HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷の剪断強度の測定
Author(s)	対馬, 勝年; 藤井, 俊茂
Citation	低温科學. 物理篇, 31, 33-43
Issue Date	1973-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18218
Type	departmental bulletin paper
File Information	31_p33-43.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Katutosi TUSIMA and Toshishige FUJII 1973 Measurements of Shear Strength of Ice.
Low Temperature Science, Ser. A, 31. (With English Summary p. 42)

氷の剪断強度の測定*

対馬勝年
(低温科学研究所)
藤井俊茂
(北海道大学大学院　理学研究科)

(昭和48年9月受理)

I. はしがき

剪断強度は氷の重要な力学的物理量でありながら，その研究はあまり行なわれていない。また測定者の間でも，測定方法の違い等によって必ずしも一致した結果が得られていない。

例えば，Finlayson[1] 及び Wilson-Horeth[2] は −1°C から −23°C の範囲では氷の剪断強度が温度に依存しないと報告している。一方，Butkovich[3] は氷のねじり剪断強度を 0°C から −50°C の間で測定し温度低下と共に剪断強度が増大することを見い出し，Finlayson 達とは矛盾する結果を得た。また強度の値についても，Finlayson 達の 7～8 kg/cm² に対し Butkovich は 11～15 kg/cm² (−10°C) とかなり大きな値を得ている。

剪断強度は構造敏感性として知られている。従って，強度は試料の表面や内部の目に見えない欠陥やクラックの存否に強く依存するであろう。また試料の寸法，結晶方位，温度，負荷速度及び試験方法の影響等を強く受けるであろう。

従来，剪断強度は主に河や湖の天然氷について調べられてきた。それで筆者らは河氷，湖氷とは結晶粒径などの異なる市販の多結晶氷及び単結晶氷の剪断強度を測定した。

今回は二種の実験方法を用いて −0.5°C から −30°C の温度範囲で行なった剪断試験の結果を述べる。

II. 片面破壊による方法 (方法 I)

この方法 (第1図参照) では，広いベースをもつ小さな氷の柱に真鍮の輪をかけ，この輪を介して氷に力を加えた。氷は小氷柱の根元 (輪の底面) で破壊された。

1. 試　　料

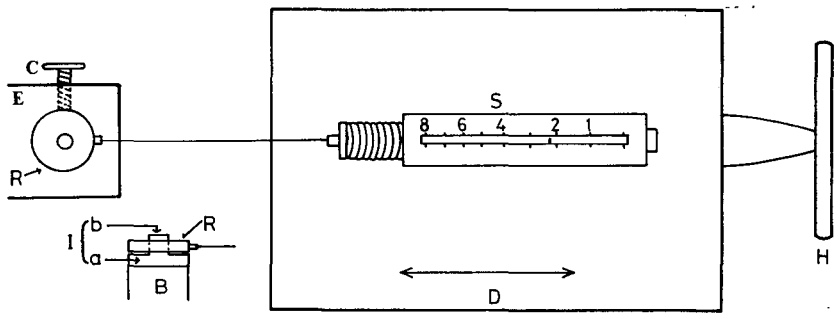
市販の大きな氷を帯のこで無差別の方向に切り，2 cm 角の氷片とした。この氷片をあらかじめ内部に氷をつめた直径 1.5cm のステンレス製円筒の一端に凍着させた。次に円筒を旋盤のチャックにはさみ，氷片の一部を削って直径 4 mm 程度の細い氷の円柱部を作った。第1図に

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1274号

注. Finlayson[1] の結果が一部に (例えば N. E. Dorsey: Properties of ordinary water substance) 単結晶氷の測定として引用されているが，Finlayson は柱状河氷の柱面に平行及び垂直な試料の剪断強度を調べたのである。

Iで示したように氷の試料は，広い氷のベースaの上に細い氷の円柱bが突き出た形となる。この試料を−5°C に半日，さらに実験温度に1日程度焼鈍した後，試験に供した。市販氷の粒径は 0.5 cm 内外で，破断面に1ケないし2ケの結晶粒が含まれていた。試料の整形は全て−5°C 附近の温度で行なった。旋盤で削った直後，氷の表面が多少白濁することもあった。しかし，この氷を空気中に1ないし2時間おくと表面層がわずかに昇華して透明な氷になった。この昇華作用は旋盤で削ることによって生ずる表面のキズを除去する作用もかねている。しかし，長時間にわたる昇華は試料の太さを不均一化させるので，半日後には試料をケロシン中に移し昇華を防いだ。

単結晶氷の試料にはアラスカのメンデンホール氷河から採取された天然の単結晶氷を用いた。この氷から結晶主軸が氷柱の軸に平行なもの及び垂直なものの2種類の試料を次の方法で用意した。まず，氷の小ブロックに赤外線ランプを照射し，チンダル像を作った。次にブロックを削り一面をチンダル像に平行或は垂直にした。この氷面をステンレスの筒の一面に凍着させた。以下，市販氷の場合と同じ方法で仕上げた。赤外線ランプの照射によって生じたチンダル像は再凍結後には完全になくなっていた。



第1図 実験装置の図解

I: 氷の試料，R: 真鍮の輪。ハンドルHを回すとバネ秤Sを載せた台Dが矢印の方向に移動し，Sにとりつけたひもの他端についているRによって氷Iに力が加えられる

2. 装置及び方法

第1図に実験装置を図解した。図中Iが氷の試料で，氷の大部分はステンレスの筒B(直径 15 mm) にはめ込まれている。ステンレスの筒は台Eにはめ込まれ，ボルトCで台に固定される。筒から出ている氷の部分 a，b はそれぞれ円柱状をなし，b の太さは直径 4 mm 程度である。氷の円柱 b には，一端をバネ秤にひもでつながれた真鍮の輪 R (内径 4.5 mm) がはめ込まれる。バネ秤Sは左右 (矢印の方向) に移動できる台Dに固定されている。ハンドルHを回転させると，台Dが図の右に移動してバネ秤のバネが伸び，輪Rを介して氷Iの a, b の境界面に力が加えられる。力はハンドルの回転と共に次第に増す。増加率は約 1 kg/min であった。氷は氷の根元 (a と b の境界面) で破壊された。この破壊の起る瞬間に氷に加えられた力をバネ秤Sに刻まれた目盛から読み取った。

3. 測 定 結 果

以上のような方法で用意した氷の試料についていろいろの温度で破壊強度の測定を行なっ

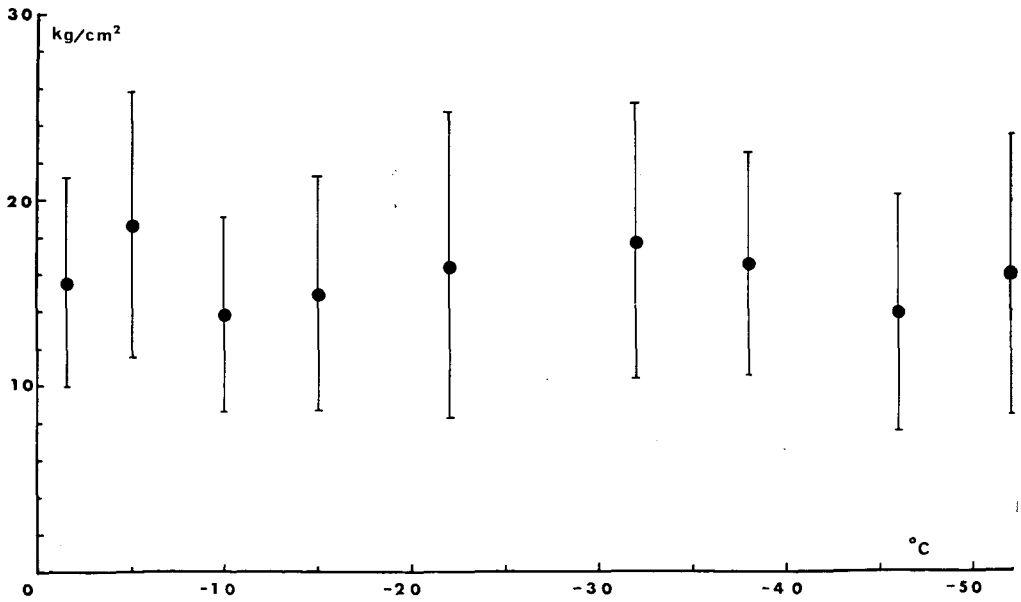
た。強度は氷柱が破壊寸前に受けていた力を小氷柱 b の断面積で割った値とした。

いろいろの太さの氷柱について破断面を観察すると，直径が 0.5 cm 以下では破断面がほぼ円形の平面状であった。しかし，0.5 cm 以上では破断面は丸みを失い，半円形に近くなった。しかも，縦断面をみると大きな凹凸をもつ形になっていることがわかった。破断面の形状が複雑になると，その面積を正確に定めることは難しい。本実験では破断面が見かけの断面積に近くなる直径 0.4 cm 内外の試料について測定を行なった。試料の太さはマイクロメーターで測定した。

1) 市販氷　市販の大きな氷の塊 ($30\times40\times50$ cm^3) から作った透明な氷の試料 239 ヶについて，−1.5°C から −52°C の温度範囲で強度の測定を行なった。測定結果を第 1 表及び第 2

第 1 表　市販氷の剪断強度

温度 (°C)	平均値 (kg/cm²)	標準偏差 (kg/cm²)	変動係数 (%)	最小値 (kg/cm²)	最大値 (kg/cm²)	試料 (ヶ)
− 1.5	15.6	5.7	36	7.1	30.5	30
− 5	18.6	7.1	38	9.2	29.6	21
−10	13.8	5.2	37	7.5	30.0	22
−15	14.9	6.3	42	7.3	30.0	41
−21	16.5	8.2	49	7.1	28.8	26
−32	17.7	7.4	41	8.3	30.9	28
−38	16.5	6.0	35	7.9	28.9	25
−46	13.9	6.4	45	7.4	26.8	24
−52	16.1	7.5	46	7.2	31.2	22



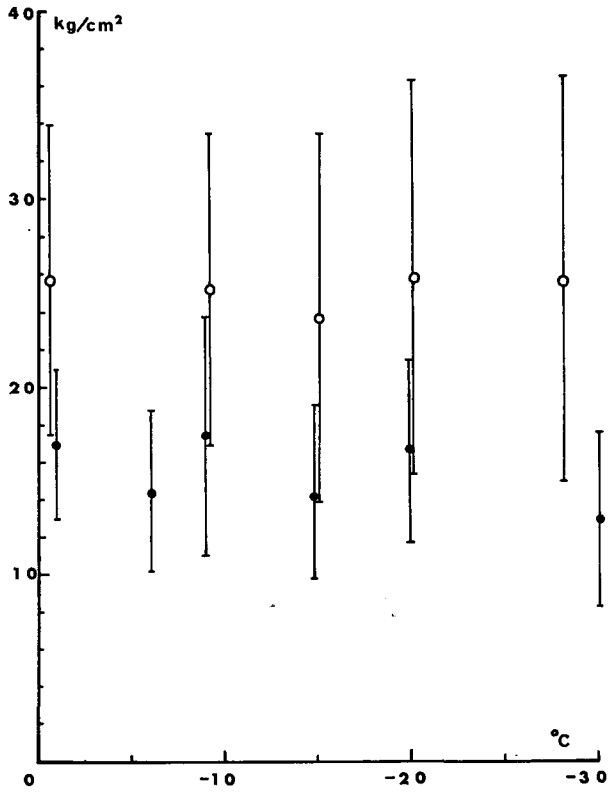
第 2 図　市販氷の剪断強度

縦軸：強度，横軸：温度。黒丸は平均値

図に示した。第1表には各温度に於ける平均強度，強度の標準偏差，強度のばらつきの度合を示す変動係数（標準偏差/平均値）等を示した。第2図には各温度での平均強度及びばらつきの程度を示した。強度は温度によってあまり変化せず，平均すると 15.9 kg/cm³ であった。

2) 単結晶氷　結晶主軸が氷柱軸に平行なもの及び直交するものの2種類の試料 320 ヶについて，−0.5°C から −30°C の範囲で強度の測定を行なった。これらの結果を第2表及び第3図にまとめて示した。いずれの場合にも，強度はかなり広い範囲にわたって分散している。第3図で黒丸は結晶主軸と氷柱軸が平行，白丸は直交する場合である。白丸は黒丸の1倍半余り大きい値を示している。平均値をみるといずれの場合も温度による強度の変化はないようである。測定中に観測された強度の中には例外的に 50 kg/cm² から 70 kg/cm² に到るものがいくつかあった。

ここで測定された 16～25 kg/cm² の値は，同じく温度依存を示さないという結果を得た Finlayson の



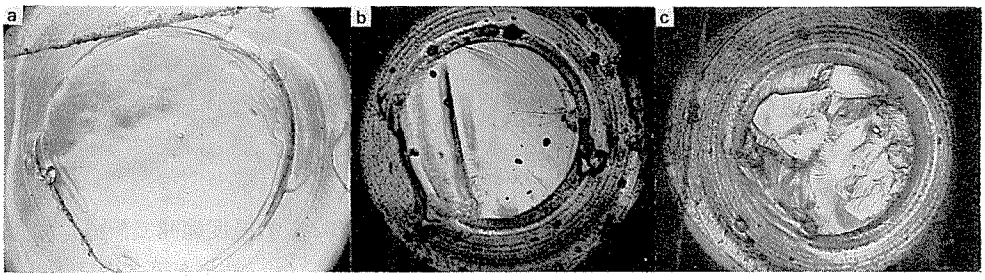
第3図　単結晶氷の剪断強度
縦軸：強度，横軸：温度。黒丸：氷柱軸//C 軸，白丸：氷柱軸 ⊥C 軸

第2表　単結晶氷の剪断強度

	温度 (°C)	平均値 (kg/cm²)	標準偏差 (kg/cm²)	変動係数 (%)	最小値 (kg/cm²)	最大値 (kg/cm²)	試料 (ヶ)
氷柱軸がC軸に平行	− 1	17.0	4.1	24	10.9	30.0	45
	− 6	14.3	4.4	30	9.1	25.3	24
	− 9	17.4	6.4	36	9.4	29.7	41
	−15	15.1	5.4	35	9.2	28.7	33
	−20	16.6	4.9	29	9.3	28.1	21
	−30	12.8	4.8	36	7.6	24.1	18
氷柱軸がC軸に垂直	− 0.5	25.7	8.3	32	13.3	43.1	26
	− 9	25.2	8.3	31	12.0	42.5	18
	−15	23.7	9.9	41	12.2	44.5	52
	−20	25.8	10.5	40	13.3	41.1	12
	−28	25.6	10.8	42	12.6	43.4	30

値の2倍以上大きかった。しかし，Finlaysonは20倍以上大きな氷の試料を用いているので，この値の相違の大部分は第2章に述べる寸法効果によって説明されるものと思われる。

次に破断面のレプリカ観察を行なったところ，強度と破断面模様との間にきわだった関係のあることがわかった。破断面にあまり模様の現われていないもの（第4図a）では強度は概して小さかった。破断面に放射状の線状模様が現われる（第4図b）ものでは中程度の強度を示す。そして破壊面に複雑な貝殻模様の現われるもの（第4図c）では剪断強度も大きな値であった。



第4図　破断面のレプリカ写真
a) 強度小，b) 強度中，c) 強度大

III.　剪断箱による方法（方法II）

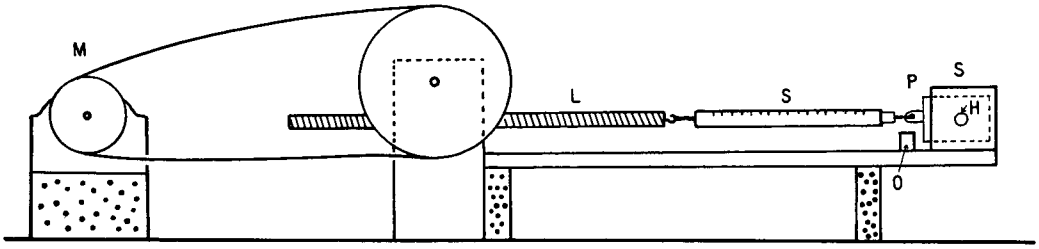
この方法（第5図参照）では剪断箱に挿入された氷の円柱が破壊される。剪断箱は真鍮の引き出しが出し入れ出来るようになっている。わくと引き出しの板をつら抜いて円い穴があけられ，穴に挿入された氷は引き出しとわくとの境界面で破壊された。

1.　試　　料

試料には市販氷及び人工の単結晶氷を用いた。単結晶氷は引き上げ法による結晶成長によって作った。あらかじめ結晶方位のわかった2種の種結晶氷からそれぞれ結晶主軸に平行及び直角方向に結晶を成長させた。結晶は直径10 cm程度の大きなもので，48時間で6 cmほど伸びた。容器内の水（蒸留水）をマグネティック・スターラーで攪拌することによって気泡を含まない透明な氷を作ることができた。この氷から成長方向に平行な多数の氷の柱（断面1 cm^2程度）を帯のこで切り出した。以下方法Iと同様の仕上げを行ない，太さ0.45 cm，長さ5 cm程度の氷の円柱にした。単結晶氷の場合，種結晶からの成長方向に従って結晶主軸に垂直及び平行な面内の剪断試験試料とした。試料は−5°Cに12時間，次に実験温度に約12時間放置，焼鈍した後試験に供した。

2.　実 験 装 置

装置を第5図に示した。図中Sが剪断箱で，円形の穴Hがあけてある。この穴に氷の円柱が挿入される。Pは引き出しでフックを介してバネ秤Sに連結されている。バネ秤の他端はシャフトLにつながり，Lは減速歯車を介してモーターMで駆動される。モーターを回すとLが左右に動き，Sを介して剪断箱内の氷Iに力が加えられる。Lの移動速度は毎分10 cmである。氷は普通0.5分から2分の範囲で破壊した。この破壊時の力をバネ秤Sに刻まれた目盛



第5図 剪断箱による実験装置
S：剪断箱，H：試料挿入穴，P：引き出し，S：バネ秤，
L：シャフト，M：モーター，穴Hに氷の試料が入る

から読みとった。剪断箱の引き出しPが破壊に際し飛び出すことのないようストッパーOが取りつけてある。

3. 測定結果

市販氷，単結晶氷及びゆき氷の剪断強度を −1°C から −32°C の温度範囲で測定した。

1) 市販氷 115個の試料について破壊強度の測定を行なった。結果を第3表にまとめて示した。強度は方法Iの場合と異なり温度の低下と共に増大した。

第3表 市販氷の剪断強度

温度 (°C)	平均値 (kg/cm²)	標準偏差 (kg/cm²)	変動係数 (%)	最小値 (kg/cm²)	最大値 (kg/cm²)	試料 (ケ)
− 3	21.5	2.6	12	12.0	30.6	29
− 9	18.5	4.0	22	12.8	26.7	28
−20	27.9	7.6	27	16.3	40.5	30
−30	30.9	7.2	23	16.9	43.9	28

2) 単結晶氷 氷の円柱軸と結晶主軸が平行なもの及び垂直なものの2種の単結晶氷について強度の測定を行なった。

測定結果を第4表及び第6図にまとめて示した。第6図で黒丸は結晶主軸と氷柱軸とが平

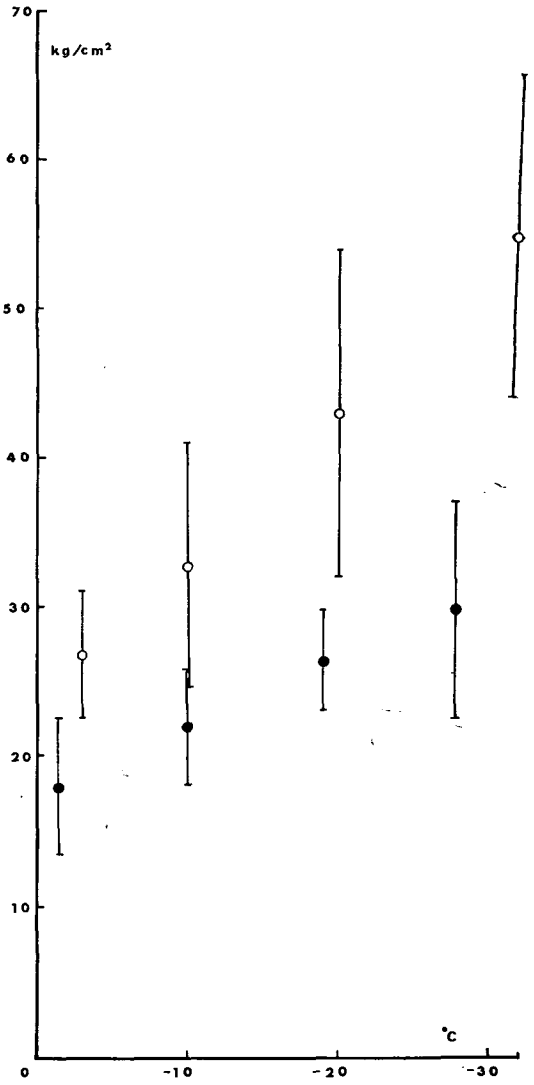
第4表 単結晶氷の剪断強度

	温度 (°C)	平均値 (kg/cm²)	標準偏差 (kg/cm²)	変動係数 (%)	最小値 (kg/cm²)	最大値 (kg/cm²)	試料 (ケ)
氷柱軸がC軸に平行	−1～−2	18.0	4.6	26	9.8	24.1	19
	−10	21.9	3.9	18	16.3	30.7	30
	−19	26.3	3.4	13	21.2	35.0	27
	−28	29.3	7.3	25	19.7	45.2	21
氷柱軸がC軸に垂直	−2～−3	26.7	4.4	16	20.3	31.1	11
	− 9	32.6	8.3	25	17.5	42.5	24
	−20	42.8	11.0	26	32.6	54.5	27
	−32	55.4	11.0	20	31.9	69.5	23

行，白丸は垂直の場合である。どちらの場合も温度低下と共に強度が直線的に増加した。しかし，氷柱軸が主軸に垂直の場合の強度は平行の場合の強度の約1倍半であった。

3) ゆき氷　次に雪をふるいにかけて0°Cの水中に落下させ，これを凍らせて作った氷（雪氷）について剪断強度の試験を行なった。この雪氷は気泡を含んで半透明であり，粒径が1mm以下の小さな結晶粒で構成された多結晶氷である。従って，破断面には数十ケの結晶粒が含まれていた。−3°Cから−20°Cの範囲で行なった測定結果を第5表に示した。強度は概して小さな値を示した。強度は温度の低下と共に増大し，−3°Cで9.8 kg/cm² だったものが，−20°Cでは15.6 kg/cm² と2倍近くまで増大した。これらの値は市販氷（第3表）の約半分の強度であった。

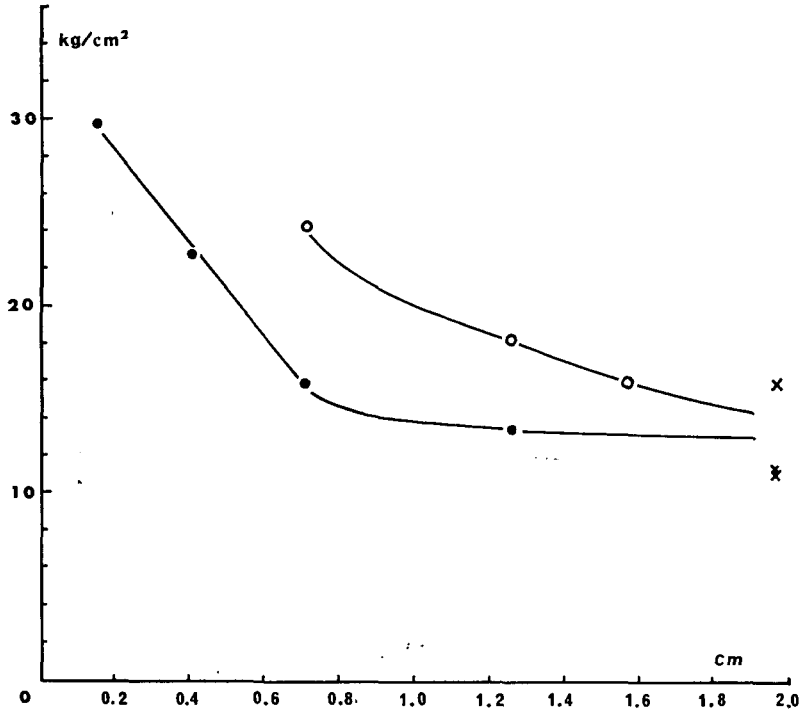
4) 寸法効果について　一般に剪断強度は寸法効果を示すことが知られている。従って，氷の場合にも試料の太さにより強度が変化すると予想される。それで太さ0.1 cmから1.2 cmの範囲の氷の試料（市販氷）241ケについて強度の測定を行なった。測定はすべて−9°Cで行なった。結果を第7図に黒丸で示した。直径0.1 cmで29 kg/cm² を示した強度は太さの増加と共に直線的に強度を減



第6図　単結晶氷の剪断強度
縦軸：強度，横軸：温度。黒丸：氷柱軸//C軸，白丸：氷柱軸 ⊥C軸

第5表　ゆき氷の剪断強度

温度 (°C)	平均値 (kg/cm²)	標準偏差 (kg/cm²)	変動係数 (%)	最小値 (kg/cm²)	最大値 (kg/cm²)	試料 (ケ)
−3	9.8	1.3	13	7.6	13.2	21
−9	13.6	2.6	19	9.3	17.5	22
−20	15.6	4.5	29	10.4	20.4	31



第7図 強度の寸法効果

縦軸：強度，横軸：試料の直径。黒丸：両面破壊，白丸：片面破壊。
×印：Butkovich の値 (−9°C)

じ，直径 0.7 cm で 16 kg/cm² になった。直径 0.7 cm 以上では強度の減少は急に小さくなり，直径 1.3 cm で 13 kg/cm² になった。

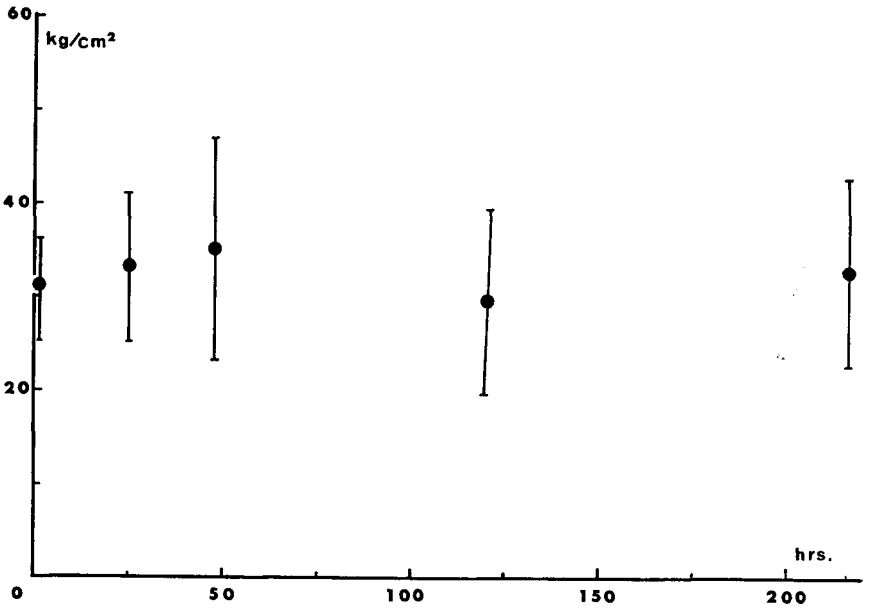
直径 0.1 cm から 0.7 cm の間，強度が太さに反比例する。このことは次のように説明することができる。破壊が表面から発生するとすれば，破壊の核の存在確率は表面積に比例するから，強度は試料の直径に反比例することになる。この点を確かめるため，氷の柱を剪断箱に半分だけ挿入し，氷の一面だけで剪断破壊がおこるような試験を行なった。同じ太さの試料では片面破壊の方が，両面破壊の場合より強度が大きい。逆に同じ強度を示す試料の太さを比較すると，片面破壊では両面破壊の場合の約 2 倍の太さになっている。このことからも破壊が表面から発生するという仮定の正しいことがわかる。

直径 0.7 cm 以上の試料では，破壊する直前に数度にわたり小さなクラックの入る音がした。この音の後 1～2 kg 荷重が加わって破壊した。小クラックは試料が太いほど多数発生した。しかし 0.5 cm 以下の太さの試料ではクラックの発生と破壊が殆んど同時であった。

第 7 図には −9°C に於ける Butkovich の値 (河氷及び市販氷) を × 印で示した。我々の値 (外挿値) とかなりよく一致している。

3) 焼鈍の効果 氷は昇華や焼鈍によって表面や内部の組織が変わる。例えば，−4°C の空気中に置かれた直径 0.450 cm の氷の円柱は 12 時間で 0.005 cm の表面層が昇華した。従って，始め表面に存在していたキズの大部分はこの間に消滅するであろう。結晶内部の欠陥はこのよ

うな短時間に消滅するとは思われない。しかし，昇華を長時間続けることは太さを著しく変えるので好ましくない。そこで長時間にわたる焼鈍の効果を調べるにはケロシンなど氷を融かさない液体に浸す必要があった。焼鈍はすべて −5°C で行ない測定は −9°C で行なった。試験結果を第 8 図に示した。図の縦軸は強度，横軸は試料作成後の時間である。測定値は広範囲にわたって分散しているが，1 ないし 2 時間から 216 時間の間では焼鈍の効果は著しくないようである。



第 8 図　焼 鈍 の 効 果

縦軸：強度，横軸：時間 (hrs.)。単結晶氷 (試料軸 ⊥C) −9°C で測定

ケロシン中では表面の欠陥は消されない。従って，ここで焼鈍効果が現われなかったことは，前節で議論したように，破壊強度には表面の欠陥が関係し，試料内部の欠陥は関係しないことを裏付けるものである。

IV. ま と め

市販氷，単結晶氷等の剪断強度を二つの方法 (方法 I 及び方法 II) で測定した。方法 I では Finlayson や Wilson-Horeth 等の結果と同様，強度の温度依存は認められなかった。しかし，方法 II では Butkovich の結果と同様著しい温度依存が現われた。このように，測定法のわずかな違いによって強度は著しく様相を異にした。

方法 I の強度は市販氷で 16 kg/cm², 単結晶氷では結晶主軸が破断面に垂直の場合 16 kg/cm², 平行の場合 25 kg/cm² であった。Finlayson の場合，我々のに比べると試料の寸法が 10 倍以上大きいので，強度の相違の一部は寸法効果によって説明されるであろう。

方法 II では，強度が温度低下と共に直線的に増加した。結果を第 3〜5 表に示した。−10°C の値は市販氷で 24 kg/cm², 単結晶氷では結晶主軸が破断面に垂直の場合 22 kg/cm², 平行の場合 33 kg/cm², ゆき氷では 13 kg/cm² であった。これらの値は同じく強度の温度依存

を見い出した Butkovich の値の約2倍であった。Butkovich は我々の試料の約4倍の太さの試料を用いている。強度の寸法効果を調べた（第7図）ところ，試料の太さと共に強度が減少した。この値を Butkovich の試料の太さまで外挿するとかなり近い値になった。

寸法効果及び焼鈍効果を調べたところ，強度は試料の表面積に依存することがわかった。

本研究を進めるに当り有益な助言を与えられると共に，論文の推敲をして下さった若浜五郎教授に感謝します。

文　献

1) Finlayson, J. N. 1927 Tests on the shearing strength of ice. *Canad. Engineer*, **53**, 101–103.
2) Wilson, J. and Horeth, J. 1948 Bending and shear tests on lake ice. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **29**, 909–912.
3) Butkovich, T. R. 1954 Ultimate strength of ice. *SIPRE Res. Rept.*, **11**, 12 pp.

Summary

For practical importance, the shear strength of ice has been studied by many workers since the beginning of this century. Finlayson, Wilson and Horeth, for instance, measured the shear strength of river and lake ice and obtained the value of 7–8 kg/cm² irrespective of temperatures from −1° to −23°C. More recently, Butkovich found the temperature dependence of the shear strength of ice in a temperature range from 0° to −50°C, which was in contrast to the results obtained by Finlayson and others. These two inconsistent results may be attributed to the differences in the size and structure of the specimens, crystallographic orientations, densities of surface defects and the methods used in the experiments, because the shear strength is a structure-sensitive quantity.

In order to study how a method adopted in an experiment influences measured results, the shear strengths of polycrystalline and single crystals of ice were measured by two different apparatuses.

The first one is schematically shown in Fig. 1. A cylindrical specimen I of ice was prepared by lathing and was annealed in the cold room at −5°C for more than twelve hours, which was fixed on the metal base B. When the deck D was moved to the right by turning the handle H, top of ice was pulled horizontally by the spring balance S, which was fixed to the deck D. The force needed to cause the shear fracture of the ice was read on the spring balance, and the shear strength of the ice was calculated. The shear strength obtained for polycrystalline ice at temperature range from −2° to −52°C was widely dispersed as shown by the vertical straight lines in Fig. 2. The solid circle at the centre of each line represents the average value at each temperature. The shear strength was independent of temperatures from −2° to −52°C, which agrees with the Finlayson's results.

The open and solid circles in Fig. 3 respectively give the average valves obtained for single crystals of ice whose c-axes are perpendicular and parallel to the axes of the ice specimens. The strength is constant in a temperature range from −2° to

−30°C as was the case for polycrystalline ice. When fracture took place, the average strength was 16 kg/cm² parallel to the basal plane (solid circles), and 25 kg/cm² perpendicular to the basal plane (open circles).

Careful inspections of the fractured planes showed that the wide dispersion in shear strength had a close connection with the mode of fracture. Small values were observed when fracture took place along a single flat plane as shown in Fig. 4 a, while larger values were obtained when the fracture plane was so complicated as shown in Fig. 4 c.

Another apparatus used in the present work is schematically shown in Fig. 5. An ice rod was inserted into the hole H of the "shearing box" S. The drawer P of the shearing box was pulled at a slow speed by the rack L through the spring balance S, which was driven to the left by the motor M. The pulling force was increased at a rate of 10 kg/min, and for while fracture took place simultaneously along the two interfaces between the drawer P and the box S. The shear strength obtained by this apparatus for polycrystalline ice, single crystals of ice and snow ice was tabulated respectively in Tables 3, 4 and 5. It was found that the strength increased as the temperature was lowered for any kind of ice, which is in agreement with the results obtained by Butkovich. The reason is not obvious why the temperature dependence was observed when the "shearing box" was used, while it was not observed in the previous experiment. Fig. 6 illustrates the strong temperature dependence on the shear strength of single crystals of ice; the strength of ice whose c-axis was perpendicular to the axis of the ice specimen (open circles) was much larger than that of ice whose c-axis was parallel to the axis of the specimen (solid circles).

The values of shear strength obtained in the present experiment were in general much larger than those obtained by Finlayson and others. This may be attributed to the size of specimens used in the tests, because the size of the specimens used in the present work was much smaller than that of the specimens used by Finlayson and others. The dependence of the size of the specimen on the shear strength was then studied by the use of ice specimen with different diameters. The obtained shear strength was plotted against the diameter of the ice specimen in Fig. 7. A strong size effect on the shear strength was found when the diameter of the ice specimen was less than 1.5 cm. X marks represent the Butkovich's values, which were consistent with the present results obtained for the specimen with larger sizes.

In order to study the effect of annealing on the shear strength of ice, specimens were kept in kerosene for a long period at −5°C and the strength was measured. No effect of annealing on the shear strength was found as shown in Fig. 8. This may suggest that fracture started at the surface of the ice because the surface defects like a notch did not disappear by the annealing of ice in the kerosene.