



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	振動法による積雪の粘弾性の研究 Ⅱ
Author(s)	黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke; 山地, 健次 他
Citation	低温科学. 物理篇, 15, 43-58
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17910">https://hdl.handle.net/2115/17910</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p43-58.pdf



## 振動法による積雪の粘弾性の研究 II\*

黒岩大助 山地健次

(低温科学研究所 純正物理学部門)

(昭和31年7月受理)

### I. 序 言

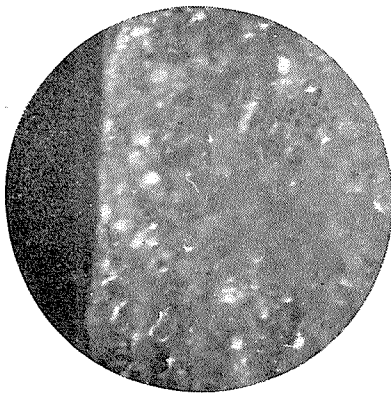
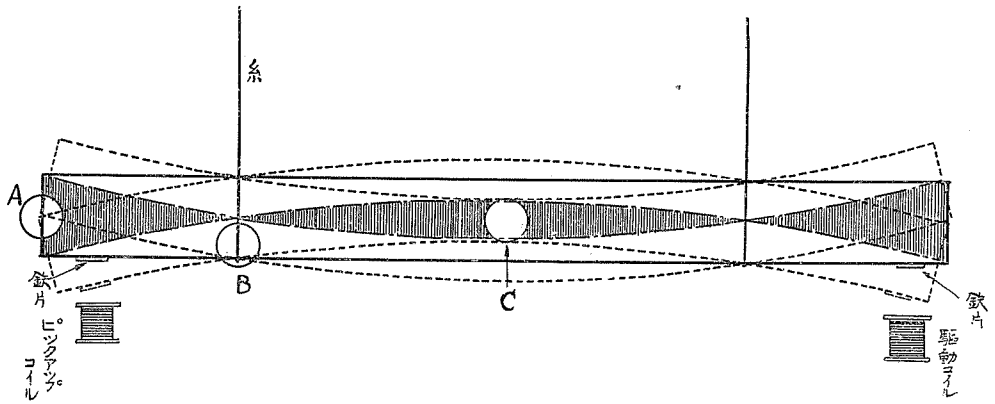
吾々はさきに振動法によつて積雪の粘弾性常数の測定を行い、その結果の一部は既に報告した<sup>1)</sup>。前報告でのべたように、当時は雪が少なくてよい試料が得られなかつたので、低温室に藏つてあつた古い雪、或は低温室の温度を下げるためのアンモニア冷却管に附着している霜をかためて作つた“人工積雪”で実験した。この報告は、その次の冬、積つた fresh な雪について同じ方法で、ヤング率及び振動損失  $\tan \delta$  の測定を行つたので、その概要をのべたものである。

### II. 実験方法とその吟味

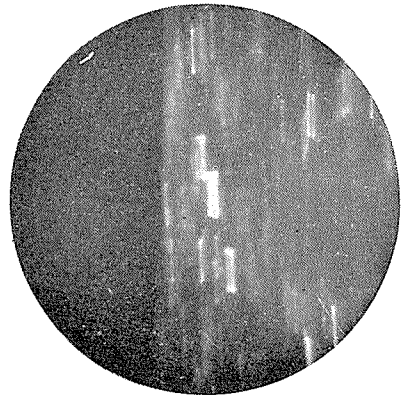
実験方法は前報告にのべたものと全く同じであるから、詳しいことは省略して簡単にのべる。先ず、測定試料として天然の積雪層から、密度・構造が均一な部分を注意して、厚さ 4 cm 巾 3 cm・長さ 40 cm の断面矩形の雪の柱を切りとる。その雪を低温室の恒温槽に入れ、2本の糸で吊り下げる。柱の両端の下面には、うすい鉄片がはりつけてあり(第1図参照)その鉄片に向い合せてすぐ下に 5 mm 位のギャップをおいて2個の電磁石をおく。一方の電磁石に交流電流を通ずると鉄片は吸引せられて雪の柱は振動を始める。その振動振幅は、ピックアップの働きをするいま一つの電磁石に誘起される起電力に比例する。その電圧は増幅され、オシログラフに記録される。雪の柱の振動は、糸で吊り下げられた位置を節とする“たわみ振動”—横振動—であるが、駆動用電磁石に流れる交流電流の周波数が雪の柱の固有振動数に一致したとき共鳴してその振幅は極大になる。この共鳴振動数を  $f_{max}$ 、振動を止めてから振幅が  $1/n$  に減衰するまでに要する時間を  $t_{1/n}$  とすると、その両者はオシログラムから求められ、雪のヤング率  $E$ 、振動損失  $\tan \delta$ 、及び内部粘性係数  $\eta$  は次の式で計算される。

$$E = \frac{48\pi^2 l^4 \rho}{m^4 a^2} f_{max}^2 \quad (1)$$

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第333号



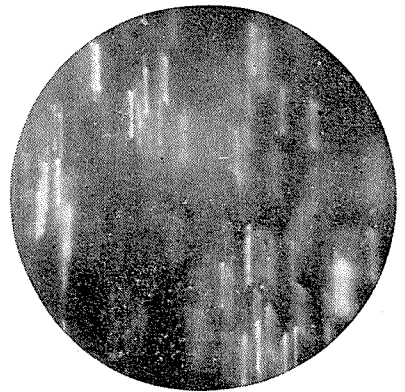
(I) 静止状態の柱の端 A



(II) 振動したときの柱の端 A



(III) 振動している場合の節 B  
中央の黒い部分は糸



(IV) 振動の腹 C  
振幅=0.195ミリ

第1図 振動しつつある雪の柱の顕微鏡写真

$$\tan \delta = \frac{\ln n}{\pi f_{max} l \frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{E \cdot \tan \delta}{\omega} \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ =積雪の密度、 $a$ =積雪柱の厚さ、 $l$ =積雪柱の長さ、 $\omega$ =角振動数、 $m$ =振動の様式できまる定数で基本振動ならば 4.73 という値をとる。

さて次に、この方法で測定される積雪のヤング率、振動損失の精度が問題になる。(1)式から明らかなように、ヤング率には、長さは4乗、厚さ及び振動数は2乗で入っている。それ故、試料の寸法、及び周波数の読みとりはできるだけ正確を期さなければならない。しかしながら、積雪のようにもろくて粒子構造をもつものを1 mm 以下の精度で正しくきりとることは困難である。吾々は積雪層から雪の柱を切りとるときは、一定の大きさの木枠を雪にはめこみ枠の両面の雪を平らにして枠ごと雪をとり出す。そして定規をあてて表面の凹凸を削り、自然に積つたままの状態をくずさぬよう注意して所定の寸法に切断した。ところで積雪は、一見して均質にみえていても、降雪強度にむらがあるため、数 cm の厚さにわたつて真に均一な密度をうることは稀である。このような事情のため、同じ層から切り出した雪の試料でもヤング率の測定値には2桁目に誤差が入ってくる。しかし、一度調製した雪の試料について、その温度特性を調べる場合には、オシログラムからの周波数及び振幅減衰時間のよみとりの誤差だけになるから、ヤング率及び  $\tan \delta$  は共に、3桁目まで正しく測定することが可能である。

なお、このように注意しても、雪の試料を糸にかけたり、はずしたりするたびに、いつも振動の節の位置で正しくつられ、かつ電磁石と鉄片とのギャップが常に一定に保たれているとは限らない。糸が節をはずれて吊られたり、電磁石が必要以上に鉄片に近づいてセットされると雪の柱の共鳴周波数や振動がダンプする時間に影響を与えるおそれがある。これらの点は実験で一応たしかめておく必要がある。

i) 雪の柱を吊す糸の位置が振動の節をはずれた場合、ヤング率及び  $\tan \delta$  に及ぼす影響。上にのべたような断面が矩形の柱が、たわみ振動をする場合、その振動が基本振動であると、その振幅の節になる位置は、柱の長さを  $l$  とすると両端から  $0.22l$  のところにあることが知られている。雪の柱をつるす場合、 $\pm 1$  mm 位の誤差で節の位置をつるすことは容易であるが、第 I 表に示す実験は、思いきつて糸の位置を節の位置から約 15 mm 内側又は外側にずら

第 I 表

実験番号	積雪柱をつるす位置、柱の端から測る (cm)	$f_{max}$ ( $\sim$ )	ヤング率	$\tan \delta$	測定温度
I	7.7	333	$4.286 \times 10^9$	0.0127	-31.0
II	9.2	333	$4.286 \times 10^9$	0.0127	-31.0
III	6.2	324	$4.057 \times 10^9$	0.0139	-31.0

せたときの測定値の変化を示す。測定に使用した雪の試料は  $\rho=0.45$  のかたしまり雪で、幅 3.0 cm・厚さ 4.0 cm・長さ 34.7 cm の寸法をもっている。

試料の長さは 34.7 cm であるから、基本振動の節の位置は、それぞれ柱の両端から測つて 7.64 cm の位置にある。従つて、実験 (I) はほぼ正しく節の位置でつた場合、(II) はそれより約 1.6 cm だけ内側をつるした場合、(III) は約 1.4 cm 外側をつるした場合である。表に示すように、(I) と (II) とは測定値に変化がなく、(III) の場合に多少の差があらわれているにすぎない。しかも、上の実験は、故意につるす位置を節の位置から大きく外した場合であつて、実際にはスケールをあてがつて 0.22 l の位置を糸でつると、容易に基本振動の節の位置を正しく支持することができる (第 1 図参照)。

### ii) 電磁石と鉄片との距離を変えたときの $E$ 及び $\tan \delta$ の変化。

磁石が鉄片に及ぼす力は、距離の 3 乗に逆比例することはよく知られている。従つて、電磁石に流れる電流を一定に保つておいても、雪の柱を振動させる力は、電磁石と鉄片との距離によつて大きく変る。それ故、電磁石と鉄片とのギャップは、雪の柱の共鳴振動数や、ダンピングに大きな影響をもつことが予想される。

次の第 2 表はギャップをいろいろに変えた場合のヤング率及び  $\tan \delta$  の変化である。

第 2 表

実験番号	I	II	III	IV
コイルと鉄片との距離 (mm)	2	3.5	4	6
$E$	$4.36 \times 10^9$	$4.20 \times 10^9$	$4.37 \times 10^9$	$4.30 \times 10^9$
$\tan \delta$	0.009	0.009	0.008	0.008
振動振幅	1	0.28	0.18	0.05
温度 (°C)	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0

この表から明らかに、電磁石と鉄片との距離は 2 mm 以上はなしておけば、 $E$  及び  $\tan \delta$  の測定値にそう大きな影響がないことがわかる。ギャップが 2 mm の場合の振動振幅を 1 とすると、3.5 mm, 4 mm, 6 mm とはなれるに従つて振幅は急に減衰し、(IV) では (I) の場合の 0.05 倍になつてしまう。吾々は、第 1 段階として、雪の柱に加える力はなるべく小さくして測定することを目的としているから、全実験を通じ、電磁石と鉄片との距離は 5 mm に保つて行つた。

### iii) 振動の mode

(1) 式の定数  $m$  は振動の様式 (mode) できまるもので、柱が基本振動をしているとき 4.73 という値をとることは前にのべた。吾々は全実験を通じて基本振動で測定を行つたが、増幅器やブラウン管で振幅を観測しただけでは果して雪の柱が正しく基本振動をしているかどうかは判定がむずかしい。もし、倍振動だつたとすると  $m=7.8$  となり、しかもこの値は (1) 式では

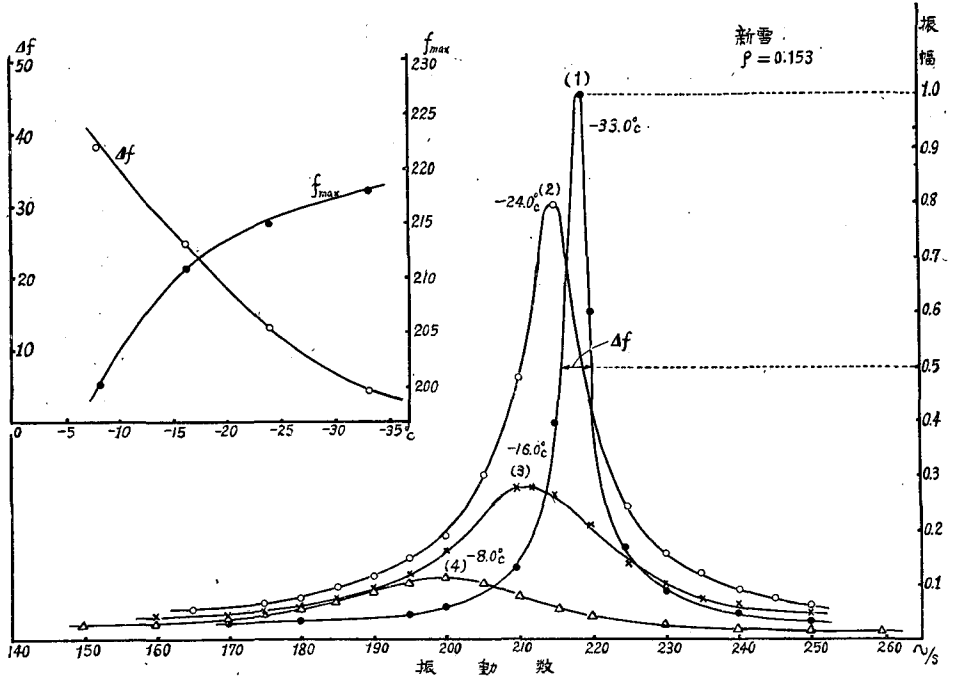
4乗となつて入っているから  $E$  の測定値に大きな誤差を生ずることになる。それで雪の柱が正しく基本振動の状態にあるかどうかは一応確かめておかねばならない。そのためには、顕微鏡をつかつて振動しつつある雪の柱の端から端まで、振幅を実測してみるのが一番確実である。先ず投光器で雪の柱の表面を小さな grazing angle で照明し水平顕微鏡でのぞいてみる。第1図(I)は、静止しているときの雪の柱の端Aの部分の顕微鏡写真である。氷の粒子は斜めから光を受けて強く輝いて見える。次に発振器のスイッチを入れて雪の柱を振動させると、これらの光点は上下にのびた線となつて見える(II)。次に顕微鏡をずらして、糸で吊るした部分Bをのぞいたのが(III)である。中央の黒い線は雪の柱を支持している糸である。雪の柱は、振動状態にあるにもかかわらず、この部分は全く振動していない。すなわち、完全に振動の節になつている。(IV)は更に顕微鏡をずらしてCの部分、すなわち振動の腹の位置をみたものである。氷の粒子は輝く光のすちとなつて見える。これらの光のすちの長さが振動振幅の大きさを与え、この場合の振動振幅は195ミクロンである。このようにして、雪の柱の振動は正しく基本振動にあることが実証される。

### III. 積雪のヤング率及び振動損失の温度特性

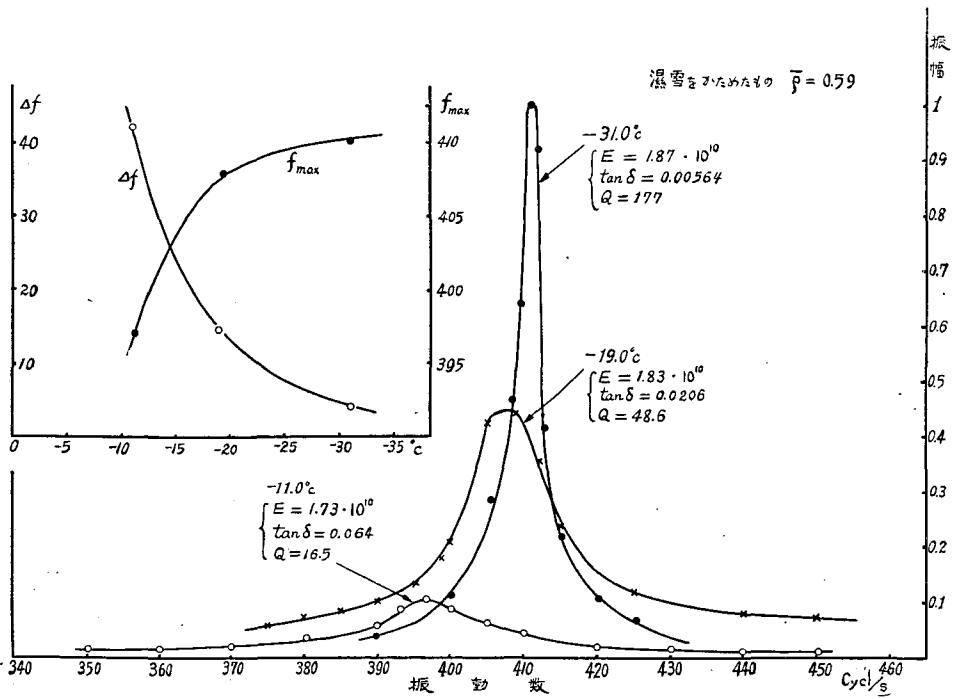
新雪の層から雪の柱をきりだし、これを低温室に持込んで、温度をいろいろに変えたときの  $E$  及び  $\tan \delta$  の変化を測定しようとする場合、もしこの試料の雪が降り積つたばかりのときは、密度が0.09位で柔かく、とても所定の柱状にはきり出せない。それで、試料は、新降雪後2~3日たつて軽くしまり密度が0.153になつたものから切り出した。寸法は厚さ4cm・幅3cm・長さ44.8cmであつた。

温度を $-33.0^{\circ}\text{C}$ にして、発振器の周波数をだんだん上げながら、雪の柱の振動振幅を測つてゆく。周波数が190くらいまでは、雪の柱はほとんど振動しないが、200を超えると振幅は増大し始め、215を過ぎると急昇して217で極大に達し、それから僅か数だけ周波数を増すと、とたんに振幅は激減する。この周波数に対する振幅の大きさを図示すると第2図の曲線(1)に示すような鋭いとんがりをもつ所謂共鳴曲線が得られる。次に温度を $-24.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-16.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-8.0^{\circ}\text{C}$ にして測定された同じ雪の共鳴曲線が、それぞれ曲線(2)、(3)、(4)として図示されている。図からわかるように、温度の上昇に伴ない、共鳴曲線は山が低くなると同時に幅が広くなり、且つ共鳴周波数(雪の柱の固有振動数)がだんだんと低周波側にずれてゆく。(1)のように共鳴曲線の幅がせまく且つ尖鋭である場合を、電気工学の類似性から、“ $Q$ ”の高い振動であるという。この $Q$ の逆数 $Q^{-1}$ は振動損失 $\tan \delta$ に等しく、それは、雪の柱に加えられた振動のエネルギーが、1サイクルの振動毎に失われてゆく割合を示すものである。

すなわち、ある瞬間に雪の柱に加わる外力を $p=p_0 \sin \omega t$  ( $p_0$ は外力の最大値、 $\omega$ は角振動数)とするとそれに応じて雪の柱のなかに生ずる歪み $s$ は、一般に $\delta$ だけ位相がおくれるので $s=s_0 \sin(\omega t - \delta)$ としてあらわされる。 $s_0$ は歪みの極大値、 $\delta$ は位相差角)したがつて、振



第2図 新雪の共鳴曲線



第3図 湿雪をかためた雪の共鳴曲線

動の1サイクル毎に失われるエネルギーを  $\Delta E$  とすれば

$$\Delta E = \int_0^{2\pi/\omega} p \frac{ds}{dt} dt = p_0 s_0 \pi \cdot \sin \delta$$

である。これを外から加えられた effective な最大エネルギー  $E = 1/2 p_0 s_0$  との比をとつて

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\pi \cdot \sin \delta \doteq 2\pi \tan \delta$$

とし、 $1/2\pi \cdot \Delta E/E$  を  $Q^{-1}$  としてあらわす。

この振動損失  $Q^{-1}$  はさきにのべた(2)式と同じもので、実測された共鳴曲線からこれを求めるには、 $f_{max}$  をはさんで振幅が1/2に減少する二つの周波数の差  $\Delta f$  を求め

$$Q^{-1} = \tan \delta = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\Delta f}{f_{max}} \quad (4)$$

から計算すればよい。

第2図から明らかなように、 $f_{max}$  は  $-33^\circ\text{C}$  では217 $\sim$ であつたものが温度上昇と共に低周波側にずれ  $-8.0^\circ\text{C}$  では200 $\sim$ に減じた。これは積雪のヤング率が温度上昇と共に小さくなることを意味する。また  $\Delta f$  は  $-33^\circ\text{C}$  では僅かに4.5 $\sim$ であつたものが温度上昇と共に増え、 $-8.0^\circ\text{C}$  では40 $\sim$ になつた。このことは、積雪の振動損失が温度上昇と共に急激に増大することをあらわしている。第3表はこれらの温度特性を示したものである。

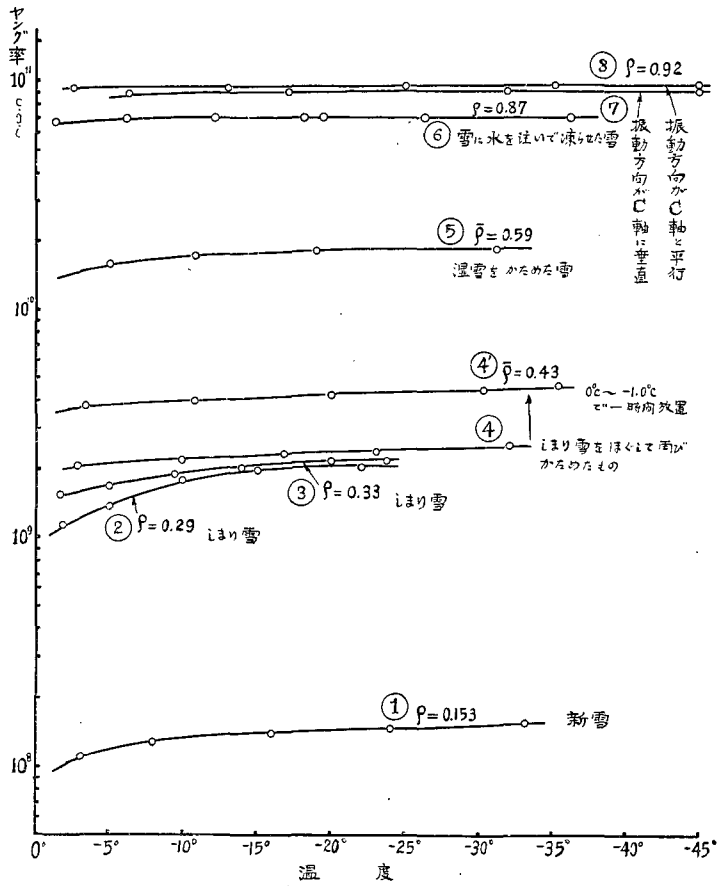
第3表 新雪の  $E \cdot \tan \delta$  の温度特性

測定温度	$-33.0^\circ\text{C}$	$-24.0^\circ\text{C}$	$-16.0^\circ\text{C}$	$-8.0^\circ\text{C}$
$f_{max}$	217 $\sim$	215 $\sim$	211 $\sim$	200 $\sim$
$E$	$1.58 \times 10^8$	$1.506 \times 10^8$	$1.43 \times 10^8$	$1.30 \times 10^8$
$\Delta f$	4.5 $\sim$	12 $\sim$	25.5 $\sim$	40 $\sim$
$Q^{-1}$	0.012	0.035	0.069	0.116
$\tan \delta$	0.014	0.038	0.064	0.150

表のなかで、 $Q^{-1}$  は(4)式から  $\tan \delta$  は(2)式から計算した振動損失である。

第3図は、春先によく降る湿雪を木の枠(第8図参照)に入れ、なるべく一様な密度になるようにかたくつめたものである。密度は0.59である。天然の積雪とはいえないが、春先によくふみかためられた雪の密度に等しい。このものについても、温度が低いほど共鳴曲線は尖鋭で、且つ第2図の新雪に比べて  $f_{max}$  を与える周波数ははるかに大きく410 $\sim$ になつている。従つてヤング率は、新雪に比べ桁違いに大きく  $-31.0^\circ\text{C}$  で  $E = 1.87 \times 10^{10}$  である。この試料も温度上昇と共に  $f_{max}$  は低周波側にずれ、且つ、 $\Delta f$  は急に増大する。 $\tan \delta$  は  $-31.0^\circ\text{C}$  で、0.00564 という小さな値から、 $-11.0^\circ\text{C}$  では0.064に増える。

第4図はこのようにして測定したいろいろの密度の雪のヤング率の温度特性を示したもので、縦軸は対数スケールである。曲線につけた番号は1から8まであり、番号がすすむに従つ



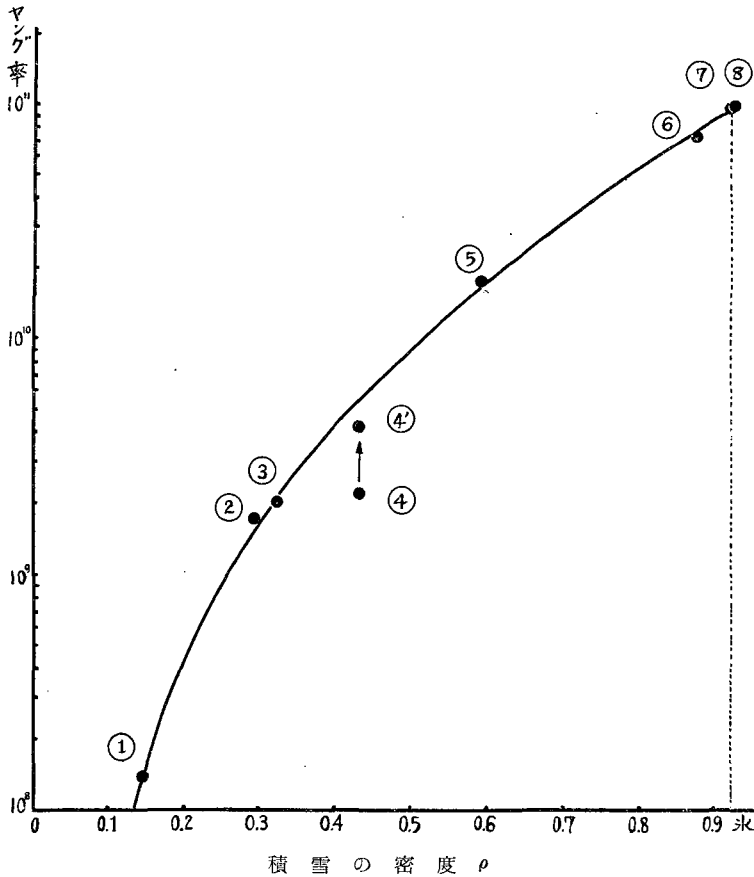
第4図 いろいろな積雪の E の温度特性

て雪の密度は大きい。ただ最後の曲線7と8とは、純粋の水についてのものであつて、曲線7は、振動方向がc軸に垂直なもの、曲線8はc軸に平行なものを示す。実験に使用された試料は市販の水で大きなブロックから、凍結方向に対して垂直に、又は平行に切り出されたものである。振動方向がc軸に垂直、又は平行といったが、試料は勿論単結晶ではなく、大きさが1~3cmの単結晶が集合したもので、各々の単結晶のc軸の方向はわずかながらそれぞれ異つたかたむきをもつており、大体において凍結方向にc軸がそぞつていたのである。(詳しいことは文献(2)を参照せられたい)。また曲線6は、密度を大きくするために普通のしまり雪に水を十分にしみこませ凍らせたものである。従つて、内部には無数の気泡を含んでいる。

図から明らかなように、積雪のヤング率は密度の増大と共に急激に増えてゆくことと、密度の大きいほどヤング率の温度効果が小さくなつてゆくことがわかる。たとえば、曲線7, 8, の氷では、Eは温度軸に対してほとんど平行である。ところで吾々は次の興味ある事実を注意しておこう。それは曲線4及び4'の試料についてである。4の試料は、3の密度が0.33のよくなつたしまり雪をつきくだいてばらばらの粉状にし、それを木の枠に入れ一様な密度になる

ようにかたくつめたものである。3の試料と4の試料との根本的な違いは、単に後者の密度が人工的に増されたというだけでなく、4の場合は氷の粒子と粒子との結合部——すなわち、“ice-bridge”が完全に破壊されているという点にある。曲線4を一見して気のつくことは密度が増えたにもかかわらずヤング率がさほど大きくないということである。ところで、この試料を温度 $0^{\circ}\text{C}$ ～ $-1.0^{\circ}\text{C}$ に保つて約1時間放置した後再びヤング率を測定してみたのが曲線4'である。わずか1時間後にこのようにヤング率が増加するのは一見奇異にみえるがこの事実こそ積雪に特有な現象とみるべきで、氷の粒子と粒子とは再び強く結合しあつて“ice-bridge”を形成したものと考えられる。これらの点については次節でいさしくわしくのべるであろう。

第5図は、第4図のヤング率の温度特性曲線で、 $-10^{\circ}\text{C}$ のところ縦の線を引き、これと各曲線群との交点に対応する $E$ の値を、雪の密度を横軸にとつてプロットしたもので、温度 $-10^{\circ}\text{C}$ における積雪の密度とヤング率との関係を示したものである。(より低い密度における $E-\rho$ の関係が欲しければ、希望の温度で縦軸を引けば求められる。)すなわち、積雪のヤング率は密度の小さい新雪の $10^8$ のオーダーから氷の $10^{11}$ までの範囲にあることがわかる。図にお



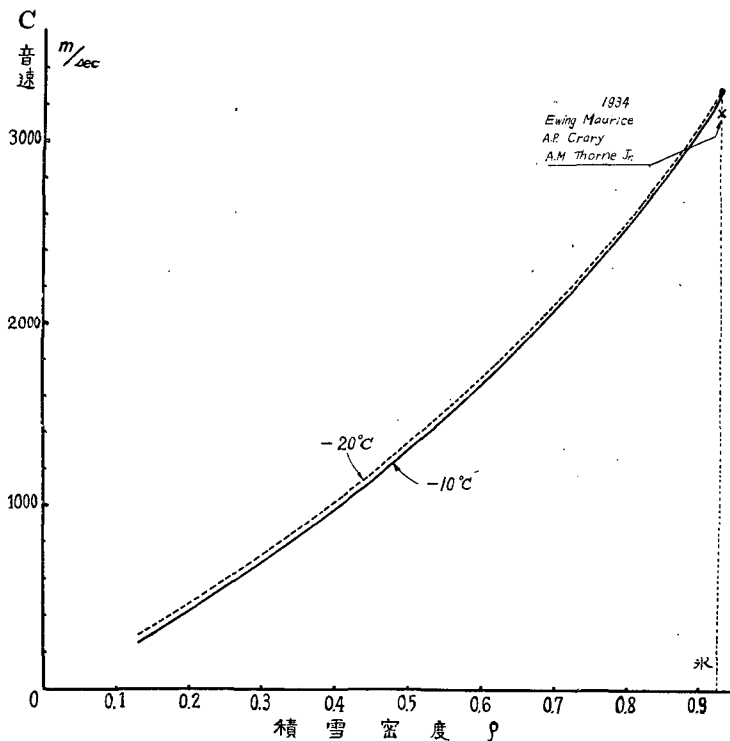
第5図 積雪のヤング率と密度との関係 ( $-10^{\circ}\text{C}$ )

いて各点は比較的好く1本の曲線にのつているが、ただ4の、しまり雪を粉にしてつきかためたものだけがこの曲線から外れている。しかし、この試料も、 $0^{\circ}\sim-1.0^{\circ}\text{C}$ に1時間保つた後では4'となり、 $E-\rho$ 特性曲線に接近してくるのである。多分もつと時間をかければ4'は更に増え完全にこの曲線に乗つたであろう。なぜなら、この $E-\rho$ 特性曲線上の各測定値は、いずれもよくしまつた、または氷粒同志がよく結合しあつた雪の試料について得られたものだからである。

次に第6図は、第5図の $E-\rho$ 特性曲線をもとにして画いた積雪の密度と積雪中を伝わる音波の速度との関係を示すものである。ヤング率が $E$ 、密度 $\rho$ をもつ媒質中を音の平面波が進む速さを $C$ とすれば $C$ は

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

で与えられる。図の実線は温度が $-10^{\circ}\text{C}$ の場合、点線は $-20^{\circ}\text{C}$ の場合のそれである。密度が0.15の新雪では音の伝播速度は295 m/sで空気中の音速より少し小さい。しかし、密度が0.4ぐらいのしまり雪になると100 m/s、 $\rho=0.67$ の雪で2000 m/sとなる。密度が0.92の氷では音速は3260 m/sに達する。図のなかで×印は、Ewing Maurice, A. P. Craryらが実験的に求めた氷の音速である。

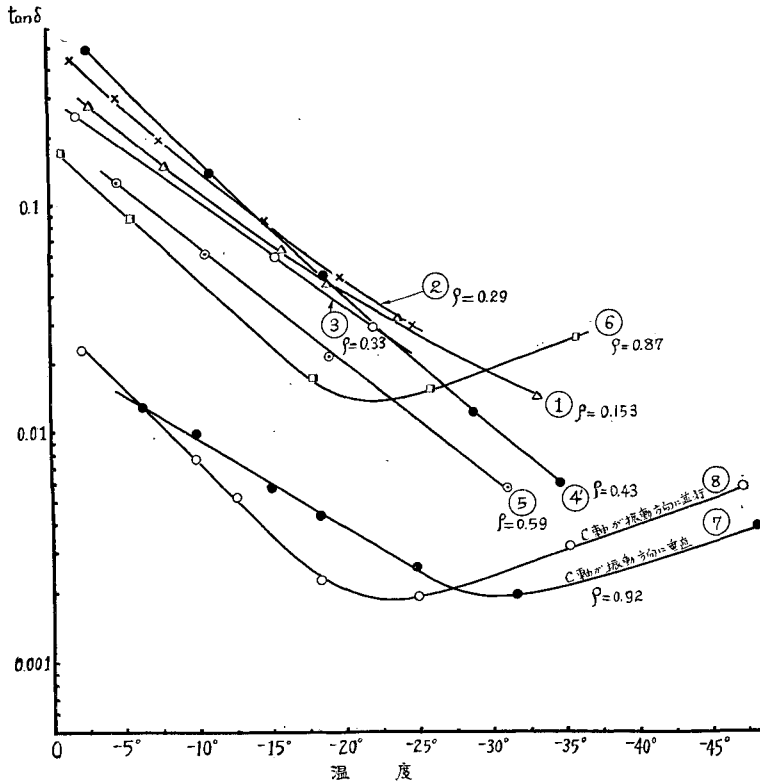


第6図 積雪の密度と音速

## IV. 積雪の内部構造と粘弾性

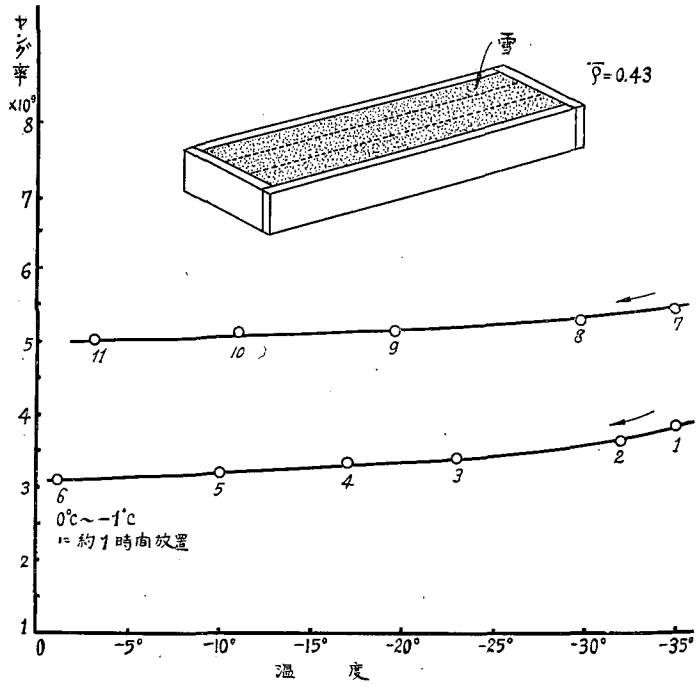
第4図に、積雪の密度をパラメーターとしたヤング率の温度特性を示した。そして、それらの間には第5図のような一義的な函数関係があることがわかった。ところで振動損失  $\tan \delta$  についても同じような関係が得られるかどうかをしらべてみる。第7図は、第4図にかかげた番号が1から8までの密度を異にする雪の  $\tan \delta$  の温度特性を示すものである。図の曲線の番号はすべて第4図の曲線のそれに対応する。 $\tan \delta$  の場合には、各曲線は互いに入り混つたり、交叉したりして、ヤング率の場合のごとく簡単ではない。 $\rho=0.92$  の純粋の氷でさえも、 $c$  軸が振動方向に垂直であるか平行であるかによつてヤング率にはあまり大きな違いはないにもかかわらず、 $\tan \delta$  には曲線7と8とのような大きな違いを生じた。このことからみても、雪の  $\tan \delta$  は単に密度だけに支配されるのではなく、積雪の構造そのものに大きく関係することが想像されるであろう\*。

第8図及び第9図は、これらの事情を理解するための一つの手がかりとなる実験を示すも

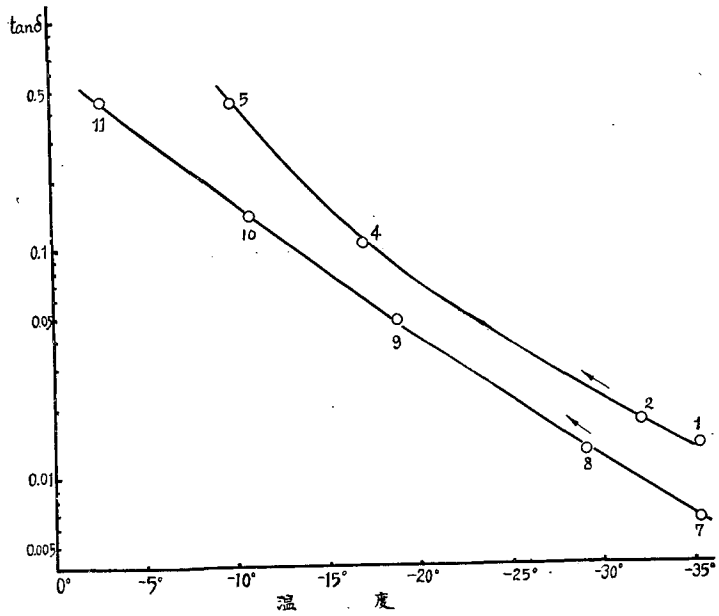


第7図 いろいろな積雪の  $\tan \delta$  の温度特性

\* この  $0^{\circ} \sim -35^{\circ}\text{C}$  の範囲における  $\tan \delta$  の急激な減少は、吾々が文献(2)で明にすることく、氷の  $\tan \delta$  の下降部と名付ける部分に相当する。



第8図 アンニーリングによる積雪のヤング率の変化



第9図 アンニーリングによる積雪の  $\tan \delta$  の変化

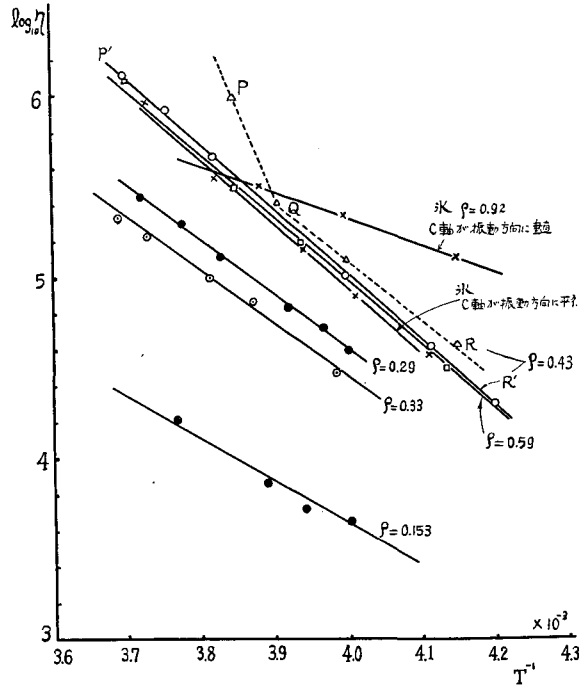
のである。まず、しまり雪をくわいて細かい粉末にする。それを第8図に示すような木枠に一樣につめてかためる。そして点線のように切りとつて試料とする。密度は0.43である。この雪を低温室に入れ、温度を $-35^{\circ}\text{C}$ からだんだん高めながら実験番号1, 2, 3, ……の順序でヤング率を測定してゆく。ヤング率は温度上昇と共に減少し、温度 $-12^{\circ}\text{C}$ (測定番号6)で、 $3 \times 10^9$ になつた。ここで実験を一時中止し、恒温槽の温度を $0^{\circ} \sim -1^{\circ}\text{C}$ の範囲に保つて約1時間ばかり放置した。この間、雪の試料は勿論とけないように注意したばかりでなく、糸に吊り下げたまま温度を上げたのでは、粘性のため柱がたれ下つて曲つてしまう恐れがあるので、雪の下側から板をあてがつて曲らないようにした。このように、ある温度で雪の試料を一定時間放置しあためておくのは、冶金学の用語でいえば“アンニーリング”を行うことに当る。次に吾々は、急に恒温槽の温度を下げて雪の試料を再び $-35^{\circ}\text{C}$ に冷却したのである。しばらくたつてからヤング率を測定してみたのが第8図で測点7として示した値である。第2回目の測定は7, 8, 9, 10, 11の順序で得られたが、ヤング率はわずか1時間のアンニーリングによつて大きく増したのである。第9図は、同じ試料の $\tan \delta$ の変化の様相で、測定番号は第8図のそれと全く対応する。 $\tan \delta$ は、アンニーリングによつて著しく減少したことがこれでわかる。

このようなヤング率の増大及び $\tan \delta$ の減少は、融点附近の高い温度に試料を長時間放置して、急に冷却したというプロセスによつて、始めばらばらにほぐされていた雪の粒子と粒子とがしつかりと結びついて“ice-bridge”を形成し、氷の粒と粒との間のスリップが減少したと考えるのが妥当であろう。従つて、第7図の密度をパラメーターとする $\tan \delta$ の温度特性曲線がまちまちな様相を呈しているのも、一応積雪の内部構造の差異によるものと考えることがができる。密度の等しい氷でさえも、結晶構造の違いによつて曲線7と8とのような大きな差異を生ずるし、また曲線6の気泡を無数に含んだ $\rho=0.87$ の水では、 $\tan \delta$ は純粹の氷のそれよりも更に大きくなる。

第7図の曲線6, 7, 8が示すように、氷の $\tan \delta$ の温度特性は、積雪のそれに比べて特異な様相を示す。すなわち、 $\tan \delta$ は、温度低下と共に減少してゆくが、ある温度で極小となり其後は上昇する。(図には $-45^{\circ}\text{C}$ までの測定値しか示されていないが、更に温度を下げてゆくと $-70^{\circ}\text{C}$ 附近で極大となり、其後は温度が下ると共に再び減少してゆくことが測定されている。)このことから想像すると、氷の内部での振動エネルギーの散逸機構には、 $\tan \delta$ の極小を与える温度をはさんで高温側と低温側に二つのtypeがあるように思われる。詳細は文献(2)にくわしくのべられているが、これらの吸収機構は氷の内部構造に大きく関係するのである。(現在のところ、積雪については、測定は $-35^{\circ}\text{C}$ までしか行われておらず、更に低い温度領域まで測定を行つたとして氷の場合のように $\tan \delta$ の極大があらわれるか否かは、甚だ興味のある問題である。)何れにしてもエネルギーの散逸がどのような粘性機構にもとづくか、雪や氷の内部構造とどのような関係にあるかは今後の重要な課題の一つであろう。

## V. 積雪の活性化エネルギー

積雪の内部粘性係数 (内部摩擦)  $\eta$  は (3) 式で与えられる。吾々は実測されたいろいろな密度の積雪のヤング率及び  $\tan \delta$  をつかつて  $\eta$  を計算し、 $\log_{10} \eta$  を絶対温度  $T$  の逆数  $T^{-1}$  に対し



第10図 積雪の  $\log_{10} \eta$  と  $T^{-1}$  との関係

てプロットしてみたのが第10図である。図から明らかなように、この両者は直線の関係にあるから形式的に

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

とおける。ここに  $F$  はこの粘性機構に特徴的な活性化エネルギーで、 $R$  は気体常数である。

第10図の直線の勾配から  $F$  を求めると次のようになる。

$\rho = 0.153$ の雪	11 kcal/mol	振動数約 200 $\sim$
$\rho = 0.29$ の雪	13 kcal/mol	" 200 $\sim$
$\rho = 0.33$ の雪	14 kcal/mol	274 $\sim$
$\rho = 0.43$ の雪	(しまり雪をはぐして粉状にし再び枠でかためたもの)	
アンニーリング前	46 kcal/mol	(曲線 $\overline{PQ}$ より)
(振動数 160 $\sim$ )	14 kcal/mol	(曲線 $\overline{QR}$ より)
アンニーリング後	15 kcal/mol	振動数 270 $\sim$
$\rho = 0.59$ の雪	16 kcal/mol	振動数約 380 $\sim$

$\rho = 0.92$  の氷

c 軸が振動方向に垂直 7 kcal/mol 振動数 220 $\sim$   
 c 軸が振動方法に平行 16 kcal/mol " 260 $\sim$

これから、天然の積雪の  $F$  は大体 1 mol 当り十数 kcal の程度であることがわかる。ところで興味のあるのは、前節でのべたしまり雪をつぶして粉末にしそれを杵につめてかためた雪の  $\log_{10} \eta - T^{-1}$  曲線であつて、図で PQR として示したものである。図にみられるとおり、PQR は単純な 1 本の直線ではなく、 $\overline{PQ}$  と  $\overline{QR}$  との 2 本の直線より成立つてのようにみえる。そして高温側の  $\overline{PQ}$  の  $T^{-1}$  軸に対する傾斜は急であるが低温側の  $\overline{QR}$  の傾斜はゆるくて、他の天然の積雪のそれとあまり変らない。 $\overline{PQ}$  の傾斜から求めた  $F$  は 46 kcal/mol で  $\overline{QR}$  の傾斜から求めたそれは 14 kcal/mol である。故意に ice-bridge を断切られた雪は氷の粒子と粒子との間の“すべり”が大きく温度が高いと振動エネルギーの損失が増えることはまえにのべた。 $\overline{PQ}$  の傾斜が急なのはこのためである。しかし、この試料も  $0^{\circ}\text{C}$  附近の温度で長くアンニーリングし、急冷したあとでは、高温部の  $\overline{PQ}$  は消え、 $\log_{10} \eta - T^{-1}$  曲線は  $\overline{P'R'}$  のごとく 1 本の直線になつたのである。これは氷の粒子と粒子とが緊密に結合しあつてすべりが小さくなり、振動エネルギーの消費がずつと減つたことをあらわしている。氷の  $F$  については文献 (2) を参照せられたい。

最後に、この論文を御校閲下さつた堀健夫教授、並びに熱心な討論をしていただいた低温科学研究所“積雪研究グループ”の諸氏に謝意を表する。

## 文 献

- 1) 山地健次・黒岩大助 1954 振動法による積雪の弾性及び粘性の研究 I. 低温科学, 物理篇, **13**. 49.
- 2) 山地健次・黒岩大助 1956  $0^{\circ}\sim -100^{\circ}\text{C}$  の範囲における氷の粘弾性 I. 低温科学, 物理篇, **15**. 171.

### Résumé

A rectangular bar of snow cut out from newly deposited snow layer was subjected to lateral vibration by the electromagnetic method or the so-called resonance method.

From the resonance frequency  $f$  which is measured, Young's modulus  $E$  and vibration loss  $\tan \delta$  can be calculated by aid of the equations

$$E = \frac{48\pi^2 l^4 \rho f^2}{a^2 m^4} \quad \text{and} \quad \tan \delta = \frac{\ln 2}{\pi f t_{\frac{1}{2}}},$$

where  $l$ ,  $a$ , and  $\rho$  denote length, thickness and density of the bar, respectively, and  $t_{\frac{1}{2}}$  is the time interval required for the amplitude to decrease to half its initial value.

Within the temperature range from  $0^\circ$  to  $-35^\circ\text{C}$ , Young's modulus  $E$  proved to increase and  $\tan \delta$  to decrease with decrease in temperature.

Young's moduli  $E$  of the snow having the densities 0.15, 0.3, 0.5, 0.8 and 0.92 were of the order of  $10^8$ ,  $1.7 \times 10^9$ ,  $9 \times 10^9$ ,  $5 \times 10^{10}$ , and  $9.5 \times 10^{10}$  (C.G.S.), respectively.

Between  $\tan \delta$  and density of the snow, however, no definite relation was found to exist, probably on account of too complicated a structure of the deposited snow. This indicates that the mechanism of the attenuation of amplitude, or the dissipation of vibrational energy, is exceedingly sensitive to the structure of snow.