

びわ湖の内部波の研究 (III)

—Instrumented Neutrally-Bouyant Floatによる
水の鉛直変位の測定について—

金 成 誠 一

ON THE STUDIES OF INTERNAL WAVES IN LAKE BIWA (III)

—On the Measurement of the Vertical Displacement
of Waters by Using an Instrumented
Neutrally-Buoyant Float—

By *Seiichi KANARI*

Synopsis

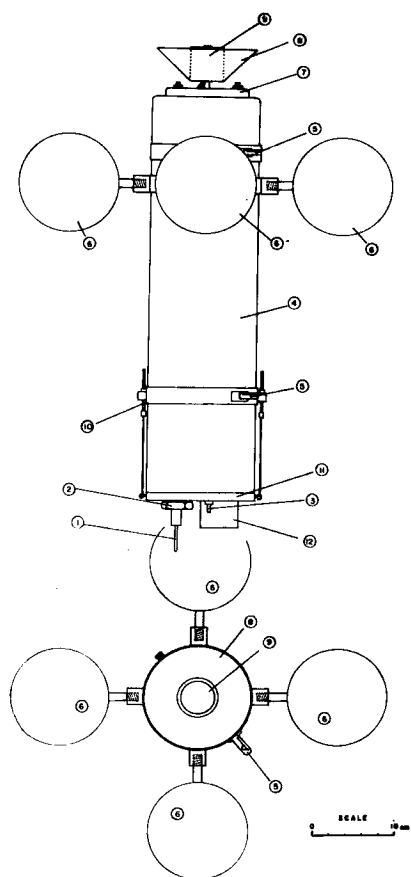
An instrumented neutrally-buoyant float was applied to the observation of vertical displacement of waters due to the internal waves in Lake Biwa in October 2 to 4, 1969, at the bay of Sugaura in the northern part of the lake. During this observation, continuous measurements of the temperature variation were also made by a fixed buoy-station which has six thermister thermometers at the depths of 12 m, 15 m, 18 m, 21 m, 24 m, and 27 m. The vertical displacements of waters were estimated by the equation of heat conduction under the assumption of conservation of heat. Finally, the estimated vertical displacement of waters which was averaged over the four layers of 18 m, 21 m, 24 m and 27 m, is compared with the vertical displacement of the instrumented neutrally-buoyant float. It will be shown that in general feature, the curve of the estimated vertical displacement of waters coincides with that obtained from the record of the instrumented neutrally-buoyant float.

1. 緒 言

内部波にもとづく水の鉛直変位の直接測定を主眼として計測装置を内蔵した neutrally-buoyant float を試作したが、この装置により水温変動測定あるいは水平流速測定から間接的に計算にもとづいて見出される内部波の振巾に関する情報の真偽がある程度評価できる。

内部波、特に湖沼における内部静振は等密度面の周期的な鉛直運動と考えられ、その直接測定は任意の密度面で平衡させた中立フロートの動きを追跡することにより達成される。しかしながら、フロートを完全に free にすれば、フロートは鉛直方向だけでなく水平方向にも移動するから、このような状態で測定された鉛直変位は、かならずしも同一水塊の鉛直変位とはみなし得なくなる。したがって、フロートの水平方向の移動を防止し、かつ鉛直方向の運動を妨げないような方法を考える必要がある。著者は、第2報¹⁾において、そのひとつの試みについて述べたけれども現場実験をするまでには致らなかったが、昭和44年10月2日から4日にかけて、びわ湖北湖の菅浦湾において、サーミスタ温度計による6層の水温変動と上記の instrumented neutrally-buoyant float (以下 INBF と略記する) による水の鉛直変位の同時観測を行なった。ただし、INBF の測定回路系には以下に述べるような部分的な変更がなされた。

(1) 第2報で述べた INBF の水温、圧力の測定量は、それに比例した周波数の副搬送波(周波数帯域



① Thermister Probe	⑦ Lower Seal Cap
② Pressure Sensor	⑧ Acoustic Reflector
③ External Switch	⑨ Acoustic Signal Emitter
④ Cylindrical Cap	⑩ Tie-Rod
⑤ Wire Holder	⑪ Lower Seal Cap
⑥ Float	⑫ Magnetic Release

Fig. 1 Schematic sketch of the instrumented neutrally-buoyant float (INBF).

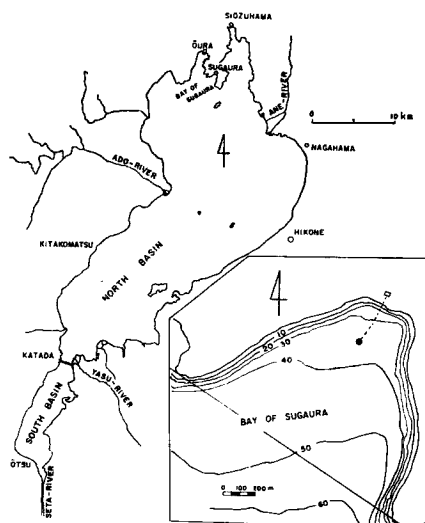


Fig. 2 Location of the sub-surface buoy-station (SSB-Station) in Lake Biwa. The insert shows the bay of Sugaura.

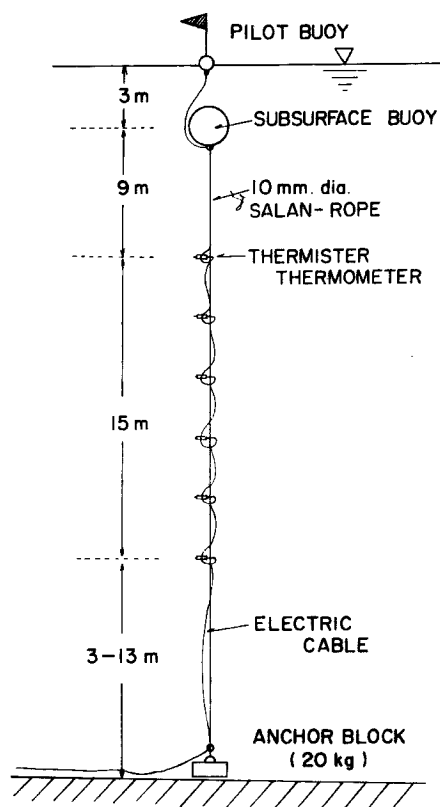


Fig. 3 Schematic structure of the SSB-Station with six thermister thermometers.

は異なる）に変換されたが、これを測定量に比例した巾を持つパルスに変換されるよう変更された。

- (2) 変更前の INBF では、測定量の変換にはそれぞれ周波数帯域の異なる副搬送波を使用していたが、時分割方式 (10 c/s) の採用によって、いずれも同一周波数の副搬送波を使用したために、受信回路が簡単になった。

以上が電気回路系流の主な変更点であるが、フロートの外観は Fig. 1 に示すように第 2 報で述べたものと全く同一である。

2. 観 測 方 法

びわ湖北岸に位置する菅浦湾内の水深約 35 m の場所 (Fig. 2) に Fig. 3 に示すような構造の Sub-Surface Buoy-Station (以下 S.S.B.-Station と略記する) を設置し、この Buoy-Station から約 50 m 南に INBF 用の船を錨留して観測を行なった。S.S.B.-Station では水面から 12 m, 15 m, 18 m, 21 m, 24 m および 27 m の 6 層の水温変動が各層に固定された Thermister Thermometer によってとらえられ、陸上

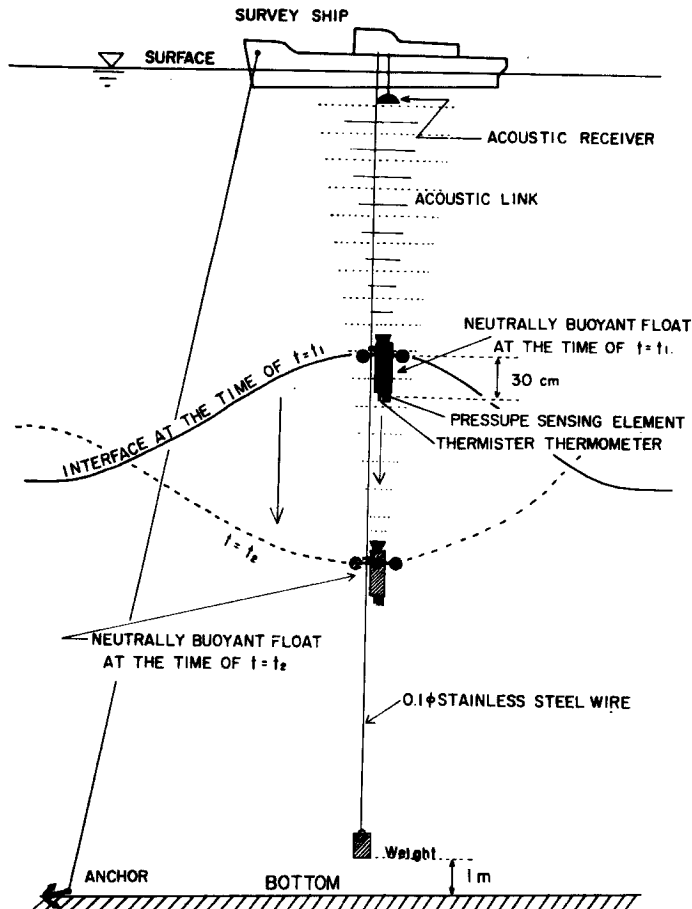


Fig. 4 Schematic representation of the operation of the INBF.

の 6-channel Recorder 上に記録される。全観測期間を通じ、水面から温度躍層までの平均深度は約 20 m であり、INBF の平衡深度もこの辺の深さを目安にして Balance Adjustment が行なわれた。INBF の使用状況は Fig. 4 に示されている。

3. 観 測 結 果

Fig. 5 は同時観測を行なった期間における S.S.B.-Station の各層の水温変動記録である。この記録から各層の水温を 1 時間毎に読みとり観測期間を通じて平均した値から平均的な水温の鉛直分布を求めた結果を Fig. 6 に示す。この平均の水温鉛直分布は、水の鉛直変位を水温変動から算出する際に利用される。

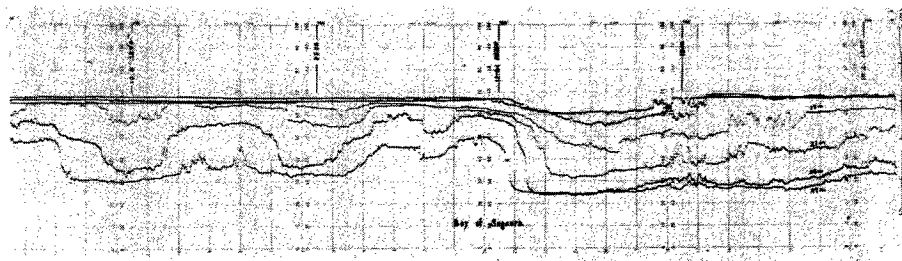


Fig. 5 Record of the temperature variations obtained from the SSB-Station.

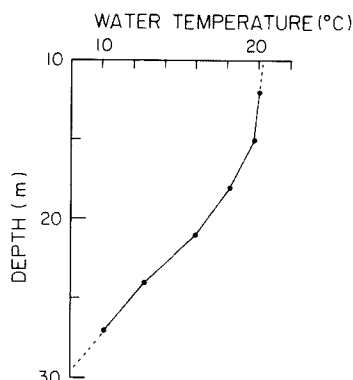


Fig. 6 The averaged vertical temperature distribution obtained from the record of the SSB-Station.

一方、Fig. 7 は水温躍層附近で中立平衡となるように Balast を調整したのち、表面から自由降下してゆく際に INBF から送出されて来た超音波信号の復調記録の一例であり、INBF が表面から次第に沈降し、水温躍層附近で平衡に達し、その後は躍層の動きに追従して鉛直運動をする様子が、INBF の周囲の水温変動と共に明瞭に記録されている。記録中に周期的 (10 分間隔) に現われている直線は各 Channel の Standard Signals である。

4. 観測結果の考察

流速の水平成分を u , v , 鉛直成分を w とするとき、Convection および eddy diffusion がない field における固定点の温度 T は

$$\kappa \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる²⁾。ここに κ は水の熱伝導率であり、また、 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ である。

しかし、海洋あるいは湖沼では通常、 κ は極めて小さいことが知られており、かつ、水温の水平勾配も水温の鉛直勾配に比べて小さいと考えると、(1)式は次のように近似することができる³⁾。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

したがって、鉛直流速 w は

$$w = - \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)}{\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と書くことができる。

ここで、更に水の鉛直流速を水の鉛直変位 ζ_w^c の変化率

$$w = - \frac{\partial \zeta_w^c}{\partial t},$$

で置きかえ、かつ、水温の鉛直勾配を水温の鉛直勾配の時間平均で置きかえるならば、(3) から

$$\frac{\partial \zeta_w^c}{\partial t} = \frac{1}{\left\langle \frac{\partial T}{\partial z} \right\rangle} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

を得る。

したがって、水の鉛直変位 ζ_w^c は

$$\zeta_w^c = \frac{1}{\left\langle \frac{\partial T}{\partial z} \right\rangle} \cdot \int_{t_0}^t \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dt = \frac{1}{\left\langle \frac{\partial T}{\partial z} \right\rangle} \cdot [T(t) - T_0] \quad \dots\dots\dots (4)$$

によって与えられる。すなわち、任意の固定点における水温変動とその場所の水温の鉛直勾配の時間平均が知れば、その点の鉛直変位が計算できる。この場合、水温の鉛直勾配はきわめて重要な factor となることは明らかであり、水温の鉛直勾配の時間変動が大きな場合には(4)式の妥当性はあまり主張できないものと思われる。

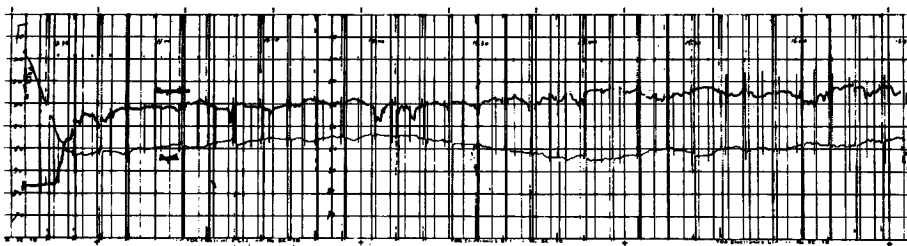


Fig. 7 An example of record of the vertical displacement of the INBF and its surrounding water temperature obtained from the underwater acoustic signals which were send out from the INBF.

そこで、(4)式の妥当性を検討するために、S.S.B.-Station で得られた6層の水温変動記録のうち、下層4層(18, 21, 24, 27 m)の記録を30分毎に読みとった結果が Fig. 8 の上段に、また、これと Fig. 6 に示した水温の鉛直分布とを用いて各層の水の鉛直変位 ζ_w^c を計算した結果が Fig. 8 の中段に示されている。

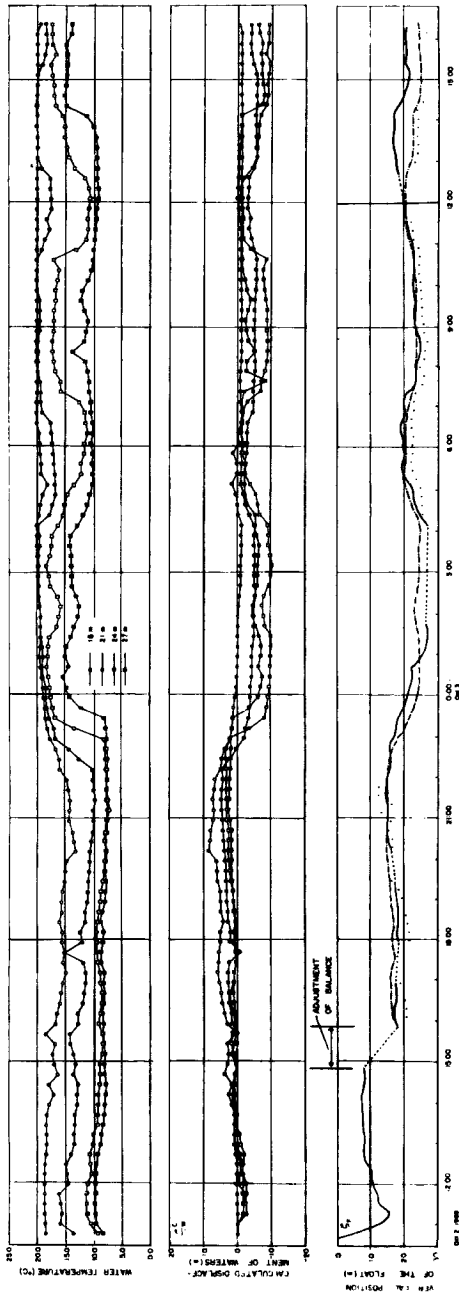


Fig. 8 Comparison between the calculated vertical displacement of waters (ζ_w) and the observed vertical displacement of the INBF (ζ_F). Upper part: variations of water temperature at the depths of 18 m, 21 m, 24 m, and 27 m which were measured by thermometer thermometers fixed on the SSB-Station. Middle part: the vertical displacement of waters calculated from the variations of water temperature by using the equation (4). Lower part: trace of the vertical displacement of the INBF (full line), calculated vertical displacement of waters averaged over the four layers of 18 m, 21 m, 24 m, and 27 m (dotted broken line), and trace of the vertical displacement of the INBF which is estimated from the temperature variations at six layers on the SSB-Station and the temperature change which measured by the INBF (dots).

る。明らかに、「各層の鉛直変位」は同一ではない。**Fig. 8** の下段の実線は、INBF によって測定されたフロート自身の変位であり、10月2日の14時50分から15時50分の間は平衡深度の変更のための調節を行なったので、記録が不連続になっている。この場合、30分以下の短周期変動が出ないように平滑化されており、その結果に現われている変動周期は数時間前後である。したがって、INBF の振動特性²⁾から、水と Float の変位比は1に近い値をとり、記録に対する振巾の補正の必要は殆んどない。INBF の深度は時間と共に変化しているから、これを S.S.B.-Station の水温変動から求めた鉛直変位のうちのどの層の変位曲線と比較すべきであるかということは一概に決められない。

すなわち、INBF が最初に平衡に達した時のその場所の水が、本来どの層に属すべき水であるかを決めるのと同様な困難さを含んでいる。

勿論、深さが異なれば当然鉛直運動の mode が異なるであろうから、水の鉛直変位の多様性を否定するわけにはゆかないが、このままでは一対一の比較対応ができない。そこで、「各層の鉛直変位曲線」を「ひとつの水塊の鉛直変位を異なった深さで観測した結果得られた変位曲線」とみなすことが許されるならば、その水塊の平均的な鉛直変位曲線を求めて、これと INBF の変位曲線と比較することは可能になる。

かくして得られた平均の変位曲線を10月2日16時における INBF の平衡深度と一致するように平行移動したものが **Fig. 8** の最下段の鎖線である。一方、INBF による水温の記録を S.S.B.-Station の水温変動曲線内に plot し、内挿によって INBF の深度を推定した結果を同図中に黒丸印で示してある。以上3種類の変位量の比較により、次のような結論が導かれる。

- (1) INBF によって直接測定された水の変位と、(4) 式にもとづいて計算した水の鉛直変位との間には部分的に大きな差が認められるが、全体の傾向は比較的一致している。
- (2) INBF の水温の記録から推定された変位は他のふたつの変位のいずれとも一致しないが、その差は systematic であり、変位にして約 3 m 上方にずらすことになり、計算によって求めた変位曲線にほとんど一致する。

5. 結 語

水中超音波による遠隔測定装置を内蔵した Neutral Float によって、湖の内部波にもとづく水の鉛直変位の直接測定を試み、それによって得た変位と固定点の水温変動から計算によって得た変位とを比較したが、いずれの方法でも全体の傾向には根本的な差は認められなかった。しかしながら、部分的にはかなり大きな差があり、INBF の水温から推定した変位には Systematic な誤差が含まれている。この観測で使用した INBF の電子回路の特性が僅かに周囲温度の影響を受けること、および受信器の周囲温度が 10°C 附近まで下がると、受信検波率がやゝ低下することなどが観測後の Calibration で見出された。したがって、上記の結果だけからは(4)式に依る鉛直変位の評価の可否について明確に結論することはできない。現在では周囲温度に対する補償がほぼ完全に行なわれるよう回路を修正してあるので、今後の観測結果によって問題はより明確になるものと思われる。

今回は時間的に平均された水温の鉛直勾配を用いて水の鉛直変位を算出したが、実際は勾配そのものが時間的に大きく変動している。したがって、各時刻における勾配を用いて水の鉛直流速を求め、しかるのちにこれを時間で積分して変位を求めるならば、(4)式から算出した変位と更に異なった結果を得る筈である。今後はこの点についても検討を進める予定である。

謝 辞

最後に本研究を遂行するに当たり、終始御激励、御指導いただいた奥田節夫教授、ならびに観測に際して多大なる協力を惜しまなかった横山康二技官に深謝の意を表する。なお、この研究は文部省科学研究費（奨励研究の補助を受けたことを付記しここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 金成誠一：びわ湖の内部波の研究 (Ⅱ), 京都大学防災研究所年報, 第12号B, 昭44, 3, pp. 669~680.
- 2) Lee, M.H.R. and C.S., Cox: Time Variation of Ocean Temperatures and Its Relation to Internal Waves and Oceanic Heat Flow Measurements, J.G.R., Vol. 71, No. 8, 1966, pp. 2101~2111.
- 3) Krauss, W.: Internal Waves, Underwater Acoustics, Vol. 2, Chapter 17, Plenum press New York, 1967, pp. 375~392.