



Title	0° ~ -100° の範囲における氷の粘弾性 I
Author(s)	山地, 健次; YAMAJI, Kenji; 黒岩, 大助 他
Citation	低温科学. 物理篇, 15, 171-183
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17920">https://hdl.handle.net/2115/17920</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p171-183.pdf



## $0^{\circ}\sim-100^{\circ}\text{C}$ の範囲における氷の粘弾性 I\*

山地 健次 黒岩 大助

(低温科学研究所 純正物理学部門)

(昭和31年8月受理)

### I. 序 言

従来、氷の粘弾性に関する研究は、主として氷河の流動の問題や、湖水や河川、海水の凍結問題に関連して行われてきた。従つて測定された温度範囲もせいぜい  $0^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$  の間で、しかもその多くは静的な測定法がとられてきた。最近、中谷教授<sup>1)</sup> は氷河の末端にある巨大な氷の単結晶について多くの研究をすすめた。それによると、単結晶から切り出された氷の棒に静的な力を加える場合、力が C 軸に平行の場合は氷の棒は容易に曲るが、垂直の場合には殆んど変形を示さないこと、また、氷に力を加える時間の函数として変形の度合が変ることが明かにされている。氷河の流動や単結晶の氷の棒の変形は、いわゆる“rheological な流れ”の現象であつて、加えた力の時間に強く関係するのであるから、氷の粘弾性の性質の研究に際して、試料に力を加える時間を自由にコントロールできる振動的方法は、静的な研究方法とならんで氷の研究に有力な手段となるであろう。なお、当研究所には最近温度を  $0^{\circ}\text{C}$  から  $-100^{\circ}\text{C}$  まで下げることができる超低温装置が設備され、測定する温度範囲を  $-100^{\circ}\text{C}$  まで拡げることが可能になつたので、我々は振動的方法により、氷の弾性率及び振動損失の測定を  $0^{\circ}\sim-100^{\circ}\text{C}$  の範囲にわたつて測定した。その結果をここに第 1 報として報告する。

### II. 実験装置及び試料の製作

実験装置は筆者らが積雪の粘弾性の測定に用いたものと全く同じである<sup>2),3)</sup>。厚さ 1 cm, 幅 3 cm, 長さ 30 cm 程度の氷の柱を振動の節点で 2 本の細い糸により吊りさげる。柱の両端の下面には、それぞれ面積が  $1\text{ cm}^2$  位の薄い鉄片を貼りつけ、それぞれの鉄片に向い合せに約 5 mm の間隔をおいて 2 個の電磁コイルを設置する。一方のコイルに低周波発振器からの交流電流を通ずると、コイルは鉄片を吸引し、氷の柱は強制振動を始める。発振器の周波数が氷の柱の固有振動数に一致すると、共鳴によつて柱の振動振幅は最大となり、他の端のコイルに誘起される感応電流は最大となる。そのときの周波数をオシログラフで測定すると、試料の密

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 346 号

度と寸法とから、ヤング率  $E$  は次の式から算出できる。

$$E = \frac{48\pi^2 l^4 \rho f^2}{m^4 a^3} \tag{1}$$

$l$ : 柱の長さ                       $a$ : 厚さ                       $\rho$ : 密度  
 $f$ : 固有振動数                       $m$ : 振動様式できまる常数

また、振動を急にとめてから、振動振幅が  $\frac{1}{n}$  に減衰するまでの時間  $t_1$  をオッシログラムからよみとれば、振動損失  $\tan \delta$  は

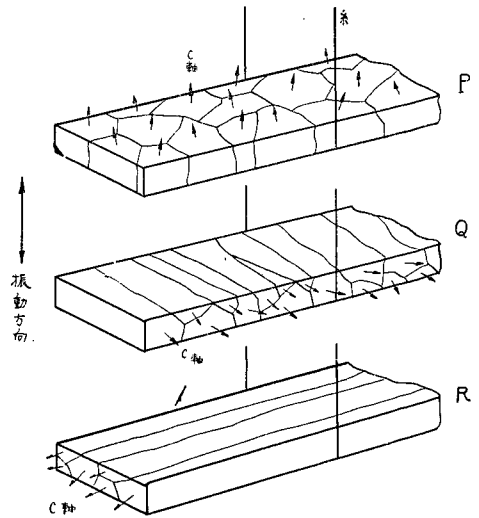
$$\tan \delta = \frac{\ln n}{\pi f t_1} \tag{2}$$

として求めることができる。

測定の精度は、試料の長さ、厚さ、密度、周波数の読みとりの精度できまり、 $E$  の絶対値は  $\pm 0.5 \times 10^{10}$  までの誤差はさげられない。しかし、 $E$  の温度変化を調べる場合は、変化するのは固有振動数のみであり、相対的变化は絶対値に比べてずっと精密に測定でき、誤差は  $\pm 0.02 \times 10^{10}$  以下である。 $\tan \delta$  の測定の精度は振幅が  $1/2$  になるまでの時間の読みとりと振動数の読みとりとできまり、誤差は  $\pm 0.005$  以内である。

実験は超低温装置の低温箱の中で行なつた。超低温箱は縦 30 cm、横 50 cm、深さ 50 cm の冷却容積をもち、フロン 22 とフロン 13 の二段冷却装置で冷される。到達最低温度は、 $-100^\circ\text{C}$  であるが、途中の任意の温度にも一定時間保持することが可能である。

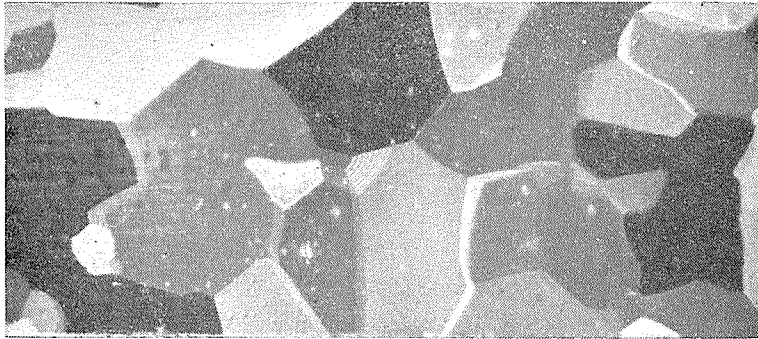
さて、氷の試料であるが、この種の研究には少なくとも、氷にかかる力の方向が結晶の主軸 ( $c$  軸) に対して平行なものと垂直なものとの 2 種類は必要である。このためには氷の柱が一つの巨大な単結晶から、それぞれの軸に応じて切りとられることが望ましい。しかし、このことは日本では殆んど不可能なことなので、我々は氷の試料はもつぱら  $30 \times 60 \times 100 \text{ cm}^3$  の大きさの市販の水から切り出すことにした。このような氷は、同容積の大きさの製氷罐につめられた水が、 $-10^\circ\text{C}$  のブラインのなかで約 2 昼夜かかつて凍結させられたものである。パブリックによつて空気抜きがしてあり、殆んど気泡を含まない純粋な氷である。ところで、これに注意してみると、凍結方向に  $c$  軸をもつ直径  $1 \sim 2 \text{ cm}$  ぐらいの、単結晶が無数にならんでいることがわかる。それで我々は、不満足ではあつたが、このような氷のブロックから、 $c$  軸が



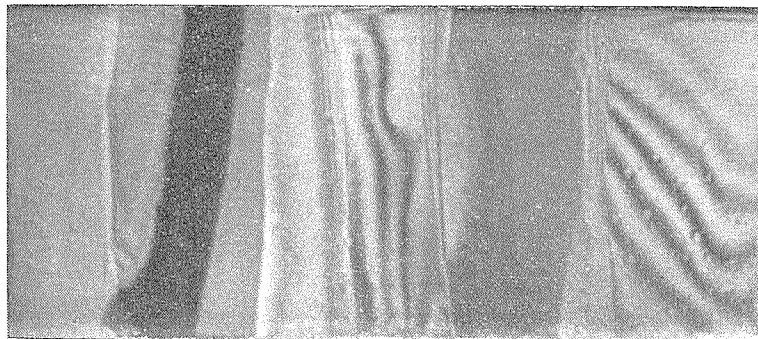
第 1 図 実験に使用した氷の種類

振動方向に平行のものと垂直のもの、及び  $c$  軸が試料の柱の長さの方向に一致するものの3種類の試料をつくつた。これら三つの種類の試料のスケッチがそれぞれ、P, Q, Rとして第1図に示されている。小さな矢印はそれぞれの結晶粒の  $c$  軸の向きを示す。

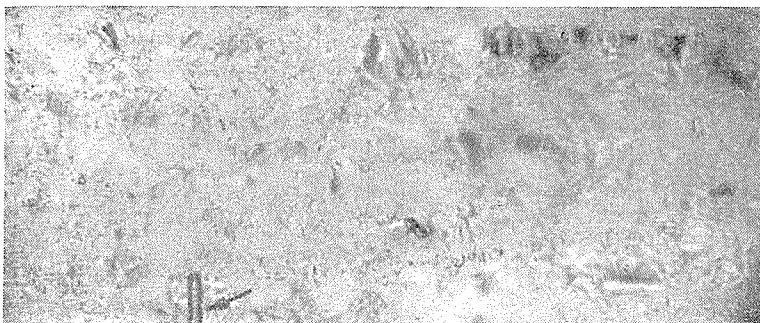
試料を所定の寸法に仕上げるには次のようにする。低温室のなかで、氷のブロックから鋸で柱の大体の形を切りとる。ついで2枚の偏光板を用いて結晶軸の向きをきめながら、鉋で表面を削り  $\pm 0.1$  mmの精度で約厚さ1 cm, 幅3 cm, 長さ30 cmの矩形の柱に仕上げる。第2図は、このようにして成形した氷の柱の一部を偏光でみたときの写真で、Aは第1図に  $c$  軸が振



A  $c$  軸, 紙面に垂直の方向



B  $c$  軸, 紙面に平行で上下方向



C つらら (試料Sとする)

第2図 氷の偏光写真

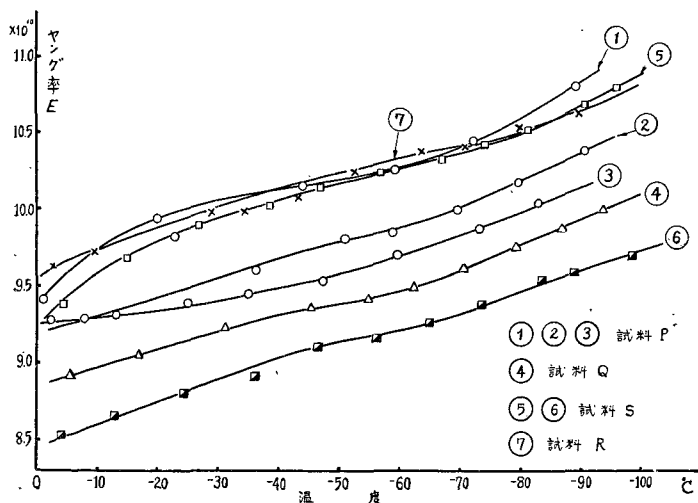
動方向に並行として示したPに対応し、Bはc軸が振動方向に対して垂直として示したQに対応する。写真Aにみられるように、氷の柱は不規則な形をした直径が1~2 cmの単結晶の柱の集合体である。各々の単結晶に濃淡の差があるのは、それぞれのc軸が第1図に示すごとく少しずつ傾いているためである。従つて、我々がうえにc軸が振動方向に平行、又は垂直にそろつた試料といつたのは、大体においてそろつているという意味である。第2図の写真Cは春先軒下にぶらさがっている長さ2 mばかりの巨大な“つらら”から同じようにして切り出した試料である。この試料をSと名付ける。A、Bと同じように偏光でとつた写真であるが、このものは明瞭な結晶構造を示していない。つららは市販の氷に比べれば比較にならないほど小さな微結晶の集合体で、かつ、その軸の方向は全く乱雑な orientation をもっているからである。従つて、この試料は結晶軸の比較的そろつているA、Bに比べてコントロールとして役立つであろう。

なお、実験に当つての温度測定であるが、低温箱及び恒温槽の温度は、そのなかにぶらさげてある電気抵抗温度計で測り、氷の試料の温度は、氷の柱をつり下げている糸の位置、すなわち振動の節の位置に小さい孔をあけ、それに直径0.2 mmの小さい熱電対をさしこんで測定した。第2図、写真Cで矢印で示した小さな孔がそれである。試料に直接孔をあけるのは少し乱暴であるが、この場所は振動の節になつているから、あまり大きな影響はないであろう。実際の測定は、電気抵抗温度計の読みと、この熱電対のよみとが一致したときの温度をもつて試料の温度とみなしたのである。

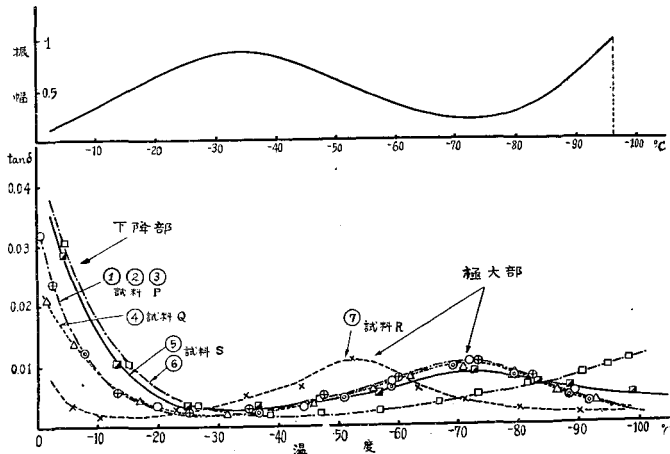
### III. 測定結果

#### i) ヤング率 $E$ 及び $\tan \delta$ の温度特性

第3図、及び第4図に、うえにのべたP、Q、R、Sの4種類の試料について0°~-100°C



第3図 各種氷のヤング率の温度特性

第4図 いろいろな氷の  $\tan \delta$  の温度特性

にわたり、そのヤング率  $E$  及び振動損失  $\tan \delta$  を測定した結果が示されている。第3図で、曲線 1, 2, 3 は結晶の  $c$  軸が振動方向に対して平行にそろっている試料 P のヤング率の変化である。何れも温度が低くなるに従って  $E$  はほぼ直線的に増え、 $-5^\circ\text{C}$  では  $9.4 \times 10^{10}$  のものが、 $-95^\circ\text{C}$  附近では  $1.1 \times 10^{11}$  に達している。しかしながら、1, 2, 3 の3本の曲線を比べてみると、同じ氷のブロックからとり出した同じ種類の試料であつても3本共そのヤング率の値にかなりの違いがあるように見える。しかし、 $E$  の絶対値には  $0.5 \times 10^{10}$  程度の誤差をともなっているもので、この差は有意なものとはいえない。曲線 4 は1例ではあるが、 $c$  軸が振動方向に垂直な試料 Q についてのものである。その値は曲線 1, 2, 3 の何れよりも小さい。曲線 5 と 6 とは、結晶軸の方向が全く乱雑な orientation をもつ微結晶の集合体であるつらら (試料 S) についての2例である。同じつららであつても採集した場所によつて構造は大変違つている。つららは通常無数の気泡や不純物を含んでいるので、ヤング率にこの程度の差を生ずるのはむしろ当然のことであろう。曲線 7 は、これも1例ではあるが、 $c$  軸が氷の柱の長さの方向に並んでいる試料 R についてのヤング率の変化を示す。

以上の測定に使用した氷の試料の寸法は、試料 R を除き、大体厚さ 1 cm, 幅 3 cm, 長さ 30 cm ぐらいで基本振動数は約 200 前後のものであつた。ただ試料 R だけが、あとでのべるように、試料の製作上長さが 12 cm (基本振動数 750 へ) であつた。すべての試料の  $E$  の温度変化を通覧すると、曲線 1, 5 のごとく  $0^\circ\text{C}$  から温度が下ると共にヤング率が2次曲線的に急に増え  $-30^\circ\text{C}$  ～  $-40^\circ\text{C}$  で一たんんだらかになり以後はほぼ温度降下と共に直線的に増えてゆくものと、曲線 3, 4, 5 のごとく始めからほぼ直線的に増大してゆくものと二つの型があるように思われる。しかし、何れにしても、各々の曲線はほぼ平行にならんでいて、温度低下に対するヤング率の増加の割合は試料の種類の如何にかかわらずほぼ等しい。

次に甚だ興味のあるのは振動損失  $\tan \delta$  の温度特性曲線である。第4図は、第3図に示し

た4種類の試料の  $\tan \delta$  の温度変化を示すもので、各々の曲線につけた番号はそれぞれ第3図の曲線のそれに対応する。先ず試料Pの曲線1, 2, 3に注目してみよう。これらは何れも  $c$  軸が振動方向に対して平行な試料である。この場合には、 $\tan \delta$  は3例共完全に一致し1本の曲線にのっている。すなわち、温度が  $-2^{\circ}\text{C}$  では  $\tan \delta$  は0.033という値であるが温度が下ると共に急激に減少し、 $-30^{\circ}\text{C}$  附近では0.002という小さな値になる。ところが、更に温度が下つてゆくと逆に増大し始め、 $-70^{\circ}\text{C}$  附近で極大となり、其の後は温度低下と共に再び減少してゆくのである。このとき同時に、我々は氷を振動させる発振器の出力を一定にして、オシログラフで氷の柱の振動振幅を測定してみたのであるが、第4図の上の曲線が示すように、振幅は  $\tan \delta$  が大きい温度範囲では小さく、 $\tan \delta$  が小さい温度領域では逆に大きくなつていて、完全な逆対応を示した。これでも、温度が  $0^{\circ}\text{C}$  に近いところと、 $-70^{\circ}\text{C}$  附近とで振動エネルギーの異常な損失があることがわかる。次に  $c$  軸が振動方向に対して垂直な試料Qについて  $\tan \delta$  の温度変化を調べてみる。これは第4図で曲線4として示されているが、試料Pの曲線1, 2, 3と違つているところは、温度が  $0^{\circ}\sim -20^{\circ}\text{C}$  の範囲で  $\tan \delta$  が少し小さくなつていただけで  $-20^{\circ}\text{C}$  以下の様相は全くPの場合と一致し、 $-70^{\circ}\text{C}$  で極大を持つ。ところが、曲線5と6とで示したつららの試料Sにおいては、そのうち曲線5が  $-70^{\circ}\text{C}$  で  $\tan \delta$  の極大を示しているにもかかわらず、曲線6の方は  $-100^{\circ}\text{C}$  の範囲内では  $\tan \delta$  の極大は現われなかつた。しかし、曲線6は温度低下と共に更に増大をつづけているから、もし  $-100^{\circ}\text{C}$  以下の、より低い温度まで測定範囲を広げたならば、 $\tan \delta$  の極大が観測されたかもしれない。温度が  $0^{\circ}\sim -30^{\circ}\text{C}$  の高い領域では、つららの  $\tan \delta$  は純粋の氷のそれよりもはるかに大きな値を示す。これはおそらくつららは無数の小さい気泡や、いろいろの不純物を含んでいることに起因するのであろう。我々はここで、仮りに、 $0^{\circ}\sim -30^{\circ}\text{C}$  の範囲における  $\tan \delta$  の急激な変化を氷の  $\tan \delta$  の“下降部”、 $-70^{\circ}\text{C}$  附近にあらわれる  $\tan \delta$  の山を“極大部”と名付けよう。

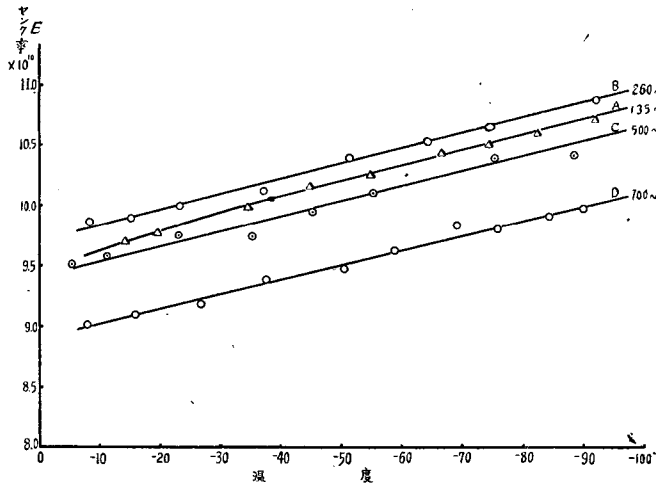
最後に我々は、次の事実を注意しておこう。それは、 $c$  軸が柱の長さの方向に切り出された試料Rに関するもので、曲線7で示した  $\tan \delta$  の温度変化の様相である。 $0^{\circ}\sim -10^{\circ}\text{C}$  の範囲における  $\tan \delta$  の値、すなわち“下降部”の  $\tan \delta$  は他の試料に比べて著しく小さいということも特徴的であるが、他の試料にあらわれた  $-70^{\circ}\text{C}$  附近における  $\tan \delta$  の極大部が、ずつと高温側にずれて  $-50^{\circ}\text{C}$  附近にあらわれていることが更に特徴的である。このことは後に改めて説明するが、その原因は、曲線7の試料Rが試料P, Qに比べて氷の柱の長さが著しく短かく、前者が30 cmであるのに、後者は12 cmであつた(素材の氷のブロックから試料Rを切り出すのにこれ以上の長さがとれなかつた)ことに帰着する。つまり  $\tan \delta$  の極大部の高温側へのずれは、以下にのべるように  $\tan \delta$  の振動数特性にもとづくものなのである(試料Rの固有振動数は750  $\sim$ , P, Qのそれは200  $\sim$  であつた)。

#### ii) $E$ 及び $\tan \delta$ の振動数特性

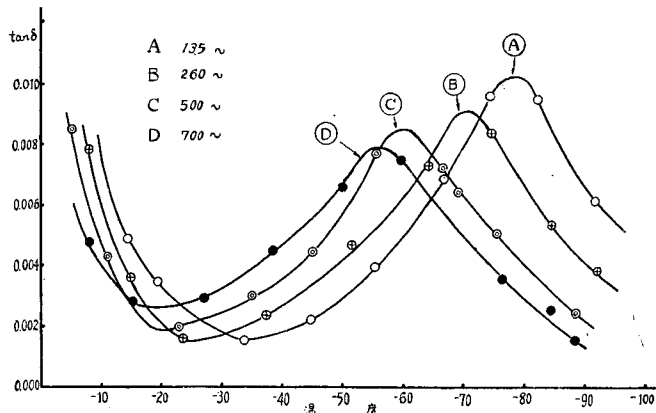
$\tan \delta$  の極大部が振動数と共に高温側へ移動することをしらべるには、前項でのべたよう

な性質の違った試料について  $\tan \delta$  を比較するのではなくて、同じ種類の試料について実験の方が望ましいことは言をまたない。それで我々は  $c$  軸が振動方向に平行な試料 P について、 $E$  及び  $\tan \delta$  の振動数特性を調べてみた。試料の振動数を変えるには、同一の試料について 1 回実験が終る毎に柱の長さを少しずつ切りとつて短かくしてゆけばよく、固有動振数はその度毎にだんだん高くなってゆく。

第 5 図はこのようにして測定されたヤング率の温度特性の振動数による変化を示す。図で曲線 A は、試料の寸法が厚さ 0.43 cm, 幅 3.15 cm, 長さ 34.8 cm のもので、固有振動数は大体 135 へであつた。ここに大体といつた意味は、測定温度を  $-14^{\circ}\text{C}$  から  $-92^{\circ}\text{C}$  まで変えて測定すると、固有振動数は実際には 132 へから 138 へに増えてゆくので、その平均をとつたのである。曲線 B, C, D はそれぞれ試料の長さを 25 cm, 17.5 cm, 12.9 cm に切りつめて測定したときのヤング率で、固有振動数はそれぞれ 260 へ, 500 へ, 700 へに増えた。図から明らかなよう



第 5 図 水のヤング率の温度特性の振動数による変化

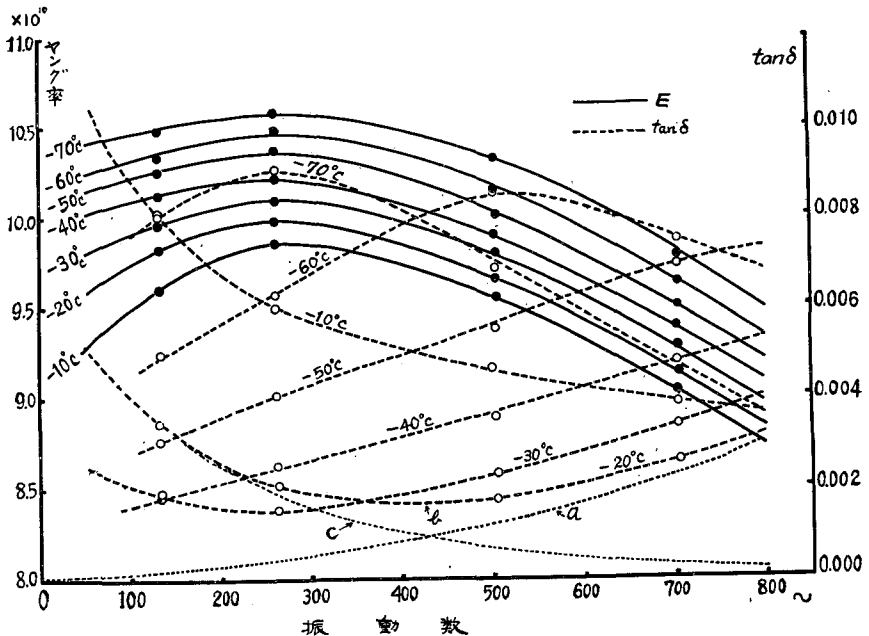


第 6 図 水の  $\tan \delta$  の温性特性の振動数による変化

に振動数がAよりも高いBではヤング率は一たん増えるが、更にC、Dの順に振動数が高くなると逆にヤング率は減つてゆく。(我々はさきにヤング率の絶体値には $0.5 \times 10^{10}$ 程度の誤差があることをのべた。そうすると第5図のヤング率の振動数による差は誤差の範囲に入つて意味がないようにみえる。しかし、同一試料について振動数を変えてヤング率を測定する場合には、試料を切つて長さを短かくしてゆくのであるから、誤差の入つてくるのは試料の長さの読みとりだけである。簡単な計算からこの誤差は $0.1 \times 10^{10}$ 以内におさまることがわかる。従つて、第5図のEの振動数による変化は十分有意なのである。)

第6図は同じ試料の $\tan \delta$ の温度特性の振動数による変化を示す。図で各々の曲線につけた名前A、B、C、Dは第5図のそれに相当する。曲線は振動数が高くなると共に、全体として高温領域にずれ、同時に $\tan \delta$ の極大の高さは低くなつてゆく。 $\tan \delta$ の極大値の現われる温度は、135 $\sim$ では $-78^\circ\text{C}$ であつたが700 $\sim$ では $-55^\circ\text{C}$ になつたのである。

第7図は、第5図及び第6図をもとにして画いた温度をパラメーターとするE及び $\tan \delta$ の振動数特性曲線を示す。図で実線はEを、点線は $\tan \delta$ をあらわし、それぞれの曲線に附した温度の等しいものが互に対応する。我々の測定では振動数はわずか4点しか変えていないので正確なことはいえないが、一見してヤング率は260 $\sim$ 附近に極大値を持ち、その前後、振動数が減つても増えてもヤング率は減少する。そして振動数が0に近い側のヤング率の減り方は温度が高い程急である。また振動数が高い側では、700 $\sim$ 以上の測定がないので断言はできないが、振動数がより以上増大すればヤング率はおそらく横軸に平行になつて、それぞれある一



第7図 氷のヤング率及び $\tan \delta$ の振動数特性曲線

定値に漸近してゆくものと思われる。また、 $\tan \delta$ の極大は温度が $-70^{\circ}\text{C}$ のときは260へ附近に、また、 $-60^{\circ}\text{C}$ のときは500へ附近にあり、大体において $E$ が振動数と共に減少しつつある領域に存在する。温度が高くなるとこの極大値は低くなり、かつ高振動数側にずれてゆく。

#### IV. 測定結果の考察

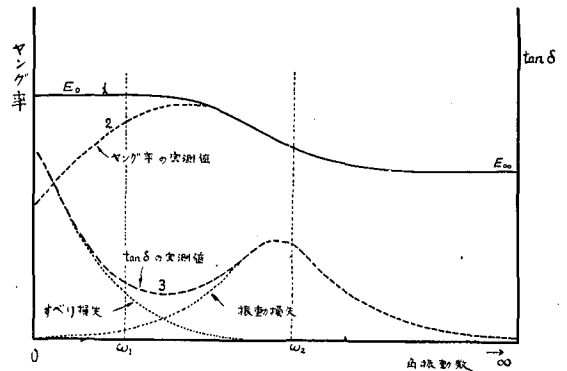
測定温度範囲を $0^{\circ}\text{C}$ ～ $-100^{\circ}\text{C}$ まで広げた結果、氷の粘弾性にいろいろの新しい知見が得られた。ヤング率は第5図に示すごとく大体 $0^{\circ}\text{C}$ 附近で $9 \times 10^{10}$ から温度低下と共に大きくなり、 $-100^{\circ}\text{C}$ では $1.1 \times 10^{11}$ に達する。(結晶軸の方向が違っても、 $E$ の値に甚だしい差が現われて来ないことは、序言でのべたような結晶軸の方向によつて流れが大きく変るといふ事実と少しも矛盾はしない。何故なら、今の実験では振動数を十分大きくして、純弾性領域での測定を行なっているのだからである。)そして温度低下と共にヤング率の増加する割合はほぼ直線的である。また、氷のヤング率の振動数特性を測つた結果は、大体260へ前後の振動数で極大値を示し、振動数が減つても、また増えてもヤング率は減少することを示した(第7図)。振動数が小さくなると共にヤング率が減るのは、換言すれば、力が氷にかかっている時間が長いことを意味する。時間が長くなると grain boundary におけるスベリが起り易くなるであろう。従つて、低振動数領域におけるヤング率 $E$ の減少に対応して、 $\tan \delta$ の増加が同じ振動数領域に現われている。殊にそれが温度の高いほど著しいことは、スベリが温度の上昇と共に起り易くなるという期待と正に調和しているのである。

ヤング率は、ある振動数のところで極大に達し再び減少してゆくが、この減少はいつまでも減り続くというものではなく、やがて振動数に無関係な一定値に近づくのであろう。(我々の測定では700へ以上の測定が困難であつたのでこれを確認することはできなかつた。)  $E$ の極大の存在を裏づける事実はその極大にほぼ対応して $\tan \delta$ の極大がみられることにある。そこでは、応力に対して氷のなかに生ずる歪みの遅れが最大になり、振動エネルギーの一部が熱エネルギーとして失われてゆく何らかの機構が存在する筈である。そしてそのような機構にもとづく $\tan \delta$ の値は振動数が0に近づくと共に0になるはずのものであろう。第7図で実測された $\tan \delta$ の曲線が振動数0で0に tend していないのは上述のような grain boundary におけるスベリに原因する損失の増加が重なつて現われているためであると考えるのが至当である。(無論図に示された $\tan \delta$ の実測値はオシログラムの上で読みとつた氷の柱の振動振幅の減衰時間から直接計算された、いわばなまの値である。それ故、空気との摩擦や、音響輻射などによるエネルギーの散逸を考慮に入れば、厳密には多少の補正を加える必要がある。そのような補正量を求めることは差し当つて不可能であるけれども、おそらくこの議論に本質的な影響を与えることはないであろう。)そこでいま、振動数0の原点を通つて例えば $-20^{\circ}\text{C}$ の $\tan \delta$ の実測曲線bに漸近してゆくような曲線aを画き、同時に、曲線bから曲線aを差引いた値をプロットして曲線cとすると、曲線aが純粹な“振動損失”を示し、曲線cが(上述の) grain boundary

のスベリに原因する損失の部分を表わすとみてよいであろう。曲線cが0になる振動数は $-20^{\circ}\text{C}$ では大体800へあたりであるが、この振動数は温度低下と共に0に近づいてゆく。

以上のような考察から、我々は氷のヤング率及び、 $\tan \delta$ の振動数特性を、模式的に第8図のように表現することができるであろう。横軸に氷に加えられる応力の角振動数を取り、縦軸にヤング率及び $\tan \delta$ をとると、氷本来

のヤング率は、曲線1で示すように、振動数が0からある値までは $E_0$ という一定値をとるが、振動数がある値になると減少し始め、更に振動数が増すと $E_{\infty}$ という一定値に近づいてゆく。しかし、 $E_0$ という値は、grain boundaryのスベリのために小さい振動数の力の場合(静的な場合も含めて)では現実には測定できない



第8図 模式化した氷の $E$ 及び $\tan \delta$ の振動数特性

で、実測値は曲線2のような経過をたどる。また、 $\tan \delta$ は、ヤング率が急に減少を始める振動数領域で極大となり、振動数が0又は無限に大きくなるに従つて0に tend する。この $\tan \delta$ の極大を与える角振動数を $\omega_{max}$ とすれば、この粘性機構を司る緩和時間 $\tau$ は

$$\tau = \frac{1}{\omega_{max}} \quad (3)$$

として与えられる。この $\tau$ は、氷の試料に応力が加わつたとき、内部に生ずる歪みがおくれる時間のorderを示すものである。

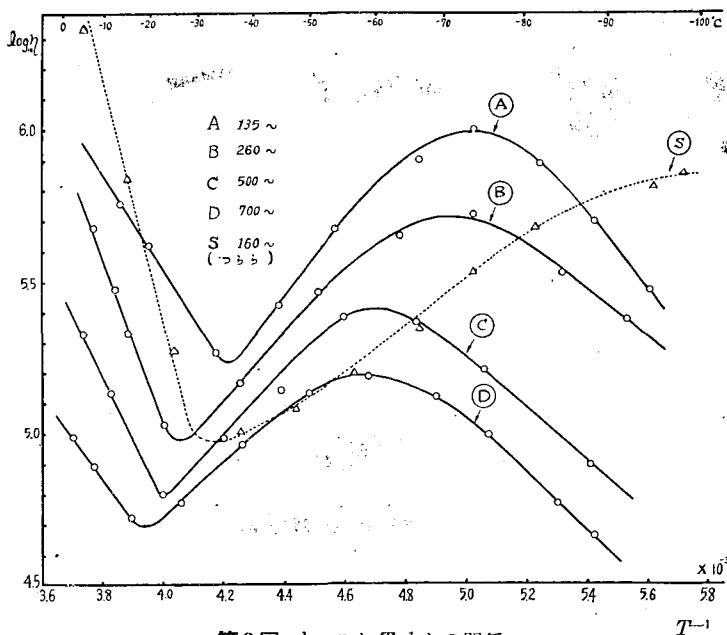
しかし、現実には振動数が0に近づくに従つて $\tan \delta$ のスベリ損失の部分が現われるため、実測される $\tan \delta$ の振動特性は両者の和として曲線3の如くなる。

第7図に示した氷のヤング率と $\tan \delta$ の振動数特性は、第8図の模式図でいえば振動数が $\omega_1$ から $\omega_2$ の範囲で実測したことに相当するのであろう。

さて、振動数の函数として $E$ 及び $\tan \delta$ が与えられた場合、氷の内部粘性係数(又は内部摩擦) $\eta$ は

$$\eta = \frac{E \cdot \tan \delta}{\omega} \quad (4)$$

で与えられる。第5図及び第6図の $E$ 及び $\tan \delta$ の実測値をつかつて(4)式から内部粘性係数を求め、その $\log_{10} \eta$ を絶対温度 $T$ の逆数 $T^{-1}$ に対してプロットしてみると第9図のようになる。曲線A, B, C, Dはそれぞれ振動数が135へ、265へ、500へ、700へに相当する。なお、曲線Sは比較のためかかげた“つらら”のそれである。この図から明らかなように、“スベリ損失”の部分では $\log \eta$ と $T^{-1}$ とは直線関係で結ばれ、形式的に



第9図  $\log \eta$  と  $T^{-1}$  との関係

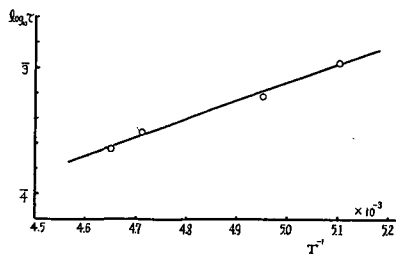
$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{F}{RT}\right) \quad (5)$$

がなりたつ。ここに  $R$  は気体常数、 $F$  は活性化エネルギーを意味する。純粋な振動損失に対応する極大部分に対しては、いきなり (5) の表現を求めることはむづかしいが、振動数が大きくなるに従って  $\tan \delta$  の極大を与える温度がだんだんと高温側にずれてゆくことから、次のような表現が可能になつてくる。すなわち、この部分の粘性機構における緩和時間を  $\tau$  とし、 $\log \tau$  と  $T^{-1}$  との関係をプロットしてみると第10図のようになり、 $\log \tau$  と  $T^{-1}$  との間には直線関係がなりたつことがわかる。従つて、この関係は

$$\tau = \frac{1}{\omega_{max}} = \tau_0 \exp\left(\frac{F'}{RT}\right) \quad (6)$$

であらわすことができる。ここに  $F'$  は、この場合の緩和機構を特徴づける活性化エネルギーである。

第9図及び第10図の直線の傾斜からそれぞれの活性化エネルギーを求めると、



第10図  $\log \tau$  と  $T^{-1}$  との関係

$F'$	曲線 A より	6.27 kcal/mol
	曲線 B より	9.21 kcal/mol
	曲線 C より	13.2 kcal/mol
	曲線 D より	7.17 kcal/mol

	平均	8.96 kcal/mol
$F'$	第10図より	6.4 kcal/mol

$F \approx F'$  であることは“振動損失”が“スベリ損失”とは異なつた粘性機構に起因することを意味するであろう。しかし、この差が有意であるか否かについて、ここで明確な結論を下すことは差し控えなければならない。なぜならば、さきにのべたように、我々が discuss している  $\tan \delta$  の値は正しく補正されたものでないからであり、また、使用した試料が完全な1個の単結晶ではないからである。 $F$  の値のばらつきもおそらく氷を構成している個々の grain の数や orientation などが試料によつて違つているためであろうし、grain boundary に析出している不純物の多少にも左右されるであろう\*。

$F \approx F'$  の真実性はともかくとして、 $F'$  の方はもつと細かな氷の内部構造に関係するものと想像される。氷に外力がかかつたとき、氷の内部に生ずる歪みのうちで、比較的その機構がよく知られているものに電氣的歪みがある。すなわち、氷に電場をかけると双極分子は水素結合をたち切つて電場の方向に転位するが、このとき必要とする活性化エネルギーは  $0^{\circ} \sim -40^{\circ}\text{C}$  の範囲で約  $8 \sim 9 \text{ kcal/mol}$  であるといわれている。これに比べると、上に求めた  $F'$  はかなり小さな値である。しかし、電氣的応力によつて生ずる電気歪と、力学的応力によつて生ずる氷の内部歪とは性質の異なつたものと考えられるから、この両者は必ずしも一致する必要はない。ただ電氣的歪みと類似な現象がここに現われているという点が興味深いのである。損失に与える内部構造の影響の最も顕著な例は、積雪の粘弾性の研究において我々が既に指摘した通りである。氷または雪の粘弾性が Maxwell, 又は Maxwell-Voigt のモデルであらわされるとして、そのばねや粘性壺は内部構造の如何なる部分がこれを担つているかは甚だ興味のある問題である。

以上、実験的事実を基礎にして氷の粘弾性機構に対する推理を行なつたが、少なくとも振動損失の機構の本質がどんなものであるかについては、まだ定性的説明すら与えることが出来なかつた。第 4, 5, 9 図に示したような温度特性に現われる“極大部”がどのような原因で起るかも全然触れることができなかつた。この問題も振動数特性における“振動損失”に対する機構が明らかになつた後はじめて解決されることであろう。すべて将来の研究にまたなければならない。

## V. 摘 要

我々は超低温装置をつかつて氷のヤング率及び  $\tan \delta$  を  $0^{\circ} \sim -100^{\circ}\text{C}$  の範囲にわたつて測定し、新しい知見を得た。その主なものは次のようなものであつた。即ち、ヤング率に関しては、結晶軸と加えられた力の方向との間に明瞭な関係を見出すことは出来なかつた。その主な理由は、使用した氷の試料が完全な1個の単結晶から作られなかつたからである。しかし、ヤング率は  $9 \times 10^{10}$  から  $1.1 \times 10^{11}$  にわたり大体直線的に増加してゆくこと、 $\tan \delta$  は  $0^{\circ} \sim -30^{\circ}\text{C}$  の範囲では 0.03 から 0.002 に減少するが更に温度が下ると逆に増えて極大となり、再び減少す

\* J. W. Glen<sup>d)</sup> は多結晶の氷に静的な力をかけ、rate of flow を測定して、 $\dot{\epsilon} = A \cdot \exp(-Q/RT)$  から活性化エネルギーを求めた。彼は  $Q = 33.4 \text{ kcal/mol}$  という値を得ている。

ることがわかつた。この  $\tan \delta$  の極大位置は振動数に関係し、振動数が高くなると高温領域に移動することがわかつた。我々はこれらの実験結果をもとにして、氷にあらわれる二つの粘性機構について或る程度の推論を行なうことができた。しかし、もつと立入つた理論的考察ができるようになるまでには、より広汎な実験データが出揃わなければならないであろう。

最後に、この研究をすすめるにあつて、有益な御助言と御援助をいただいた堀健夫教授に感謝の意をあらわす。

## 文 献

- 1) 中谷宇吉郎 1956 氷単結晶の物理. I. 科学, Vol. 26, No. 6.
- 2) 山地健次・黒岩大助 1954 振動法による積雪の粘弾性の研究. I. 低温科学, 物理篇, 13, 49.
- 3) 黒岩大助・山地健次 1956 振動法による積雪の粘弾性の研究. II. 低温科学, 物理篇, 15, 43.
- 4) J. W. Glen 1953 Rate of Flow of Polycrystalline Ice. Nature Vol. 172, 721.

## Résumé

Young's moduli  $E$  and vibration losses  $\tan \delta$  were measured by the vibration (or resonance) method for the rectangular bars of ice ( $1 \times 3 \times 30 \text{ cm}^3$ ) made up of larger or smaller single crystals whose axes were oriented, i) parallel to the vibrational direction, ii) perpendicular both to the length of the bar and to the vibrational direction, iii) parallel to the length of the bar, and iv) in random directions. For cooling the sample, use was made of a frozen room of which the temperature was controlled from  $-30^\circ$  to  $0^\circ\text{C}$ , and also of a cold box which could be cooled down to  $-100^\circ\text{C}$ . The resonance frequency was found to be about 200 c.p.s. The main results obtained were as in the following.

Young's moduli of ice in the temperature range  $0^\circ \sim -100^\circ\text{C}$  were of the order of  $9 \times 10^{10} \sim 11 \times 10^{10}$ , increasing linearly with decrease in temperature. No marked difference was observed among the samples with different crystal orientations. The vibration loss  $\tan \delta$  was found to decrease exponentially within the temperature range  $0^\circ \sim -35^\circ\text{C}$ , but as the temperature was further lowered, it began to increase and reached a maximum at about  $-70^\circ\text{C}$  then to decrease again. The position of the maximum proved to depend on the resonance frequency (or the size of the rectangular bar) in such a way that it shifted towards higher temperature side as the frequency was increased. The coefficient of internal viscosity  $\eta$  is given by the formula  $\eta = E \cdot \tan \delta / \omega$ , where  $\omega$  is the angular frequency of vibration. From the curve of  $\log \eta$  versus reciprocal of absolute temperature  $T^{-1}$ , which came out linear in the higher temperature region, the activation energy was estimated to be about 9 kcal/mol. The activation energy corresponding to the maximum of  $\tan \delta$  appearing in the low temperature region was calculated to be about 6 kcal/mol from the relation between  $\log \tau$  and  $T^{-1}$ , where  $\tau$  is the relaxation time  $= 1/\omega_{max}$ ,  $\omega_{max}$  being such a frequency that gives the maximum of  $\tan \delta$  in the  $\tan \delta - \omega$  diagram. Some inferences with respect to the mechanisms of internal viscosity have been drawn from the observed facts, but since the visco-elastic properties of an ice block are affected by many factors, besides frequency of applied force and temperature, such as grain boundaries, impurities, or modes of crystal aggregation, a greater number of studies will have to be conducted before any definite conclusion can be deduced.