



Title	ボスニア湾海氷調査 II : 曲げ強度の測定
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi; 鈴木, 義男 他
Citation	低温科学. 物理篇, 33, 199-206
Issue Date	1976-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18286
Type	departmental bulletin paper
File Information	33_p199-206.pdf



ボスニア湾海水調査 II***

— 曲げ強度の測定 —

田畑忠司・鈴木義男・青田昌秋

(低温科学研究所)

(昭和50年10月受理)

I. ま え が き

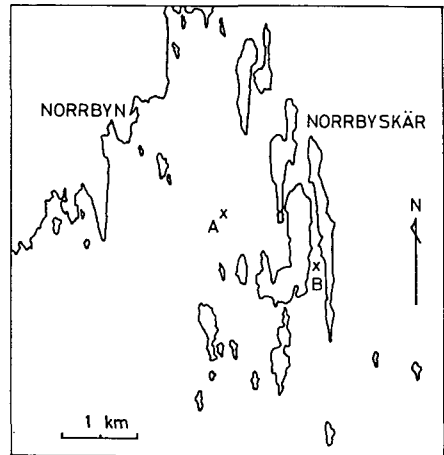
海氷の強度は氷の温度と氷中に含まれる塩分量、もしくは海氷中に占めるブラインの体積比(これは温度と塩分量の函数である)に関係することが知られている。すなわち、温度が高くて塩分量が多いほど、あるいはブラインの体積比が大きいほど海氷の強度は小さくなる。

海氷の中に含まれる塩分の量は、主としてその氷が生じたもとの海水の塩分量と氷の成長速度に依存する。

氷中の塩分量と曲げ強度との関係については数多くの報告がなされている¹⁾が、それらはいずれも塩分量が30%以上の海水から出来た塩分量の多い海氷についてであり、塩分量の少ない海氷についての現場測定はほとんどなされていない。

ボスニア湾の海水の塩分量は北極海やオホーツク海の海水の数分の1の4~6%であり、したがって海氷中の塩分量も極めて少ないと期待される。

筆者等は1975年2月~3月のボスニア湾海氷調査の際に3月5~16日、ボスニア湾のノルビッチャー島周辺の2点において片持梁法によって海氷の曲げ強度の現場測定を行なった。測定に際しては加重時の梁の先端に加わる力および変位量を測定して曲げ強度および弾性率を算出した。



第1図 測定地域

II. 測定方法

測定は氷板の一部を“コ”の字形に切り除いて氷の片持梁をつくり、その梁の曲げ強度を測定するいわゆる key-Method によった。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1720号

** 北海道大学低温科学研究所 流水施設研究施設 研究報告 第45号

水の梁の先端附近に挺子を利用し電気加重計を介して人力で下から上向きに力を加え氷を破壊した。同時に梁の先端に変位計を載せて周囲の氷板に対する変位量を測定した。梁の先端に加える力ではできるだけ一定の割合で増加するように心掛けた。海水の曲げ強度は応力の増加速度によっても異なる値を示すことが知られている。今回の測定では応力の増加速度は $0.5 \sim 5.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であった。梁が曲げ破壊したときに先端に加わった力は $75 \sim 180 \text{ kg}$ で、梁の大部分は期待されたようにその支持端の所で破壊した。

測定は3月5～8日、第1図に示したノルビッチャー島の近くのA域で、13～16日にはB域で計33本の試料について行なった。A域の水厚は約34 cm、B域で約50 cmである。また梁の長さおよび幅はそれぞれ1.8～3.0 mおよび約30 cmである。

III. 測定結果

1. 海水中の温度および塩分量

海水の強度はそれ自身の温度と塩分量に対する依存度が大きい。

測定域Aにおいては測定期間中氷の表面から底面(約33 cm)まで約5 cm毎に熱電対を埋設して水温の変化を記録した。第2図に表面と表面から30 cmの温度変化を示した。測定域Bでは水温の連続測定はしなかったが曲げ強度の測定時に棒状温度計を用いて氷の平均温度を測定した。測定期間中気温が異常に高く⁴⁾、曲げ強度の測定時の水温は両点とも融点に近く、A域で $-0.4 \sim -0.3^\circ\text{C}$ 、B域で $-0.7 \sim 0^\circ\text{C}$ であった。

両測定点の海水の塩分量はA域が4.17‰、B域で4.02‰であった。第1表には両測定点の各層の塩分量を示す。

北極海、オホーツク海等の海水の塩分量は30～34‰であり、そこで生成する海水中の平均塩分量は水温 $-2 \sim -1^\circ\text{C}$ で4～10‰であり温度が上昇するとさらに増大する。これにくら



第2図 B点の垂直断面の薄片

第1表 氷および海水の塩分量測定結果

A 点		氷厚 33 cm	B 点		氷厚 51 cm
位	置	塩分量 (%)	位	置	塩分量 (%)
(cm)			(cm)		
0~5		0.63	0~9		0.68
5~14		0.67	9~17		0.84
14~25		0.68	17~28		0.72
			28~38		0.60
			38~51		0.53
海	水	4.2	海	水	4.0

べてボスニア湾の海水の塩分量は極めて低いといえる。なお海水の塩分量はコアドリルで採取した海水資料を切断し、その融解水を電気伝導度計で測定したものである。

2. 海水の内部構造

測定に用いた海水の塩分量は僅か 0.7‰ にすぎなかったにも拘わらず、その結晶構造はよく知られている塩分の濃い海水に特有なそれと全く同一であった。A 点の氷の厚さは約 33.5 cm で、表層から 12 cm ぐらいまでが粒状構造でその下はモザイク状構造であり、その様子はボスニア湾海水調査の報告 (文献 4) に詳細に紹介されている。B 点では氷厚が約 50 cm で、この氷を厚さおよそ 1 cm に切って水に浮かべたのが第 2 図である。写真の右側が氷の表面である。写真の表面からほぼ 8 cm ぐらいの範囲の白い色の所は粒状構造の氷である。その下の黒く見える所はモザイク状構造の部分である。下面近くの 5 cm ぐらいの白く見える部分はいわゆるスケルトン層にあたる部分で特にブライン細胞の多い部分であるが、結晶構造はモザイク状である。この氷の薄片の偏光写真を第 3 図に示した。A 点の氷の結晶構造と全く同一である。

両地点の氷の厚さはいくらか異なるが、結晶構造もまた塩分量もほとんど同一であることから、その曲げ強度にも大きな違いがないことが期待される。

3. 曲げ強度および弾性率

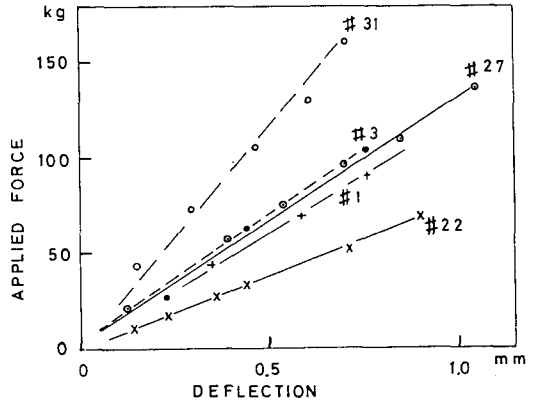
梁の先端に加えた力と先端の変位の関係を数例について第 4 図に示す。

第 4 図から、梁の先端の変位は加えた力に直線的に比例しながら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たわみながら



第2図 B 点の氷の垂直断面の偏光写真

破壊にいたった場合と全く同じ関係を示している。梁が弾性変化をしたのであれば、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取り去ったのちに梁の変位が回復するか否かを測定していないので梁の変形が純弾性的におこっているとは断言できない。しかしここでは第4図の関係から、梁は弾性的に変形し、終に破壊したと仮定することにする。また氷の力学的性質は氷層を通して均質であると思ふことにする。このような立場から、梁の弾性変形の場合の第(1)式を用いて各試料の弾性率 E を求めた。



第4図 梁の先端の変位と力の関係

第2表 海水の曲げ強度および弾性率の測定結果

No.	測定日時	$K = \frac{6l}{bh^2}$ ($\times 10^{-2}$)	力 (kg)	変位 (mm)	曲げ強度 σ (kg/cm ²)	$\dot{\sigma}$ (kg/cm ² ·sec)	弾性率 E (10^{10} dyne/cm ²)	平均水温 ($^{\circ}$ C)	平均塩分量 (%)
1	5日 15:20	3.4	96.5	0.38	3.33	2.15	5.6	0.32	0.58
2	"	3.5	136.0	0.48	4.74	0.81	6.3	0.35	0.58
3	"	3.1	135.3	1.00	4.15	0.93	2.6	0.37	0.58
4	" 16:20	3.6	119.5	0.98	4.34	1.02	2.8	0.40	0.58
6	6日 14:45	5.7	75.0	0.45	4.28	1.71	5.1	0.46	0.58
7	"	3.3	117.8	0.75	3.87	1.24	3.3	0.47	0.58
8	"	3.5	116.8	0.80	4.07	1.29	3.3	0.49	0.58
9	"	3.4	122.3	0.75	4.13	0.83	3.4	0.51	0.58
10	"	3.3	139.0	0.90	4.52	0.91	3.1	0.51	0.58
11	" 16:48	4.0	77.8	1.00	3.12	0.96	3.0	0.52	0.58
12	8日 16:45	4.0	123.3	1.10	4.88	1.40	3.6	0.28	0.58
13	"	3.8	107.5	1.00	4.13	0.67	3.3	0.28	0.58
14	"	4.4	93.5	0.95	4.08	0.98	3.4	0.28	0.58
15	"	3.9	103.0	—	4.03	0.50	—	0.28	0.58
16	"	3.8	101.0	1.00	3.84	0.67	2.9	0.28	0.58
17	" 17:00	4.3	94.5	1.20	4.03	0.60	2.7	0.28	0.58
19	13日 12:20	2.7	107.0	1.20	2.91	1.30	2.9		0.76
20	" 16:15	2.7	71.4	0.85	1.90	1.36	2.6		0.76
21	" 16:45	2.8	97.4	1.10	2.71	1.13	3.0		0.76
22	15日 11:00	1.9	69.0	0.90	1.28	0.37	1.0		0.76
23	" 15:00	1.8	55.8	0.80	1.02	0.94	0.6		0.76
24	" 15:25	1.8	73.0	0.75	1.34	5.02	1.2		0.76
25	" 16:00	1.9	61.1	0.90	1.13	2.21	0.9		0.76
27	16日 09:50	2.4	138.9	1.10	3.29	3.41	3.7	0.76	0.76
28	" 11:20	2.6	111.9	1.10	2.91	1.74	3.4	0.76	0.76
29	" 11:52	2.0	140.7	0.70	2.76	2.67	2.9	0.76	0.76
31	" 12:40	2.0	161.9	0.70	3.26	2.20	3.4	0.76	0.76
32	" 12:56	1.5	181.5	—	2.69	1.05	—	0.76	0.76

$$E = \frac{4Fl^3}{dbh^3} \tag{1}$$

ここでは l , b および h はそれぞれ梁の長さ, 幅および厚さであり, F は梁の先端に加わった力, d はそこの変位である。

力 F と変位 d のあいだに第4図のような直線関係があれば, 支持点の最外側面にはたらく最大引張り応力 σ_x の破壊の瞬間の値 σ_f , すなわち, 曲げ強度は

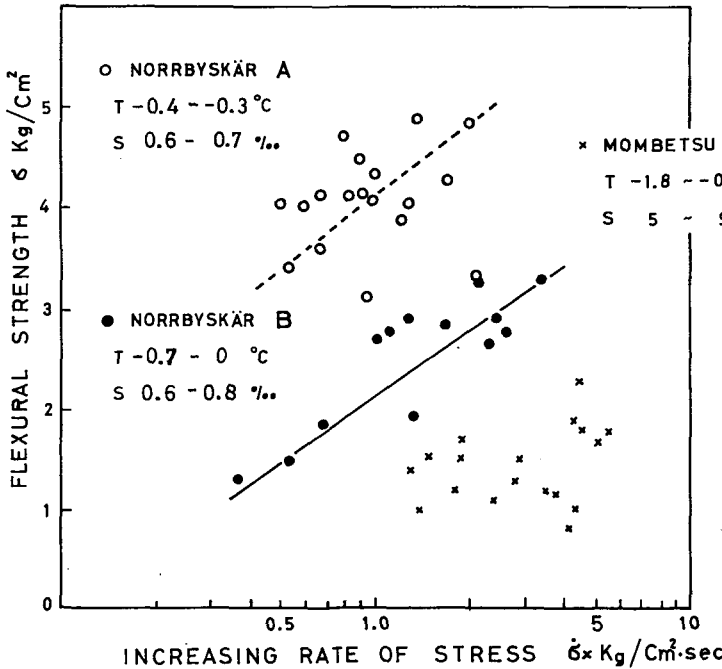
$$\sigma_f = \frac{6l}{bh^2} F = kF \tag{2}$$

で表わされる。ここで F は梁の破壊の瞬間に先端に加わった力である。

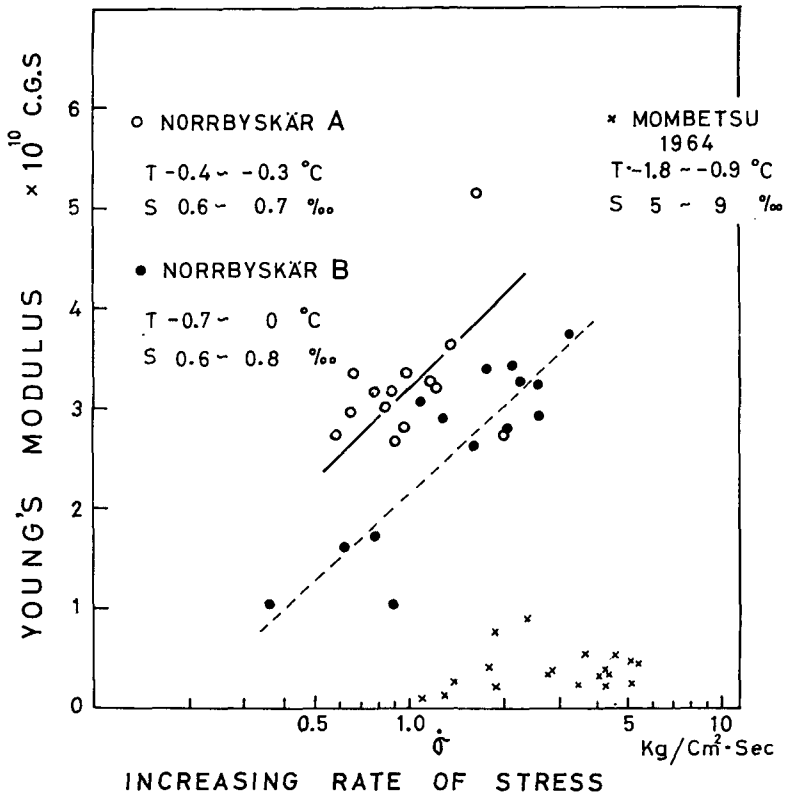
第2表に各試料の形状によって定まる係数 $k = \frac{6l}{bh^2}$, 梁の破壊時の力 F , そのときの変位 d , (1) および (2) 式から求めた弾性率 E , 曲げ強度 σ_f および破壊点における引張り応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ 等を示す。

第2表からも認められるように海水の曲げ強度, 弾性率は応力の増加速度によって異なる値を示す。第2表に示した結果の応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ と曲げ強度 σ_f の関係および応力の増加速度 $\dot{\sigma}_x$ と弾性率 E の関係をそれぞれ第5, 6図に示した。図中ボスニア湾のA点におけるものを白丸で, B点におけるものを黒丸で示した。さらに比較のために田畑²⁾によって測定されたオホーツク海の海水の曲げ強度および弾性率等の一例も同時に記入した。なお温度および塩分量についても同時に図中に示した。

第5図から明らかなようにボスニア湾A点の海水の曲げ強度は応力の増加速度が0.5~2



第5図 応力の増加速度と曲げ強度の関係



第6図 応力の増加速度と弾性率の関係

kg/cm²·sec のときに 3~5 kg/cm² で、B 点では 1~3.2 kg/cm² である。応力の増加速度に比例して曲げ強度が増加する傾向が明らかに認められる。同じ傾向は同図中に示したオホーツク海の氷についての結果にも認められる。A 点と B 点の氷はすでにのべたように、厚さがことなるが温度・塩分および結晶構造がほぼひとしいにも拘わらず、曲げ強度は明らかに A 点の氷が大きい。これは主として氷の結晶構造の微妙なちがいによるものと考えられる。

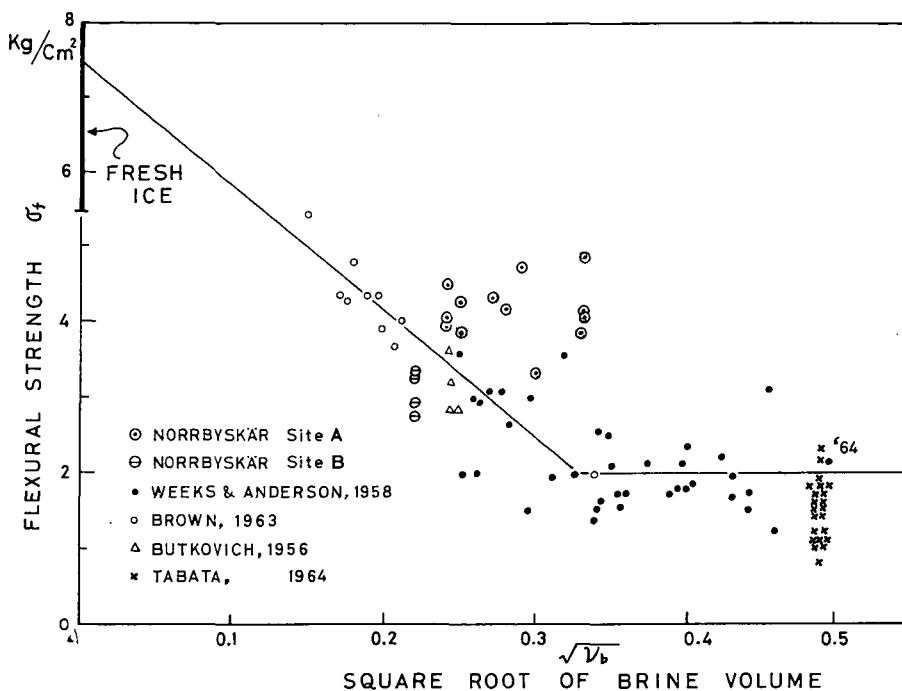
第5図中に示したオホーツク海の海水の曲げ強度は 0.5~2 kg/cm² で、ボスニア湾の氷の強度は之よりもかなり大きい。

弾性率は $1\sim 6 \times 10^{10}$ dyne/cm² であり、これも応力の増加速度に比例して増加している。この値は第6図中に示したオホーツク海の氷のその約 5~10 倍の値である。

ボスニア湾の氷の測定時の温度はその結氷温度にきわめて近く、オホーツク海の氷の測定時のそれよりも明らかに高い。それにも拘らず前者の氷の曲げ強度と弾性率が後者よりも著しく大きい。

その原因としてはボスニア湾の氷の塩分量がオホーツクの氷のその約 10 分の 1 にすぎないことしか考えられない。

Assur⁵⁾ の方法にしたがって第2表中の氷の温度と塩分量からブラインの体積を求め、Weeks の求めた曲げ強度とブラインの体積比の平方根との関係図に記入したのが第7図である。図には第5図に示した田畑らによるオホーツク海の氷についての結果も同時に記入した。



第7図 海水中のブライン体積比と曲げ強度の関係

ボスニア湾の氷の結果の一部は Weeks の実験式から可成りずれており、その原因のひとつとしては結晶構造のちがいによる可能性が考えられるが、詳細は不明である。オホーツク海での測定結果は図の実験式とよく一致している。点が上下に散っているのは破壊応力の増加速度のちがいがあらわれているものである。

IV. 結 語

1975年3月5～16日ボスニア湾のノルビツシャー島(北緯63度,東経20度)周辺の2海域で現場の海水の曲げ強度を片持梁法を用いて測定した。測定時の氷の厚さはA点で約34cm,温度は $-0.5 \sim -0.3^{\circ}\text{C}$,氷の塩分量は約0.6～0.7‰,B点ではそれぞれ45～50cm, $-0.7 \sim 0^{\circ}\text{C}$,0.7‰であった。測定に際しては氷の梁の先端の変位量も測定し,それらの結果次のことがわかった。

1) 梁の先端に加わる応力の増加速度は, $0.5 \sim 5.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ で, 梁の変位量と加えた力から求めた弾性率 E はおよそ $(1 \sim 3.5) \times 10^{10} \text{ C.G.S}$ であり, 曲げ強度はA点で約 $4 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$, B点で約 $(1.5 \sim 3) \text{ kg/cm}^2$ であった。

2) 曲げ強度, 弾性率は応力の増加速度に比例して増大する傾向がみられる。

3) 得られた曲げ強度の結果の一部は, Weeks らの求めた曲げ強度とブラインの体積比の関係を示す実験式と一致しないが, その理由はよくわからない。

4) A, B両地点の氷は厚さが多少異なるほかは, 温度・塩分および結晶構造がほぼ同じであったにも拘らず曲げ強度と弾性率には明らかな相違がみられた。

おわりにのぞみ、現地観測に際しては、スウェーデン国立気象海象研究所、主任研究員 Thompson 博士、ならびにウメオ大学研究員 Åke 氏御夫妻をはじめノルビッチャー島の皆様の暖かい御援助を得たことを記し、厚く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Anderson, D. L. and W. F. Weeks. 1958 A theoretical analysis of sea ice strength. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **39**, 632-640.
- 2) Tabata, T., Fujino, K. and M. Aota 1967 The flexural strength of sea ice *in situ*. In *Physics of Snow and Ice*, Inst. of Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., Vol. **1**, 539-550.
- 3) Weees, F. and A. Assur. 1968 The mechanical properties of sea ice. In *Proceeding of the Conference on Forces that Ice can Exert Against Structures*, Laval Univ., NRC., Canada, Ass. Comm. on Geotechnical Research, Technical Memo No. **92**, p. 25-78. Also CRREL Monograph IIC3 (AD 662716).
- 4) 田畑忠司 1975 ポスニア湾海氷調査. 低温科学, 物理篇, **33**, 191-198.
- 5) Assur, A. 1958 Composition of sea ice and its tensile strength. In *Arctic Sea Ice*. U.S. NAS-NRC., Publ. **598**, p. 106-138.

Summary

Flexural strength of sea ice was measured in Norrbyskär, Sweden, from March 5 to 16, as a part of the project, "Ice Study in the Gulf of Bothnia". Measurements were carried out at Stations A and B as shown in Fig. 1. Thickness of ice was 35 cm at A and 51 cm B. It was fairly warm and the surface temperature of ice was -0.3 to -0.8°C (See Fig. 3 of reference 4). Despite that the ice had such a very low salinity as 0.7‰, its crystallographic structure was very similar to that of normal sea ice.

The cantilever beam test was used for the measurement of strength. Seventeen tests were carried out at Station A and twelve at Station B. The width of test beams was about 30 cm; their length ranged from 1.8 to 3.0 m. The force, applied manually through a lever to the free end of a beam, was measured by an electric load cell connecting the lever and the beam; vertical deflection of the free end was simultaneously recorded. The deflection was preportional to the force as seen in Fig. 4. The ice being assumed elastic, its Young's modulus and flexural strength were calculated with Eqs. 1 and 2.

Figures 5 and Table 2 show the obtained results, together with the data of Okhotsk sea ice measured in 1964. The flexural strength varied from one to five kg/cm^2 and the Young's modulus from one to six 10^{10} dyne/cm. Both increased with an increase in the rate of stress. The ice at Station A showed higher strength and Young's modulus than that at Station B, in spite of their similarity in temperature, salinity and crystallographic structure. The strength and the Young's modulus of the ice at Station B, however, were much higher than those of Okhotsk sea ice, probably because of the lower salinity of the former ice. All data including those of Okhotsk sea ice seem to fit the relation given by Weeks between strength and brine volume (which is dependent on salinity and temperature).