



Title	運動荷重による氷板の変形 II
Author(s)	滝沢, 隆俊; TAKIZAWA, Takatoshi
Citation	低温科学. 物理篇, 37, 69-78
Issue Date	1979-03-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18371
Type	departmental bulletin paper
File Information	37_p69-78.pdf



運動荷重による氷板の変形 II^{*,**}

滝沢 隆 俊

(低温科学研究所)

(昭和53年10月受理)

I. はじめに

水に浮いた氷板の上を荷重が運動した場合には、荷重の運動速度が臨界速度を越えると氷板に波動が発生し、臨界速度以下では静止している時と同様に荷重の囲りに縁が盛り上った大きなくぼみが発生しそれが荷重とともに移動して行くことがわかっている。

氷板に発生する波はこれまでの研究では荷重前方にのみ発生するとされていたが¹⁾、著者の1977年の実験の際に氷板の波動が荷重の後方にも発生することが認められた²⁾。そこで1977年の予備的実験に引き続き氷板の変形を調べる実験を行ったのでその結果について報告する。

II. 実験地点の概況

実験は前回と同じく北海道オホーツク海沿岸のサロマ湖の湖水上において1978年2月3日～7日に行った。実験地点としては、水深の違いにより氷板の変形に差があるか否かを調べるために、岸から約600m沖合いの第1地点と約1,400m沖合いの第2地点の2カ所を選んだ(第1表)。

サロマ湖は塩湖であり湖水の塩分量は通常の海水のものとはほぼ等しい。したがって湖の氷は通常の海水であり冬の終りには約40cmの厚さに達する。海水の結晶構造は、両地点とも上層2～3cmは粒状のゆき氷でありそれ以深は海水特有のモザイク状の構造であった。

両地点からコアドリルにより海

氷の垂直方向の試料を3本ずつ取り出し一軸圧縮試験により氷のヤング率を求めた。第1表に示したヤング率は3個の試料の平均値である。また同時に氷の小試料を切り出し、銀滴定法によって塩素量を求めその値を1.80655倍して海水の塩分量とした(第1表)。

第1地点に曲管温度計を埋設し実験実施時の氷温と水温を適宜読み取った。期間中、氷の表面から2cmの深さの氷温は $-2.3\sim-4.0^{\circ}\text{C}$ 、10cmの氷温は $-2.5\sim-3.2^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。

第1表 実験地点の状況

		第1地点	第2地点
氷	厚	17 cm	15 cm
氷	深	6.2 m	12 m
積	雪	6～8 cm	6 cm
氷のヤング率		$2.5 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$	$2.8 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$
氷の塩分量		6.0%	5.8%

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1944号

** 北海道大学低温科学研究所 流水研究施設研究報告 第64号

水温は一定で -1.8°C であった。また同時に気温も棒状温度計で読み取ったが、 $+0.5\sim-9.5^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。

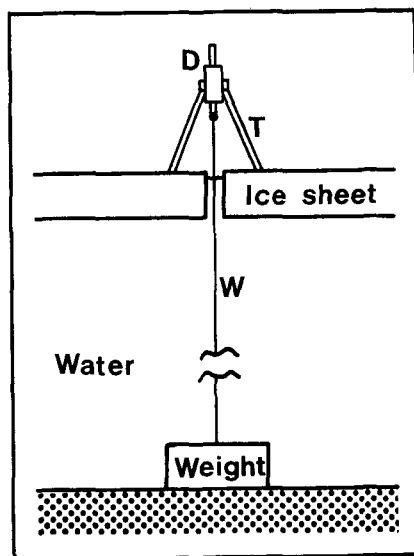
III. 実験方法

氷上に長さ 400 m の走行路 (幅 4 m) を設け、運動荷重としてスノーモービル (ヤマハ S-300 M, 長さ 2.43 m, 幅 0.79 m, 重量 165 kg) を用いた。走行路の前後は助走路で、走行路には 100 m 毎に荷重の進行方向に直角に長さ約 4 m の細い鋼線を高さ 50 cm に張りその一端をナイフの刃と滑車を介してマイクロスイッチに結んだ。荷重がこの点を通るとナイフの刃により鋼線が切れ、マイクロスイッチを介して信号が伝送される。

氷板の変位の検出は走行路の中央において第 1 図に示した様な装置で行った。氷板に穴をあけ湖底に沈めた錘りを不動点とし、これより直径 0.25 mm の鋼線を引き他端を撓動形の変位計 (三栄測器 9E08-D3) に結びつけた。変位計からの出力は歪増幅器を通じて荷重が 100 m 毎の線を通じた信号とともにペン書き記録計に記録した。

測定にあたっては、助走路で設定速度まで加速しその速度を保って走行路を走り抜けた。運転者は定速で走ることに心がけたが、実際には設定速度を正確に保つのは困難であった。そのため、荷重の運動速度は変位計のある点の前後各 100 m, 計 200 m を走するのに要した時間を記録紙上の信号から読み取って求めた。

第 1 地点での測定は 0, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 km/h の 8 段階の設定速度で 38 回行った。荷重の大きさは運転者を合わせて 230 kg であったが、一部の測定では更に錘りを乗せて 355 kg で行った。氷板の変位の検出は装置の制約上荷重直下ではなく両地点とも側方へ 1 m 離れた所で行ったが、この距離の影響を調べるために第 1 地点において 1.5 m, 2 m, 3 m 離れた所での測定も行った。第 2 地点での測定は 24 回行い、設定速度は $0\sim 40$ km/h の 7 段階、荷重は 230 kg であった。

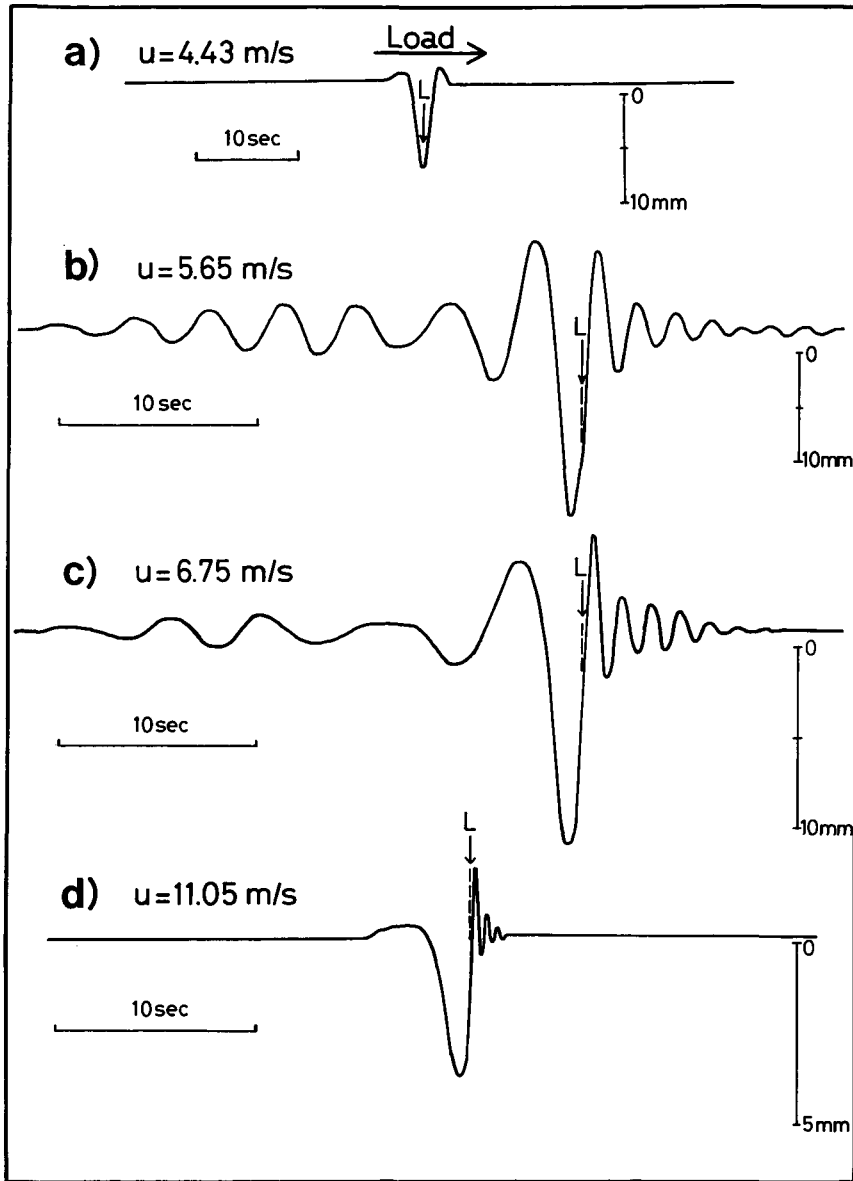


第 1 図 氷板の変位の検出装置
D: 変位計, T: 三脚, W: 鋼線

IV. 実験結果

測定された氷板の変位の記録の一部を第 2 図に示した。速度が 4.43 m/sec の場合は両縁が盛り上ったくぼみが生ずるだけであるが、5.65 m/sec と 6.75 m/sec の場合には荷重の前方に短波長の波、後方に長波長の波が生ずる。速度が更に大きい 11.05 m/sec の場合では後方の波は消え前方の波だけが残った。ここで言う波とは静止している時でも見られる荷重の囲りに生ずる沈下量が最大で両縁が盛り上ったくぼみ以外の氷板の振動を指す。

第 3 図には氷板に発生した波の波長と速度の関係を示した。但し、1 波長以上の波が記録

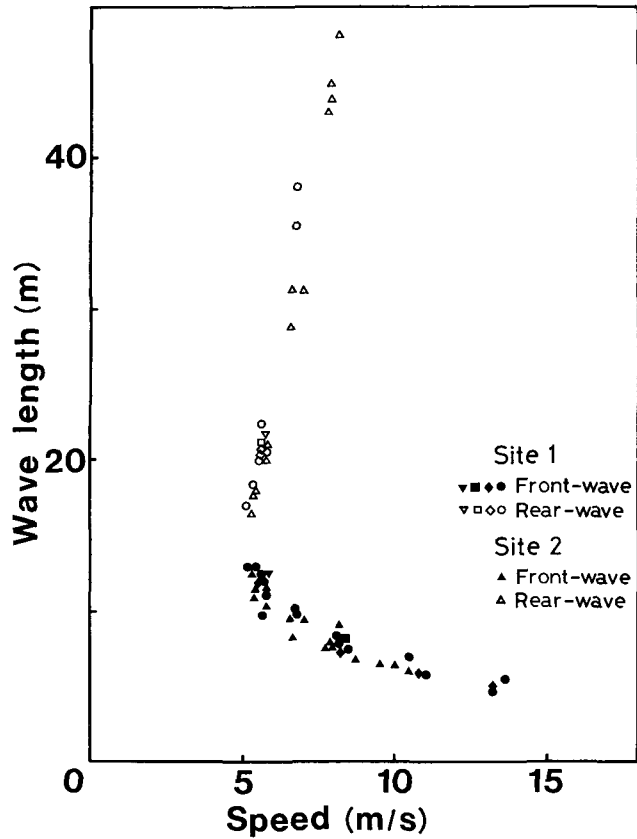


第2図 測定された氷板の変位の例

荷重 230 kg, 変位計と荷重通過点の距離は 1 m,
 u は速度, L は荷重の位置

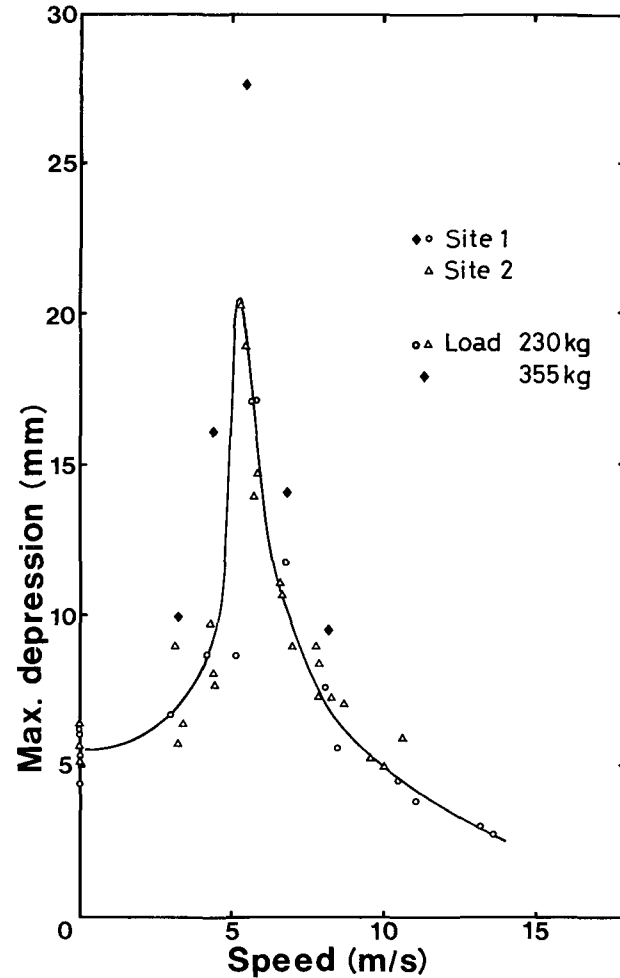
されたものだけを採用した。この図から明らかな様に荷重通過点と変位計の距離の違いによる有意な差は認められない。但し、距離が大きくなるにしたがって氷板の沈下量は減少する。水深が異なる第1地点と第2地点の波長にも有意な差はない。また第1地点での荷重が 230 kg と 355 kg の場合では波長に差がなかったので区別せずに示してある。

第4図は氷板の最大沈下量と速さの関係を示したものである。但し、沈下量は荷重の直下



第3図 氷板に発生した波の波長と荷重の運動速度の関係

第1地点の▽, □, ◇, ○印は変位計と荷重通過点の距離を示し、それぞれ3 m, 2 m, 1.5 m, 1 mである。第2地点の距離は1 mである



第4図 氷板の最大沈下量と荷重の運動速度の関係
最大沈下量の値は荷重直下ではなく1 m 側方のものである

ではなく1 m 側方の値である。静止している時は約6 mm であるが速度が増すにつれて増大し5 m/sec を越えたところで最大で20 mm を越える。さらに速度が増すと減少し10 m/sec 以上では静止時より小さくなる。荷重が355 kg の時は沈下量は約50% 程度大きい。

第5図は最大沈下量を示すくぼみの幅と速さの関係である。最大沈下量とは反対に、速度が5 m/sec を越えたところで最小になっている。ここで言うくぼみの幅とは、第2図に示した様な記録から読み取った最大のくぼみの中立線以下の部分の長さである。

第2図に示した様に氷板の最大沈下は常に運動している荷重の後方に生ずる。第6図はこの遅れを示したものである。測定点のバラツキが大きい、速度が約4 m/sec くらいから遅れが始まり速度が大きくなるほど遅れが大きいことがわかる。

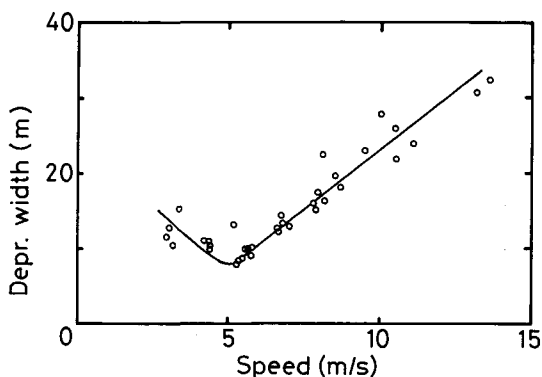
V. 考 察

この実験では氷板の変位の検出装置の制約上、荷重直下の氷の変形の様子は知ることができない。

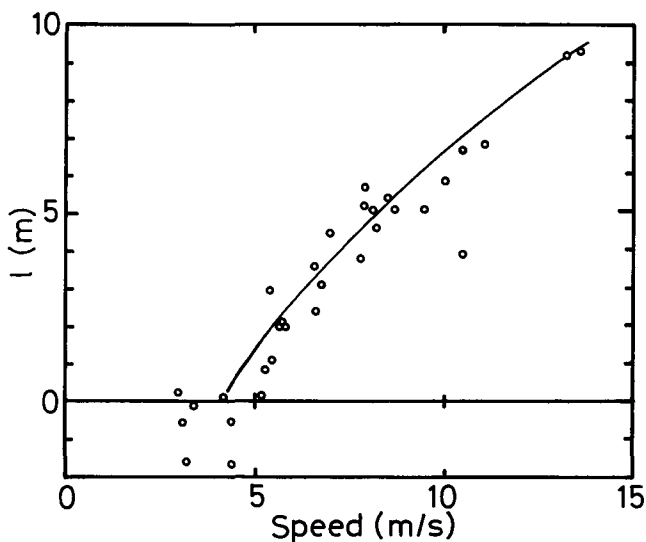
しかし、すでに第3図に示した様に、変位計と荷重通過点の距離を1~3 m 変えた測定では、沈下量にいくらかの違いはあったが、氷板に発生した波の波長には有意な差は認められなかった。したがって、得られた記録は荷重直下の氷板の変形を良く反映していると思なしてよいであろう。

1. 水深の違いの影響

第1地点と第2地点では水深が約2倍違うが、両地点における氷板の変形には差がなかった。Eyre¹⁾によると、 H を水深、 L を(1)式で定義される長さの次元を持つ量(characteristic length)とすると H/L が2以上では氷板の波は H/L に実質的に依存しない。即ち、水深があ



第5図 最大沈下量を示すくぼみの幅 (l) と荷重の運動速度の関係
荷重 230 kg, 変位計と荷重通過点の距離 1 m



第6図 最大沈下点の荷重位置からの遅れと荷重の運動速度の関係
荷重 230 kg, 変位計と荷重通過点の距離 1 m

る程度以上大きくなれば水深の違いは氷板の波に影響しない。

$$L = \left(\frac{Eh^3}{12\rho_w g(1-\sigma^2)} \right)^{1/4} \quad (1)$$

ここで E は氷のヤング率, h は氷厚, ρ_w は水の密度, σ はポアソン比である。これを今回の実験に当てはめてみると, $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$, $g = 980 \text{ cm/sec}^2$, $\sigma = 1/3$ とし E, h, H は第1表の値を用いると第1地点では $L = 1.9 \text{ m}$, $H/L = 3.3$, 第2地点では $L = 1.7 \text{ m}$, $H/L = 7.1$ となる。したがって, 両地点の測定結果に差がなかった事は Eyre の結果と一致している。

2. 氷板に発生する波と荷重の運動速度の関係

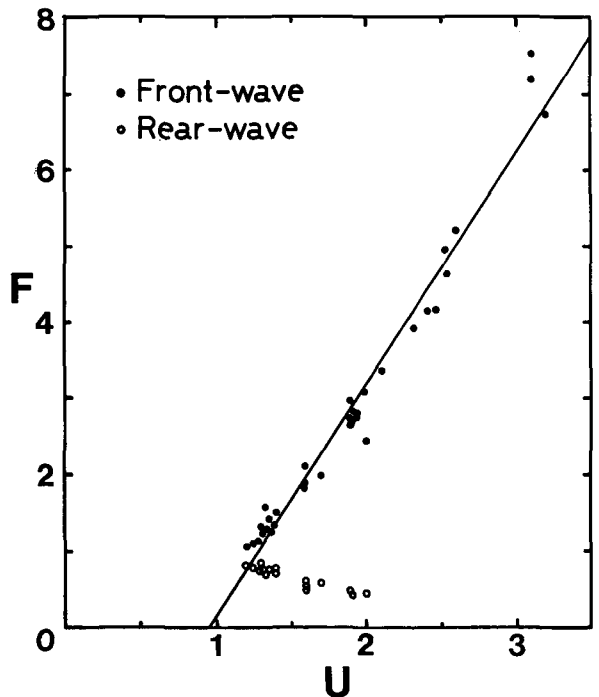
すでに第2図に示した様に荷重の運動速度が 5 m/sec を越えると氷板に波が発生する。氷板を伝播する波の速度と荷重の運動速度が等しいことは Eyre¹⁾ により確かめられている。Eyre の結果では波は荷重前方にのみ発生するとされたが, 今回の実験では明らかに荷重後方にも波が発生し, しかもその波長は前方の波のそれよりも長い(第2図 (b), (c))。しかし, 速度が 9 m/sec 以上では第2図 (d) の様に後方の波は消え, 前方の波だけが残る。また, 記録された波の数は臨界速度付近では前後の波とも数波長あるが速度が大きくなるにつれて少なくなり, 後の波は約 9 m/sec で消え前の波も約 14 m/sec で消える。今回の実験の最高速度 14.24 m/sec での測定では, 荷重前方には荷重の囲りのくぼみの前縁に当る山とその直前の谷しか見られなかった。したがってこれらの事を合わせて考えると次の様に言えるであろう。荷重の運動速度が臨界速度を越えると氷板には荷重と同じ速度を持った2つの波が発生する。1つは荷重前方の波長が比較的短い波であり, もう一つは後方の波長の比較的長い波である。速度が増すともない前方の波の波長はさらに短くなり後方の波の波長はさらに長くなる。観測される波の数は速度が大きくなるとともに少なくなり, まず後方の波が消え続いて前方の波も消える。最終的には臨界速度以下の様な荷重の周囲の両縁が盛り上ったくぼみだけが残る。

第7図には(2)式により無次元化された氷板の波の振動数と速度の関係を示した。

$$U = \frac{u}{\sqrt{gL}}, \quad F = 2\pi f \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2)$$

ここで u は速度 (m/sec), f は振動数 (Hz) で U と F はそれぞれ無次元化された速度と振動数である。

第7図から明らかな様に荷重前方



第7図 無次元化された振動数 (F) と速度 (U) の関係

の波の振動数は直線で近似できる。図中の直線は最小二乗法で引いたもので相関係数 0.98 で次式で表わされる。

$$F = 3.04U - 2.89 \quad (3)$$

但し、この式は臨界速度以上で意味を持つ。

Eyre¹⁾によれば

$$F = 2.73U - 2.45 \quad (4)$$

である。

(3) 式を (2) 式を用いて書き換えると (5) 式を得る。

$$f = 0.483 \frac{u}{L} - \frac{1.44}{\sqrt{L}} \quad (5)$$

3. 臨 界 速 度

臨界速度の時に、氷板の変形に著しい変化が起るわけではないので臨界速度を正確に決定するのは困難である。間接的な方法として第 7 図から無次元の臨界速度 U_c を求めると $U_c = 1.25$ を得る。(2) 式により書き換えると臨界速度 u_c は

$$u_c = 1.25\sqrt{gL} \quad (6)$$

となる。

Eyre¹⁾によれば

$$u_c = 1.31\sqrt{gL} \quad (7)$$

である。

VI. ま と め

1978 年 2 月北海道サロマ湖の湖水上で運動荷重による氷板の変形に関する実験を行った。荷重としてはスノーモービルを用い、水深の異なる 2 つの地点で合計 62 回の測定を行った。その結果は、荷重後方に発生する波を除いて Eyre の結果とほぼ一致を示した。結果をまとめると次の様である。

(1) 臨界速度以下では氷板には荷重の囲りに両縁が盛り上ったくぼみが生じて、それがそのまま荷重とともに移動する。

(2) 荷重の運動速度が臨界速度を越えると氷板には 2 つの波が発生する。1 つは荷重前方の比較的短い波長の波であり、もう 1 つは荷重後方の比較的長い波長の波である。速度が増加すると荷重前方の波の波長はさらに短くなり、後方の波の波長はさらに長くなる。

(3) 観測された波の数は、臨界速度付近では数波長あるが速度が増加するにつれて少なくなり、後方の波は約 9 m/sec で消え前方の波も約 14 m/sec で消える。したがって、速度が十分に大きい時には臨界速度以下の時と同様に両縁が盛り上ったくぼみが生ずるだけである。

(4) 氷板の最大沈下量は臨界速度で最大で静止している時の 3 倍以上である。また、速度が臨界速度の約 2 倍以上の時には静止している時より最大沈下量は小さい。

(5) 氷板の最大沈下は臨界速度以下の約 4 m/sec の時から運動している荷重の後方で起る様になり、速度の増加とともに遅れも大きくなる。

(6) 最大沈下量を示すくぼみの幅は臨界速度で最小になる。

(7) 荷重の大きさは氷板の最大沈下量と波の振幅に影響するが、波の波長は関係しない。

(8) 水深が 6.2 m と 12 m の地点では氷板の変形に差はなかった。

(9) 無次元化された氷板の波の振動数 F と速度 U の関係から、荷重前方の波の振動数は次式で表わされることがわかった。

$$F = 3.04U - 2.89$$

(10) 臨界速度は F と U の関係を示す第 7 図から読み取り次式を得た。

$$u_c = 1.25\sqrt{gL}$$

(11) 今後の課題としては、最大沈下点の荷重の中心からの遅れの問題や荷重の前後に発生する 2 つの波を統一的に表わせる理論的考察などが残されている。また将来は、荷重の運動速度が変化する場合や荷重の運動方向と直角方向の氷板の変形などを調べるのも必要であろう。

この研究に際して、北大名誉教授の吉田順五博士及び田畑忠司教授をはじめ海洋学部門、流水研究施設の諸兄から多くの御指導、御助言を頂いた。実験に用いた荷重の通過時点を知る装置は流水研究施設の大井正行技官、富士博樹技官、石川正雄技官の設計、製作によるものである。また、氷のヤング率と塩分量は大学院生納口恭明君に測定していただいた。実験に際しては、河村俊行助手、大学院生白沢邦男君、石川正雄技官、大学院生納口恭明君及び鴻野繁和君から多大の御助力を頂いた。これらの方々に対して心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) Eyre, D. 1977 The flexural motions of a floating ice sheet induced by moving vehicles. *J. Glaciol.* **19**, 81, 555-570.
- 2) 滝沢隆俊 1977 運動荷重による氷板の変形 (序報). 低温科学, 物理篇, **35**, 233-240.

Summary

An experiment to study the deflection of a floating ice sheet subjected to a moving load was conducted in February 1978 at lake Saroma in Hokkaido.

This lake is connected to the Sea of Okhotsk, having the lake water salinity of about 31‰. Two test sites with different water depths were chosen for observation of the effect of water depth on ice response. Site 1, 6.2 m deep, and Site 2, 12 m deep, were about 600 and 1400 m off shore respectively. The thickness of ice at Sites 1 and 2 was 17 and 15 cm respectively, the ice being covered with snow of several centimeters in depth. Salinity of ice was 5.8~6.0‰, while ice temperature was $-2.3 \sim -4.0^\circ\text{C}$ during the test. Young's modulus of ice, which was determined by uni-axial compression tests, averaged 2.5×10^9 and 2.8×10^9 dyne/cm² at Sites 1 and 2 respectively.

A test lane of 400 m in length was set up, at the halfway of which a bottom-anchored

deflectometer was installed, as shown in Fig. 1.

A snow-mobile (YAMAHA S-300 M: 2.43 m in length, 0.79 m in width, 165 kg in weight) used as a moving load had the total weight of 230 kg or 355 kg including the weight of a driver and an additional weight.

The number of runs totaled 62, which were made at different vehicle speeds 0, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 km/h. On each run the vehicle was accelerated to the required speed as quickly as possible in the approach lane, and then passed through the test lane with constant speed. The deflectometer was set 1 m off the vehicle track. To examine what effect the distance between the deflectometer and the vehicle track had on an observed pattern of ice deflection, several measurements were made, changing the distance to 1.5, 2 and 3 m.

These results showed that such a change in distance had no significant effect on the wavelength but some effect both on the maximum depression depth and the amplitude of the wave induced in the ice sheet. Therefore, it can be said that the ice deflection pattern measured at the distance of 1 m was practically the same as the pattern immediately beneath the vehicle.

The typical records of ice deflection are shown in Fig. 2.

The results are summarized as follows:

(1) At speeds under the critical speed, the profile of ice deflection is seen in Fig. 2 (a). It is quite similar to that obtained by a static load.

(2) At speeds above the critical speed, two different waves are generated: the first one with a relatively short wavelength seen in front of the vehicle; the second one with a relatively long wavelength seen in the rear of the vehicle (Fig. 2 (b), (c)). As the vehicle speed increases, the wavelength of the front-wave is shortened and that of the rear-wave elongated (Fig. 3).

(3) With a further increase in vehicle speed, the rear-wave disappears (Fig. 2 (d)) and subsequently the front-wave also disappears.

(4) Change in maximum deflection with vehicle speed is shown in Fig. 4. It is obvious from the figure that the maximum depression, which is seen at the critical speed, is more than three times that obtained by a static load. As the speed exceeds the critical speed, the maximum deflection decreases quickly with increasing speed. At the speed of 10 m/sec, the deflection of ice is smaller than the static depression. The variation in the width of depression with vehicle speed is shown in Fig. 5. The maximum depression is observed at the critical speed, at which the minimum width of depression is seen.

(5) The position of maximum deflection starts to lag behind the vehicle at a speed slightly below the critical speed. The lag l increases with increasing vehicle speed (Fig. 6).

(6) The difference of vehicle weight only affects depth of depression and amplitude of wave, having no significant effect on wavelength or frequency.

(7) As is clear from Fig. 7, which shows a relation between non-dimensional frequency F and vehicle speed U , a relation between frequency of front-wave and vehicle speed can be expressed by a straight line. By the method of least squares it is represented by:

$$F = 3.04U - 2.89$$

where a correlation coefficient is 0.98.

(8) It is virtually impossible to identify the exact critical speed because of the absence of any sudden change observed in an ice response at such a speed. The data points in Fig. 7 give an indirect confirmation of the theoretical critical speed, which is defined by:

$$u_c = 1.25\sqrt{gL}$$

where u_c is critical speed, g is acceleration of gravity, and L is characteristic length of ice.

(9) Change in water depth has no significant effect on ice deflection. Based on a theoretical analysis, Eyre¹⁾ has shown that, if the numerical value of H/L is greater than 2.0, any change in that value has no significant effect on the relation between F and U , where H is water depth. In this experiment H/L is 3.3 and 7.1 at Sites 1 and 2 respectively. Consequently, the present experiment supports the result of Eyre.