



Title	海氷の力学的研究 IV : 内部摩擦の測定
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi
Citation	低温科学. 物理篇, 18, 131-148
Issue Date	1959-11-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17961
Type	departmental bulletin paper
File Information	18_p131-148.pdf



海水の力学的性質の研究 IV*

— 内部摩擦の測定 —

田 畑 忠 司

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和34年7月受理)

I. ま え が き

海水に静荷重を加えたときの歪みの時間的変化から粘性係数を測定¹⁾することは行われているが、内部摩擦又は内部粘性の測定は行われていない。

筆者は撓み振動法を用いて海水の弾性率を測定²⁾した際に、共鳴振動をしている試料から振動を駆動している外力を突然とり去つたのちの振動の減衰より海水の内部摩擦を求めた。この方法は、すでに雪や氷³⁾、氷河の氷⁴⁾などの内部摩擦の測定に用いられてをり。それらの結果、純氷や雪では、内部摩擦は温度の低下とともに急激に減少して -35°C 位で極少に達し、更に低い温度では逆に増して、 $-50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 附近で極大に達しその後再び減少することが、知られている。海水について測定した結果、その複雑な構造のために純氷の場合よりもやや複雑ではあるが、ほぼ同様な傾向が得られた。海水の内部摩擦の機構の考察には致らなかつたが、測定の結果を一応報告する。

II. 測定方法・装置・原理

測定に用いた装置は Fig. 1 に示した。これは、弾性率の測定に用いた装置そのものである。試料は低温室に保存しておいた海水から切りだした長さ 35~40cm、幅 4~5 cm、厚さ 1.8~2 cm の海水の角棒を用いた。測定に当つては試料の両端近くに小鉄片をそれぞれ貼り付ける。試料を所定の位置で水平に張つた糸の上に支持し、片方の鉄片の下に置いた駆動用コイルで撓み振動を起させ、もう片方の鉄片の下に置いたピックアップで振動の模様を知ることができるようになっている。Fig. 2 は装置の回路である。測定にあつては、試料が共振しているか否を陰極線オスシログラフ及びピックアップの出力計で看視し乍ら、駆動周波数をいろいろ変えて、試料を共振状態にさせる。その時の共振周波数を発振器の周波数目盛から読みとつてから、ピックアップの出力回路をオスシログラフの回路につなぎかえる。そうして共振状態にある試料の振動の模様を短時間記録させたのちに、振動を駆動するための回路を急に切つて試料の振巾が次第に減少する様子をオスシログラフに記録させる。記録から読み取つた振動の減衰率と試

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 523 号

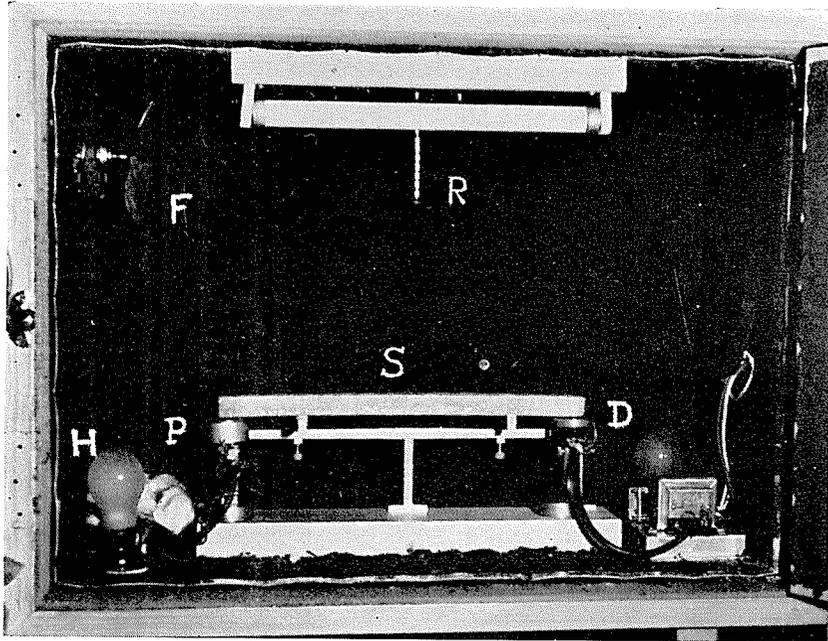


Fig. 1. R: Regulator. F: Fan. H: Heater.
S: Sample. D: Driver. P: pick-up.

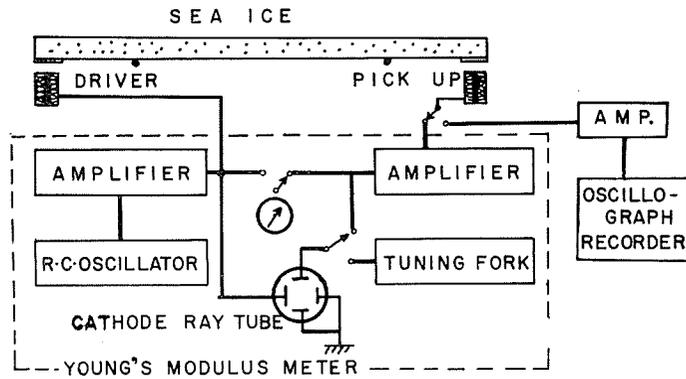


Fig. 2. The schematic diagram of equipment.

料の角振動数その他から、内部摩擦を求めることができるのである。試料を支持する台とピックアップは低温室内の恒温箱におさめ、他の機器は低温室の外に置いて測定を行った。

振動を起させている外力をとり去つたのちの振巾の減衰は試料によつて著しくことなつてゐる。Fig. 3はオシログラムの一例であり、これから読みとつた振巾の減衰の様子をFig. 4に示した。図から振巾はほぼ対数曲線的に減衰していることがわかる。ただ振巾の小さい所で直線が折れ曲つてゐる例が多い。このほかの試料の減衰曲線においてもこの直線の折れ曲りが観察された。黒岩・中谷らが積雪や純氷で同じような減衰を測定したときにはこの折れ曲りは

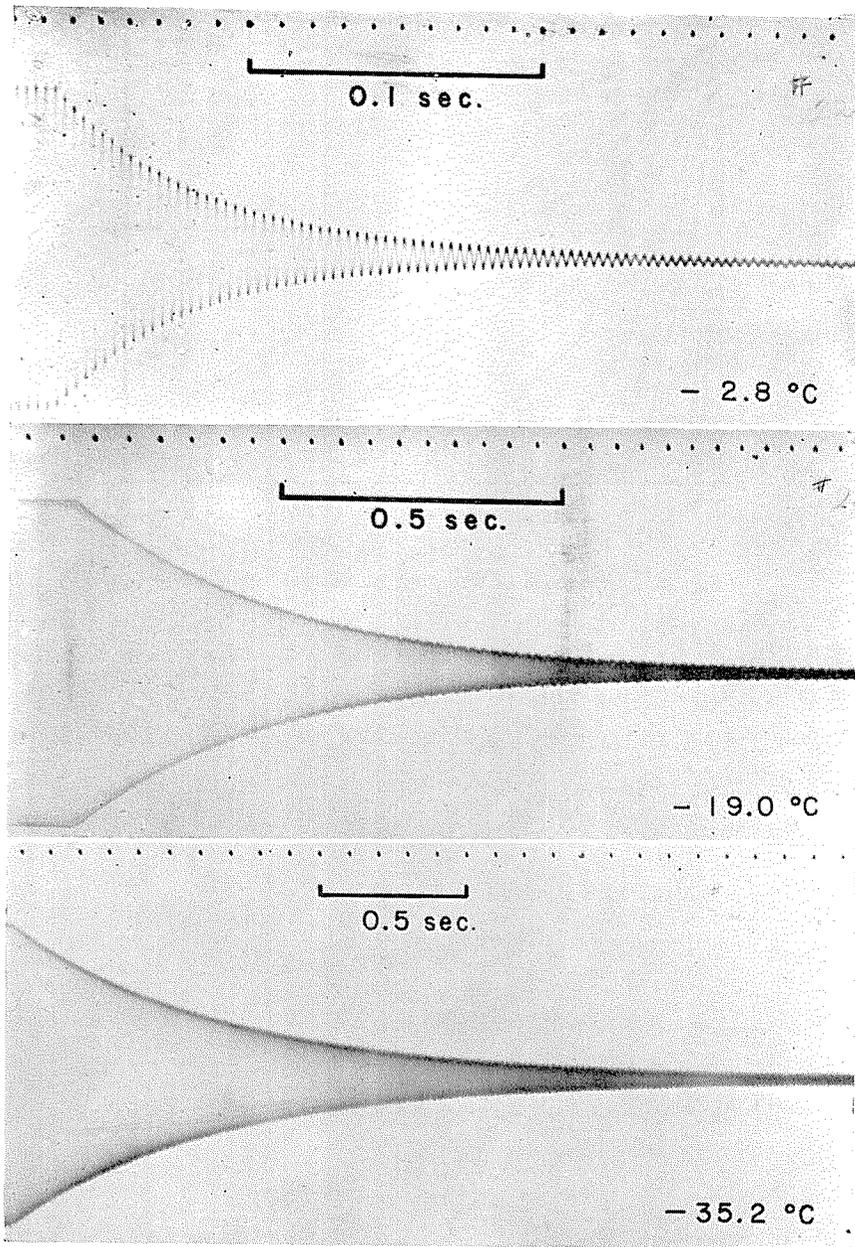


Fig. 3. Some examples of oscillogram (Sample No. 22).

観察されていない。これがどのような原因によるものかの議論は別の報告によることとし、この報告では振巾の比較的大きい部分で振巾が対数的に減衰することのみ着目する。図から、振幅の減衰は温度が高い程早いことがわかり、Fig. 4 の例では $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ の時の減衰率は $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ の時の減衰率の約 10 倍も大きい。

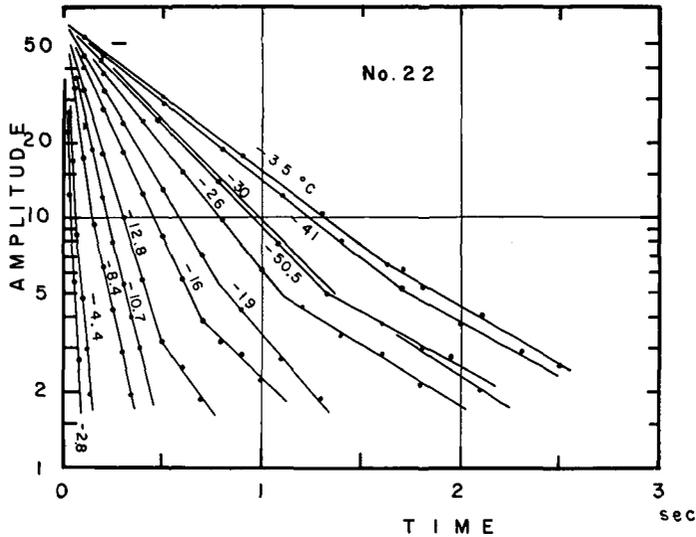


Fig. 4. The mode of damping at various temperature.

外力を取り去つたときの振幅の減衰は試料の内部摩擦のために起り、減衰が早いほど内部摩擦が大きい。したがつて Fig. 3, 4 から、温度が高いほど内部摩擦が大きいことがわかる。内部摩擦を伴う撓み振動の場合の解は吉田⁵⁾によつて求められている。即ち、振幅の減衰率が λ で、振巾が

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \sin \omega t \quad (1)$$

であらわされるときには、次の式が得られる。

$$\omega^2 + \lambda^2 = \frac{m^4 h^2 E}{12l^4 \rho} \quad (2)$$

但し、 ω : 角振動数、 h : 試料の厚さ、 l : 試料の長さ、 E : ヤング率、 m は振動の様式で定まる常数で基本振動の場合には 4.730 である。Fig. 4 からわかるように、海水では (1) 式が成り立つことは明らかであり、 λ は図の直線の傾斜から求められ、 ω は実測される。

$$\frac{2\lambda}{\omega} = \tan \delta \quad (3)$$

が振動損失、減衰係数又は内部摩擦とよばれているものであり、一振動毎に失われる振動のエネルギーと、失われる直前のエネルギーの比を示している。即ち振動が早く減衰するほど $\tan \delta$ が大きい。

更に (2) 式で、 λ が ω に比べて充分小さい時、即ち減衰があまり大きくない場合に $(\lambda/\omega)^2$ を無視すると、完全弾性体の角棒の撓み振動と弾性率の関係を与える式

$$E = \frac{48 \pi^2 \rho l^4}{m^4 h^2} f^2 \quad (4)$$

が得られる。Fig. 4 に示した例から $\tan \delta$ を求めると、最大値は、 -2.8°C のときに 0.02 である。このたびの測定中に得られた $\tan \delta$ の最大値は 0.086 であつたから、 $(\lambda/\omega)^2 < 0.002$ であり無視して差支えない大きさである。したがつて海水の弾性率を求めるときに²⁾ 完全弾性体として導かれた (4) 式を用いたのは差支えなかつたことがわかる。

III. 内部摩擦と温度

39 個の各試料のうち No. 2~No. 20 は、約 $-3 \sim -36^\circ\text{C}$ 、No. 21~No. 40 については $-3 \sim -52^\circ\text{C}$ の間の種々の温度で振巾の減衰を測定し、その減衰率から内部摩擦を求めた。試料の塩素量などは別表に示してある。得られた結果の一部と温度との関係を Fig. 5, 6 に示した。Fig. 5 は、海水に固有な mosaic 構造をした所謂 mosaic ice, Fig. 6 は海水の上層部にみられる granular ice についての測定結果である。

2 つの図から内部摩擦の大きさは各試料によつて可成りちがうが、温度変化に依る変化の傾向は良く似ている。温度が高いほど内部摩擦が大きくて特に -5°C 以上では急に上昇しているようである。温度が下ると、 -20°C 位までは速やかに内部摩擦が減少するが、それ以下ではゆつくり減少し、 $-35^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ 位で極小値に達する。その後、僅かに内部摩擦がふえているのがわかる。この場合の内部摩擦の測定は -52°C までであるが、温度変化による変化の傾向は、第 I 節に述べた山地、黒岩が求めた純氷のそれと良く一致している。

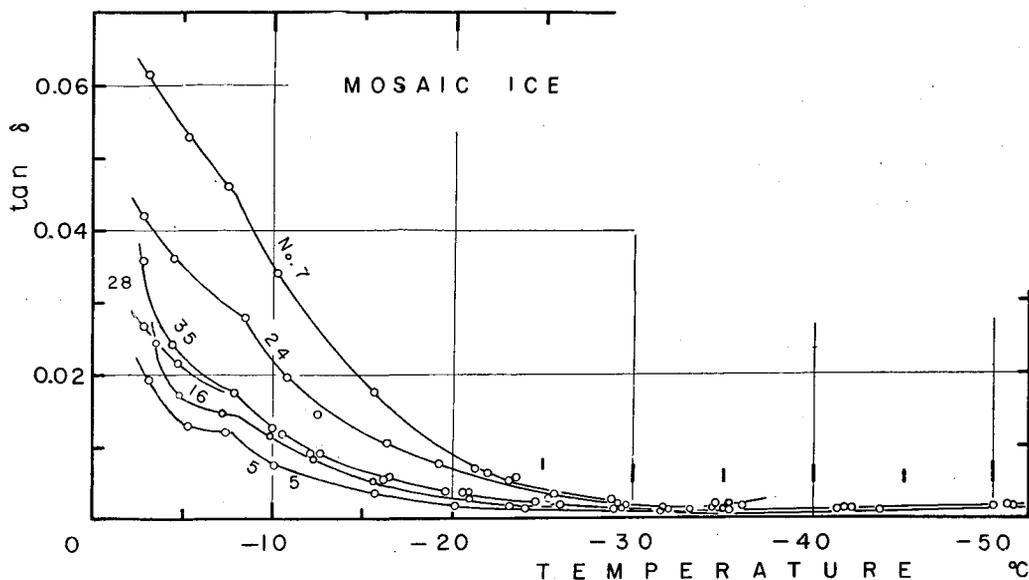


Fig. 5. The relation between $\tan \delta$ of mosaic ice and temperature.

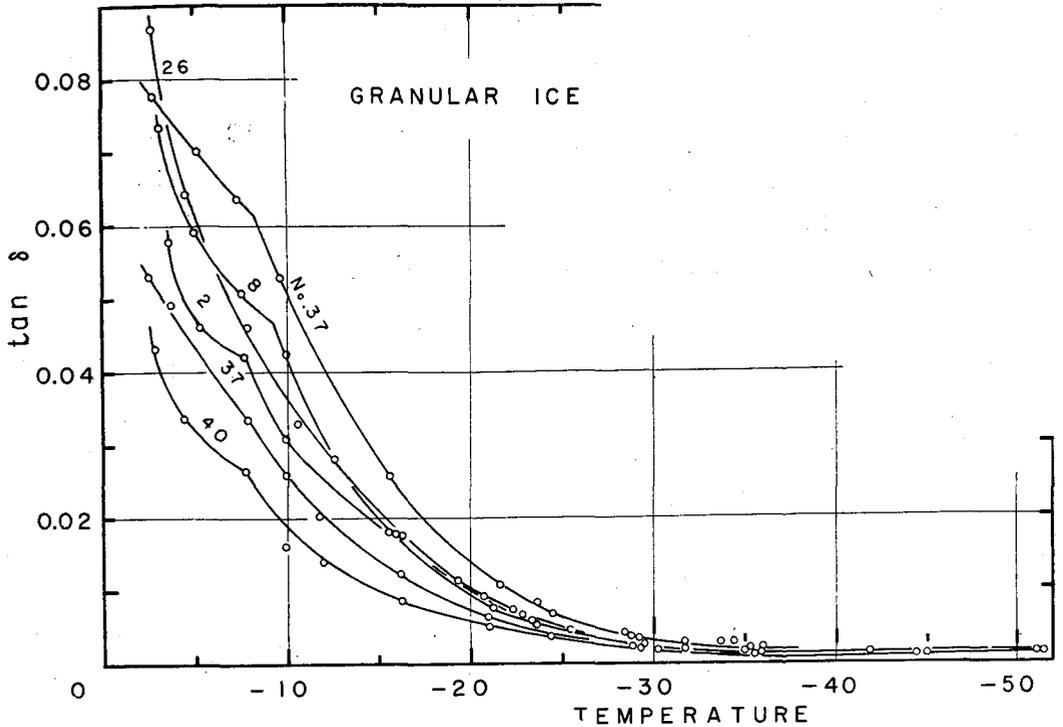


Fig. 6. The relation between $\tan \delta$ of granular ice and temperature.

これらの図で特徴的なことは、ほぼ -8°C 附近で、内部摩擦の減少の傾向が急にかわつて
いることである。のちに述べるように内部摩擦は -8°C 附近と -22°C 位の間では対数曲線的
に変化しており、それ以外の温度範囲では必ずしもそうではない。即ち、 -8°C 附近と -22°C
附近を境にして内部摩擦の温度係数が急に変わっている。ただし、Fig. 5, 6 では後者の温度におけ
る不連続性は $\tan \delta$ の値が小さすぎるためによくわからないだけである。この傾向は granular
ice と mosaic ice では全く同じである。

現在のところ、海氷の内部摩擦を生ずる機構についてはよくわからないが、 -8°C 、 -22°C
附近はそれぞれ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ がブラインから折出をはじめる温度であり、
 $\tan \delta$ のみでなく、弾性率²⁾ や引張り強度³⁾ もこれらの温度を境にして明らかな変化を示すこ
とが知れている。海氷中の固体の塩もしくはブラインの体積の急激な変化がその力学的性質に
重要な役割を演じていることがわかる。

得られたすべての $\tan \delta$ の値は Fig. 5, 6 のそれぞれの最大値、最小値を示す曲線のあいだ
に含まれている。例えば、 -10°C では、granular ice で $0.017 \sim 0.051$ 、mosaic ice では $0.008 \sim$
 0.035 のあいだにあつた。このことから、granular ice の内部摩擦は mosaic ice のそれより、
いくらか大きいことがわかる。黒岩が純氷について求めた $\tan \delta$ は同じ温度で、ほぼ $0.002 \sim$
 0.02 、中谷がグリーンランドの氷冠の水 ($\rho = 0.911 \sim 0.917$) について求めた $\tan \delta$ は、 $0.015 \sim$
 0.003 位であつた。筆者の測定した例とは、試料の密度も測定周波数も、内部構造もちがうが、

海水の内部摩擦は純氷もしくは純氷に近い密度をもつた粒状結晶で小気泡を含む氷冠の水のそれよりも可成り大きいということができよう。

内部摩擦 $\tan \delta$ は、又次のような方法で求めることができる。試料の温度をいろいろ変え乍ら共振周波数を測定すると、温度が比較的高い時には振巾は小さく、しかも共振周波数から多少ずれた周波数でも振巾はあまりかわらない。温度が下がると、共振周波数が次第に高いほうにずれてくる。それにつれて、同じ駆動出力に対して振巾が大きくなり、共振周波数からほんの少しずれただけでも振巾が急に減少する。種々の温度で駆動周波数をかえたときのピックアップの出力を読みとつて振巾と周波数の関係を示したのが Fig. 7 である。図のうちで、共鳴

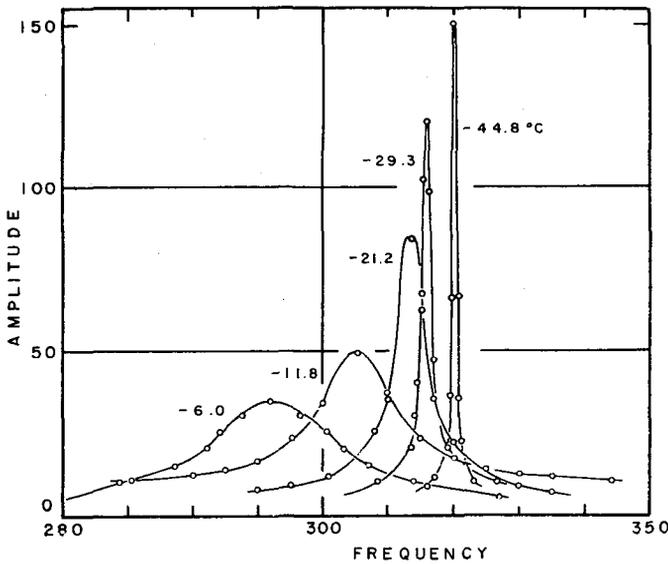


Fig. 7. The resonance curve at various temperature (Sample No. 38).

曲線の山の巾がせまいほど内部摩擦が小さい。この共鳴曲線から、共振周波数: f と振巾が例えば $1/2$ のときのふたつの周波数の読取値の差: Δf , 即ち山の巾を求めれば、内部摩擦は

$$\tan \delta = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\Delta f}{f} \quad (4)$$

であらわされる。この方法で求めた $\tan \delta$ と振幅の減衰曲線から求めた値を比較したのが次の表である。Fig. 7 からわかるように、内部摩擦の小さい所では Δf の値に誤差が入りやすい。したがって振動減衰曲線から求めた値とのちがいが大きくなることがあるが、内部摩擦があまり小さくない所では両者は、当然のこと乍ら、よく一致している。

Sample No. 38	-6.0°C	-11.8	-21.2	-29.3	-44.8
f (cycle/sec)	292	305.5	313.5	316	320
$\tan \delta$	0.0514	0.0344	0.0110	0.00289	0.0016
$\tan \delta'^*$	0.0521	0.0329	0.0111	0.00291	0.00104
E (10^{10} C·G·S)	5.50	6.02	6.34	6.44	6.58

* $\tan \delta'$: Obtained from resonance curve in Fig. 7.

IV. 内部摩擦と密度・塩素量・グレインの大きさ

Fig. 5 及び Fig. 6 からわかるように、同じ温度でも内部摩擦の大きさには可成りのちがいがあある。中谷によると、グリーンランドの氷冠の氷では内部摩擦は測定周波数と氷の密度に大いに関係する。海水について、この内部摩擦のちがいが試料の各要素とどのような関係にあるかを吟味してみた。

共振周波数との関係

同一の試料では温度を次第に下げて行くと共振周波数が高くなる。筆者の測定するときには、このふえ方が、 -3°C と -50°C のあいだで、mosaic ice では 30~50 cycle, granular ice では 40~60 cycle, 平均してそれぞれ、40 及び 50 cycle であつた。ただし mosaic ice で No. 13 のみが、例外的に 90 cycle ふえた。内部摩擦 $\tan \delta$ は周波数の函数であることが知られており、厳密には試料の温度をかえても周波数かわらないようにして測定するのがのぞましい(そのためには試料の厚さを少しずつ減らすか長さを短かくすれば良い)。又、筆者の場合のように数多くの試料を測定するときには、各々の試料の共振周波数が等しくなるように試料を作るのがのぞましいが、実際にはなかなか行いにくく、各試料間では共振周波数が上に示した程度に異なつていた。それで、黒岩・中谷によつて研究されている $\tan \delta$ の周波数特性を用いて、筆者の場合の誤差を検討してみる。黒岩の研究によると、 -5°C から -50°C に温度を下げたときに共振周波数が 50 cycle ふえたとすると、 -50°C における $\tan \delta$ の測定値は周波数が等しいようにして得られる値より、ほぼ 7~8% 多くなる。しかし、Fig. 5, 6 からわかるように -50°C における $\tan \delta$ の値は -5°C のときの値の約 10% 以下である。したがつて、同一の試料の $\tan \delta$ の温度特性を論ずる場合には、温度低下とともに共振周波数のふえるための誤差は無視してもあまり差支えがないであろう。

これに対して、同一の温度における各試料間の共振周波数のちがいによる誤差は決して無視できない大きさであつた。筆者の場合、 -10°C における共振周波数は、mosaic ice では 264~483 cycle, granular ice では 276~411 cycle であつた。特にかけはなれた周波数を示した試料(前者では No. 15, 21, 27, 33, 後者では、8, 18, 37, 40)をのぞいてもそれぞれ 295~403, 276~315 cycle ではほぼ 100~150 cycle 位のちがいがあつた。中谷によると -10°C で共振周波数が以上の値ぐらいちがつた場合には、周波数の高い時に求められた $\tan \delta$ の値は約 20% 強だけ少ない。温度がもつと高いと絶対誤差はふえるが相対誤差は減少し、温度がもつと低い場

合には絶対誤差が減少して相対誤差もいくらか減少する。この結果は小気泡を含んでいる粒状の多結晶の氷河の水で得られたものである。しかし granular ice は似たような結晶構造をしているし、このほかの測定例がないので筆者の測定に適用して、同一の温度で $\tan \delta$ を比較した場合には、共振周波数のもつとも少ないものと多いものとは共振周波数のちがいだけでよつても $\tan \delta$ の値にほぼ 20% のちがいが生じていると考えて大差ないであろう。

密度

海水の弾性率は温度のほかには主に密度もしくは海水中の純水の体積によつてちがうことはすでに報告した。又、氷河の水では $\tan \delta$ は密度と逆比例することが報告されている。海水の -10°C における内部摩擦と密度の関係を示したのが Fig. 8, 9 である。図では共振周波数によつて符号を変えて記してある。Fig. 8 (mosaic ice) から $\tan \delta$ は密度によつてほとんどかわらないことがわかる。Fig. 9 から granular ice では密度が小さくなれば、 $\tan \delta$ が小さくなる傾向がみられる。既にのべたように、Fig. 8, 9 の $\tan \delta$ の値には共振周波数のちがいによる補正を考えに入れなければならない。Fig. 8 では、前項でのべた程度の補正を施しても密度の大小と $\tan \delta$ の間にはつきりした傾向はあらわれそうもない。海水の弾性率についての報告でのべたように測定に用いた試料の塩素量は少ないので、密度は殆んど海水中の純氷量もしくは空気量に比例する。それ故、mosaic ice の $\tan \delta$ は密度又は海水中の純氷量又は気泡量にはあまり関係しないということができよう。Fig. 9 で共振周波数による補正を行つても密度と $\tan \delta$ の比例関係は殆んどかわらないようである。すなわち、granular ice では密度が小さくなると $\tan \delta$ は小さくなる傾向があると見做すことができる。しかし、それらの間の量的な関係は今のところよくわからない。

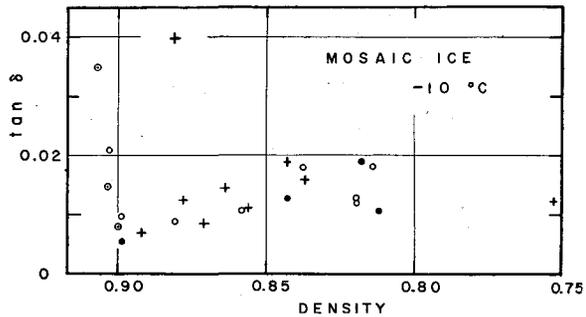


Fig. 8. The relation between $\tan \delta$ of mosaic ice and density at -10°C (resonance frequencies are: ●; 250~300, ○; 300~350, +; 350~400, ⊕; >400).

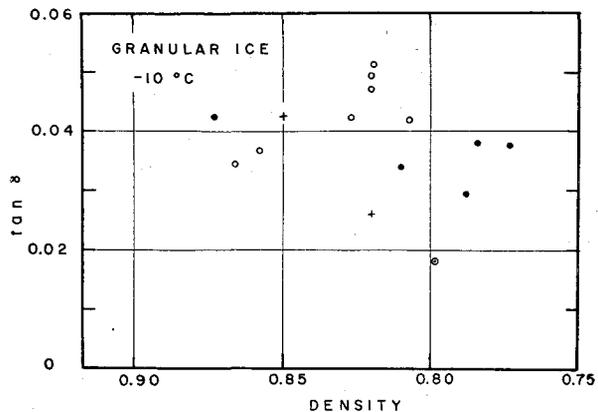


Fig. 9. The relation between $\tan \delta$ of granular ice and density at -10°C (resonance frequencies are: ●; 250~300, ○; 300~350, +; 350~400, ⊕; >400).

塩素量・ブラインの体積

ブラインの体積のちがいは温度が等しければ氷中の塩素量に比例するので、ブラインの体積のかわりに氷の塩素量と内部摩擦 $\tan \delta$ を比較しても、ブラインの体積と $\tan \delta$ の関係がわかる。Fig. 10, 11 には、 -10°C における夫々 mosaic ice と granular ice の $\tan \delta$ と塩素量の関係を示してある。Fig. 10 から、mosaic ice の $\tan \delta$ と塩素量、即ちブラインの体積との間に

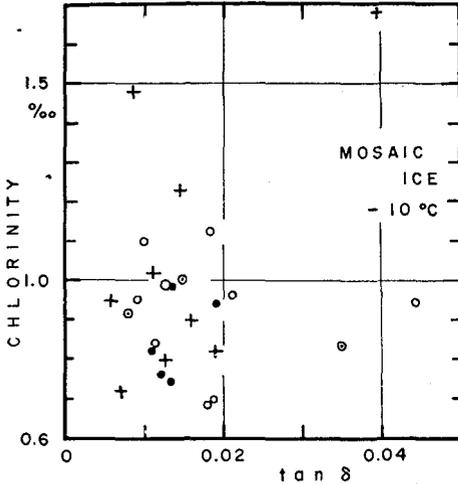


Fig. 10. The relation between $\tan \delta$ of mosaic ice and chlorinity at -10°C (resonance frequencies are: ●; 250~300, ○; 300~350, +; 350~400, ⊙; > 400).

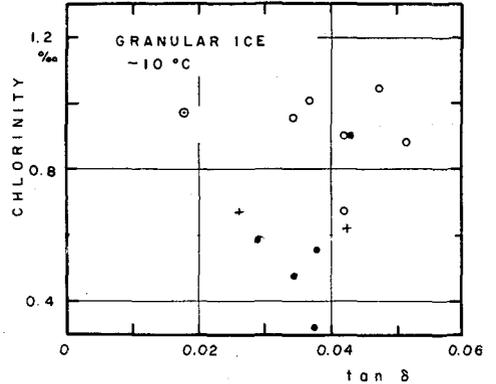


Fig. 11. The relation between $\tan \delta$ of granular ice and chlorinity at -10°C (resonance frequencies are: ●; 250~300, ○; 300~350, +; 350~400, ⊙; > 400).

はあまり関係がなさそうである。Fig. 11 の両者のあいだでも殆んど同様である。石田⁷⁾が海水中の弾性波の速度を測定して、温度が高い時には海水の内部摩擦が著しく大きくなることに注目して、その原因は氷中のブラインの体積が著しく大きくなることによるのではないかと考えている。温度が高くなると内部摩擦が大きくなることは Fig. 3, 4 から確かであるが、この傾向は純氷においてもみられるものでありこれらの図からはブラインの体積が多いと $\tan \delta$ が大きくなるという傾向はみられない。したがって石田の指摘した点は海氷中の純氷自身の性質によるのかもしれない。

グレインの大きさ

次に、グレインの大きさと $\tan \delta$ を比較したのが Fig. 12, 13 である。此所にいうグレインとは光学的に同一の性質を示す部分の平均の面積をいい、内部摩擦の測定が終つたのちに、試料をうすく削つて写した偏光写真から求めた。写真は結氷面に平行な断面を写した。何れの図においても $\tan \delta$ との間にはあまりはつきりした関係がみられない。しかし強いて云えば mosaic ice ではグレインが小さくなると $\tan \delta$ が僅か乍ら増す傾向にあるようである。granular ice の

グレインの大きさには偶然にもあまり大きなちがいが無いので断定はできないが、グレインがほんの少し小さくなっただけで $\tan \delta$ が急に大きくなるという傾向にあるとみなすことができるかもしれない。

内部摩擦とそれに影響をあたえたとおもわれる海水の諸要素とを比較したが、Fig. 3, 4に見られる所の同じ温度での各試料間の内部摩擦の相違の原因は、mosaic ice ではほとんど見出されなかつた。granular ice では、密度が減少すると $\tan \delta$ が減少し、グレインの大きさが小さくなるにつれて $\tan \delta$ が増すらしいことが知られた。即ち、 $\tan \delta$ のバラッキは共振周波数のちがいが一部分影響していることは明らかであるが、それ以外のことについては、granular ice ではいくらか説明されたが未だ不十分であり、mosaic ice については殆んどわからなかつた。

mosaic ice では海水の基本的構造要素である薄片状結晶相互の間にブラインが閉じ込められている。ブラインの体積が増すと結晶を相互に結びつけている bridge が少なくなり、逆の場合には多くなる。しかもこの bridge はおそらく内部摩擦に大きな関係があるとおもわれる。そうすると、mosaic ice の $\tan \delta$ が密度やブラインの体積と単純な関係にないことは別に怪しむにあたらない。海水の内部摩擦を明らかにするには氷の光学的なグレインの大きさのみでなく、むしろ微視的な構造の観察も行う必要があると思われる。

海水の弾性率は密度が減少すると小さくなるが、その内部摩擦は密度に殆んど関係しないとすると、弾性率と内部摩擦のあいだに簡単な関係がみられそうにもないことはすぐに気が付く。実際に両者を図上で比較してみても mosaic ice ではほとんど関係がみられなくて、granular ice で $\tan \delta$ がふえるにつれて弾性率が僅かに小さくなるような傾向がうかがわれる程度である。

V. 内部粘性

海水の粘弾性的性質が Maxwell Unit もしくは Voigt Unit であらわされると仮定すれば、その内部粘性を求めることができる。即ち、もし Maxwell Unit であらわされるとすると内部

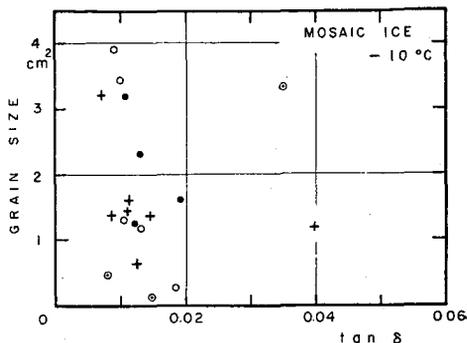


Fig. 12. The relation between $\tan \delta$ of mosaic ice and grain size at -10°C (resonance frequencies are: ●; 250~300, ○; 300~350, +; 350~400, ⊙; > 400).

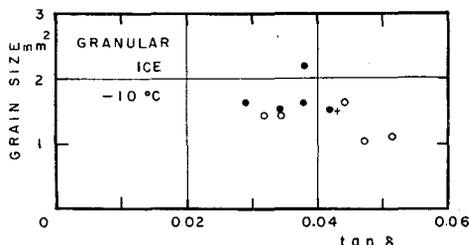


Fig. 13. The relation between $\tan \delta$ of granular ice and grain size at -10°C (resonance frequencies are: ●; 250~300, ○; 300~350, +; 350~400, ⊙; > 400).

粘性: η は

$$\eta = \frac{E}{2\pi f \cdot \tan \delta} \quad (5)$$

であらわされる。 E は弾性率で、 f は共振周波数である。海氷のような複雑な構造をもっている物質の粘弾性的性質をこのような簡単な模型であらわすことの可否については議論があろうし、模型を海氷に適用したときの物理的意味も不明であるが内部粘性のより物理的な取扱いができる前の過度的な方法としては許されるであろう。

各試料について(5)式を用いて求めた η と温度との関係のいくつかの例を示したのが Fig. 14, 15 である。内部粘性は $-3 \sim -50^\circ\text{C}$ のあいだでは、 $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^{10} \text{ C}\cdot\text{G}\cdot\text{S}$ のあいだを変化

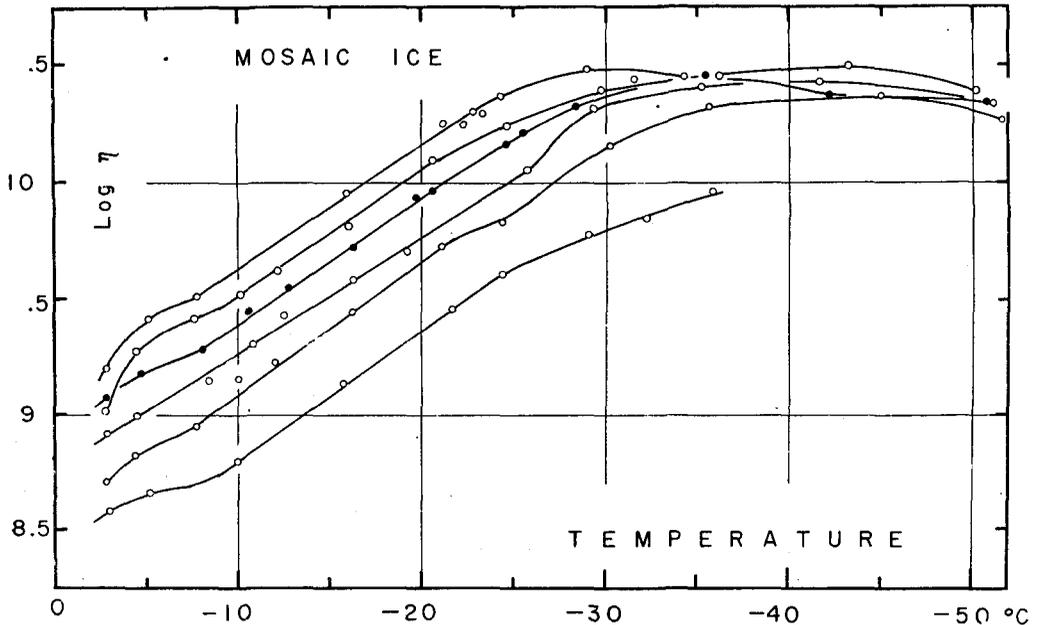


Fig. 14. The relation between $\log \eta$ of mosaic ice and temperature.

し、同じ温度では mosaic ice の η が granular ice のそれよりも広い範囲にわたって分布しているのに気が付く。温度との関係では、両図とも全く同じ傾向を示している。即ち $-8 \sim -10^\circ\text{C}$ 以上の温度では温度の低下に対する増し方は必ずしも一定でないが、 $-8 \sim -10^\circ\text{C}$ から $-22 \sim -23^\circ\text{C}$ 位のあいだでは、 $\log \eta$ が直線的に増加している。しかもすべての試料についてほとんど平行であり、 mosaic ice と granular ice でもその傾斜がほとんどかわらない。海氷の弾性率についての報告²⁾で、温度変化に対する弾性率の変化 $\Delta E/\Delta t$ が温度のみの函数であることを指摘したが、 $-8 \sim -22^\circ\text{C}$ のあいだでは $\Delta \eta/\Delta t$ も又温度のみの函数であるのは興味深い。 $-22 \sim -23^\circ\text{C}$ 以下になると、その増し方はゆるやかになって、 $-35 \sim -45^\circ\text{C}$ 附近で極大に達しそれ以下の温度で僅かに減少している。 η の温度特性が $-8 \sim -10^\circ\text{C}$ 附近でかわることは Fig. 3,

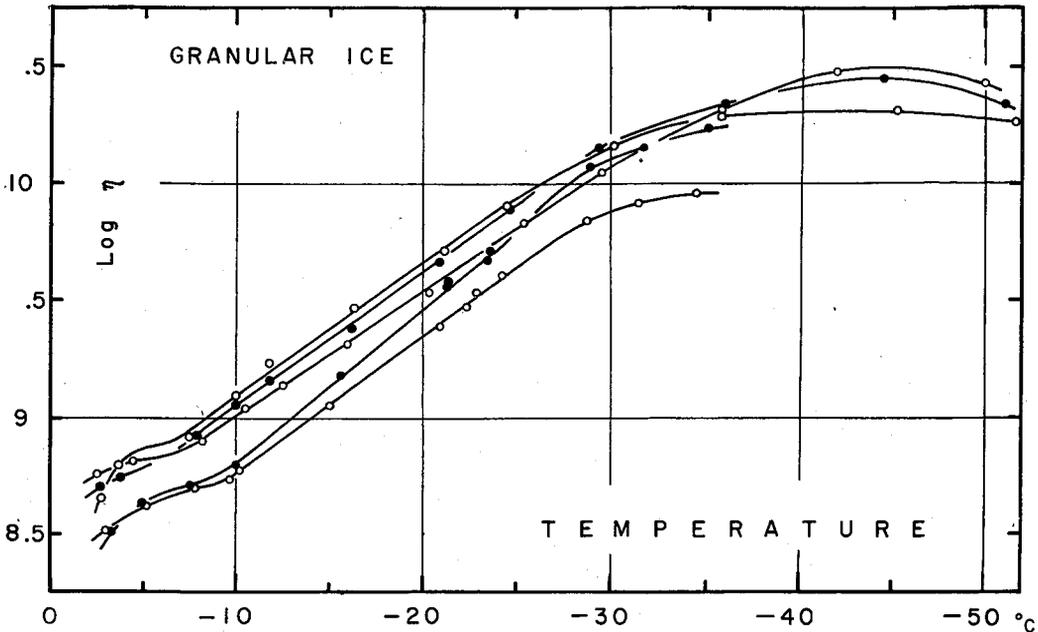


Fig. 15. The relation between log η of granular ice and temperature.

4でも既に明らかであるが、Fig. 14, 15 から $-22^{\circ}\text{C} \sim -23^{\circ}\text{C}$ 付近でもかわることがわかる。先に述べたように、Fig. 3, 4 では $\tan \delta$ の絶対値が少ないために後者の温度附近での温度特性の変化は気付かなかつたが、これらの図であきらかになった。これらの温度特性の変化する温度は、海氷中のブラインから夫々 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が析出しはじめる温度であり、海氷中のブラインの量の変化又は固体の塩が海氷の内部摩擦乃至内部粘性に無視できない影響を与えていると考えられることについては既に第 III 節で述べた。

氷の内部摩擦は共振周波数によつて多少ことなることはすでに指摘したが、内部粘性 η は共振周波数に殆んど関係ないことが中谷によつて確められている。Fig. 14, 15 にみられる同じ温度での η のバラッキと密度との関係

を示したのが、Fig. 16, 17 である。mosaic ice では η が密度に比例して減少しているのがわかる。granular ice ではそもそも η のバラッキが少ないのであるが、密度との関係も明らかでない。

内部粘性 η は (5) 式からわかるように、弾性率: E に比例し内部摩擦: $\tan \delta$ に逆比例する。mosaic ice では E は密度に比例するが、 $\tan \delta$ は密度に無関係であり、granular ice では E

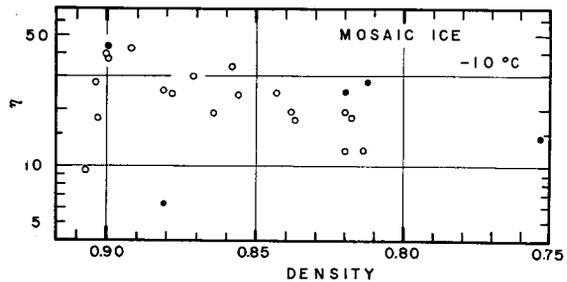


Fig. 16. The relation between log η of mosaic ice and density at -10°C . (resonance frequencies are: \circ ; 295~403, \bullet ; 264~282 & 483).

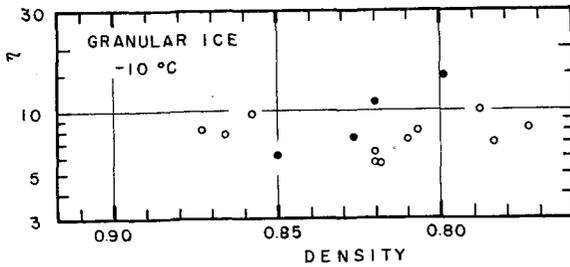


Fig. 17. The relation between $\log \eta$ of granular ice and density at -10°C (resonance frequencies are; ○; 276~315, ●; 350~383 & 411).

は密度に比例し $\tan \delta$ も密度に比例する傾向があるので、これらの結果は当然予想されたことである。密度以外の海氷の構成要素即ち塩素量、グレインの大きさなどとの関係も求めたが、あまりはつきりした関係は見出されなかった。結局内部粘性は海氷の密度及び海水中の純氷の性質と温度によつてきまると見なすことができよう。内部粘性も内部摩擦と同様に海氷中の塩素量

に即ち、ブラインの量と固体の塩の量にあまり関係がなくて、新たな塩が析出しはじめる温度附近でのみその温度特性が変化することは興味深い。

VI. む す び

低温室に保存してあつた海氷から切りだした棒の撓み振動の振巾の減衰から、内部摩擦を測定した。内部摩擦を生ずる物理的機構についての考察には到らなかつたが、次のようなことがわかつた。

塩素量の少ない海氷では $-2.8^{\circ}\text{C} \sim -52^{\circ}\text{C}$ の範囲では、

1) 海氷の内部摩擦 $\tan \delta$ は結氷点に近い所では可成り大きい。 -20°C 位までは温度が下がるにつれて急激に減少して、 $-35^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 位で極小に達する。それより温度が下がると僅かにふえる。

2) 内部摩擦及び内部粘性 η の温度特性は、海氷中のブリンから、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が析出しはじめる -8.2°C , -22.8°C 附近で変化する。なおこれらの温度では弾性率と引張り強度の温度特性も急に变化することが知られている。

3) 内部摩擦は同じ温度でも各試料によつて可成りことなり純氷のそれより一般に大きい。mosaic ice ではその違いは氷の密度、海氷中の純氷の量、塩素量、ブラインの体積、グレインの大きさ等にはあまり関係しない。granular ice では密度が小さくなると僅かに減少し、グレインが大きくなると、増加する傾向があるようである。

4) 海氷の粘弾性性質が、Maxwell Unit であらわされると仮定して求めた内部粘性 η の温度特性は $\tan \delta$ と逆になり、特に $-8^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ と $-20^{\circ}\text{C} \sim -23^{\circ}\text{C}$ の間では対数函数的に増加し、しかもどの試料でもその増し方 $d\eta/dt$ はほぼひとしい。

5) η は mosaic ice では同じ温度でも可成りちがいが、密度の減少につれて減少する。granular ice では、各構成要素のちがいがによつてもあまり大きくかわらない。

6) 弾性率と内部摩擦の間には殆んど関係がない。

海氷の弾性率と破壊強度は -8.2°C , -22.8°C で急に变化することが知られている。内部

摩擦についても同じ傾向がみられたことは非常に興味深い。海氷中の固体の塩又はブラインの体積の急激な変化がその力学的性質に大きな影響を与えていることがわかる。もつと塩素量の多い氷で、しかもこれらの諸量を同じ試料について測定してブリンもしくは塩と海水の力学的性質の関係を明らかにしたいとおもっている。又この測定で海水の内部摩擦について大凡その傾向を知ることしか出来なかつた。次の機会にはその機構に対する考察に及びたいとおもう。

この測定を行うにあたって種々の激励と援助を受けた低温科学研究所石田完助教授、資料の読取り、整理に協力いただいた品田悦子嬢に厚くお礼申し上げます。試料の採取に御援助をいただいた、紋別市役所、紋別市漁業協同組合、紋別海上保安署にも厚く御礼申し上げます。実験に要した費用の一部は文部省特別研究費(沿岸海水の物理的性質の研究)によつた。

文 献

- 1) 田畑忠司・小野延雄 1958 海水の力学的性質の研究 I. 海水の静的粘弾性について. 低温科学, 物理篇, **17**, 135.
Tabata, T. 1958 Studies on visco-elastic properties of sea ice. "Arctic Sea Ice", Publication **598**, NAS-NRC., U. S. A., 139.
- 2) 田畑忠司 1959 海水の力学的性質の研究 III. 振動法による弾性率の測定 (2). 低温科学, 物理篇, **18**, 115.
- 3) 黒岩大助・山地建次 1954 振動法による積雪の弾性及び粘性の研究. 低温科学, 物理篇, **13**, 49.
同上 1956 同上, II. 低温科学, 物理篇, **15**, 43.
山地建次・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.
- 4) Nakaya, N. 1958 Visco-elastic properties of snow and ice in Greenland ice cap J. Faculty of Sci., Hokkaido Univ., Ser. II (Physics), **5**, No. 3, 119.
- 5) Yosida, Z. and Colleagues. 1956 Physical studies on deposited snow. II. Mechanical properties (1). Contri. Inst. Low Temp. Sci., **9**, 37.
- 6) Assur, A. 1958 Composition of sea ice and tensile strength. "Arctic Sea Ice" Publication **598**, NAS-NRC., U. S. A., 106.
- 7) 石田 完 1959 海氷中の音速度 II. 低温科学, 物理篇, **18**, 157.

Résumé

Data on the internal friction of sea ice were obtained by measuring the resonance frequency and damping coefficient of rectangular ice bar. Samples used were the same ones which were used in the measurement of elastic modulus. (See: Studies on Mechanical Properties of Sea Ice. III. Measurement of Elastic Modulus of Sea Ice by the Lateral Vibration Method (2)).

If the vibration of rectangular ice bar damps with the damping coefficient λ , amplitude is represented as equation (1). The solution of the lateral vibration with damping is obtained by Yosida⁵⁾ and is

$$\omega^2 + \lambda^2 = \frac{m^4 h^2 E}{12l^4 \rho} \quad (2)$$

where, ω is angular frequency, h is the thickness of bar, l is the length, ρ is the density,

E is elastic modulus, m is 4.730 for fundamental vibration. Internal friction or so-called loss factor or vibration loss $\tan \delta$ is expressed by

$$\frac{2\lambda}{\omega} = \tan \delta \quad (3)$$

$\tan \delta$ means the dissipated energy for every one cycle of vibration and is obtained experimentally.

The damping of amplitude was recorded by an oscillograph recorder. Fig. 3 shows some oscillograms of sample No. 22 at various temperatures. Fig. 4 shows the mode of damping obtained from the oscillograms. The logarithm of amplitude decreases linearly with time and the damping coefficient λ is obtained by the slope of the straight line. However, for most cases, it is noticed that this straight line suddenly changes direction when amplitude attenuates to a certain small value. That is, the second damping coefficient appears. This second damping coefficient will be discussed in the next paper. As, in the case of sea ice, the vibration attenuates with the certain damping coefficient, so equations (1) to (3) are useful in this case. Damping coefficient λ is obtained from the mode of damping and $\tan \delta$ is calculated by equation (3).

Some examples of obtained $\tan \delta$ are shown in Figs. 5 and 6. As is seen from these figures, internal friction declines remarkably with decrease of temperature. Minimum value of internal friction is observed in the temperature range from -30°C to -40°C , and if material is cooled more, the value increases slightly. Temperature dependency of internal friction of sea ice is quite similar to that of pure ice which has been reported by Kuroiwa⁹⁾ and Nakaya⁹⁾.

It should be noticed that the temperature dependency of internal friction is suddenly changed at $-8^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$. As is stated later, at $-22^{\circ}\text{C} \sim -23^{\circ}\text{C}$, temperature dependency is also changed. Similar to the case of elastic modulus of sea ice, temperature dependency of internal friction is also changed at the temperatures at which $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ and $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ are crystalized from the *brine*. A. Assur⁶⁾ reported that the tensile strength is also changed at these temperatures. It is easily recognized that the deposition of new salt from brine or decrease in volume of brine are having an important effect upon all the mechanical properties of sea ice.

Value of $\tan \delta$ is also obtained from the resonance curve shown in Fig. 7 and equation (4). $\tan \delta$ obtained from resonance curve and oscillogram are in good agreement as are shown in table.

Internal friction is considered as a function of resonance frequency, density of ice, volume of brine or chlorinity of ice, grain size and structure. In the present experiment, resonance frequencies at a certain temperature, say at -10°C , distribute from 295~403 cycles/sec and 276~315 cycles/sec for mosaic ice and granular ice, respectively. At this temperature, the error depends upon the difference of resonance frequency which is obtained by using Nakaya's work becomes about 20%.

Relations between density and $\tan \delta$ are represented in Figs. 8 & 9. From Fig. 8 it is obvious that $\tan \delta$ of mosaic ice does not depend upon its density, from Fig. 9 it decreases slightly with the decrease of density for granular ice. In Figs. 10 & 11, it is

noticed that $\tan \delta$ of sea ice has no distinct relation to its chlorinity or volume of brine. From Fig. 12, $\tan \delta$ increases slightly with the decrease of grain size for mosaic ice. For the case of granular ice, it may be seen from Fig. 13, that $\tan \delta$ decreases with the decrease of grain size.

Taking the Maxwell-unit as the model of visco-elastic properties of sea ice, internal viscosity η can be calculated by equation (5). Some examples of obtained internal viscosity are shown in Figs. 14 & 15. η increases with the decrease of temperature for the temperature range from -3°C to $-30^{\circ}\text{C} \sim -45^{\circ}\text{C}$, and for the more cold region, it decreases slightly with the decrease of temperature. At the temperature -8.2°C and -22°C , temperature dependency of η is also changed.

As η is a function of $\tan \delta$, temperature dependency of $\tan \delta$ also has to be changed at these temperatures. However, in Figs. 5 & 6, because of the poor amount of $\tan \delta$ at -22°C , a change of temperature dependency of $\tan \delta$ was not found.

It is noticed especially that for the temperature region from -8°C to -22°C , logarithm of η is a linear function of temperature, and besides, in this temperature region, temperature dependencies of $\log \eta$ of almost all samples are parallel with each other. That is, η is depends only upon the temperature in this temperature region.

As was reported by Nakaya, η does not depend upon resonance frequency of sample. Figs. 16 & 17 show the relation between η and density. For mosaic ice, η decreases with the decrease of density but for the case of granular ice there is no distinct relation between them. Comparering the internal viscosity η with volume of brine or grain size, the auther could not find clear relations between them. Between elastic modulus and internal viscosity, also there was not seen any distinct relation.

Appendix

Density, chlorinity etc. of samples which were used for measurements of elastic modulus and internal friction are cited in this table.

Sample (No.)	Density (g/cm ³)	Chlorinity (‰)	Air void (%)	Grain size (cm ²)	Volume of brine at -5°C (%)
Mosaic ice					
4	0.892	0.72	3.7	3.19	0.73
5	0.900	0.91	2.8	0.47	0.93
6	0.904	1.00	2.4	0.11	1.02
7	0.907	0.83	2.1	3.34	0.85
9	0.864	1.23	6.7	1.36	1.25
10	0.871	1.40	5.9	1.39	1.43
11	0.820	0.91	11.5	1.18	0.93
12	0.814	1.12	12.1	0.23	1.14
13	0.881	1.68	14.9	1.20	1.71
15	0.753	0.74	18.7		0.76
16	0.856	1.02	7.6	1.62	1.04
17	0.837	0.90	9.6	1.44	0.92
21	0.899	0.95	2.9		0.97
22	0.881	0.95	4.9	3.91	0.97
23	0.899	1.10	2.9	3.43	1.12
24	0.903	0.96	2.5		0.98
27	0.812	0.82	12.3	3.24	0.84
28	0.843	0.98	9.0	2.32	1.00
29	0.818	0.84	11.7	1.61	0.86
33	0.820	0.75	11.4	1.26	0.77
34	0.858	0.83	7.3	1.31	0.85
35	0.878	0.80	5.2	0.65	0.82
36	0.838	0.68	9.5	0.20	0.69
39	0.843	0.82	9.0		0.84
Granular ice					
				(mm ²)	
2	0.866	0.95	6.0	1.44	0.97
3	0.820	1.04	11.5	1.04	1.06
8	0.850	0.61	8.2	1.51	0.62
14	0.820	1.84	11.5	1.65	1.88
18	0.827	0.85	10.7		0.87
19	0.819	0.88	11.6	1.11	0.90
20	0.810	0.47	12.5	1.51	0.48
25	0.873	0.85	5.7	1.51	0.87
26	0.858	1.00	7.3	1.45	1.02
30	0.788	0.59	4.9	1.64	0.60
31	0.784	0.55	5.4	1.64	0.56
32	0.773	0.32	6.5	2.18	0.33
37	0.820	0.67	11.4	1.65	0.68
38	0.807	0.67	12.9		0.68
40	0.799	0.97	3.7		0.99