



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海氷の力学的性質の研究 I : 海氷の静的粘弾性について
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi; 小野, 延雄 他
Citation	低温科学. 物理篇, 17, 135-145
Issue Date	1958-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17950
Type	departmental bulletin paper
File Information	17_p135-145.pdf



海水の力学的性質の研究 I*

海水の静的粘弾性について

田畑忠司 小野延雄

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和33年7月受理)

まえがき

海水の静的粘弾性の研究は、筆者の一人田畑によつて数年前から続けられ、すでに1955年¹⁾と1956年²⁾に報告を行つてきた。1956年、Butkovich³⁾は円柱状試料(コア)の圧縮から海水のヤング率を求めている。田畑は、平らに張りつめた氷板上に両端もしくは一端を固定した氷の棒を作り、荷重を加えた時の曲げから粘弾性の性質を調べた。又、海水から切りだしたコアについて圧縮による粘弾性の性質の測定もおこなつた。それらの時間・歪曲線を調べた結果、海水は Rheology でいう Maxwell-Voigt Body (Maxwell unit と Voigt unit を直列につないだもの)として近似され、そのヤング率と粘性係数が、それぞれ 10^9 dyne/cm², 10^{10} dyne·min/cm² 程度であることを示した。

しかし、結氷上で行われる氷の棒の曲げによる測定は、風やうねりの影響を強く受けるので、風の弱い日が選ばれ、わずかの測定しか得られていない。1958年2月にも北海道オホーツク海沿岸の紋別市の港内で、同様の測定を行つた。

コアの圧縮による方法も結氷点に近い温度での測定しか行われていなかったもので、低温実験室内で測定温度範囲をひろげて粘弾性係数の温度特性を調べてみた。それ等の測定の結果について報告する。

I. 海水の棒の弯曲による方法

すでに田畑が報告したように、平らな氷に平行に鋸の目を入れて両側約10cm程の氷を除き、巾40cm、長さ約4mの両端を固定された氷の棒を作つた。氷の棒の中央に荷重を加えた時その中央における沈下量を周囲の氷にたいして測定した。沈下量の測定は、不動氷に木製の台を置いて氷の棒の上をわたし、それから錘をつけた鋼鉄棒をおろしてその沈下量を拡大記録した。拡大装置としては、気象測器の自記空盒気圧計に用いられている拡大記録装置(拡大倍率約100倍)をそのまま利用した。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第456号

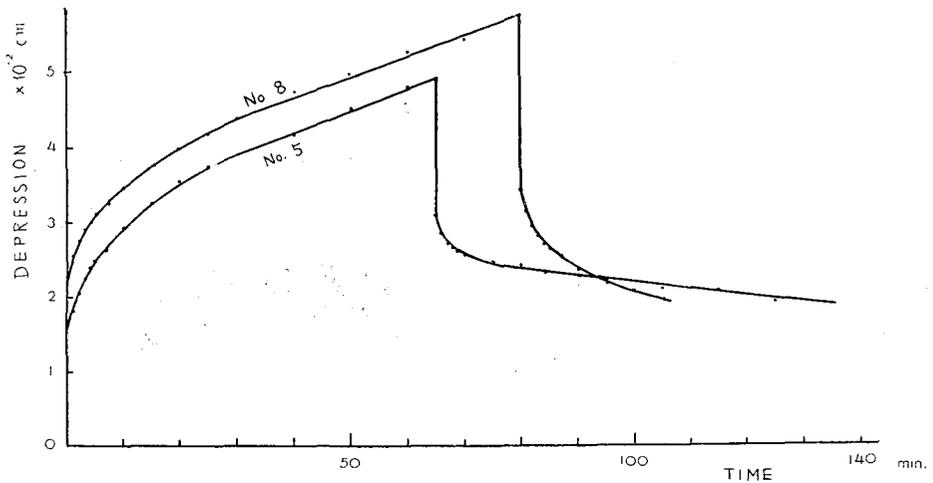


Fig. 1. Depression-time curves of sea-ice.

得られた時間・歪曲線の例を Fig. 1 に示す。

すでにのべたように、海氷の時間・歪曲線は、ほぼ Maxwell-Voigt model であらわされるようなかたちを示す。すなわち、荷重を加えた瞬間にまず弾性歪が見られ、ひきつづいて弾性と粘性による変形が起る。そして時間・歪曲線は

$$\epsilon = \frac{p}{E_1} + \frac{p}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) + \frac{p}{E_1} \left(\frac{t}{\tau_1}\right)$$

であらわされる曲線で近似される。この式はヤング率 E_1 、粘性係数 η_2 の Maxwell unit と、ヤング率 E_2 、粘性係数 η_2 の Voigt unit とを直列につないだ Maxwell-Voigt model に、力を加えた時の model の歪の時間的変化をあらわしている。各 Unit において、ヤング率と粘性係

Table 1. Young's modulus

No.	l (cm)	b (cm)	d (cm)	Temp. (°C)	Cl (%)	E_1 (dyne/cm ²)	E_2 (dyne/cm ²)
1	297.5	48.9	15.4	—	1.47	3.3×10^9	3.8×10^9
2	299.0	50.3	15.4	-0.9	0.62	4.1	3.9
3	354.5	52.2	15.4	-0.8	1.45	5.8	18.8
4	352.5	48.3	16.5	-0.7	0.92	8.4	29.7
5	353.0	49.3	15.7	-1.3	0.93	8.1	9.2
6	352.0	38.8	16.3	-1.1	0.78	8.3	—
7	405.0	45.8	15.7	-1.4	2.53	5.3	—
8	404.5	44.1	16.5	-2.2	—	7.9	16.9
9	406.0	38.8	15.8	-1.5	3.03	4.8	6.4
10	353.5	40.5	15.6	-1.5	2.90	4.8	9.8

数との比が

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 E_1 &= \tau_1 \text{ (relaxation time)} \\ \eta_2 E_2 &= \tau_2 \text{ (retardation time)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。

棒の弯曲の場合には、長さ l 、巾 b 、厚さ d の氷の棒に重量 W の荷重を加えた時、氷の棒が両端を固定された一般の棒のようにたわむと仮定すれば、 p は $p = \frac{Wl^3}{16d^3b}$ であらわされる量であり、 ϵ は沈下量となる。加えた荷重量は、すべての場合 9.1 kg であつた。

測定された時間・歪曲線がこの式であらわされるとして、求めた $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2, \tau_1, \tau_2$ の値を Table 1 に示す。表には同時に氷の棒の長さ l 、巾 b 、厚さ d 、測定温度、塩素量、測定日時なども示してある。

得られた粘弾性係数の値は、1955 年、1956 年の値とも比較的良好一致していた。

II. 海氷の円柱状試料の圧縮による方法

圧縮装置はまえに田畑が用いたものを、そのまま実験機にとりつけて使用した。すなわち海氷から切り出した直径約 6 cm の円柱状試料(コア)を、両面を平行に仕上げた砲金製の筒の中に収め、上から圧力を加えた時の縮み量を、拡大して記録させる装置である。力は挺子によつて加え、試料に対する圧力が $4 \sim 5 \times 10^6$ dyne cm^2 になるように荷重した。記録の拡大装置は、二段の挺子を用いて 100 倍位に拡大し、1500~1000 mm の縮みまで測れるようになっている。拡大された縮み量は、シンクロナスモーターで駆動する一周 6 時間の自記円筒の、或いは気象測器に用いる一周 2 時間のゼンマイ式時計円筒に連続記録され、あとでその記録から読みとつた。

測定は、1957 年末と 1958 年 2 月および 6 月の 3 回にわけて行つた。1957 年末の測定は、その年の春、紋別附近で見られた流氷と紋別港内の結氷板からコア・ドリルで採つた試料を用

and viscosity of sea-ice.

η_1 (dyne min/cm ²)	η_2 (dyne·min/cm ²)	τ_1 (min)	τ_2 (min)	Date	
3.2×10^{11}	4.0×10^{10}	93.0	10.5	Feb. 9 '58	14.30~16.21
2.7	7.0	63.2	18.0	10	10.31~12.50
3.7	10.6	63.3	5.7	10	13.01~15.07
9.3	18.1	111.5	6.1	10	15.41~17.08
4.6	6.7	55.8	7.3	11	10.23~12.41
—	—	—	—	11	12.51~ —
—	—	—	—	11	15.52~14.47
6.0	15.4	77.0	9.1	12	10.03~11.55
5.5	18.3	113.0	13.0	12	12.03~13.38
5.1	12.6	104.6	12.9	12	14.00~17.15

いて、低温実験室内で行つたものである。1958年2月には、これ等の装置を紋別に運び、附近に坐礁している流水からコアを採つて測定した。その時持ち帰り低温室に保存しておいた紋別港内の結氷板について、低温実験室内で行つたのが6月の測定である。

従来、氷の両面は、木の枠を用いて平行になるように仕上げていたが、6月の測定の際は試料の体積と両面の平行性の精度を増す為、低温室内に持込んだ旋盤を用いて試料のコアを作製した。

圧縮を行つたすべてのコアは、中央部から薄い円板を切りとつて鉋で仕上げ、偏光による水平断面の写真を撮つて結晶の大きさを調べた。残りの部分は融かして塩素量を測定するのに用いた。塩素量の測定は Mohr の硝酸銀滴定法によつた。

測定から得られた時間・歪曲線は、Fig. 1 に示した曲げの場合と同様の変化を示している。従つてこの時間・歪曲線も、前述の(1)式および(2)式で近似することが出来る。この場合に、 ϵ はコアの単位長さ当りの縮み量、 p は単位断面積におよぼす歪力である。この式を用い

Table 2. Young's modulus

No.	l (cm)	r (cm)	w (gr)	ρ (gr/cm ²)	Cl (%)	Ice Content (%)	Crystal size*	Stress (dyne/cm ²)	Temp. (°C)
1	6.4	2.9	150	0.90	1.43	97	M	4.61 × 10 ⁶	-26
2	6.3	3.0	137	0.80	1.48	86	M	4.45	-27
3	6.0	3.0	146	0.89	1.44	96	M	4.45	-26
4	6.0	3.0	146	0.89	1.14	97	M	4.45	-15
5	6.0	2.9	130	0.84	1.27	92	S	4.76	-15
6	6.3	3.0	—	—	0.90	—	M	5.84	-24
7	6.4	3.0	157	0.88	0.55	94	M	4.35	-5
8	6.1	3.1	143	0.79	—	—	S	4.15	-2.5
9	5.9	3.1	146	0.84	0.48	90	M	4.15	-3
10	5.9	3.0	144	0.84	—	—	S	4.20	-2.2
11	5.9	3.0	151	0.89	—	—	S	4.26	-1
12	5.9	3.0	148	0.86	—	—	S	4.20	-3
13	6.0	3.0	—	—	—	—	S	4.20	-2.5
14	6.3	3.0	152	0.83	0.37	89	S	4.20	-4
15	6.1	3.1	159	0.83	0.50	89	S	4.65	-4
16	6.30	2.80	134	0.81	1.28	92	L	4.89	-18
17	6.29	2.93	150	0.88	1.27	94	L	4.46	-19
18	6.16	3.10	165	0.88	1.39	95	L	3.98	-17
19	6.08	3.03	156	0.88	1.60	94	L	4.17	-13
20	5.89	3.13	158	0.84	1.33	92	L	3.90	-13
21	6.40	3.02	154	0.83	1.00	89	L	4.21	-23

* Crystal size; L: Large, M: Medium, S: Small.

て求めた粘弾性係数の値を Table 2 に示す。表には試料の高さ l 、半径 r 、重さ w 、密度 ρ 、塩素量 Cl 、純氷率、結晶の大きさ、歪力 p 、温定温度、測定日、試料の種類等も示してある。表の中で測定温度は、氷の温度が殆んど気温に等しいことから気温を用いたが、測定中若干の気温の変動が見られた。表に示した温度は、加重時の温度である。

低温室内の低い温度と、紋別での比較的高い温度とによつて、 $-1^{\circ}C$ から $-27^{\circ}C$ にわたつて種々の温度での測定が得られたので、前報²⁾の値も加えて温度と粘弾性係数との関係を調べた。 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 のそれぞれについて、温度特性を示したのが Fig. 2~Fig. 5 である。図の中で \times 印で示したのは 1956 年²⁾の測定による値である。

海氷の構造は、目で見ただけでも一様でなく、気泡の多い所や短冊状薄片からなるモザイク状構造の箇所等を見わけることができる。海氷の構造については、すでに述べたように⁴⁾、海氷を 0.5~1 mm の厚さの薄片に削り、たがいに直交させた 2 枚の偏光板の間に入れて調べるのがよい。偏光で眺めると、C 軸のむきが同じと考えられる短冊状モザイク結晶の集まり

and viscosity of sea-ice.

E_1 (dyne/cm ²)	E_2 (dyne/cm ²)	η_1 (dyne·min/cm ²)	η_2 (dyne·min/cm ²)	τ_1 (min)	τ_2 (min)	Remarks	Date
1.5×10^9	5.5×10^9	6.6×10^{11}	15.2×10^{10}	244	28	ice floe '57	Dec. 3 '57
2.6	7.0	4.6	19.8	178	28	"	" 4
1.4	5.6	4.9	16.7	339	30	shore ice '57	" 4
0.6	7.8	4.8	19.5	852	25	"	" 7
0.4	6.1	3.4	15.4	840	25	ice floe '57	" 7
2.0	13.0	14.1	31.3	713	24	shore ice '58	Nov. 12 '57
—	7.3	2.0	7.2	—	10	ice floe '58	Feb. 7 '58
0.5	7.2	2.6	11.2	592	16	"	" 7
0.7	4.8	3.4	4.4	460	9	"	" 8
0.5	9.4	2.3	19.8	474	21	"	" 8
—	4.7	1.9	5.1	—	10	"	" 9
0.5	3.4	3.3	2.4	714	4	"	" 10
0.4	2.8	5.7	2.4	1482	9	"	" 12
0.4	4.0	6.6	3.3	1860	8	"	" 14
0.6	3.5	3.4	2.4	610	7	"	" 15
1.5	5.4	7.5	5.1	516	10	shore ice '58	Jun. 9 '58
1.3	7.4	10.3	11.3	838	15	"	" 11
1.6	4.7	9.4	4.7	585	10	"	" 12
—	2.9	7.5	1.5	—	5	"	" 20
0.7	3.7	4.9	2.9	689	8	"	" 21
—	6.4	10.4	8.5	—	12	"	" 28

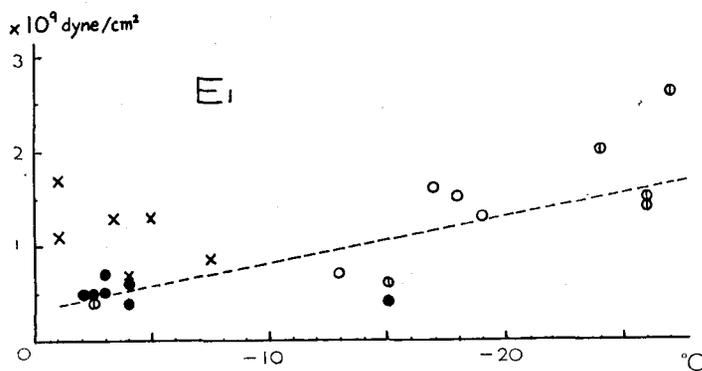


Fig. 2. E_1 versus Temp.

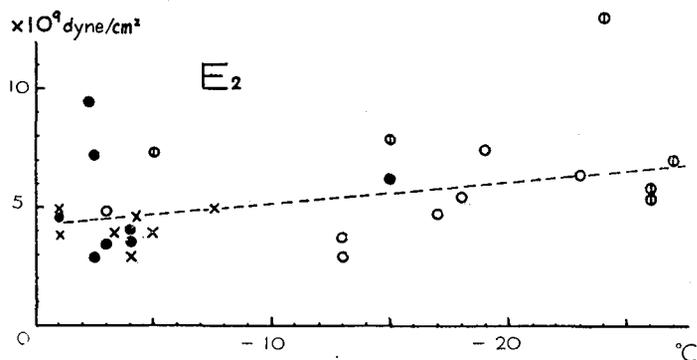


Fig. 3. E_2 versus Temp.

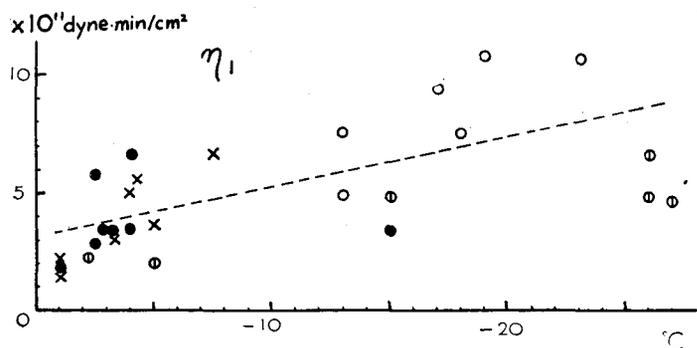


Fig. 4. η_1 versus Temp.

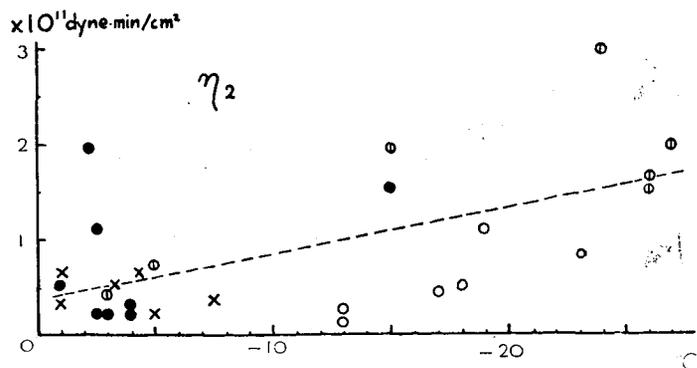


Fig. 5. η_2 versus Temp.

LEGEND: Crystal size
 ○ ... Large (L).
 ⊙ ... Medium (M).
 ● ... Small (S).
 × ... 1956 (not determined).

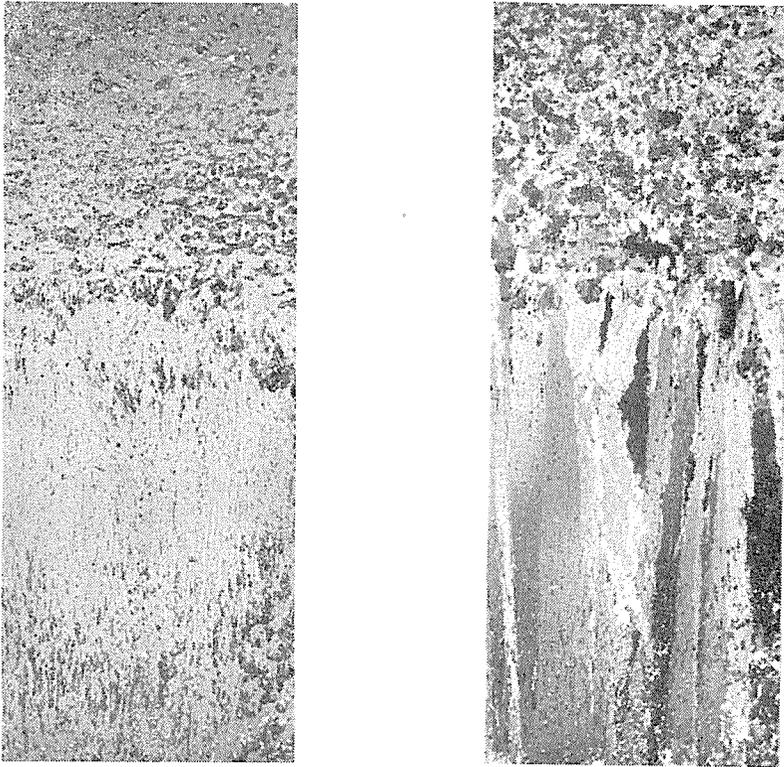


Fig. 6. Structures of young shore ice.
(Monbetsu '58, $\times 2/3$)

(grain) は、隣り合う別のグレインと色が違うので容易に見分けることが出来る。Table 2 で No. 16~No. 21 の試料に用いた港内の結氷は、ほぼ 15 cm の厚さをもち、その構造は Fig. 6 に示すようなものである。写真は垂直断面を示し、左側が透過光、右側が偏光による写真である。透過光では非常にすきまの多い下部の部分も、偏光でみると中央部からの結晶が続いて成長していることがわかる。しかし圧縮測定では、試料はその内部が出来るだけ一様である事が望まれるので、No. 16~No. 21 の測定に用いた試料は、すべて中央部の比較的すきまの少ない部分を選んだ。圧縮したコアの水平断面の偏光写真を撮つてみると、グレインの大きなものと非常に小さいものとがあつた。グレインの大きさは、その力学的性質にかなりの影響を与えていると考えて、グレインの大きさを、大きなもの L、小さなもの S、中間のもの M と三段階に分けてみた。L はグレインの大きさがその長い部分で 1 cm を越えるもので、1 cm 以下のものが多い試料は M として示した。又、S は結晶粒が 2~3 mm 以下の大きさで、浸潤氷と呼ばれ、氷の上に積つた雪が若干融けたり、海水が浸み出したりして凍つたものと考えられる。S の様な断面を持つた試料は、流水から採つたものに多かつた。これ等グレインの大きさを示す一例を Fig. 7 に示す。写真でグレインの大きな L の例は、Fig. 6 において下から約 13 の個

所の水平断面を示している。又、Fig. 2~Fig. 5には、このグレインの大きさの種類を符号を変えて示している。

Fig. 2 から Fig. 5 までの結果をみると、測定の際にはほぼ同じ温度で同じような構造の試料しか用いなかた為に、ある大きさのグレインのものについての温度特性を見ることが出来ないが、全体として温度が下るにつれて各粘弾性係数はともに増加の傾向にあることがうかがわれる。これ等の値は、1956年の測定値²⁾とはよく一致しているが Butkovich の求めたヤング率の値 ($-4.5^{\circ}\sim-16^{\circ}\text{C}$ で $7.7\sim 8.4\times 10^4$ dyne cm^2) より一桁小さい。

III. 測定結果の考察

海氷の構造のその力学性質におよぼす問題には、グレインの大きさのほか、海氷に含まれているブラインや空隙の量などがあげられる。海氷の中のブラインは、温度が下がると氷を析出して濃度を増し、温度が上がると氷が融けて濃度を減らす。その濃度は、温度を決めると、ある定まった値をとることが知られている³⁾。それ故、氷を融かして測った塩素量から逆に測定温度におけるブラインの量を計算することが出来る。その結果、Table 2 に示した程度の塩素量では、ブラインの占める体積は多く見積つても 2% を越えないことがわかった。

一方、ブラインの量がわかると、実測した密度と理論的に求めた空隙を含まない純氷の密度との違いから、気泡の部分の体積を求めることが出来る。こうして得られたブラインと空隙を除いた体積、すなわち海氷における氷の占める体積を純氷率として求め Table 2 に記入した。これから空隙は全体積の数%から 10% 位を占めていることがわかる。

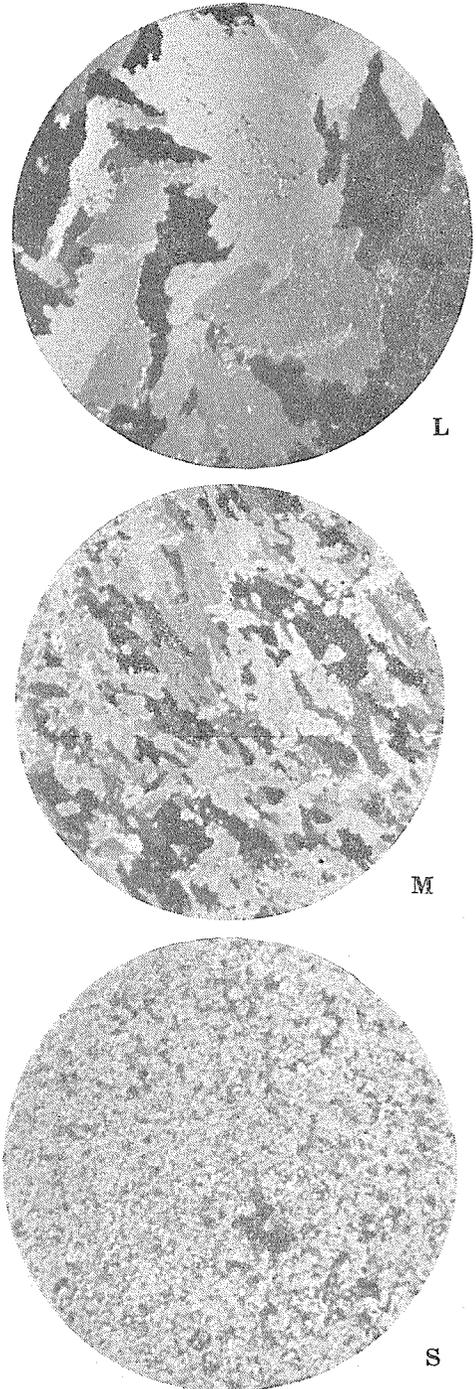


Fig. 7. Crystal grain size.
(horizontal section, $\times 1$)

純氷率と粘弾性係数の関係を調べてみると、測定が種々の温度で行われている為に、そのまま比較することは出来ないが、あまり顕著な関係は見られなかつた。

筆者の一人田畑が、海水から切り出した角棒を用いて振動法で求めた結果⁶⁾によると、海水のヤング率として 10^{10} dyne/cm² の値を得ている。これは圧縮法から求めた値よりほぼひと桁大きい。曲げの場合においても同様に、石田⁷⁾が張りつめた港内結氷上で音波の伝播速度から求めた値 (5×10^{10} dyne cm²) より、約ひと桁小さくなっている。この違いは、一般に静的方法と動的方法との違いによる考えられる差よりも大きい。

空隙が数%から10%も含まれているコアの圧縮の場合には、空隙の存在のために、ある断面において力を受ける面積はその全断面積より常に小さい。従つて実際の歪力 ρ はある部分において計算値よりも常に大きい。しかし、空隙がかなり一様に分布しているので、これだけではひと桁にも達する違いを説明することは出来ない。空隙が含まれていると、圧力を加えた瞬間に内部の歪力の分布は一様ではない。Fig. 6にも見られるように、海水の短冊状構造が必ずしも垂直でないので、特に空隙の周辺では、短冊状薄片は圧縮による縮みのほかに極くわずかながら曲げによる変位を起すことが予想される。その為、曲げの起らない場合の縮み量よりも大きな歪み量が記録され、各粘弾性係数の値が小さくなつていと考えられる。前報²⁾において、田畑は試料のC軸、すなわち短冊状薄片に垂直な軸と、加えた力の間の角度を色々と変えて圧縮測定を行なつた。その際、短冊状薄片が垂直から水平にねてくるに従つて、各粘弾性係数の値が小さくなつていく結果が得られたことは、この考えを裏付けるものである。

曲げの場合については、Fig. 6に示したように、海水が数多くの空隙を持ち、特に表面や下面附近では非常に多くの空隙がある。福富・工藤等⁸⁾によると氷の下面では純氷の占める体積は僅か60~70%にすぎない。それ故、曲げに対して表面及び下面では殆んど無抵抗であると考えられる。したがつて、氷厚としては実測の d の値よりずっと小さい値をとるべきだという事になる。又、このように考えると、ほぼ垂直にならんだ小さい短冊状薄片からなり、そのすきまにブラインを含んだ海水のような構造のものが、荷重を加えたとき、はたして一般の棒のようなたわみを起すかどうかとも問題となる。

Fig. 1には、ある時間荷重を加えたのちに荷重を取り去つたときの氷の棒の沈下の回復の曲線も同時に示してある。この図に見られる荷重を取去つた時の時間・歪曲線は、Maxwell-Voigt modelに歪力を加え取去つたときの曲線とあまりよく一致しない。又、コアの圧縮の場合にも同様の傾向がうかがわれた。

以上掲げたいくつかの問題点について、今後更に測定や検討を加えていきたいと考えている。

結 語

海水の棒の曲げおよび切りとつたコアの圧縮の時間・歪曲線から、海水の力学的性質をMaxwell-Voigt bodyと見做して粘弾性係数を求めた。又、粘弾性係数の温度特性を調べた結

果、 -1°C から -27°C の範囲において、温度が下がると各係数とも増加の傾向にある事がわかった。粘弾性係数の値は、 $E_1=10^9\sim 10^{10}$ dyne cm^2 , $E_2=10^9\sim 10^{10}$ dyne cm^2 , $\eta_1=10^{11}\sim 10^{12}$ dyne \cdot min cm^2 , $\eta_2=10^{10}\sim 10^{11}$ dyne \cdot min cm^2 であつた。

このヤング率の値は、振動法及び音波の伝播速度から求めた値 ($10^{10}\sim 10^{11}$ dyne cm^2) より約ひと桁近く小さい。この点について若干の定性的な考察を試みた。

この問題及び海水の構造がその力学的性質におよぼす影響については、今後更に研究を行ないたいと考えている。

試料の採取及び測定に際しては、紋別漁業協同組合、紋別市当局、紋別海上保安署、北海道開発局紋別港湾修築事務所等の御便宜を得た。この研究に要した費用の一部は、文部省特殊研究費 (海水の研究) および科学研究費 (沿岸海水の物理的性質に関する研究) に依つた。又、楠宏・石田完・鈴木義男各氏には種々の御協力御教示をいただいた。ここに厚く感謝致します。

文 献

- 1) 田畑忠司 1955 海水の粘弾性係数の測定. 低温科学, 物理篇, **14**, 25.
Tabata, T. 1955 A measurement of visco-elastic constant of sea ice. J. Oceanogr. Soc. Japan, **11**, No. 4. 1.
- 2) 田畑忠司 1956 海水の粘弾性の研究. 低温科学, 物理篇, **15**, 101.
- 3) Butkovich, T. R. 1956 Strength studies of sea ice. S.I.P.R.E. Research paper **20**.
- 4) 田畑忠司・小野延雄 1957 海水の構造について. 低温科学, 物理篇, **16**, 197.
- 5) Zubov, N. N. 1945 L'dy Arktiki (北氷洋の氷). Izd. Glavsevmorputi, Moskva.
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**, 227.
- 6) 田畑忠司 1958 海水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**, 149.
- 7) 石田 完 1958 海水中の音速度. 低温科学, 物理篇, **17**, 99.
- 8) 福富孝治・斎藤光郎・工藤義夫 1953 海水の研究 (第16報). 海水の組成, 特に氷殻における純水率と短冊状氷片, 氷片集塊について, 低温科学, 物理篇, **9**, 113.

Résumé

Measurements of visco-elastic constants of sea ice, by static loading methods, were performed in the cold room of the Institute in December 1957 and June 1958, and at Monbetsu located on the Okhotsk sea coast of Hokkaido in February 1958. Two kinds of methods were used for measurements: the one is the bending of a floating ice bar (about 4 m in length, 40 cm in width and about 15 cm in thickness) under static loading (weight of load 9.1 kg), and the other is the compression of ice cores sampled from various kinds of sea ice (6 cm in diameter, 6 cm in length, and stress applied are 4~5 dyne/cm²).

Fig. 1 shows examples of depression-time curve obtained by method of bending of ice bar. As was reported in the writer's previous paper, this curve is analogous to that

obtained by Maxwell-Voigt model. Therefore, visco-elastic constants are calculated from formulae (1) and (2) in the text. Obtained visco-elastic constants were shown in Table 1 (bending of ice bar) and 2 (compression of ice cores). Using data of compression test, relations between visco-elastic constants and temperature are shown in Figs. 2~5. From these figures, it is obvious that visco-elastic constants increase slightly as the temperature decreases. In this experiment, however, the relation between visco-elastic properties of sea ice and its crystal structure is not distinguished.

Approximate values of visco-elastic constants obtained from static loading experiments were $E_1=10^9\sim 10^{10}$ dyne/cm², $E_2=10^9\sim 10^{10}$ dyne/cm², $\eta_1=10^{11}\sim 10^{12}$ dyne·min/cm², $\eta_2=10^{10}\sim 10^{11}$ dyne·min/cm². These elastic constants were much smaller than those obtained by means of vibrational method. A tentative explanation was given to this discrepancy attributing to the fairly large deformation due to bending of ice plates of crystals under static loading.