

水温変動からみたびわ湖の内部波の研究

遠藤 修一・今脇 資郎・國司 秀明

STUDIES ON THE INTERNAL WAVES BY OBSERVING THE TIME VARIATIONS OF WATER TEMPERATURE IN LAKE BIWA

By Shuichi ENDOH, Shiro IMAWAKI and Hideaki KUNISHI

Synopsis

In order to reveal the time variations of water temperature field in the north basin of Lake Biwa, successive measurements of spacial temperature distribution were carried out using a bathythermograph for four days during 28-31 August, 1973. The horizontal distribution of observed water temperature at the thermocline depth fluctuates largely day by day. This fluctuation seems to be caused by the rotating internal wave, which has been pointed out by Kanari.

At the fixed buoy station, Ie-1, time series of current and water temperature were obtained. Results show that the internal wave with the period of about 40 hours has been dominant in the fluctuations of both current and water temperature. An elliptical hodograph of this wave has been obtained and this means the Coriolis' force plays a very important role to the internal wave of the fundamental mode. It is interesting that the direction of the major axis of the ellipse almost coincides with that of the longitudinal line of Lake Biwa at this buoy station.

1. ま え が き

夏季のびわ湖北湖には環流と称される定常的な湖流が存在し、バロクリニックな地衡流の性格を有することが知られている¹⁾。過去幾度か北湖において水温分布の観測が実施され、力学計算による湖流の推算がなされてきた^{2), 3)}。湖流を地衡流として近似することの妥当性についてはまだ十分に吟味されているとは言えない面はあるが、湖流の広範な直接測定が非常に困難な現状を考えると、比較的に容易な水温分布の観測から得られるこのような湖流の情報は非常に重要である。

湖流を水温分布を通して把握しようとする立場での問題点は、様々な時間、空間スケールを有する湖水の流動現象が、各々どのように水温構造と関連しているかを明確にすることにある。そのためには、まず、卓越する現象についての特性を解明することから始めなければならないが、夏季のびわ湖における水温変動の主要な原因としてまず考えられるのが内部波である。

びわ湖における内部波に関しては既に金成⁴⁾⁻⁶⁾による一連の研究があり、中でも長周期の内部波の挙動について興味ある結果が得られている。すなわち、従来、しばしば単純にびわ湖の長軸方向の単節定常振動とみなされていた北湖の基本モードの内部波は、地球自転の効果により、内部ケルビン波に似た反時計回りの旋回性波動となることが数値実験によって見出され、いくつかの定点での水温連続観測や周航水温観測などによってその存在が確認された。しかしながら、内部波の空間的な振舞いの状況や内部波に伴う流れの特性の観測面からの把握はなお皆無に近いのが現状である。そこで、著者らは1973年の夏、北湖全域にわたる水温観測と、沖合の定点での水温と流速の連続観測を併行して実施し、その面から基本モードの内部波の振舞

いに関して若干の知見を得たので以下に報告する。

2. 観 測 概 要

2. 1 北湖全域の水溫観測

1973年8月28日から31日まで、びわ湖北湖全域を覆う BT (Bathymograph) を用いた水温分布の観測 (以下 BT 観測と略記する) を1日に1回計4回連続して実施した。Fig. 1 に示すように、北湖に8本の横断測線を設け、各測線上には約2 km 間隔に観測点を置いた。観測基地は、阪本と菅浦の南北2ヶ所に設営し、偶数日は北から南へ、奇数日はその逆のコースをたどった。天候は4日間とも比較的平穏であり、ほぼ予定通りの観測を行なうことができた。各観測の観測点の数は、天候その他の事情で異なるが、それぞれ53, 65, 52, および69というまだかってない観測網の細かいものであった。これほどの精細な観測にもかかわらず、観測艇として速度約20ノットの京都大学防災研究所の高速艇「ひら」を使用したことにより、約8時間で北湖全域の観測を終えることができた。

ところで、夏季の北湖においては、水温は鉛直方向だけでなく、水平方向にも大きな傾度をもつことが知られている。従って、測点の位置の誤差は見かけ上の水温差となって観測されることになる。今回の観測においては、原則として艇の航走時間によって測点の位置を決定したが、精度向上をはかるために、あらかじめ

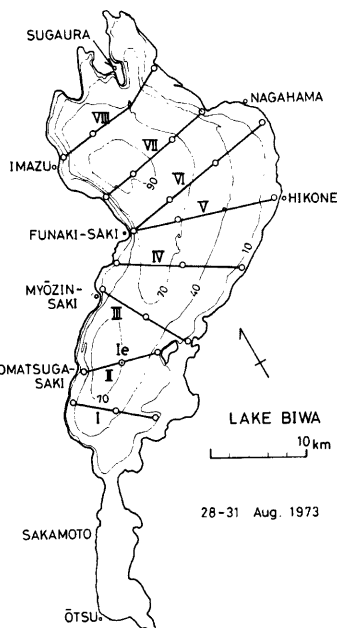


Fig. 1 Map of Lake Biwa showing the locations of BT survey lines and marker buoy stations (open circles). Depth contours are in meters.

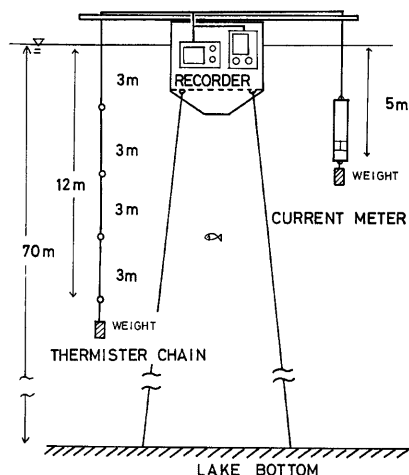


Fig. 2 Schematic picture of the thermistor-chain and the current meter at Ie-1 buoy station.

め全ての予定測線の両端と測線上に標識ブイ (Fig. 1 の白丸) を設置し、航路修正の基準とした。さらに、時間の許す限り、六分儀と測深を併用して位置決定の精度向上に務めた。

2. 2 定点における水温と流速の連続観測

BT 観測と併行して、8月27日から9月3日まで、雄松崎と沖島のほぼ中間に位置する水深約70mの定点において、表層の流向・流速と各層の水温の連続自記観測を実施した。I_e-1と呼ばれるこの定点には、当時京都大学臨湖実験所によって鋼鉄製のブイが碇置されていて、著者らは、このブイに、Fig. 2 に示すように流速計とサーミスタチェーンを設置した。

使用した流速計は、京都大学防災研究所白浜海象観測所製作のローター式の流向流速計で、測流深度は水面下5mである。記録のサンプリング間隔は10分で、1分間の平均流速と流向が2ペンの記録計によって自記される。サーミスタチェーンは、水面下3, 6, 9, および12mの4深度に感温部が位置するように設置し、記録は6打点の記録計に30秒毎に自記される。比較的浅い深さにこれらの測器の感部を設置したのは、Fig. 2 に示すような設置方法では、ロープの揺れ等によって深くなるほど測定深度の誤差が増大することを考慮したためである。

このような連続観測は、びわ湖の沿岸域ではこれまでもに行なわれているが、今回のように水深の大きい沖合の水域ではほとんど例を見ない。その意味で、観測結果に寄せる期待は大きいものがあったが、結果的には種々のトラブルにより、正常な記録が得られたのは、水温については8月27日13時から30日9時、および31日9時から9月3日17時まで、流向流速についてはBT観測の終了した9月1日16時から3日17時までにとどまった。

3. 観 測 結 果

3. 1 北湖全域における水温変動

連続4回のBT観測によって、北湖の三次元的な相次ぐ4日間的水温分布が得られた。この観測の本来の目的は夏季の湖流を推算するための定常的な水温分布を得ることであり、そのために、何日か連続した観測結果の時間平均を求める必要があった。観測期間は、観測当時の水温構造から基本モードの内部波の周期を約2日と予想し⁵⁾、4日間に設定されたものである。従って、見方を換えれば、この観測結果は、観測期間

中の水温分布の時間変動を把えるための格好の資料と言える。以下に北湖における水温変動の特徴について述べる。なお、4日間の平均水温場に基く湖流推算に関しては Endoh⁷⁾ に詳しく述べてある。

はじめに、観測当時の水温の鉛直分布と、鉛直傾度の分布を Fig. 3 に示す。値は4日間の全測点での総平均値である。図から明らかなように、表層一深層間には20℃を越える水温差がみられ、水深約5～15mに水温躍層が存在している。このような分布はこの時期に通常観測されるものである。なお、湖面直下に弱い成層が見られるが、これは観測期間を通して平穏な天候が続いたために日中の加熱によって生じた日水温躍層が捉えられたものである。

次に、これらの観測水温の分布の変動を内部波の観点から考察する。内部波は水温躍層の振動であるから、内部波に起因する水温変動は躍層の深さで最

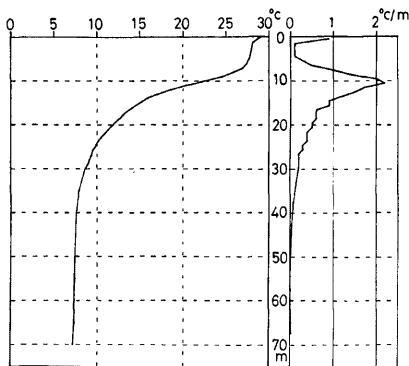


Fig. 3 Vertical distributions of water temperature and vertical temperature gradient averaged through 28-31 August, 1973.

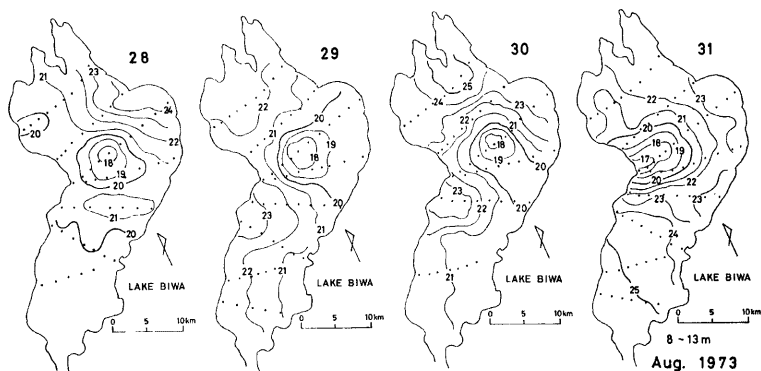


Fig. 4 Horizontal distributions of water temperature ($^{\circ}\text{C}$) averaged for 8-13 meters depth from 28th to 31th August, 1973.

も顕著に認められるはずである。従って、内部波による変動に着目する場合、躍層内のある深さにおける水温変動を代表としてとってよいが、**Fig. 3** に示したように水温躍層にかなりの厚さがあるので、なるべく全体的な躍層の振動をとらえる意味で、ここでは水温の鉛直傾度が $1.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上である8～13 mの厚さ5 mの平均水温をとり、その水平分布について考察することにする。

Fig. 4 が8～13 mの平均水温の水平分布を4日間について示したものである。図からまず気が付くのは、湖の中央やや北に4日間を通して水温の低い領域が存在することである。この低温域は、夏季の北湖にほぼ定常的に存在し、力学的には反時計回りのいわゆる第1環流に対応するものとしてよく知られている¹³⁻²³⁾。しかしながら、それ以外の領域については、4日間に共通した水温分布をみることは出来ない。このように、湖全域についてみると、水温分布は従来予想されていた以上に大きな変動を呈し、8月31日の水温分布に到っては環流に対応する低温域でさえも閉曲線ではなく、環流の名にふさわしくない分布となっている。この水温変動の様子を注意してみると、各日とも高温域と低温域がほぼ対向して存在し、日毎にこのパターンが変化している様子がうかがえる。そこで、その状況を見易くするために、平均水温からの偏差を出す操作を行なった。

そのために、4日間の平均水温を求める必要があるが、その際、各観測日で欠測や測点の位置の違いなどのために平均操作が困難な場合が生じる。そこで、北湖を一边1 kmの正方形の格子に分割し、各観測日の水温を格子点上に補間した後平均操作を施した。補間に用いた方法は、ある格子点の近傍の3～4の観測点までの距離の逆数を“重み”とした加重平均法である。このようにして、まず、各点別の4日間の平均水温からの偏差を求めたが、さらに内部波による水温変動を取出すという考えで次の操作を加えた。すなわち、内部波に起因する水温変動を考察する場合には水温を保存量として扱うが、現実には観測される水温分布には、湖面を通しての熱の出入りや湖水の混合などによる変動が含まれているため、ある深さにおける水温といえども必ずしも保存されないのが通常である。そこで、近似的に保存量の性格を持つ水温を取出すために、先に求めた水温偏差から各日別のその水平平均値を差引く操作を施した。その結果を示したのが**Fig. 5**である。すなわち、**Fig. 5**においては、各日の湖全域の平均値も、ある点での4日間の平均値も共に零となる。

以上の点を念頭に置いて**Fig. 5**をみると、一見して、各日とも湖が1本の曲線によって高温域と低温域に二分されているのがわかる。しかも、二分のされ方は必ずしも南北ではなく、日によっては東西の場合も

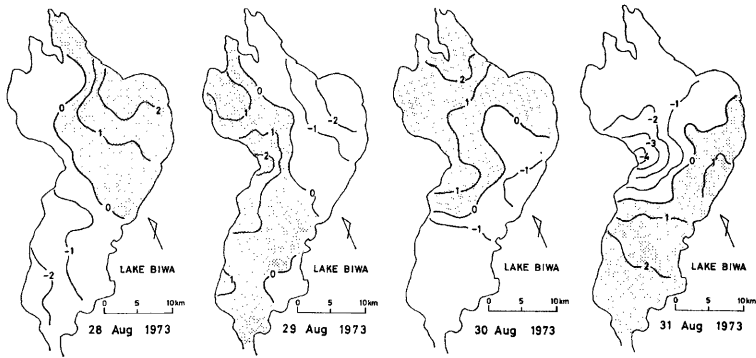


Fig. 5 Distributions of water temperature anomalies from the averaged over four days. Shaded areas indicate positive values.

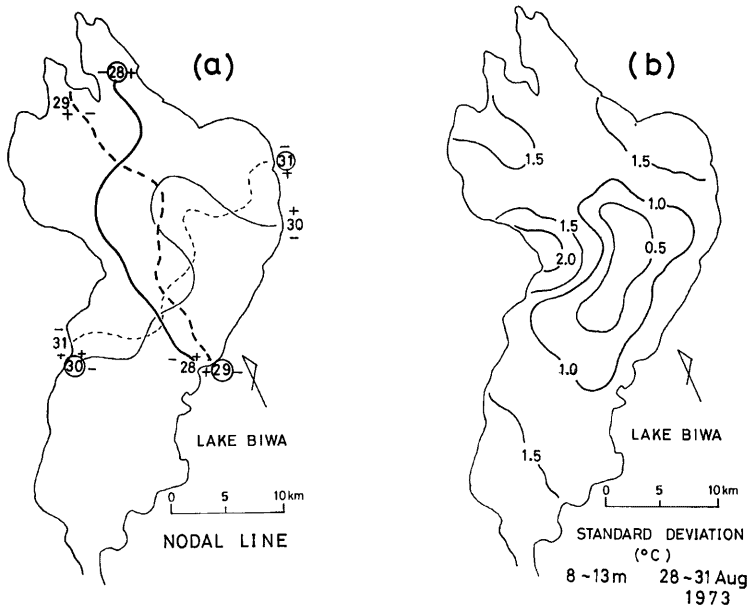


Fig. 6 Horizontal distributions of (a) "nodal line" (no anomaly line in Fig. 5), and (b) standard deviations of temperature anomalies for four days.

みられることから、この水温変動は北湖の縦方向の単節内部静振によるものとは考えられない。Fig. 6 は、Fig. 5 に示された各日における偏差が零である線（“節線”）と、各日の水温変動の標準偏差を表わしたもの

である。この図から、4本の“節線”の交差するのが舟木崎と彦根を結ぶ線のほぼ中央付近であること、また、湖岸近くで変動が顕著であり、“節線”の交差する付近で変動の小さいことが見てとれる。**Fig. 7**は金成⁴⁾が数値実験によって求めた基本モードの旋回性内部波の振巾と位相を示したものであるが、この図と**Fig. 6**とは良い一致をみせている。また、**Fig. 6 (a)**の“節線”が1日でほぼ半周(29日から30日にかけてはそれ以上)していることからみて、この水温変動は2日弱の周期をもつ旋回性内部波に起因するものと結論することができる。

3. 2 定点における流速と水温の時間変動

Ie-1のブイに設置したサーミスタチェーンと流向流速計によって得られた連続記録から、長周期の内部波による変動について以下に述べる。はじめに、**Fig. 8**は深さ12mにおける水温の時間変化を示したもので、途中に一度欠測はあるがほぼBT観測期間をカバーしている。この図から実に10℃にも及ぶ水温の変動が読み取れるとともに、1つの卓越した長周期波の存在を明瞭に認めることができる。この記録を前後半に分け、それぞれについて15分毎の水温の読み取り値に基くFFTによるスペクトル解析の結果を**Fig. 9**に示す。図から明らかに、周期42.6時間の振動が圧倒的に卓越している。ただ、記録の長さがこの周期と同じ程度であるから、FFTで得られたこの周期にはある程度誤差を含んでいることに注意しなければならないが、この水温変動の周期は、前節で得られた北湖全体の水温変動の周期にほぼ合致している。

一方、9月1日16時から3日7時にいたる39時間の流向・流速および水温の同時記録が得られたが、その結果を**Fig. 10**に示す。図には、流速の東向成分・北向成分の時間変化、および最下段には**Fig. 9**の後半の部分の水温変化を再掲してある。図で流速の時間変化をみると、3.5 cm/sの北東向きの一般流の上にかなり短い時間変動が重なっていて、全体

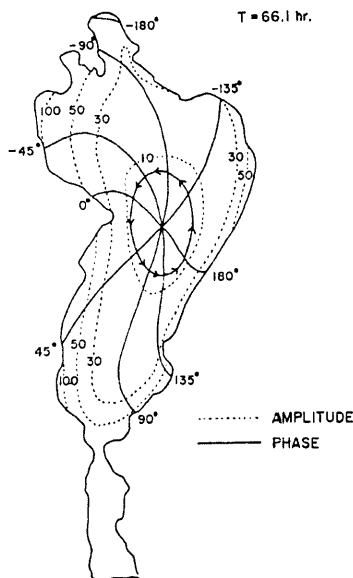


Fig. 7 Interface structure for the internal wave of the fundamental mode calculated by Kanari⁴⁾. solid lines—phase(in degrees); dotted lines—amplitude (in centimeters).

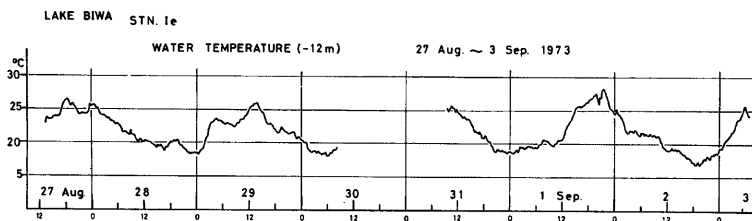


Fig. 8 Time variations of water temperature at the depth of 12m at Ie-1 buoy station from 27th August to 3rd September, 1973.

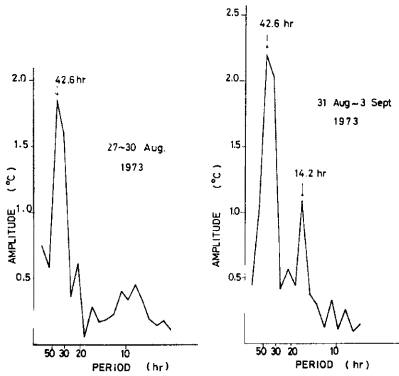


Fig. 9 Amplitude spectra of water temperature shown in Fig. 7.

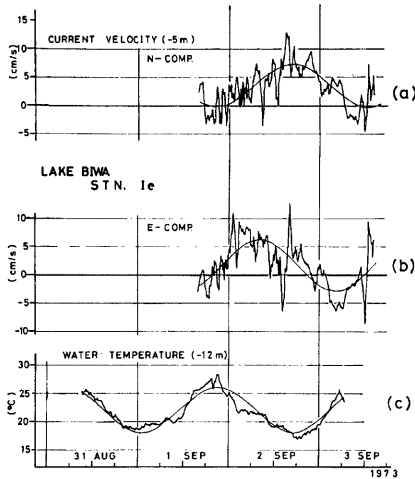


Fig. 10 Time variations of the current velocity at 5m depth and water temperature at 12m depth at Ie-1 buoy station. (a) north component of velocity, (b) east component of velocity, and (c) water temperature (the same as in Fig. 8) Thin lines represent sinusoidal variations with the period of 40 hours obtained by the least mean square method.

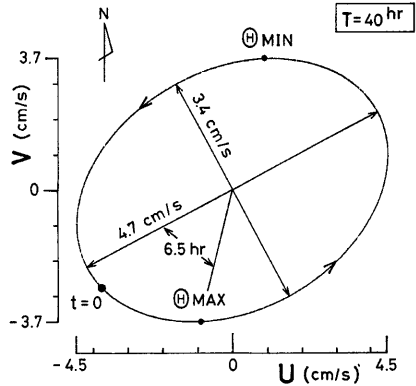


Fig. 11 Hodograph of internal wave with the period of 40 hours at Ie-1 buoy station. The origin of the time is taken at 16:00 of 1st September, 1973.

としては複雑な変化を呈している。しかしながら、注意してみると、やはり長周期の波の存在が認められる。そこで、卓越する波の概要を知るために、10分毎の流速の記録を用いてFFTによるスペクトル解析を行なった所、流速の東向成分、北向成分ともに水温の場合と同じく42.6時間の周期に顕著なピークがみられた。しかし、もちろん、流速記録の期間の長さはこの周期よりも短いから、得られたその卓越周期の値を直ちに信頼はできないので、ここでは長周期の波動にのみ着目することにして、流速変動を最小自乗法によって単一の正弦波で近似することにした。この方法によって求められた周期は、流速の二成分と水温についてそれぞれ39, 41, 40時間位の値となるので、いま周期を40時間として最小自乗法で求め直した曲線をFig. 10に細線で示した。それらは、 u , v , θ をそれぞれ流速の東向成分、北向成分、および水温の振動成分として、

$$u = 4.5 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - 57^\circ\right) \text{ cm/sec}$$

$$v = 3.7 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - 132^\circ\right) \text{ cm/sec}$$

$$\theta = 4.0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + 45^\circ\right) ^\circ\text{C}$$

と表わされる。ただし、 T (=40時間)は周期であり、時間 t の原点は記録開始の9月1日16時にとってある。またこの u と v を合成するとFig. 11に示すような楕円形のホドグラフが得られ、 u と v の位相

差から流向は時間と共に反時計回りに変化することがわかる。

前節で述べた北湖全域の水温変動の周期が2日弱であること、また本観測の約半月前に行なわれた金成⁵⁾による周航水温観測から得られた旋回性の内部波の周期が45.5時間であることなどを考え併せると、ここで得られた周期40時間の流速・水温の変動は北湖の基本モードの内部波によるものと考えてよいであろう。とくに、楕円形のホドグラフが得られたことは、基本モードの内部波が北湖の縦方向の内部静振ではなく、地球自転の影響を受けた旋回性の波動となっていることを如実に示している。また、興味深いのはこの楕円の長軸の向きがこの水域におけるびわ湖の縦方向にほぼ一致していることで、それは内部波に伴う流れが湖盆の形状による影響を受けたためと考えられる。

一方、Fig. 11で水温の最大は流速の最大(南西流)から約6.5時間、角度にして59°遅れて生じているのがわかる。単節内部静振の場合の水温と流速の位相差は90°であり、純粋な地衡流平衡の場合には水温躍層の最大傾斜時に最強流となるから、ここで得られた内部波に伴う流れはそれらの中間程度の振舞いを示していると考えられる。あるいは、このような位相差が生じるのは、水温躍層の最大傾斜時が必ずしも水温の極大になる時間と一致しないこと、すなわちFig. 7にみられるように内部波の等振巾線と等位相線が直交しないことによるのかもしれない。いずれにせよ、1点のみの観測からでは内部波の水平的な振動特性に関してはまだ推測の域を出ないが、この問題は流動場と水温場との力学的関連を究明する上での非常に重要な問題であり、今後の充実した係留システムによる観測が強く望まれる。

4. む す び

1973年の夏、びわ湖北湖全域を覆う4回の水温分布の観測から、水温躍層の変動が金成によって指摘されたような地球自転の影響を受けた反時計回りの旋回性内部波に起因することが確認された。このように、内部波の水平的な挙動が観測によって捉えられたのは今回が初めてであり、これは平均60の測点数を有する精細な観測を4日間連続して行なったことの大きな成果である。実際、ある程度の予想はしていたものの、これほど大規模な水温変動の現実的存在が浮彫りにされたことには、大きな感銘を禁じ得なかった。著者らは以前から1回限りの水温分布の観測に基づく湖流推算の危険性を予感していたが、今回の観測結果はまさにこの危険性を如実に物語るものである。

一方、BT観測と併行して、定点において流向・流速と水温の連続観測を実施した。数々のトラブルにもかかわらず、長周期の内部波に伴う流れの特性と水温変動に関する知見とが得られたことは大きな収穫であった。内部波に伴う湖水の流動は、成層期のびわ湖北湖における流況を支配する重要な要因であるとともに、湖水中の物質の分散過程においても大きな役割りを果たしている可能性がある。その意味でも、流速と水温の連続記録を得るための組織的な観測の必要性が痛感される。

最後に、本報告を記すにあたっては、京都大学理学部の今里哲久講師から貴重な助言を頂いた。また、定点での観測に際しては、京都大学理学部の西 勝也助手と京都大学防災研究所の清水保隆技官に全面的な協力を頂いた。ここに記して深く感謝する次第である。また、Ic点のブイ使用について快く便宜をはかって下さった京都大学臨湖実験所の諸氏、ならびにBT観測に協力を頂いた京都大学理学部海洋物理学研究室の学生諸氏に感謝する。また、この研究は、京都大学防災研究所の琵琶湖流域水文観測特別事業、および琵琶湖水資源・水環境調査特別事業の一環として行なわれたものであり、観測資料の解析は、京都大学大型計算機センターのFACOM M-190によるものである。

参 考 文 献

- 1) 岡本 巖・森川光郎：密度分布より見たびわ湖の湖流について，陸水学雑誌，22巻，1961，pp. 193-200.

- 2) 岡本 巖・森川光郎：重力ポテンシャル法によるびわ湖の湖流の力学計算，滋賀大学紀要，第11号，1961，pp. 27-33.
- 3) 國司秀明・岡本 巖・佐藤英夫：びわ湖湖流の観測，京都大学防災研究所年報，第10号 B，1967，pp. 321-329.
- 4) Kanari, S.: On the study of numerical experiments of two layer Lake Biwa, Japanese J. Limnol., Vol. 35, 1974, pp. 1-17.
- 5) Kanari, S.: Some results of observation of the long-period internal seiche in Lake Biwa, Japanese J. Limnol., Vol. 35, 1974, pp. 136-147.
- 6) Kanari, S.: The long-period internal waves in Lake Biwa, Limnol. Oceanogr., Vol. 20, 1975, pp. 544-553.
- 7) Endoh, S.: Diagnostic analysis of water circulations in Lake Biwa, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 34, 1978, pp. 250-260.
- 8) 今脇資郎・遠藤修一・國司秀明：びわ湖湖流の研究—湖流と内部波の分離—，京都大学防災研究所年報，第22号 B-2，1979，pp. 591-599.