

## 湖の成層破壊過程における水温変動の時空間特性

大久保賢治

### TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF WATER TEMPERATURE IN PROCESS OF DESTRATIFICATION IN LAKES

By *Kenji OKUBO*

#### Synopsis

Temporal and spatial variation of water temperature was measured in a lake by using three different probes. A P-probe has seven sensors for depth, temperature, light attenuation due to sediment concentration, solar radiation and so on. Temperature fluctuations were compared between the moving and fixed P-probes. Period of these fluctuations ranges from several seconds to some tens of seconds and seems to be higher components of internal wave of the maximum buoyancy frequency. T-probe as a vertical array of thermistors, also showed a patchy structure consisting of eddies of a few centimeter likely due to the cellular motion, which was verified in the other shallow lake during the previous measurements. Discussing the stability parameters, the current field in the vertical during the measurements was proved to be on the critical stability condition.

#### 1. 緒 論

湖の水温変動は広範な時間スケールの現象を包含するが、季節成層の変動のような長期現象はサーミスタチェーンなどによって、数日～数か月の連続記録が多くの湖で観測されてきた。こうした係留観測では10分程度の時間間隔で内部静振等が記録されるが、周期数100秒の内部波を捉えるのが限界である。一方、日成層破壊時は内部波とともに小規模な構造の水温変動が現れ、後者は浮力振動数より高周波で、風波と同程度の周期の水温変動と三次元的な組織的水温構造をもたらす<sup>1)</sup>。そうした水温構造のうち上部混合層下端の巻波 (billow) は、最小周期の内部波より数倍速い変動と考えられ、セル構造を伴う変動の波長及び周期は風波のそれらに近く、それぞれ、数10 cm及び数秒である。このように乱れの影響も受ける高周波の水温変動を対象とする場合には応答性のよい水温計を必要とし、データ数も増大する。移動プロファイラーは時間的に100 Hz、空間的に1 mmの分解能をもつものがあり、湖や貯水池で使用される。基本的にスカラー測定であるが、流れの空間構造を得るために定置・曳航型のスキュン式のプロファイラーも用いられている。移動プロファイラーは乱れ変動の存在する層を効率的に見出す優れた測器であるが、固定プロファイラーによる多点同時測定も同時に行えば周波数スペクトルと時空間構造が議論でき、渦スケールや混合形態にも言及できる。各プロファイラーには一長一短があり、水温変動の時空間特性をみる本研究の目的にはその併用が重要と考えられる。

成層破壊のように気象条件が重要な現象は水温分布とともに気象量や水中放射強度も同じ場所の同時測定が望ましい。また淡水湖では底泥の再浮上と関係し濁度が重要なことが多い。さらに湖水の安定度に係わる流速が重要であるのでそれを同時測定できればなお有効である。

本研究では、乱流周波数領域の多項目測定に適する複合型プローブを試作し、固定・移動測定を併用して、放射・濁度・水温・圧力・流速の時系列及び鉛直分布形の推移を追跡するとともに風速・気温も同時測定し、水温成層の形成・破壊過程における鉛直分布の遷移を明らかにし、水温構造を時間及び空間の両面から実測する。以下、2.では試作した測器とそれらを用いた観測について述べ、3.でその観測値を示すが、比較のため4.では既往観測値についても参照し、成層破壊過程の水温及び湖流の鉛直構造とその遷移過程を考察する。

## 2. 観測の概要

### 2.1 機器の試作

3種のプローブ、すなわち、気象量を測定するMプローブ、圧力など7項目複合型のPプローブ、水温空間構造を測定するTプローブを試作した。Mプローブは風速・気温センサを各1個配置し、観測中の湖面上の気象条件を測定する。前者は市販のホットサーミスタ（芝浦電子製）を用いており時定数は約6秒である。ホットサーミスタとその温度補償用サーミスタは1方向の風を感知するよう保護枠の矩形窓に配置されており、別途気温測定用サーミスタを追加した。一方、Tプローブは直径13mmのステンレスパイプに8個のサーミスタを50mm間隔で埋込んだものであり、層に固定して水温空間構造の測定に用いたが、全長は約50cmと鉛直分布の追跡用としては短く、むしろより微細構造の測定に合わせたものとなっている。

本観測の主要測器であるPプローブは、Fig. 1に示すように直径48mm、長さ220mmの塩ビパイプにプリアンプを入れ両端を塩ビ製円盤で閉じてある。信号ケーブルと反対側の円盤中心に圧力センサ（共和電業製）を1個、その両側に薄膜温度センサ（帝人エンジニアリング製、2φステンレスパイプで保護され、円盤面からの突出長は5mm）を2本つけた。1本は水温、他の1本は熱膜（を管で被覆）式の流速計として用いる。T及びUセンサのなす直線と直交する軸の両側外周部には幅5mmの溝を設け、赤外LEDとピーク感度波長のあった受光素子（ともに浜松ホトニクス製）を向い合わせた透過式濁度センサ、鉛直移動速度をモニターする薄膜温度センサ（マイクロメジャメント社製）を取付けた。同軸上には放射センサとしての受光素子も1個つけている。Pプローブは圧力センサのある面を上方にして湖底から浮上させるか、逆にそれを下方にして水面から沈降させるかのいずれかであるが、後者の場合の放射測定用にケーブル側円盤に同じ受光素子を埋込んだ。こうして、圧力(P)、水温(T)、水平全流速(U)、濁度(C)、鉛直速度(W)、及び前・後方の放射(S, R)の7センサを配置した。

### 2.2 観測の方法

観測はフェッチが小さく波が低いことから琵琶湖塩津湾の湾口部西岸の定点で行った。観測時のプローブ配置をFig. 2に示す。観測点の湖底は東に向って下る急斜面で船の移動で水深は測定毎にかなり変動した。なお、湖底は水草（コカナダモ）で覆われていた。

Mプローブはポール付きブイ先端（水面上約1.5m）に取付け、ブイ下端からTプローブを固定深さ（水面下約2.5m）に吊下げた。ブイは船から一定間隔に保つためロッドで固定している。2本のPプローブのうち、1本はTプローブ2本の間際にケーブル側を下方にして固定し、他の1本は鉛直プロファイラーとした。後者は水面から定速で沈降させ、M、T及び固定Pプローブとともに連続データを記録する。チャンネル数と測定継続時間、素子の応答時間から20Hz程度の測定が適当と思われた。1991年12月19日と20日の観測値のうち、記録の短いもの、チェックが目的のものは除き、19日の分として10回、20日の分として17回の測定データを取扱う。季節的に顕著な成層は期待しえなかったが、2日目はかなり強い日射があり、何回かの測定で0.2°C程度の温度差がみられた。

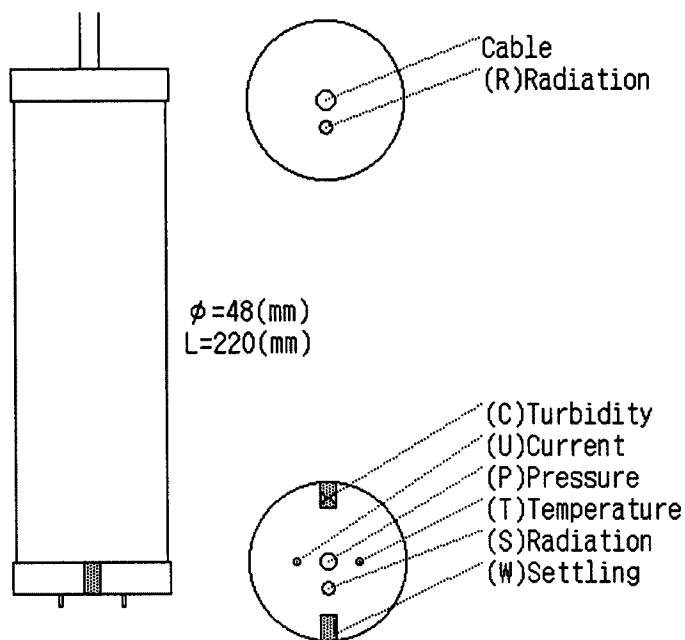


Fig. 1. Arrangement of sensors on P-probe.

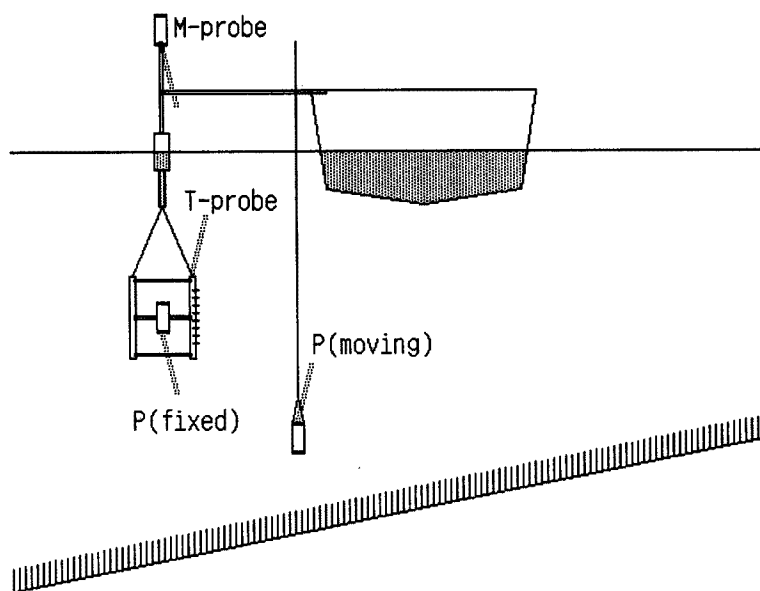


Fig. 2. Schematic view of the measurement.

### 2.3 機器の検定

検定は各プローブが観測で動作したのを確認した上で観測後に行った。Pプローブから7ch（2本で14ch）、Mプローブから2ch、Tプローブから8chの合計24chのデータを用いる。回路スペースとケーブル芯数の制約から温度依存センサの温度補償回路は設けず、センサ間隔が小さい構造を生かし、測定水温値による補正を試みた。

濁度は精密天秤で計量した8号砂を段階的に増量し、各濃度センサの値をよみとった。低濃度域で砂は約0.5gきざみで加え、高濃度域では追加量を増した。得られた結果を体積濃度に換算し、出力電圧の関係を調べた。2回の検定で水温が約1℃異なった。高温度の方が同一濃度に対して大きな出力電圧を与えることがみられた。発光・受光素子ともに温度依存があるが、それ以上に低濃度域と高濃度域の特性の差が問題と思われた。観測では湖水の濁りは見た目にはほとんどなく、十分低濃度と考えられたので低濃度域に合わせる係数を求めた。ただし、低濃度域の検定は使用状態におけるレンズの汚れ、水道水の質、LEDの劣化など問題が多く困難はあったが、ある程度の結果が得られたと思われる。

放射はPプローブ2本を光源から50cmの等距離に置き、電圧を調節し光量を変化させながら検定した。光源には、500Wのハロゲンランプをスポット照射で使用した。調整電圧から光源ワット数を求めセンサ出力と対比させた。Sセンサについて2プローブ同時に検定し、Rセンサも光源を放熱させた後、同じ要領で検定した。各データを1分弱で記録し、15段階の検定を約10分で完了させた。Sセンサ検定時にTセンサは25℃から31℃まで上昇した。光量を増すほど温度も上昇したことを考慮し、検定曲線を得た。結果として4個のS、Rセンサの特性は揃ったものとわかった。試行の結果、光源からの距離が50cmの位置における照射面積を0.1㎡と仮定し放射量に変換すると観測時の電圧範囲に対する放射量範囲が冬季の可能日射量範囲にほぼ対応することが知れた。

湖流の流速が微弱であるため当初より困難と予想した流速の検定は、開水路にUセンサを横に2本並べ、その上流10cm位置にプロペラ流速計をおき、その出力もADボードの空チャンネルに接続し、段階的に流速を増加させて行った。立てたPプローブを横に並べ流水中におくことで上流側の水を若干せき上げたが、センサ位置を水面から約10mmの潜りとして緩和された。基準流速計の指値で3～28cm/sの範囲は、観測された流速範囲より若干大きめであった。

Wセンサを取付けたスリットが流水にひたるようPプローブを水平に2本横に並べて流水中に置き、前方流速測定によりUセンサと同じ要領で検定したが、水はねはやや激しかった。センサ出力が狭い範囲でしか変化せず、とくにP2のWセンサは検定が困難であり、これ以外の作業は行わなかった。

圧力検定は全長8m、75φの塩ビパイプを鉛直に立てて水を満たし、スチール巻尺に止めた2本のPプローブを0.5mピッチでパイプ内に沈め、引上げ時も何点かで静止させ、各深度の出力電圧を記録した。水中投入直後、Pセンサは深度1m以下で応答が遅れ、ケーブル空域からプローブ内の空気が排出されるためと思われた。Pセンサは水深50m用素子であり、本観測ではその10～20%を使用しているに過ぎず、大気圧自体の変動やセンサも含めた温度依存など誤差の要因はかなり存在する。

#### 2.4 観測値について

電圧と物理量の関係は最小自乗法で2次式係数を求めたが、W2以外は観測時の電圧範囲が検定時のそれとほぼ一致した。濁度のように高・低濃度域で特性が変わるセンサは領域毎に係数を求める必要があるが、高濃度を記録したのはプローブが湖底に到達後の少数データに限られ、これらはスケールアウトとみなし低濃度域の係数を用いた。

今回の観測では、1日の観測における水温差は1℃以下で温度補正の必要は少ないが、観測1日目と2日目では平均水温で約2℃異なった。検定時の平均水温は観測2日目のそれにはほぼ等しかったが、圧力検定は屋外で行い、水温は観測1日目の平均水温に近かった。検定時の微少な温度変化のデータから個々の温度係数を正確に知ることは困難であって、センサ毎に以下の方法で温度係数を与えた。

1℃の温度上昇に対しUセンサは1cm/s、S、Rセンサは0.2W/㎡を加える。逆にCセンサでは $1 \times 10^{-6}$ の濃度を減じ、同一出力電圧でも高温時に高濃度側にずれる効果を考慮した。したがって、流速・放射・濃度センサについてはこの温度係数に測定時と検定時の温度差をかけて補正量を求め、前節の検定曲線で得られる物理量に加えるようにした。

### 3. 観測結果の考察

#### 3.1 気象条件

Fig. 3は、観測の気象条件として風速、気温、放射及び水温に関する1回の測定時間(40~160秒、チャンネルあたりのデータ数800~3,200)の平均値の推移を示す。気温と風速は水面上1.5m高さで測定し、水温は2本のPプローブの測定毎の平均値を用いた。水温は19日が11~12℃、20日は14~15℃であり、気温は水温より2~5℃ほど低く、水面近傍は不安定な成層状態であった。風速は1m/s以下の微風しか測定されず、20日の後半に2m/s程度の風が30分程度持続したに過ぎない。先述したように、風速感知部は保護枠に入れたまま使用したのでデータは全風速より小さく、また、その変動にはブイ自体の振動の影響も残る。ただし、2日目の観測直後には対岸尾上漁港の防波堤先端の風速値は8m/sあり、観測地点が風のあたらない場所であったことが確認された。

放射については19日12時前後に10W/m<sup>2</sup>程度の日射量が観測されたが、その後減少した。20日は雲の存在によって放射は変動しているが、大体10W/m<sup>2</sup>を維持した。これらは固定深度の平均値であり、次節に述べるように移動プローブの放射(R)センサの記録ではほぼ半水深での値に相当する。この深度では放射量は湖底での値と同じレベルにまで下がり、これよりも水面に近い領域で急激な変化を示す。水面放射量は下層よりも最大30W/m<sup>2</sup>程度大きく、表層で40W/m<sup>2</sup>程度と考えられた。琵琶湖における冬季の全天日射量は約200W/m<sup>2</sup>、彦根気象台の記録によれば、12月の日照率0.5以下の日の実測地表面日射量は100W/m<sup>2</sup>以下であって概ね妥当な値の範囲にあるといえる。今回の観測では風速は弱く日射もあり極めて寒い条件ではなかった。逆にいえば、風は弱かったが気温が低く潜熱熱量が日射と拮抗し、日成層が観測されるかどうかは微妙な条件にあったと推定される。

#### 3.2 鉛直分布の特性

データは20Hzで収集したが、鉛直分布特性を考えるための平滑な記録として各変量とも20個ずつのデータの平均値(以下、秒データと呼ぶ)を用いる。Fig. 4及びFig. 5はそれぞれ19日及び20日の各

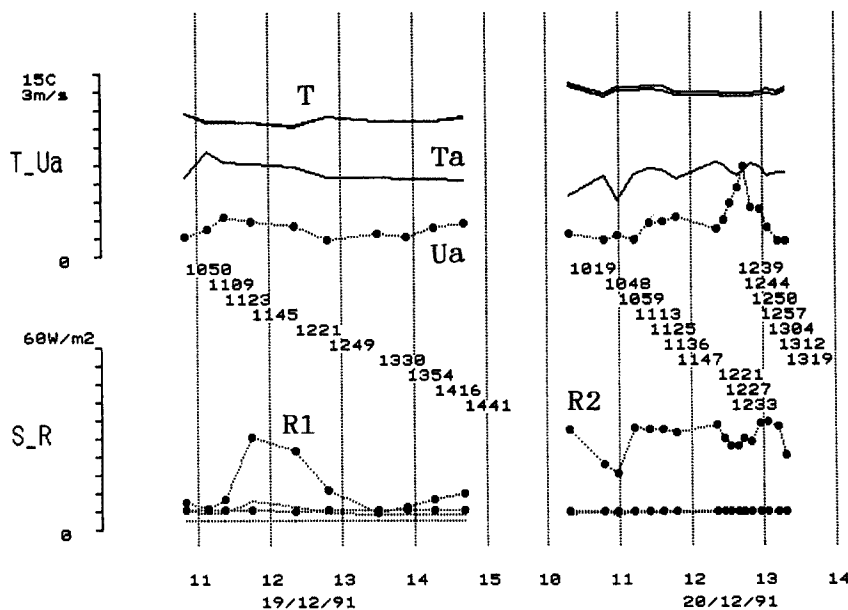


Fig. 3. Time averaged water and air temperatures, wind velocity and radiations for each measurement.

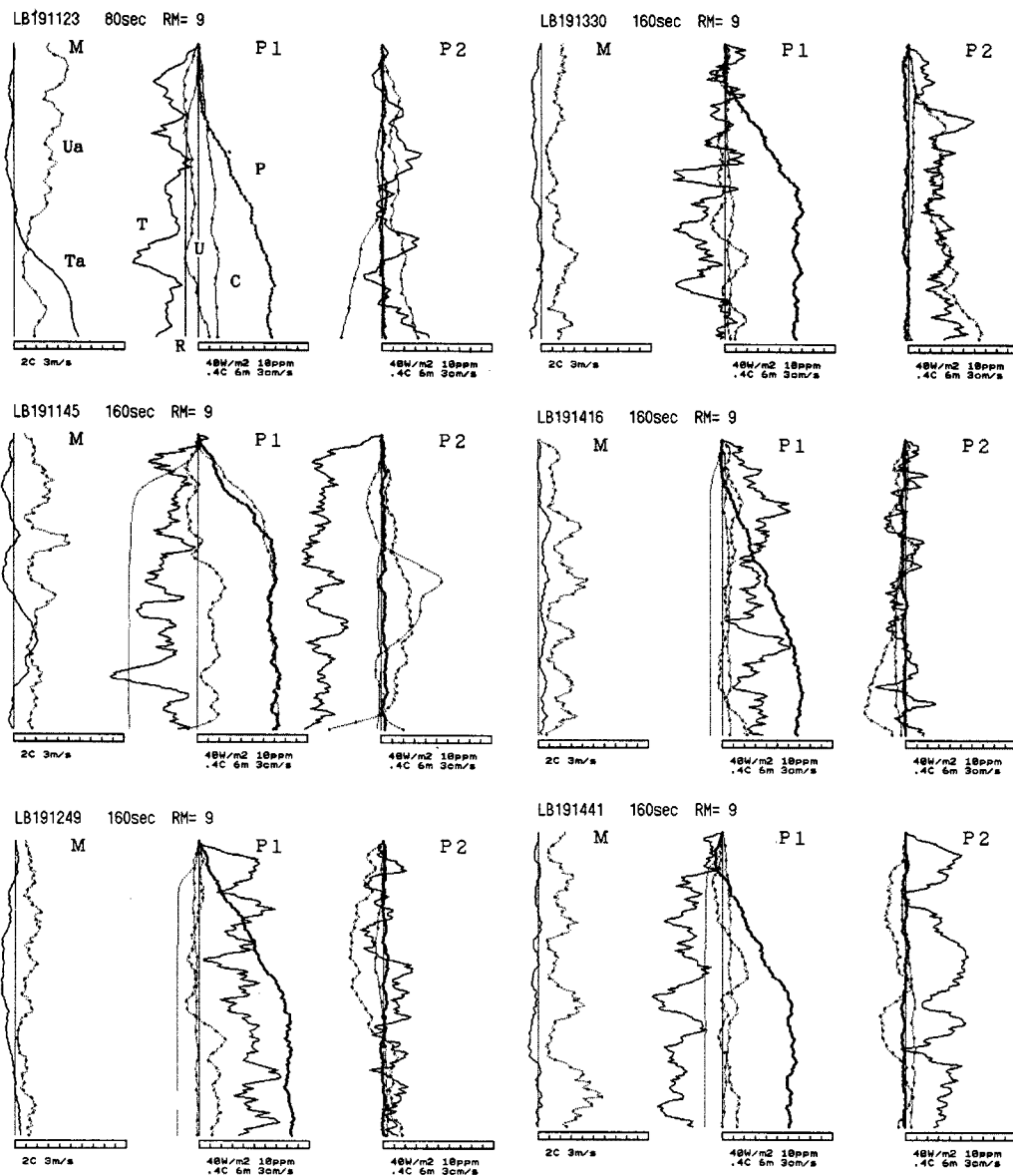


Fig. 4. Records of M-probe and P-probes (1991. 12. 19).

測定の数データをプローブ毎に示す。データ左上に観測日と時刻、観測継続時間を示し、19日では、左が気温・風速のMプローブ、中央が鉛直に移動させたP1プローブ、右側が固定したP2プローブに対応し、いずれも縦軸は時間を表す。各量とも初期時刻または表層値からの偏差量として示し、横軸はそれからの変動の大きさ、下に記した値は目盛フルスケールに対する各量の値を示す。例えば、水温はフルスケールが $0.4^{\circ}\text{C}$ で示した。

観測の1日目(12月19日)はP1を移動、P2を固定とした。20日は役割を入換えP2を移動プローブとした。縦軸は基本的に時間を表すが、移動プローブについては圧力値が増加し始めるまでが表層、増加を完了したところが湖底に対応し、その間の記録が鉛直分布とみなせる。実際には風波の圧力変動や降下速度の変動がみられたが、時系列を平滑化しプローブが等速で鉛直下向きに移動したとみなす。

Fig. 3からわかるように、19日は時刻1145の測定時に日射量が最大となったが、前後約1時間で弱

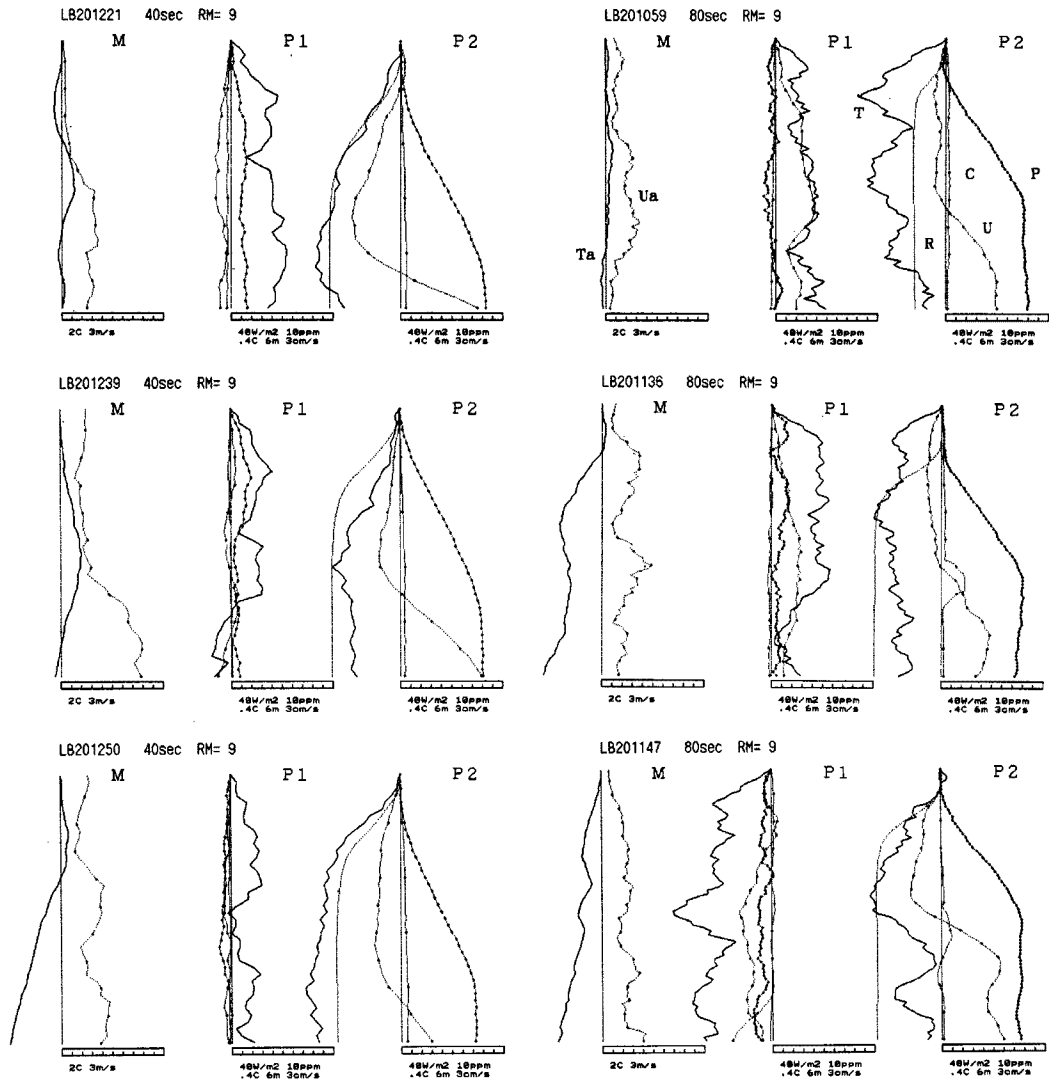


Fig. 5. Records of M-probe and P-probes (1991. 12. 20).

まったので成層の形成はほとんど認められなかった。したがって、浮力振動数も正確には評価できないが、 $0.2^{\circ}\text{C}$  の水温差に相当する水の密度差を  $2.8 \times 10^{-2} \text{ (kg/m}^3\text{)}$  とし、これが  $5 \text{ m}$  で変化したとすると、浮力振動数  $N = \{(g/\rho) | d\rho/dz | \}^{1/2}$  は  $0.0074 \text{ rad/s}$ 、対応周期は  $850 \text{ 秒}$  になる。ここに、 $g$  は重力加速度、 $\rho$  は水の密度、 $z$  は鉛直座標を表す。一方、実際的水温変動は長いもので  $50 \text{ 秒}$  程度の周期であり、そこに風波の数秒周期の波形が重なったものとなる。1 測定にかけた時間は  $40 \sim 160 \text{ 秒}$  で、基本周期とした  $850 \text{ 秒}$  の  $1/5$  以下であり、測定された分布は基本波（浮力周期の内部波）については瞬間分布とみなせる。先述したように、 $N$  より高周波の成分は基本波の増幅に伴う変調及び風波との共鳴過程で生成される界面波と考えられる。

界面波による変動成分を空間的にみると、いずれの図にも P プロブが移動（圧力が変化）する全水深範囲に数個の波形がみられることからセル運動の存在が推察される<sup>3)</sup>。本来のセル運動の解は  $N$  より低周波  $\omega$  の運動を指す ( $\omega < N$ ) が、 $N$  の数倍程度の周波数の界面波については解の形式を利用して初期構造を計算することは可能と思われる。基本波から派生しうる界面波は無数にあるが、実測の水温変動とし

て、測定の間時間スパン 80 秒の間に 5 周期程度の変動を示す約 16 秒の周期成分が存在する。また、時刻 1145 以外では P1 プローブの示す放射量変化は小さい。このように、19 日は気象条件からみても混合、あるいは成層破壊条件にあったと思われる、界面波が卓越していた。図では 9 点移動平均を施して 10 秒以下の変動を抑えているが、生データはさらに波数の大きな成分がみられた。

一方、Fig. 5 についてみると 20 日前半は数 10 秒周期の変動がみられたが、測定時間を 40 秒にしてからは内部波よりも吹送流が顕著になった。これは卓越する界面波の変動時間内に一回の測定を行ったためと考えられる。これは時刻 1136 頃に始まり観測終了まで持続した。20 日は日射が前日より高いレベルで維持されており、午前中は界面波による水温変動が卓越したが、時刻 1221 以降には、成層とみられる水温プロファイルが連続し、水面から湖底にかけて  $0.2^{\circ}\text{C}$  程度の水温差がみられた。ただし、これを安定成層とみなす前に、固定 P2 プローブの記録に系統的な時間変化がないかどうか注意が必要である。しかし、時刻 1221 や 1250 の記録には  $0.4^{\circ}\text{C}$  程度の水温差が認められ、放射強度の分布ともほぼ対応しており、弱い成層は存在したと思われる。この成層時における流速  $U$  の分布を見ると水面及び湖底付近での流れを示しており、前者は吹送流の状況を示すと考えられる。プローブが湖底に到達してから流速が極端に上昇する現象はこの時間帯に限らず同様にみられることから流速以外の因子が関係するようである。水温センサに特徴的な波形はなく、下層密度流とは考えにくい。湖底の植生や底泥にセンサが潜込んだ際の放熱も一因と考えられ、あるいは、着底時にプローブが横転した際の乱れが数秒間持続するのではないかと考えられる。これには泥と水との比熱の差やセンサ姿勢が変化したことの影響も含まれる。一方、観測を通じて湖水は澄んでいたため濁度の特徴的な変化はないが深さとともにわずかに増加し、例えば時刻 1136 の記録にみられるようにプローブが泥を巻上げたと思われる際、一時的な増加が見られた。

### 3.3 水温の変動特性

T プローブの水温変動記録には、層の水温間に相関がみられる箇所もあるが、逆相関になる箇所や 1 層において類似した波形がみられるところもある。数個の振動成分が卓越し、それらが鉛直に 35 cm の測定全範囲をカバーするが、特定の層間に系統的な正負の相関を見出せないのが特徴である。以上の事実は数秒周期の水温変動をもたらす構造が測定層間隔 (5 cm) 程度の大きさをもつとして説明できる。

Fig. 6 は T プローブ水温の時間鉛直構造であり、5 秒移動平均をかけ、各層の時間平均水温からの偏差の時間変動として示した。1 階調  $0.05^{\circ}\text{C}$  の温度範囲に対応し、濃色中の淡色域は温水塊、淡色中の濃色域が冷水塊を示す。例外的に白地の黒パターンも温水塊を示すが、これは  $0.25^{\circ}\text{C}$  毎に現れる。水塊として認識されるものは鉛直に 5 ~ 10 cm 程度の長さを持ち、19 日の時点 1145 や 1221 の長い記録の中では、T プローブの全長かそれを越える鉛直範囲にわたって数秒間、全水温センサが同じ変化傾向となる数 10 cm 以上の構造もみられる。別の浅水湖における観測<sup>2)</sup>では水平及び鉛直プローブから得た水温分布の時間変動は Fig. 7 のようであり、水平構造にみられる水塊構造の方が、成層の弱い本観測の記録 (Fig. 6) と類似している。ただし、Fig. 7 では、等温線は  $0.2^{\circ}\text{C}$  刻みで示され、縦軸の目盛りは 2 倍の 10 cm である。前報<sup>1)</sup>で述べたように、このような水塊構造は、Fig. 6 の 20 日の記録の右側に示すような瞬間分布のオフセット表示で特有の粗密パターンを示し、これがセル運動の水温変動に対応する。

Fig. 8 は 20 Hz の生データから求めた水温変動の周波数スペクトルで、1 Hz 付近をピークとするなだらかな分布を示し、低周波側のエネルギーレベルは低い。周期 16 秒程度の界面波に対応するピークが現れている。 $10^{-1} \sim 1$  Hz の領域にいくつかの小さなピークがみられ、これらが界面波の高周波成分と思われる。ただし、一定密度勾配を保持する密度界面に対応する界面波が風波と共鳴し、界面波を常に生成している強い成層時とは異なり、周波数スペクトルには明瞭な減衰特性 (負のべき乗則) はみられなかった。2 日目は測定時間 40 ~ 80 秒と短く、前日に比べ界面波の水温変動は小さく、とくに後半の鉛直分布では安定成層の水温分布がいくつかの時点にわたって捉えられた。



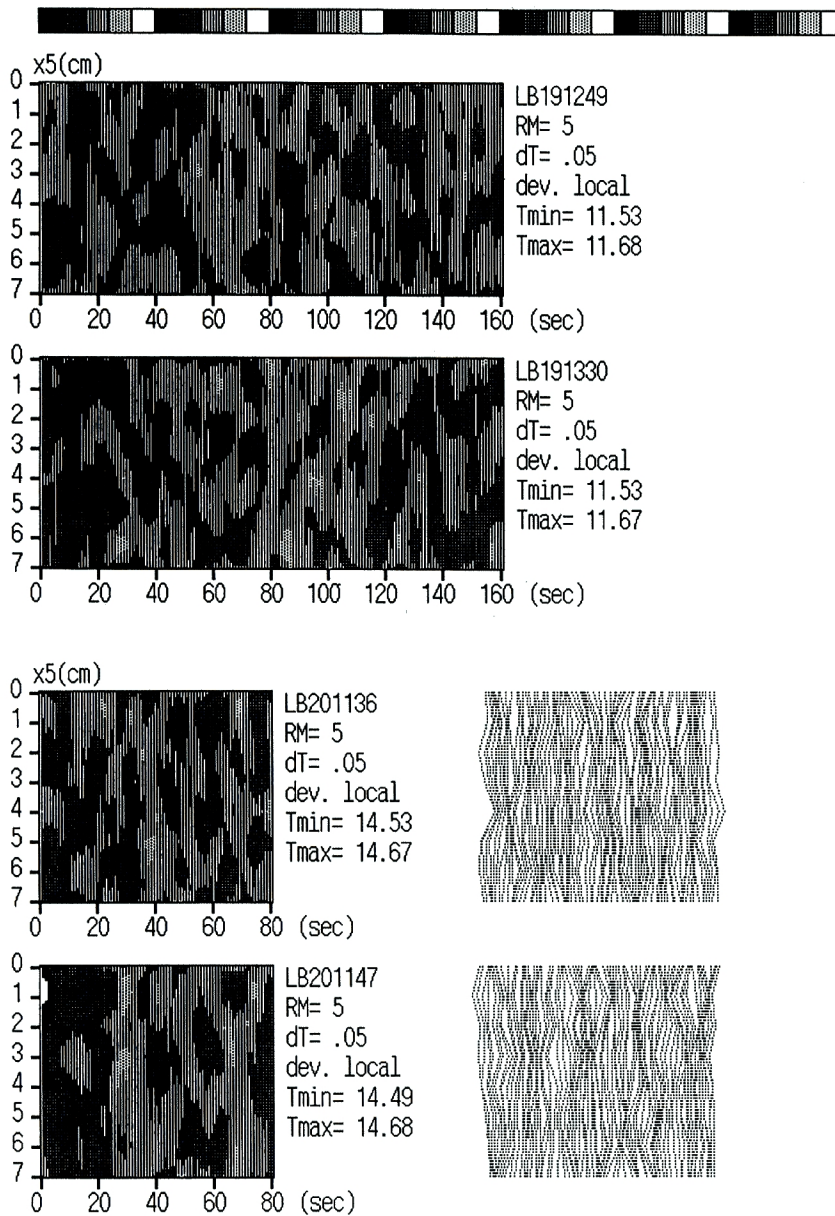


Fig. 6. Records of T-probe. Deviations from the time averaged temperatures of the layers are shown with the deviation profiles offset.

#### 4. 成層破壊過程の水温変動

先述した観測<sup>1), 2)</sup>では浮力周期は  $T = 100$  秒程度で、巻波の擬似周期は  $10 \sim 30$  秒とその数分の1であった。顕著な成層界面が発達し、 $5 \text{ m/s}$ の風が吹いても界面は下降しつつ1時間程度は持続した。また、界面下方に巻波が発生し、基本波周期は70秒であったのに対し、今回は極めて弱い成層に対して弱い風が吹く状態で、小さな密度勾配で特徴づけられ、周期800秒というゆっくりした基本波から派生する50秒程度の周期をもつ界面波が卓越した。

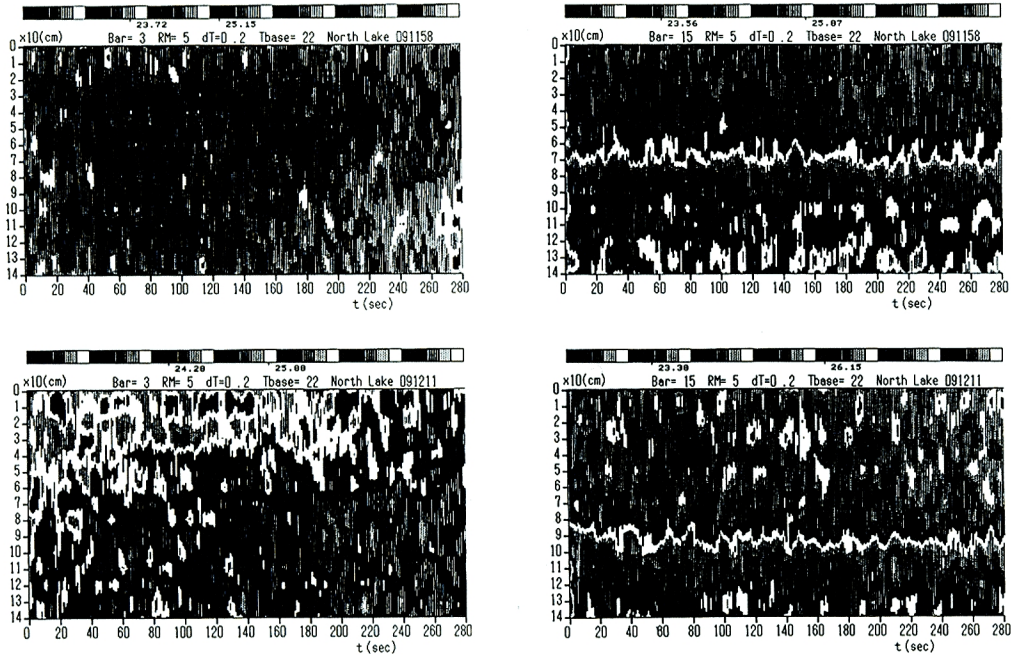


Fig. 7. Temperature structures in the time-horizontal domain (left), and in the time-vertical domain (right) during typical destratification in the shallow lake.

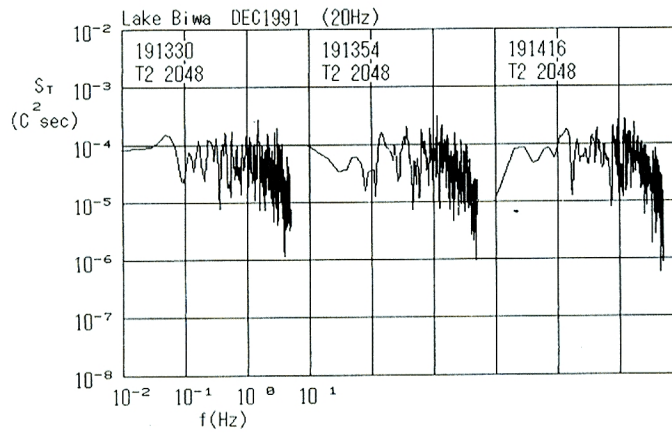


Fig 8. Frequency spectrum for temperature variation.

琵琶湖南湖の観測<sup>1)</sup>では、吹送流の対数+直線則がみられた。一方、西オーストラリアの小湖で得られた拡散係数分布から水温について同様の分布則が示され<sup>1)</sup>、実際、水温分布には界面付近の直線分布と下層の対数分布が認められた。ただし、上部混合層は放射と風の状態に応じ種々の水温分布がみられるので、その水温は一定とみなし、鉛直分布を一定+線形+対数の3層に分割した。線形層厚  $a$  は界面波波高を表すとし、界面波の間隔  $s$  を用いた波形勾配  $\lambda = a/s$  と拡散・粘性係数比  $\beta$  をパラメータとするモデルのフィッティングにより界面摩擦速度や浮力束を求めた。さらに、変動成分については風速の横波長で決まる並列らせん渦に対し、風と直交する鉛直面内のセル運動として多層らせん渦を伴う構造が示された。ただし、実測では、多くの成分が共存するため明瞭な節はみられず、また、ある距離伝わって減衰する揺らいだ対流がみられた。

今回の観測でもセル構造に伴う水温変動は捉えられたが、成層自体が弱く系統的なプロファイルの追跡は行えなかった。流速データを確認するため、移動Pプローブについてリチャードソン数を評価することを試みた。勾配型の局所リチャードソン数は鉛直分布自身が変動を含んでいるため正しく評価することはできなかった。一方、平均流速を用いたりリチャードソン数は過小となった。速度差を用いて評価した全体リチャードソン数は最大値が0.1のオーダーを示した。とくに、2日目の後半のデータは界面波の影響が除去されており、流速・水温データとも平均値の鉛直勾配に近いとみなされた。分布の最大リチャードソン数でみて安定な分布と見なせるかどうかの限界的な範囲にあったということが推察された。

## 5. 結 語

内部波や風波と相互作用する界面波の水温変動の時空間特性を明らかにし、乱れ計測へと接続していく目的で測器の試作とそれを用いた現地観測を行った。こうした乱流周波数領域の多項目測定に適合する複合型プローブの固定及び移動測定を併用し、放射・濁度・水温・圧力・流速時系列とそれらの鉛直分布の推移を追跡するとともに風速・気温も同時測定した。

琵琶湖塩津湾の西岸の定点で1991年12月19日と20日の両日に27回測定を行った。季節的に顕著な成層は期待しえなかったが、2日目はかなり放射があり何回かの測定では0.2°C程度の成層がみられた。1回の測定時間は40～160秒としたが、鉛直分布は40～80秒以内で測定した。試算した浮力周期は約850秒であり、分布測定は数分～数10分毎、数10秒で行ったから、測定毎に安定・不安定成層状態が転じていた可能性がある。

1日目の観測は測定時間80～160秒で行い、固定及び移動Pプローブとも周期16秒程度の界面波が卓越する結果を示した。この日は、観測の比較的初期に放射最強をとった後減少し、卓越波の波数・周波数が増加していく成層破壊過程にあったと推察される。ただし、一定密度勾配を保持する界面に対応する周波数の界面波が風波と共鳴し、より高周波の界面波を常に生成する強い成層時とは異なり、周波数スペクトルに明瞭な減衰特性（負のべき乗則）はみられなかった。

2日目の観測は測定時間40～80秒で行い、周期10秒より低周波側には前日と同程度の周期の界面波が存在したが、前日より界面波の水温変動は小さく、とくに後半は、Pプローブの鉛直分布に安定成層の水温分布がみられ、水平流速、濁度分布もほぼ一定形状を示し、成層した吹送流のプロファイルと思われるものをいくつかの時点にわたって捉えた。

移動プローブによる鉛直分布と固定層の時系列の比較から、鉛直分布が内部波及びさらに高周波の界面波に強く影響されることがわかった。水温の固定プロファイラー（水温計格子）による観測でみられた全水深にわたる多層らせん渦の存在を示す結果とも合致すると思われる。固定プローブの記録にも同程度の周期成分が存在し、水温計配列の記録にもセル運動による変動が観察された。

機器には検定など改良すべき点が残されるが、精度向上により有効なデータを収集していく見通しを与えるものといえる。本研究は文部省科学研究費奨励研究（湖における組織的水温構造の時空間特性に関する研究、03750435）の補助を受けたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 大久保賢治：水温計格子を用いた浅水湖の成層破壊過程の観測，京都大学防災研究所年報，第34号B-2，1991，pp.319-336.
- 2) 大久保賢治：湖の成層破壊過程にみられる組織的な水温構造，水工学論文集，第36巻，1992，pp.199-204.
- 3) Turner, J. S.: Buoyancy effects in Fluids, Cambridge Univ. Press, 1973.

- 4) 大久保賢治・村本嘉雄：琵琶湖南湖の湖流観測（2）—吹送流の時間的变化—，京都大学防災研究所年報，第 30 号 B-2，1987，pp. 569 - 582.