HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北極圏海氷調査　I　：小試料の曲げ強度の測定
Author(s)	田畑, 忠司; 河村, 俊行; 滝沢, 隆俊
Citation	低温科學. 物理篇, 34, 201-207
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18313
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p201-207.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Tadashi TABATA, Toshiyuki KAWAMURA and Takatoshi TAKIZAWA 1976 Arctic Sea Ice Research. I. Measurements of Flexural Strength of Small Sea Ice Beams. *Low Temperature Science, Ser. A, 34.* (With English summary p. 206)

北極圏海氷調査 I*,**

——小試料の曲げ強度の測定——

田畑忠司・河村俊行・滝沢隆俊
(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

I. まえがき

海氷の曲げ強度の測定はこれまでに多くの研究者によってなされている。それらは大別して，結氷板から切り出した小試料を用いる方法[1~5]と，現場において作った水に浮んだ氷の梁を用いる方法[7~10]にわけられる。後者によるものは，天然の場合と同じ温度条件において測定できること，および海水中に含まれるブラインが落下しない等の長所があるが温度条件が制約される。いっぽう前者においては測定温度を自由に変えることができるが試料製作中および測定中のブラインの落下は避けられない。しかし氷の厚さが充分に厚くしかも温度が低いときの氷の表層近くから切り出した試料のように，ブラインの落下はあまり多くないと考えられるときには充分利用できる。

筆者等は1976年3月下旬より約1カ月アラスカ北端のバロー (71.16°N, 156.50°W) において海氷の調査を行なったが，その際に温度および荷重速度が曲げ強度におよぼす影響を求めるために，結氷板から切り出した小試料の曲げ強度の測定を行なった。

II. 測定方法

測定に用いた試料は沿岸定着氷上の岸から約150 m沖合いの平坦な場所から採取した。この地点の氷厚は2 mであった。チェーンソーにより表面から深さ約60 cmまでの氷塊を切り出して実験室に運び，丸ノコで厚さ約3 cm，幅約5 cm，長さ約30 cmの角棒を作った。その広い面が定着氷の表面と平行になるようにした。氷の表面はカンナで整形し測定試料とした。海氷の構造はその厚さの方向には均一でないので採取した深さの違いにより試料を区分した。同じ深さから採取した試料は，その構造，密度，塩素量が等しいとみなしそれらを集めてひとつの組とした。同じ深さから約50本の試料を作ってひとつの組とし，深さ32～60 cmの所から17層の試料すなわち17組の試料を作った。試料の各稜の長さは，強度測定の前にキャリパーで測りそれから求めた体積と重量から密度を算出した。

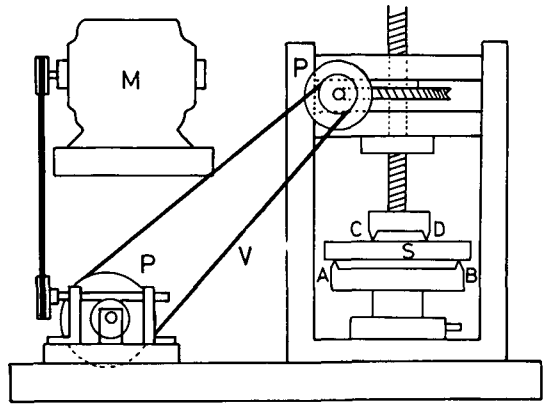
曲げ試験後に試料の一部を融かしモールの銀滴定法により塩素量を測定した。また残りの

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1804号

** 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設研究報告 第49号

試料から薄片を作りその結晶構造を観察した。

測定に用いた装置を第1図に示す。試料台A, Bは固定されており加重支点C, Dはモーターの回転によって一定の速度で下降する。その速さはプーリー及びVベルトを交換することにより変えることができる。今回の測定は 7.4×10^{-4} cm/sec, 6.5×10^{-3} cm/sec 及び 2.0×1.0^{-2} cm/sec の3段階の速度で行った。試料台の支点間の距離ABは24 cmで加重支点C, DはABを3等分している。C, Dを一定速度で下降させると試料には一定の速さで曲げが生ずる。この際に試料に加わる力は試料台の下に取り付けたロードセルによって測定記録した。海氷は温度によってブラインの体積が変化する。そのため，破壊強度や弾性率が変化するので測定は −10°C 付近と −20°C 付近の2つの温度帯について行った。測定前一日以上試料を測定温度に保って保存した。



第1図 曲げ試験装置

この装置で試料に曲げを生じさせると支点CDの間では曲げモーメントは一定になる。最大引張り応力 σ はCD間の試料の下面に働き

$$\sigma = F\frac{l}{bh^2} \tag{1}$$

である。F は試料に加わる力で，b, h, l はそれぞれ試料の幅と厚さとAB間の長さである。試料の自重による曲げは無視できるほど小さい。曲げ破壊強度を σ_c とすれば，σ_c は破壊の瞬間の外力 F_c から求めることができる。力 $F/2$ がそれぞれ加重支点CおよびDに加った時のC及びDのたわみ量を δ とすると

$$\delta = \frac{3Fl^3}{8E_b bh^3} \tag{2}$$

となる。ここで E_b は弾性的にたわんだ場合の弾性率（曲げ弾性率）である。E_b が時間に関係なく一定であるとすれば

$$\dot{\delta} = \frac{3}{8}\cdot\frac{\dot{F}l^3}{E_b bh^3} \tag{3}$$

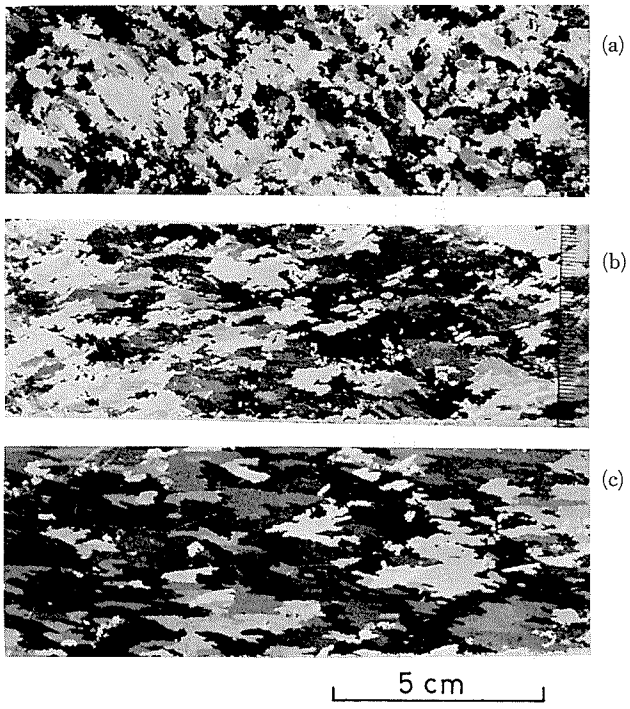
となる。$\dot{\delta}$ はこの場合加重支点の下降速度であり既知量であるので $\dot{F}$ がわかれば曲げ弾性率 E_b が計算できる。

III. 測定結果

1. 結晶構造

第2図(a), (b), (c)に当時の海氷の水平断面の偏光写真を示した。のちに青田等が作った

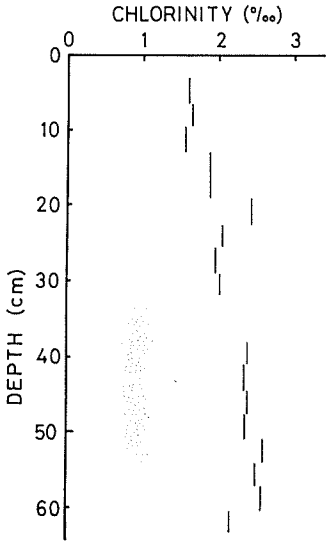
同じ氷板の垂直断面からわかるように[11]，表面から約 15 cm までは第3図 (a) に見られるようないわゆる粒状氷で，結晶粒が小さく結晶軸方向も乱雑である。これは結氷初期の氷および降雪などに起因する上積み氷である。それ以深は海氷に特有な結晶構造をしており，第2図 (b) および (c) からわかるように，深くなるに従って結晶粒が僅かに大きくなる傾向がある。しかしその割合はよく知られているよりも少なく[12),13)]，試料の厚さ 3 cm の範囲では一様であるとみなすことができる。同じ深さから採取した試料のあいだでは結晶構造のちがいはみとめられなかった。



第2図 氷の水平断面
(a) は深さ 5 cm, (b) は 20 cm, (c) は 49 cm 試料の幅は 4.8 cm

2. 塩素量および密度

よく知られているように，海氷の強度はそれ自身の温度と塩分量に依存するところが大きい。曲げ試験直後に融かした試料から求めた塩素量の垂直分布を第3図に示す。各点は2～4個の試料の平均値である。深さ 15 cm ぐらいまでの粒状氷の部分はほぼ 1.6‰ でもっとも塩素量が少なく，深くなるにしたがって塩素量が徐々に増加している。



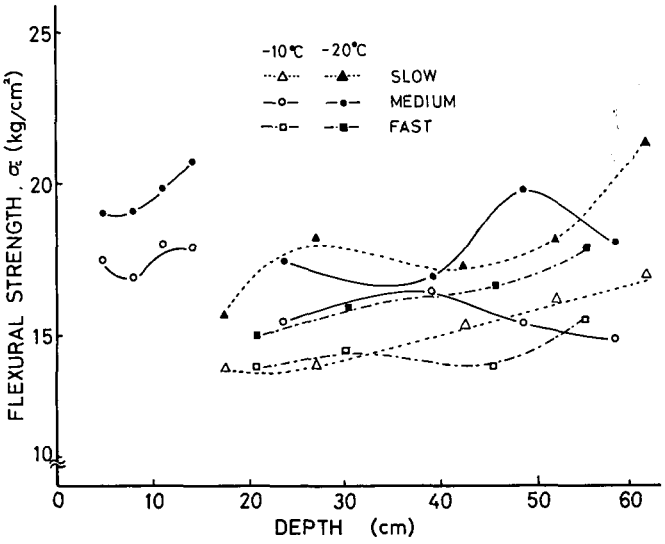
第3図 塩素量の垂直分布

密度は表面からおよそ 6 cm の部分で 0.90 g/cm^3 でもっとも小さく，それ以深では 0.91～0.92 g/cm^3 で試料全体を通じてほぼ一定の値であった。

3. 曲げ破壊強度

第4図に曲げ破壊強度 σ_c の深さによる変化をたわみ速度および温度を変数として示した。温度は −10 および −12 °C で，たわみ速度すなわち加重点の沈下速度は 0.74, 6.5 および 20×10^{-3} cm/sec の3種類である。図中の各点はそれぞれ5個の測定値の平均値であり，同じ条件で測定を行なった各点をそれぞれ曲線で結んである。

図の左側，深さ 15 cm 以浅はいわゆる粒状氷の部分でそれ以深の海氷に特有な結晶構造をした部分とは区別するのが



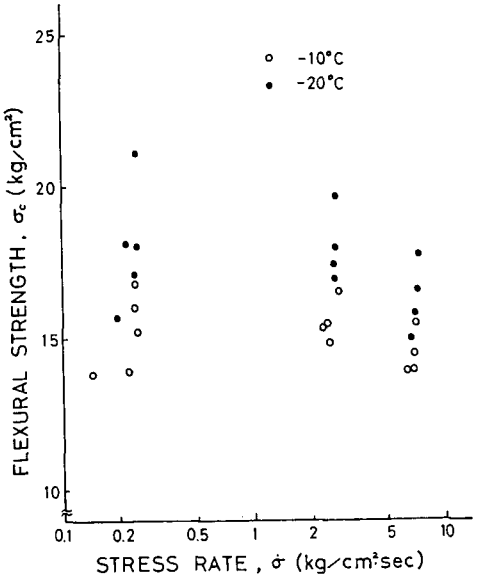
第4図 曲げ強度の測定結果. Barrow, Alaska, April, (1976)

妥当である。図から明らかなように粒状氷の部分の曲げ強度は他の部分のそれよりも大きい。この部分の平均曲げ強度は −10°C で 17.5 kg/cm², −20°C では 19.6 kg/cm² で後者が前者の 1.12 倍である。

15 cm 以深の部分では曲げ強度は 13～21 kg/cm² で測定条件の違いによる差がかなり大きい。量的にあらわすことは難かしいが，深くなるにしたがって強度が大きくなる傾向が明らかにみとめられる。第3図に示したように塩素量も深さとともに増加している。通常は塩分が増加すると強度が減少する。この場合には密度はほぼ一定であるから，深さによる構造のちがいたとえば結晶粒の成長などが塩分増加による強度劣化を補なっていると考えざるを得ない。

試料に加わった力 F の増加曲線はほぼ直線的であったので試料は弾性体であると見做すことにすると，力の増加曲線の勾配から求めた $\dot{F}$ と (1) 式から応力の増加速度 $\dot{\sigma}$ を求めることができる。

第5図はこのようにして求めた $\dot{\sigma}$ と深さ 15 cm 以深の試料の曲げ強度との関係である。ここでは深さのちがいによる強度の変化を無視しているので点がかなり散らばっている。筆者の一人，田畑によると[4] 応力の増加速度が 0.1～2 kg/cm²·sec のときに曲げ強度 σ_c は $\dot{\sigma}$ とともに増加することが報告されているが，ここではそのような傾向は見られなかった。むしろ $\dot{\sigma}$ が

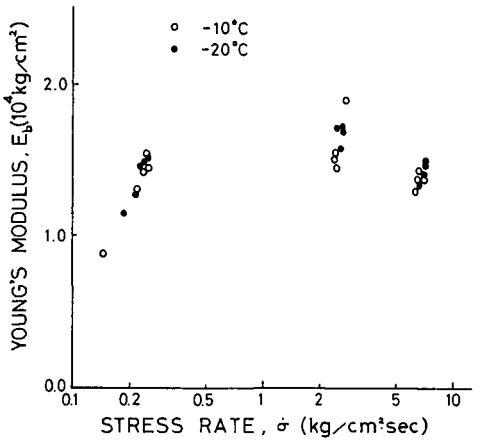


第5図 曲げ強度と応力の増加速度の関係

大きいときに曲げ強度がいくらか減少している。温度低下による強度の増加は顕著で，−20°C では −10°C のときよりも約15% 強度が増しており，この傾向は田畑[4]が以前に求めたものとほぼおなじである。

4. 曲げ弾性率

(3)式より求めた曲げ弾性率 E_b と応力の増加速度 $\dot{\sigma}$ の関係を第6図に示した。$\dot{\sigma}$ が 2 kg/cm²·sec のときの曲げ弾性率の値が大きいのが目につく。この図でも表層近くの粒状氷で得られた値は含まれていない。−10°C から −20°C えの温度低下による弾性率の増加はおよそ5%にすぎなかった。



第6図 曲げ弾性率と応力の増加速度の関係

IV. 結　　語

アラスカ・バロー沖の沿岸定着氷（厚さ 2 m）の表層近く（60 cm 以浅）から切り出した海氷の小試料（厚さ 3 cm, 幅 5 cm, 長さ 24 cm）の曲げ破壊強度および曲げ弾性率の測定を行なった。

測定温度は −10°C と −20°C 附近の2つの温度帯で，曲げ速度は 0.74, 6.5 および 20×10^{-3} cm/sec の3段階であった。試料の密度は 0.90～0.92 g/cm³，塩素量は 1.5～2.6‰ で，ともに深さと共にゆるやかに増加していた。表面から 15 cm ぐらいの深さまでは粒状氷であったがそれ以深では海氷に特有な結晶構造を示しており，深さとともに結晶粒径がゆるやかに増大していた。

測定の結果次のことがわかった。

1) 曲げ強度 σ_c は 10～22 kg/cm² で，表層の粒状氷の部分をのぞくと，深さとともに増加の傾向が見られた。

2) 曲げ強度は −20°C のときには −10°C とくらべると約15% 大きかった。

3) 曲げ強度の応力増加速度による増加はみとめられなかった。

4) 曲げ弾性率は $1.0\sim1.8\times10^4$ kg/cm² で，$\dot{\sigma}$ が 2 kg/cm²·sec のときにやや大きな値が測定された。

5) −20°C のときの曲げ弾性率は −10°C のときよりもおよそ5% 大きい。

この調査に要した費用の一部は文部省校費，アラスカ調査経費によった。現地での調査にあたっては，アラスカ大学 Shapiro 博士，Sackinger 博士，Metzner 氏のお世話になった。ここに記して厚く感謝します。またバローの NARL の施設の使用を快諾された Office of Naval Research および同所の北極研究主任 McGregor 氏，NARL 所長 Shaws 氏，Denner 博士，Underwood 博士にも心からお礼を申し上げます。

文　献

1) Butkovich, T. R. 1959 On the mechanical properties of sea ice, Thule, Greenland, 1957. U.S.A SIPRE Research Report **54**, pp. 11.
2) Pounder, E. R. and E. M. Little 1959 Some physical properties of sea ice. I., Canadian J. Phys., **37**, 443-473.
3) Смирнов. В, И, 1961 О Количестьенных Маракте характеристих лвда как материал. Труды Арктический и Антарктический Научно-Исследовательский Институт, **256**, 40-46.
4) Tabata, T. 1966 The flexural strength of small sea ice beams. *in* "Snow and Ice", Proceeding of Sapporo Conference, The Institute of Low Temp. Sci. Hokkaido Univ., 481-497.
5) Abele, G. and G. Frankenstein 1967 Snow and ice properties as related to roads and runways in Antarctica. U.S.A Army CRREL, Technical Report, **176**, pp. 37.
6) Butkovich, T. R. 1956 Strength studies of sea ice. U.S.A SIPRE Research Report, **17**, pp. 12.
7) Weeks, W. F. and D. L. Anderson. 1958 An experimental study of the strength of young sea ice. Transact. Am. Geophys. Univ., **39**, 641-647.
8) Brown, J. H. 1963 Elasticity and strength of sea ice. *in* "Ice and snow processes, properties and applications" (W. D. Kingery, *Ed.*) Cambridge, Mass; MIT Press, p. 79-106.
9) Tabata, T., K. Fujino and M. Aota. 1996 The flexural strength of sea ice in-Situ. *in* "Snow and Ice", Proceeding of Sapporo conference. Institute of Low Temp. Sci. Hokkaido Univ., 539-550.
10) 田畑忠司・鈴木義男・青田昌秋 1966 ボスニア湾海氷調査 II. 曲げ強度の測定. 低温科学, 物理篇, **33**, 199-206.
11) 青田昌秋・田畑忠司・石川正雄 1976 北極圏海氷調査 II. 圧縮強度の測定. 低温科学, 物理篇, **34**, 209-220.
12) Weeks, W. F. and W. L. Hamilton 1962 Petrographic characteristics of young sea ice, Point Barrow, Alaska. Am. Mineral, **47**, 945-961.
13) 田畑忠司・小野延雄 1962 種々の氷の結晶主軸方向の分布の測定. 低温科学, 物理篇, **20** 199-214.

Summary

To study the behavior of sea ice beams as to relations among flexural strength, bending Young's modulus and the increasing rate of an applied stress, measurements were made of them by a bending method in Barrow, Alaska, in April 1976. Ice samples were collected from shore fast ice of Barrow. The thickness of the sheet was 2 meters and several blocks of ice were cut our from the upper 60 cm of the ice sheet. From these ice blocks ten small rectangular ice beams were sawed out at each of 17 different depths in such a way as to make their wide plane parallel to the surface of the ice sheet. The surface of a beam was planed carefully by a plane for carpentry.

The size of the beam was 24 cm in span length, about 5 cm in width and 3 cm in thickness. The density of ice was in a range of 0.90-0.92 g/cm^3. Test temperatures were -10 and -20°C. The beam was bent at three constant speeds, 0.74, 6.5 and 20×10^{-3} cm/sec by an electric motor. The force applied to the beam was measured by a load cell.

The uppermost 15 cm of the ice block comprised small ice grains, whereas the

rest of the ice block had a structure characteristic of sea ice. Polarized pictures of horizontal thin sections of samples from several depths are shown in Fig. 2. Chlorinity distribution obtained by Mohr's titration method for melted water of the tested beams is shown in Fig. 3.

The results indicate, as shown in Figs. 4 and 5, that the flexural strength was 10–22 kg/cm^2 and it increased slightly with the depth except the uppermost 15 cm of the ice sheet. The chlorinity also increased with the depth as shown in Fig. 3. The flexural strength increased by 15% as temperature decreased from −10 to −20°C. There was no clear dependency of flexural strength on the increasing rate of applied stress. The bending Young's modulus was $1.0–1.8\times10^4$ kg/cm^2, as shown in Fig. 6, whereby its dependency on the stress rate was not observed either.