

びわ湖の内部波の研究(Ⅱ)

—On the instrumented neutrally-buoyant float—

金 成 誠 一

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

—On the instrumented neutrally-buoyant float.—

By *Seiichi KANARI*

Synopsis

In order to study the internal waves in Lake Biwa, an instrumented neutrally-buoyant float was constructed. The float is connected with a survey ship through an acoustic link which is ejected from the float itself, and carry the signals of depth of the float and of water temperature in the same depth.

Characteristics of the responses of motion of the float which is balanced in the state of neutrally buoyancy at a thermocline, is calculated. The amplitude ratio of the vertical motion of the float vs. the vertical motion of water depends on the temperature gradient and frequency of water movement in the thermocline, and has a resonant frequency which moves toward the higher frequency range according to the increasing temperature gradient.

1. 結 言

湖沼の内部波の観測は温度計またはバシサーモグラフなどによる水温測定に頼っているのが現状であるが、この方法では、内部波にもとづく実際の水の運動を直接とらえることは困難である。通常、内部波による水の鉛直速度は、水温の時間変化を平均の温度こう配で除したもので近似される¹⁾。しかしながらこの方法は水温の保存則に基礎をおく方法であって、水平方向の流れがないか、もしくは水温の水平方向のこう配が無視できること、および渦動拡散が非常に小さいことを前提としており、現実の湖沼で必ずしも満足される仮定ではない。ことに、びわ湖では夏から秋にかけて、非常に卓越した水平流が認められているし、また秋期においては thermocline 以浅のところでは、みかけの乱流拡散が比較的大きくなるものと考えられる²⁾。したがって、このような水理条件下に存在する内部波の振巾あるいはその鉛直速度を上記の方法にもとづいて算出しても、それは内部波による実際の水の振動振巾あるいは鉛直速度を与えたことになるかどうか疑わしい。

内部波は等密度面の振動と考えられるから、その直接測定は等密度面の動きに追従し得る中立フロートを投入し、その動きを正確に追跡することにより達成される。Swallow³⁾の neutral-buoyant float はこのような考えに立って海洋の中層水の水平方向の大規模な動きを追跡する目的で作られたものであり、これはフロートが発信する音響パルスの伝播方向を二点で測定してフロートの位置を決定しながらフロートを追跡してゆくのであるが、伝播方向の決定に大きな誤差を伴うために、これから微小な鉛直変位を決定することは非常にむづかしい。むしろ、フロート自身に自分の位置（フロートの位置）あるいは周囲の水理条件を測

定させる方が有利である。

著者は従来より超音波による水中遠隔測定装置の開発^{4),5)}に勉めてきたが、この装置を部分的に改造し、送信装置をそのまま neutrally-buoyant float としたものを試作した。これはフロート自身が各種の測定を自動的に行うことができるので、Swallow のフロートにみられるような測定上の困難は生じない。この装置によれば、任意の深さの内部波の直接測定が可能となろう。以下において、この装置の概要ならびにフロートの運動特性について述べる。

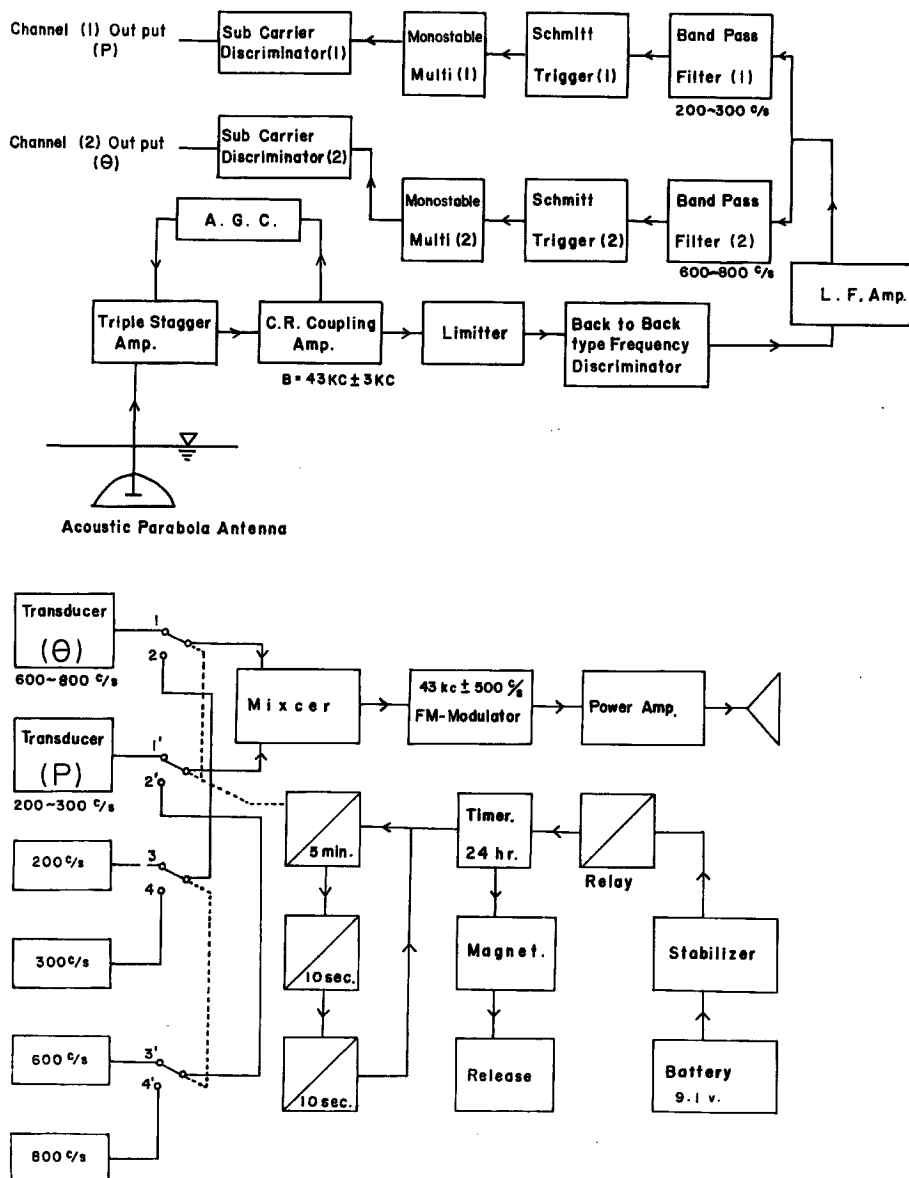


Fig. 1 Block diagrams of the receiver and the transmitter of the instrumented neutrally-buoyant float.

2. 装置の概要

(a) 回路の構成

フロート側における測定は水温と圧力の二要素について行なわれる。原理的には圧力のみで充分目的が達せられるが、後述するように、フロートの応答特性には共振点と反共振点があり反共振周波数においては、フロートが水の動きに追従できなくなる。この附近の周波数をおぎなう目的で、同時に水温の測定をも行なう必要がある。

水温検出は初期抵抗 $55.79\text{ k}\Omega$ 、B定数 3370°K のビード型サーミスタを含むブリッジ回路により行なわれ、回路の出力電圧によって、第1副搬送波発振器の周波数を制御し、 0°C から 30°C までの水温変化を 600 c/s から 800 c/s までの定振巾交流信号に変換する。圧力検出は PS—10KA 型の超小型圧力変換器により行なわれ、やはり、その出力電圧によって第2副搬送波発振器の周波数を制御し、 0 kg/cm^2 から 10 kg/cm^2 までの圧力変化を 200 c/s から 300 c/s までの交流信号に変換する。この部分は Fig. 1 の下側のブロックダイアグラムの中でそれぞれ (θ) および (P) の記号で表わされている。このふたつの副搬送波発振器出力を次段の混合回路で加え合わせ、その合成波によって中心周波数 43 kc の搬送波を周波数変調する。被変調搬送波は中心周波数のまわりに最大 $\pm 500\text{ c/s}$ の偏移巾を持っており、無変調搬送波振巾の 1% までの信号スペクトルに対する通過帯域は水温信号に対して約 4 kc 、圧力信号に対しては約 2.5 kc である。かくして変調された搬送波は最終段で電力増巾され、円筒型圧電振動子を通じて水中超音波信号として放射される。Fig. 1 の下段のブロックダイアグラムにおいて、 200 c/s 、 300 c/s 、 600 c/s および 800 c/s の各固定周波発振器は各チャンネルのキャリブレータを構成しており、5分間の測定後に10秒間だけ校正信号が検出信号に代わって送出される。この外に一定時間（約24時間）経過後に自動的にバラストを落させてフロートを浮上させるための電磁式自動回収装置、定電圧回路および、電池槽などがあり、上記の装置が直径 12 cm 、長さ約 50 cm のアルミニウム製円筒からなるカプセル内にコンパクトに組み込まれている（Photo. 1 および Photo. 2 参照）。

Fig. 1 の上側のブロックダイアグラムは、フロートから送られてくる超音波信号の受信装置であり、超音波の検出は直径 40 cm のパラボラ型反射器を持った水中マイクロフォンによって行なわれる。受信波は

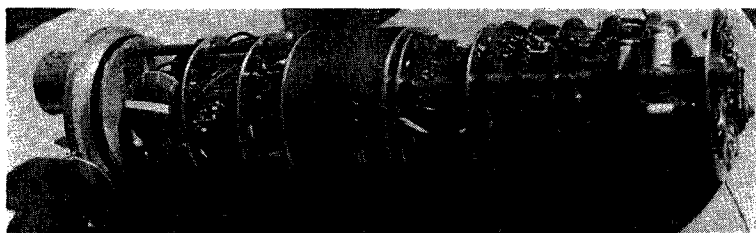


Photo. 1 Electronic assembly in the capsule of the instrumented neutrally-buoyant float.

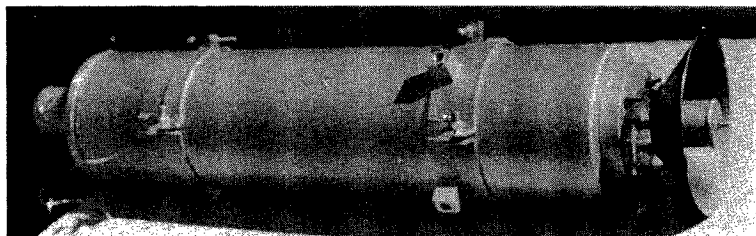


Photo. 2 View of the main body.

Table 1 List of characteristics of electronic component in the float capsule.

		Center of frequency	Frequency deviation	output	Power consum	Type of circuit
Sub-carrier oscillator	(P) 0~30°C	250 c/s	± 50 c/s	0.1 V	0.2 W	V-control
	(θ) 0~10kg/cm ²	700 c/s	±100 c/s	0.1 V	0.2 W	V-control
Main-carrier modulator		43.0 KC	±500 c/s $\beta_P=0.6\sim0.8$ $\beta_\theta=1.7\sim2.5$	1.0 V	0.05 W	V-control
Power amp		43.0 KC	(Band width) ±4 KC	30 V (0.8 W)	1.5 W	B-class P-P
Release magnet		—	—	—	6.5 V ×50 mA	Timer-Relay control

Table 2 List of characteristics of receiver components.

		Gain	Pass band	In put	Out put	Coefficient of discriminator
H. F. amp.		120 db	(43±3) KC	> 10 μV	2 V	—
Main-carrier discriminator		-26 db	(43±3) KC	2 V	0.1 V	0.1 mV/cycle
L. F. amp.		30 db	0~1 KC	0.1 V	3.2 V	—
Band pass filter	θ	(cut off) -30 db	600~800 c/s	3.2 V	6 V	—
	P	(cut off) -36 db	200~300 c/s	3.2 V	6 V	—
Sub-Carrier discriminator	θ	—	0~1 kg	6 V	700~900 mV	0.186 mV/cycle
	P	—	0~1 kg	6 V	300~500 mV	0.239 mV/cycle



Photo. 4 View of the receiver unit. Left, receiver and recorder; center, acoustic microphone with parabola reflector; right, battery and D. C.—A. C. inverter.

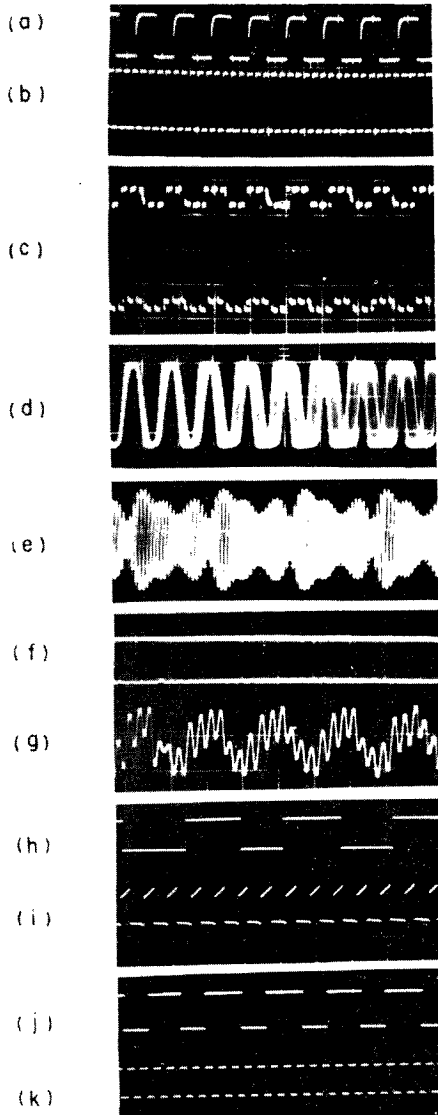


Photo. 3 The out put wave forms of (a) pressure oscillator, (b) temperature oscillator, (c) mixer, (d) carrier modulator, (e) transmitted sonic waves, (f) limiter, (g) carrier discriminator, (h) B.P. filter (1), (i) B.P. filter (2), (j) monostable multi. (1), (k) monostable multi. (2).

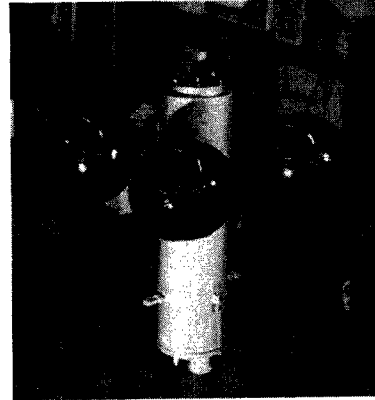


Photo. 5 View of the instrumented neutrally-buoyant float with four spherical sub-floats.

トリフルスタガー増巾器および抵抗容量結合増巾器を経て充分増巾され、さらにリミッターで一定振巾の波形に整形されて離調型の搬送波弁別器に送られ、ここで合成副搬送波が再生される。この波は次の帯域濾波器（1）および（2）に加えられ、水温信号と圧力信号とに分離される。分離された各信号波は波形整形されて最終段の副搬送波弁別器に送られ、周波数に比例した D. C. 出力に変換される。このふたつの直流出力は EPR-3T 型の 2 ペンレコーダに直接記録できるが、このままでは記録紙の全巾有効に使えない。したがって、各チャンネルの復調 D. C. 出力がそれぞれ記録紙の全巾に対応するように分圧および零シフト回路が附加されている。Photo. 3 の (a)~(d) はフロートの内部の送信回路各部電圧波形であり、(e)~(k) は受信回路の各部電圧波形を示したものである。以上の送受信各系統の電気的主要諸元は Table 1 および Table 2 に示すとおりである。

(b) Neutrally Buoyant Float の構成

(a) において述べたような送信回路を内蔵するカプセルは排水量が 6800 cc 全重量は M1-Y 型水銀電池 7 個を封入した状態における空中重量は 4.274kg となつてこのままでは浮力の中立平衡を達成できない。浮力の中立平衡を得るために Fig. 2 に示すようにカプセルの周囲に 4 個のアルミニウムの補助フロートを取りつけてある。この状態における釣合は僅かに 150 g の浮力過剰となり、水中重量 135 g の铸铁

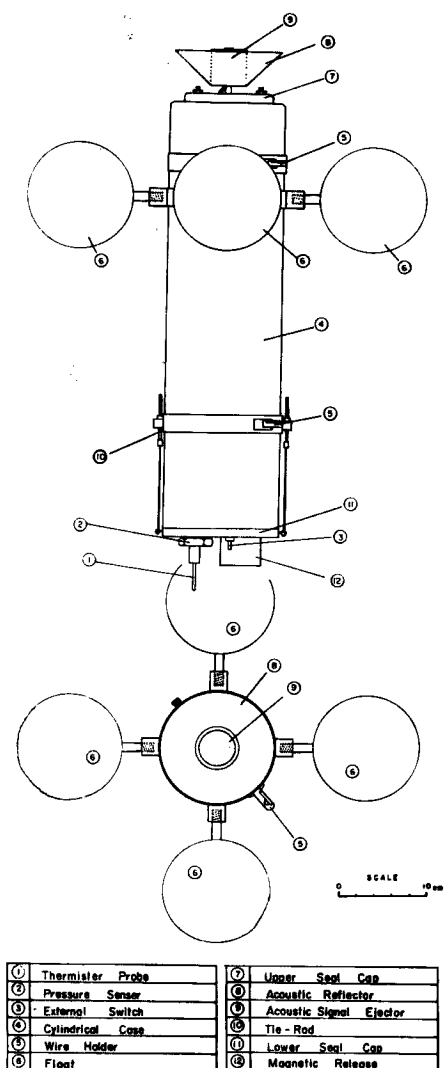


Fig. 2 Schematic diagram of the instrumented neutrally-buoyant float.

この実験の結果、等密度面の運動速度が約 0.1 cm/sec 以上あれば、密度こう配が 8×10^{-6} (g/cm⁴) でも充分応答しうることが確認された。

現場における浮力調整は水中重量約 1 g の鉄球と直径 8 mm、厚さ 2 mm のアルミ円板 (水中重量約 0.2 g) との数を試行錯誤的に適当に調整することにより行なわれる。これらのバラストはカプセルに沿って固定された直径 1 cm、長さ 40 cm の薄肉金属円管 (下端はバラストが抜け落ちない程度に封じてある) に投入される。補助フロートとカプセルを含めたフロート全体の排水量は 8800 cc であり、水中重量 0.2 g の軽金属片 1 個によるフロートの平均密度の増分は約 2×10^{-5} (g/cc) になる。したがって、原理的には 2×10^{-5} の密度差まで中立平衡の調整が可能であるがフロートの体積変化 (圧力または温度による) のえきようがあるために実際は 10^{-4} 程度までの調整が限度である。

錘 (直径 5 cm、高さ 2 cm の円柱型でマグネットにより吸引される) と水中重量約 1 g の鉄球バラスト 10 数個を附加することにより完全に中立平衡になる。銑鉄錘は電磁的にカプセル最下端のマグネットに固定され、自動浮上装置のタイマーの設定時刻に達するまではフロートのバラストとなり、タイマーが所定の設定時刻に達してマグネットの電流が絶たれると直ちにカプセルから離脱し、フロートを自動的に浮上せしめる。

サーミスタおよび圧力変換器はカプセルの最下端のシールキャップに固定されている。このシールキャップは内部の送信回路と一体になっており、回路の点検あるいは電池の交換に際しては、タイロッドのナットをはずすだけで内部の回路をカプセルから簡単に引き出すことができる。

カプセル上部に取りつけてある送波器は円筒型振動子と円錐状の反射器で構成され、円筒振動子の径方向のひろがり振動による半径方向への無指向性音波が円筒軸方向の指向性音波 (片側約 20°) に変換される。

現段階では受信装置にフロートの水平移動に対するトラッキング機構が追加されていないのでフロートを完全にフリーにすることができない。そこで先端に約 5 kg のおもりのついた直径約 1 mm のなめらかなステンレス・ワイヤーを水中に鉛直に吊しつワイヤーに沿ってフロートを上下させる。Fig. 2 の ⑤ で示したワイヤー・ホルダーはフロートをワイヤーに拘束するためのものである。この方式ではワイヤー・ホルダーとワイヤーの間のまさつ抵抗がフロートの動きに重大なえきようを与えるものと考えられるが、ワイヤーが通過するホルダーの穴を充分大きく (直径約 5 mm) とれば、実用的にはほとんどそのえきようを無視できることが模型実験によって確かめられた。この模型実験は淡水と塩水によって密度こう配を作りその中に縮尺約 2 分の 1 の模型をワイヤーに沿った状態で平衡させ、等密度面の上下動に対するフロートの易動性を観察したものであるが、こ

3. フロートの水の動きに対する応答

フロートの中立平衡は上述のように試行錯誤的に行なわれるが、水の表面附近で僅かに負の浮力になって初めてフロートが沈下して行く。これが水面下何メートルのところで平衡するかはその場所の水の鉛直密度分布および温度分布、フロートの圧縮率および熱膨張率、水の表面でのフロートの平均密度と水の密度との差などで決まる。ここでは、一応そのような平衡がある深さのところで達成されたものとし、その位置の水塊が内部波によって上下に変位したときに、フロート自身はどのような運動をするかを検討する。

水平移流がなく、小水塊がその平衡位置から Z_w だけ鉛直に変位したとき、小水塊の運動方程式は Eckart (1960)⁶⁾ によれば、

$$\rho_w \frac{d^2 Z_w}{dt^2} = -\rho_w N^2 Z_w - \frac{\partial p'}{\partial z} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに N は Väisälä frequency で水の断熱圧縮率を K_{wa} とするとき、

$$N^2 = -\left(\frac{g}{\rho_w} \cdot \frac{d\rho_w}{dz} + \rho_w g^2 K_{wa} \right)$$

で定義される。また、 p' は平均の圧力場からの deviation として表わされる圧力である。このような小水塊内で中立平衡を保っていたフロートは、一般に、慣性のために水とは異なった変位を示す。その変位を Z_F 、平衡時のフロートの平均密度を ρ_{F0} とすると、フロートの運動方程式は次のように書ける。

$$\rho_{F0} \frac{d^2 Z_F}{dt^2} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + X_1 - k \left(\frac{dZ_w}{dt} - \frac{dZ_F}{dt} \right) - \alpha \left(\frac{d^2 Z_F}{dt^2} - \frac{d^2 Z_w}{dt^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 X_1 は水とフロートの変位が異なることにより生ずる浮力の excess、右辺第三項は水とフロートの相対速度に比例したまきつ力、また右辺第四項はフロートが水をひきづって動くために生ずる見かけの慣性の増分を表わす。 α は慣性係数 (inertia coefficient) と呼ばれ、球の場合は 1/2 の値となることが知られているが⁷⁾、円筒に対する値は知られていない。ここでは Pochapsky⁸⁾ の推定に従って 1/5 という値を採用する。

次に変位 Z_F によるフロートの平均密度の変化を計算する。初めの平衡位置におけるフロートの平均密度 ρ_{F0} に対し、変位 Z_F による圧力変化を dp 、水塊との相対変位にもとづく温度変化を $d\theta$ とすると、変位後のフロートの平均密度 ρ_F は

$$\begin{aligned} \rho_F &= \rho_{F0} - \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial p} \right)_0 dp + \left(\frac{\partial \rho_F}{\partial \theta} \right)_p d\theta \\ &= \rho_{F0} - \rho_{F0} K_{F\eta} dp + \rho_{F0} \beta_F d\theta \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ただし、 $K_{F\eta}$ 、 β_F はそれぞれフロートの等温圧縮率、熱膨張率を表わす。圧力変化 dp を静水圧で近似すると、

$$dp = \rho g Z_F \dots\dots\dots (4)$$

また、温度差 $d\theta$ は

$$d\theta = + (Z_w - Z_F) \frac{d\theta}{dz} - \frac{\theta \beta_w}{C_p} g Z_w \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。(5) の右辺第 1 項は水とフロートの相対変位にもとづく温度変化であり、右辺第 2 項は水塊の変位にもとづく Potential temperature の変化分である。ここに、 β_w 、 C_p はそれぞれ水の熱膨張率、定圧比熱を表わす。

故に変位後のフロートの密度 ρ_F は

$$\begin{aligned} \rho_F &= \rho_{F0} - \rho_{F0} \rho g K_{F\eta} Z_F + \rho_{F0} \beta_F (Z_w - Z_F) \frac{d\theta}{dz} \\ &\quad - \rho_{F0} \beta_F \frac{\theta \beta_w}{C_p} g Z_w \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

一方, $\mathbf{Z}_F$ の変位によるフロートの周囲の水の密度は

$$\rho_w = \rho_0 + \frac{d\rho}{dz} \cdot \mathbf{Z}_F \quad \dots\dots\dots (7)$$

であるから, 変位にもとづく浮力の excess は,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 = g(\rho_w - \rho_F) &= (\rho_0 - \rho_{F0})g + \left(g \frac{d\rho}{dz} + \rho_{F0} g^2 \mathbf{K}_{F\eta}\right) \mathbf{Z}_F \\ &\quad - g \rho_{F0} \beta_F \left\{ (\mathbf{Z}_w - \mathbf{Z}_F) \frac{d\theta}{dz} - \frac{\theta \beta_w g}{C_p} \mathbf{Z}_w \right\} \end{aligned}$$

であるが, 平衡位置では $\rho_0 = \rho_{F0}$, また,

$$\begin{aligned} N^2 &= - \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_w}{dz} + \rho_w g^2 \mathbf{K}_{wa} \right) \\ \frac{\theta \beta_w}{C_p} &= \frac{\rho_w}{\beta_w} (\mathbf{K}_{w\eta} - \mathbf{K}_{wa}) \end{aligned}$$

の関係を使かうと,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= (-\rho_F N^2 - \rho_w^2 g^2 \mathbf{K}_{wa} + \rho_{F0} g^2 \mathbf{K}_{F\eta}) \mathbf{Z}_F \\ &\quad - g \rho_{F0} \beta_F \left\{ (\mathbf{Z}_w - \mathbf{Z}_F) \frac{d\theta}{dz} - \frac{\rho_w g}{\beta_w} (\mathbf{K}_{w\eta} - \mathbf{K}_{wa}) \mathbf{Z}_w \right\} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

これを (2) に入れ, $\rho_w \approx \rho_{F0} \approx \rho = \rho_0 (= \text{const.})$ とおき, さらに (1) によって圧力こう配 $\frac{\partial p'}{\partial z}$ を消去すると,

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\alpha}{\rho_0}\right) \frac{d^2}{dt^2} (\mathbf{Z}_F - \mathbf{Z}_w) &= N^2 (\mathbf{Z}_w - \mathbf{Z}_F) + \rho_0 g^2 (\mathbf{K}_{F\eta} - \mathbf{K}_{wa}) \mathbf{Z}_F \\ &\quad + \rho_0 g^2 \frac{\beta_F}{\beta_w} (\mathbf{K}_{w\eta} - \mathbf{K}_{wa}) \mathbf{Z}_w \\ &\quad - g \beta_F \frac{d\theta}{dz} (\mathbf{Z}_w - \mathbf{Z}_F) - \frac{k}{\rho_0} \frac{d}{dt} (\mathbf{Z}_F - \mathbf{Z}_w) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで, 水もフロートも $e^{i\omega t}$ の型の運動をするものと考えて,

$$\mathbf{Z}_w = \zeta_w e^{i\omega t}, \quad \mathbf{Z}_F = \zeta_F e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (10)$$

とおくと, (9) は

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\alpha}{\rho_0}\right) \omega^2 (\zeta_F - \zeta_w) &= N^2 (\zeta_w - \zeta_F) + \rho_0 g^2 (\mathbf{K}_{F\eta} - \mathbf{K}_{wa}) \zeta_F \\ &\quad + \rho_0 g^2 \frac{\beta_F}{\beta_w} (\mathbf{K}_{w\eta} - \mathbf{K}_{wa}) \zeta_w \\ &\quad - g \beta_F \frac{d\theta}{dz} (\zeta_w - \zeta_F) - i \frac{k}{\rho_0} \omega (\zeta_F - \zeta_w) \end{aligned}$$

故に, これから水の変位とフロートの変位の比 (ζ_F/ζ_w) について解けば,

$$\frac{\zeta_F}{\zeta_w} = \frac{N^2 - \left(1 + \frac{\alpha}{\rho_0}\right) \omega^2 - \rho_0 g^2 \delta \mathbf{K}_{Fw} - g \beta_F \left(\frac{d\theta}{dz}\right) + i \frac{k}{\rho_0} \omega}{N^2 - \left(1 + \frac{\alpha}{\rho_0}\right) \omega^2 + \rho_0 g^2 \frac{\beta_F}{\beta_w} \delta \mathbf{K}_{w\eta a} - g \beta_F \left(\frac{d\theta}{dz}\right) + i \frac{k}{\rho_0} \omega} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし, $\delta \mathbf{K}_{FW} = \mathbf{K}_{F\eta} - \mathbf{K}_{wa}$, $\delta \mathbf{K}_{w\eta a} = \mathbf{K}_{w\eta} - \mathbf{K}_{wa}$ ここでさらに,

$$\begin{aligned} A(N, \omega) &= N^2 - \left(1 + \frac{\alpha}{\rho_0}\right) \omega^2 \\ B(\theta') &= \rho g^2 \delta \mathbf{K}_{FW} + g \beta_F \frac{d\theta}{dz} \end{aligned}$$

$$C(\theta') = \rho g^2 \frac{\beta_F}{\beta_w} \delta K_{w\eta a} - g \beta_F \frac{d\theta}{dz}$$

において、実数部と虚数部とに分離すると

$$\mathcal{R}_e \left\{ \frac{\zeta_F}{\zeta_w} \right\} = \frac{[A(N, \omega) + C(\theta')][A(N, \omega) - B(\theta')] + \left(\frac{k}{\rho_0} \omega \right)^2}{[A(N, \omega) + C(\theta')]^2 + \left(\frac{k}{\rho_0} \omega \right)^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

および

$$\mathcal{I}_m \left\{ \frac{\zeta_F}{\zeta_w} \right\} = \frac{\left(\frac{k}{\rho_0} \omega \right) [B(\theta') + C(\theta')]}{[A(N, \omega) + C(\theta')]^2 + \left(\frac{k}{\rho_0} \omega \right)^2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(12, 13) の数値計算にあたり、 N は $\frac{d\rho}{dz}$ の関数であり、また $C(\theta')$ 、 $B(\theta')$ は $\frac{d\theta}{dz}$ の関数である。したがって、密度と温度の関係から $\frac{d\rho}{dz}$ を $\frac{d\theta}{dz}$ で置きかえることが出来れば、(11)を $\frac{d\theta}{dz}$ をパラメータとして計算できる。一般に $\frac{d\rho}{dz}$ は $\frac{d\theta}{dz}$ だけでは

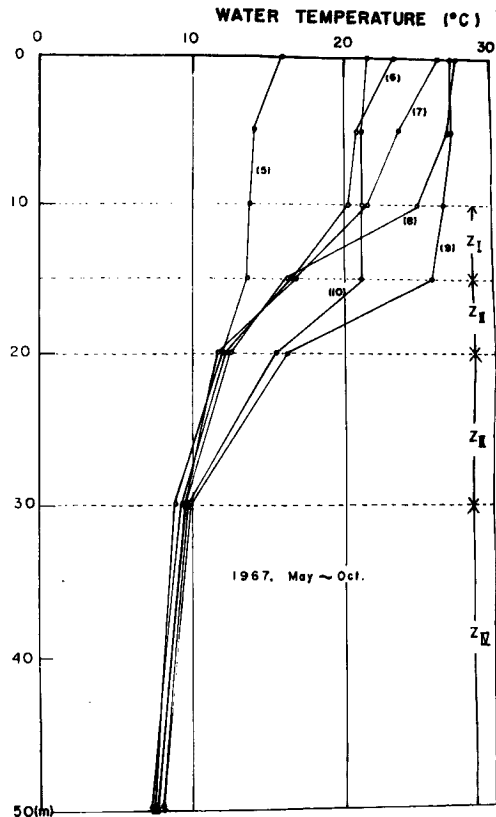
なくて θ そのものによっても変わる。しかしながら、実際の湖水にみられるような温度範囲では θ そのもののえいきょうはあまり大きくないと考えられる。Fig. 3 は昭和42年の5月から10月までのびわ湖の各月の水温の鉛直分布であるが、この分布を $Z_I = 10 \text{ m} \sim 15 \text{ m}$ 、 $Z_{II} = 15 \text{ m} \sim 20 \text{ m}$ 、 $Z_{III} = 20 \text{ m} \sim 30 \text{ m}$ および $Z_{IV} = 30 \text{ m} \sim 50 \text{ m}$ の四つの深度に分けて、各領域の温度こう配および密度こう配を算出し、両者の関係をひとつのグラフにプロットしてみると、Fig. 4 に示す結果が得られる。Fig. 4 で (・) 印で示した三点を除けば、ほぼ1対1の対応が成立しており、これによっても、温度 θ の大きさにはほとんど関係なしに密度こう配を温度こう配で置き換えることができる。

計算は、実際に起り得ると思われる内部波の周波数領域に対して、これも実際に起り得る温度こう配をパラメーターとして行なった。

計算に要する各定数値については、試作したフロートに関する定数値および常温 (20°C) の水について知られている物理定数を使用した。すなわち、円筒型カプセル (アルミ製) の圧縮率は、次のようにして求めた。

今、円筒の肉厚 t 、長さ l_0 、内径 r_i 、外径 r_o 、ポアソン比およびヤング率をそれぞれ ν 、 E 、とすると、単位圧力による半径方向および軸方向の歪はそれぞれ

$$\frac{\partial r}{\partial p} = \frac{r_o r_i}{2tE} (2 - \nu), \quad \frac{\partial l}{\partial p} = \frac{r_o^2 l_0}{2tr_i E} (1 - \nu)$$



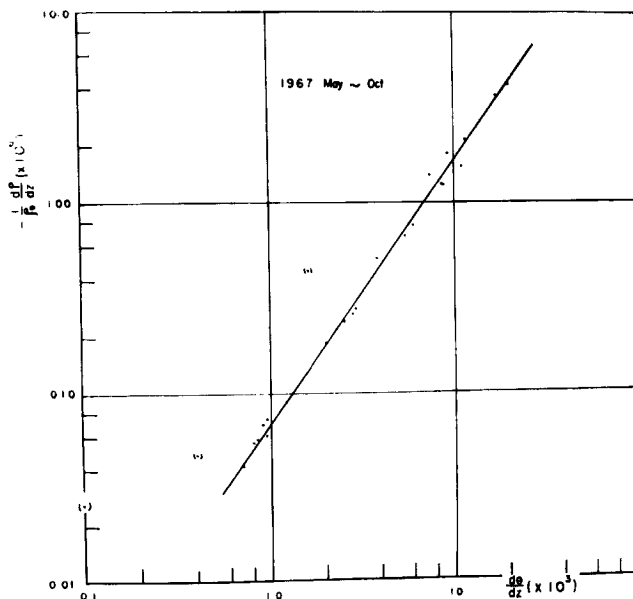


Fig. 4 Relation of $\frac{d\theta}{dz}$ vs. $-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$, calculated from vertical temperature distributions shown in figure 3, by the use of the approximate relation⁹⁾ of $\rho = 1 - (6\theta^2 - 36\theta + 47) \times 10^{-6}$.

で与えられる。したがって、加圧後の容積変化は

$$\begin{aligned} \Delta V_c &= \pi(r_0 - \delta r)^2(l_0 - \delta l) - \pi r_0^2 l_0 \\ &\approx \frac{-2r_0^2}{Et} \pi r_0 l_0 \delta p \end{aligned}$$

したがって、圧縮率 K_{FO} は

$$K_{FO} = -\frac{1}{V_{00}} \cdot \frac{\partial V_0}{\partial p} \approx \frac{2r_0}{Et}$$

球型の補助フロートについても同様な計算を行ない、これを K_{FS} として、全体の圧縮率 K_F を

$$K_F = \frac{V_{00}K_{FO} + 4V_{0s}K_{FS}}{V_T}$$

から求めた。ここに、 V_T はカプセルおよび補助フロートを含む全容積、 V_{00} はカプセルの容積、 V_{0s} は球型補助フロート1個の容積である。ただし、慣性係数については、球について知られている $1/2$ という値と、円筒に関する Pochapsky の推定値（推定の基準は明確でない。）である $1/5$ という値をそれぞれの容積で weight を掛けて加え合わせた値、すなわち

$$\alpha = \alpha_s \frac{4V_s}{V_T} + \alpha_0 \frac{V_0}{V_T}$$

によって決定した。ここに、 α は球の慣性係数、 α_0 はカプセルの慣性係数 V_T は補助フロートを含む全容積、 V_s はフロート1個の容積、 V_0 は円筒型カプセルの容積で、 $\Delta V_s + V_0 = V_T$ である。

また、まさつ係数 k は Reynolds 数 1800 における直径 18 cm の球の抵抗係数を単位容積に換算した値 k_s とカプセルに対する抵抗係数を同じく単位容積に換算した値 k_0 を用いて

$$k = 4k_s + k_0$$

によって計算した。その値は $k = 6.6 \times 10^{-4} (\text{dyne} \cdot \text{sec} / \text{cm}^4)$ である。

実数部, (12) 式の計算の結果を Fig. 5 に示す。虚数部, (13) は考えている周波数範囲ではきわめて微小な値 (約 10^{-2}) しかとり得ず, 位相差としては殆んど無視することができる。したがってフロートの運動特性は実数部, (12) 式の挙動でほぼ決定されると考えて良い。

曲線は $\frac{d\theta}{dz}$ をパラメータとして表わされているが, いずれの曲線も, かならず共振点と反共振点をひとつづつ持っている。共振点, 反共振点はいずれも $\frac{d\theta}{dz}$ の増加にともない高い周波数にずれ, それに応じて共振点と反共振点の間隔が接近してゆく。 $\frac{d\theta}{dz} = 10^{-3} (^\circ\text{C}/\text{cm})$ では共振点よりも低い周波数に対する応答があまり良好ではなく, フロートは水の変位に追従できなくなることを示している。したがって, 非常に長い周期の内部波を観測するためには, すくなくとも温度こう配が $10^{-3} (^\circ\text{C}/\text{cm})$ より大きな値を持つ水深でフロートを使用しなければならない。

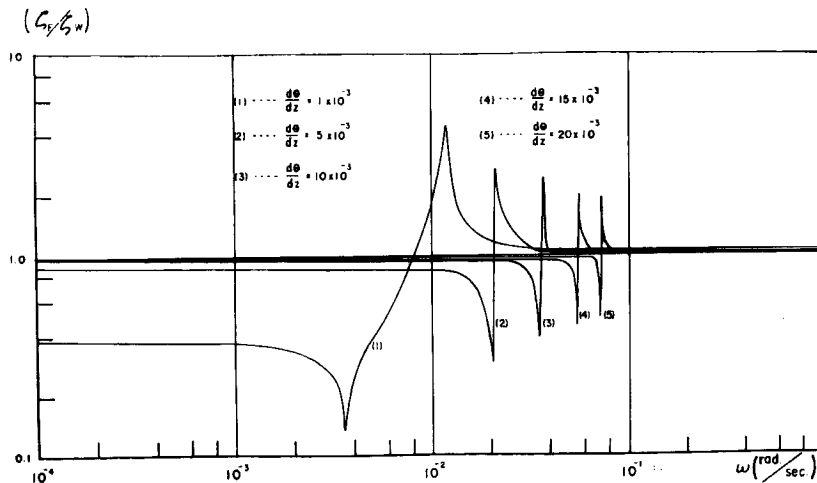


Fig. 5 Frequency characteristics of the responses of the neutrally-buoyant float.

4. 結 語

内部波にもとづく水の鉛直変位の直接測定ということを主眼にして, 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, 水温測定あるいは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チェックされるであろう。

計算された振動特性からみて, フロートが低周波内部波(周期数時間以上)に忠実に応答するためには, 水温こう配がすくなくとも $10^{-3} (^\circ\text{C}/\text{cm})$ 以上である必要がある。これは密度こう配にして, $8 \times 10^{-8} (\text{g}/\text{cm}^4)$ に相当し, 当然中立平衡の限界を超えた値である。反共振点附近では, もっとも応答が悪くなるが, その附近の周波数では, 相対的にフロートに対する水の動きが大きくなるので, 見かけ上温度の変化が大きくなる。フロート自身, この水温の変化を測定することができるので, この周波数における内部波は水温の変動として記録される。このような水温の変動の記録は, 圧力変動の記録とちがって, 直接内部波による変位振巾の完全な情報にはなり得ないが, すくなくともそのような周波数の変動が存在したという消極的な情報は提供する。このように, 応答特性における振巾比が 1 以下の周波数領域では, 圧力特性の劣化分は水温変化として記録され, 不十分ながら圧力特性を補償する。

ここに試作したフロートの活用により, 内部波にもとづく実際の水の変位を直接記録することが可能である。この装置は, 現在試作後の最終調整が行なわれている段階で, 観測にはまだ利用されていないが, 今

後、この装置により、びわ湖の内部波の実態が明らかになるものと思われる。

最後に、この装置の一部は文部省科学研究費補助金によって準備されたことを附記し、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) M. H. K. Lee 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.
- 2) W. H. Munk and E. R. Anderson: Note on a theory of the thermocline, J. Marine Res., Vol. 7, No. 3, 1948, pp. 276—295.
- 3) J. C. Swallow: A neutral-buoyancy float for measuring deep currents, Deep Sea Res., 3, 1955, pp. 74—81.
- 4) S. Kanari: Underwater Acoustic Telemetry for Oceanographical and Limnological Research, Part I and Part II, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol. 15, Part 3, No. 102, 1966, pp. 71—94.
- 5) 金成誠一: 水中超音波によるテレメータ, 京都大学防災研究所年報, 第10号A, 昭和42年3月, pp. 537—545.
- 6) C. Eckart: Hydrodynamics of oceans and atmospheres, Pergamon Press, Oxford, 1961.
- 7) H. Lamb: Hydrodynamics, Cambridge Univ. Press, Six edition, 1932.
- 8) T. E. Pochapsky: Measurement of small scale oceanic motions with neutrally-buoyant floats, Tellus, vol. XV, No. 4, 1963, pp. 352—362.
- 9) G. E. Hutchinson: A treatise on limnology, Vol. I, —Geography, Physics, and Chemistry, John Wiley & Sons, Inc., New York.