

中禅寺湖の岸付近における水温変動特性

Temperature Variation in Nearshore of Lake Chuzenji

国立公害研究所 正員 平 田 健 正

国立公害研究所 正員 村 岡 浩 爾

1. はじめに

水温躍層内の step 構造形成に代表される小規模な混合現象は、その要因としてせん断不安定¹⁾や内部波の碎波²⁾に求められてきた。ただ混合現象に伴う水温の転倒を捉えた観測例は数少ない。³⁾ 事実、著者等も中禅寺湖で湖水温の観測を行ってきたが、^{4),5)} 7~8m/s の風が吹いている状態でも湖の中央に沿った水温鉛直分布にはほとんど水温の転倒は観測されていない。他方、中規模程度の湖について、Fischer et al.⁶⁾やSpiegel・Imberger⁷⁾は境界の非一様性に起因する混合の重要性を指摘しており、Tahoe湖での観測例も報告されている⁸⁾。また著者等の行った中禅寺湖の内部セイシュの観測資料からも、境界付近での混合を示唆する結果が得られている。⁵⁾

境界付近の混合とは言っても、側岸や底面の凹凸、あるいは斜面を遡上する内部波の碎波も含まれ、現象は複雑である。加えて、水温鉛直分布の観測が主体であり⁹⁾、岸付近の水温構造については不明な点が多い。こうした現状を踏まえ、著者等は中禅寺湖の千手ヶ浜で水温の定点観測と水温の鉛直分布の測定を行った。これらの観測資料を基に本研究では、まず岸付近の内部セイシュの特性を調べる。続いて、水温変動時系列から卓越する成分を抽出し、水温鉛直分布の観測結果と併せて、中禅寺湖における岸付近の水温特性について考察する。

2. 現地観測の概要

中禅寺湖千手ヶ浜の地形断面図と観測地点を図1に示す。千手ヶ浜は中禅寺湖の西端に位置し、湖南北方向のほぼ中央部に観測水域を設定した。この水域は汀線から勾配約 1/3 の斜面が100m程度続き、それ以降は勾配 1/4~1/5 の斜面となっている。水温観測地点はSt-(a), (b), (c), (d)の4点であり、水深はそれぞれ19.5, 30, 40, 80 mである。また各観測地点は岸から64, 91, 120, 330mの位置にある。

内部セイシュの観測は、St-(c)および(d)の密度界面位置で水温の時間変化を測定して行った。用いた機器はハイドロラブ水温計2基で、測定間隔はいずれも5分、観測期間は1984年7月末から8月上旬である。

続いて、岸付近の水温変動パターン、およびその変動に伴う混合現象を捉えるため、水温の定点観測と水温鉛直分布の測定を実施した。水温時系列はSt-(a)と(c)の2点で、特にSt-(a)では鉛直方向に0.5mの間隔を置いて2点で検出している。観測機器はハイドロラブ水温計2基と時軸センサー型水温計1基である。前者は1分間隔、後者は15秒間隔で岸付近の水温変動を追跡した。観測は1984年8月中旬から10月末にかけて3回行った。また水温鉛直分布については各観測期間中はほぼ1.5時間毎に、St-(a)から(d)

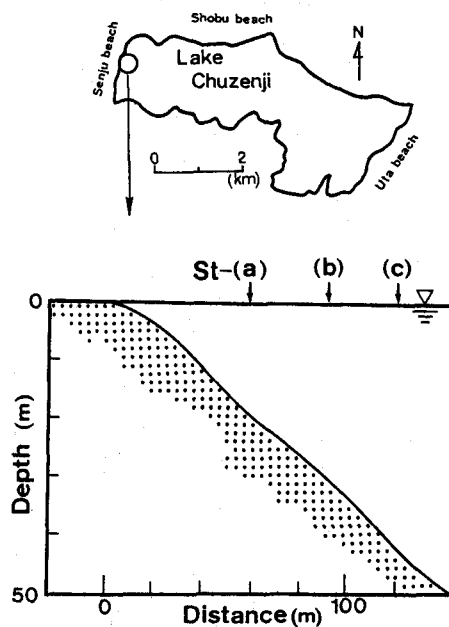


図1 千手ヶ浜の地形断面図と観測地点

の4地点で測定した。

3. 内部セイシュの特性

図2はSt-(c)と(d)の密度界面位置(表層と底層の中間密度で定義される位置で、この場合は水深10m)で得られた8月20日12時から25日12時までの水温の経時変化であり、図中に水温変動幅を水温躍層内の水温勾配で除して求めた鉛直変位の換算スケールも記している。以後、水温時系列は観測地点名で表示することとする。これらの観測時は受熱期に相当するため、時系列の平均水温は上昇している。また(c)、(d)いずれの時系列にも基本モードの内部セイシュによる周期にして12時間程度、波高にして5~6mの変動が見られる。そして岸側程水深が小さくなること、および内部セイシュのloopに近づくことから、水温変動幅も増加している。水温変動幅に差違はあるものの、両者は良く対応しており、実際に相互相関係数にもほとんど位相は現れていないことから、中禅寺湖では湖全域に内部セイシュによる界面振動が存在する様である。

図3は図2の時系列(c)と(d)からFFT法で計算された水温変動スペクトルである。いずれも内部セイシュの周期に相当する12.2時間に最大のピークが現れ、内部セイシュに起因する水温変動が卓越していること

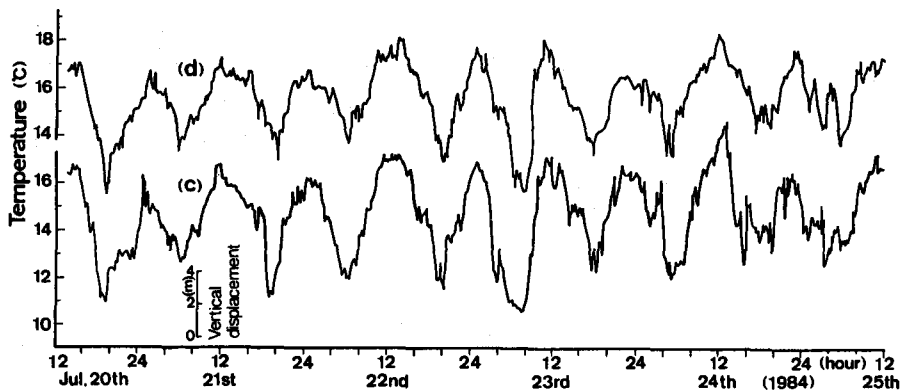


図2 St-(c)と(d)で観測された7月の水温変動時系列

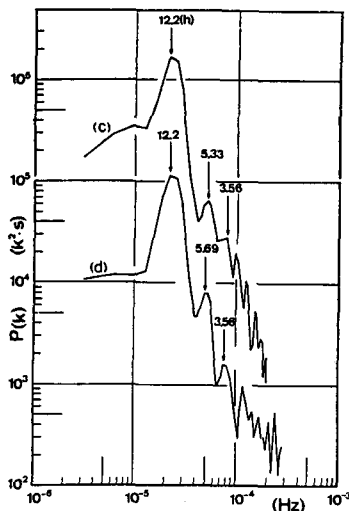


図3 水温変動スペクトル

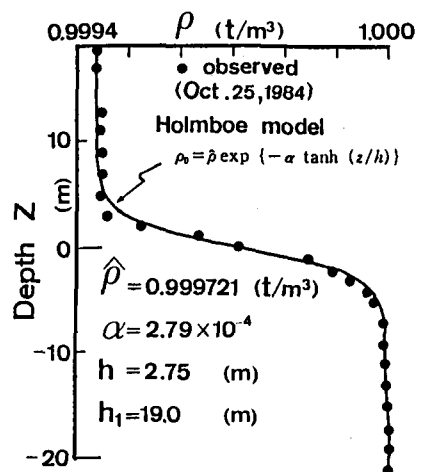


図4 観測期間中の密度分布

が分かる。因みに、Holmboe モデルから得られる内部セイシュの周期は 11 時間である。そして前報で報告した様に、⁵⁾基本周波数成分の 2 倍および 4 倍の周波数成分も認められる。

4. 岸付近の水温特性

ここでは 1984 年 10 月末に実施した観測結果を中心に考察する。水温時系列は St-(a) の 19.5 m (時系列(a)-1) と 19.0 m (時系列(a)-2), および St-(c) の 18 m (時系列(c)) の 3 点で検出し、水温鉛直分布は(a)から(d)までの 4 地点で日中ほぼ 1.5 時間毎に観測している。図 4 に観測期間中の St-(d)の密度分布を示す。図中に Holmboe の密度分布形も載せているが、同式は実測値を良く近似していることが理解される。観測時の平均的な密度界面は水深 19.0 m にあり、したがって時系列(a)-1 と 2 の検出位置は密度界面が岸付近の湖底と接する部分に相当する。この時系列(a)-1 を図 5 に示す。図には内部セイシュによる水温変動パターンが見られ、図 2 と比較して岸付近の水温変動は短周期成分が卓越している点に特徴付けられる。

4.1 水温変動特性

10 月 25 日 0 時 30 分から同 7 時までの水温時系列(a)-1 と(c)を図 6 に比較している。両者共にハイドロラブ水温計を用いて、1 分間隔で測定した資料である。同図から、1) いずれの時系列にも周期 10 ～ 15 分の変動成分が存在すること、2) 時系列(a)-1 の水温変動幅は(c)のそれより大きいこと、が分かる。図

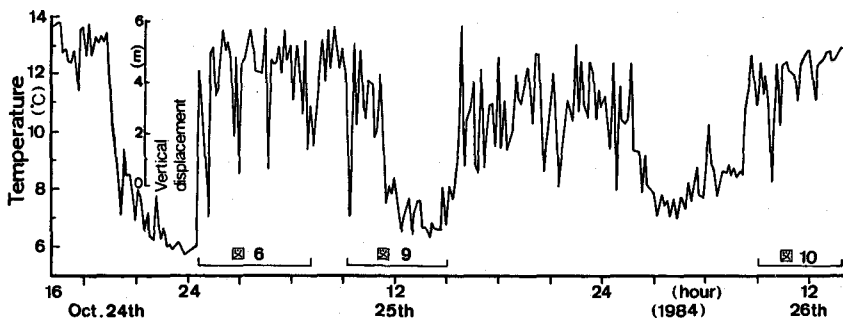


図 5 St-(a)で観測された 10 月の水温変動時系列

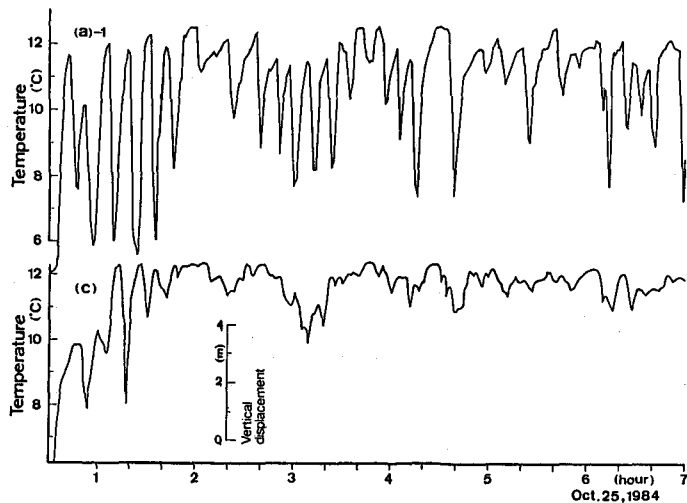


図 6 St-(a)と(c)の水温変動時系列の比較

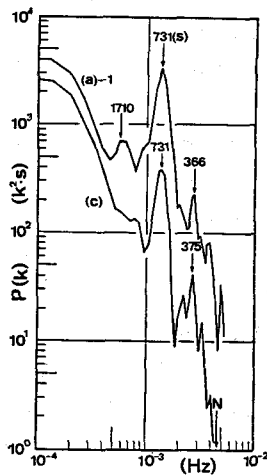


図 7 水温変動スペクトル

7にこれらの時系列から計算された水温変動スペクトルを描いている。用いたデータは25日0時30分から4時45分までの256個である。図中横軸に示したN値は図4にプロットした密度分布形から、界面付近の密度分布を直線近似して得られたブルント・バイサラ振動数であり、周期にすると228秒となる。いずれのスペクトルにも731秒付近に卓越した周期成分が現れ、図6にある水温変動パターンを反映している。また低周波側で若干ずれているが、総じて両者は良く対応している。そこで、これらの時系列の位相関係を調べるため時系列(a)-1に時間遅れを与えて相互相関係数を求めると図8の様である。同図から、時系列(a)-1は(c)に比べて4分程度遅れていること、および相互相関係数に先述した10分程度の周期成分が重畳していることが分かる。

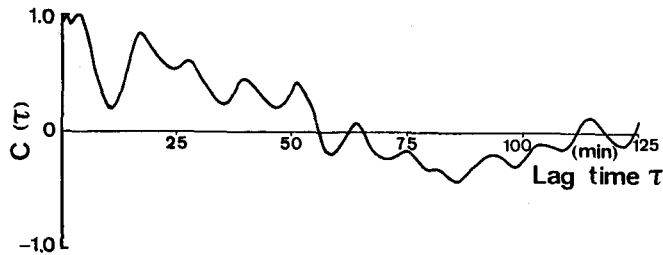


図8 時系列(a)-1と(c)の相互相関係数

つぎに、周期731秒の水温変動成分が内部波に励起されていると考える。周期を731秒とし、水深はSt-(a)と(c)の水深の平均値として30m、および図4中の水理諸量を用いてHolmboeモデルから波長を推算すると129m、波速は0.18m/sとなる。すなわち、St-(a)と(c)は56m離れていることから、内部波がSt-(a)——(c)間を進行するのに約5.3分要することを意味する。この値は先述した時系列間の時間遅れとはほぼ合致する。さらに岸に近づくことによる水温変動幅の増加も、斜面を遡上する内部波の浅水変形の影響を受けた結果と解することができる。

しかしながら、時系列の検出位置が両者において鉛直方向に若干異なること、および後述する25日8時30分から12時45分までの資料には顕著な時間遅れは認められないことから、図6に描かれた水温変動は全て内部波に依存するとは断言できない。ここで言えるのは、岸付近にはブルント・バイサラ周期の約3倍の変動成分が卓越していることである。

4.2 水温鉛直分布と水温の転倒

前節では岸付近で観測された水温変動時系列から卓越する成分を抽出し、その特性について考察した。こうした変動成分により混合が生じているかどうかを調べるため、St-(a)の水深19.5m(時系列(a)-1)と19.0m(時系列(a)-2)の2点で観測した水温時系列を図9に示す。観測は10月25日8時30分から7.3時間、前者はハイドロラブ水温計(測定間隔は1分)、後者は時軸センサー型水温計(測定間隔は15秒)を用いて測定した。図中上段は時系列の生データを表し、時系列(a)-1と2を実線と点線で区別している。また、下段は両者の差をとった結果であり、負の値は鉛直方向に水温が転倒していることを意味する。

水温変動幅を見る限り最大6°Cにもなるが、水温の転倒回数は25日の観測を通じて13回、水温差にして最大0.5°C、平均的には0.2°C程度である。水温の転倒している時間も合計32分であり、全観測時間に占める割合も7.3%にすぎない。同様な観測を翌26日にも5時間にわたり実施したが(図10)、この場合には水温の転倒は8回、その継続時間は20分となり、観測時間に占める割合は6.8%であった。そして水温の転倒するパターンは水温時系列の波谷部に多く見られ、これらの変動が波動に起因するとすれば波頂時に相当する。続いて、時系列(a)-1と2から得られる水温変動スペクトルを図11にプロットしている。同図から549あるいは512秒といったブルント・バイサラ周期の2.4~2.2倍付近に卓越したピークが認められる。

水温時系列に加えて、水温鉛直分布もSt-(a)から(d)までの4地点で測定しており、これらの観測時間帯は矢印で図9に載せている。この内4ケースを選び図12に比較している。図中の水温分布は、St-(d)の資料を基準

にして(c), (b), (a)の順に2℃づつずらして描いた結果である。さらに、St-(a), (b), (c)は水面から湖底までの全分布形を、St-(d)は水深40 mまでのそれを表す。概してSt-(d)の水温鉛直分布形が最も滑かであり、岸に近づくに伴い図9にある水温変動の影響を受けるため水温躍層内にwavyな構造が現れてくる。

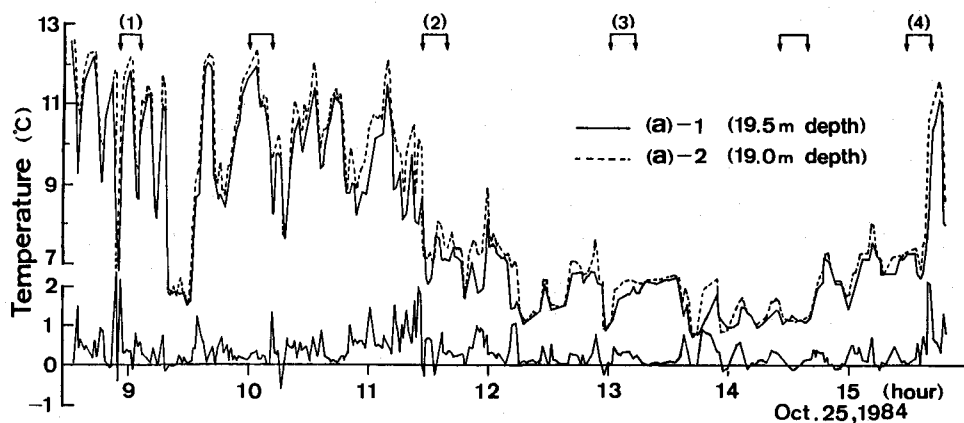


図9 St-(a)で観測された10月25日の水温変動時系列

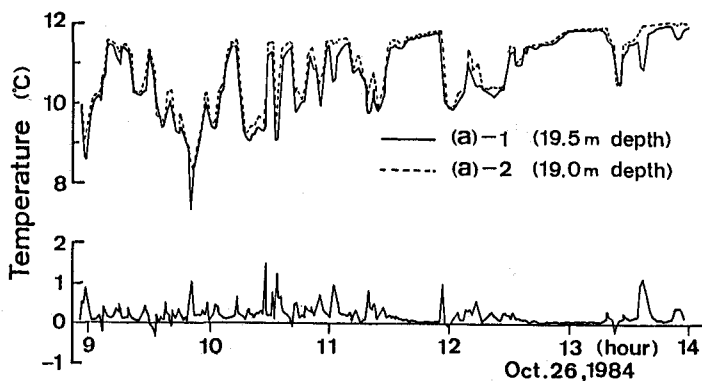


図10 St-(a)で観測された10月26日の水温変動時系列

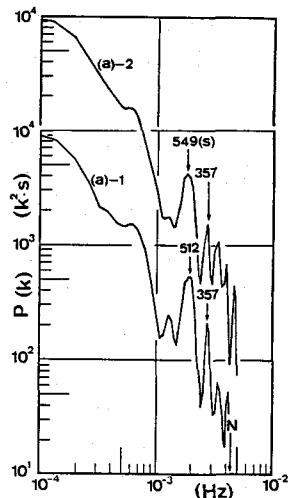


図11 水温変動スペクトル

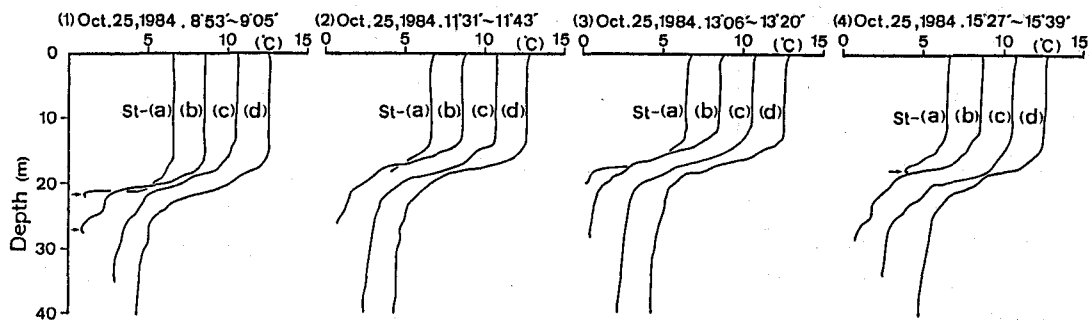


図12 水温鉛直分布の経時変化

この傾向は、特に St-(b) の観測資料に顕著に認められる。ただ、Tahoe 湖での結果から、Caldwell et al.⁸⁾ が指摘した程には水温躍層内に歪は存在せず、明瞭な step 構造も見ることはいできない。

続いて、図 12-(1) の St-(a), (b) および (4) の St-(a) の底部付近に水温の転倒が存在し (図中の矢印)、混合の生じていることがうかがえる。ただ、St-(a) と (b) については図 12 以外にも適宜水温鉛直分布を観測しているが、水温の転倒が確認されたのは以上の 3 資料が全てである。図 9 で指摘した様に、水温転倒の発生回数が少ないことを考え合わせると上記の結果も容認できることである。そして St-(b) から (d) までの水温躍層内に水温の転倒が見られなかったことから、岸付近の混合現象は水温躍層部の湖底と接する部分に限られると言って良さそうである。また混合の鉛直スケールについては、先述した 3 ケースとも底面から 0.5 m の領域にあり、混合によって生じる水温の上昇も $0.1 \sim 0.2^{\circ}\text{C}$ の範囲に留まっている。

以上の様に、岸付近の水温変動には周期にしてブルント・バイサラ周期の 2~3 倍の成分が卓越すること、および水温躍層部の湖底と接する領域に混合の生じていることが確認された。こうした結果は、図 5 に描かれた波高 5~6 m の内部セイシュの存在する密度場での現象であって、内部セイシュの挙動の卓越周期成分や混合現象に及ぼす影響については今後の課題である。

5. 結 語

本研究は中禅寺湖の千手ヶ浜で水温の定点観測と水温鉛直分布の計測を行い、岸付近の水温変動パターンと変動に伴う混合現象について検討した。

その結果、中禅寺湖の岸付近にはブルント・バイサラ周期の 2~3 倍の成分が卓越することが明らかにされた。特に、図 7 に示された卓越成分の挙動特性から、斜面を遡上する内部波の存在を示唆する結果も得られている。

水温変動幅は時には 6°C にもなる。そして、これらの変動に伴い水温躍層と岸付近の湖底との接する領域に水温の転倒、すなわち混合の生じていることが確認された。ただ水温転倒の発生頻度は水温時系列から予想された程多くなく、混合の及ぶ範囲も湖底から 0.5 m 程度に留まっている。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費・一般研究 B (代表者・大阪大学教授 室田 明) の助成を得て行われた。また現地観測に際して、中禅寺漁協の方々から多大の協力を頂いた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Thorpe, S.A.: A method of producing a shear flow in stratified fluid, J. Fluid Mech., Vol. 32, pp. 693-704, 1968.
- 2) Orlanski, I. and K. Bryan: Formation of the thermocline step structure by large-amplitude internal gravity waves, J. Geophys. Res., Vol. 74, No. 28, pp. 6975-6983, 1969.
- 3) Woods, J.W.: Wave-induced shear instability in the summer thermocline, J. Fluid Mech., Vol. 32, pp. 791-800, 1968.
- 4) 村岡浩爾・平田健正: 中禅寺湖の内部波, 第 27 回水理講演会論文集, pp. 179-184, 1983.
- 5) 村岡浩爾・平田健正: 中禅寺湖の内部波(2), 第 28 回水理講演会論文集, pp. 327-332, 1984.
- 6) Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger and N.H. Brooks: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, pp. 148-228, 1979.
- 7) Spiegel, R.H. and J. Imberger: The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size, J. Phys. Oceanogr., Vol. 10, pp. 1104-1121, 1980.
- 8) Caldwell, D.R., J.M. Brubaker and V.T. Neal: Thermal microstructure on a lake slope, J. Limn. Oceanogr., Vol. 23, pp. 372-374, 1978.
- 9) Wunsch, C.: Temperature microstructure on the Bermuda slope with application to the mean flow, Tellus, Vol. 24, pp. 350-367, 1972.