



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海氷の力学的研究 III : 振動法による弾性率の測定 (2)
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi
Citation	低温科学. 物理篇, 18, 115-129
Issue Date	1959-11-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17960">https://hdl.handle.net/2115/17960</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	18_p115-129.pdf



## 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) —

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

海水を削つて作った角棒 (厚さ 2~3 cm, 巾約 5cm, 長さ 35~40 cm) を水平に支持して撓み振動を起させ、その共振周波数と棒のシメンションから海水の弾性率を求めた結果については前報<sup>1)</sup>に報告した。その測定は試料として定着氷から切りだして低温室に保存してあつた海水を用い、 $-3^{\circ}\text{C}$  から  $-35^{\circ}\text{C}$  の範囲のいろいろの温度について行つた。その結果、海水の弾性率は  $10^{10}$  C.G.S の程度で、温度を下げると  $-10^{\circ}\text{C}$  位までは急激に弾性率が増すがそれ以下では温度の低下とともにほんの少しずつ増すことがわかつた。又、海水の弾性率は主としてその密度又は海水中の純氷の量に支配されることもわかり、種々の温度における弾性率と密度又は純氷率の関係が簡単な実験式であらわされることを報告した。更に結氷板に垂直に即ち鉛直面内で振動させた場合と、結氷板に平行即ち水平面内で振動させた場合で弾性率があまり変わらないこともわかつた。測定に用いられた試料の塩素量は 0.5~1.5%, 密度は 0.79~0.90, 試料の数は 20 個であつた。

しかし、前報に報告した測定では、試料の数が充分でなかつた。特に海水の表層部近くを占める granular ice についての測定数が少なく、密度と弾性率の定量的な関係を見出すことができなかった。その後、更に海水の弾性率の測定を行なつたので、その結果に前報に報告した測定結果を含めて報告する。新たに加えた資料では  $-52^{\circ}\text{C}$  までの温度範囲で測定を行つた。測定に用いた試料は前回と同じく低温室に保存したものをを用いたので塩素量は矢張り比較的少なかつた。弾性率の測定と同時に、共鳴振動をしている試料から強制振動を起させている外力をとり去つたときの振動振幅の減衰を用いて海水の内部摩擦を求めるための測定も行つたが、その結果については別報<sup>2)</sup>に報告する。

### II. 測定方法・装置・試料

測定の原理は前回と全く同じである。即ち、水平に支えられて撓み振動をしている角棒

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 522 号。

(厚さ:  $h$ , 長さ:  $l$ , 密度:  $\rho$ ) の各ジメンションと共振周波数:  $f$ , 試料の弾性率:  $E$  のあいだの良く知られている関係

$$E = \frac{48\pi^2 l^4 \rho}{m^4 h^2} f^2 \quad (1)$$

を利用して, 弾性率を求める方法である。此所で  $m$  は振動の様式によつて定まる定数で, 基本振動の場合には 4.730 である。(4) 式は完全弾性体の撓み振動から導びかれた式であるが, 内部摩擦の測定<sup>2)</sup> の報告で述べたように, 海水の場合にもそのまま用いて差支えないことが確められている。

測定装置には多少の改良を加えた。前の測定では, 試料を支持するために 2 本の糸を用いて上方から吊り下げていたが, 水平に強く張つた短い糸の上に乗せるようにした。試料を駆動するためにスピーカーで音響的に振動させ, クリスタル・ピックアップを用いて振動の模様を検出していたが, それを試料の両端に小鉄片を氷着させて, その下に夫々コイルを置いて片方のコイルで電磁的に駆動させ, もう一つのコイルで振動の模様を検出するようにした。測定に用いた回路も前報のものと同様で, R-C-Oscillator を用いて駆動周波数を連続的に変え乍ら試料に振動を起させ, 共振しているか否かを陰極線オスシログラフとピックアップの出力計によつて確める。試料が共振したならば, その周波数を発振器の周波数目盛で読みとる。ここまでは前回の測定と同じである。周波数を読んだ後, ピックアップの出力を電磁オスシログラフの回路に切り替え, 振動の駆動回路を急に切つたのちの振動の減衰の模様を記録させた。この振幅の減衰曲線からは内部摩擦を求めた。

試料の振動の振幅は, 試料の中央(振動の腹にあたる)に印をつけて水平顕微鏡で読み取つた。駆動するための出力が足りなかつたので, すべての試料の振幅を一定にすることはできず,  $10 \sim 30 \times 10^{-4}$  cm の範囲であつた。

試料は幅の広い面が海水の結氷面に平行になるように切りだし, 振動はすべて結氷面に對して垂直, 即ち鉛直面内でおこさせた。試料とピック・アップ及び駆動用コイルは低温室内の恒温箱におさめ, 他の器械類は低温室の外においた。39 個の試料について  $-3^\circ\text{C} \sim -52^\circ\text{C}$  の範囲の種々の温度で測定を行つた。比較のために市販の氷から切り出した試料 2 個についても同様な測定を行つた。個々の試料の密度, 塩素量その他については内部摩擦の測定に関する別報に記載したが, 密度は  $0.75 \sim 0.91$ , 塩素量は  $0.1 \sim 1.5\%$ , グレインの大きさは Mosaic ice では  $0.11 \sim 3.91 \text{ cm}^2$ , granular ice では  $1.0 \sim 2.2 \text{ mm}^2$  であつた。試料の厚さは  $1.7 \sim 2.2 \text{ cm}$ , 長さは  $35 \sim 40 \text{ cm}$ , 幅は  $4 \sim 5 \text{ cm}$ , で厚さと長さの比がほぼ  $1:20$  になるように試料をつくつた。氷の温度は, 端から  $2 \sim 3 \text{ cm}$  のところに横幅の中央に達する直径  $3 \text{ mm}$  の穴をあけ, 測定の前後に細いアルコール温度計を挿入して測定した。一回の測定には数分しか要しないので測定の前後では氷の温度は殆んど変化しなかつたし, 穴をあけたために共振周波数が増減するということはなかつた。測定された共振周波数は  $250 \sim 400 \text{ cycle/sec}$  で R-C-Oscillator の発振周波数は JJY の標準電波で補正したが, 長時間測定を行つているうちには発振周波数が  $1 \sim 2 \text{ cycle}$  ずれることがあつた。試料の厚さ, 幅はキヤリパーで測定し, 密度は体積と重量から求め

た。(1)式の諸量のうちでは周波数の測定にもつとも誤差が入りやすく、求められた弾性率の絶対誤差は周波数によって異なるがほぼ2~3%であった。

III. 弾性率と温度

得られた弾性率と温度の関係の一部を示したのが、Fig.1, Fig.2である。海水の上層部を占める granular ice とその下の海水に特有な モザイク構造をしている部分とでは、のちのべるように、弾性的性質が明らかに異なるのでそれらの各々に分けて図に示した。又、前報

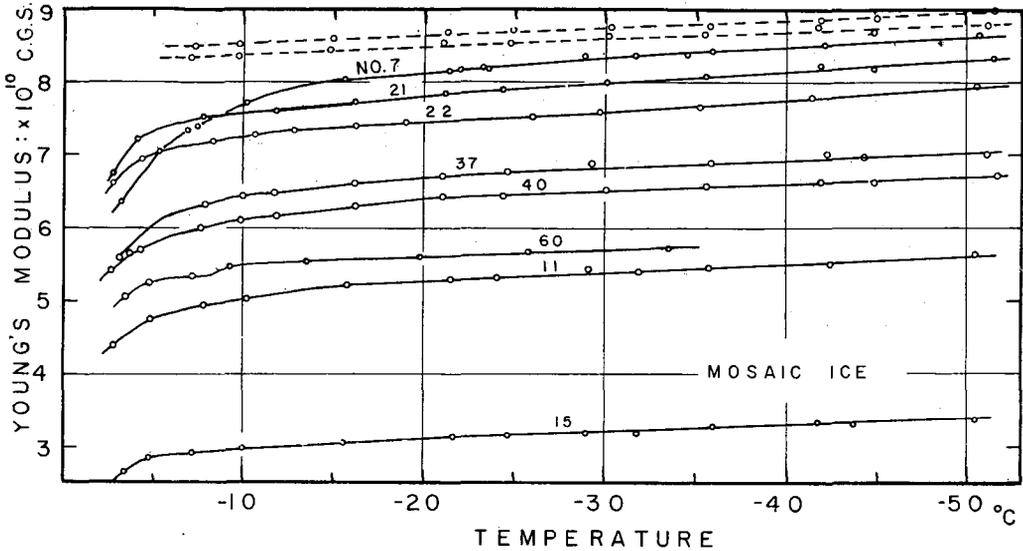


Fig. 1. The relation between Young's modulus of mosaic ice and temperature. (Broken line: commercial ice)

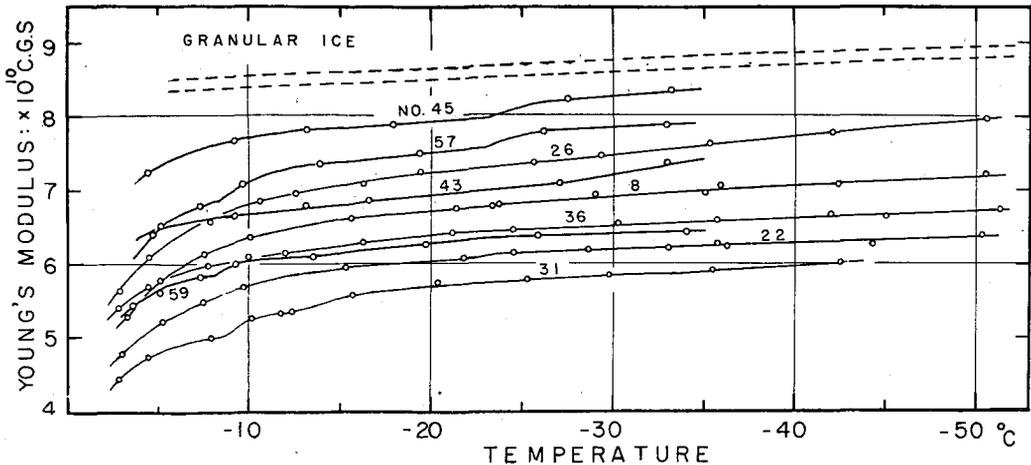


Fig. 2. The relation between Young's modulus of granular ice and temperature.

に示した結果の一部も再び示してある。両図から、海水の弾性率は試料相互の間では可成り相異なっており、個々の試料では  $-10^{\circ}\text{C}$  位までは温度が下るにつれて急に増加するが  $-10^{\circ}\text{C}$  以下では温度に対する変化の割合がゆるやかになることがわかる。一部の試料では、ほぼ  $-8^{\circ}\text{C}$  と  $-22^{\circ}\text{C}$  附近で弾性率が急に変つている。前者は海水中のブラインから  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、後者は  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  が析出しはじめる温度である。以上のことは前報で報告した結果と全く一致している。前回の測定範囲は、 $-35^{\circ}\text{C}$  までであつたのをこのたびの測定で  $-52^{\circ}\text{C}$  まで拡げたが、あらたに拡張した温度範囲では弾性率の急激な変化は測定されなかつた。

Fig. 1, Fig. 2 をみると試料相互のあいだでは弾性率の絶対値が可成り異なるにも拘わらず、温度降下による弾性率の増加の曲線は互にほぼ平行であることに気がつく。このことは、温度が変つたときに弾性率の変化する量は、個々の試料の弾性率の絶対値、水中の塩素量、ブラインの体積、固体の塩の量、密度、測定周波数、グレインの大きさなどには関係なく温度のみの函数であることを示している。それ故、すべての試料について得られた温度曲線を平均したものは海水の弾性率の温度特性を示しているものと見做すことができる。Fig. 3 にその平均値、すなわち、mosaic ice と granular ice の弾性率の温度特性が示してある。図には同時に、筆者

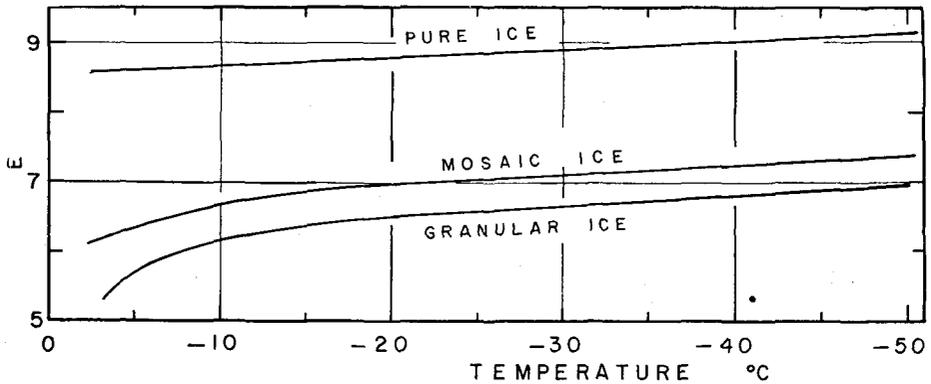


Fig. 3. The temperature dependency of Young's modulus.

の測定した純水の弾性率の平均値も示してある。海水の弾性率はそれを構成している純水の弾性率とブラインの量、固体の塩、密度、結晶構造などによつて決まるものと考えられる。測定中にブラインの流出はなかつたので密度は一定であり、結晶構造は大まかには勿論変化しない。ブラインから氷が析出したり、逆に氷がブラインに融け込んだりするたびにブラインと氷の比容の差のために気泡の量が変化するが、それは無視してもよいほど少ない。

結局、海水の弾性率が温度によつて変化する原因は、純水の弾性率、ブラインの量及び固体の塩の量によるとおもわれる。このうち純水の弾性率は Fig. 3 からわかるように温度が高くなつてもほんの少ししか減少しないので、海水の弾性率が  $-20^{\circ}\text{C}$  以上の温度で著しく減少する原因としては不充分である。即ち、海水の弾性率が  $-20^{\circ}\text{C}$  以上の温度で著しく減少するのは、氷中のブラインの量の増加によるものが大きいと考えても差支えないであろう。海水は

結氷温度近くまで温度を上げてグレインの大きさやその光学的な性質は変化しないが、結氷温度の近くではブラインの体積が著しく増し、それだけブラインの周囲の純氷の量が減少する。そのために、海水に固有な薄い板状の結晶相互の結合が弱くなる。おそらくは、それが弾性率の低下の原因となるのであろう。氷の温度が上り、ブラインがふえると塩が減少するので、弾性率の減少がブラインの増加に依るといふことと析出している塩の減少によるといふことは同意義である。但し、物理的には、必ずしも同じでなく、液体のブラインの増加かもしくは固体の塩の減少か、あるいはその両方の割合の変化によつて弾性率の減少が起るのかもしれないが、それを確めるためには更にくわしい観察と測定が必要である。

Fig. 3 の曲線は何れも、 $-3^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$  のあいだでは温度の降下とともに弾性率が対数曲線的に増しているが、 $-20^{\circ}\text{C}$  以下では直線的に増加しているとみなすことができる。これらの曲線すなわち弾性率： $E$  の温度係数は  $-3^{\circ}\text{C}\sim-50^{\circ}\text{C}$  の範囲に対してそれぞれ次の式であらわされる。

Mosaic ice	$\begin{cases} E = a + 0.014t & -20 \geq -t \geq -50^{\circ}\text{C} & (2, a) \\ E = a + 0.014t - 0.59 \exp(-0.0129t) & -3 \geq -t \geq -20^{\circ}\text{C} & (2, b) \end{cases}$
Granular ice	$\begin{cases} E = a' + 0.017t & -20 \geq -t \geq -50^{\circ}\text{C} & (3, a) \\ E = a' + 0.017t - 2.0 \exp(-0.28t) & -3 \geq -t \geq -20^{\circ}\text{C} & (3, b) \end{cases}$
Pure ice	$E = 8.6 + 0.012t \quad -3 \geq -t \geq -50^{\circ}\text{C} \quad (3, c)$

これらの式で、 $t$  は温度の絶対値、 $a, a'$  は温度以外の要素によつて定まる値でこの図ではそれぞれ 6.7 及び 6.2 である。すべての試料の平均の密度は mosaic ice では 0.859, granular ice では 0.822, 平均の塩素量はそれぞれ 0.99%, 0.83% であるから、これらの曲線は、以上のような密度、塩素量をもつ海水の弾性率をあらわしていることになる。

Fig. 3 及び (2, b), (3, b) 式からわかるように、 $-20^{\circ}\text{C}$  以上の温度での mosaic ice と granular ice の弾性率の温度上昇による減少のし方は可成り異なつてゐる。又一方、この温度でのブラインの体積の増加の割合はのちに述べるように同じである。即ち、ブラインの体積の増加の割合は等しくても、試料の構造の如何によつて弾性率の減少の割合が異なる。云いかえると、ブラインの体積の増加のために弾性率は減少するが、その量は試料の構造にも関係する。

Fig. 3 の曲線及び (2), (3) 式には  $-8^{\circ}\text{C}$  と  $-23^{\circ}\text{C}$  附近の弾性率の急激な変化は含まれていないが、弾性率の大凡の温度係数を知るためには差支えないであらう。

#### IV. 弾性率と密度・純氷率

温度がひとしい場合には海水の弾性率は密度又は海水中の純氷率が小さくなると減少すること及び、弾性率を密度又は純氷率の函数としてあらわした実験式を前報で報告した。このたびの測定で得られた結果も、密度、海水中のブラインの量、グレインの大きさなどと比較してみたが、矢張り密度 (又は純氷率) が弾性率にもつとも大きな、しかもはつきりした影響を与えていることがわかつた。温度がひとしい場合の各試料の弾性率と密度を比較したのが Fig. 4

~7である。Fig. 4, 5は mosaic ice の夫々  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$  の場合で, Fig. 6, 7は granular ice の夫々同じ温度の場合である。これらの図には同時に、筆者の測定した純氷の弾性率を黒丸で示してある。 $-10^{\circ}\text{C}$  の場合には両者とも点のパラッキは可成りあり、 $-30^{\circ}\text{C}$  の図では点のパラッキが少なくなっている。これらの図において弾性率と密度の平均の関係を示す直線をひい

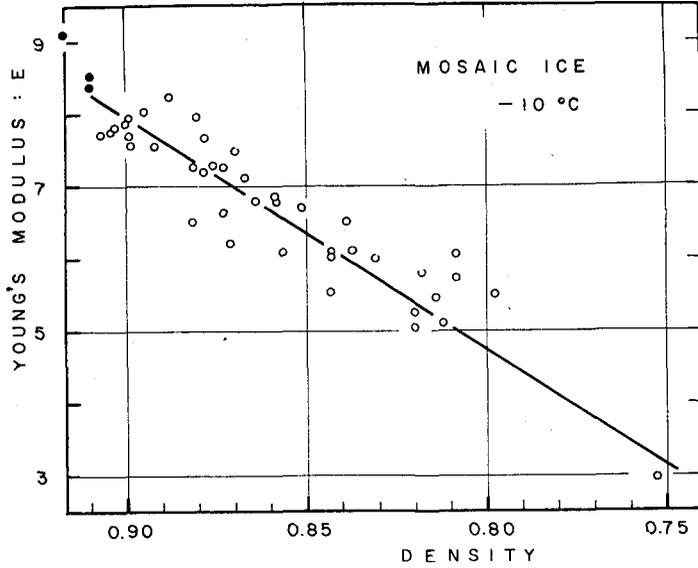


Fig. 4. The relation between Young's modulus of mosaic ice and density at  $-10^{\circ}\text{C}$ .

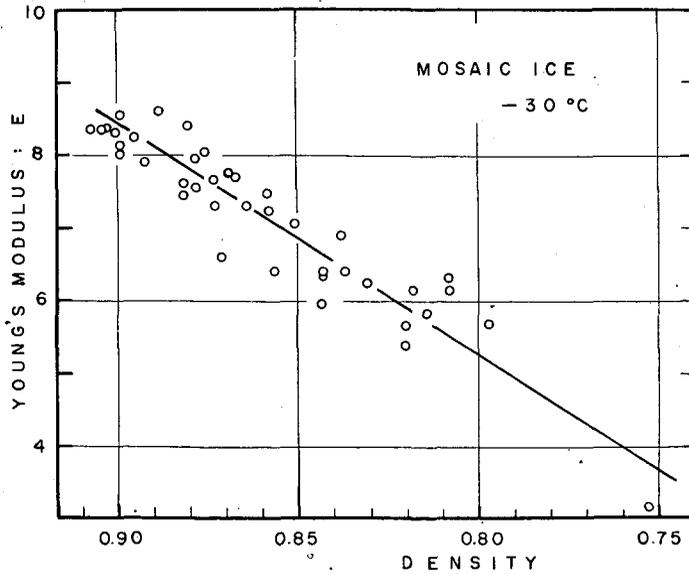


Fig. 5. The relation between Young's modulus of mosaic ice and density at  $-30^{\circ}\text{C}$ .

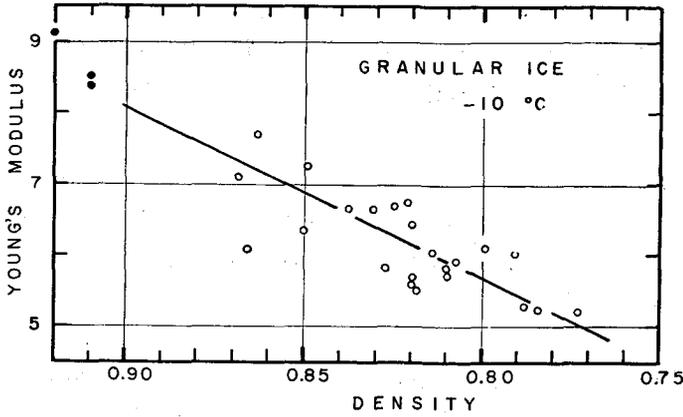


Fig. 6. The relation between Young's modulus of granular ice and density at  $-10^{\circ}\text{C}$ .

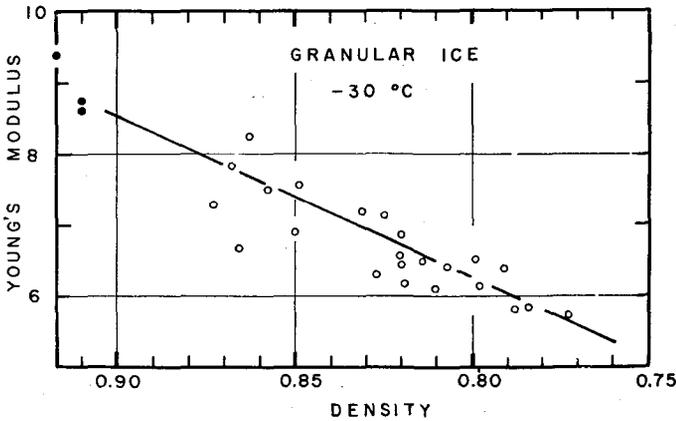


Fig. 7. The relation between Young's modulus of granular ice and density at  $-30^{\circ}\text{C}$ .

たのが図中の実線であり、Fig. 4 と Fig. 5, Fig. 6 と Fig. 7 では実線は夫々互にほぼ平行であり、それらの実線の間隔は夫々 (2), (3) 式であらわされている。このような直線をいろいろの温度で画いてみると、(2), (3) 式であらわした関係が正しいことがわかる。

Fig. 4, 6 の実線を用いると、 $-10^{\circ}\text{C}$  では弾性率と密度： $\rho$  のあいだには次の関係があることがわかる。

$$E = 8.5 - (0.917 - \rho) 32.3 \quad \text{Mosaic ice} \quad (4)$$

$$E = 8.5 - (0.917 - \rho) 24.0 \quad \text{Granular ice} \quad (5)$$

ただし、これらは  $0.91 \geq \rho > 0.75$  に対して用いられる。この式ではのちに述べる海水の平均の密度 0.926 に対しては  $E = 8.8$  となり、Fig. 4, 5 に記入した純水の弾性率、とほぼひとしくなるが、そのことだけで純水の弾性率とブラインを含んでいる海水の弾性率を結びつけて論ず

るわけにはいかない。

右辺の第2項は弾性率の密度特性をあらわしており、(2), (3)式と夫々組合せることによつて、種々の温度における海水の弾性率と密度の関係を示す式が得られることは明らかである。

同じ方法で弾性率を求めた前報では<sup>1)</sup>、弾性率と海水中の純水の体積率との関係を示した。これは密度と弾性率の関係と良く似ているが、ブラインの体積が急に多くなる  $-10^{\circ}\text{C}$  以上の温度に対しては体積率を用いたほうが弾性率との関係がより簡単に表わされるという長所があつた。しかし、実用的には海水の密度をそのまま用いた方が便利なので、この報告では海水中の純水の体積率をあまり用いなかつた。

密度は確かに海水の弾性率に大きな影響を与えておりそれらの間の関係が明らかになつたが、Fig. 4~7 でわかるように同じ密度、同じ温度の場合でも海水の弾性率は必ずしもひとしくなくて、場合によつては25%もちがう。このバラッキの原因を知るために、ほぼひとしい密度、同じ温度でしかも弾性率が異なつている例をえらびだして、測定周波数、ブラインの体積その他との関係をしらべてみた。

## V. 弾性率と共振周波数・ブラインの体積・グレインの大きさ

### 共振周波数

別表に示したように、筆者の測定では共振周波数は mosaic ice の大多数の試料では、280~425 cycle, granular ice では 255~340 cycle にわたつている。氷の弾性率は振動の周波数によつてことなることが知られており、黒岩、山地<sup>2)</sup>は雪と市販の氷について、中谷<sup>3)</sup>はグリーンランドの氷冠の氷について弾性率の周波数特性を測定しているが、海水では周波数のちがひによつて弾性率がどのようにかわるかを吟味してみた。Fig. 8 は試料の長さ是一定にして厚さを少しずつ薄くしながらその時々共振周波数から弾性率を求めた測定のいくつかの例である。図中の実線は mosaic ice, 破線は granular ice についての結果である。周波数の低いほうの測定が少ないが、300 cycle 以上では周波数のちがひは弾性率に殆んど影響を与えていないことがわかる。300 cycle 以下では、周波数の減少に伴つて弾性率が大きくなるような傾向がみ

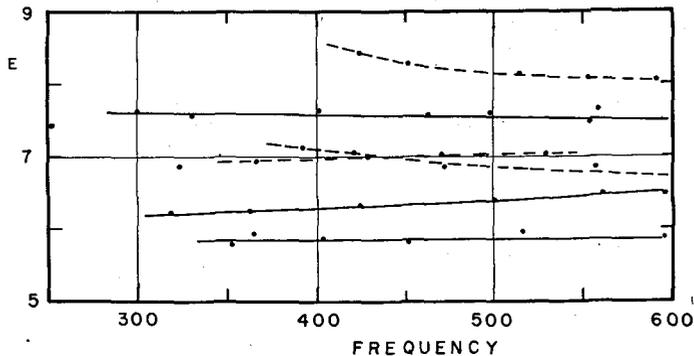


Fig. 8. The frequency dependency of Young's modulus.

らたものがあつた。中谷が小気泡を含む氷で求めた結果によると、300 cycle 以下でも周波数によつて殆んど弾性率のかわらないものもあるし、又、300 cycle から 200 cycle まで周波数がかわつたときに弾性率が 5% 位増加した例も報告されている。中谷の測定と、Fig. 8 から、海氷でも測定された周波数の範囲では 5% 位の誤差を許せば弾性率に対する周波数の影響は殆んどないと見做すことができよう。

**ブラインの体積及びグレインの大きさ**

温度と密度が殆んどひとしい場合の海氷の塩素量及びグレインの大きさと弾性率の関係を示したのが Fig. 9, 10 である。此所でグレインとは光学的にはほぼ同じ性質を示す部分をひとつ

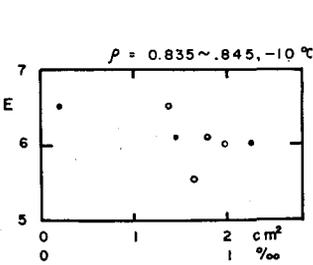


Fig. 9. (a) The relation between Young's modulus of mosaic ice and chlorinity (○) and grain size (●).

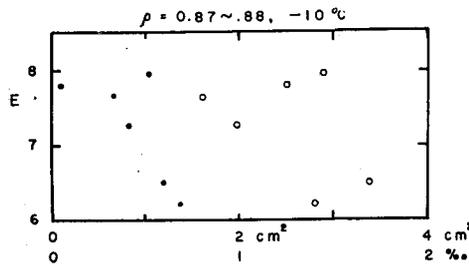


Fig. 9. (b)

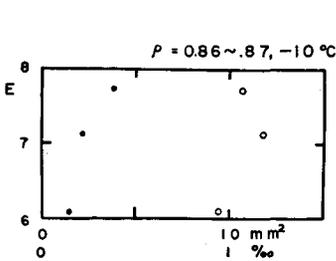


Fig. 10. (a) The relation between Young's modulus of granular ice and chlorinity (○) and grain size (●).

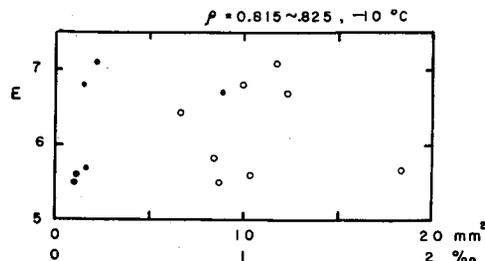


Fig. 10. (b)

のグレインと名付けて、その面積は 30 個以上のグレインを平均して求めた。温度がひとしい場合には、海氷中のブラインの体積は氷全体の塩素量に比例するので、これらの図はブラインの体積と弾性率を比較したものともみることできる。Fig. 9 は mosaic ice, Fig. 10 は granular ice である。密度が ±0.05 の範囲にあつて弾性率が可成りちがう例が少ないので、両者のあいだの量的な関係は良くわからないが、次のような傾向があるようである。

Fig. 9 即ち, mosaic ice では、グレインが大きくなるにつれて弾性率が小さくなり、ブラインの体積が多くなつても弾性率が小さくなる傾向がある。granular ice では、グレインが大

きくなると弾性率が増すような傾向があるが、ブラインの体積との関係ははつきりしない。mosaic ice で、海水中のブラインの体積が増すと弾性率が小さくなることは、第3節で述べたことと一致する。

(2, b), (3, b) 式の右辺の第3項は  $-20^{\circ}\text{C}$  以上での弾性率の著しい低下をあらわす項で、これはブラインの体積がふえるためにおこると考えられることはすでに述べた。Assur<sup>5)</sup> は Thompson, Nelson<sup>6)</sup> の測定結果にもとづいて、各温度におけるブライン中の各イオン別の重量を求めている。更に 3y6ob<sup>7)</sup> の求めた海水の平均密度: 0.926 を用いて各温度におけるブラインの体積を算出し、それが温度の指数関数であらわされることを指摘している。Fig. 11 の実線は Assur の表から求めた塩素量 1% の海水の各温度におけるブラインの体積 (%) を示す。図から、ブラインの体積:  $\nu\%$  は近似的に次の式であらわされる。

$$\left. \begin{aligned} \nu &= 7.3 t^{-0.84} & -2 \geq t \geq -22^{\circ}\text{C} \\ \nu &= 10.8 \left( \frac{t}{10} \right)^{-3.6} & -22 \geq -t \geq -50^{\circ}\text{C} \end{aligned} \right\} (6)$$

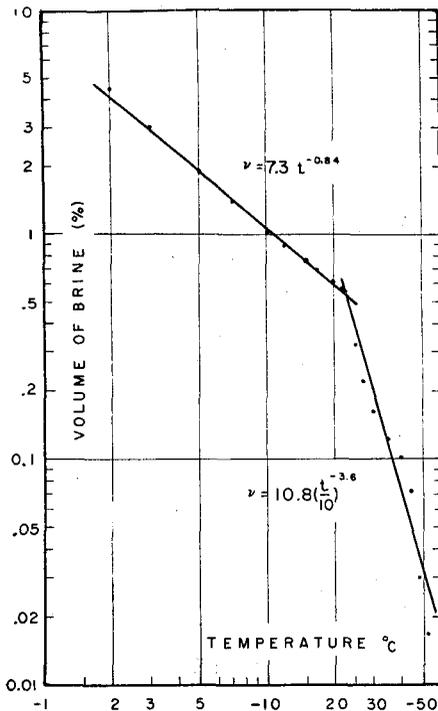


Fig. 11. The relation between the volume of brine (%) in sea ice of 1% chlorinity and temperature.

弾性率の温度係数を示す (2), (3) 式と (6) 式を比較してみると、温度が下るにつれて、 $-22^{\circ}\text{C}$  以上ではブラインは指数関数的に減少し弾性率は対数曲線的に増しているのがわかる。 $-22^{\circ}\text{C}$  以下では前者は指数関数的に減少して、後者は直線的にふえている。即ち、 $-22^{\circ}\text{C}$  を境にしてブラインの体積と弾性率の関係が異なっている。このことから、海水の弾性率は純水の弾性率の温度係数とブラインの体積のみでは説明されないことがわかる。おそらく、固体の塩にも関係するのであろう。そのほかに、mosaic ice と granular ice で温度係数が違うことから構造にも関係すると考えられることは既に述べた。

海水の弾性率は純水のそれとブラインの体積のみでは説明されないことは明らかになったが、ブラインの体積が増すと弾性率が小さくなることはうたがいない。グレインの大きさと弾性率の定量的な関係はよくわからないが、等しい温度と密度をもっている海水相互のあいだの弾性率のちがいは実用的にはブラインの体積の多少と、グレインの大きさの違いによつてほぼ説明されるであろう。

#### 海水の弾性率をあらわす式

以上で海水の弾性率は主にその温度と密度によつてきまり、同じ温度と密度でもブライン

の量の多少によつていくらかかわることがわかつた。後者の影響は筆者の用いた塩素量の少ないたがってブライン体積の少ない氷ではあまり大きくないので、実用的には密度と温度を用いて弾性率をあらわしても充分である。あまり塩分の多くない海水の弾性率は (2), (3) 式と (4), (5) 式を総合して、 $-3\sim-50^{\circ}\text{C}$  の範囲では次の式で与えられる。

Mosaic ice

$$E=32.3\rho-20.7+0.014t \quad -20^{\circ}\text{C} \geq -t \geq -50^{\circ}\text{C} \quad (7, a)$$

$$E=32.3\rho-20.7+0.014t-0.59 \exp(-0.0129t^2) \quad -3^{\circ}\text{C} \geq -t \geq -20^{\circ}\text{C} \quad (7, b)$$

Granular ice

$$E=24.0\rho-15.4+0.017t \quad -20^{\circ}\text{C} \geq -t \geq -50^{\circ}\text{C} \quad (8, a)$$

$$E=24.0\rho-15.4+0.017t-2.0 \exp(-0.279t) \quad -3^{\circ}\text{C} \geq -t \geq -20^{\circ}\text{C} \quad (8, b)$$

但し、 $t$  は温度の絶対値、 $\rho$  は密度で  $E$  は  $\times 10^{10} \text{C}\cdot\text{G}\cdot\text{S}$  で得られる。前報で  $-10^{\circ}\text{C}$  以下の温度に対して海水の密度と弾性率との関係を与えた式は (7, a) 式と少し違うが、新たに測定した結果を加えた (7, a) 式の方が一般的であることはいうまでもない。

これらの式の右辺の第3項と第4項の温度のかわりにブラインの体積あるいは同体の塩の量などを持ち、その上、氷の構造に関する項を入れて (7), (8) 式を取りまとめることは可能であるとおもわれる。然し、そのためには、現在の測定では不十分なこと申すまでもない。

### VI. 海水中の弾性率の垂直分布

以上に述べた測定に用いた試料は、紋別港内の軟氷 (young ice) (氷厚約 17 cm) から切り出して保存してあつた大きな氷塊から切り取つたものである。試料の厚さは 2~3 cm で、氷板の上から下までを 5~6 層に分けて切りだしたものが多し。したがつて実測した弾性率から氷板中の弾性率の垂直分布を知ることができる。

海水の弾性率は温度によつてかわり、海水中の温度分布も常に変化しているので氷中の弾性率の分布も一定ではない、Fig. 12 は  $-15^{\circ}\text{C}$  のときの氷中の弾性率の垂直分布である。温度分布が一様であつても垂直分布は可成り変化している。

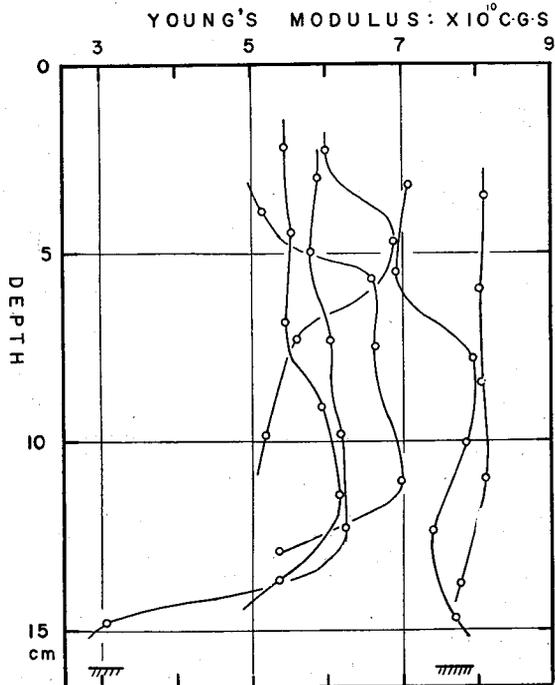


Fig. 12. The vertical distribution of Young's modulus in sea ice at  $-15^{\circ}\text{C}$ .

図中の2つの曲線について試料採取時に現場で観測された温度の垂直分布に対する弾性率の分布を示したのが Fig.13である。弾性率の分布の温度変化に原因するちがひよりは、氷の性質のちがいによる弾性率のちがひの方が大きいことがわかる。殊に氷の下面近くでは温度の変化が少ないのでこの傾向は著しい。又、下層は常に結氷温度に近いので、盛氷期にある氷板では、下層の弾性率が小さいことは容易に考えられ、図の結果もそれを示している。ただし、注意しなければならないのは、この図に示した結果は低温室に長時間保存しておいたためにブラインが脱落して塩素量が非常に少なくなつた氷について測定されたものであることである。現場においては、海水の特に下層部でブラインの占める体積が非常に大きい。測定時にはすき間が多く、したがって密度も小さかつたが、すき間にブラインが入つていれば密度が大きくなるが又一方、ブラインが多くなれば弾性率は減少する筈である。

ブラインの脱落がなるべく少ない状態での弾性率のいくつかの測定を1959年2月紋別港で行つた。当時、気温が高くて、厚さ約15cmの氷はほとんど結氷点に近かつた。切りだしたばかりの氷では試料の振動を駆動及び検出するための鉄板をはりつけることができなかつたので、数時間以上放置したのちに測定を行わざるを得なかつた。その結果は Fig.14 に示してある。測定時の氷温は一つの測定では $-3.3^{\circ}\text{C}$ 、他のは $-5.6^{\circ}\text{C}$ であつた。弾性率の値は可成り小さく、しかも全層にわたつてあまり変化していないが、前節までにのべた測定結果よりは現場での値に近いであろう。この氷板については、石田<sup>9)</sup>が水中の弾性波の速度を測定し、その結果から弾性率を求めて $2.9 \times 10^{10}$  C.G.Sを得た。石田の得た値は図の値よりやや小さいが、ほぼ一致している。残念なことに氷中の塩素量の測定を行わなかつたが、ブラインの体積は前節までにのべた測定に用い

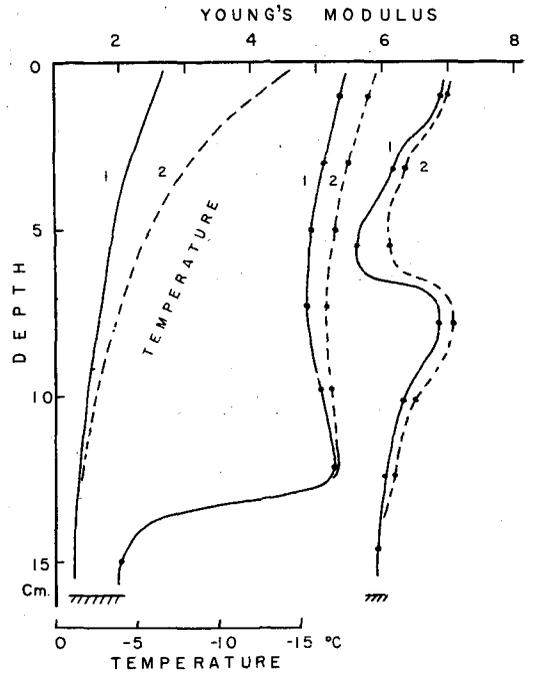


Fig. 13. The vertical distribution of Young's modulus in sea ice.

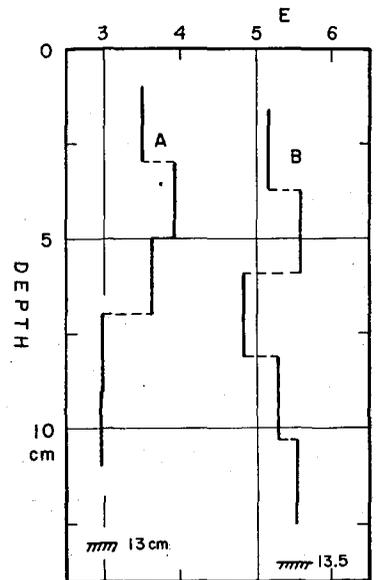


Fig. 14. The vertical distribution of Young's modulus in sea ice at Monbetsu.

た試料よりは可成り多いとおもわれる。氷の全層にわたつて弾性率があまり変らなかつたことは、弾性波の速度の測定の際に好都合であつた。

## VII. む す び

塩素量の少ない海氷から切りだした試料の撓み振動法による弾性率の測定を  $-3^{\circ}\sim-52^{\circ}\text{C}$  の範囲で行い、すでに報告した結果も含めて、海氷の弾性率の傾向を確かめることができた。海氷を mosaic ice と granular ice に分けてその各々について

1) 弾性率は注意してみると、ブラインから新たな塩が析出しはじめる温度で即ち  $-8^{\circ}\text{C}$  と  $-22^{\circ}\sim-23^{\circ}\text{C}$  附近で急に変化する。

2) 温度を下げると弾性率がふえるが、 $-20^{\circ}\text{C}$  附近までは対数的に増し、それ以下ではほぼ直線的に増加する。しかも、その弾性率の増し方  $\frac{\Delta E}{\Delta t}$  は、弾性率の絶対値の如何にかかわらず温度のみできまり、(7), (8) 式の右辺の第 3 項以下であらわされる。

3) 以上のことは逆に温度の低いほうからみれば、 $-20^{\circ}\text{C}$  ぐらゐまでは弾性率は直線的に減少するが、それ以上の温度ではその直線的減衰率に対数的減衰率を加えただけ減少し、それはブラインの体積がふえることに大いに関係するがそれだけでは説明されない。

4) 海氷の弾性率は温度がひとしい場合には、ほぼその密度に比例し、両者の関係は (4), (5) 式であらわされる。

5) 同じ温度、密度の場合でも海氷の弾性率は必ずしもひとしくない。これは主として試料によつて塩素量すなわち氷中のブラインの量がちがうことによるものとおもわれる。グレインの大きさによつても弾性率はいくらかかわるような傾向があるがまだよくわからない。

近いうちに、もつと塩素量の多い海氷について弾性率の測定を行つて、ブラインの体積とその増減及び固体の塩が弾性率におよぼす影響とその物理的機構を確かめたいとおもつている。

終りにのぞみ、この実験にあたり有益な助言を下さつた低温科学研究所雪氷研究グループの皆様には謝意を表します。試料の採取、現場での実験にいろいろと御援助、御便宜を与えていただいた紋別市漁業協同組合、紋別市役所、紋別海上保安署に厚く御礼申し上げます。

なお研究に要した費用の一部は 文部省特別研究費 (沿岸海氷の物理的性質の研究) によつた。

## 文 献

- 1) 田畑忠司 1958 海氷の力学的性質の研究 II. 振動法による弾性率の測定. 低温科学, 物理篇, **17**, 135.
- 2) 田畑忠司 1959 海氷の力学的性質の研究 IV. 内部摩擦の測定. 低温科学, 物理篇, **18**, 131.
- 3) 黒岩大助・山地健次 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.  
同 上 1956 同上. II. 低温科学, 物理篇, **15**, 43.  
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.
- 4) Nakaya, N. 1958 Visco-elastic properties of snow and ice in Greenland ice cap. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. II (Physics), **5**, No. 3, 119.

- 5) Assur, A. 1958 Composition of sea ice and tensile strength. "Arctic Sea Ice" Publication 598, NAS-NRC., U. S. A., 106.
- 6) Thompson, T. G. and K. H. Nelson. 1956 Concentration of brines and deposition of salts from sea water under frigid conditions. Amer. J. Sci., 254, Apr., 227.
- 7) Зубов, Н. 1945 Льды Арктики. Издательство Главсевморпути, Москва 125.  
(低温科学研究所訳, 北氷洋の水, 第5章, 海水の物理的・化学的性質, 32).
- 8) 石田 完 1959 海水中の弾性波の測定. 低温科学, 物理篇, 18, 157.

### Résumé

In the previous paper "Studies on Mechanical Properties of Sea Ice. II. Measurement of Elastic Modulus by the Lateral Vibration Method" the author reported from the obtained elastic modulus the simple relations which connected the elastic modulus to the temperature, density and volume of pure ice (%). Measurements were carried out at various temperatures between  $-4^{\circ}\text{C}$  and  $-36^{\circ}\text{C}$  for each 20 samples.

After the conclusion of the previous experiments, some measurements of elastic modulus of sea ice using the same method were carried out. In this experiment, elastic moduli of 39 samples were measured at various temperatures between  $-3^{\circ}\text{C}$  and  $-52^{\circ}\text{C}$ .

In the present paper, the results of the above measurements are all described.

Obtained elastic moduli for some samples at various temperature are shown in Figs. 1 and 2. Elastic modulus of each sample is increased slightly but they are almost parallel to each other with the decrease of temperature. Remarkable changes of temperature dependency are noticed at the temperatures of about  $-8.2^{\circ}\text{C}$  and  $-23^{\circ}\text{C}$ , where  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  are crystalized respectively from the brine. Taking the average of all data the curves in Fig. 3 are obtained; equation (3) shows the mean temperature dependency of elastic modulus of sea ice. It is noticed that elastic modulus decreases rapidly when the temperature rises above  $-20^{\circ}\text{C}$ . Relations between elastic modulus and density are shown in Figs. 4~7. The points are scattered over a wide range showing the elastic moduli decrease linearly with the decrease of density. The general tendency for the elastic modulus of sea ice to be a linear function of the density; these relations are shown as formulae (4) & (5). If one is satisfied with the accuracy of 5%, the elastic modulus of sea ice is expressed as formulae (7) and (8), by combining the formulae (2) and (4) for mosaic ice or (3) and (5) for granular ice, respectively.

Although the elastic modulus of sea ice is depend mainly upon temperature and density of the ice, obtained values are scattered in a wide range even in the cases of the same temperature and density. Figs. 9 & 10 show the relation between elastic modulus and chlorinity ( $\%$ ) or grain size ( $\text{cm}^2$  or  $\text{mm}^2$ ). For mosaic ice, it is seen that the elastic modulus decreases with increasing chlorinity and grain size. In granular ice also, the elastic modulus decreases as grain size increases. At a certain temperature, the volume of brine is a linear function of chlorine content. Therefore, it may be recognized that the elastic modulus decreases with increases in the volume of brine. The volume of brine is represented as a power function of temperature as was suggested by A. Assur,<sup>5)</sup> and is seen in Fig. 11 and in formula (6) which represent volume of brine

(%) in sea ice of 1‰ chlorinity.

The 2nd and 3rd terms of the right side of formulae (2) & (3) may be represented as a function of volume of brine and deposited salt. However, in the present paper, temperature dependency of the elastic modulus could not be represented as a function of volume of brine and other elements.

Vertical distributions of the elastic moduli in ice sheet were obtained as shown in Figs. 12~14.