



Title	2. 倶多楽湖における湖面の長周期振動
Author(s)	中尾, 欣四郎; NAKAO, Kinshiro; 三宅, 秀男 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 21, 13-22
Issue Date	1969-02-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.21.13
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13950
Type	departmental bulletin paper
File Information	21_p13-22.pdf



2. 倶多楽湖における湖面の長周期振動

中尾欣四郎・三宅秀男・大槻 栄
小泊重能・大友和雄・川村政和

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 43 年 10 月受理 —

I. 緒 言

湖沼へ流入または流出する地下水量を比較的短期間の水収支の調査から求めるためには、湖水位を蒸発量の精度と等しく精密に測定しなければならない。

筆者らは、従来から短期間の水収支には、湖水位および Floating Pan の水位は、1/30 mm の測定精度をもつ読取の精密水位計によって測定している。

昭和 39 年 7 月 17 日から 8 月 3 日まで倶多楽湖で水収支の調査を行ない、地下水漏出の有無を解析した¹⁾。この結果、調査の期間で、地下水漏出のみによる水位低下は 4.9 mm/day であったが、この値は、収支期間によっては、2.9 mm/day から 6.3 mm/day まで差異があり、平均値のまわりはかなりばらついている。

この調査期間の水位の変化幅は 50 mm にすぎず、しかも湖水位と漏水による水位低下高との間には有意な関係は認められない。

従って、このような短期間では、一定であるはずの漏水量のばらつきは、湖水位が何らかの原因によって長周期の振動をしているためではないかという疑問を生じさせる。

昭和 40 年 8 月湖岸の 2 地点で 1 分間隔で約 2 時間水位の連続観測を行なったところ、2 地点で、それぞれ水位はほぼ逆の変化を示し、しかもかなり長周期の湖面振動で、その変化幅は約 3 mm もあることがわかった。

そこで、前回の水収支の調査での漏水量のばらつきは、湖水面が長周期の振動をしているため、定時の測定水位に生じる誤差のためであると考えた。

昭和 40 年 8 月の水収支の調査²⁾では、2 つの地点での水位は、方向が正反対で、しかもよく似た変化をしていることからみて、この 2 地点は、湖面振動の Nodal-line に対してほぼ対称の位置にあると考えた。そこで、2 地点の水位の平均で水位低下を求め、水収支を解析した結果、8 月 9 日から 8 月 12 日までの 1 日毎の漏水量は、6.0, 6.5, 5.9 (mm/day) とほぼ等しい値を得た。

そこで、このような 3 時間にもおよぶ長周期の湖面振動がどのような原因で生じているか

1) 中尾欣四郎・愛沢行三・大槻 栄； 倶多楽湖の水収支，北大地球物理学研究報告，15 (1966)，21.

2) 中尾欣四郎・大槻 栄・田上龍一・成瀬廉二； 閉塞湖からの分水界漏出—倶多楽湖—，北大地球物理学研究報告，17 (1967)，47.

を調査するために、昭和42年8月18日から20日まで湖岸の4地点に水位計を設置して水位の連続観測を行なったが、この結果、平均すれば3時間10分の長周期の湖面振動が観測され、これは内部静振に起因するものであることが明らかになった。

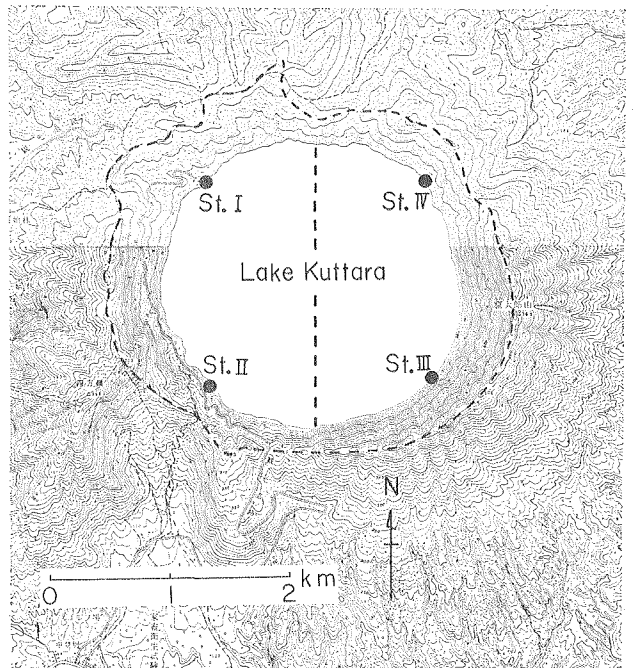
II. 調査の概要

倶多楽湖は流入する河川も流出する河川もないカルデラ湖で、湖水面積は 4.72 km^2 、半径 1.2 km のほとんど完全な円形湖である。

湖盆形態は田中館³⁾の測深によれば、湖岸より急傾斜で水深が増大する標式的な碗状である。最大水深 146.5 m 、平均水深は 105.0 m である。

水位計は第1図に示したごとく、湖岸線を4等分した St. I, St. II, St. III, St. IV の4地点に設置した。St. I, St. II は昭和40年8月に水位を測定したときと同一地点である。

水位測定用円筒は直径 14.8 cm で、測定水面が風波や短周期の表面静振などによって変動するのを防ぐために、直径 0.5 cm 、長さ 1 m のビニールパイプによって湖水と連絡されている。このように細いパイプによって湖水とつながっている円筒内の水位は、湖水位の変化に follow するためには時間的遅れが生じ、短周期の湖水位の変動は damping されることになる⁴⁾。



第1図 倶多楽湖周辺の地形図、St. I, St. II, St. III, St. IV は水位の測点、点線は水面振動の nodal line である。

Fig. 1. Topographic map around the lake Kuttara. The water level is measured at St. I, St. II, St. III, St. IV, a dotted line is the nodal-line of the oscillation on water surface.

III. 水位の時間変化

第2, 3, 4図に、5分間隔で水位の同時測定を4地点で行なった結果を示した。図によれば、8月18日の測定では顕著な周期変化はみられないが、8月19日、20日の測定では明らかに長

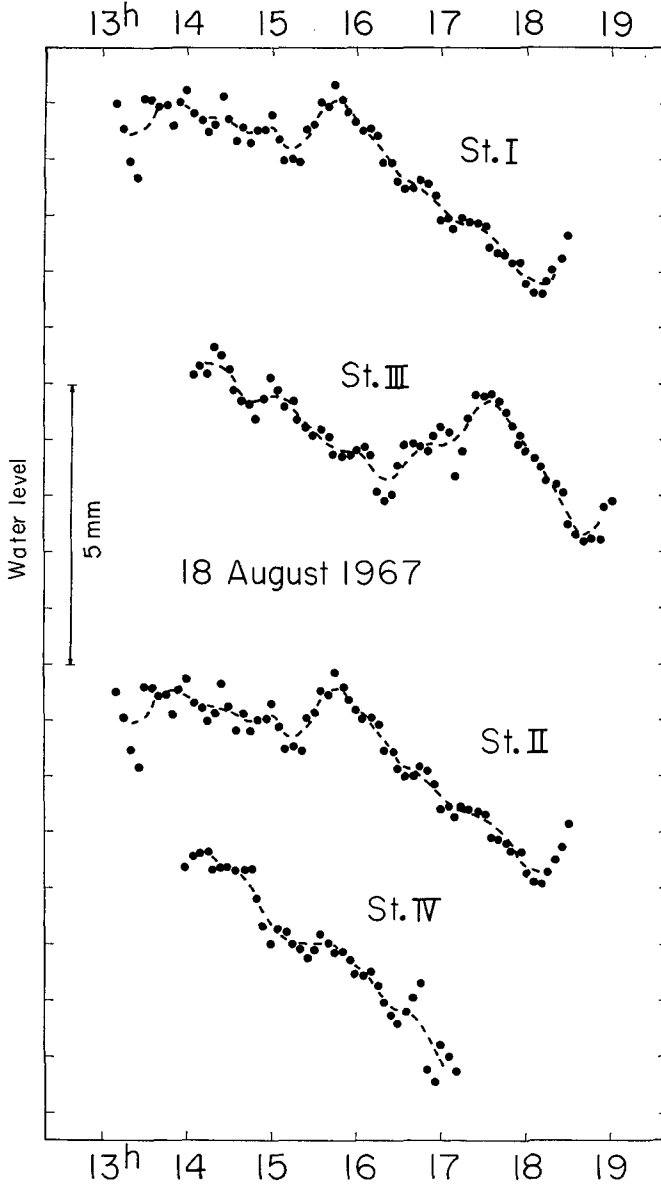
3) 田中館秀三; 北海道火山湖研究概報, 北海道庁 (1925).

4) 前掲 2).

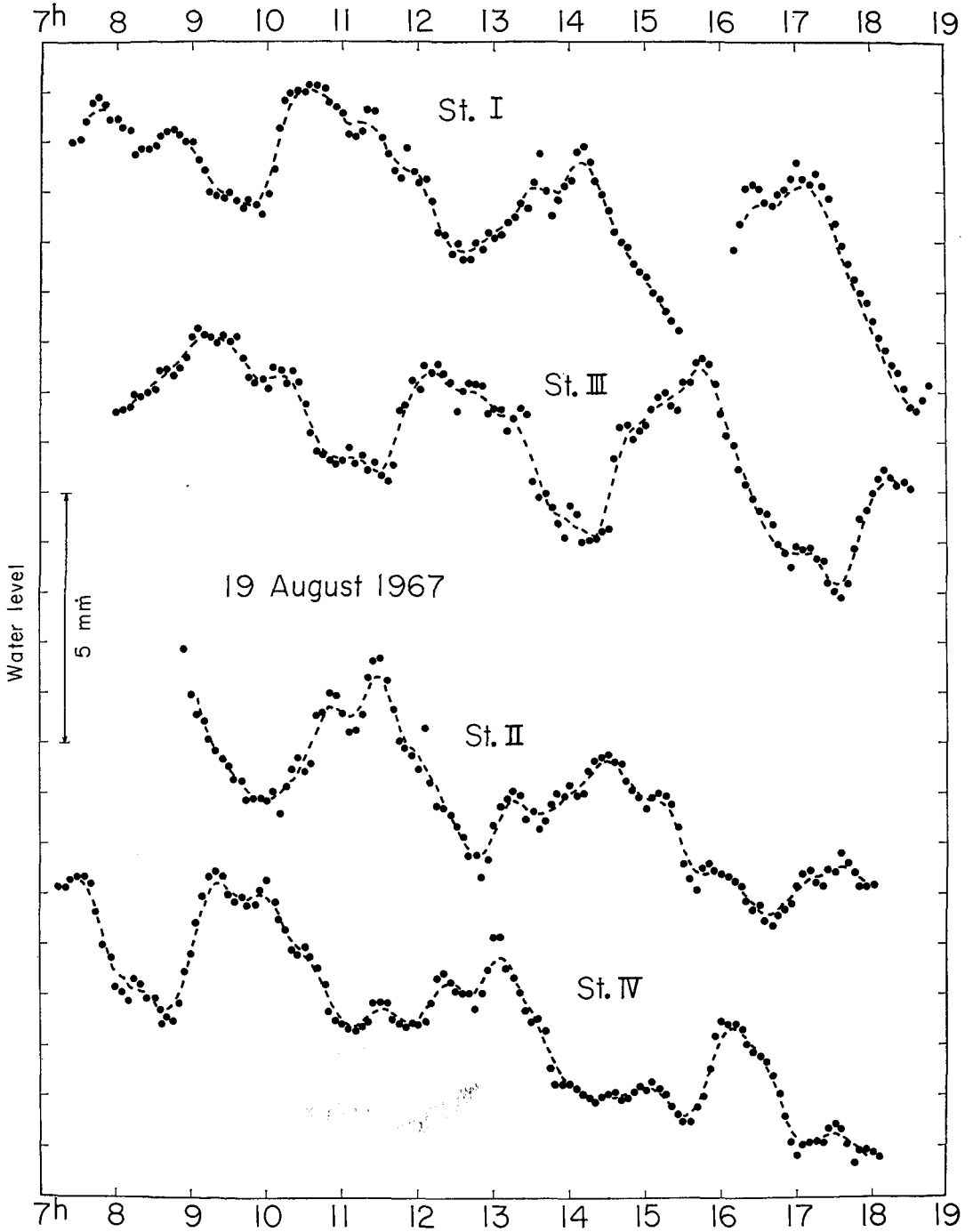
周期の振動がみられる。

第2, 3, 4図の点線は20分間の移動平均を求めた曲線で, 卓越した長周期振動の周期は19日, 20日の測定結果を平均すると3時間10分となった。尚これに重なって約30分程度の周期振動も認められるようである。

St. I, St. II と St. III, St. IV とは湖心を通る南北線に対して対称の位置にあるが, 第3, 4

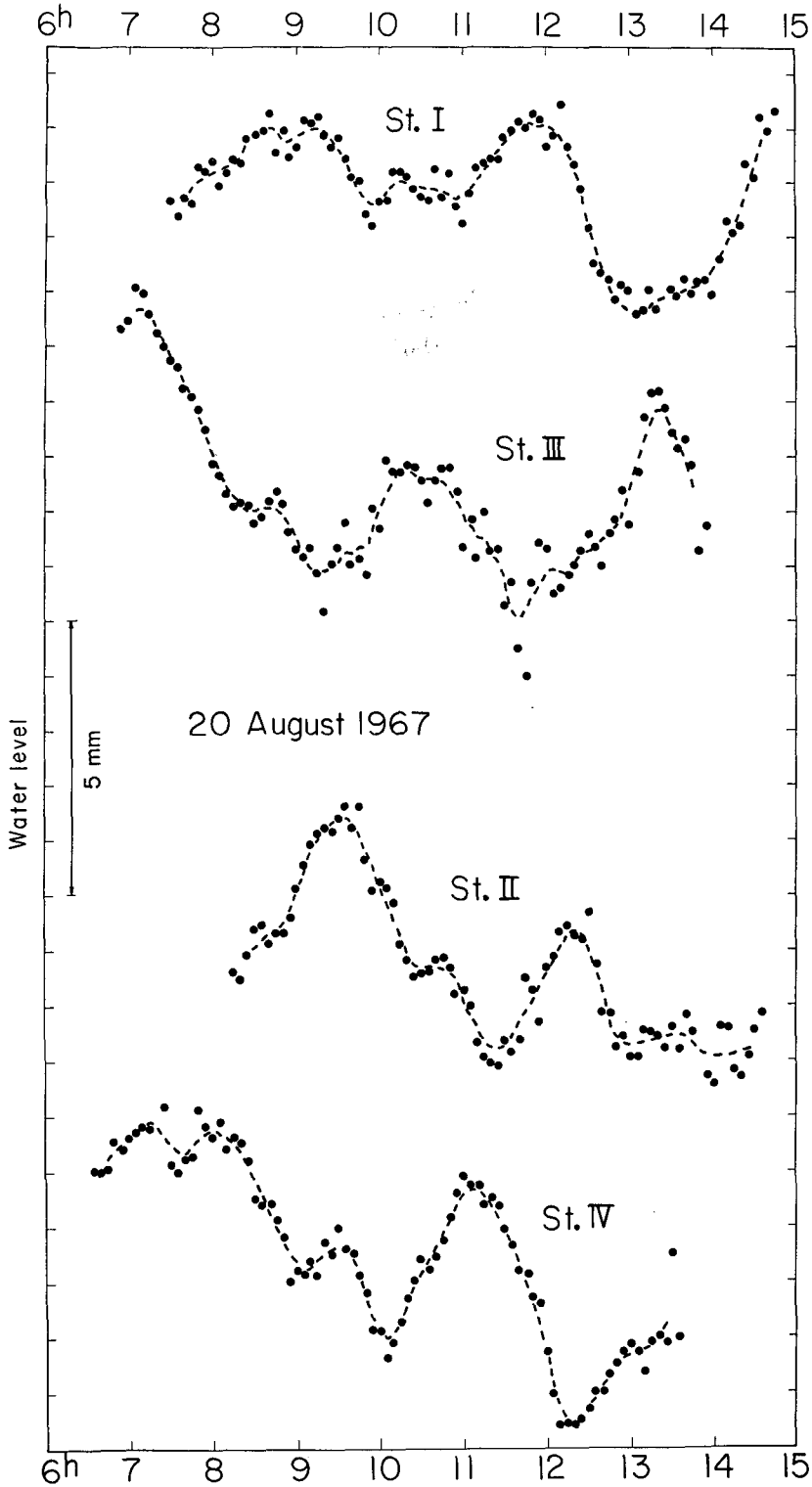


第2図 8月18日における4地点での水位変化, 点線は20分毎の移動平均
 Fig. 2. Changes of water level at the four gaging points, 18 August. The dotted lines show the moving average (20 minutes interval).



第3図 8月19日における4地点での水位変化, 点線は20分毎の移動平均

Fig. 3. Changes of water level at the four gaging points, 19 August. The dotted lines show the moving average (20 minutes interval).



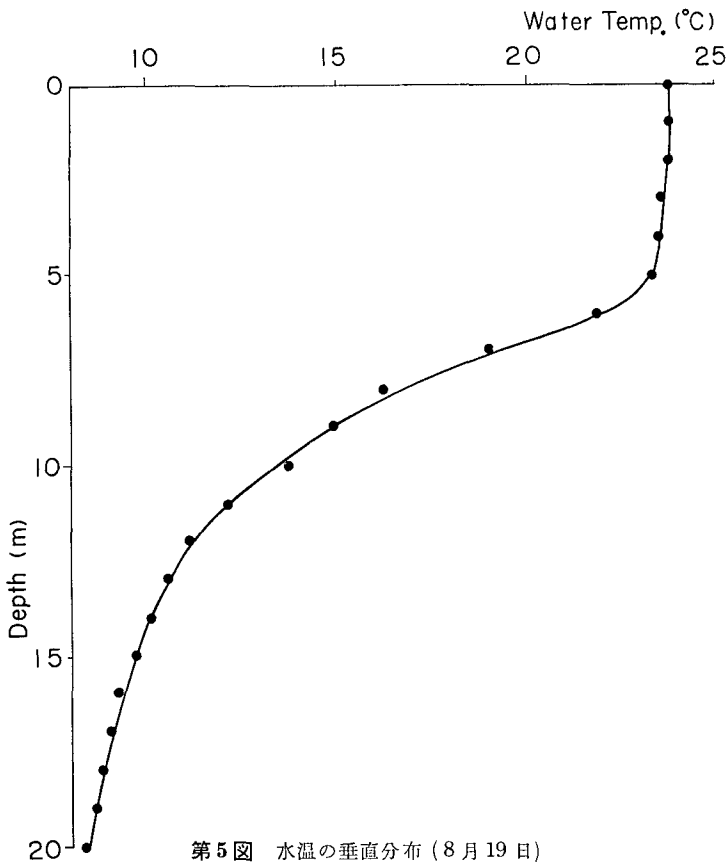
第4図 8月20日における4地点での水位変化, 点線は20分毎の移動平均
 Fig. 4. Changes of water level at the four gaging points, 20 August. The dotted lines show the moving average (20 minutes interval).

図で、水位変化の方向は、St. I と St. II に対して St. III と St. IV とはちょうど逆になり、ほぼ南北線を nodal-line とする湖面振動が起こっていると考えられる。更に、こまかにみれば、St. I と St. III および St. II と St. IV とは、それぞれ変化の方向が逆で、山谷の時刻はほぼ一致する。これから考えて、St. I と St. III および St. II と St. IV とがそれぞれ nodal-line に対して等距離の位置にあるように、nodal-line が南北線からやや傾いていることが予想される。

なお、昭和40年8月の St. I と St. II での水位観測の結果からみると、今回とは反対に、nodal-line は東西の線になる。湖が円形で湖盆も椀状であるためか、湖固有の nodal-line の方向がないのかもしれない。観測中の卓越風向は南西の風であった。

IV. 湖水温の垂直分布

調査期間の8月19日に湖心で、サーミスター温度計によって20 m までの水温の垂直分布を求め、第1表および第5図に示した。水温躍層は8 m 深にみられる。なお、1カ月後の9月15日に再び湖心でバチサーモグラフによって150 m まで测温したが、20 m 深の水温は8.1°C

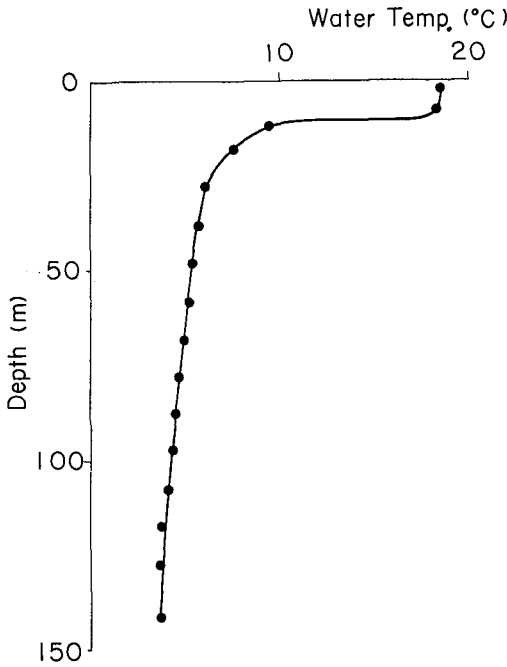


第5図 水温の垂直分布 (8月19日)
Fig. 5. Vertical distribution of the water temperature. (19 August)

第1表 水温の測定値
(8月19日)

Table 1. Observed values of the water temperature. (19 August)

Depth (m)	Water temp. (°C)
0	23.7
1	23.7
2	23.7
3	23.5
4	23.4
5	23.3
6	21.8
7	19.0
8	16.2
9	14.9
10	13.7
11	12.1
12	11.1
13	10.5
14	10.1
15	9.7
16	9.2
17	9.0
18	8.8
19	8.6
20	8.3



第6図 水温の垂直分布 (9月15日)
 Fig. 6. Vertical distribution of the water temperature. (15 September)

第2表 水温の測定値
 (9月15日)
 Table 2. Observed values of the water temperature.
 (15 September)

Depth (m)	Water temp. (°C)
0	18.8
5	18.7
10	16.1
15	11.6
20	8.1
25	6.6
30	6.3
40	6.1
50	5.9
60	5.6
70	5.3
80	4.9
90	4.7
100	4.4
110	4.2
120	4.1
130	3.9
140	3.8
150	3.8

で、8月の測定の水温 20 m 深の水温 8.3°C とほぼ等しく、20 m 以深の水温はほとんど変化がないと考えてよい。140 m および 150 m 深の水温は 3.8°C であり、150 m 深の水温は転倒温度計によっても 3.8°C を確認した。

最大密度になる水温は圧力によって異なり、100 m 深で 3.82°C、200 m 深で 3.71°C であり、140 m、150 m 深での水温 3.8°C はこの深さでの最大密度の水温である。9月15日の水温の測定値は第2表および第6図に示した。

水位測定時の 8 m 躍層の上下水層の平均水温は、8月19日には 20 m 以深で水温の測定を行っていないので、1ヵ月後の水温の垂直分布からみて、20 m 以深では変化が少なくとし、30 m からの水温は9月15日の測定値を使って求めた。

このようにして求めた躍層の上層 (0 m~8 m) の平均水温は 22.3°C で、躍層から平均水深までの下層 (8 m~105 m) の平均水温は 6.2°C であり、これに対応する水の密度はそれぞれ 0.99773 および 0.99996 である。然し密度は圧力によっても変化し、湖沼学的な精度では、深さに伴う密度の増加は $0.0011/250 \text{ m}^5$ の直線的増加と考えてよい。従って下層の平均密度は、水圧を下層の平均水深 50 m に対して考慮すれば、1.0002 となる。

このような顕著な水温躍層があるとき、躍層で内部静振が起こることは、躍層付近の水

5) G. E. HUTCHINSON; A Treatise on Limnology, I (1957), 206.

温が周期変化するという観測事実によって確められている。湖水面の長周期振動が内部静振に関係があるのではないかとすることが予想される。

V. 内部静振の理論と内部静振に誘起される表面振動

水温躍層を境として、密度の異なる二層があるとき、境界層で起こる内部静振の理論⁶⁾は既によく知られている。

第7図に模式的に示したごとく、湖が矩形で等深であるとし、上下水層の密度をそれぞれ ρ , ρ' 、湖水表面および境界層の変動を ζ および ζ' であらわし、水平流速を上層で u 、下層で u' 、層の厚さを h , h' とし、湖の長さ方向に x をとると、

連続の式は、上層、下層でそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} (\zeta - \zeta') &= 0 \\ h' \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial \zeta'}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

運動の式は、上下層で、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial u'}{\partial t} &= -g \frac{\rho}{\rho'} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \left(1 - \frac{\rho}{\rho'}\right) \frac{\partial \zeta'}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。

(1) および (2) 式を基本式として、湖岸の条件 $x=0$, $x=L$ で $u=0$ と置いて解くと、表面における静振の周期 T は単節で、

$$T = \frac{2L}{\{g(h+h')\}^{1/2}} \quad (3)$$

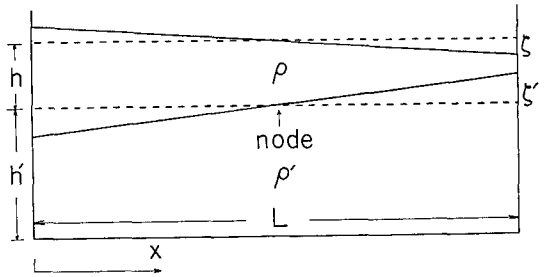
となり、 $h+h'$ は湖の平均水深で、一層の場合の表面静振の周期の式と等しい。

境界層での内部静振の周期は、

$$T = 2L \left\{ \frac{\rho'}{\rho' - \rho} \frac{1}{g} \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{h'} \right) \right\}^{1/2} \quad (4)$$

上層、下層の流量は、

$$uh = -u'h' \quad (5)$$



第7図 内部静振の模式図

Fig. 7. Schematic representation of the internal seiche.

6) J. PROUDMAN; Dynamical Oceanography (1953), 333.

となる。

(3)式から表面静振の周期を湖の直径を L とし, $L=2.4$ km, $g=980$ cm/sec², 湖の平均水深 $h+h'=105$ m で計算すると, 単節の場合の周期は 150 sec となり, このような短周期の湖面振動は水位測定用円筒内では damping され, 平均的な水位を示す。

今回の調査時には, 水温躍層の深さは 8 m で, この躍層を境にして, 上層の平均密度は $\rho=0.9977$ g/cm³, 下層では $\rho'=1.0002$ g/cm³ で, $h=8$ m, $h'=97$ m である。

倶多楽湖は円形の湖であるが直径を L とし, (4)式から躍層で起る内部静振の周期を計算すると, 3時間8分となり, 前記の水位変化の周期3時間10分と非常によく一致する。

然し, (5)式によれば, 内部静振で引き起される流量は, 上層と下層で方向が逆で, 値が等しい。従って, nodal-line を境にして一方に水の堆積が起ることはなく, 短周期の表面静振による湖面振動を別にすれば, 湖の表面で内部静振によって振動は起こらないはずである。

然し, 湖面で内部静振の周期と一致した振動が観測されている事実は次のように説明することができる。

内部静振が起ったとき, 境界面では, nodal-line を境にして一方で下層の ρ' の水が上り, 他方では上層の ρ の水が下る。その結果, 上層の水は, 全層の静水圧的釣合を保つために, 水層の厚さが変化するはずである。

その関係は,

$$\zeta = -\frac{\rho' - \rho}{\rho} \zeta' \quad (6)$$

となり, 躍層の上下変化と方向が逆で, しかも, 観測時の密度差では 1/399 の変化が表面で起る。従って水位観測で確かめられた内部静振の周期と一致する湖面振動は, 二層の境界面の上下に対応し静水圧的釣合をたもつために誘起されたものである。

VI. む す び

内部静振と周期が等しい振動が湖水位に起ることがわかった。躍層が発達しているとき, 湖の大きさによって, 長周期の水位振動が起るので, 湖の精密な水位変化 (1/10 mm) を求める必要のある調査では, 精密自記水位計を用いるなどして長期記録を得るか, 読取り水位計の設置ヶ所の選定に充分注意しなければ, 思わぬ誤差を生じる恐れがある。

おわりに, 御助言をいただいた福富教授に厚く感謝いたします。なお, この研究費用は昭和42年度文部省科学研究費(各個研究)によった。

2. Lake Level Oscillation of Long Period at the Kuttara

By Kinshiro NAKAO, Hideo MIYAKE, Sakae ÔTSUKI,
Shigeyoshi KODOMARI, Kazuo OTOMO and
Masayori KAWAMURA

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

The purpose of this study is to investigate the oscillation of long period which was suggested in the recent studies of the water balance.

With the interval of five minutes, the water level of the lake is measured with an accuracy of 1/30 mm by the four gages which were located on the positions (St. I, St. II, St. III, St. IV) quartered shore line of the lake.

The water in the well measured the lake level, flows out or in to the lake through a fine vinyl pipe (length 1 m, diameter 0.5 cm) to damp the lake level oscillated with short period.

The oscillation in the lake level have distinctly 3.2 hours in the period and the water level at St. I or St. III move oppositely for that of St. II or St. IV.

During the period of investigation, the position of thermocline is observed in the depth of 8 m.

In the case of free uninodal oscillation of a rectangular basin of length L , the period (T) of the internal seiche is shown by the following equation,

$$T = 2L \left\{ \frac{\rho'}{\rho' - \rho} \frac{1}{g} \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{h'} \right) \right\}^{1/2}$$

For the Kuttara $L=2.4$ km, and 19 August 1967, the following measurements were made :

the depth of upper layer $h=8$ m, $h'=97$ m in lower layer,

the mean water density in upper layer $\rho=0.9977$ g/cm³,

$\rho'=1.0002$ g/cm³ in lower layer,

$g=980$ cm/sec².

The period of the internal seiche is calculated by the above numerical values, its values is 3.2 hour which closely agree with that of oscillation in the lake level.

From the theory of the internal seiche, it is shown that the flow rate of the currents is equal magnitude in the two layers, flow oppositely in direction.

Considering on the basis of above fact, the oscillation in the lake level never occurs by the internal seiche.

The agreement between the period of the oscillation on the lake level and the internal seiche, is explained by the phenomenon that changes water depth in upper layer to keep the hydraulic balance as the thermocline moves.

It is shown by following the relation, as the movement of lake surface or thermocline denote respectively ζ or ζ' ,

$$\zeta = - \frac{\rho' - \rho}{\rho} \zeta'$$

It is confirmed that the period of surface oscillation agree with that of internal seiche and the surface oscillation changes oppositely on the thermocline.