



Title	海氷の圧縮破壊
Author(s)	納口, 恭明; NOHGUCHI, Yasuaki; 田畑, 忠司 他
Citation	低温科学. 物理篇, 35, 221-231
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18337
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p221-231.pdf



海 氷 の 圧 縮 破 壊^{*,**}

納 口 恭 明

(北海道大学大学院理学研究科)

田 畑 忠 司

(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

I. ま え が き

海水の圧縮強度は温度、歪速度、圧縮方向、ブラインの体積等に依存している。しかもこれらの要素は、互いに独立ではなく相互に関係しながら海水の圧縮強度に影響をおよぼしている。海水の圧縮強度の測定は、いろいろな研究者によってなされている。しかしその結果は様々であり、互に相反する関係を与えているものもある。そこで改めて海水の圧縮強度と温度、歪速度、圧縮方向の関係を調べてみた。

又、自然界における海水の破壊は単調に増加する圧縮荷重によってのみ起るものではなく、繰り返しの荷重によって起る場合も多いと考えられる。そこで海水においては初めての試みとして変動荷重による破壊実験を行なった。荷重の変動は圧縮とその停止による応力緩和の繰り返しによってなされた。繰り返し圧縮試験では、破壊強度のかわりに破壊に要する時間と繰り返し回数とが得られる。この繰り返し圧縮による結果と普通の圧縮試験の結果を、試料に対してなされた仕事という観点から比較した。

II. 実 験 方 法

実験は北海道オホーツク海沿岸のサロマ湖で、1977年2月に行なった。サロマ湖はオホーツク海とつながっており、その塩分量はオホーツク海のものとはほぼ同じである。試料にはサロマ湖の水を用い、圧縮試験は現場で行なった。

試料は手回しのコアドリルによって厚さ20 cmの氷板から、鉛直な方向(氷の成長方向)と水平な方向の2通りを採取した。したがって試料は直径79 mmの円筒形である。又、垂直方向に採取した試料については、その上部の雪氷の部分と下端の海水の脆い部分(いわゆる Skelton layer)とを取り除き均質になるように心掛けた。このような制約のため鉛直試料の高さは84 mmであった。一軸圧縮においては試料の長さが測定結果に影響を与えるので、すべての試料の長さを同じくした。第1図に全層の垂直断面と水平断面の偏光写真を示す。

実験に用いた一軸圧縮試験機(第2図)は加压板の変位速度を7 mm/min から 50 mm/min

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1853号

** 北海道大学低温科学研究所 流水研究施設研究報告 第61号

の範囲で連続的に変化させることができる。これは歪速度にして $10^{-3}/\text{sec}$ から $10^{-2}/\text{sec}$ の間である。この試験機の受圧側 (上部) にロードセルを、加圧側 (下部) の台座にダイヤルゲージをそれぞれ取り付け荷重と変位量とを記録した。

試料の温度は実験中の気温によって左右された。このため試料の温度範囲は -2°C から -24°C の間であった。

圧縮の際には、試料からのブライン脱落を防ぐために、試料はポリエチレンの袋に入れた。各試料のうちで同一条件で採取し実験を行なったものの中からいくつかを抽出して重さの測定とモールの銀滴定法による塩分量の測定を行なった。

繰り返し圧縮試験では最大荷重と最小荷重を設定し、その間を試験機の変位速度 $7\text{ mm}/\text{min}$ で圧縮すると、試験機の駆動を停止することによる応力の緩和によって往復させた。与えた最大荷重は、同じ条件における普通の圧縮強度の大きさに近いものから、その半分ぐらいまでの値とした。

合計で370個の試料にいつて圧縮試験を行なった。

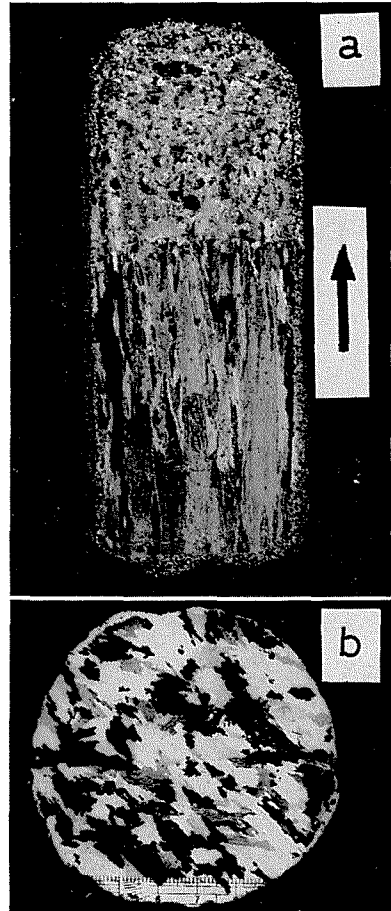
III. 測定結果

1. 圧縮強度の測定

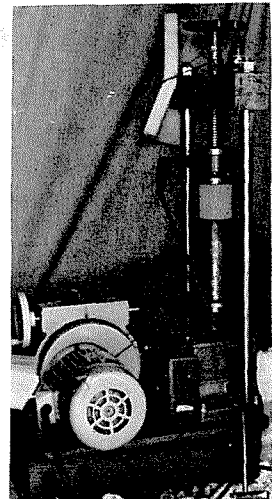
(1) 破壊の形式

応力時間曲線の代表的ないくつかの例を第3図に示す。鉛直試料の圧縮における破壊は主に爆発的な脆性破壊であった。破断面は圧縮方向に平行に走り、数十本の棒状の小片に分かれた (第4図 a)。これは破断面に対して引っ張りが作用したことを示している。応力時間曲線の多くは、第3図 a に示すように最大応力に達したときに爆発的に破断した。しかし温度が高くなるほど、又歪速度が小さくなるほど第3図 b に示すように応力が最大値から $2\sim 3\text{ kg}/\text{cm}^2$ 程度低下してから破断するものが多く含まれるようになった。この形式の破壊の割合は、歪速度 $10^{-3}/\text{sec}$ において温度 -10°C で30%であったのに対して -5°C では50%になった。

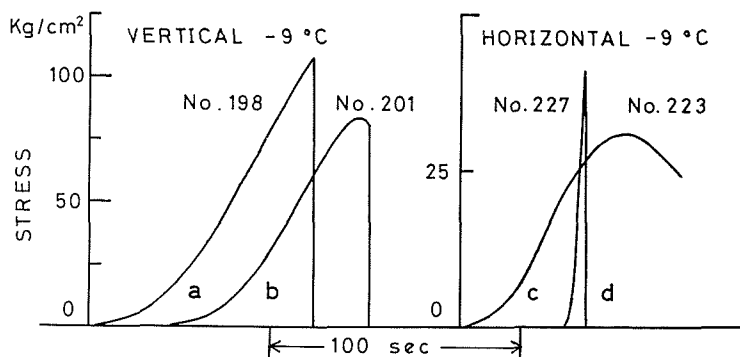
水平試料の圧縮の破壊形式は歪速度によって著しく異なった。小さな歪速度 ($10^{-3}/\text{sec}$) では第3図 c に示すように、応力時



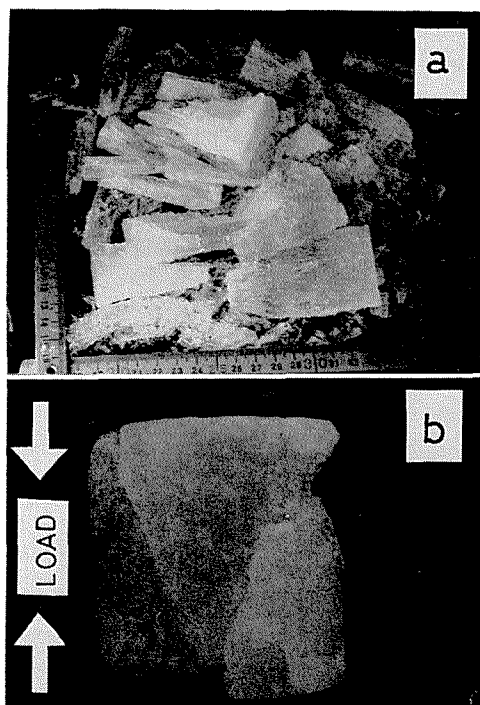
第1図 全層の垂直断面 (a) と水平断面 (b) の偏光写真



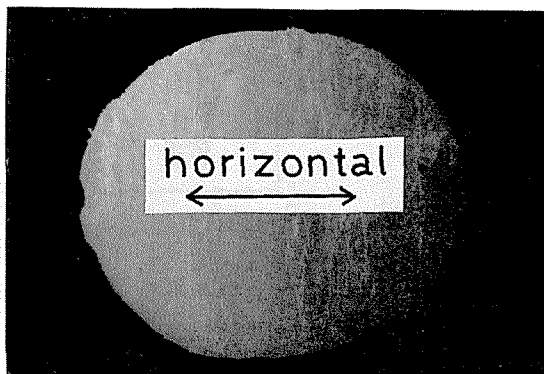
第2図 一軸圧縮試験装置



第3図 応力時間曲線の代表的な例



第4図 破壊後の鉛直試料 (a) と水平試料 (b)



第5図 圧縮による水平試料の横断面の変形

間曲線は応力が最大値に達したのち緩やかに低下していった。この形式の破壊では目に見えるくらいの亀裂は生じたが破断には至らなかった。歪速度が大きくなるとすべて破断を生じたが、第3図 d に示すような脆性的な破壊形式に至る前の過渡的なものとして塑性変形を伴う破壊が含まれた。この形式の破壊は -10°C でゼロであったのに対し -5°C では50%に達した。

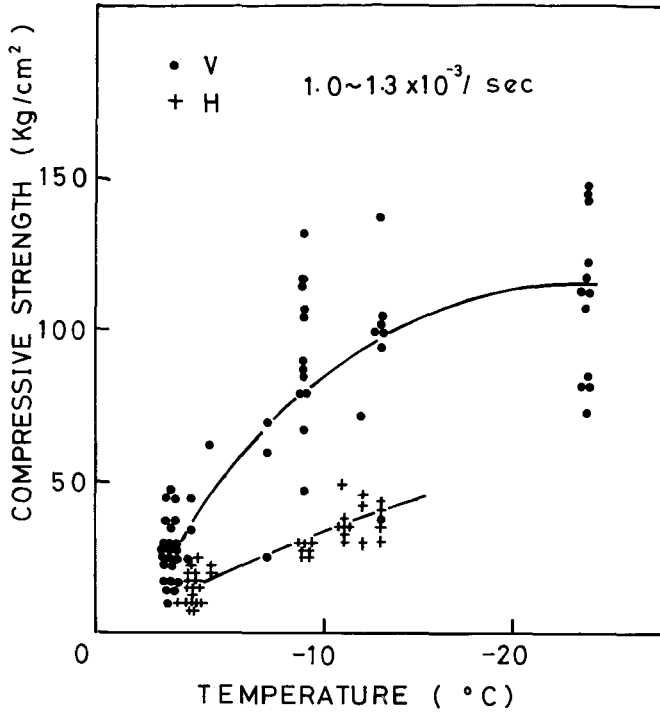
水平試料の破断面の特徴は第4図 b に示されるように圧縮方向に対して傾いていることである。これは破断面に剪断力が作用したためであることを示している。

圧縮に伴う試料の横断面の変形は、鉛直圧縮が円形のままであったのに対して、水平圧縮では氷の成長方向とは直角な方向、すなわち採取した氷板の水平方向にだけ延びて楕円形のようになった(第5図)。

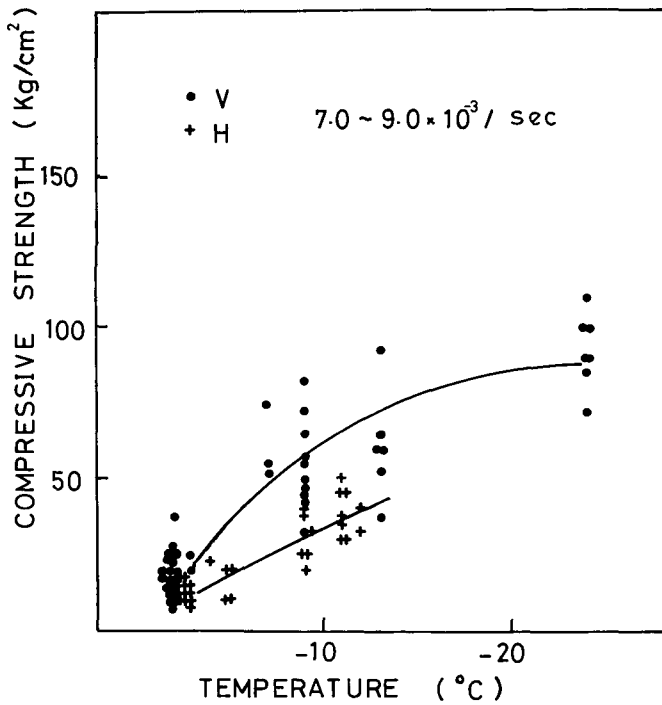
亀裂は結晶粒界付近にあるが、必ずしも粒界とは一致していないようである。

(2) 圧縮強度と試験条件との関係

圧縮強度としては最大応力を採用した。第6図に温度と圧縮強度との関係を示す。温度の



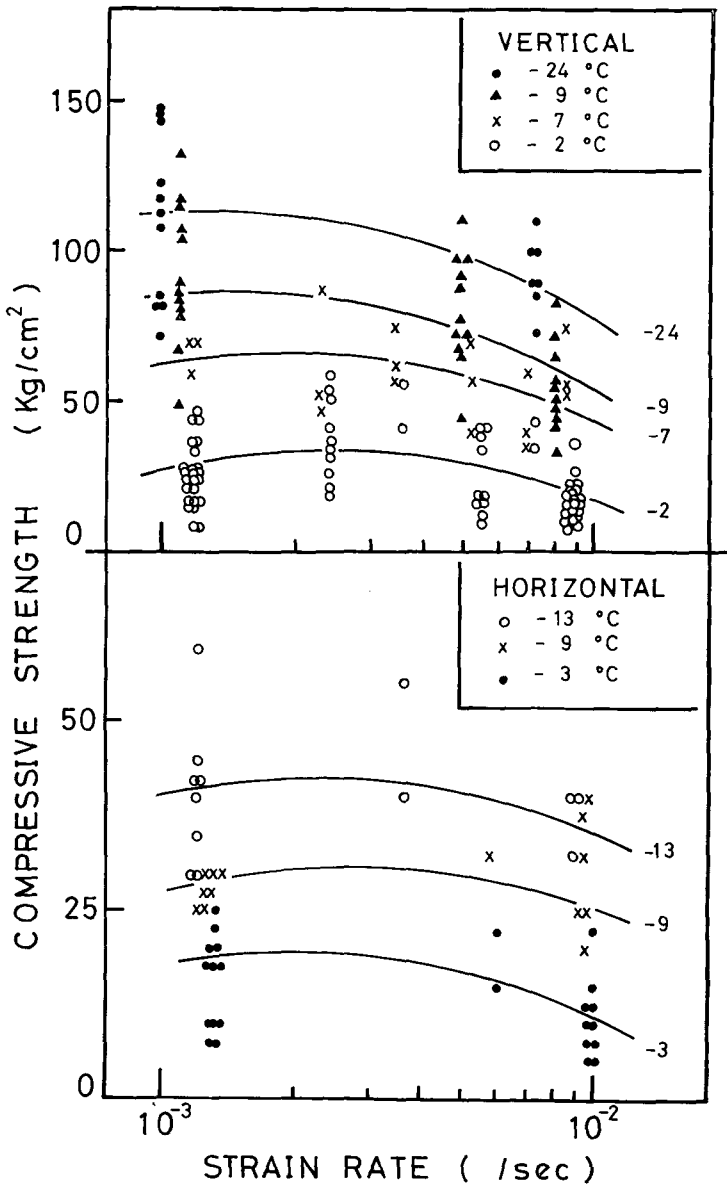
第6図 (a) 温度と圧縮強度の関係
 (歪速度 $1.0 \sim 1.3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$) V: 鉛直試料 H: 水平試料



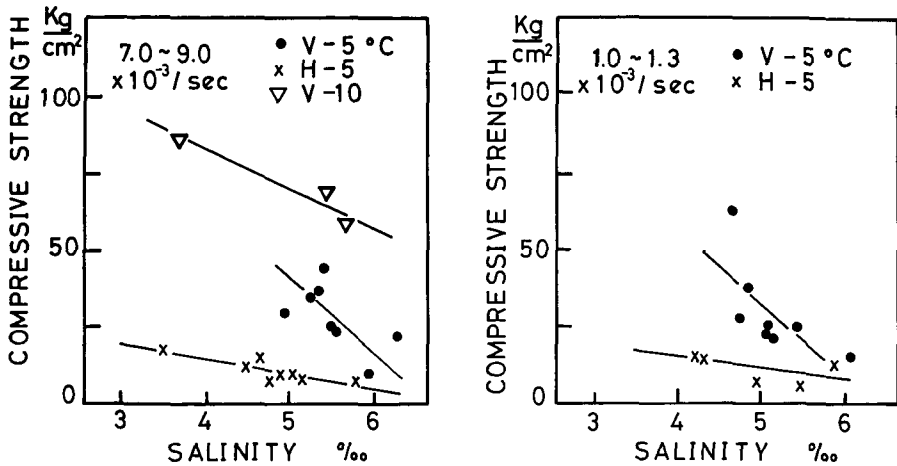
第6図 (b) 温度と圧縮強度の関係 (歪速度 $7.0 \sim 9.0 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$)

低下に伴って強度は増大していった。-24°C の鉛直試料で最大 150 kg/cm² の強度をもつものが存在した。これは、低温では氷自身の強度が大きくなるのと同時に、海氷の場合液体のブライン体積が減少するためである。又その温度依存度は -10°C 以下で小さくなっているが、これはブライン体積の変化の割合が小さくなるためではなからうか。

歪速度と圧縮強度の関係を第7図に示す。純氷の場合、圧縮試験の結果からある歪速度に圧縮強度の最大値が存在することが知られている^{1)~3)}。Schwarz は海氷の圧縮試験の結果から歪速度 10⁻³/sec 付近に圧縮強度の最大値が存在することを示している。実験で用いた歪速度



第7図 歪速度と圧縮強度の関係



第8図 塩分量と圧縮強度の関係

は $10^{-3}/\text{sec}$ くらいから $10^{-2}/\text{sec}$ までの間で, Schwarz と同じ傾向があるように見えなくもないが断言はできない。もう少し広い範囲の歪速度を用いて実験をする必要がある。

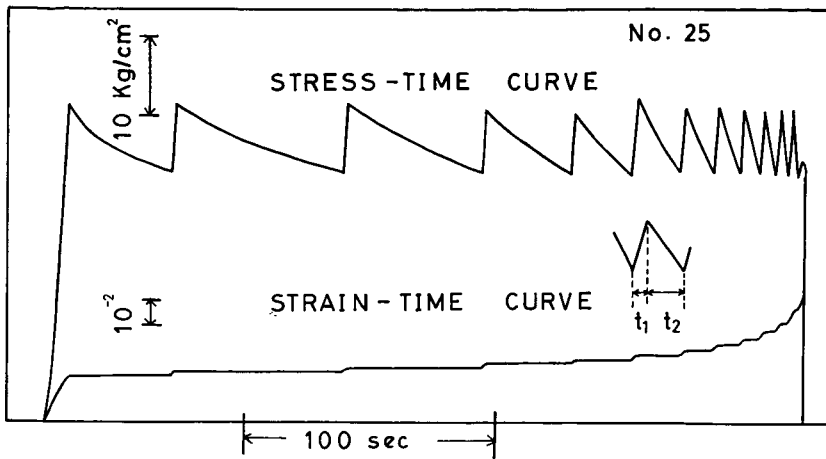
第8図に塩分量と圧縮強度との関係を示す。塩分量が増大すると圧縮強度が低下することがわかる。これは同じ温度では塩分量が大きくなるほどブライン体積が大きくなるためである。

以上の結果いずれの場合においても圧縮強度は鉛直試料の圧縮の方が水平試料の圧縮よりも約2倍程度大きな値であった。このことは破壊形式のちがいで説明される。すなわちブラインという液体部分を含み、すべり面とも一致している海水の短冊状の板が、鉛直圧縮では圧縮方向と平行なのに対して水平圧縮では様々な角度をなしている。又、破断面の圧縮方向に対してなす向きが、鉛直圧縮では平行であったのに対して水平圧縮ではある角度をもっていたことから、水平圧縮のときには剪断力による変形と破壊によって強度が鉛直圧縮よりも小さくなったのであろう。これは Peyton⁴⁾ と一致し、Schwarz と逆である。

2. 繰り返し圧縮試験

(1) 一般的な特徴

この試験の結果得られる代表的な応力時間曲線と歪時間曲線を第9図に示す。応力の繰り返しの一段階ごとに加重時間 t_1 と緩和に要する時間 t_2 が得られる。 t_1 は加重時における歪量に比例しており、1つの実験中ほぼ一定と考えられる。応力緩和に要する時間 t_2 は、最大応力と最小応力の差が全体の応力水準にくらべてある程度小さい場合には、はじめ増大しその後減少した。第10図に示す一般的なクリープ曲線と比較すると、 t_2^{-1} が歪速度に比例していることから、これは一次クリープから二次クリープへの変化(歪速度の減少)、二次クリープから三次クリープへの変化(歪速度の増加)に対応していることがわかる。この繰り返し圧縮試験は応力がある範囲の間を変化するが、平均値は一定の条件下で行なわれることから、この破壊の過程は定荷重によるクリープに対応していると考えられる。逆にこの結果から、このような条件における海水のクリープの特徴を、その試料の応力緩和に要する時間の変化する過程として解釈することができる。



第9図 繰り返し圧縮試験における応力時間曲線と歪時間曲線の代表的な例

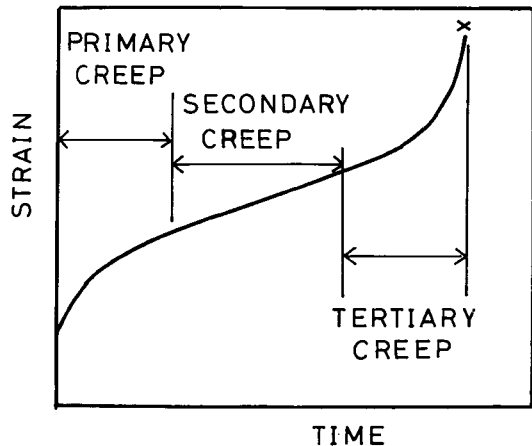
鉛直試料の繰り返し圧縮における破壊の形式は普通の圧縮における破壊の形式とは少々異なったものであった。高い応力水準で行なった。試験では応力が最大値を過ぎて急に大きく下降した後に爆発的な脆性破壊を起した。この応力の低下量は 10 kg/cm^2 以上であった。又、中には応力緩和の最中に爆発的な破壊を起すものもあった。一方、低い応力水準では破壊は穏やかに行なわれた。水平試料の試験では普通の圧縮試験と同様に、緩やかに応力が低下してゆくのみで破断は生じなかった。

圧縮試験における強度のばらつきと同様に繰り返し圧縮試験では破壊に至るまでの時間と繰り返し回数にばらつきが生じた。又、破壊時における歪の大きさは、普通の圧縮における値よりも2倍～3倍大きくなった。第1表に破壊時間・繰り返し回数等を示す。

(2) 繰り返し圧縮試験における依存関係

圧縮強度が温度の低下とともに増大したのに対応して繰り返し圧縮試験では温度が下るとその破壊時間・繰り返し回数は増大した。この関係を第11図に示す。第12図に平均応力と破壊時間の関係を示す。平均応力が大きいほど破壊時間は小さくなる傾向にある。応力振幅が与える影響については今後の課題である。

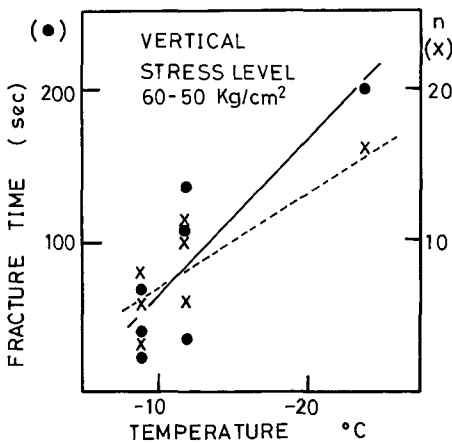
この繰り返し圧縮試験ではすでに述べたように同じ温度と応力水準で行なった実験であっても、1回ごとの加重の緩和に要する時間はまちまちであり、しかもひとつの実験について加重ごとに徐々にかわった。そこで緩和に要する時間と破壊時間との関係を調べた。いちばん初めの応力緩和曲線について、単位応力だけ低下するのに要する時間と破壊時間の関係を第13図に示す。この最初の応力緩和は普通の意味での応力緩和試験と一致するものである。この図か



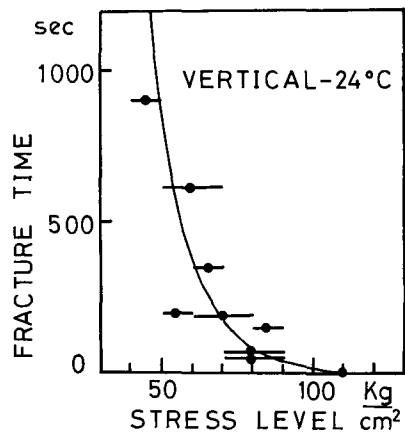
第10図 一般的なクリープ曲線

第1表 繰り返し圧縮試験の結果

No.	温度 (°C)	応力水準 (kg/cm ²)	荷重方向	繰り返し回数	破壊時間 (sec)	No.	温度 (°C)	応力水準 (kg/cm ²)	荷重方向	繰り返し回数	破壊時間 (sec)
12	-10	60~40	V	7	165	214	-9	50~40	V	14	520
14	-10	60~40	V	3	77	215	-9	50~40	V	13	310
15	-10	60~40	V	4	78	216	-9	60~50	V	6	40
17	-10	40~32	V	14	238	217	-9	60~50	V	3	22
18	-10	40~32	V	21	810	218	-9	60~50	V	8	68
19	-10	40~32	V	21	470	235	-9	20~10	H	8	65
20	-10	60~40	V	5	270	274	-24	80~70	V	13	147
21	-10	60~40	V	5	140	275	-24	70~60	V	18	350
23	-10	60~40	V	2	50	276	-24	60~50	V	16	200
25	-10	40~32	V	12	295	277	-24	50~40	V	23	900
27	-10	40~32	V	17	205	278	-24	80~60	V	4	45
92	-7	30~40	V	—	—	279	-24	70~50	V	8	610
93	-7	30~40	V	11	390	281	-24	80~60	V	4	70
94	-7	40~35	V	25	170	282	-24	80~60	V	6	190
95	-7	40~25	V	5	180	361	-12	60~50	V	11	135
96	-7	40~20	V	3	150	362	-12	60~50	V	6	35
97	-7	40~20	V	5	330	363	-12	60~50	V	10	106
98	-7	40~35	V	2	3	364	-12	60~40	V	5	115
99	-7	40~35	V	7	26	365	-12	60~40	V	8	220
165	-11	25~20	H	19	85	366	-12	60~40	V	7	395
192	-9	50~40	V	16	250	367	-12	60~55	V	17	62
212	-9	50~40	V	10	193	368	-12	60~55	V	18	63
313	-9	50~40	V	11	180	369	-12	60~55	V	24	88



第11図 温度と破壊時間，繰り返し回数の関係



第12図 平均応力と破壊時間の関係 (図中の横棒は応力振幅を表わす)

ら応力緩和に要する時間が長いものほど破壊時間は長くなる傾向がわかる。しかもその関係は線型である。この直線が原点を通る意味は、緩和時間ゼロは瞬間的な破壊を表わしているためである。

(3) 仕事量にもとづく考察

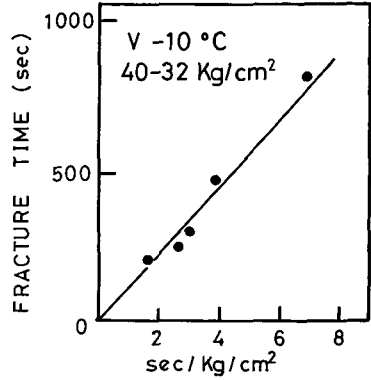
この繰り返し圧縮試験における荷重と変位量の関係を、第14図のようにすべて直線で近似する。これから応力振幅 a と平均応力 b と繰り返し回数 n を用いて、この繰り返し圧縮試験と同じ仕事量では、どの程度の圧縮強度になるかを求めることができる。この換算された強度を c とすると次式が得られる。

$$c = \sqrt{2abn + b^2} \quad (1)$$

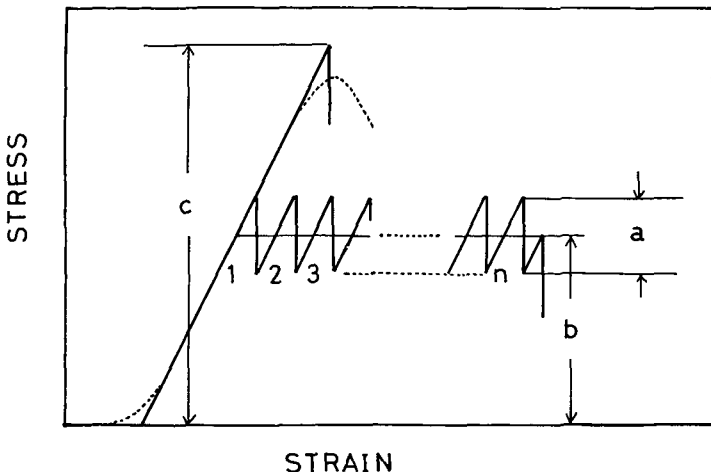
第15図にこの換算した強度を示す。破線と一点鎖線はそれぞれ普通の圧縮試験における水平試料の強度と鉛直試料の強度を表わしている。この図から次のことがわかる。

- (a) 鉛直圧縮においては、この換算された強度は圧縮強度と同程度ないしはやや大きめの値になった。
- (b) 水平圧縮においては換算された強度は圧縮強度の2倍くらいの大きさとなった。
- (c) 換算された強度は温度の低下とともに増大した。
- (d) 同じ温度では、応力振幅や応力水準によらず同程度の大きさであった。

実際の応力-歪曲線は第14図の点線のようなものであるが、それを図のように直線で近似したので、この換算された強度は普通の圧縮強度よりもいくらか大きくなることもある。その意味では、(a)の結果から鉛直圧縮の場合、破壊の基準としてなされた仕事の全量と考えるのは妥当であろう。一方、うゑに述べた直線近似からのずれが鉛直圧縮よりいくらか大きい水平方向の圧縮では誤差は大きいと思われるが、(b)の結果はそれをはるかに上回るものである。これは繰り返



第13図 1回目の加重後に応力が1 kg/cm² 緩和するのに要する時間と破壊時間の関係



第14図 換算強度を求めるための応力-歪曲線の模式図

返し圧縮によって直接破壊の原因となる亀裂の他に、塑性流動などの変形を与えるのにエネルギーが消費されたためと思われる。実際に圧縮試験で示されたように、すべりが起りやすい水平試料では特にこの塑性流動によるエネルギーの消費が大きいため鉛直圧縮に比べて大きな差を生むのだと考えられる。

したがって、もし海氷を水平方向から圧縮して破壊しようとする場合、繰り返し圧縮では小さな荷重で破壊を起す一方で非常に多くのエネルギーを必要とすることになる。

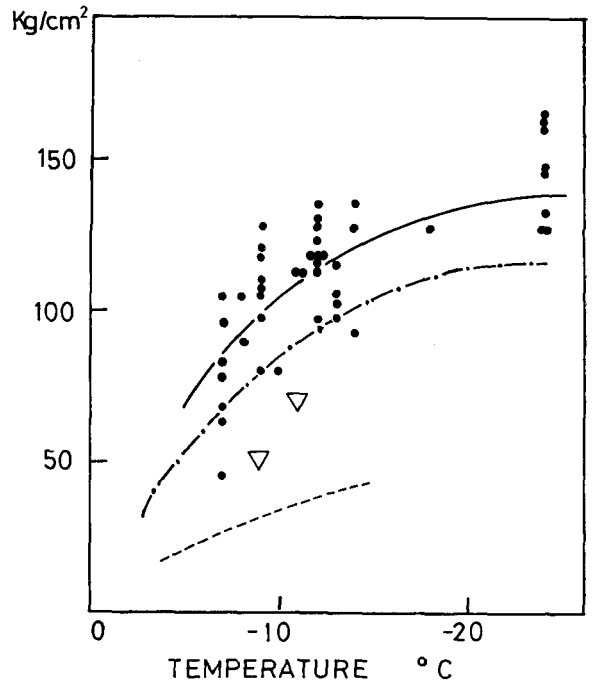
IV. ま と め

圧縮による海氷の破壊を、単調な荷重の増加による方法と繰り返し荷重による方法で行なった。単調な荷重の

増加による方法では圧縮強度が得られ、繰り返し荷重による方法では破壊時間と繰り返し回数

- (1) 圧縮強度は鉛直試料の方が水平試料よりも2倍大きい。
- (2) 温度・塩分量の低下とともに圧縮強度は増す。
- (3) 圧縮強度の半分以下の荷重でも繰り返しによって破壊を起せる。
- (4) 繰り返し圧縮の破壊時間は、温度・平均応力の増加にもなって減少する。
- (5) 繰り返し圧縮では、破壊に至るまでのエネルギーの損失の割合は水平圧縮の方が鉛直圧縮よりも大きい。

この研究に際して、小野延雄助教授には多くの御指導を頂いた。又、実験地では青田昌秋助教授、河村俊行助手、滝沢隆俊助手、紋別流氷研究施設の諸兄、大学院生の齋藤隆君、小川潔典君、西村浩一君らから御助力を頂いた。これらの方に深く感謝の意を表します。



第15図 温度と換算強度（黒丸は鉛直試料，三角は水平試料）の関係（破線は水平試料の圧縮強度，一点鎖線は鉛直試料の圧縮強度）

文 献

- 1) Carter, D. S. 1972 Brittle fracture of polycrystalline ice under compressive loadings. In "IAHR Symposium: Ice and Its Action on Hydraulic Structures" [September, 1972, Leningrad]. International Association of Hydraulic Research, Committee on Ice problems, 62-71.
- 2) Wu, H. C. and others 1976 Fracture in the compression of columnar grained ice. *Engineering Fracture Mechanics*, 8, 365-372.

- 3) Schwarz, J. 1970 The pressure of floating ice fields on piles. In "I. A. H. R. Symposium, Ice and its action on hydraulic structures" [Reykjavik, Iceland], International Association of Hydraulic Research Committee on Ice Problems, Paper 6. **3**, 12 pp.
- 4) Peyton, H. R. 1966 Sea ice strength. Geophysical Institute, University of Alaska, Report NR 307-247/7-6-55, 273 pp.
- 5) Butkovich, T. R. 1956 Strength studies of sea ice. USA *SIPRE Res. Rep.*, **20**, 15 pp.
- 6) Butkovich, T. R. 1959 On the mechanical properties of sea ice, Thule, Greenland U.S.A. *SIPRE Res. Rep.*, **54**, 11 pp.

Summary

Uniaxial compression tests were made on sea ice of Lake Saroma in two different ways. One was a normal compression test, by which the compressive strength was obtained as a function of temperature, strain rate, load direction and salinity. The other was a test by a cyclic load, whereby compression and stress relation were mutually repeated between two fixed stress levels until the specimen broke. The high stress level was about 30 to 60% of the compressive strength. The stress-time and strain-time curves are given in Fig. 9. The number of repetitions and the time required until a failure took place were obtained in this cyclic load test.

All specimens are cylinders 79 mm in diameter and 84 mm in length. The relations of the compressive strength with temperature, strain rate, and salinity are shown in Figs. 6, 7 and 8 respectively. As for dependency on load directions, the strength obtained from a vertical core was about twice that obtained from a horizontal core. This result is in agreement with that of Peyton and Butkovich, but not Schwarz.

A repeated-compression test seems to be equivalent to a compressive creep test since the average stress through a cyclic test is kept constant. In fact, primary, secondary and tertiary creeps were obtained from changes in relaxation time during repetitions. The results of repeated-compression tests are summarized in table 1. The time to failure decreased with the increase of average stress and temperature (Figs. 11 and 12).

The results of repeated-compression tests were compared with those of normal compression tests. Considering the total mechanical work required for a failure to take place, the authors obtained equation 1 which converts the number of repetitions into the compressive strength. The strength thus defined was greater than that obtained from normal compression tests, especially in horizontal cores. Therefore, it is concluded that in the repeated compression test, though the stress in each compression is small, the total amount of mechanical work required for a failure to take place is much larger than that by the normal compression test.