



Title	海氷の力学的性質の研究 : 現場における曲げ強度の測定
Author(s)	田畑, 忠司; 藤野, 和夫
Citation	低温科学. 物理篇, 22, 147-154
Issue Date	1964-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18013
Type	bulletin (article)
File Information	22_p147-154.pdf



[Instructions for use](#)

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 —

田畑忠司・藤野和夫

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和38年12月受理)

I. ま え が き

結氷板から切り出した小試料を用いた海水の曲げ強度の研究は多くの研究者によってなされている。しかし海水はひとたび結氷板から切り出してしまうと、天然の場合と温度条件が変わるばかりでなく、海水中に含まれているブラインが流下してしまう。そのために一旦切り出した小試料について得られた結果と天然の結氷板の強度とを単純に比較することができない場合が多い。この欠点を避けるために、Butkovich¹⁾, Weeks 及び Anderson²⁾, Brown³⁾などは結氷板をそのまま利用して海水の曲げ強度を測定した。これらの測定にはいずれも結氷板の一部を切り取って氷の片持梁をつくり、その梁の曲げ強度を測定する方法、いわゆる *Key-method* が用いられている。しかし得られた結果は互いにあまりよくは一致していない。海水の曲げ強度は海水自身の温度・塩分・構造などに関係することは言うまでもない。したがって、それぞれことなつた成長条件の海水について測定された値が互いに多少ことなつた結果を示したとしてもあまり異とするにあたらぬかもしれない。しかしそのほかに上記諸氏が測定に際して梁に加えた破壊応力の増加速度はそれぞれ異なっている。一般に物質の破壊強度は加えられた応力の増加速度が大きくなると大きくなることは周知の事実である。海水も脆性破壊をするときにはこの例外ではないことは田畑⁴⁾ が海水の小試料について行なつた曲げ強度の研究のさいに確かめられている。それゆゑ、上記諸氏の結果が一致しなかつたのは梁に加えた破壊応力の増加速度がそれぞれ異なつていたことにもよるのであらうと考えられる。

この点に注目して、筆者等は応力の増加速度を変えながら現場で海水の曲げ強度を *Key-method* を用いて測定した。測定は1963年2月13~18日の間に紋別港内 (44°21'N, 143°21'E) で行なつた。当時港内外は定着氷でおおわれており、港内の氷厚は約26cmであつた。測定は応力の増加速度をいろいろ変化させながら行なつたのであるが、果して、応力の増加速度が大きくなると海水の曲げ強度は大きくなり、しかもその影響は無視できぬほど大きいことが確かめられた。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第663号

II. 測定方法

港内の結氷板上に幅 30~40 cm, 長さ 2.5~3 m の長方形を作図しその短い一辺を残して他の三辺を周囲の氷から切り離すことによって片持梁を作り, この梁の曲げ強度を測定した。

測定期間中, 熱電対を用いて氷の表面と表面から 1, 2, 4, 7, 10 および 15 cm の深さの各点の氷の温度および氷の下面から約 10 cm 下の水温を連続的に記録させた。

梁はふたつの方向に曲げ破壊させた。すなわち, 半数の梁は先端に上から下向きに力を加えて曲げ, 残りは梁の先端を水平方向に引張って曲げた。いずれの場合にも人力と挺子を利用して曲げた。梁の先端に加える力はなるべく一定の割合で増加するように心掛けて加え, しかも測定たびごとにこの力の増加する速さを変えるようにした。梁に加わった力は電氣的荷重計を用いて検出し, その増加の様子を電磁オシログラフに記録した。測定は 42 本の梁について行なったが, 梁が曲げ破壊したときに先端に加わっていた力は 23~73 kg であった。

梁の大部分は期待されたようにその根元の所で破壊した。破壊点の梁の表面における長さ方向の引張り応力 σ_x の破壊の瞬間の値 σ_c を梁すなわち海水の曲げ強度とみなした。

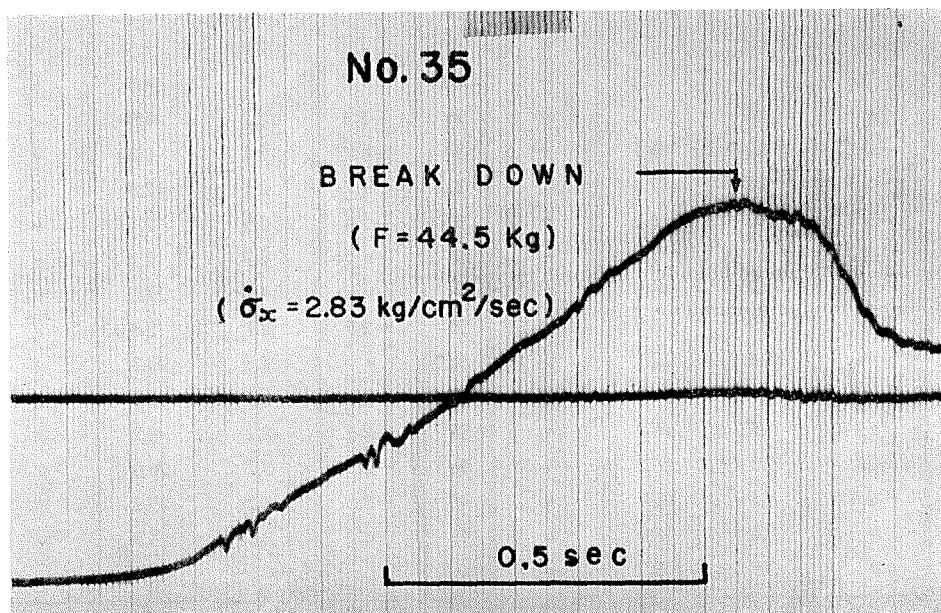
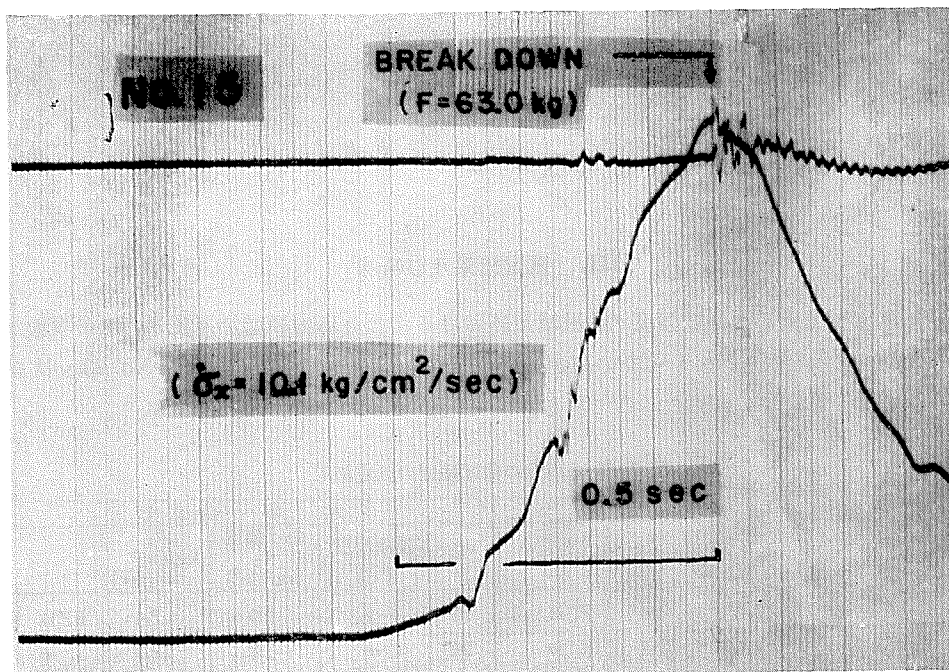
梁の先端に加わった力 F の増加の例を第 1 図に示した。人力を利用して梁を曲げたにも拘わらず, 力はほぼ直線的に増加して遂に破壊にいたっていることがわかる。

測定に際して梁の沈下量は測定しなかった。そのために, 梁が果して弾性的に曲りながら破壊にいたったかどうかは直接確かめることができなかつた。しかし, 次のようなことから間接的にこのことを確かめることができる。

加重中に梁の曲げが急に变化するような手ごたえはなかつた。また梁が弾性的な曲げ変形をしたとして破壊点の表面での引張り応力 σ_x の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ を求めてみると 2~26 kg/cm²/sec になる。測定時の氷の温度については, のちにくわしく述べるが, -1.5~-3.7°C であった。筆者のひとり田畑が行なった結氷板から切り出した小角柱の曲げ強度の測定結果⁴⁾によると, -3°C のときには $\dot{\sigma}_x$ が 2~3 kg/cm²/sec 以上のときには海水はあたかも弾性体のように変形しつつ破壊にいたる, すなわち脆性破壊をすることがわかっている。測定時の氷温がこの実験よりもいくらか高いのであるが, 梁はほぼ弾性的に変形しつつ破壊にいたったものとみなすことができよう。

また同じく田畑が結氷板中の破壊強度と弾性率の垂直分布を測定した結果⁴⁾によると, 氷の各層が -3°C のときには, 氷の下面を占める数 cm の厚さのいわゆるスケルトン層をのぞいた他の部分では, 曲げ強度及び弾性率が深さとともに減少する海水もあり, また逆に深い所にそれらの値が大きい部分がある場合もある。しかもそれらの値の深さによるちがいはあまり大きなものでないことが知られている。測定期間中の氷層中の垂直方向の温度差は, わずか 0.5~2°C であった。それゆえ, 測定に用いた梁の強度と弾性率の垂直分布は未知ではあるが, 結果の整理を簡単にするために梁は上から下まで均質なものと見做してもあまり大きな間違いではないとおもわれる。

このようにして, 測定に用いた海水の梁の曲げ強度 σ_c は近似的に次の式を用いて求めるこ



第 1 図 梁の先端に加わった力の増加の例
(水平な線は梁の支持端附近の水板の振動)

とができる。

$$\sigma_c = \frac{6Fl}{bh^2} \quad (1)$$

ここで F は梁の破壊の瞬間にその先端に加わった荷重, b, h, l はそれぞれ梁の幅, 厚さ及び長さである。

III. 測定結果及び吟味

(1) 式によって求めた曲げ強度 σ_c , 破壊点における引張り応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$, 氷の表面温度などを第1表に示した。No. 1~21 の測定は押し下げ法によって強度を求め, No. 23~41 は水平引張りによって強度を求めたものである。

第1表 海水の曲げ強度の測定結果

鉛 直 曲 げ				水 平 曲 げ					
No.	表面温度 (°C)	曲げ強度 σ_c (kg/cm ²)	$\dot{\sigma}_x$ (kg/cm ² /sec)	No.	表面温度 (°C)	曲げ強度 σ_c (kg/cm ²)	$\dot{\sigma}_x$ (kg/cm ² /sec)		
1	-3.1	2.7	4.0	FEB. 13	23	-2.2	2.9	7.4	FEB. 16
2	"	2.7	2.8	"	24	"	3.8	12.0	"
3	"	3.1	2.0	"	25	"	4.2	17.3	"
4	"	3.1	2.1	"	26	"	3.8	13.2	"
5	"	1.9	2.3	"	27	"	2.4	3.3	"
7	-3.3	2.7	12.2	"	28	"	3.1	4.3	"
8	"	3.4	7.0	"	29	-2.3	2.7	7.0	"
9	-3.4	3.0	8.1	"	30	"	2.1	2.8	"
10	-3.7	3.8	17.4	FEB. 15	31	"	2.1	2.8	"
11	-2.2	3.5	6.3	"	32	-2.4	2.3	1.1	"
12	-2.0	4.2	7.1	"	33	"	2.9	2.2	"
13	"	3.9	18.5	"	34	"	4.4	27.0	"
14	"	3.9	8.9	"	35	-2.5	2.7	2.8	"
15	"	4.4	10.1	"	36	"	4.3	23.3	"
16	"	4.7	38.2	"	37	-3.0	3.5	11.9	FEB. 18
17	"	4.5	18.9	"	38	-2.6	2.2	8.2	"
18	-2.2	5.0	26.2	"	39	-2.3	3.7	26.0	"
19	-2.4	4.3	25.8	"	40	-2.2	3.9	25.8	"
20	"	3.4	18.9	"	41	"	2.8	4.5	"
21	"	3.9	9.2	"					

海水の塩素量は強度を測定した氷のすぐ近くから切り出した試料の融解水についてモールの銀滴定法で求め, 表面から 10 cm までの塩素量は平均 5.5%, 10~15 cm の平均が 7.4% であった。

測定期間中の氷の温度及び水温の測定の結果は第2表に示した。

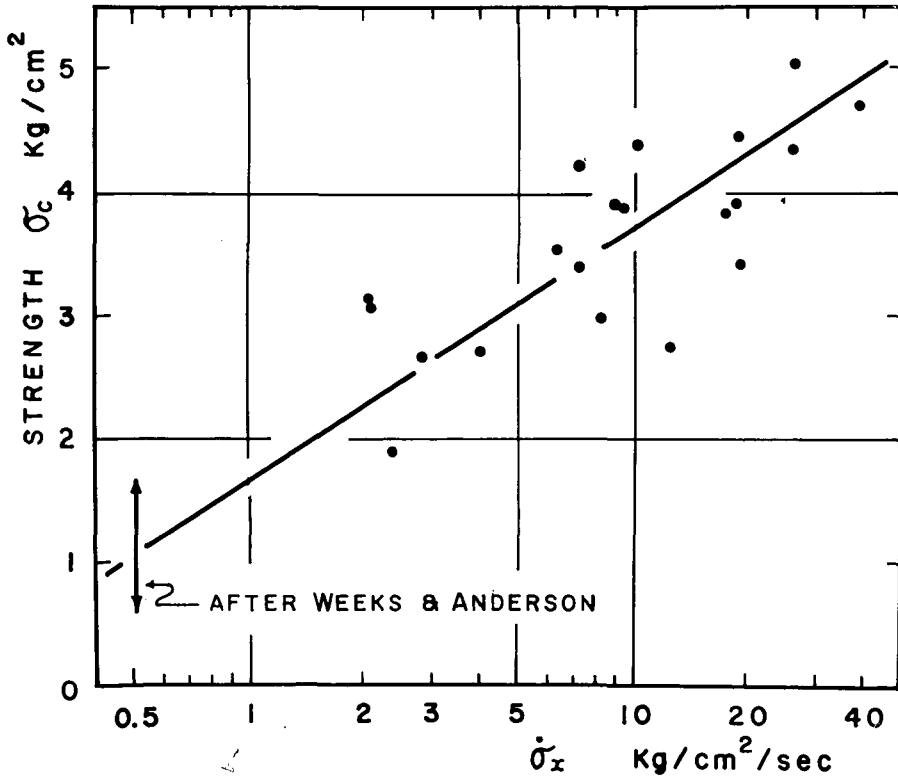
温度が目立って変動しているのは厚さ 26 cm の氷層のうち、表面の僅か 1~2 cm の厚さの層だけで、その他の部分はほぼ一定の温度であったと云うことができよう。すなわち、測定はほぼ同一の温度条件下で行なわれたとみなすことができる。

測定をおこなった 2 月 13 日~18 日の間に氷の厚さはほとんど増加しなかった。また氷の温度分布も期間中ほぼ同一であったので、第 1 表に示したように曲げ強度の値が変動しているのは、同じく表中に示した応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ のちがひによるものと考えることができる。

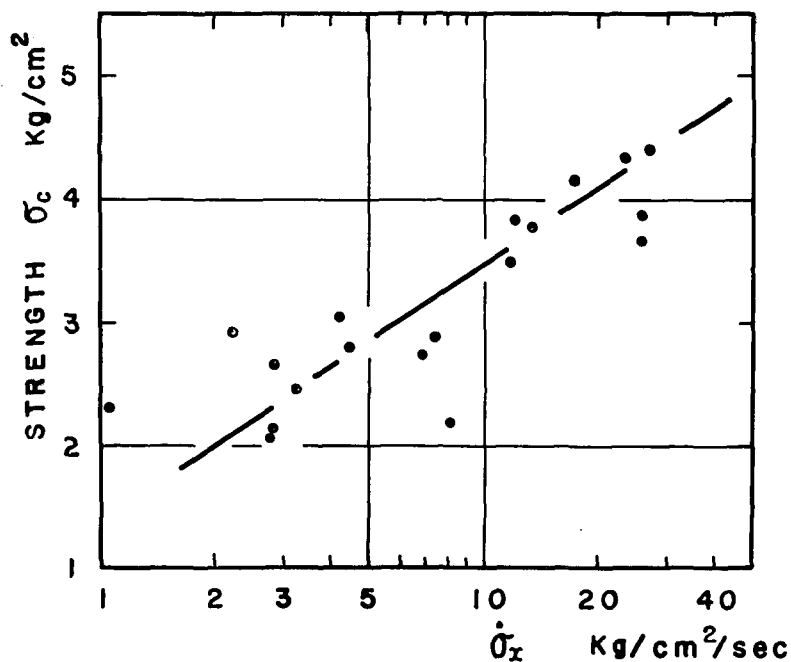
押し下げ及び水平引張りによって得られた第 1 表の結果をそれぞれの場合に分離して、曲げ強度 σ_c と応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ との関係を示したのが第 2 図と第 3 図である。これらの図から、現場の海氷の曲げ強度は応力の増加速度が増すにつれて大きくなることが明らかである。図中に直線で示した両者の関係は、押し下げ破壊のときには、

第 2 表 氷の温度の測定結果

位置 (cm)	温度 (°C)
氷の表面	-2.0~-3.7
表面から 1	-2.1~-3.3
2	-2.1~-3.0
4	-2.3~-2.8
7	-2.3~-2.6
10	-2.1~-2.4
15	-1.8~-2.2
水 温	-1.4~-1.5



第 2 図 海氷の曲げ強度と応力の増加速度との関係 (押し下げ)



第3図 海氷の曲げ強度と応力の増加速度との関係 (水平引張り)

$$\sigma_c = 1.65 + 2.05 \log_{10} \dot{\sigma}_x \quad (2)$$

水平引張り破壊に対しては、

$$\sigma_c = 1.40 + 2.07 \log_{10} \dot{\sigma}_x \quad (3)$$

であらわされる。但し $2 < \dot{\sigma}_x < 40 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ である。

両式から、押し下げ法で得られた強度が僅かに大きいことがわかる。海氷は水平方向には一様な構造をしている。それゆえ、水平引張りの場合には、曲げの方向に均質な構造をしており、得られた結果が海氷の横方向の平均の強度を示すことは疑いない。押し下げで得られた強度の値が、水平曲げで得られた値よりもいくらか大きいのは、最も温度が低かった表層部分の強度がその下の部分よりも大きかったことを示すのかもしれない。しかしふたつの方法による測定結果がこの程度のちがいで一致したことは、海氷は厚さの方向にも均質であるとして押し下げ法による測定に対しても、(1)式を用いて曲げ強度を求めたことが近似的には正しかったことを意味している。

Weeks 及び Anderson²⁾ が *Key-method* で曲げ強度を測定した海氷は厚さ 40 cm 以下、塩分量 8~13% (塩素量 4.4~7.2%) で、筆者らの海氷とほぼ同じ条件である。Weeks は海氷の梁を持ち上げる方法と押し下げる方法で測定している。押し下げ法でしかも -3.5°C 以上の温度で得た強度の値 (27 個) を第 2 図に同時に記入してある。ほぼ同じ条件の海氷について全く同じ方法で測定した Weeks と筆者らの得た曲げ強度の値の相違は、応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ のちがいによるものであるということができよう。

Butkovich は $-3\sim-8.5^{\circ}\text{C}$ 、厚さ $46\sim47\text{ cm}$ の海氷の梁を $0.2\sim0.7\text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ の応力増加速度で曲げ強度を測定し、 $2.2\sim4.0\text{ kg/cm}^2$ の曲げ強度を得ている。この値は筆者等の得た値と比較するといくらか大きい、その原因は測定温度が筆者のそれよりもかなり低いこと、および塩素量が $2.5\sim4.8\%$ (塩分量 $4.6\sim8.7\%$)で筆者等の氷よりも可成り少ないことによるものとおもわれる。更に、梁が弾性的に変形して破壊にいたったと考えるには応力の増加速度が小さすぎる。したがって筆者らの測定結果と直接比較することはできない。

Brown は平均 -11°C の海氷を $4\sim8\text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ の応力増加速度で破壊して $2\sim5\text{ kg/cm}^2$ の強度を得ている。第2図の結果を比較するとこの値はいくらか大きい、それは氷の温度が低いためとおもわれる。

Brown は片持梁法による曲げ強度の測定にあたっては、梁の支持端における応力集中を無視することができないことを指摘している。この報告ではこの点は考慮していないが、近い将来に充分検討されるべき問題点だとおもわれる。

IV. 結 語

沿岸の厚さ 26 cm の定着氷上で、海氷の片持梁をつくり、その先端に荷重を加えて、垂直下方および水平方向に曲げ破壊したときの曲げ強度を測定した。測定は、梁に加わる力の増加速度をいろいろ変え乍ら行なった。その結果次のことがわかった。

1) 測定された曲げ強度は $1.9\sim5\text{ kg/cm}^2$ で、梁を垂直下向きに曲げたときの曲げ強度のほうが水平方向に曲げた場合よりもいくらか大きかった。

2) 現場の海氷の曲げ強度 σ_x は(2)、(3)式であらわしたように、梁に加わる破壊応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ によって著るしく影響され、後者が大きくなるほど強度は大きくなる。

終りにのぞみ、現地観測に種々の御便宜を与えて下さった紋別市漁業協同組合、北海道開発局紋別港湾修築事業所、紋別市役所に厚く感謝いたします。また測定に際しては低温科学研究所海氷研究グループの諸氏の御協力を得たことを付記し感謝の意を表します。

文 献

- 1) Butkovich, T. R. 1956 Strength studies of sea ice. SIPRE. Res. Rep., **20**.
- 2) Weeks, W. F. and Anderson, D. L. 1958 An experimental study of strength 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 1960 海氷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**, 187-201.

Summary

Studies of the strength of small samples of sea ice removed from an ice sheet have been made by many writers, however, there are few measurements of the strength of sea ice *in situ* (Butkovich 1956, Weeks and Anderson 1958, Brown 1962).

The present report concerns cantilever ice beam test made on thin (26 cm), shore fast sea ice at Monbetsu, Hokkaido (44°21'N, 143°21'E). The object of this study was to determine the relation between flexural strength and the increasing rate of applied stress.

A U-shaped channel was cut in the ice sheet using an ice chain-saw and a hand saw. A cantilever ice beam with one end attached to the ice sheet was made with this channel. The width of the beam was 30–40 cm and the length was 2.5–3.0 m. The ice beam was bent in two directions, vertically down wards and horizontally. In the vertical measurement a force was applied manually by a vertical wooden lever attached to the horizontal lever. Horizontal force was also applied manually by pulling a chain which had been placed around the end of the ice beam. The applied force was measured with an electric load cell and recorded with an oscillograph.

Examples of the changes in the bending force F with time are seen in Fig. 1. Since the bending force increases linearly, the tensile stress within the beam also increases linearly between 2–40 kg/cm²/sec. It is assumed that the beam was deflected and broken like an elastic substance, because of the greatly increasing rate of tensile stress (Tabata 1960).

The temperature of the ice sheet was recorded using a series of thermocouples frozen into the ice sheet at vertical intervals of few centimeters. The vertical distribution of temperature during the period of measurement is shown in Tab. 2. It can be assumed from these results that the temperature profile of the ice is almost constant throughout the experiment.

The vertical distribution of chlorine content of the upper 15 cm layer of the ice sheet was measured. The mean chlorinity of the upper most 10 cm was 5.5‰, and of the lower 5 cm 7.7‰.

The flexural strength σ_c is calculated from the equation (1), where F is the force applied to the end of the beam at failure, l is the length of the beam; b and h are the width and the thickness of the beam respectively. The results of the measurements are shown in Tab. 1. The relation between the obtained strength σ_c and the increasing rate of the maximum tensile stress at the surface of the ice beam $\dot{\sigma}_z$ is shown in Figs. 2, and 3. Fig. 2 is the relation obtained by vertical application of force and is formulated by (2). Fig. 3 is the result of horizontal test and the relation is represented by equation (3). In Fig. 2, the strength obtained by Weeks and Anderson (1958) is also shown.

It is obvious from these figures and equations that the flexural strength is remarkably dependent upon the increasing rate of applied stress, and that vertical test shows a little larger strength than that of horizontal test. It is concluded that the increasing rate of applied stress $\dot{\sigma}_z$ is also an important controlling factor of the flexural strength of sea ice *in situ*.