



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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)
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi; 藤野, 和夫 他
Citation	低温科学. 物理篇, 23, 157-166
Issue Date	1965-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18028
Type	departmental bulletin paper
File Information	23_p157-166.pdf



海水の力学的性質の研究 VIII*

現場における曲げ強度の測定 (2)

田畑忠司・藤野和夫

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和39年12月受理)

I. ま え が き

天然の海水の氷板上に長方形を画き、その短かい辺のひとつを残して、他の3辺に沿って鋸を入れて周囲の氷から切りはなすと海水の片持梁ができる。この梁の曲げ強度を測定して海水の強度を求める方法は、いわゆる Key-method とよばれる。この方法には、梁の成形に手数がかかるという欠点があるが、自然の状態の海水の強度を求め得るというすぐれた点があり、Butkovich¹⁾、Weeks 及び Anderson²⁾、Brown³⁾ などによって利用されている。

筆者等は1963年2月に北海道の紋別港内の海水(厚さ26 cm)の強度を Key-method を用いて測定して次のような結果を得た⁴⁾ことはすでに報告した。すなわち、氷の温度が $-2\sim -2.3^{\circ}\text{C}$ のときに、梁に加わる歪力の増加速度を変化させながら測定を行ない $1.9\sim 5\text{ kg/cm}^2$ の曲げ強度を得た。しかも、歪力の増加速度が大きくなるほど強度が大きくなることが確かめられた。また、氷の梁を曲げた方向は鉛直下向きと水平の2方向であったが、両者の場合の強度がほぼ同じであったことから、海水は厚さの方にもほぼ均一な強度をもっていると思ふことができた。この測定にあたっては加えた力だけを自記記録させて梁の沈下量は測定しなかったのであるが、力の増加曲線およびその他のことから梁は脆性破壊をしたものと想定して、得られた結果を整理した。

1964年2月15~19日の間に同じく紋別港内でふたたび Key-method を用いて曲げ強度を測定した。測定は1963年と同じく歪力の増加速度をいろいろ変化させながら行なった。同時に加重時の梁の先端の加速度も記録し、その値を積分して梁の先端の変位を求め、弾性率も知ることができた。その結果について報告する。

II. 測定方法

測定時に港内には厚さ23 cmの平坦な氷が張りつめており、港外は氷丘化した(水面上の高さ2 m位)氷野でおおわれ開水面は全くなかった。

測定に用いた梁は主として幅30~40 cm、長さ150 cmのもの54本で、このほかに人工的

* 北海道大学低温科学研究所業績 第702号

に作った開水面に自然にできた厚さ8~11 cm, 幅20 cm, 長さ80~100 cmの梁14本も用いた。

梁を曲げた方向は22本の梁では鉛直上向きで, のこりの梁は鉛直下向きであった。いずれの場合にも, 簡単な挺子を利用して電気式荷重計を介して人力で梁の先端に力を加えた。電気荷重計で検出された力の増加の様子は電磁オッシログラフに記録させた。梁に力を加える速さは手で調節し, ひとつの梁については破壊するまでできるだけひとしい速さで力を加えるようにし, 梁がかわるたびごとに, 速さを変えるようにつとめた。

梁のほぼ先端の着力点の近くに加速度計を載せておき, 力を加えて梁が沈下または上昇するときの加速度も同時にオッシログラフに記録させた。この加速度を2度積分して, 梁の先端の変位を求めた。

海水の梁は, ほとんど全部がその支持点のところで長さの方向にほぼ垂直な面内で折れた。それゆえ, 通常の片持梁が横から力をうけて曲がり遂に破壊するときと同じく, この場合にも支持点における梁の表面で最大である長さ方向の引張り応力 σ_x のために破断したと考えることができる。

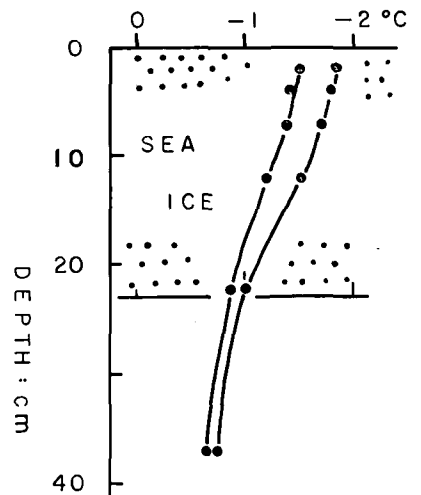
水の温度は, 梁の近くの氷板中の2, 4, 7, 12および22 cmの深さに埋設した熱電対を用いて測定した。参考のために, 氷板の下面から約15 cm下の水温も同時に記録させた。

III. 測定結果

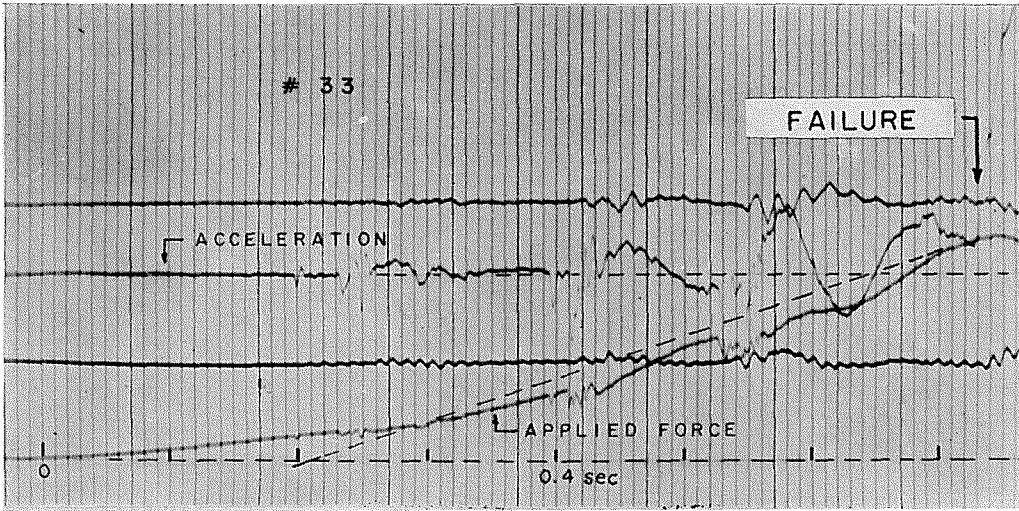
測定期間中の水中の温度分布の最高および最低の値を第1図に示した。温度変化のもっとも著しい表面近くでさえわずか 0.3°C しか変化していなかったので, 測定期間中氷の温度はほぼ一定であったと見做すことができる。

水中の塩素量は円筒状の試料をコアドリルによって切り出し, その融解水についてモールの銀滴定法で測ったが, 表面から5 cmのあいだが4.7%で以下5 cm毎に3.0, 2.6, 2.3%で底面近くの20~23 cmのあいだは3.8%であった。

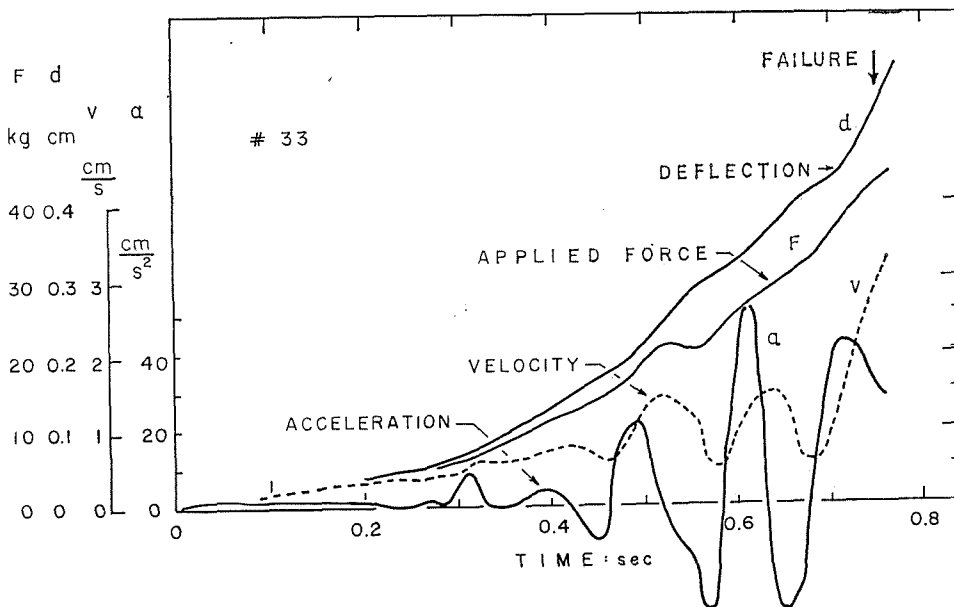
梁に加わった力 F および梁の先端の変位の加速度 a の記録例を第2図に示した。この例は梁の先端を上へ引き上げて曲げ破壊させた場合である。力を加えはじめてから約0.7秒で梁が破壊しており, 破壊時の力 F は44.3 kgである。はじめの0.2秒ぐらいのあいだは力の増しかたは非常に少ないが, その後急激にしかもほぼ直線的に増加して破壊にいたっている。梁の先端の加速度はほぼ0.1秒の週期で変動しているのがわかる。図中の他のふたつの曲線は梁の支持端の近くの氷板の振動を示しており, 梁の破壊時に急に大きくなっている。



第1図 測定期間中の水中の温度分布(最高および最低)



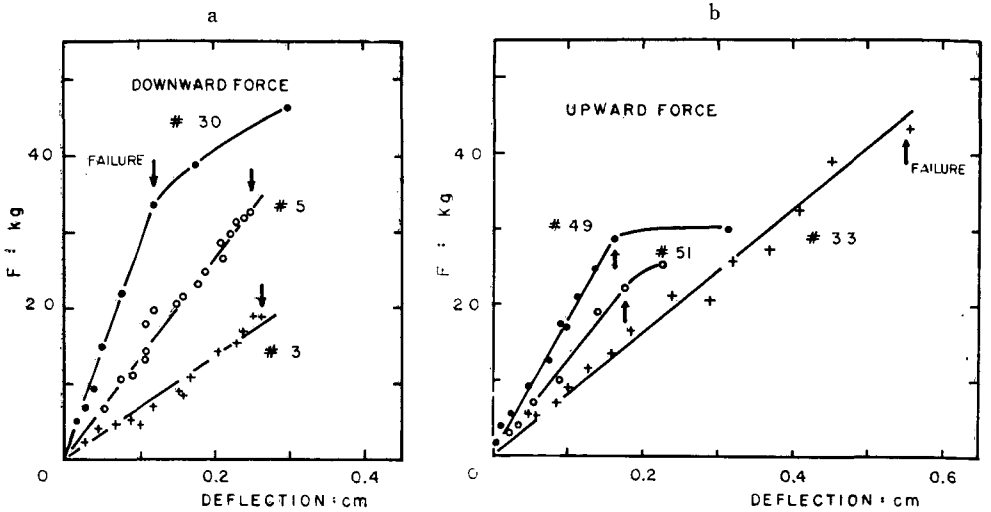
第2図 梁の先端に加えた力および梁の先端の加速度の記録例



第3図 梁の先端の変位の加速度、速度および変位の時間的变化の一例(測定 No.33)

第2図の加速度を積分して速度 v と変位 d を求めた結果が第3図である。図には同時に力 F も記入してある。梁はその先端がほぼ 0.55 cm 変位したときに破壊していることがわかる。更に梁の変位 d を示す曲線と力 F の曲線から、両者がほぼ比例しているらしいこともわかる。

いくつかの測定について、力 F と変位 d の関係を示したのが第4図である。第4図(a)は



第4図 梁の沈下量と力の関係

梁の先端を押し下げて曲げた場合で、(b)は引き上げて曲げた場合である。図から、梁の先端の変位は力に直線的に比例して増加して遂に破壊にいたったことが明らかである。すなわち、力と変位は梁が弾性的に変位しつつ破壊にいたった場合と全く同じ関係を示している。梁が弾性変形をしたのであれば図中の直線の傾斜が弾性率 E に比例する。しかし、この測定の場合には荷重をとり去ったのちに梁の変位がもとどおりに回復するかどうかを測定していないので、加重時に力と変位のあいだに第4図のような関係があるというだけでは梁の変形が純弾性的におこっていると断言することができない。すなわち、第4図の直線の傾斜が真実の弾性率を与えるとは断定できない。しかし、実用的に荷重と変位量の関係を求めるためにはその傾斜が弾性率 E に比例すると考える方が便利である。このような立場から、梁の弾性変形の際の第(1)式を用いて各試料の弾性率 E を求めた。

$$E = \frac{4Fl^3}{dbh^3} \quad (1)$$

ここで、 l 、 b および h はそれぞれ梁の長さ、幅および厚さである。

力 F と沈下量 d のあいだに第4図のような直線関係があれば、梁が必ずしも純弾性的に変位したのではなく、支持点の最外側面にはたらく最大引張り応力 σ_e の破壊の瞬間の値 σ_e 、すなわち、曲げ強度は

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

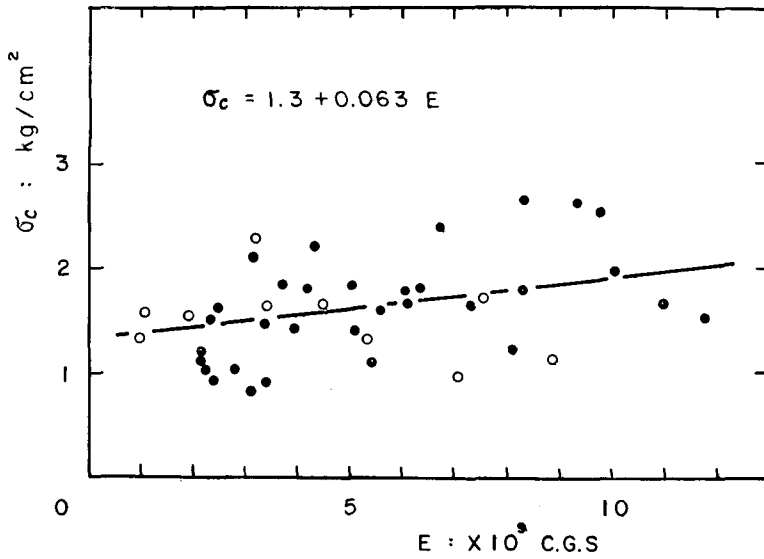
であられる。

測定は68ケの試料について行なった。加速度の記録に失敗したものをのぞいた42ケの測定例について求めた弾性率 E 、曲げ強度 σ_e などを第1表に示した。なお、厚さ23 cmの梁では、 $F=13\sim 46$ kg、 $d=0.08\sim 1.0$ cm、力が F に達するまでの時間 $t=0.08\sim 1.0$ sec で、厚さ8~10 cm

第1表 海水の曲げ強度，弾性率の測定結果

No.	曲げ強度 σ_c (kg/cm ²)	σ_x (kg/cm ² ·sec)	ヤング率 E (10 ⁹ dyne/cm ²)	No.	曲げ強度 σ_c (kg/cm ²)	σ_x (kg/cm ² ·sec)	ヤング率 E (10 ⁹ dyne/cm ²)
3	1.0	1.4	2.4	32	1.7	21.0	11.0
4	1.5	2.9	3.7	33*	2.3	4.4	3.2
5	1.4	1.8	3.9	34*	1.6	2.8	3.4
6	1.8	5.5	4.2	37*	1.7	5.1	4.5
7	1.2	3.5	2.1	44*	1.6	1.5	4.1
10	1.6	10.1	5.6	45*	1.4	1.3	1.0
11	1.1	5.1	2.2	46*	1.5	1.9	1.9
12	1.4	7.8	5.2	49*	1.7	1.9	7.5
14	2.2	13.0	4.3	50*	1.1	2.4	8.9
15	2.1	9.2	3.2	51*	1.3	8.3	5.3
16	1.7	12.6	7.3	52*	1.0	7.3	7.1
17	1.8	4.6	5.1	55	1.5	7.1	2.3
23	1.9	4.3	3.7	56	1.0	4.3	2.1
24	2.4	30.0	6.7	61	1.2	19.2	8.2
25	2.6	24.7	9.4	62	1.8	15.0	8.3
26	1.7	16.8	6.1	63	1.8	17.0	6.1
27	2.7	25.1	8.4	64	1.7	9.2	2.5
28	2.5	15.9	9.8	65	1.0	5.7	2.8
29	1.8	15.9	6.4	66	0.9	6.1	3.3
30	2.0	11.1	10.9	67	0.8	4.1	3.1
31	1.5	28.8	11.8	68	1.1	3.7	5.4

註 *: 梁を引き上げて曲げ破壊させた試料。No. 3~No. 52 は氷厚 23 cm, 他は氷厚 8~10 cm。



第5図 海水の曲げ強度 σ_c と弾性率 E の関係 (白丸は梁の先端を引き上げて曲げ破壊させた場合。黒丸は押し下げて曲げ破壊させた場合)

の梁では、 $F=2.4\sim 4.3$ kg, $d=0.1\sim 0.8$ cm, $t=0.1\sim 0.5$ sec であった。

第1表中の E と σ_c を比較したのが第5図である。図中に白丸で示したのは梁の先端を引き上げて曲げ破壊させた場合で、黒丸は押し下げて破壊させた場合である。第1図に示したように海水では下面がもっとも温度が高く、したがってブラインの占める体積比も大きい。そのため、温度だけから見ると、引張り強度は下面がもっとも弱く、逆に氷の表面はもっとも温度が低いので強度がいちばん強いと考えられている。それゆえ、氷の梁を曲げたときに破壊が梁の最外側の面に生ずる最大引張り応力によっておこるとすると、梁を上へ引き上げて曲げた場合のほうが、押し下げて曲げた場合よりも破壊強度が小さくなる筈である。しかし、実際には第2図からわかるように、上へ引き上げた場合(白丸)の破壊強度が小さいという傾向はないようである。

海水の破壊は水中の欠陥における応力の集中によってはじまるであろうことは疑いない。海水は多くのブライン細胞および若干の気泡を含んでいる。しかもそれらの形と大きさと分布は千差万別である。それゆえ、海水は破壊に対する組織敏感性が著しい。このために測定された強度は第5図に示したように可成り変動するのである。また、この測定結果の変動のゆえにうえに述べた僅かの温度のちがいによる強度のちがいは明瞭にはあらわれないのであろう。すなわち、この測定の場合には、海水は近似的には上から下まで均一な強度を有しているとみなしたほうが妥当とおもわれる。

得られた曲げ強度は $0.8\sim 2.6$ kg/cm² のあいだに分布し、弾性率は $(1\sim 12)\times 10^9$ C \cdot G \cdot S である。弾性率の値が大幅に変化しているのが目立ち、弾性率が大きな場合には破壊強度も大きくなる関係があるようである。両者の関係を最小自乗法で求めてみると

$$\sigma_c = 1.3 + 0.063 E \quad (1 < E < 12 \times 10^9 \text{ C} \cdot \text{G} \cdot \text{S}) \quad (3)$$

であらわされる。

弾性率が大きい物質は小さい物質よりも破壊強度が大きいことが一般に知られている。この測定の場合にも第(3)式に示されるように、弾性率が大きくなると伴って破壊強度が大きくなる傾向にあることは明らかである。

筆者等の測定においては梁に加えた応力の増加速度が広範囲にわたっているのが、それにしても第5図に示したように、得られた弾性率の値が広範囲にわたっているのは注目すべきことである。弾性率は物質に固有な常数であるから、この測定のように全く同じ条件下で生成され、しかも連続している海水の弾性率が第5図のように広範囲に変化するのは一見奇異におもわれる。しかし、海水は顕著な粘弾性的性質を示す物質として知られているのでその弾塑性的性質が、いろいろの時定数をもったマクスウエル模型の組合せであらわされると考えることができる。そうすると、応力を加える速度が変わるとそれぞれに対応する弾性率が測定されてもよい筈である。しかも力を加える速さが大きくなるほど、時定数の短い、いいかえると固有振動数の高い、すなわち、弾性率が大きいスプリングが応対する結果、大きな弾性が測定されることになる。このようにして、力の増加速度を大幅に変えて変形させた筆者等の測定では

いろいろの大きさの弾性率 E の値が測定され、しかも応力の増加速度と弾性率の値は正比例することが期待される。

第5図に示した σ_c と E の関係から破壊の瞬間の梁の最大歪量を求めると $(14 \sim 1.3) \times 10^{-4}$ である。

すでにのべたようにこの測定では人力を利用して力を加えた。そのために、たとえば第2、3図のように、はじめの短い時間のあいだは力がほとんど加わらないで、その後急激に力、したがって、変位が増加している場合が多かった。このため応力が加わっていた時間として力を加えていた全期間をとるよりも、第3図に示していたように、力がほぼ直線的に増加するようになってからの力-時間曲線を外挿して時間の原点とするほうが妥当であろうと考えられる。このようにして第3図のNo. 33の測定では力が加わっていた時間は0.52秒であったとみなすことにする。他のすべての試料についてもこのようにして求めた力の実質継続時間を用いて、梁の支持点における長さ方向の最大応力 σ_x の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ を求めた。

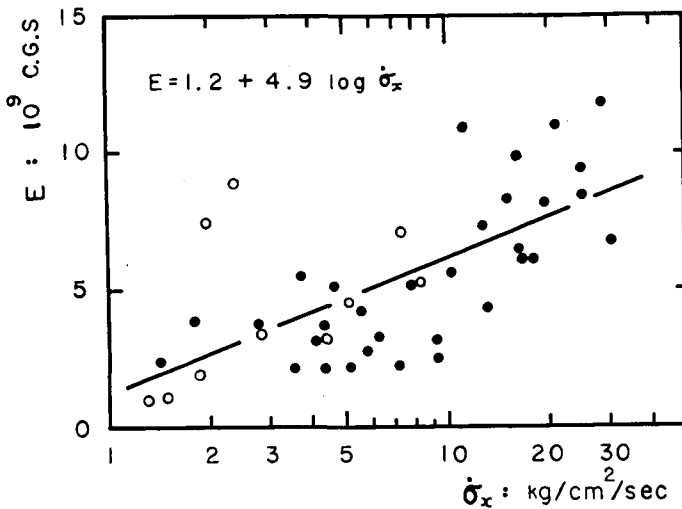
最大歪力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ と弾性率 E の関係を示したのが第6図である。 $\dot{\sigma}_x$ は対数量度であらわしてあり、 $\dot{\sigma}_x$ が大きくなるに伴って E が大きくなることは明らかである。 $\dot{\sigma}_x$ が大きくなるにつれて E の上昇の割合はゆるやかになり、ほぼ 10^{10} の値に達している。この最終的な弾性率の値は超音波^{3),5)} で測定した海水の弾性率の値に可成り近く、 $\dot{\sigma}_x$ の小さいときの弾性率の値は静的測定によって求めた値⁶⁾ とほぼ一致している。第6図の関係は

$$E = 1.2 + 4.9 \log \dot{\sigma}_x \quad (1 < \dot{\sigma}_x < 30 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}) \quad (4)$$

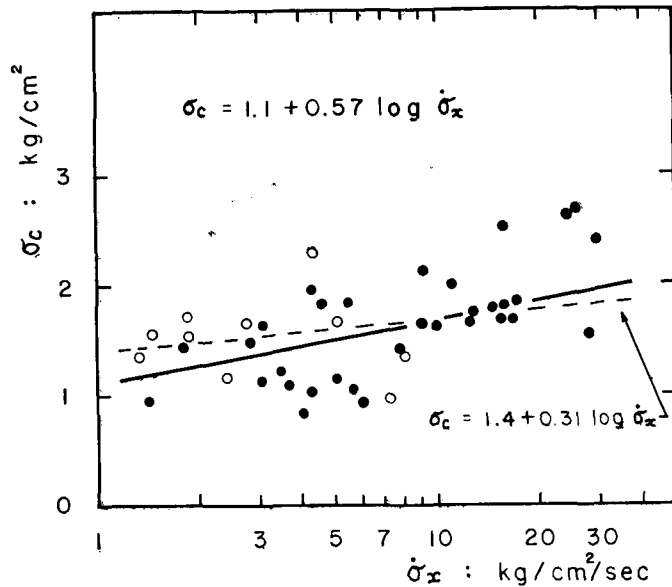
であらわされる。

(3) および (4) 式から、曲げ強度 σ_c は $\dot{\sigma}_x$ の関数としてあらわされ次の式になる。

$$\sigma_c = 1.4 + 0.31 \log \dot{\sigma}_x \quad (5)$$



第6図 最大応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ と弾性率 E の関係 (白丸は梁の上を持ち上げて曲げた場合、黒丸は押しさげて曲げた場合)



第7図 曲げ強度 σ_c と応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ の関係 (点線は(3), (4)式から求めた(5)式の関係を示す)

すなわち、 $\dot{\sigma}_x$ が大きいかほど σ_c が大きくなる筈である。

第7図は実測された σ_c と $\dot{\sigma}_x$ の関係を示したものである。図中の実線は図から求まる両者の関係を示したもので

$$\sigma_c = 1.1 + 0.57 \log \dot{\sigma}_x \quad (1 < \dot{\sigma}_x < 30 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}) \quad (6)$$

であらわされる。同じ図中の点線は(5)式の関係を示している。

この図から、果して期待されたように現場の海氷の曲げ強度は応力の増加速度が増すと大きくなることが明かである。実測された σ_c と $\dot{\sigma}_x$ の関係を示す(6)式と同じく両者の関係を間接的に求めた(5)式とは比較的良く一致しており、 $\dot{\sigma}_x$ を大きくするとそれに対応して弾性率の値が大きくなり、破壊強度が増加することはうたがいない。

1963年2月に紋別港内でも曲げ強度の測定を行なって、 σ_c が $\dot{\sigma}_x$ の増加に伴って大きくなるという結果を得た。この年には変位を測定しなかつたので弾性率を求めることができなかつたが、 $\dot{\sigma}_x$ の増加は弾性率 E の増大を伴ない、その結果曲げ強度 σ_c が大きくなったものと考えても差支えないであろう。ただし、1963年と64年の結果を比較すれば、たとえば $\dot{\sigma}_x = 5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のときに σ_c はそれぞれ約 3 kg/cm^2 と 1.5 kg/cm^2 である。このちがいは、63年には氷の温度が(平均して表面で -2.9°C 、下面で -1.5°C)64年のときの氷の温度(同じく表面で -1.7°C 、下面で -0.9°C)より低かつたことによるのではないかとおもわれる。

V. 結 語

厚さ 23 cm, 氷の温度 $-1.7 \sim -0.9^\circ\text{C}$ の曲げ強度を Key-method を用いて測定し、同時に

加速度計を利用して梁の沈下量も測定した。それらの結果次のことがわかった。

1) 曲げ強度 σ_0 は $0.8 \sim 2.4 \text{ kg/cm}^2$ で、梁の先端を上を持ち上げて曲げ破壊させた場合と下に押し下げた場合のあいだには意味のあるほどのちがいは認められなかった。

2) 梁の沈下量と加えた力から求めた弾性率 E は $(1 \sim 12) \times 10^9 \text{ C} \cdot \text{G} \cdot \text{S}$ であった。

3) 応力の増加速度 $\dot{\sigma}$ を大きくすると (4), (6) 式であらわれるように σ_0 も E もともに大きくなる。

ただし、すでに述べたようにこの報告に示した弾性率 E は弾性論で定義される弾性率とは一致しないかもしれないが、この点については近いうちに確かめたいとおもっている。

おわりにのぞみ、現地観測に際しては、紋別漁業協同組合、北海道開発局紋別港修築事業所、紋別市役所の御援助を得たことを厚く感謝いたします。測定および結果の整理に関しては低温科学研究所海氷研究グループの諸氏および同雪氷関係グループの方々の御協力を得たことを付記し謝意を表わします。

文 献

- 1) Butkovich, T. R. 1956 Strength Studies of sea ice. SIPRE. Res. Rep., **20**, 15.
- 2) Weeks, W. F. and Anderson, D. L. 1958 An experimental study of young sea ice. Trans. Amer. Geophys. Uni., **39**, No. 4, 641-647.
- 3) Brown, J. H. 1963 Elasticity and strength of sea ice. Ice and Snow, Edited by W. D. Kingery, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 79-106.
- 4) 田畑忠司・藤野和夫 1964 海水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.
- 5) Langleben, M. P. and Pounder, E. R. 1963 Elastic parameters of sea ice. Ice and Snow, 69-78.
- 6) 田畑忠司 1960 海水の力学的性質の研究 V. 曲げ破壊強度の測定. 低温科学, 物理篇, **19**, 187-202.
- 7) 田畑忠司 1962 同 上 VI. 静荷重による曲げ. 低温科学, 物理篇, **20**, 187-198.

Summary

This paper concerns a cantilever sea ice beam test *in situ*. The test was carried out on thin (23 cm), shore fast ice at Monbetsu-Harbour during the period February 15-19, 1964. The width of the beam was 30-40 cm and the length was 1.5 m. A very thin ice beam (8-10 cm) 1 m long, was also tested. Both upward and downward forces were applied. The bending force, F , was applied manually with a vertical wooden lever attached to the horizontal lever, measured with an electric load-cell, and recorded with an oscillograph. The acceleration of the bending, a , was also measured with an accelometer placed on the free end of the beam, and recorded.

The maximum and minimum values of the temperature profile of the ice as obtained with a series of thermo-couples are shown in Fig. 1.

An example of the record of the bending force, F , and the acceleration, a , is shown in Fig. 2. Integrating the acceleration, the authors obtained the velocity, V , and the deflection, d , of the beam, as shown in Fig. 3. Which also shows the change in the

applied force, F . In Figs. 4, (a) and (b), F is plotted against d . It is obvious from these figures that the beam deflected and broke as an elastic substance. Young's modulus for the sea ice beam may therefore be obtained from equation (1), where F_c is the force applied to the free end of the beam at failure, l is the length, and b the width, and h the thickness. It must be noted, however, that since no recovery was observed in the deflected beam when the force removed, the authors cannot conclude that the beams are truly elastic.

In any case the flexural strength of the beam, σ_c , is represented by equation (2).

The relation between the calculated flexural strength, σ_c , and Young's modulus, E , is shown in Fig. 5, and by equation (3). Fig. 6 and equation (4) show the relation between E and the increasing rate of the maximum tensile stress at the surface of the beams, $\dot{\sigma}_x$. As is the case with most substances, the flexural strength of sea ice beams increases with increasing Young's modulus, E , and Young's modulus is dependent upon $\dot{\sigma}_x$.

As is shown in Figs. 5 and 6, there was little difference between the results obtained with downward (solid circles) and upward (open circles) forces, and it may be therefore assumed that the strength of the tested sea ice beams was nearly constant from top to bottom.

The relation between σ_c and $\dot{\sigma}_x$ may be calculated from equations (3) and (4), giving equation (5) shown by the dotted line in Fig. 7. The solid line in Fig. 7 indicates the observed relation between σ_c and $\dot{\sigma}_x$, which is represented by equation (6). Equation (5) and (6) show a similar tendency, and the same relation between σ_c and $\dot{\sigma}_x$ was obtained by the authors in 1964 (Ref. 4). It may be concluded that the flexural strength of sea ice beams increases with increasing rate of tensile stress because Young's modulus increases with increasing rate of tensile stress.