



Title	海氷板の破壊に伴う振動
Author(s)	石田, 完
Citation	低温科学. 物理篇, 24, 239-248
Issue Date	1966-03-22
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18046
Type	bulletin (article)
File Information	24_p239-248.pdf



[Instructions for use](#)

海水板の破壊に伴う振動*

石 田 完

(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和40年10月受理)

I. ま え が き

天然の海氷上でその海氷の曲げ強度を測定する実験が、数年来、田畑ら^{1),2)}によって、北海道の紋別港内の平坦氷に於いてなされてきた。それは、いわゆる Key-method とよばれるもので、天然の海氷に鋸目を入れて海氷の片持梁を作り、その自由端に力を加えていって、ついに梁が折れる時の強度を測定する方法である。この梁が折れた瞬間から、その梁がつながっていた海水板に振動が起る。これは梁が折れた瞬間、その附根に蓄えられていた弾性エネルギーが解放され、その一部が海水板の振動エネルギーにかわった結果であろう。片持梁の自由端に集中荷重が加えられた場合、引張り、または圧縮による単位体積あたりの弾性エネルギー U は梁の断面が矩形ならば、

$$U = \frac{\sigma^2}{18E} \quad (1)$$

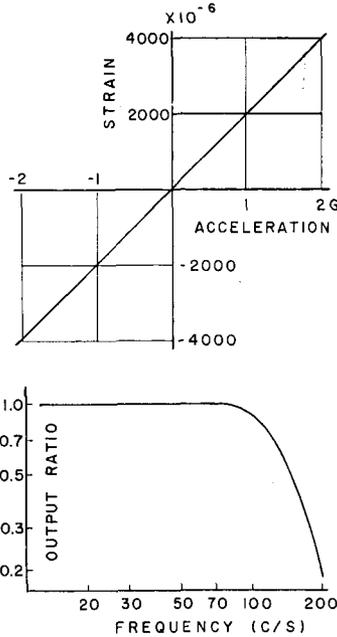
によって求められる。ここで E は梁の縦弾性係数、 σ は最大引張り、または圧縮応力で、自由端に加えられた力を F 、梁の長さ、幅および厚さを l 、 b および h とすれば、

$$\sigma = \frac{6Fl}{bh^2} \quad (2)$$

で与えられる。もし海水板に生じた振動のエネルギーが、梁が折れる瞬間の弾性エネルギーに比例するものとすれば、振動のエネルギーの測定からも、梁の最大弾性エネルギーを推定できるであろう。そこで外力 F から得られる弾性エネルギーと、氷板の振動エネルギーとの関係を求めるために、海氷の曲げ強度の測定と同時に氷板の振動の測定を行なった。

Frenkel³⁾ が指摘しているように、普通の張力の下に於ける物体の引張りの強さは、それを構成している分子同志を引きはなすのに要する力から推定される強さより遙かに小さい。それは物体の破壊が内部の小さな割目の拡大や、それらの連結の進行によって起るからだと言明されている。事実 Gold⁴⁾ は水の試料に圧力を加えて、氷がクリープしてゆく過程で、クラックの発生に伴うパルス音を観測している。吾々の実験に於いても、梁内の最大応力の増加速度が小さい場合、この点に着目して、応力が増加してゆく過程で生ずる梁の微小振動の観測を行なった。

* 北海道大学低温科学研究所 業績第765号



第1図 Uゲージ加速度計の特性

II. 測定に用いた受振器

振動の測定には3種類の受振器を用いた。一つは新興通信工業のUゲージ加速度計で、その特性を第1図に示す。これを互いに直角な方向に3個組合わせて、垂直方向と水平2方向の振動を測定できるようにし、受振器の標準とした。第2は2.4 kgの錘を持つLa Coste型上下動振子の動電型受振器で自作した。固有周期は0.5 sで氷板の上下動の観測に用いた。第3も自製の小型高感度の圧電型受振器で、梁が折れる場所に置き、クラックの発生に伴うパルス音の観測に用いた。第2、第3の受振器の特性は第1の加速度計と共に、同一の台に乗せ、これに衝撃を与えた時の夫々の記録波形を周波数分析して求めた。すなわち、較正しようとする受振器から得られた波形を $F(t)$ 、較正されている加速度計の波形を $P(t)$ とすると、夫々は

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3)$$

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} p(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (4)$$

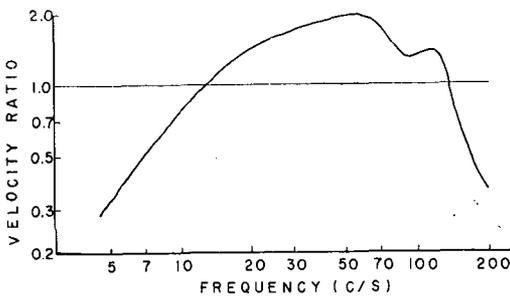
と表わされるから、較正すべき受振器の加速度に関する周波数特性 $G(\omega)$ は

$$G(\omega) = \frac{f(\omega)}{p(\omega)} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} F(t) e^{-i\omega t} dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(t) e^{-i\omega t} dt} \quad (5)$$

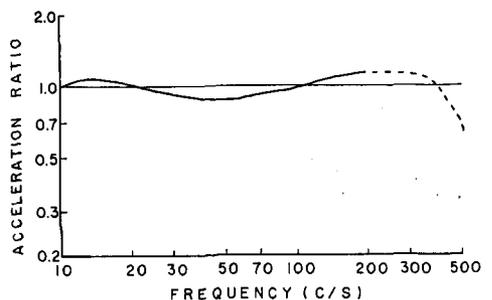
から、また速度、変位に関する周波数特性 $U(\omega)$ 、 $X(\omega)$ は夫々

$$U(\omega) = \omega \cdot G(\omega) \quad (6)$$

$$X(\omega) = \omega^2 \cdot G(\omega) \quad (7)$$



第2図 動電型上下動受振器の速度特性。
比1.0に於ける感度は記録紙上
1 cmが 3×10^{-2} cm/s



第3図 圧電型受振器の加速度特性。
比1.0に於ける感度は記録
紙上1 cmが 5×10^{-3} G

から求められる。周波数分析の計算には北大計算センターの HIPAC 103 を使用した。第 2 図、第 3 図に増幅器と記録計を含めた動電型上下動受振器の速度特性と、圧電型受振器の加速度特性を示す。氷の梁が折れるときに海水板に生ずる振動は 0.01 G 以下の非常に小さな振動であるのに対し、標準とした加速度計はその測定範囲が $\pm 2 G$ のものであったため、それらの絶対値は余り正確でない。

III. 氷板の振動エネルギーの測定結果

氷板の振動は前述の動電型上下動受振器を梁の付け根から適当な距離をおいて 2 台、海水上に設置し、オシログラフに記録されたそれらの波形から梁が折れた場所に於ける振幅を推定して求めた。氷板の単位体積あたりの振動エネルギー E は海水の密度を $\rho \text{ g/cm}^3$ 、推定した折れ点の速度振幅を $u \text{ cm/s}$ とした場合

$$E = \frac{1}{2} \rho u^2 \times 1.02 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{cm/cm}^3 \quad (8)$$

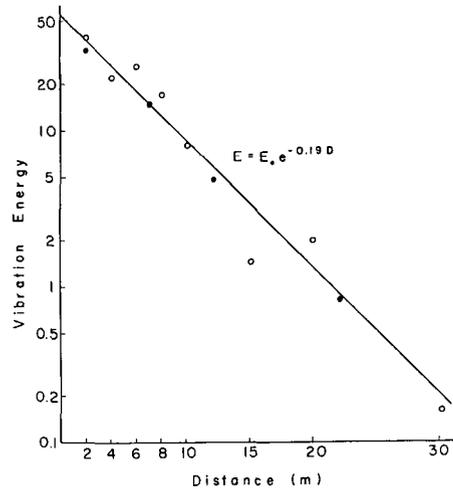
によって計算した。

海水中の振動エネルギーの減衰は 1964 年の実験例を示すと、第 4 図の如く

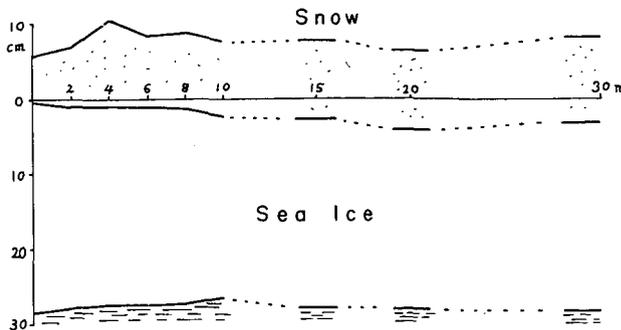
$$E = E_0 e^{-0.19 D} \quad (9)$$

で表わされた。ここで D は m で測った震源距離である。上下動受振器を測線上に 2 台、866 cm はなして置き、受振器から次第に遠ざかりつつ、海水上に 4 kg の鉄球を 1 m の高さから落した。図の黒丸と白丸は震源から夫々、遠い方と近い方の受振器から得られた値である。第 5 図はその時の測線に沿った海水の断面図である。

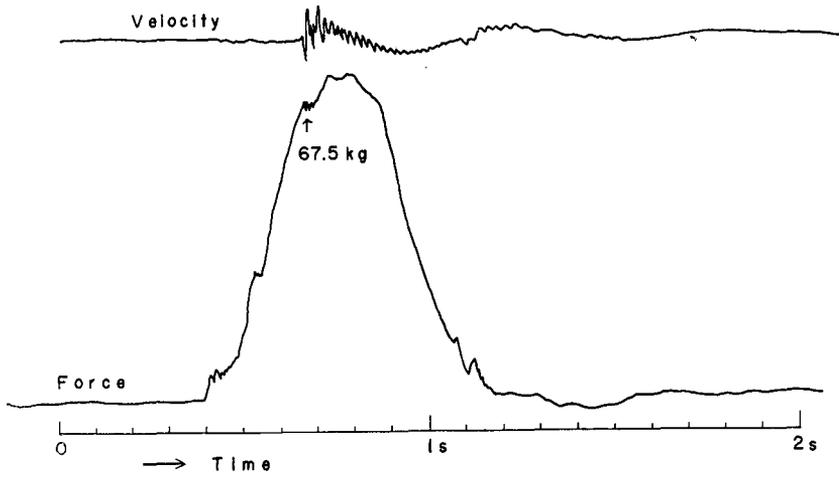
氷の梁が折れた時に、氷板に起る上下動は初め振動数が 80~100 c/s の早い減衰振動で、続い



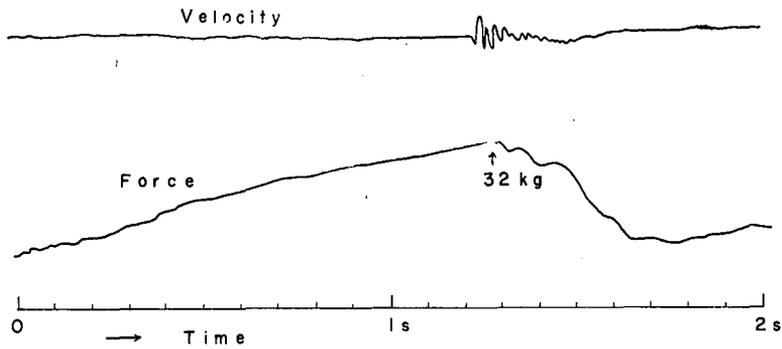
第 4 図 海水の振動エネルギーの減衰



第 5 図 測線に沿った海水の断面 (1964 年 2 月, 紋別港)



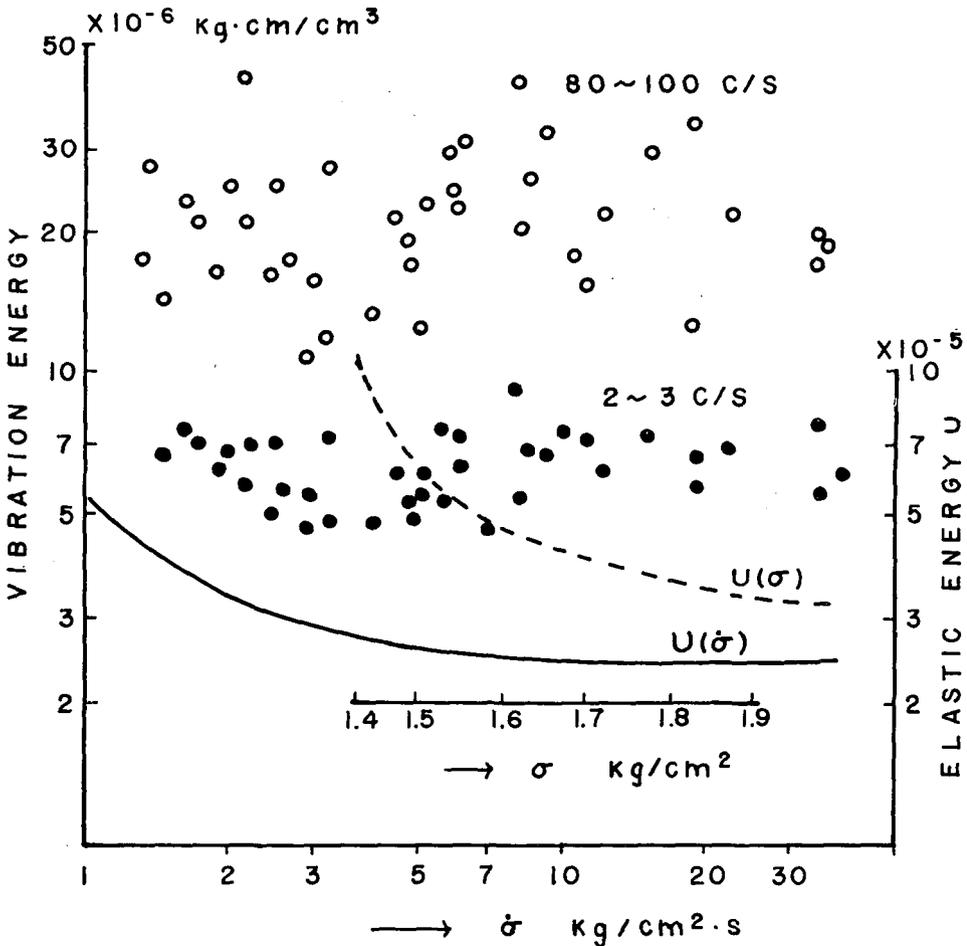
第6図 応力の増加速度が大きい場合の氷板の上下速度振動



第7図 応力の増加速度が小さい場合の氷板の上下速度振動

て2~3 c/sのゆっくりした減衰振動になる。梁内の最大応力の増加速度が比較的大きい場合と小さい場合の例を第6図、第7図に示す。梁に加える力は挺子を利用して人力でなされるので、余りなめらかには上昇していない。力の増加速度が大きい場合は、人力を急に加えなければならぬので、梁が折れた後もなお、梁を海水中に沈めるような結果になり海面を波立たせる。それによって引き起される氷板の大きな振動が記録されることがあるが、そのような波動は測定から除いた。図の例は梁の折れによってのみ生じたと思われる振動であるが、なおかなり複雑である。このような減衰振動のエネルギーを定めるために、それを80~100 c/sの早い振動と2~3 c/sの遅い振動に分け、それぞれの最大振幅を求める。2台の受振器から得られたその最大振幅から、距離による減衰を考慮して、梁が折れた場所に於ける振幅を推定し、(8)式によってエネルギーを計算した。

第8図に1964年2月の測定結果を示す。図は変化範囲の大きい最大応力の増加速度 $\dot{\sigma}$ に対して記入してあるが、 $\dot{\sigma}$ が1~30 kg/cm²·sの範囲では振動エネルギーは殆んど変化しないように見える。田畑ら²⁾はこの時の実験から曲げ強度 σ 、弾性率 E 、最大応力の増加速度 $\dot{\sigma}$ の間



第8図 応力増加速度と振動エネルギーとの関係

白丸は80~100 c/sの波, 黒丸は2~3 c/sの波, 破線は曲げ強度と弾性エネルギー, 実線は応力増加速度と弾性エネルギーとの関係

の関係をjているが, いま σ と E の単位を kg/cm^2 , $\dot{\sigma}$ の単位を $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{s}$ として書きなおしてみると

$$E = 1.62(\sigma - 1.3) \times 10^3 \tag{10}$$

$$E = 1.02(1.2 + 4.9 \log \dot{\sigma}) \times 10^3 \tag{11}$$

$$\sigma = 1.1 + 0.57 \log \dot{\sigma} \tag{12}$$

となる。従って, 梁が折れるときの最大弾性エネルギーは, これらを(1)式に代入して

$$U = \frac{0.555\sigma^2}{\sigma - 1.3} \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{cm/cm}^3 \quad (1.4 < \sigma < 2.0 \text{ kg/cm}^2) \tag{13}$$

$$U = \frac{(1.1 + 0.57 \log \dot{\sigma})^2}{0.22 + 0.90 \log \dot{\sigma}} \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{cm/cm}^3 \quad (1 < \dot{\sigma} < 30 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}) \tag{14}$$

となる。この U と σ , U と $\dot{\sigma}$ の関係を第 8 図にそれぞれ破線と実線で記入してある。これから判るように最大応力の増加速度が $1\sim 30 \text{ kg/cm}^2\cdot\text{s}$ の範囲では、梁の最大弾性エネルギーは丁度その極小値付近にあって ($\dot{\sigma}=27.6 \text{ kg/cm}^2\cdot\text{s}$ で U は極小となる), 変化が小さい。従って氷板の振動エネルギーの測定値も殆んど変化しなかったものと思われる。

IV. 梁内の最大応力が増加してゆく過程に現われる微小振動

1965 年 2 月の実験に於いては、氷の梁の自由端に鎖を介して鋼索をとりつけ、これをウォームギヤで回転をおとした軸に巻き取ると云う方法で、ゆっくり力を加えた。この場合、力が殆んど直線的に上昇してゆく途中で、何回も力が dip する記録が得られた。例えば、5 秒間に 14 kg の力が加えられて梁が折れた場合、明らかな力の dip が 6 回あらわれ、力の減少量の最大値は約 3 kg に達した。力が減少する時間は短かく、4 ms 以内で元の値にもどる。このような力の緩和、回復が起る毎に、梁の付け根に置かれた 3 成分加速度計により微小振動が記録された。第 9 図はその記録波形から得た梁の長さ方向の軸を含む垂直面内の加速度軌跡、第 10 図は水平面内の加速度軌跡である。

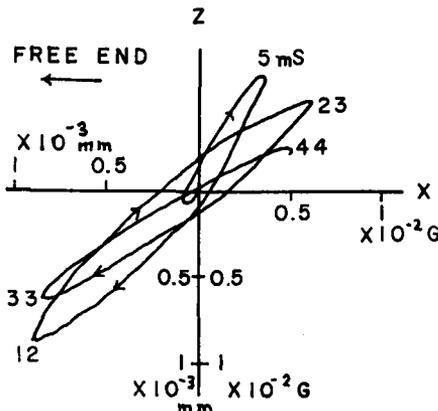
この加速度の振動波形はほぼ減衰正弦振動なので

$$\ddot{x} = e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (15)$$

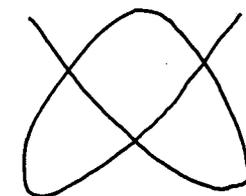
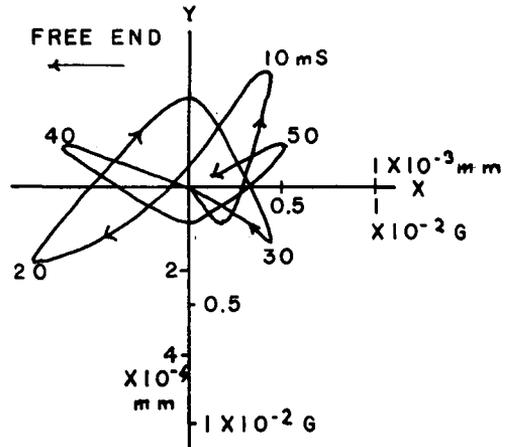
と置くと、変位は

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \beta) \\ \tan \beta &= \frac{2\alpha\omega}{\alpha^2 - \omega^2} \end{aligned} \right\} (16)$$

となり、位相は僅か異なるが、加速度波形と同じ減衰係数、周波数を持つ減衰正弦振動である。位相の違いは、加速度波形が 1 周期で $1/e$ におちるような急な減衰の場合でも、



第 9 図 垂直面内の振動の軌跡



3:4 LISSAJOUS' FIGURE

第 10 図 水平面内の振動の軌跡と 3:4 のリ-サーージュ図形

$$\omega = \frac{2\pi}{t_1}, \quad \alpha = \frac{1}{t_1}$$

$$\text{から} \quad \frac{2\alpha\omega}{\alpha^2 - \omega^2} = -0.327, \quad \beta \doteq -\frac{\pi}{10}$$

となり、変位波形は加速度波形より僅か $\pi/10$ だけ位相がおくれるにすぎない。従って第 9, 10 図は、また水上の一点の変位軌跡と見ることが出来る。それで両図の軸には加速度の目盛り (単位: 重力加速度 G) と共に変位の目盛りが加えてある。ただし、第 9 図の垂直面内の振動では z 方向 (垂直方向) と x 方向 (梁の長さの方向) の振動周期が等しく 20 ms であって振幅はほぼ等しいのに対し、水平面内の振動では y 方向 (水平面内で x 軸に直角な方向) の周期が 15 ms なので、 y 方向の変位は x 方向の変位の約 1/3 である。ここでは比較的大きく横ゆれの場合を示したが、多くの場合、 y 方向の振れは、 z 方向、 x 方向に比べ遙かに小さい。

弾性論によれば、片持梁の自由横振動の基本周期 τ は

$$\tau = \frac{2\pi}{3.515} \sqrt{\frac{\rho S l^4}{EI}} \quad (17)$$

で与えられる。ここで右辺の平方根内の諸量は梁の材質、形状に関する物理量で、 ρ は密度、 E は縦弾性係数、 S は断面積、 l は長さ、 I は断面の慣性モーメントである。厚さ h 、幅 b の矩形断面の梁では、上下振動と水平振動の場合の断面慣性モーメントを夫々 I_y 、 I_z とすると

$$I_y = \frac{Sh^2}{12}, \quad I_z = \frac{Sb^2}{12} \quad (18)$$

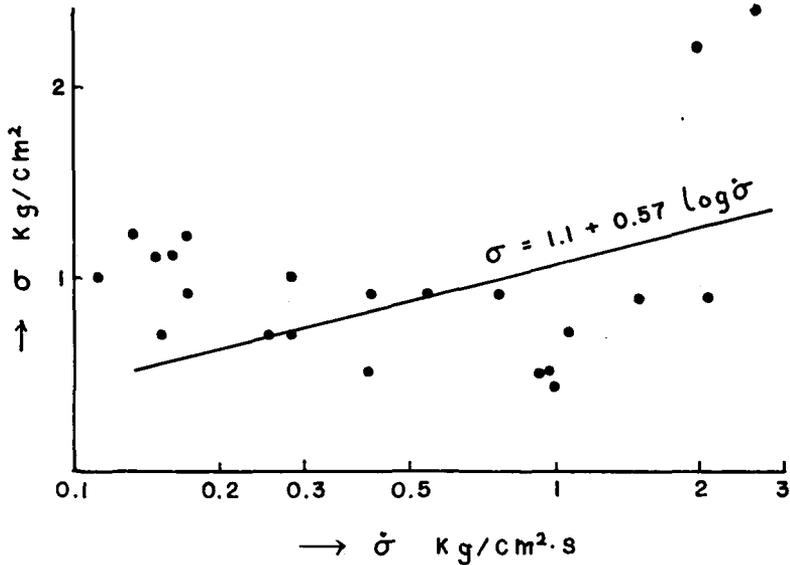
であるから、水平動周期 τ_y と上下動周期 τ_z との比は

$$\frac{\tau_y}{\tau_z} = \frac{h}{b}$$

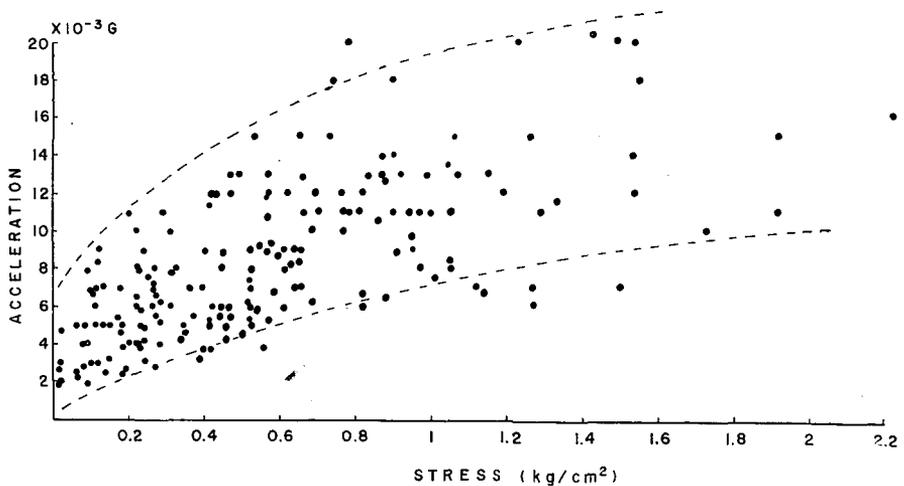
となる。第 9, 10 図の振動が起った梁では $h=21.67$ cm, $b=29.7$ cm なので $h/b=0.73$ である。一方 τ_y 、 τ_z の実測値から $\tau_y/\tau_z=15$ ms/20 ms=0.75 となり、これらの比は大体一致する。またこの比は 3:4 に近いので水平動の様子が 3:4 のリサーチ図形に近かったことが判る。

V. 梁内の最大応力が増加してゆく過程に起るパルス状振動

前節に述べたように、梁の自由端にゆっくり力を加えた場合、梁が折れる迄に何回か力の dip が見られたが、梁の付け根に置いた圧電型受振器によっては、そのつど、更に力に殆んど変化が見られない場合にもパルス状の振動が観測された。再び前節の例をとると、梁が折れる迄に力の dip が 6 回見られたのに対し、パルス状振動は 12 回起っている。1 回の振動は約 4 ms 続き、その間に約 16 個のパルスが観測される。これは Gold が観測している氷内のクラック発生に伴う振動であると思われるが、この実験に於ける梁の曲げ強度と最大応力の増加速度の範囲は、田畑の測定⁵⁾によると第 11 図の如くで、Gold の実験 (圧縮応力 10 kg/cm² 以上) よりずっと小さな応力範囲である。第 12 図は梁内の最大応力に対するパルス状振動の出現頻度で 16 個の梁について観測された総数 200 回の振動から得た。図では最大応力の幅 20 g/cm² 毎に現



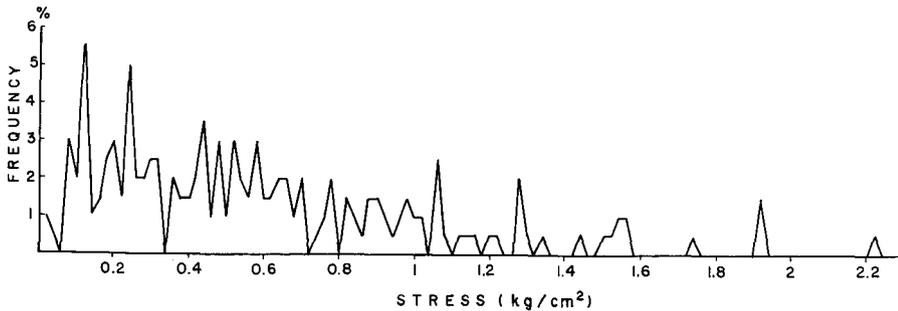
第11図 実験範囲に於ける曲げ強度 σ と応力増加速度 $\dot{\sigma}$ との関係



第12図 梁の最大応力に対するパルス状振動の出現頻度

われる確率を示してあるが、見やすくするために各点を直線で結んである。この図で、振動の起る回数は最大応力が小さい所で多く、最大応力の増加と共に減少する傾向があり、更に幾つかの定まった最大応力の所で特に振動の起る回数が多いことが注目される。第13図には、これらの振動の大きさを最大応力に対して記入してあり、振動の大きさは最大応力と共に増加する傾向が見られる。

以上の実験を行なった時の海氷の構造は小野⁶⁾の断面写真に見られるように大体4層に分けられた。最下層は短冊状の典型的な海氷構造で、その上に比較的粒子の大きな粒状の氷がある。これはある時期に多量の降雪があった時の海水面積雪の水化した層と思われる。更にこの



第13図 梁の最大応力に対するパルス状振動の大きさ

上に粒子の小さな粒状氷があるが、これは測定の数日前の多量の降雪が氷化したもので、この上の方の上層は測定前に表面をふみ固めたため比較的硬い層となっていた。このような特別な海氷構造が第12図の特性とどのように結びつくかは現段階では明らかでない。しかし定まった海氷構造については、応力に対するクラックの出現頻度図の一つが対応するものと考えられる。

VI. 要 約

海氷の曲げ強度の測定で、氷の梁が折れるときに、それがつながっていた海氷板に起る振動を測定した。その振動のエネルギーは、梁の最大応力の増加速度が $1\sim 30 \text{ kg/cm}^2\cdot\text{s}$ の範囲では殆んど変化しなかった。これは梁の最大弾性エネルギーがその範囲で最小値にあり、変化の少ないことと一致した。最大応力の増加速度が $2 \text{ kg/cm}^2\cdot\text{s}$ 以下の小さなときに、応力の増加してゆく過程で内部クラックの発生に伴うと思われるパルス状振動が観測された。その出現頻度は幾つかの定まった応力の時に高く、それが海氷の構造と対応するものと思われた。

この研究を行なうに当って御協力を戴いた田畑忠司教授をはじめとする低温科学研究所海氷研究グループの諸氏、結果の整理について助力を得た小林俊一助手、ならびに現地観測に際して御便宜を戴いた紋別漁業協同組合、北海道開発局紋別港修築事業所、紋別市役所に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 田畑忠司・藤野和夫 1964 海氷の力学的性質の研究 VII. 現場における曲げ強度の測定. 低温科学, 物理篇, **22**, 147-154.
- 2) 田畑忠司・藤野和夫 1965 海氷の力学的性質の研究 VIII. 現場における曲げ強度の測定 (2). 低温科学, 物理篇, **23**, 157-166.
- 3) Frenkel, J. 1947 Kinetic Theory of Liquids. Oxford, 100 pp.
- 4) Gold, L. W. 1960 The Cracking Activity in Ice during Creep. *Canad. J. Phys.* **38**, 1137-1148.
- 5) 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.
- 6) 小野延雄 1966 海氷の熱的性質の研究 III. 海氷の比熱について. 低温科学, 物理篇, **24**, 249-258.

Summary

The strength of sea ice *in situ* has been measured by the Key-method at Monbetsu harbour on the Okhotsk Sea coast of Hokkaido, for several years. In this experiment vibrations of a sea ice sheet were also observed when a cantilever of a sea ice beam deflected and broke. Three types of transducers were used to detect the vibrations. A vertical component of the vibration energy measured by the use of an electro-magnetic detector of the moving-coil type having 2 c/s of the natural frequency was nearly constant in the range of the increasing rate of the maximum tensile stress at the surface of the beam from 1 to 30 kg/cm²·s. It was consistent with the result that the maximum elastic energy of the beam was retained around the minimum value and altered little in this range. At a low increasing rate of the maximum tensile stress less than 2 kg/cm²·s many micro-vibrations occurred during a load test. In this case a ratio of periods between a vertical and a lateral vibration of the beam measured by the use of accelerometers of the U-gage type agreed with the value estimated by the elastic theory concerning a cantilever having a rectangular section. A transducer of the piezoelectric type placed at the joint of the ice beam detected pulsive noise correspondent to internal cracking of the ice during flexural loading. The pulsive noise seemed to occur whenever the maximum tensile stress reached some definite value in the transient stage of an increase in stress.