HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	運動荷重による氷板の変形（序報）
Author(s)	滝沢, 隆俊
Citation	低温科學. 物理篇, 35, 233-240
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18338
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p233-240.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Takatoshi TAKIZAWA 1977 Deflection of a Floating Ice Sheet Subjected to a Moving Load. (Preliminary Report). *Low Temperature Science, Ser. A. 35.* (With English Summary p. 240)

運動荷重による氷板の変形 (序報)*,**

滝沢隆俊
(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

I. はじめに

冬季，河川や海などの凍結に伴い氷板は，特に極地方において，飛行場や交通路などとして利用されている。この際には，どのような条件のときに安全性が確保されるかが重要な問題である。したがって荷重の速度，重量や氷厚などにより氷板がどのような変形をするかを調べることが必要である。

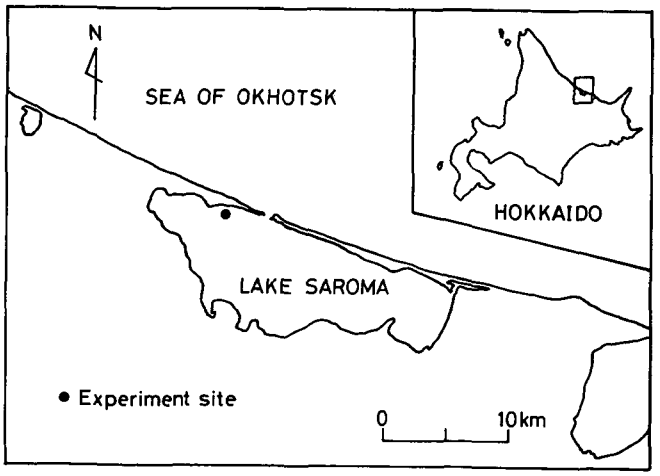
静荷重による氷板の変形に関しては多くの研究があるが，運動荷重に関してはさほど多くない。これまでになされた実験的研究[1~3]や理論的研究[4~9]によると以下の様なことがわかっている。荷重の速度が小さい時の氷板の変形は静止している時の型が荷重と伴に移動して行くだけである。速度がある値（これを臨界速度と呼ぶ）を越えると氷板には波動が生じる。氷板の最大沈下量は速度の増大に伴い増加し臨界速度で最大値（理論的には無限大）を取り臨界速度を越すと減少しついには静止している時より小さくなる。

しかし，波動は荷重前方だけに発生するのか，それとも後方にも生じるのかなどまだ十分に解明されていない点が多く残されている。そこで，速度によりどの様な波が生じるかを調べるための予備的実験を行ったのでそれについて報告する。

II. 実験地点の概況

実験は，1977年2月北海道オホーツク海沿岸のサロマ湖（第1図）の湖氷上で行われた。サロマ湖は塩湖でありその水の塩分量は海水のそれとほぼ同じである。冬にはそれが結氷して平坦な海氷が形成される。

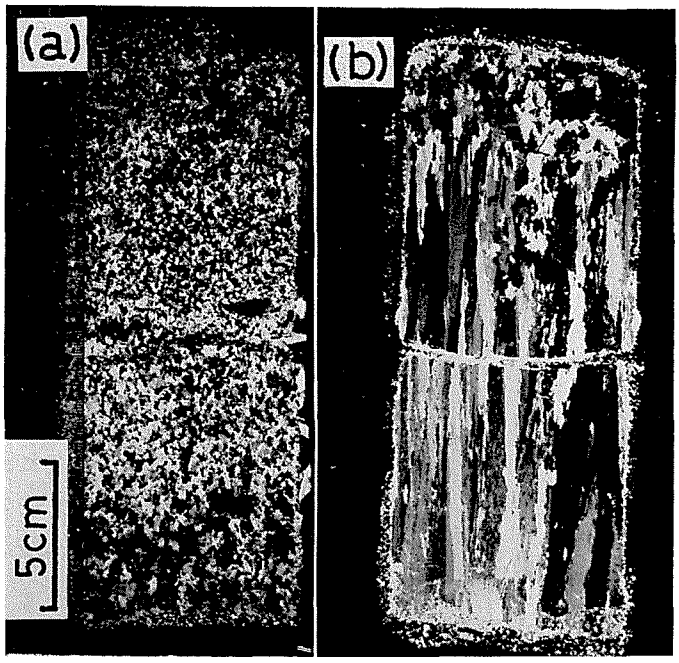
実験地点は岸から約300 m



第1図 実験地点

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1842号
** 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設研究報告 第57号

沖合いで，その付近の水深は5 m，氷厚は40 cmでその上に数cmの積雪があった。第2図に氷板の垂直断面の偏光写真を示したが上層20 cmは粒状のゆき氷でありそれ以深は海氷に特有のモザイク状の結晶構造をしていた。



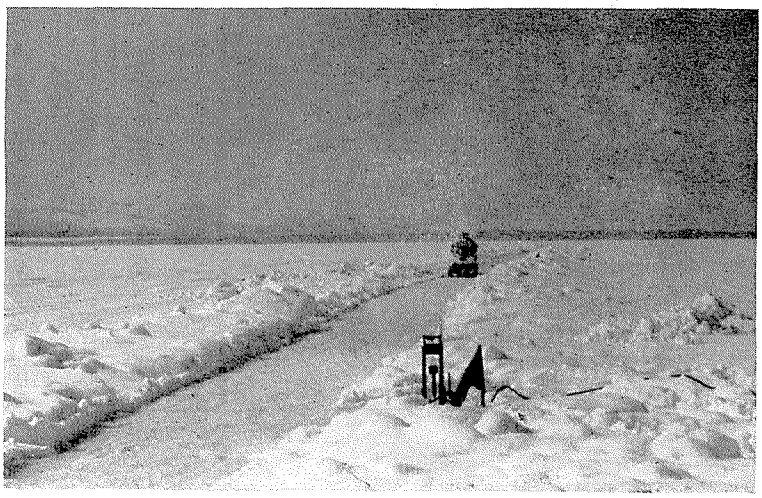
第2図 実験地点の海氷の垂直断面の偏光写真
(a) は上層，(b) は下層

III. 実 験 方 法

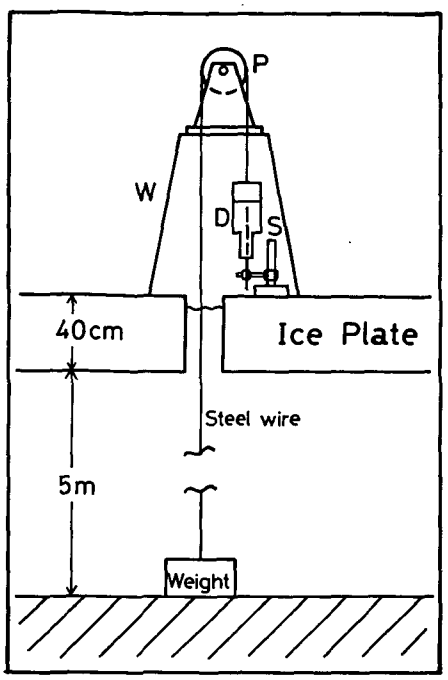
岸にほぼ平行に幅約2 m，長さ約250 mにわたって除雪された走行路において測定が行われ，荷重としてはスノーモービル（ヤマハS-300 M，長さ2.43 m，幅0.79 m，重量165 kg）が用いられた（第3図）。

氷板の変位の検出は走行路の中央から約1 m側方に離れたところで行った。第4図に示した様に，氷板に直径12 cmの穴をあけ湖底に沈めた重りを不動点とした。これより直径約0.5 mmの鋼線を引き，氷の表面から高さ30 cmにあるプーリーを介し鋼線の他端に変位計（新興通信 IDF-2 F）を結びつけた。変位計には鋼線に張力をかける様に重りを取り付け，全体の重量は770 gであった。変位計からの出力は歪増幅器を通じてペン書き記録計に記録された。

一回の測定は，十分遠方からスノーモービルを発進させ設定の速度に達したらその速度を



第3図 測 定 風 景



第4図　氷板の変位の検出装置
P：プーリー，W：木台，D：変位計，S：変位計の鉄心を固定するスタンド

保って走行路を走り抜けることでなされた。実際には，設定した速度を保ったままで走ることが困難であったので走行路に50 m毎に旗を立て，スノーモービルが通過した時点を記録紙上に記入してその時間から速度を計算しそれを荷重速度とした。

IV. 実験結果

実験は，三段階の速度で計5回行われた。第1表にそれぞれの速度を示した。

第1表　荷重速度

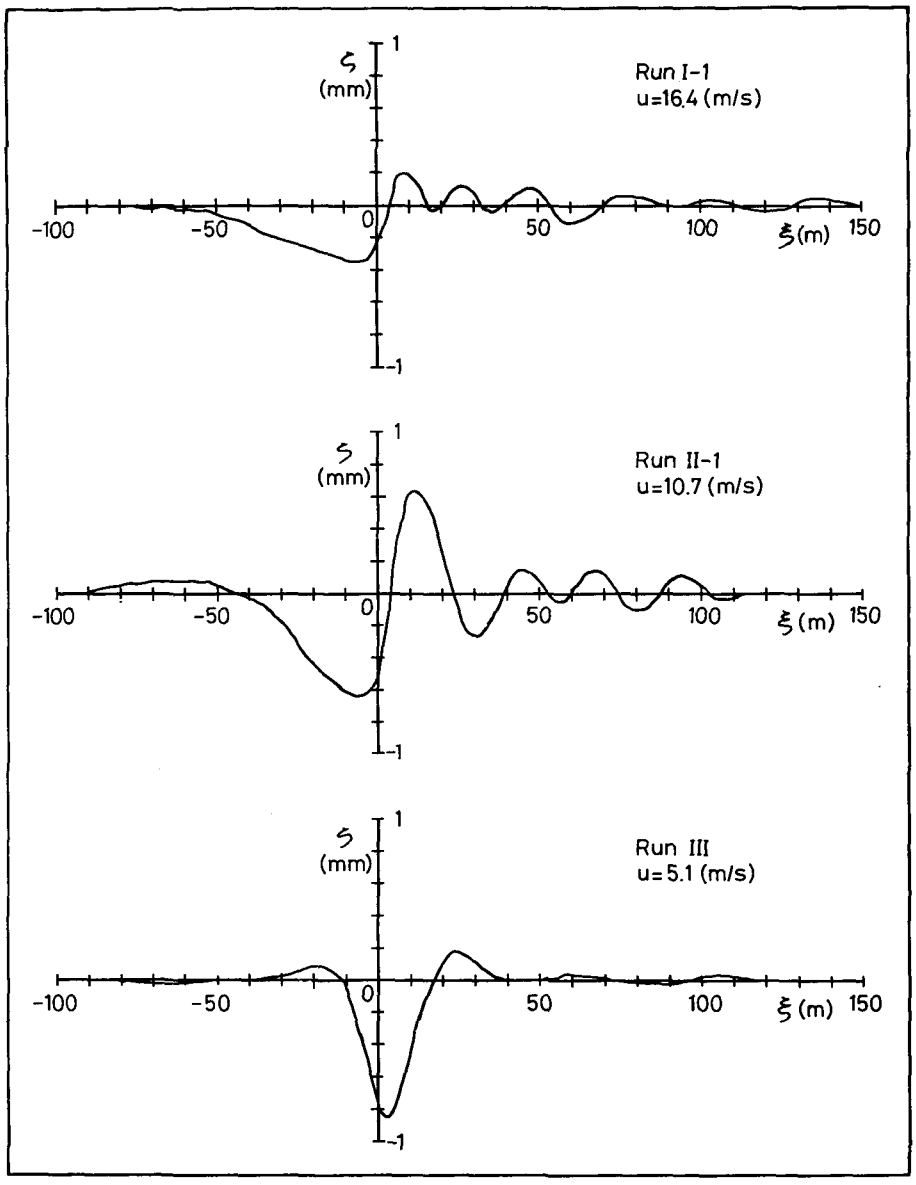
実験番号	速度 (m/sec)
I-1	16.4
I-2	15.2
II-1	10.7
II-2	11.5
III	5.1

得られた変位の記録は潮汐による成分を含んでいるが測定時間中の潮汐による変位は一定の割合で起ると考えられるので，得られた記録から最小二乗法により求めた変位の直線成分を差し引いた。第5図に補正された変位の記録の一部を示した。座標は走行路上に荷重の進行方向に x，鉛直上向きに z を取ったが図ではこの静止座標系から $\xi=x-ut$, $\zeta=z$ の関係式により (ξ,ζ) 運動座標系に変換して示してある。ここで u は荷重速度，t は時刻であり荷重が $x=0$ を通過した時刻が $t=0$ である。変位を測定した位置は $x=150$ m であった。

Eyre and Hesterman[3] によると，氷板の変形は荷重の速度によって第2表に示すように四つの領域に分けられる。第6図には第2表に対応する変形の模式図を示した。

第5図と第6図を比較してみると，I-1 と II-1 は波動領域にあり III は非対称遷移領域にあることがわかる。I-1 と II-1 を比べてみると II-1 の方が，即ち速度が小さい方が波形が整っていて最大沈下量と振幅が大きい。荷重前方の波は両者とも約4波長のところで振幅が0になっている。また II-1 では後方にも波が存在しているが I-1 では明らかに存在していない。

Eyre and Hesterman の実験でもこれとほぼ同じ結果が得られている。それによると，波動領域の下限近く，即ち臨界速度よりやや大きい速度では荷重前方の波は3～4波長のところでほぼ0まで振幅が減衰する。速度が増大するにしたがって波形は崩れはじめ遂には波は事実上消滅し前方には1つのピークだけが残る。後方には曖昧で識別しがたいような弱い波が認められるが通常はランダムな振動にかくされて判別し難い。最大沈下量及び波の振幅は速度が大きくなるに伴って減少する。



第5図 測定された氷板の変形の記録。座標は荷重と伴に移動する運動座標系である。静止座標系との関係は $\xi=x-ut$, $\zeta=z$ で与えられる。ここで x は走行路上で荷重の進行方向に正は，z 鉛直上向きに正である。変位の測定は $x=150$ m のところで行われた

第2表 速度の違いによる氷板の変形の推移 (Eyre and Hesterman による)

1. 準静的領域	(Quasi-static zone)	$0 \leqq u/u_c < 0.7$
2. 対称遷移領域	(Symmetric Transition zone)	$0.7 \leqq u/u_c < 0.85$
3. 非対称遷移領域	(Asymmetric Transition zone)	$0.85 \leqq u/u_c < 1.0$
4. 波動領域	(Wave-generating zone)	$1.0 \leqq u/u_c$

ここで u は荷重速度，u_c は臨界速度である

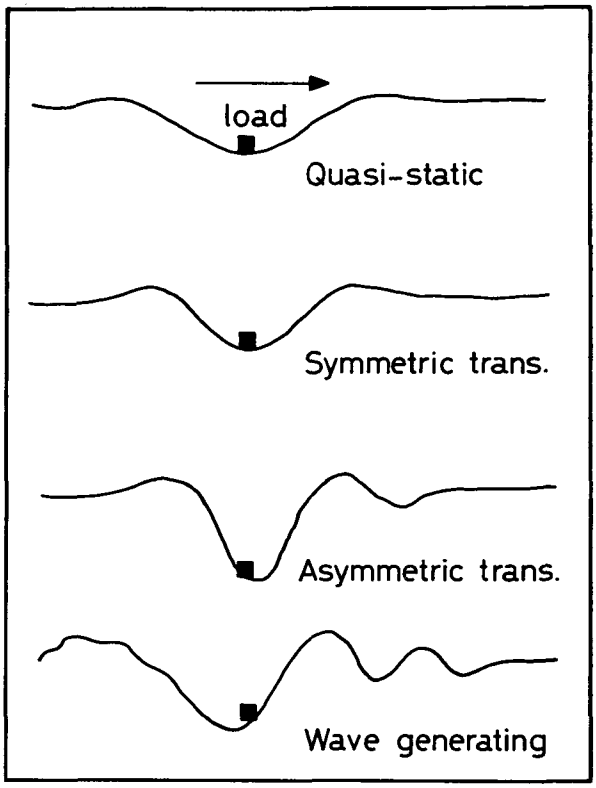
V. 考　　察

Eyre and Hesterman は彼らの実験結果から，臨界速度以上で走る荷重はその前方に同じ速度を持ったただ一つの波を発生させるとしてWilson の理論[4] に修正を加えて考察を行った。それによると，荷重速度＝波の速度と波長の関係は次式で与えられる。

$$u^2 = \frac{g}{2\pi}\left(\lambda + (2\pi L)^4\left(\frac{1}{\lambda}\right)^3\right) \times \tanh\frac{2\pi H}{\lambda} \qquad (1)$$

但し，λ は波長，g は重力の加速度，H は水深である。L は長さの次元を持つ量 (characteristic length) であり次式で定義される。

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



第6図　速度の違いによる氷板の変形の模式図 (第2表参照) Eyre and Hesterman による

ここで，E は氷のヤング率，h は氷厚，ρ_w は水の密度，σ はポアッソン比である。

(1) 式を (3) 式を用いて無次元化すると (4) 式を得る。

$$U = \frac{u}{\sqrt{gL}}, \qquad X = \frac{\lambda}{2\pi L}, \qquad F = 2\pi f\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (3)$$

$$U^2 = \left(X + \frac{1}{X^3}\right)\tanh\left(\frac{1}{X}\frac{H}{L}\right) \qquad (4)$$

また

$$U = FX \qquad (5)$$

の関係がある。ここで，U, X, F はそれぞれ無次元化された速度，波長，振動数である。

したがって (4), (5) 式から数値計算により X と U, F と U の関係を H/L をパラメーターとして画くことができる (第7図)。第7-a, b 図で U の最小値が無次元化された臨界速度 (U_c) である。第7-b 図において，各曲線は臨界速度以上で実用的には (6) 式のような直線で近似できる。

$$F = a + bU \qquad (6)$$

ここで，係数 a, b は H/L により異った値をとる。この直線が横軸と交わる点，即ち $F=0$ となる速度は遷移速度 (onset velocity) U_0 と呼ばれ準静的領域と対称遷移領域の境界を示す速度

である。

今回のサロマ湖の実験結果をこの理論に当てはめてみる。$h=40$ cm, $\rho_w=1$ g/cm^3, $\sigma=1/3$, $g=980$ cm/sec^2 としヤング率は紋別港内の氷と同じとすると $E=10^{10}$ dyne/cm^2 [10] であるので (2) 式により $L=4.97$ m を得る。水深は 5 m であるので $H/L=1$ となる。したがって $H/L=1$ の時の a, b, U_c, U_0 を Eyre and Hesterman の図 (第 81, 82 図) から読み取ると次の様になる。

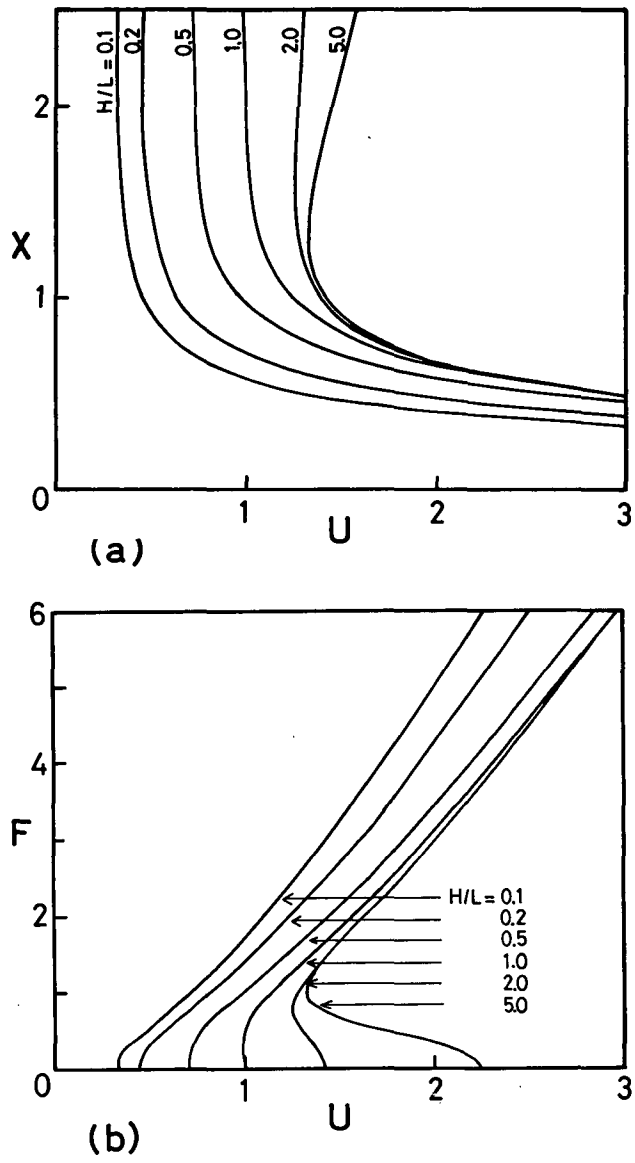
$$\left.\begin{aligned} F &= -1.7+2.36\,U \\ U_c &= 0.99 \\ U_0 &= 0.71 \end{aligned}\right\} (7)$$

したがって (3) 式により書き換えると

$$\left.\begin{aligned} f\,(1/\text{sec}) &= 0.076\,u\,(\text{m/sec}) \\ &\quad -0.38 \\ u_c &= 6.9\,(\text{m/sec}) \\ u_0 &= 5.0\,(\text{m/sec}) \end{aligned}\right\} (8)$$

第 3 表に実験から得られた振動数と (8) 式による計算値を示した。理論値の方が大きい値を示しているがその差は速度が 16.4 m/sec の時がやや大きいがその他は 10% 以内で良い一致を示していると言えるであろう。

Eyre and Hesterman[3] は後方には事実上波は存在しないとしているがサロマ湖の実験では II-1, 2 で後方に波が認められる。第 7-b 図によると臨界値よりやや大きい速度では二つの振動数が対応しある速度以上になると一つの振



第 7 図 (a) 種々の H/L の値に対する無次元化された速度 U と波長 X の関係
(b) 種々の H/L の値に対する無次元化された速度 U と振動数 F の関係
Eyre and Hesterman による

第 3 表 実験により得られた振動数と理論値

速　度 (m/sec)	16.4	15.2	10.7	11.5
実　験　値	0.75	0.71	0.39	0.42
理　論　値	0.87	0.78	0.43	0.49

動数しか対応しない。したがって,実験 II-1, 2 で後方に長波長の波が存在しそれより速度の大きい実験 I-1, 2 で存在しなかった事実より次の様に言うことができるであろう。臨界速度よりやや大きい速度で走る荷重は，前方に比較的短い波長の波と後方に比較的長い波長の波の二つの波を発生させる。しかし速度がある程度以上になると前方にのみ波は発生する。

VI. ま と め

1977 年 2 月北海道サロマ湖の湖氷上で運動荷重による氷板の変形に関する予備的な実験が行われた。荷重としてはスノモービルが用いられ第 1 表に示された速度で計 5 回の測定がなされた。

その結果は，速度の大きい実験 I と II では荷重前方に波動が発生した。また実験 II では後方にも波が認められた。速度が最も小さい実験 III では波は発生せず氷板は荷重が静止している時とほぼ同じ型の変形をした。実験 I と実験 II を比べると速度のより小さい実験 II の方が波形が整っており振幅及び最大沈下量とも大きかった。また最大沈下量の起る位置は実験 I と II では荷重の後方，III では前方であった。

これらの実験結果は Eyre and Hesterman の実験結果と良い一致を示している。しかし，荷重後方の波について彼らは事実上存在しないとしているが,考察に用いた理論と実験 II では波が認められているのにそれより速度の大きい実験 I では認められなかったと言う事実を考慮すると，臨界速度よりやや大きい速度では後方にも波が生じるがある速度以上になると波は前方にのみ生じると言えるであろう。

おわりにのぞみ，北大名誉教授の吉田順五博士及び凍上学部門の鈴木義男助教授に多大な御指導と御助言をいただきましたことを深く感謝いたします。また，実験に際しましては流氷研究施設の研究員，技官諸氏及び田畑忠司教授をはじめ海洋学部門の皆様から多大な御協力をいただいた事をここに記し心から感謝の意を表します。

文 献

1) 南満州鉄道株式会社 1941 河氷特に氷上軌道に関する研究. 608 pp.
2) Stevens, H. W. and Tizzard, W. J. 1969 Traffic tests on Portage lake ice. *CRREL Tech. Rept.*, **99**, 60 pp.
3) Eyre, D. and Hesterman, L. 1976 Report on an ice crossing at Riverhurst during the winter of 1974-75. *Saskatchwan Research Council*, 123 pp.
4) Wilson, J. T. 1958 Moving loads on floating ice sheets. *Univ. Mich. Res. Inst.*, AFCRC TR-58-243, ASTIA AD 152589, 22 pp.
5) 久保義光 1958 自然結氷板の耐荷力について (1). 雪氷, **20**, 75-78.
6) 久保義光 1958 自然結氷板の耐荷力について (2). 雪氷, **20**, 97-104.
7) 久保義光 1959 結氷板の土木工学的利用性. 雪氷, **21**, 99-105.
8) Nevel, D. E. 1970 Moving loads on an floating ice sheet. *CRREL Res. Rept.*, **261**, 13 pp.
9) 吉田順五 1976 水に浮いた氷板の運動荷重による変形. 低温科学研究所にての特別講議.
10) 田畑忠司 1966 海氷の力学的性質の研究 IX. 現場における曲げ強度の測定 (3). 低温科学, 物理篇, **24**, 259-268.

Summary

A preliminary experiment to study the deflection of a floating ice sheet subjected to a moving load was carried out in February 1977 at Lake Saroma in Hokkaido (Fig. 1). The test site was about 300 m off from the shore and the depth of water was 5 m. The ice had the thickness of 40 cm and was covered with snow several centimeters in depth.

A test lane approximately 2 m wide and 250 m long was set up and a deflectmeter, as shown in Fig. 4, was installed at the point 150 m from the starting position of the lane. The deflectmeter was set 1 m from the center line and, therefore, measured values deviated slightly from actual deflections under a moving load.

A snow-mobile (YAMAHA S-300 M, 2.43 m in length, 0.79 m in width, 165 kg in weight) was used as a moving load.

The five runs were made with speeds approximately grouped into three different speeds (Table 1). The vehicle started at the position well away from the starting position into the lane and then accelerated to the required speed as quickly as possible. Keeping a required uniform speed, it entered and passed through the lane.

The typical results of measured deflections are shown in Fig. 5, which is represented in the co-ordinates moving with the vehicle. It is obvious from the figure that the runs I-1 and II-1 are at the stage of wave generation and the run III is at that of asymmetric transition. The characteristic patterns of ice deflections varying with different speeds which correspond to Table 2 are shown schematically in Fig. 6.

The maximum deflection occurred behind the vehicle on the runs I-1 and II-1. The absolute value of the maximum deflection and also the amplitude of the wave of the run II-1 are greater than those of the run I-1 which was made at a higher speed. The maximum deflection occurred ahead of the vehicle on the run III.

These results show a good agreement with those obtained by Eyre and Hesterman[3]. Their experimental results led them to the idea that the vehicle moving above the critical velocity generates only one wave formed ahead of it. However, the present experimental results show that the wave behind the vehicle was recognized on the run II-1, but not on the run I-1.

Consequently, the following can be concluded from this finding and the theory of Wilson[4]: the vehicle at speeds just above the critical value generates two waves; namely, the first with a relatively short wavelength ahead of the vehicle, and the second with a relatively long wavelength behind the vehicle; the vehicle at speeds much greater than the critical value generates only one ahead of the vehicle.