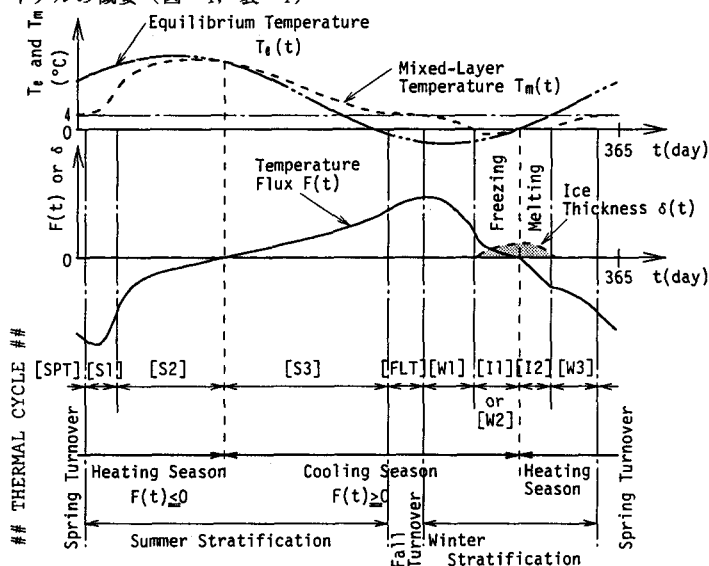
未利用エネルギーの1つとして河川・海域の熱エネルギー利用が考えられている。低レベルではあるが包蔵電力の大きい熱資源は、効率の高いヒートポンプや温度差発電技術の開発によって、将来その需要を高めることになる。湖沼や貯水池に蓄えられる熱を利用することは次の点で河川の場合より有利である。(1) 水深が大きいほどその貯熱効果によって温度の年周変化は大気より時間的にずれ、「河川-大気」間に比べて、常時大きな「大気-湖面」間温度差を持つ。(2) 水温成層が形成される場合には、「表層-底層」間の温度差ポテンシャルも利用することができる。湖・貯水池における熱エネルギー資源量は、その水温構造・熱収支量の年周変化を評価することによって算定される。著者らはこれまで逆列成層や氷結の見られないいわゆる「熱帯湖」を対象として水温・熱収支解析を行ってきた。逆列成層は0~4℃の狭い水温範囲で形成される弱い密度成層であるので、水体の力学的安定度におよぼす効果は比較的小さい。しかし、熱学的観点から見ると、「水-氷」間の比熱差が大きいため結氷熱容量は1年の熱サイクルに大きな影響を与える。

以上の背景に基づいて、本研究では氷結、逆列成層過程を含む「温帯湖」における密度成層・熱サイクル特性を明らかにし、湖沼・貯水池における熱エネルギー再開発のための解析的背景を確立することを目的としている。

* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

2. 温帯湖の密度成層の変遷と熱サイクルの概要 (図-1, 表-1)

温帯湖の1年間の密度成層の変遷と熱サイクルを整理して図-1と表-1に要約する。図-1ではほぼ全ての素過程を経る場合について例示している。簡単のために、以降、各素過程の名称は同図・同表中に示した略号を用いる。現実には1年間で全ての過程を常を経験するわけではなく、いくつかの過程の組み合わせより1年のサイクルが構成される。例えば、表中のW1, W2, W3, I1, I2のいずれも経験しない場合は水温が常に4℃以上に保たれる「熱帯湖」に相当する。



3. 解析法

平衡水温の概念を導入したバルク式と混合層モデルによって、

(湖面の熱収支) / (湖内の水温) の混成解析を行う。

詳細は「熱帯湖」に関する著者らの研究¹⁾に記載されているので、ここでは「温帯湖」特有の現象に関連する解析のサブモデルについて重点的に説明する。

3.1 水温と熱収支量の解析

解析の簡素化と水温と熱収支量の解を同時に得る目的で、水面での温度フラックス $F(t)$ (°C/day) は次式のバルク公式とsin関数変化する平衡水温 T_e によって記述する。

[温度フラックス] :

$$F(t) = -k(T_e - T_m) \quad \text{.....(1)}$$

[平衡水温] :

$$T_e(t) = \Delta T_e \sin(\omega t - \phi) + T_{e0} \quad \text{.....(2)}$$

ここで、 T_m : 表層水温, $2\Delta T_e$: 平衡水温の年較差,

T_{e0} : 平衡水温の年平均値, $\omega = 2\pi/365$ (1/day), t : 時間(day)である。 $F(t)$ は受熱時に負, 放熱時に正の値をとる。また、Eq. (2)中の位相差 ϕ は熱収支が1年でクローズするという制約条件から決定される。先の解析¹⁾では熱収支式を線型化し、各種気象条件の典型的な値を導入することによって、 $k = 0.45$ (m/day)なる定数値を得た。これによって熱収支量・水温構造の年周変化の観測値を説明できたことから¹⁾、概ね合理的な値と考えているが、直接これを検証するために、ある貯水池において著者らが観測した熱収支量とEq. (1)との比較を図-2に示す。図よりEq. (1)の妥当性が確認される。正列成層の場合の水温分布は、図-3の実線で示すように、一様な水温 T_m の表層混合層部と下層の連続成層部より構成されるKraus-Turner-typeの混合層モデル²⁾によって表現される。

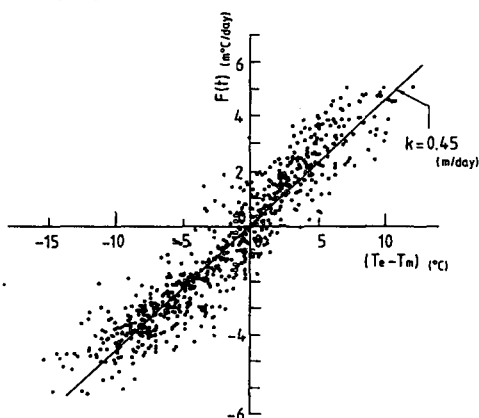


図-2 水面の熱交換係数 k の検証 (Dataは著者らの観測値, 直線はEq. (1)).

3.2 逆列成層の取扱い

$T(z) = 0 \sim 4^\circ\text{C}$ の範囲においては図-3の破線のような逆列成層が形成される。密度成層の発達・混合過程の

表-1 温帯湖の1年間の熱サイクルで生ずる熱素過程の一覧（図-1に対応）

【LEGEND】 F_t : 熱フラックス $F(t)$ (放熱 [鉛直上向きのフラックス] を正とする)
 δ : 氷厚, T_i : 氷表面の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

略号 CODE	生起する現象 (Phenomena)	水面での熱交換 Heat Flux, $F(t)$	Mixed-Layer Temp., T_m ($^{\circ}\text{C}$)	混合層厚 (Layer Thickness, h_m)	氷厚 (Ice) δ
SPT	春期大循環と全層混合 Spring Turnover and Full Scale Mixing	加熱 Heating $F(t) < 0$	$T_m \leq 4$ & $T_m \geq 4$	$h_m = H$	NON-FREEZING PHASE ($\delta = 0$)
S1	正列成層の形成 Development of Summer Stratification		正列成層 $T_m \approx 4^{\circ}\text{C}$	h_m が減少 ($dh_m/dt < 0$) stratifying	
S2	正列成層が受熱条件下で混合 Erosion of Summer Strati- fication with Warming			h_m が増加 ($dh_m/dt > 0$) destratifying	
S3	正列成層が放熱条件下で混合 Erosion of Summer Strati- fication with Cooling			h_m が増加 ($dh_m/dt > 0$) destratifying	
FLT	秋期大循環と全層混合 Fall Turnover and Full Scale Mixing	冷却 Cooling $F(t) > 0$	$T_m \leq 4$ & $T_m \geq 4$	$h_m = H$	NON-FREEZING PHASE ($\delta = 0$)
W1	逆列成層の形成 Development of Winter Stratification		逆列成層 $T_m \approx 0^{\circ}\text{C}$	h_m が減少 ($dh_m/dt < 0$) stratifying	
W2	逆列成層が放熱条件下で混合 Erosion of Winter Strati- fication with Cooling			h_m が増加 ($dh_m/dt > 0$) destratifying	
I1	氷結期 Freezing		$T_m = 0$ $T_i < 0$	$h_m = \text{const.}$ unchanged	$d\delta/dt > 0$ Freezing
I2	融解期 Melting	加熱 Heating $F(t) < 0$	$T_m = 0$ $T_i = 0$	$h_m = \text{const.}$ unchanged	$d\delta/dt < 0$ Melting
W3	逆列成層が受熱条件下で混合 Erosion of Winter Strati- fication with Warming		逆列成層 $0 \leq T_m \leq 4^{\circ}\text{C}$	h_m が増加 ($dh_m/dt > 0$) destratifying	氷厚減少 ($d\delta/dt < 0$)

機構は正列成層の場合と同じと考えられ、著者らが提案してきた連行則・熱保存式¹⁾を用いる。ただし、正列・逆列成層の双方を取り扱うので、 4°C 付近における「密度 ρ - 水温 T 」の関係は非線形性が強く、熱膨張係数を用いた密度換算はできない。ここでは、状態方程式を直接用いる。

3.3 氷結・融解時の解析

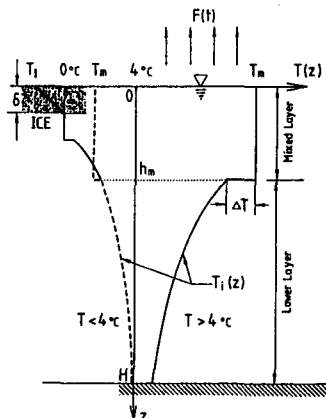
$T_m \leq 0$ の時、氷結が開始する。季節スケールの変化を考える時、氷内の熱伝導過程に比べ気象条件の変化はゆるやかで準定常と考えられるので、氷層内の温度は線型分布とみなしてよい。図-3中のような水層モデルを考え、氷厚 $\delta(t)$ 、氷表面温度 $T_i(t)$ の経時変化を求める。結氷河川に関するShenらの研究²⁾を参考にして、氷結時なら

びに融解時の潜熱保存式、氷上下面での境界条件を表-2のように与 図-3 温度分布モデルと氷層モデル

える。氷厚 δ は氷結時・融解時ともに Eq. (3) で与えられる。また、氷表面の温度 T_i は、Eqs. (4), (5), (6) から

$$\cdot \text{氷結時: } T_i = k' \delta T_0 / (k' \delta + \kappa_1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\cdot \text{融解時: } T_i = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$



となる。氷下面では混合層の水と接しているので、氷結時・融解時ともに $T_m=0(^{\circ}\text{C})$ で一定と考える。ここで、「大気-氷表面」間の熱交換係数 k' は、厳密には氷の表面状態 (Fragil, Black, Snow Ices, etc.) に支配される。 k' について数多くの検討がなされているが、統一的な見解はまだ得られていない。さらに厳密な議論が必要であるが、氷結時にも「大気-氷表面」境界面と同じオーダーの熱交換係数を有するという報告⁴⁾に基づいて、ここでは $k=k'$ と仮定する。解氷が完了した後は、受熱条件のもとで逆列成層場での鉛直混合が進行する状態に復帰する。

表-2 氷結・融解時の氷層厚 δ 、氷表面温度 T_i の算定式
(a) 氷結時 (Cooling, $F(t) \geq 0$, $T_a \leq T_i$)

氷の潜熱保存式	氷表面での熱フラックス連続式	氷下面での境界条件
$\frac{1}{c} \cdot \frac{d\delta}{dt} = F(t) \dots (3)$	$\kappa_i \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa_i \frac{T_m - T_i}{\delta} = F(t) \dots (4)$	$T_m = 0 (^{\circ}\text{C}) \dots (5)$

(b) 融解時 (Heating, $F(t) \leq 0$, $T_a \geq 0$, $T_i = 0 (^{\circ}\text{C})$)

氷の潜熱保存式	氷表面と下面での境界条件	ここで、 $\kappa_i = 0.047 [\text{m}^2/\text{day}]$ は氷の熱拡散係数である。
$\frac{1}{c} \cdot \frac{d\delta}{dt} = F(t) \dots (3)$	$T_i = 0 (^{\circ}\text{C}) \dots (6)$ $T_m = 0 (^{\circ}\text{C}) \dots (7)$	

4. 解析例

平衡水温に関しては各地の観測データを統計的に解析し、 ΔT_a 、 $T_{a,s}$ の変化範囲を決定すべきであるが、ここでは、内島の平衡水温マップ (日本)⁹⁾に基づいて、 $\Delta T_a = 12.0 (^{\circ}\text{C})$ 、 $T_{a,s} = 6 \sim 18 (^{\circ}\text{C})$ の範囲で検討を行う。また、風応力については1年間の等価摩擦速度として $u_* = 0.18 (\text{cm}/\text{sec})$ を与える。表-1に示した各素過程の組み合わせより想定し得る年周変化パターンは表-3のようである。水深 H と年平均平衡水温 $T_{a,s}$ をパラメーターとして $\Delta T_a = 12.0 (^{\circ}\text{C})$ に対する熱サイクルパターンを示すと図-4のようになる。可能性としては表-

表-3 熱サイクルにおける各種Regimeの出現の組み合わせと熱サイクルパターン

PATTERN	REGIME	SPT	S1	S2	S3	FLT	W1	W2	I1	I2	W3	Development of Stratification
	ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
(I) NF (Non-Freezing)												
(A) FM		*	-	-	-	*	-	-	-	-	-	No Strati- fication
(B) SS _{HM}		*	*	*	-	*	-	-	-	-	-	Summer Strati- fication
(C) SS _{CM}		*	*	*	*	*	-	-	-	-	-	
(D) WS _{CM}		*	-	-	-	*	*	*	-	-	-	Winter Strati- fication
(E) WS _{HM}		*	-	-	-	*	*	*	-	-	*	
(F) SWS _{HM-CM}		*	*	*	-	*	*	*	-	-	-	Summer & Winter Stratification
(G) SWS _{CM-CM}		*	*	*	*	*	*	*	-	-	-	
(H) SWS _{HM-HM}		*	*	*	-	*	*	*	-	-	*	
(I) SWS _{CM-HM}		*	*	*	*	*	*	*	-	-	*	
(II) FR (Freezing)												
(J) FM		*	-	-	-	*	-	-	*	*	-	No Strati- fication
(K) SS _{HM}		*	*	*	-	*	-	-	*	*	-	Summer Strati- fication
(L) SS _{CM}		*	*	*	*	*	-	-	*	*	-	
(M) WS _{HM}		*	-	-	-	*	*	-	*	*	*	Winter Strati- fication
(N) SWS _{HM-HM}		*	*	*	-	*	*	-	*	*	*	Summer & Winter Stratification
(O) SWS _{CM-HM}		*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	

【NOTATION】 * : Regimeを経験する。 - : Regimeを経験しない。

3のように全部で15種類が考えられるが、本解析で与えたEq.(2)の平衡水温変化のもとではその全てが現出していないことがわかる。代表的なパターンとして、表-3中の(A),(C),(I),(J),(L),(O)の場合に対応する表-4の条件のもとでの解析結果を以下に示す。

4.1 水温構造

図-5は各々のCaseに対する等水温線(Isopleth)である。横軸の時間 $t(\text{day})$ は熱帯湖に関しては受熱が開始する時間 ($F(t)=0$ かつ $dF(t)/dt \leq 0$)、温帯湖に関しては水温がちょうど 4°C になる春期循環時を、各々原点にとっている。縦軸は全水深 H で無次元化された水深 z/H である。細線は等水温曲線 (各線の温度差は $1(^{\circ}\text{C})$)、太実線は躍層位置 h_m/H 、太破線は氷氷が見られる場合の氷厚 δ/H である。(A),(C),(I)は氷結しない場合、(J),(L),(O)は氷結する場合である。氷結・逆列成層がともに見られない(A),(C)のみが熱帯湖であり、その

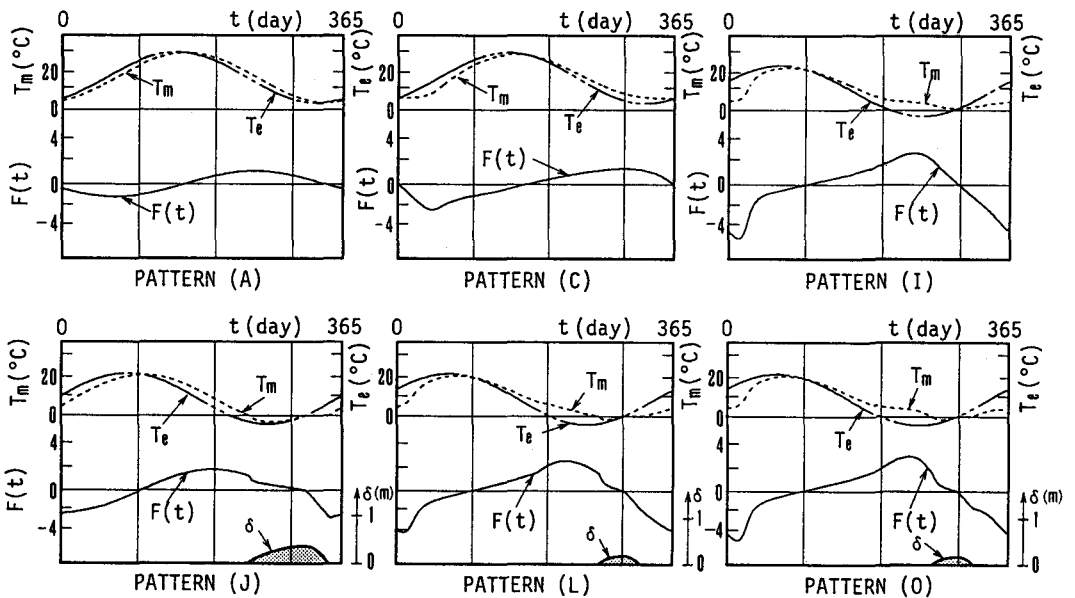


図-6 図-5のCaseに対する各諸量（表層水温 T_m ，平衡水温 T_e ，温度フラックス $F(t)$ ，氷層厚 $\delta(t)$ ）の時系列。

6. むすび

温帯湖の密度構造の発達特性と熱サイクルを解析的に記述した。熱密度流現象にともなう物質輸送過程の記述のみならず「大気-水」，「表層-底層」間の温度差を利用したエネルギー開発のFeasibility Studyに際しても，本研究が一つの解析的根拠になり得ると考えている。今後，各地の観測資料-特に結氷湖沼-を収集してモデル定数をチューニングするとともに，経済効果などを考慮した湖沼・貯水池の熱エネルギー利用に関する検討を行う予定である。

本研究は河川環境管理財団河川整備基金（助成番号3-1-7-2）の援助のもとに遂行された。

参考文献

- 1) Michioku, K. and Kadoyu, K.: Parametric Analysis on Annual Variation of Surface Heat Exchange and Thermal Structure in Lakes, J. Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.10, pp.77-94, 1992.
- 2) Kraus, E.B. and J.S.Turner: A one-dimensional model of the seasonal thermocline, II. The general theory and its consequences, Tellus, 19, pp.98-105, 1967.
- 3) Shen, H.T. and Chian, L.A.: Simulation of Growth and Decay of River Ice Cover, Proc.ASCE, J.Hydraulic Engin., Vol.110, No.7, 958-971, 1984.
- 4) Ashton, G.D., ed.: River and lake ice engineering, Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1986.
- 5) 内島：水温の熱収支気候学的研究，農業技術研究所報告，A-7号，pp.131-181，1959.