

9. 湖の氷に関する測定

地震研究所 岸上冬彦

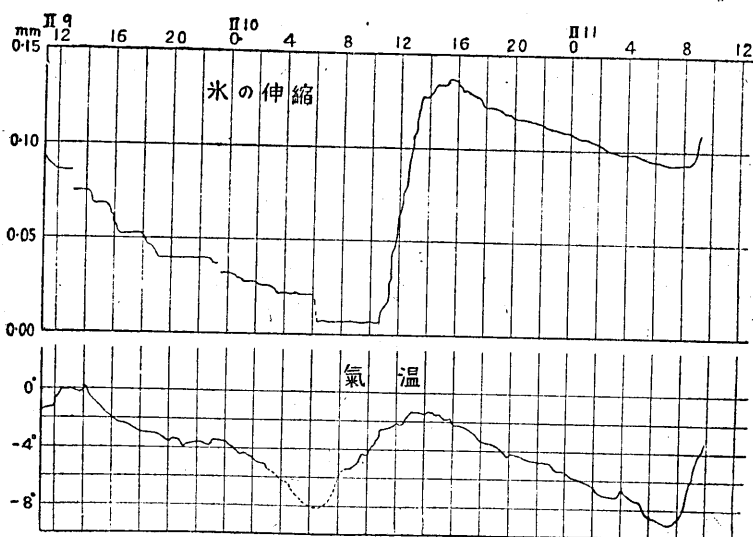
(昭和17年3月19日發表——昭和17年12月20日受理)

昭和15年1月から2月にかけて諏訪湖において色々の研究が行はれ、筆者もその一部を受持つて、氷の中を傳はる彈性波の實驗と、氷の上に微動計を以て觀測とを行ひ報告をしたものがある¹⁾。次の昭和16年は研究を續けやうと器械類は送つたが、諏訪湖が凍らず準備は空しく、荷物はそのまま送り返へされた。昭和17年には1月27日に湖の全面結氷し、六斗川の川口から下諏訪の四王に向けたものと、高濱灣の東にある富部の尾掛松の方に向けたものと二つの大きな氷の割目ができた。この割目が諏訪湖では著しく大きく、形も美しく、これをこの地方では「御神渡」と稱へ、昔から湖上を神の通られた跡であるといふことはよく知られてゐる。然るに翌28日に氣温が昇り、29日の夜明には $+8^{\circ}$ になつて雨が降りその上風が強く、湖の氷は小さく裂かれてしまつた。2月1日には湖の中央に氷が無くなり、2日には湖の西方にあたる岡谷に氷の塊が流れて行つて東の方では氷は全く見られなくなつた。其の後2月7日に西風が強く吹き岡谷近くにあつた氷が東に流され、氣温も下つて2月8日には諏訪市側の湖面が凍つた。この頃筆者はこの年も氷に関する研究はできないと思ひ、豫め送つておいた器械類の低温における性能の試験と、その一部の荷造をとき後で述べる群馬縣の榛名湖の氷の上で測定を行ふ爲荷造をやりなほしに諏訪に行つた。幸ひこの時湖の一部が凍つたので、氷の温度による膨脹收縮を測る装置を取付け短い時日であつたが觀測した。この時の氷は2月11日觀測を止めるまでははつてゐたが、其の時まで朝夕の氣温の低い間は氷上に人が歩行することができたのは、この地方としては比較的稀なことであるといふことであつた。併し日中氣温の高いときは氷の厚さは10cm程あつても、中に無数の泡があつて歩くと足の部分が抜け落ちる恐れがあるといふやうな状態であつた。

氷の温度による伸縮の測定

伸縮を測るには温度によつて伸縮をしない標準になるものがなければならぬ。物質の性質の表、例へば理科年表の中の物理化學部等を見ると種々の物質の線膨脹係數がのせてある。その中こゝに必要なものを記せば、

1) 岸上冬彦 地震 12 (1940), 156~165.



第2圖 諏訪湖における氷の伸縮 (1942. II. 9~11)

い間をとつて氷の線膨脹係数を求めれば、 0.5×10^{-4} となり前に表で示した値と殆ど一致した。念の爲に述べるが、この値が實驗室で知られたものと一致したことは偶然のことであるかも知れない。將來更に詳しく調べなければならないと考へられる。氷の伸縮が気温變化より約2時間遅れることについても短い観測であるから確かな値は得られないが、得られた結果になるべく近い簡単な場合について考へて見る。

半無限に擴がつた氷と假定し、表面に 10°C の變化があるとして氷の中 10 cm の所の溫度變化の遅れを求めて見る。熱傳導度その他の値は實驗室で得られた値を借りると、遅れは2時間となりその溫度變化は 5.6° となつて、遅れの時間は今回の測定結果と大約一致する。併し實際には氷は半無限ではなく下には水がある等、境界條件は違ふが、其等について十分な測定がないので、こゝでは唯拵外れたの値ではないと考へるに止めておく。

湖の氷の線膨脹係数が今まで知られてゐた値に近いので、假にこゝに得られた値を採つて御神渡の現象について考へてみる。それには諏訪湖の場合は筆者は未だ十分に觀察してゐないので、昭和17年2月12日に見た榛名湖の氷について見た現象が諏訪湖の御神渡と同様なものと考へ、少くも諏訪湖の場合の参考になるものとして論ずる次第である。

榛名湖にも御神渡の見られることは田中阿歌磨氏も書かれてゐる²⁾が、昭和17年に筆者の見た時土地の人々に聞くと皆初めてだといつてゐた。これは氷の岸に押し上

2) 田中阿歌磨 諏訪湖の研究 689, 東京 大正7年。

げられるものが御神渡は似てゐるので、そのやうなものを田中氏は書かれたやうである。筆者の見たものは榛名湖の東にある榛名富士の山頂から南西にあたる岬近くの清水の湧いてゐるところから割れてゐた。そこは何時も氷がはらないといふ。1月10日に湖一面に氷がはり、そこから約 $N40^{\circ}\sim 50^{\circ}W$ に向けて氷の割目は進んで行つたといふ。西の端には又清水の湧く所があつて其の附近は氷は薄く、岸に沿つて廣い所で岸から4mの間隔で、長さ300m程の割目があり、東から來た大きい割目はこれに垂直に交はつて終つてゐた。2月12日に筆者の見た時東の端の割目は見えなくなつてゐたが、湖の中央部で氷が南北から押し上げられた御神渡に似た形となり、その立ち上つた氷の高さはこの中央部附近が最も高く最高70cm、氷の厚さ5cmであつた。その西は次第に低くなり、終の部分は割目が白く跡を見せてゐるのみであつた。土地の人にはこの現象を注意して見てゐた人はなく十分なことはわからなかつたが、1月10日結氷しその日は風が強く夜の中に割目ができてゐたといふ。

この成因を考へるに、結氷した夜風が強かつたさうで、土地の人々は何時も風が吹くと氷は割れるといつてゐた。この頃この地方では風の強い時は氣温が低く、水の蒸發による冷却も考へられる。氷の厚さ x を

$$x + \frac{x^2}{2} = -\frac{\tau K t}{LS}$$

の式³⁾で5cmの厚さに凍る時間を求めてみる。 x は氷の厚さ(cm)、 τ は時間、 t は氣温、 K は氷の熱傳導度(0.0057 cal/cm² sec per °C/cm) L は潜熱(80 cal/g)、 S 氷の密度(0.9166 g/cm³)である。氣温を諏訪湖の場合を参考にして $t = -10$ とし、 $x = 5$ とし、 τ を求めると $\tau = 6.3$ 時となる。それ故夜の中に5cmの厚さになることは考へ得る。夜が明けると共に急に 10° 氣温が上つたものと假定する。榛名湖の長徑は約1400mmで、線膨脹係数は諏訪湖で得た結果 0.5×10^{-4} を用ひれば、氷の長さは70cm増すこととなる。すると氷の板が高さ約70cmで $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ の傾きで立つには、湖の長徑の兩端を固定して約30cm伸びれば説明がつく。夜になると又收縮するがこの場合温度の下るのは前の諏訪湖の場合で知られたやうに徐々に下り、それによる氷の熱應力には氷には應力の恢復作用がある⁴⁾ から、この形は残ると考へられる。この割目が湖のほど短徑の方向に生じたのは岸で氷の板を固定した場合の應力による挫屈としても考へなければならぬと思ふが、それにしても兩端に清水の出る所のあるといふ境界條件によつて夜間冷える爲に氷の收縮によるか、或ひは夜明の膨脹による

3) N. E. DORSEY, *Properties of Ordinary Water Substance*, 409, New York, 1940.

4) 前掲 3) 443.

か何れにしてもここから割目がはいると考へた方が合理的でないかと考へる。諏訪湖の場合も同様に考へられるか否かは未だわからないが、御神渡の一端が凍らない川口である場合が多いのも弱點から割目が生ずるといふ考へを支持すると思はれる。併しこの現象に關する物理的の觀測が少いから決定的な説明は後日にまつこととする。

氷中の爆發によつて起された彈性波の觀測

昭和 15 年 1 月末から 2 月にかけて諏訪湖に於て彈性波の實驗をしたことは既に書いたものがあるが⁵⁾、その續きが諏訪では結氷が不十分のためにできず、榛名湖で行つたことは前に述べた通りである。

この實驗は氷の物理的性質を知るばかりでなく、彈性波の生成、媒質の状態や境界條件の地殻内を傳はる彈性波の場合より簡單であることから、彈性波其のものの研究に關しても興味のある問題と思はれる。

昭和 15 年の實驗の時に最も苦しんだ點はオシログラフを据えた天幕内は日中暖く水蒸氣が多く電氣の漏洩が起つたことと、地震計の眞空管を用ひた増幅装置を働かす電源についてであつた。溫度の低いために乾電池の放電容量が減じたので、眞空管織條の加熱には蓄電池を用ひて其の缺點を補つたが、陽極電壓には一組の電池で 2 個の増幅器を並列に働かした所、一方の増幅器の陽極電流の變化が他方に影響を及ぼし、互に干涉した。唯格子偏倚電壓は乾電池でも役に立つた。

陽極電壓の干涉を除く方法として乾電池を増幅器毎に別々にすればよいが、低温の爲容量の減るのを防ぐことはむづかしい。この缺點を除く爲には、オシログラフを働かすのに 100 V の交流を用ひるので、それを利用して既に發表したやうに交流電源による増幅装置を製作した⁶⁾。この装置は定電壓放電管 (マツダ VRB 150/60) を陽極電壓回路に挿入した眞空管 57 型及び 56 型を夫々 1 個用ひた低周波抵抗増幅器である。尙電氣の漏洩をふせぐには、絶縁のよいやうに防水被覆電線を用ひる等、其の他十分材料と工作に注意した。

以上の試作をしたが諏訪湖において二年氷がはらず實地に使へないので、遂に榛名湖へ行つて實驗することとした。併し器械の運送が不便であるのと小人数で實驗するので實驗用電線も漸く 150 m の距離まで測定する準備ができた計りであつた。そこで 150 m 以内の近距離で前に述べた増幅装置やオシログラフの使ひ方等について種々研究的の測定をしたに止つた。

5) 前掲 1)

6) 岸上冬彦・矢橋徳太郎、「交流電源による彈性波實驗用増幅器」地震 14 (1942), 144~148.

測定した場所は榛名湖の南西にある村落の東部の湖畔の家から、電燈用晝間線を $N35^{\circ}E$ に 120 m 湖上に出し、其所にオシログラフをおく天幕をはり、そこから $N80^{\circ}E$ に 125 m、反対方向 $S80^{\circ}W$ に 13.5 m までの間に、2 個の波江野式ラヂオ地震計の検震器を適當の個所に据えた。水深は約 10 m で、氷は實驗した時は厚さ 34 cm で堅かつたが、時期が 2 月 26 日から 3 月 2 日といふ次第に暖くなる頃であつたので、氷の上はその前に降つた雪がとけて、日中は雪が表面にあり、下部には雪解の水が約 2 cm あり、更にその下に湖氷があり水があるといふ状態であつた。

記録には諏訪湖の場合と同様で、横河電機製作所の 3 成分電磁型オシログラフを用ひ、その 2 成分で上下動の振動をかゝせ、残りの 1 成分は爆發の合圖を記入するのに使つた。オシログラフの振動子も前回同様 H 型を使用した。これは二本吊で自己周期 0.001 秒、感度は 75×10^{-5} D. C. Amp/mm であつて、前回はこれに制振油が凍ることを恐れて用ひなかつたが、今回は始めの中は振動子の周りに油を入れなくて實驗したが、後になつて油を入れた。そしてこの器械では記録紙の 1 端には、周波數 50 の交流で同期電動機が動き、0.01 秒毎に光の點ははいることも後に掲げた記録の説明として念の爲記しておく。

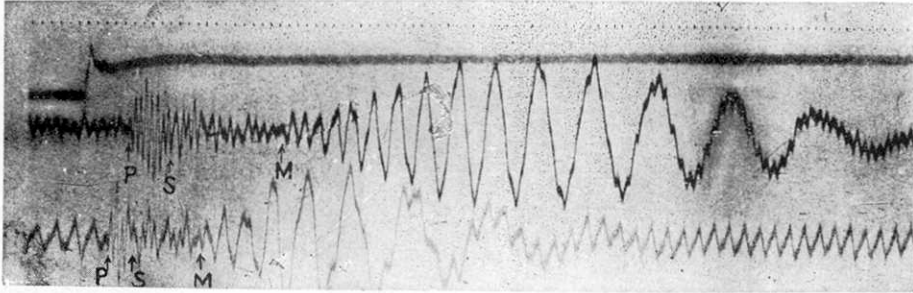
爆發は工業用電氣雷管 6 號を 5 個 1 束に包み、防水の處置を施してから氷の中になるべく細くあけた深さ約 10 cm の孔の底に入れる。その上には水もはいるが雪をつめ、更に雪を 20~30 cm 堆積しそれを雪搔きで叩いて固めた。雷管の電線は 1 個のは不發のときの豫備として取出しておき、3 個のは切り取り、残り 1 個に爆破電流を通じて全部同時に爆發させた。雷管に與へる電流も交流を使ふこととし、10 V の呼鈴用變壓器を用ひ、その變壓器は双形開閉器を通して、オシログラフの自動開閉装置につないだ。申すまでもなく自動開閉装置を適當に調節することによつて、爆發後適當の時間だけオシログラフの記録装置が働くことになる。

爆發時刻は雷管の周りに電線を巻きつけ、合圖用としたオシログラフの振動子につなぎ、更に回路に 1.5 V の乾電池と適當な抵抗とを入れた。すると振動子は爆發前は光の像がずれてゐるが、爆發すると雷管の周りの線が切れて像が動くのである。

尙記録には寫眞フィルムを用ひ、伊香保へ持つて行き現像させ、結果を見て次の實驗の參考にしながら研究を進めた。

主な結果は第 3 圖に示すもので、圖の説明をすれば、一端の點は 0.01 秒毎の合圖で 0.1 秒毎に少し太くなつてゐる。それに近い曲線は爆發と同時に切れた乾電池回路、第 3 は距離 76.2 m、第 4 は 141.75 m における振動記象である。増幅率は遠い方

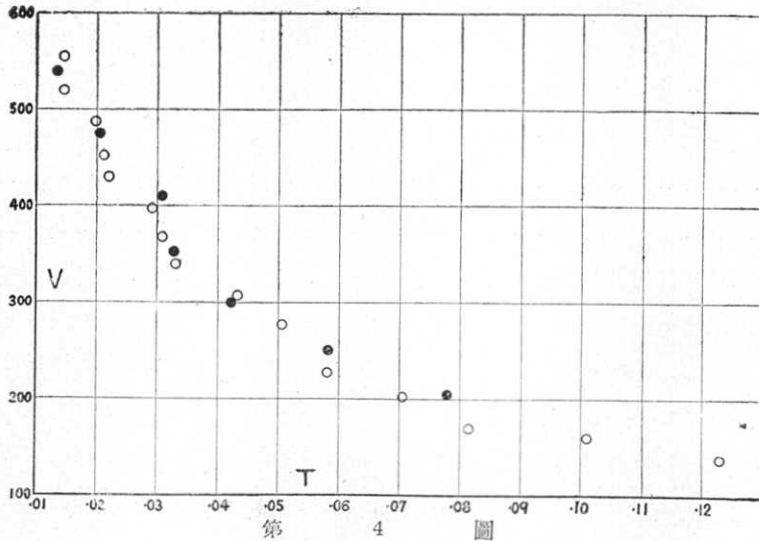
を近い方の3倍にしてある。

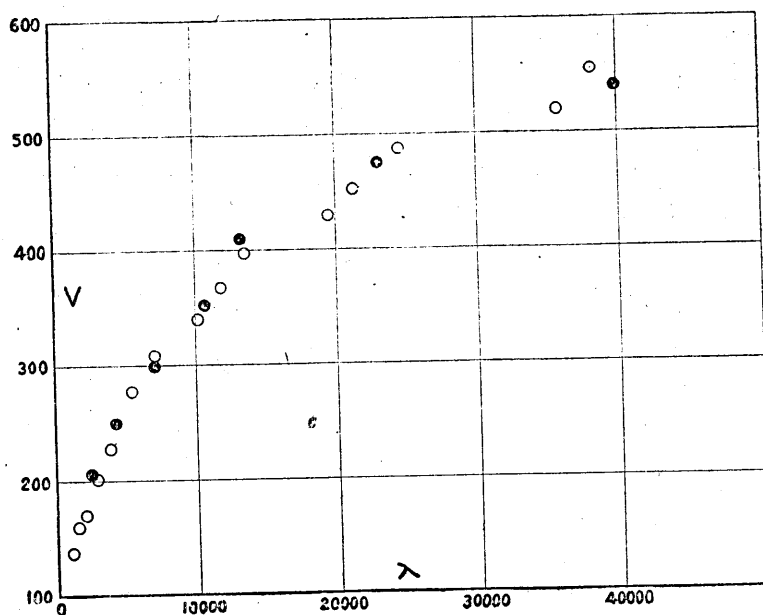


第3圖 樺名湖の水を傳はる弾性波の記象 (原圖の約1/2)

最初に来る波 (P と符号したもの) は縦波と考へられるが、これの傳播速度を求め
るのに2種の方法がある。1つは爆發時刻と地震計までに到着した時刻との差で、爆
發點と地震計との間の距離を割つて速度を求めるのと、他の方法は2個所の地震計間
の距離を2個所の到着時差で割るものである。初め方法は距離は長いが爆發時刻が正
確に示されてゐなければならず、後の方法は距離は短くなるが爆發時刻の問題はなく
なる。即ち誤差については相違があるが、觀測材料が少いので兩方一緒にして平均す
ると速度は 2.82 ± 0.06 km/s となる。そしてこの波の振動周期は約 0.007 秒であつた。
第2の横波 (S と記したもの) の速度は 1.51 ± 0.02 km/s であつて、その周期は 0.009
秒といふ値が得られた。そして縦波と横波との速度の比は 1.87 となる。

第3圖に M と記した波は表面波と思はれるが、波の分散現象が見られる。縦軸に
速度をとり、横軸に周期又は波長をとつたものが第4圖及び第5圖である。圖の中に





第 5 圖

白丸と黒丸とで區別したのは観測した距離が違ふことを示してゐる。

前回諏訪湖に於いては縦波の速度として 3.5 ± 0.1 km/s といふ結果を得、又 Ewing 其他⁷⁾ は同様の測定で縦波 3410 ± 9 m/s, 横波 1849 ± 46 m/s, この比 1.84 といふ値を求めてゐる。そして湖の氷の場合は一般の無限にある媒質を傳はる弾性波とは違ふから水の上にある板の中を傳はるものとして數理から論じて、計算結果とよく一致したといふ。

諏訪湖の測定では縦波の測定が漸くできた程度であり、今回の榛名湖の場合氷の上の水の影響かも知れないが傳播速度が小さいことの説明ができない。又表面波と考へられるといつた波の性質も、特別な分散をしてゐることがわかつたのみで波の性質がわかつてゐないこと等、未だ論議すべきことはあるがそれに十分な資料が集まつてゐない。後日測定を進めてこの問題を研めたいと思ふ。

尙未解決の問題として述べるものであるが、晴れた日中に周期約 0.0014 秒の振動がオシログラフに現はれた。諏訪湖の時にも見られたが、當時は真空管増幅器の故障による電氣振動かと考へたが、今回は色々の點を調べたが結局氷の振動と考へた。振幅についてまで詳細に論ずることはできないが、湖の中央部の方が岸に近い方より大

7) M. EWING, A. P. CRARY and A. M. THORNE, Jr., *Physics* 5 (1934), 165~168, 及び 141~184.

きかつた。氣付いた儘を記しておき將來確めたい。

終りに臨み、この研究は文部省科學研究費による所が多く、尙氷の伸縮測定装置については金谷春男氏の協力により、又榛名湖における測定については同行された矢橋徳太郎、藤代春松、納富武繁の三氏と其の土地の門倉幾太郎氏等の援助を得たことを記して厚く感謝の意を表する次第である。

9. *Studies on Lake-Ice.*

By Fuyuhiko KISHINOUE,

Earthquake Research Institute.

First, the change in length with temperature of ice frozen on Lake Suwa was measured with an apparatus, which consisted of a tube of fused silica and a recording drum. The end of the tube, 1 m long, was fixed to a stand that rested on the ice surface, and the displacement of the other end owing to expansion or contraction of the ice recorded. Comparing the daily change in the length of ice with that of the air temperature recorded simultaneously, the linear expansion coefficient of the lake-ice was found to be $0.51 \cdot 10^{-4}$. Availing ourselves of the data regarding ice and air temperature thus obtained, the mechanism of growth of the ice-ramparts that formed on Lake Haruna in 1942 was discussed.

Next, the velocity of elastic waves caused in lake-ice at Lake Haruna by setting off detonators was recorded with the aid of geophones. The velocities of longitudinal and transverse waves obtained were 2.8 and 1.5 km/s respectively, and dispersion curves of waves of long period which succeeded the foregoing waves were drawn.
