



Title	北極圏海水調査 : 一軸圧縮強度の測定
Author(s)	納口, 恭明; 青田, 昌秋; 田畑, 忠司
Citation	低温科学. 物理篇, 37, 131-139
Issue Date	1979-03-26
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18378
Type	bulletin (article)
File Information	37_p131-139.pdf



[Instructions for use](#)

北 極 圏 海 氷 調 査 IV^{*,**}

—— 一軸圧縮強度の測定 ——

納 口 恭 明

(北海道大学大学院 理学研究科)

青 田 昌 秋 ・ 田 畑 忠 司

(低温科学研究所)

(昭和53年10月受理)

I. ま え が き

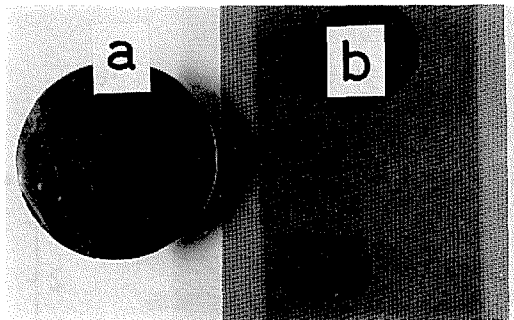
海水の圧縮強度の測定は、数多くなされてはいるが^{1~6)}、まだ十分に一致した結果は得られていない。著者らは、1977年にひきつづき1978年4月アラスカのバローにおいて海水の一軸圧縮試験を行なった。当時氷厚は、160 cmで深さ方向に徐々に結晶構造が変化しており、深さごとに結晶構造の異なる試料を得ることができる。結晶構造・歪速度・試料の寸法・圧縮の繰り返しの効果などに着目して圧縮強度を測定した。

II. 測 定 方 法

試料はバロー沖の定着氷から動力式のコアドリル(内径75 mm)と手回しコアドリル(内径100 mm)によって採取し、その両端を電動式カッターで切断して円筒形に整形した。氷板に鉛直な方向の試料は、直接コアドリルで表面から約90 cmの深さまで採取した。水平方向の試料は約4 m四方、深さ80 cmの穴を氷板に明け、その壁面から海岸線に平行なものと直角なものとを、それぞれの深さごとに採取した。

一軸圧縮試験機は、納口・田畑⁵⁾が用いたのと同じものを使い、ロードセルとダイヤルゲージで荷重と変位量とを連続測定した。圧縮の際には試料の両端と加圧板との間にステンレススティールの板を入れた(第1図 a)。又、摩擦による効果を調べる実験の際にはサンドスクリーン(第1図 b)と呼ばれる摩擦の大きなものをはさんだ。

それぞれの試料の結晶構造は圧縮試験



第1図 a: ステンレス板
b: サンドスクリーン

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1972号

** 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設 研究報告 第71号

を行なう前の試料の整形中に両端の薄片を切り取り、偏光のもとで観察した。試験中の温度は一部を除いてすべて、室温・氷温とも -5°C に統一した。

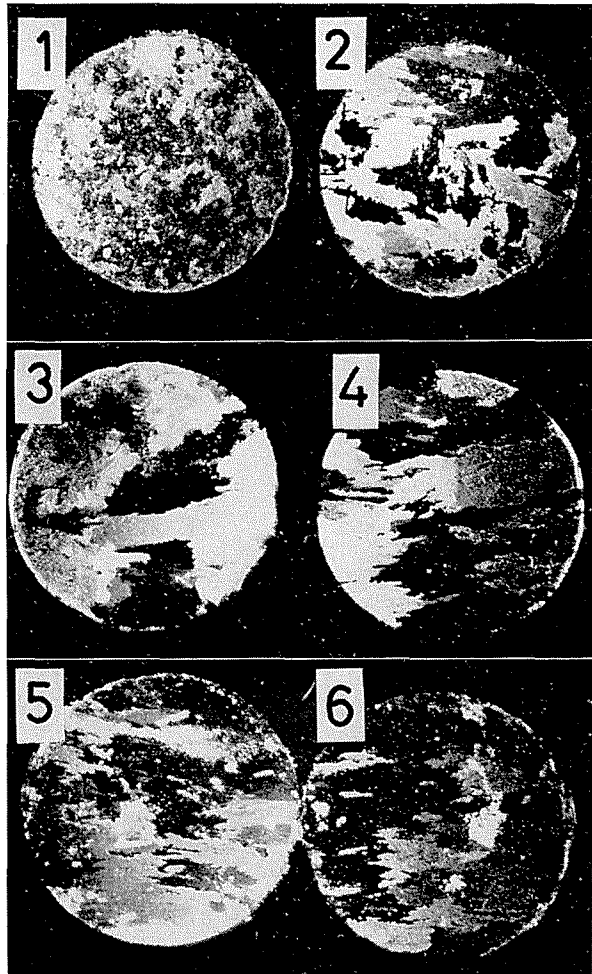
III. 試料の結晶構造

第2図にそれぞれの深さごとの海氷の水平断面の偏光写真を示す。表面から10cm くらいまでは粒状構造のいわゆる雪氷であり、その下にc軸が水平に近いモザイク状の氷が見られる。c軸が同じ水平面内ではあっても、30cm くらいの深さまでは、その中でいろいろな方向を向いているが、それよりもさらに深くなるにつれて選択的方位をとるようになる。結晶粒の大きさは深さ40cm から70cm くらいにかけて大きくなっていくのがわかる。それよりも深い所では、c軸の方位にわずかのずれを持つものもあるが、ほぼ単一の結晶粒であるとみなせる。モールの銀滴定法によって求めたそれぞれの深さについての塩素量の分布を第3図に示す。

IV. 測定結果

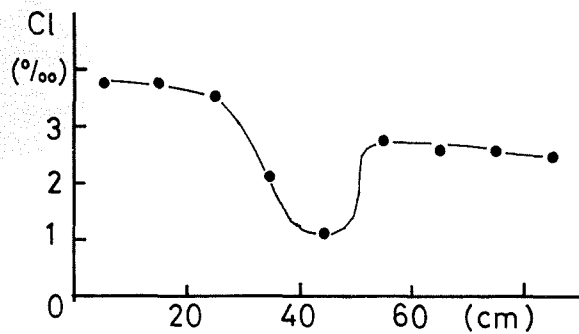
1. 破壊の形式

$10^{-4}/\text{sec}$ よりも大きな歪速度の圧縮試験では、すべての試料の破壊形式は爆発的な脆性破壊であった。氷板に鉛直な試料(鉛直試料)の破壊は主に圧縮方向(同時に成長方向でもある)に平行な破断面を持つ数個の小部項に分断されるものであった(第4図a)。



第1図 水平断面の結晶構造(直径75mm)

- | | |
|----------|----------|
| 1. 表層 | 2. 20cm層 |
| 3. 35cm層 | 4. 55cm層 |
| 5. 70cm層 | 6. 90cm層 |



第3図 塩素量の鉛直分布

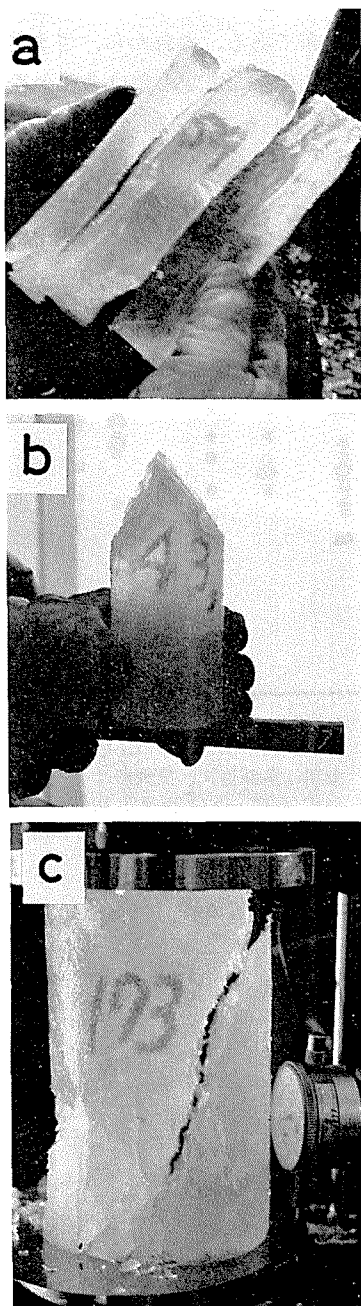
これとは別に、成長方向には一致せず、すなわち圧縮方向に対してある傾きを持つ破断面を生じる剪断破壊が存在した(第4図b)。この形式で生じた破断面は非常に平滑な平面であり、又、その面の傾きは必ずしも同じではなく、水平面に対して約20~60°くらいの範囲にばらつ

いていた。このような形式(今後、剪断形式と呼ぶ)の破壊は、前述の破壊(今後、引っ張り形式と呼ぶ)にくらべて大きな爆発を伴ない、強度の値も数十パーセント大きい。10⁻⁵/secの歪速度では破断は生じずに応力だけが低下して行く延性形式のものであった。

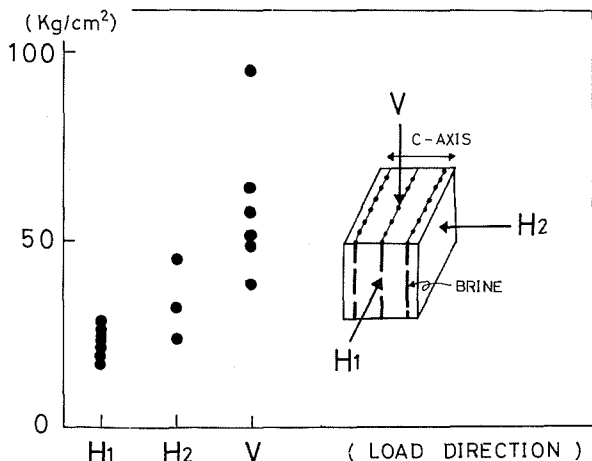
氷板に平行に採取した試料(水平試料)の場合10⁻³/secの歪速度ではすべて脆性的な破壊であった。破断面は試料の結晶構造にかかわりなく、どの場合でも常に成長方向に平行であり、圧縮方向に対して傾いている(第4図c)。これは、ブラインの穴をつたわるようにしてき裂ができるためだと思われる。

2. 結晶構造と圧縮強度

ほぼ単一の結晶粒だけからなる試料について圧縮方向と強度との関係を第5図に示す。H₁とVとを比較すると、c軸に対する圧縮の方向がともに90°であるが強度は、非常に異なっている。これは圧縮方向とブライン細胞列のなす角度が両者で異っているためである。同じブラインの向きをもつがc軸に対する向きがH₁とH₂の強度のちがいは、H₁とVとの差よりも小さい。すなわち圧縮強度に対してはc軸と圧縮方向との関係ばかりではなく、むしろブライン細胞の向きが大きな影響を与えることがわかる。



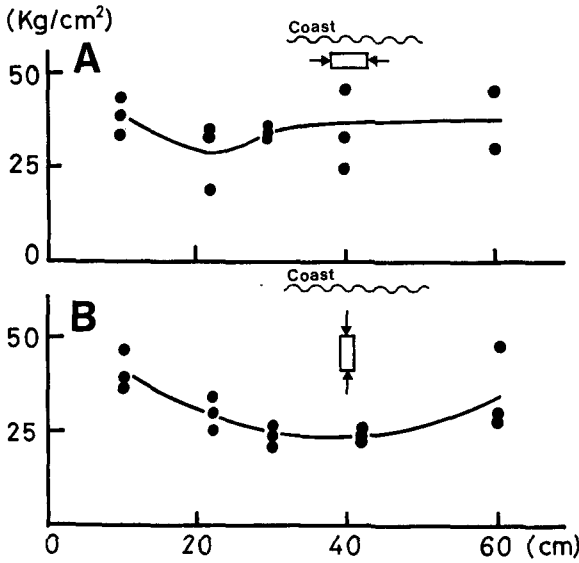
第4図 破壊後の鉛直試料 (a) 引っ張り形式、(b) 剪断形式と水平試料 (c)



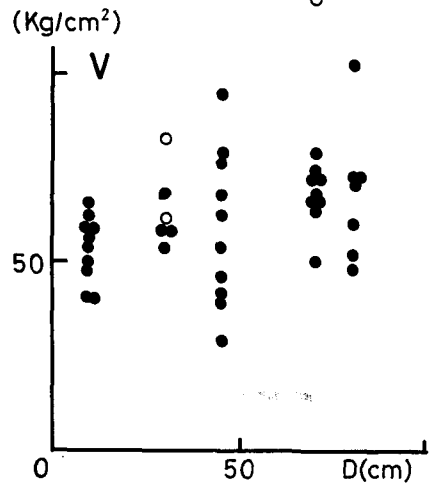
第5図 圧縮方向と強度との関係 (温度 -5°C, 歪速度 10⁻³ sec⁻¹ 試料の直径 100 mm, 長さ 200 mm)

これらの結果は Peyton³⁾ のものと同じである。

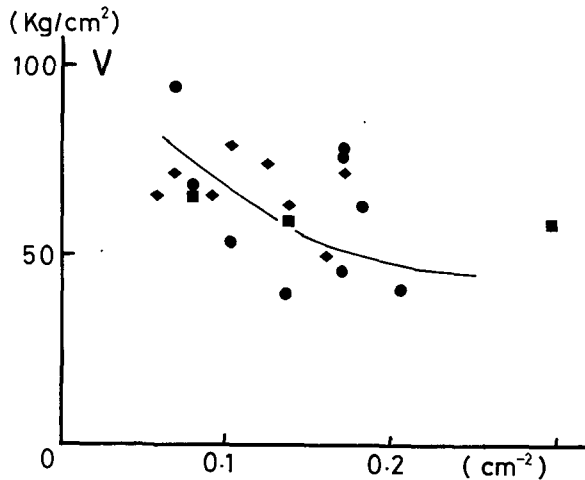
氷板の深い所における水平面内の c 軸の選択的な方位は、コアドリルの内径程度の小さな規模のものではなく、この地域において c 軸はほぼ海岸線に平行であることが確認されている⁷⁾。したがって圧縮強度にもこの異方性が当然あらわれることが予想される。第6図は海岸線に平行な水平試料と直角な水平試料の深さごとの圧縮強度の分布である。これから、さまざまな結晶方位をもっている小結晶粒からなる 20 cm の深さまでは両者に強度の差はみられないが、それよりも深くなると明らかに異方性があらわれていることがわかる。c 軸、すなわち海



第6図 水平試料の深さごとの圧縮強度 A: 海岸線に平行, B: 海岸線に直角 (温度 -5°C , 歪速度 10^{-3} sec^{-1} , 試料の直径 100 mm, 長さ 160 mm)



第7図 鉛直試料の深さごとの圧縮強度 白丸印は剪断形式, 黒丸印は引張り形式 (温度 -5°C , 歪速度 10^{-3} sec^{-1} , 試料の直径 75 mm, 長さ 200 mm)



第8図 単位面積当りの結晶粒の数と圧縮強度の関係 (丸印: 深さ 45 cm, ひし形: 深さ 70 cm, 四角: 深さ 30 cm)

岸線に平行な方向の圧縮強度の方が直角な方向の圧縮強度よりもやや大きめである。上に述べた結果、および Peyton の結果などからも期待されたとおりである。

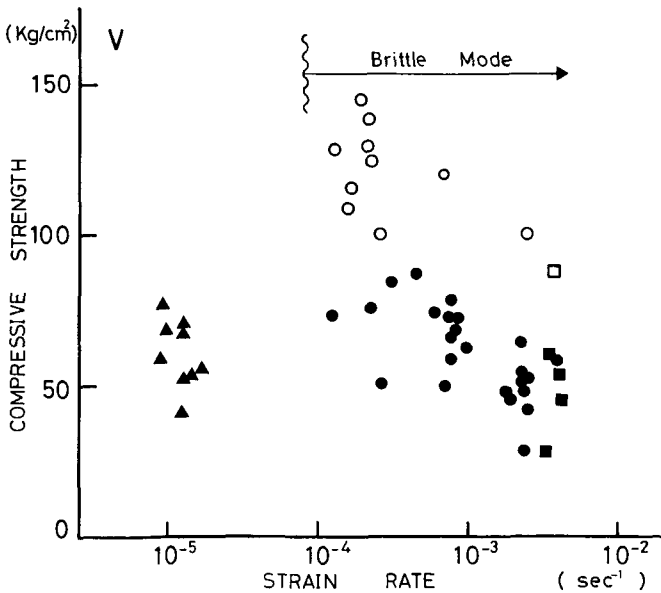
鉛直試料の深さごとの圧縮強度の値を第7図に示す。比較的、ばらつきが大きく深さに対する傾向はあまり明らかではない。各試料の両端の薄片の観察から求めた試料断面中の結晶粒の個数を横軸にとると第8図のようになる。この図から、結晶粒の試料中に占める数が小さくなるほど、すなわち結晶粒が大きくなるほど強度は大きくなる傾向が見られる。

3. 歪速度の効果

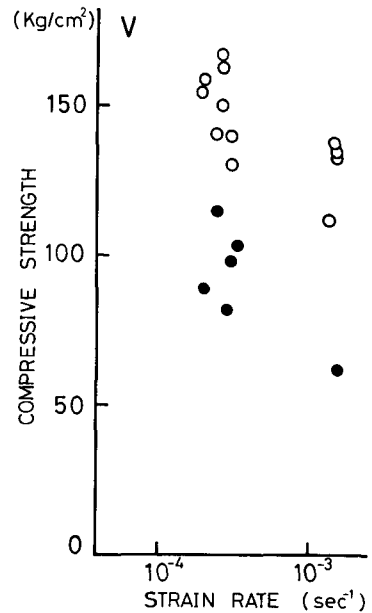
第9図は鉛直試料についての圧縮強度と歪速度との関係を示す。 $10^{-5}/\text{sec}$ 付近の黒三角印は破断を生じずに応力だけが低下して行く延性形式の破壊である。 $10^{-4}/\text{sec}$ 以上の脆性破壊領域では、剪断形式(白丸印)と引っ張り形式(黒丸印)の2種類の破壊形式が存在する。しかし、いずれの場合も歪速度が小さくなるに従って圧縮強度は大きくなる傾向にある。これは歪速度のある点に圧縮強度の最大値が存在するというよく知られている結果^{4),5),8)}と同じである。

剪断形式の破壊は歪速度の低下とともに増える傾向がある。このような、小さな歪速度における剪断形式の破壊の卓越は、試料と加圧板との間の摩擦によって説明することができる。すなわち歪速度が小さいほど破壊までの時間が長いために試料の両端の変形が起り、加圧板との密着が増す。このため真実接触面積も大きくなるであろう。したがって両端の拘束力としての摩擦力の増加によって引っ張り形式の破壊は起りにくくなることが予想される。

摩擦によって引っ張り形式の破壊が起りにくくなることを確かめるために、摩擦の大きなサンドスクリーンを接触面にはさんで行なった実験の結果を第10図に示す。対馬による摩擦試験の結果⁹⁾では -5°C .



第9図 鉛直試料の歪速度と圧縮強度との関係 (温度 -5°C , 試料を採取した深さ 70 cm, 試料の直径 75 mm, 長さ 200 mm)



第10図 圧縮強度に対する試料の両端の摩擦の効果 白丸: サンドスクリーン, 黒丸: ステンレス板 (温度 -7°C , 試料の直径 7.5 mm, 長さ 130 mm)

50 kg の荷重においてサンドスクリーンの動摩擦係数は 0.30 (変位速度: 2×10^{-4} cm/sec) でありステンレススティールの粗面は 0.26 (変位速度: 4×10^{-5} cm/sec), 光沢面は 0.04 (変位速度: 2×10^{-4} cm/sec) であった。又, 変位速度が小さくなると動摩擦係数は増加する。

サンドスクリーンを用いた圧縮試験では, すべて剪断形式の破壊が起った。又, 摩擦の少ないステンレス板をはさんで行なった引っ張り形式の圧縮強度に比べて数十パーセントも大きな値になった。

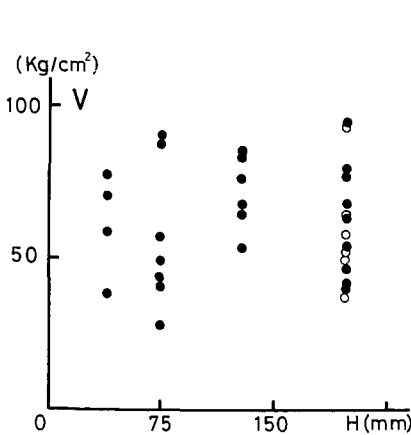
4. 寸法効果

一般に試料が大きくなるに従って破壊強度は小さくなるといわれている。第 11 図は鉛直試料について断面積・長さを変えて行なった圧縮試験の結果である。黒丸印は直径 75 mm の試料の強度であり白丸印は直径 100 mm の試料の強度である。歪速度はすべて約 10^{-3} /sec である。この図から, 長さの効果はあまり明らかではないが, 断面積に関しては, 100 mm の直径を持つ試料の方が 75 mm の試料よりも明らかに小さな強度を示す。

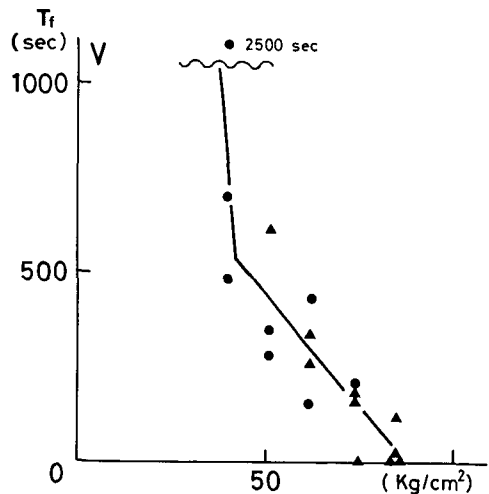
5. 繰り返し圧縮試験

鉛直試料について繰り返し圧縮試験^{5),10)}を行なった。これは, 一定歪速度の圧縮と定歪による応力緩和とによって平均的に一定応力水準を維持するもので, 圧縮によるクリープ破壊試験と同等なものである。第 12 図に平均応力と破壊時間との関係を示す。三角印は爆発をともなう脆性破壊である。ここで得られた破壊時間はサロマ湖での納口・田畑^{5),10)}の結果と比較して非常に大きい。例えばサロマ湖の水では -7°C の鉛直試料で応力水準 37 kg/cm^2 の最大の破壊時間が 200 秒程度であるのに対して, この値は約 1,000 秒である。

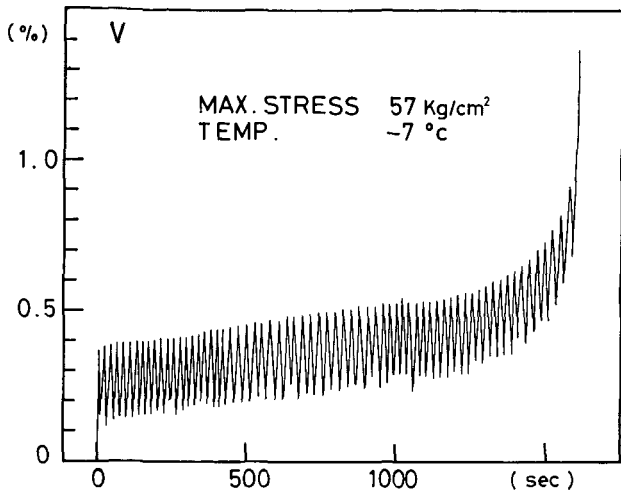
次に, この方法とは少しちがう繰り返し圧縮試験として圧縮試験機の駆動を逆転してある最大応力値とゼロとの間の往復を繰り返して破壊に至らせる実験を鉛直試料について行なった。これによって得られた歪・時間曲線の一例を第 13 図に示す。この試験においても歪・時間曲線は, 永久歪の増加によるクリープ曲線の特徴を持っている。すなわち一回の繰り返しごと



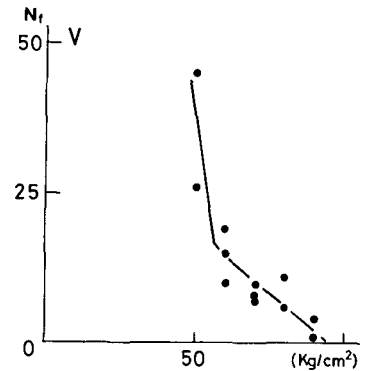
第 11 図 試料の長さとの圧縮強度の関係 黒丸印は直径 75 mm, 白丸印は直径 100 mm (温度 -5°C , 歪速度 10^{-3} sec^{-1})



第 12 図 平均応力と破壊時間との関係 (温度 -5°C , 直径 75 mm, 長さ 200 mm)



第12図 試験機の駆動を逆転して行なった繰り返し
圧縮の歪の記録例



第14図 最大応力と破壊までの繰
り返し回数の関係 (温度
-5°C, 直径75 mm, 長
さ200 mm)

に一定の永久歪が生じる定常クリープに相当する部分と、急激に永久歪が増加していく加速クリープに相当する部分が見られる。最大応力値と破壊までの繰り返し回数を第14図に示す。

この試験では破壊は爆発的ではないが、主として縦に走るひとつの破断面の形成によって起る。しかし、その前に加速クリープに近づく頃から試験機の駆動を逆転して応力が低下している時に、横に走るき裂が発生し始める。しかもこの微小なき裂の発生数は応力が低くなるにつれて多くなる。応力低下時におけるき裂の発生し始める3点の応力値は破壊に近づくにつれて大きくなり、最終的には応力低下のはじめから現われる。このき裂の原因としては永久歪の生成によって応力低下時に、もとへもどろうとする弾性力が塑性域に対して引っ張り力を作用することによると思われる。一方この弾性力の原因としては、もともとの氷の弾性以外にブラインの水圧が応力の開放によって外側に働くことも考えられるが、これらは今後の課題である。又実際に起る破壊の直接の原因は縦に走る大きなき裂であることを考えると、この横のき裂が破壊に対してどのような役割を果たしているのか興味を持たれる問題である。

V. ま と め

1978年4月アラスカ・バロー沖の沿岸定着氷を用いて海水の一軸圧縮試験を行なった。試験では結晶構造・歪速度・試料の寸法・繰り返し圧縮の効果がそれぞれ調べられた。その結果、次のことがわかった。

- (1) 破壊の形式、圧縮強度の値は、結晶構造ばかりでなくブラインの向きとの関係が大きな意味を持つ。又、水平方向の圧縮強度に関して地理的規模での異方性が存在する。
- (2) 試料と加圧板との間の摩擦力による拘束のために、破壊形式・破壊強度にちがいが生じる。この効果は歪速度のちがいで生じる摩擦効果の差によってもあらわれる。
- (3) 繰り返し圧縮では負荷の減少時に試料を横切るような小さなき裂が多数発生し、その最後に縦方向の大きなき裂が発生して破壊に至る。

おわりにのぞみ現地での調査にあたっては CRREL の Weeks 博士, Gow 博士それにアラスカ大学の Shapiro 博士, Metzner 氏のお世話になった。また Kelley 博士をはじめ NARL の皆様から御協力を得た。これらの方々に厚く感謝の意を表します。

この報告の作製にあたっては対馬勝年助手に多くの御協力をいただいた。厚く謝意を表わします。

なお、この研究はアラスカ調査費によった。

文 献

- 1) Butkovich, T. R. 1956 Strength studies of sea ice. *SIPRE Res. Rep.*, **20**, 15 pp.
- 2) Butkovich, T. R. 1959 On the mechanical properties of sea ice, Thule, Greenland. *SIPRE Res. Rep.*, **54**, 11 pp.
- 3) Peyton, H. R. 1966 Sea ice strength. Geophy. Inst., Univ. of Alaska, Rept R-182, 187 pp.
- 4) Schwarz, J. 1970 The pressure of floating ice fields on piles. In "IAHR Symposium, Ice and its action on hydraulic structures" [Reykjavik, Iceland], Int'l Assoc. of Hydraulic Research Committee on Ice Problems, Paper 6. **3**, 12 pp.
- 5) 納口恭明・田畑忠司 1977 海氷の圧縮破壊. 低温科学, 物理篇, **35**, 221-231.
- 6) 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.
- 7) Gow, A. J. and Weeks, W. F. Interrelations between the internal structure and the physical properties of fast sea ice at Barrow, Alaska. (未発表).
- 8) Gold, L. W. 1977 Engineering properties of freshwater ice, *J. Glaciol.*, **19**, 197-211.
- 9) 対馬勝年・田畑忠司 1978 北極圏海氷調査 V. 海氷と各種材料間の摩擦の測定. 低温科学, 物理篇, **37**, 141-161.
- 10) 納口恭明・田畑忠司 1978 海氷の繰り返し圧縮による破壊. 低温科学, 物理篇, **37**, 63-68.

Summary

Effects of ice structure, strain rate, and sample size on the uniaxial compressive strength of sea ice were studied by carrying out uniaxial compression tests in Barrow, Alaska, in April 1978. Cylindrical specimens were prepared from fast ice using a boring drill and a cutter. Test temperature was always -5°C . Polarized pictures of horizontal thin sections of sea ice from several depths are shown in Fig. 2. Chlorinity obtained by Mohl's titration method changes with depth in the ice sheet, as shown in Fig. 3.

Figure 5 shows a relation of compressive strengths to angles between the directions of a load the c -axis as well as a load and the brine tube. It was found that the compressive strength depended on the latter angle rather than the former angle.

Horizontal cores had a anisotropy in compressive strength at depths deeper than 25 cm (Fig. 6); namely, those parallel to the coastline had larger compressive strength than those perpendicular to it. This fact is related with the anisotropy of c -axis alignments recently ascertained by Dr. Weeks et al., that is, c -axis alignments are parallel to the coastline.

Though vertical cores did not show a clear relation between compressive strength and depth (Fig. 7), the strength increased with increasing grain size, as shown in Fig. 8.

Two kinds of brittle failure modes were obtained from tests on vertical cores. One was "tension mode", and the other was "shear mode" as shown in Figs 4a, 4b respectively. As the strain rate was lowered within the range larger than $10^{-4}/\text{sec}$, the "shear mode" became

predominant. When a sandscreen (Fig. 1b) which generates a large frictional resistance was put between a load platen and the end of a specimen, the specimen always failed in the "shear mode". The strength in the "shear mode" was larger than that in the "tension mode" by about 50%. But in either mode within the range of strain rate causing a brittle failure compressive strength increased with decreasing strain rate.

The specimens had the diameters of 75 and 100 mm and the lengths of 40, 75, 130, 180 mm. Compressive strength had little dependency on length as seen in Fig. 11. However, as is well known, specimens with large cross sections showed small compressive strength on the average.