



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海氷の粘弾性の研究
Author(s)	田畑, 忠司; TABATA, Tadashi
Citation	低温科学. 物理篇, 15, 101-115
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17916
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p101-115.pdf



海氷の粘弾性の研究*

田畑忠司

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和31年8月受理)

まえがき

筆者は数年前より、海氷の粘弾性係数の測定を行なつて来た¹⁾。その方法は、海に張りつめたままの氷に鋸の目を平行に入れて、両端若しくは一端を固定した氷の棒を作り、その棒に荷重を加えた時の時間—歪曲線より粘弾性係数を求めるというものであつた。昨年迄に行なつた測定では歪の測定に Optical lever や dial gauge を用いてそれらの示度を直接読みとり、測定時間は20~30分であつた。沿岸結氷上でこの様な測定を行なえば天候に大きく左右されるのは当然で、風が少なく測定に適当な天候が少なかつことも関係して測定数は少なかつた。それにも拘らず、この程度の時間内の測定では、海氷は略 Maxwell-Voigt body としてあらわされる事がわかり、その結果、弾性係数、粘性係数はそれぞれ 10^{10} dyne/cm², 10^{10} dyne·min/cm² 程度の大きさであることがわかつた。

しかし海氷のこの傾向は測定時間を延長した場合にも維持されるか否かも疑問であつたし測定も少ないので更に昭和31年1月下旬より2月中旬に前年度と同様に、北海道オホーツク海岸の紋別市の港内の海氷について、従来行なつて来た弯曲法による測定の他に海氷から切り出した円筒状の試料の圧縮による方法を併用して、海氷の粘弾性係数を測定した。この際に歪の測定にはすべて自記装置を用いて測定時間を長くする様に試みた。それらの測定の方法及び結果について報告する。

I. 測定方法ならびに装置

1) 歪拡大装置及び記録装置

歪の拡大には写真1に示した様な方法を用いた。この装置は極めて簡単で、lever A の一端 C に下向きの力を加えると lever B の一端に取りつけられた記録用ペンが上昇して C の沈下量を約100倍に拡大するようになつている。このペンの動きはシンクロナスモーターで駆動される自記円筒に取付けた記録紙に記録される。自記円筒の回転は歯車の取替えにより一周6時間もしくは24時間とすることが出来る。lever A, B が僅かの力によつても動作する様にす

* 北海道大学低温科学研究所業績 第341号

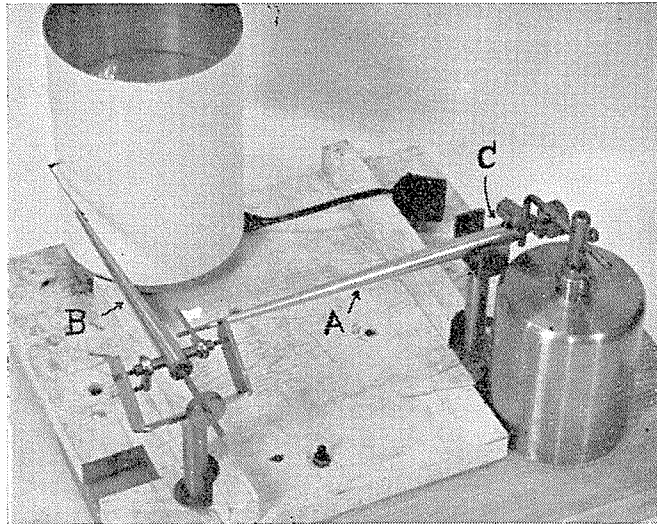


写真1 歪拡大装置

るために、図に見られる様に適当な counter weight をとりつけてある。この度の測定に際しては2種の方法を用いて海水の歪を測定したが、何れの場合にも歪はこの装置を用いて拡大記録した。この装置では写真から明らかな様に、記録用ペンの上昇につれて拡大率が僅かに異なるのでその補正が必要なことが欠点であるが、取扱いは極めて簡便で感度も良かった。lever A の一端 C は充分に固い鋼鉄の円錐を用い、それに接触する板には良くみがいた瑪瑙の板を用いた。此の C 点を押しさげる方法はのちに述べる様に海水に歪を生じさせる2つの方法によつて夫々異なっている。実際の測定に当つては、海水の歪量すなわち、C 点の変位はたかだか 1.7 mm にとどまるように試料の大きさ及び荷重量を加減した。

2) 氷の棒の彎曲を用いる方法

既に報告したと全く同じ要領で氷の棒を作り¹⁾、その中央部に荷重として穴のあいた鉄塊(重量 16.8 kg) をのせて氷の棒を彎曲せしめ、その際の沈下量を測定する方法である。この方法は、既にソビエトに於いては各地の河の氷及び海水の強度を測定する際に用いられている²⁾。

測定に当つて先ず写真2に示した様に周囲の不動氷に固定した丈夫な木製の台の上に拡大装置及び記録装置を置く。次に氷の棒の上に小さな錘をおきそれに鋼鉄棒を鉛直に固定する。この棒の先端に瑪瑙の板を棒に垂直にとりつけ、写真1の拡大装置の C 点に接触せしめる。その後荷重を氷の上ののせ約2時間この氷の棒の中央部の沈下を記録して時間—歪曲線を得た。

この方法によると測定する氷の状態に変化を与えない利点があるが、測定中に氷を切り取つて露出せしめた海水面に新しい氷が出来る。しかもこの氷を取り除くために人が近づくと記

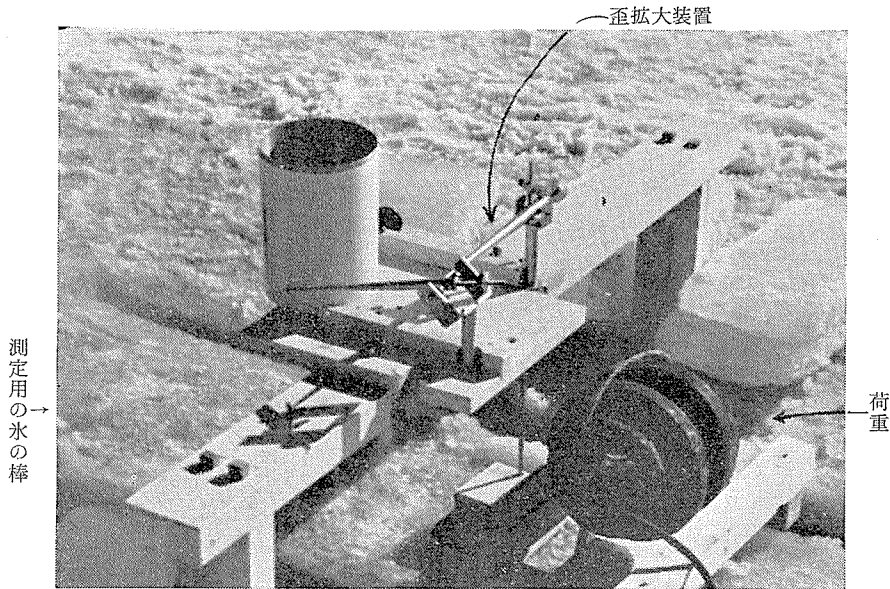


写真 2 海水の粘弾性係数の測定 (水の棒の撓曲による方法)

録装置の台を固定した周囲の氷が沈下するし、又それによつて海水が動揺して測定される氷の棒が振動する。その為に新しく生じた氷を取除くことが出来ないので測定はそれらの新生氷があまり発達しない程度の2~3時間位しか続けることが出来ない欠点がある。前にも述べた様に、風が強いと、海水のうねりの影響と、露出した海面に生ずる波のために測定は不可能になる。その上今年の冬には、観測期間中に多量の積雪があり、その重さによつて氷が沈下して海水が多少氷の上に滲み出して、氷の上面がやわらかくてその上に拡大装置の台などを固定することが出来ない日が多かつたので、この方法による測定は僅か4例で、各々の場合の測定時間は夫々約2時間であつた。加えた荷重は何れの場合も16.8 kgで、この荷重による最大沈下量は0.6 mmであつた。氷はこの沈下によつて新たに浮力をうけるか、その大きさはこの場合最大50 gであり、無視しても差支えない大きさであつた。

氷の温度及び氷の下の水温は水中に埋没及び氷の下に下げた上利式記録温度計の記録より読みとつた。氷の塩素量は測定に用いた氷から core drill⁹⁾によつて切り取つた試料を融解して通常の海洋観測に用いられる方法によつて求めた。

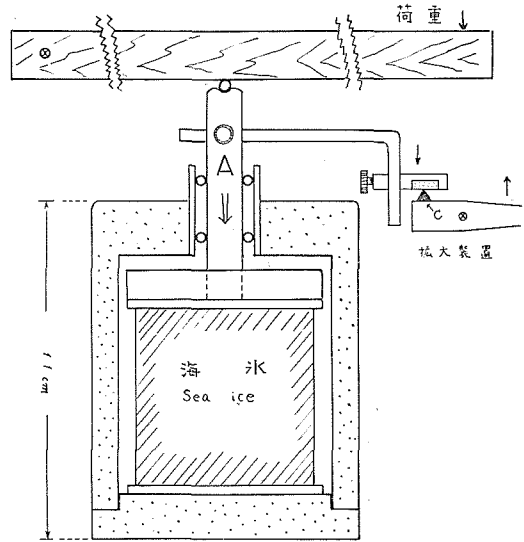
3) 結氷板から切り出した円筒の圧縮による方法

測定しようと思つた結氷板から core drill によつて円筒状の氷を切り出す。この drill で切り出される氷の円柱の直径は大凡6 cm である。その円柱を実験の便宜上定めた約6 cm の長さに切り取り、両端を平行に仕上げた上で厚さ約3 mm の真鍮板を氷着させ、測定に用いる試料とする。この試料を第1図に示した砲金製の筒の中に収めて、上から圧力を加え、その際の円柱

の縮み量を拡大記録する方法である。この様な方法は純水の粘弾性を測定するためには時々用いられている⁹⁾。力は写真3に示した様に挺子を用いて加えた。この挺子は試料に対する全圧力最大約 130 kg (試料の単位面積当り約 4.0 kg) にすることが出来る様に設計した。歪の測定には前に述べた拡大装置及び記録装置を用い、実際に歪を測定した時間は2~19時間であつた。

海水はこの様に結氷板から切り出すと *brine* の滴下のためにその塩素量が時間と共に減少することが知られている⁹⁾。又氷の温度が変わると氷中の *brine* 濃度が変わり、場合によつては *brine* が氷から押し出される。そのために測定中に試料の塩素量が減ずる。又氷の温度も採取時とは異なつたものとなることが多い。したがつてこの様な測定方法はあまりうまい方法とは言われないが結氷したままの水について行なう歪の測定と本質的に異なつた結果を生ずると思われぬし、しかも前述した様に結氷したままの水に力を加えた時の沈下の状態の長時間にわたる測定は天候にも左右されることが大きくて充分に行なうことが出来ないでこの様な方法をも併用することは意味がある。

測定中の水の温度は間もなく気温に



第1図 海水圧縮装置

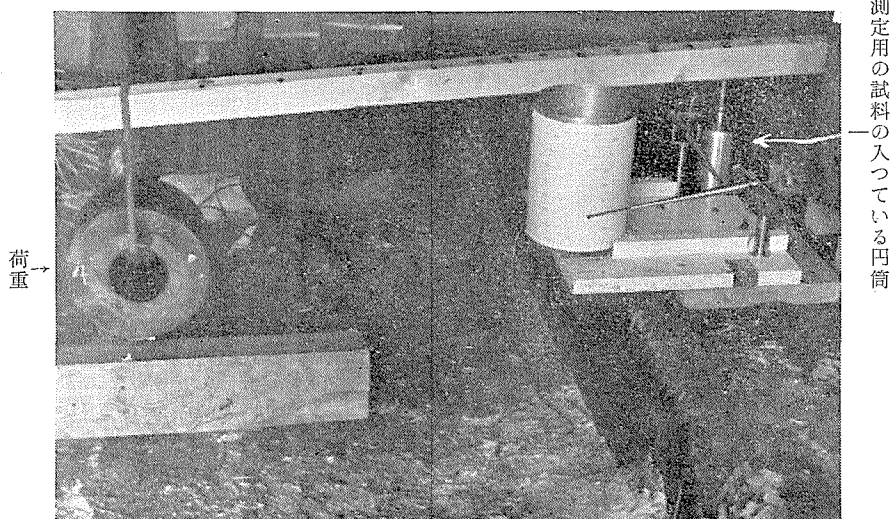


写真3 海水の粘弾性係数の測定 (海水より切り出した円柱の圧縮による方法)

等しくなるものと思われるので、圧縮装置の近くに自記温度計をおいて、記録された気温をもつて測定中の大凡の氷温とした。結氷板から切り出した時の試料の温度は前に述べた氷中に埋めた上利式温度計による氷温の記録から求めた。歪量の測定中に氷の塩素量が減少するので試料の塩素量の分析のために圧縮用の試料のすぐ傍から分析用の試料を別に drill で切り出したが、更に歪量の測定を終った氷も分析用の試料として、このふたつの分析結果から測定に用いた試料の測定前後の塩素量を知った。

測定に用いた試料の長さは約 6 cm であり、測定期間中の氷厚が約 20 cm であつたので少なくとも上、中、下の 3 層にわけて測定出来る筈であるが、氷の下面のモザイク構造のはつきりしている部分数種はあまりもろくて測定用の試料を作ることが出来なかつたし、上面数種もやわらかすぎて測定に適さないことが多かつたので、大多数の測定は概ね中心部のもつとも硬い部分から切り取つた試料について行なつた。

測定した試料の数は 19 箇でそれらの歪量の最大は約 1.7 mm であつた。6 cm の長さをもつ試料はこの程度の歪では割目は生じなかつたし目立つ程の変形は認められなかつた。

II. 氷の棒の彎曲の際の時間—歪曲線及び結果

定荷重によつて海水の棒を彎曲せしめた時の記録の例を写真 4 に示した。写真には明かに荷重を加えた瞬間に弾性歪が見られ、ひきつづいて弾性と粘性による変形が見られる。測定には出来るだけ平穩な日をえらんだのであるが、記録には“うねり”もしくは港内の副振動及び可成り離れてはいるが結氷板の上を人が動き廻つていることなどによる拡大装置を固定した氷

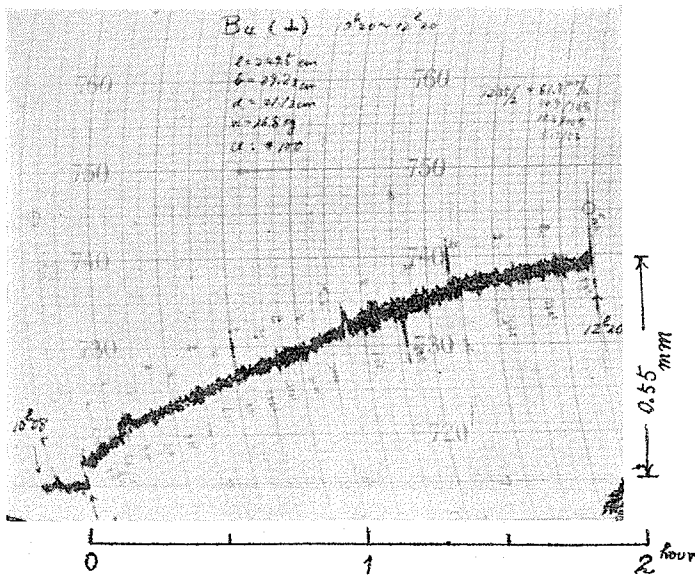
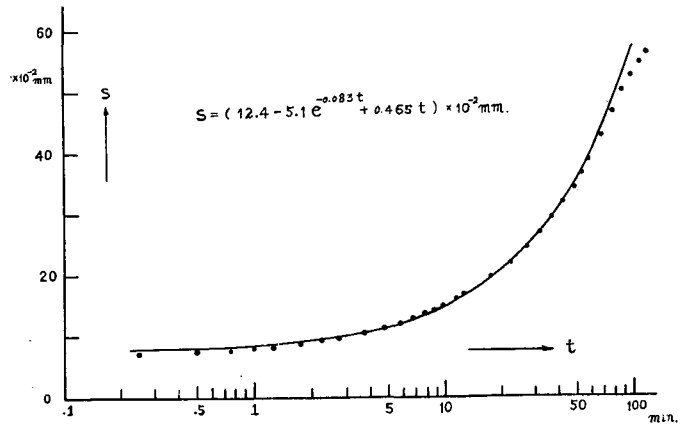


写真 4 海水の棒を彎曲した時に得られた記録
(時間—歪) の例 (測定 B₁)



第2図 海氷の棒を定荷重によつて彎曲せしめた時の時間—歪曲線の例 (測定 B₄)

板と測定に用いた棒の相対的な振動がはつきり記録せられており、記録用ペンは振動し乍ら次第に上昇、すなわち、沈下量が増大しているのがわかる。この振動している曲線の中点を連ねたものを荷重による沈下と見做し、拡大装置の拡大率の補正を施した結果得られた時間—歪曲線を時間軸に $\log t$ をとつてあらわしたのが第2図である。この様な曲線が測定の度毎に得られたが、何れも前報で報告したものと殆んど同じ傾向を示している。

この曲線は図からわかる様に、実験式としては

$$s = A - Ce^{-at} + Bt \quad (1)$$

を用いるのが都合が良いと思われる。但し s は歪で、 A 、 B 、 C 及び a は常数で、 t は時間 (分) である。

この実験式の常数の持つ物理的意味を明かにするために

$$\left. \begin{aligned} A &= p \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \\ B &= \frac{p}{\eta_1} = \frac{p}{E_1 \tau_1} \\ C &= \frac{p}{E_2} \\ a &= \frac{1}{\tau_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

第I表 彎曲法によつて求

	l (cm)	d (cm)	b (cm)	荷 重 (kg)	A	B	C	α
B ₁	199.0	20.00	38.95	16.8	11.0	0.39	5.3	0.11
B ₂	255.0	21.40	39.30	16.8	15.8	0.53	7.0	0.24
B ₄	249.5	21.13	39.23	16.8	12.4	0.46	5.1	0.083
B ₅	203.5	21.55	28.64	16.8	14.6	0.39	7.6	0.095

とおくと、(1)式は

$$s = \frac{p}{E_1} + \frac{p}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) + \frac{p}{E_1} \left(\frac{t}{\tau_1}\right) \quad (3)$$

となる。この式は弾性係数 E_1 と粘性係数 η_1 を有する Maxwell unit と弾性係数 E_2 、粘性係数 η_2 を有する Voigt unit を直列につないだ模型すなわち Maxwell-Voigt body に歪力 p を加えた時の歪をあらわす式にはかならない。従がつて得られた時間—歪曲線が(1)式であらわされるということは、海水が Maxwell Voigt body の構造を持つことを意味する。但しこの場合には荷重の重量を W 、氷の棒の長さ、厚さ及び幅を l 、 d 及び b とすると $p = Wl^3/16d^3b$ である。

力はこの測定では結氷板に対して垂直に加えているので海水の棒は上面では圧縮、下面では伸びの変形をする。即ち氷にとっては水平方向に圧縮又は引張りの力を受けたと同じ結果になつている。又圧縮と引張りの際の粘弾性的性質は全く等しいと見做しているが、棒全体の歪は極めて小さいから差し支えないであろう。

得られた時間—歪曲線を(1)式であらわした時の各常数 A 、 B 、 C 、 a 及び(2)式の関係を用いて得られた弾性及び粘性係数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 及び τ_1 (relaxation time)、 τ_2 (retardation time) の値は第 I 表に示すとおりである。表には同時に測定に用いた氷の棒の大きさ、平均温度、塩素量も同時に示した。

表に示された結果は相互に割合に良く一致しており、1955年2月の測定で得られた結果もこれらの値と略同じ程度である。したがつて、結氷面に平行に歪力を加えた場合に海水の粘弾性係数は、この位の氷温と塩分の時には大凡この程度のものであらうと見做される。又第 I 表に示された値は、後にのべる結氷板に平行に主軸を有する様に切り出した円柱を圧縮してその歪と応力から得られた粘弾性係数とも割合によく一致する。個々の測定の間における結果の相違と、粘弾性に影響を及ぼすと考えられる氷の温度、塩分との間の関係はこの測定においてはあまりはつきりしないが、氷の温度が高くなると E_1 、 E_2 が減少する傾向にあることがうかがわれる。ただ τ_1 は逆に氷の温度の上昇と共に増大する傾向にある様に思われる。

III. 氷の円柱を圧縮した際の時間—歪曲線及び結果

前述した大きさの円柱を約 2.7 kg/cm^2 の圧力で圧縮した際に得られた記録の例を写真5、

めた海水の粘弾性係数

E_1 (10^9 dyne/cm^2)	E_2 (10^9 dyne/cm^2)	η_1 ($10^{10} \text{ dyne} \cdot \text{min/cm}^2$)	η_2 ($10^{10} \text{ dyne} \cdot \text{min/cm}^2$)	τ_1 (min)	τ_2 (min)	t_c ($^{\circ}\text{C}$)	Cl (%)	測定日時 (1956年2月)
4.5	4.9	6.8	4.5	15	9.1	-3.0	2.7	^{9H} 11 ^h 15~12 ^h 00
5.1	6.3	8.4	2.6	17	4.2	-2.5	3.2	^{9H} 12 ^h 30~14 ^h 35
5.9	8.5	9.5	10.2	16	12.1	-2.9	2.9	^{10H} 10 ^h 20~12 ^h 20
4.3	4.0	7.8	4.2	18	10.5	-1.9	3.4	^{10H} 12 ^h 43~15 ^h 02

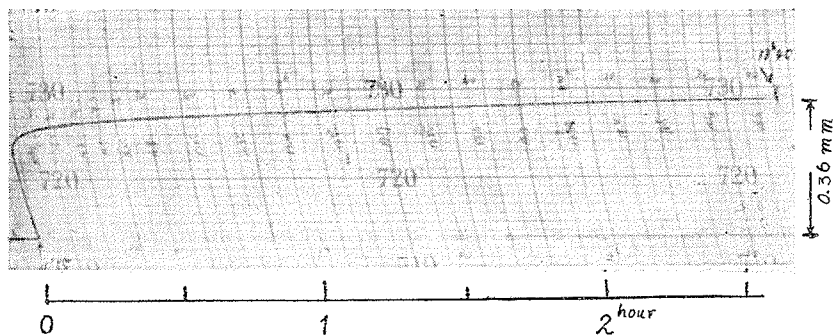


写真 5 海水より切り出した円柱を圧縮した時に得られた記録
(時間一歪) の例 (測定 No. 2) (円柱の軸が鉛直の場合)

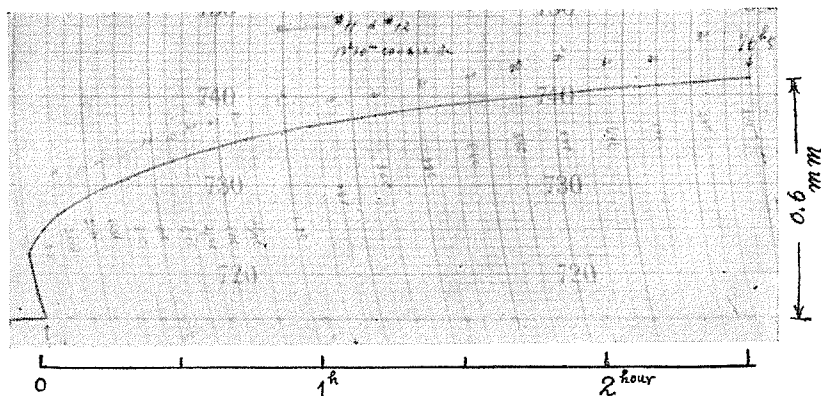


写真 6 海水より切り出した円柱の圧縮の時に得られた記録
(時間一歪) の例 (測定 No. 3) (円柱の軸が水平の場合)

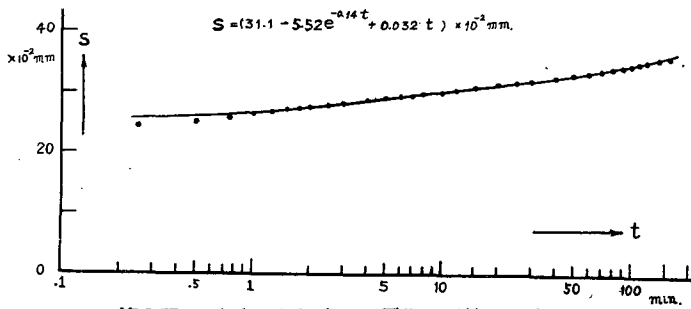
写真 6 に示した。写真 5 は切り出した円柱の軸が鉛直な場合で、後者は水平の場合である。即ち前者においては歪は結氷板に垂直に生じ、後者では水平である。このふたつの記録を比較すると、先ず retarded elastic deformation を呈する部分の曲率の違いが目立っていることに気がつく。即ち前者の方が、 E_2 も η_2 もともに大きいことがわかる。又それに続く粘性変形部分の傾斜は前者が小さいことから、 η_1 は結氷板に鉛直に力を加えて押しつぶした場合には水平に力を加えた場合よりも大きいことがわかる。

良く知られているように、海水は厚さ約 1 mm、幅数種、長さ数種の短冊形をした板状の結晶から出来ている¹⁾。しかもそれらがあたかも数冊の本をきちんとならべて立てた様な小塊をなし、その小塊は何れも鉛直に立つてはいるが互にある角度をなしているという構造をしており且短冊状の薄片の間には brine が含まれている。したがって海水を上から押しつぶした場合と横から押しつぶした場合ではその粘弾性的性質が可成り異なることが当然予想される。即ち後者の場合には氷の板の圧縮ばかりでなく、試料中のある部分の小塊では短冊状の薄片の平らな面に対して斜めの方向から力を受けることになり、それらの結晶板の間でいくらか

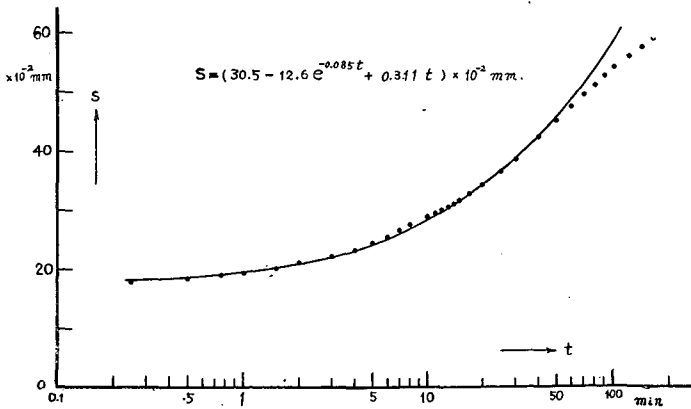
の滑りが起ることが考えられるのである。なおこの短冊状の薄片の間には *brine* が含まれているので互に附着している力はあまり強くなって手で容易に引き放せる程度である。このような構造の方向性に原因する粘弾性係数の相違を確かめるために、測定にあつては結氷板に対して円柱の軸が垂直及び平行なものを切り出して夫々に力を加えた。又この両者の場合の中間的な性質を示す場合として、円柱の軸が結氷面と 30 度及び 60 度をなすものもいくつか切り出して圧縮してみた。

写真 5 及び 6 の曲線に拡大率の補正及び力を加えた時に第 1 図の A の部分 (鋼鉄棒) に生ずる弾性縮みの量の補正を施した結果得られた時間—歪曲線を時間軸に $\log t$ をとつて示したのが第 3, 4 図である。

この曲線も近似的には第 2 図の場合と同様に (1) 式であらわされるので、全く前項と同様にして粘弾性係数を求めて、第 II 表に示した。表の中で θ は測定に用いた円筒の軸と水平面のなす角度で、90 度というのは円筒の軸が鉛直な場合即ち写真 5 の場合に相当し、0 度は写真 6 の場合に当たる。試料の採取位置は氷の上面から円筒の中心までの距離をあらわしている。



第 3 図 海水より切出した円柱を圧縮した時に得られた時間—歪曲線の例 (測定 No. 2)



第 4 図 海水より切出した円柱を圧縮した時に得られた時間—歪曲線の例 (測定 No. 3)

第II表 圧縮法によつて

No.	試料の 厚の長さ	試料の 直 径	試料の 高 さ	歪力 (kg/cm^2)	A	B	C	α	E_1	E_2	η_1	η_2	τ_1	τ_2
	(度)	(cm)	(cm)	($10^9 dyne/cm^2$)					($10^9 dyne/cm^2$)	($10^{11} dyne \cdot m \cdot n/cm^2$)	($10^{10} dyne \cdot m \cdot n/cm^2$)			
1	90	5.9	6.0	2.66	4.8	0.030	3.5	0.064		4.5	5.3	7.0		16
2	90	5.8	6.0	2.70	31.1	0.032	5.5	0.14	0.63	3.9	5.0	2.8	794	7.1
20	90	6.0	5.4 ₈	2.54	37.2	0.022	5.0	0.053		2.8	5.6	5.2		19
5	90	6.2	5.9	3.70	28.7	0.032	3.9	0.15	0.87	5.5	6.7	3.7	771	6.7
8	90	6.1	6.0	3.81	23.1	0.063	5.7	0.18	1.3	3.9	3.6	2.2	273	5.6
15	90	6.0	6.0 ₃	3.91	8.0	0.033	2.0	0.19	3.0	11.4	7.0	6.1	235	5.4
16	90	6.0	5.9 ₈	3.93	23.5	0.074	6.1	0.073	1.3	3.8	3.1	5.2	234	14
18	90	5.9	6.0 ₇	4.06	27.9	0.165	5.0	0.15	1.1	5.0	1.5	3.3	137	6.7
19	90	6.0	6.1 ₅	3.97	20.2	0.114	6.2	0.058	1.7	3.8	2.1	6.6	120	17
10	60	6.1	6.0 ₈	2.46	9.0	0.077	3.3	0.083	2.7	4.4	1.9	5.4	72	12
9	60	6.0 ₅	5.9 ₂	3.88	7.4	0.268	5.3	0.25		4.2	0.8	1.7		3.9
11	60	6.1	5.8 ₅	3.81	15.0	0.121	4.6	0.114	2.2	4.8	1.8	4.2	85	8.8
12	30	6.1	5.6 ₁	2.66	52.0	0.268	5.7	0.25	0.32	2.6	0.55	1.0	172	4.0
14	30	6.1	5.9 ₆	2.48	19.2	0.660	4.7	0.34	1.01	3.1	0.23	0.93	23	3.0
3	0	6.1	6.0	2.50	30.5	0.311	12.6	0.035	0.83	1.2	0.47	1.4	57	11
4	0	6.1	6.0	2.50	24.6	0.125	10.9	0.059	1.1	1.4	1.2	2.3	108	17
17	0	5.9	6.0	2.64	20.4	0.057	4.4	0.062	0.98	3.5	2.7	5.7	277	16
6	0	6.1	6.1	3.82	36.0	0.294	18.2	0.111	1.3	1.3	0.78	1.1	59	9.0
7	0	6.1	6.1 ₂	3.82	14.8	0.253	13.8	0.058		1.7	0.91	2.9		17

塩素量は既に述べた様に試料を結氷板から採取した直後の塩素量と測定終了後の値である。

第II表に示した氷の温度 t_s は測定に用いた円柱を切り出した時の温度である。今冬の観測期間中は例年になく気温が高く、したがつて氷の温度も表に示した程度であつたので、温度の粘弾性に及ぼす影響を知るためにはあまり具合がよくなかつた。切り出した円柱の圧縮の実験は海に面している漁業協同組合の市場内で行なつた。測定中の気温すなわち氷の温度 t_{obs} も数例をのぞいてはあまり低くならなかつたが、これは測定中の氷に恒温装置を用意しなかつたことをいくらか補なつたことになる。

表の中で、 E_1 , τ_1 の値の欠けているものがあるが、これは圧縮装置の砲金製の円筒が荷重を加えた時に僅かではあるが動き荷重前の基準線を確かめることが出来なく、したがつて荷重した時の弾性変形の量のはつきりしなかつたことによるものである。

表に示した諸測定では2~19時間にわたつて氷柱の匍匐の測定が行なわれているが、大多数の例については変曲点はあらわれなかつた。ただ No. 18, 19 では、恐らくは気温(測定中の氷の温度)が高かつたことによるのであろうが、前者は荷重後約40分、後者は約2時間で変曲点に達しその後は破壊に向うような時間—歪曲線を示した。No. 9 は気温もあまり高くない

求めた海水の粘弾性係数

t_i (°C)	$t_{obs.}$ (°C)	Cl (%)	試料の中心の位置 (氷の上) (面より) (cm)	註	測定日時 (1956年2月)
-2.0	-5.5~-3.0	3.6~2.3	4		^{3日} 16 ^h 30~11 ^h 30
-1.7	-4.0	2.4~2.2	9.5		^{5日} 10 ^h 55~13 ^h 40
		1.8~1.7			^{12日} 12 ^h 20~15 ^h 55
-1.6	-7.5	2.1~2.0			^{6日} 12 ^h 32~14 ^h 30
-1.6	-7.0~-3.0	3.2~2.2	10.5		^{7日} 10 ^h 07~13 ^h 12
-1.8	-3.0~-3.5	2.3~2.0	12	No. 16 のすぐ下の部分の水	^{9日} 16 ^h 35~18 ^h 46
-2.0	-3.0~-4.0	2.9~2.4	6	No. 15, 16 は B ₂ の測定を行なった氷から切出した。	^{9日} 19 ^h 07~09 ^h 42
-1.6	-1.0	1.8~1.1	9	測定中の気温が高く、flow が甚だしく大きい。氷の融解のおそれあり。B ₅ の測定に用いた氷の中心部の固い所。	^{11日} 10 ^h 26~16 ^h 40
-1.8	-1.0	2.1	9		^{11日} 17 ^h 20~06 ^h 00
-1.6	-3.0~-4.0	2.2~2.1	7.5	No. 9~11 は同時に相隣る位置から切り出した試料。	^{7日} 17 ^h 01~09 ^h 25
-1.6	-3.0	2.1~1.9	7.5	測定開始 25 分で変曲点に達し破壊に向う。	^{7日} 13 ^h 28~16 ^h 41
-1.6	-4.0~-2.0	2.1~2.1	7.5	1 日室内放置後測定。	^{8日} 09 ^h 42~12 ^h 00
-1.6	-2.5	2.4~1.9	7	切り出して 1 日室内放置。	^{8日} 12 ^h 06~14 ^h 06
-2.5	-2.0	3.1~2.7	7		^{8日} 17 ^h 20~09 ^h 50
-1.7	-4.0	1.8~1.6	9.5	No. 2 と同じ位置から切り出した試料。	^{5日} 14 ^h 10~16 ^h 50
-1.6	-4.5~-8.0	2.5~2.3	9.5	No. 3 のとなり 5 cm の所から切り出した試料	^{5日} 17 ^h 40~09 ^h 30
-1.8	-3.0~-2.0	1.5	7		^{10日} 17 ^h 42~10 ^h 10
-1.3	-6.5	2.0~1.9		No. 6, 7 は同時に相隣る位置から切り出した。荷重を加えた時の弾性変形がはつきりせずに flow が始まった。	^{6日} 14 ^h 40~16 ^h 40
-1.3	-6.5~-5.0	2.0~1.9			^{6日} 17 ^h 05~09 ^h 16

場合の測定であつたが、No. 18, 19 と同様に荷重後約 35 分で変曲点があらわれた。そのためにこれらの試料についての測定結果は他のものと別個に考慮する必要がある。

温度、塩分などの異なる海水を、しかも同一でない温度のもとで測定した結果としては、 θ (円柱の主軸と水平面との傾き) によつて分けた各群内の測定値は特殊なもの及び明かに測定の不備に原因するものを除いては割合に良く一致していると思ふことが出来る。このうち No. 9, 10, 11 は非常に近接して (間隔約 3 cm) 採取した円柱による測定であり結果も前述した No. 9 をのぞいてはよく一致している。

$\theta=90$ 度のもつと $\theta=0$ 度 (円柱の軸が水平) のものを較べると、もつとも大きな違いは η_1 したがつて τ_1 にもあらわれている。即ち短冊状の結晶の薄片の間の滑りが考えられる後者の場合に η_1 が小さい。 E_1 はあまり異ならないが E_2 は少し異なる。又 $\theta=60$ 度、 $\theta=30$ 度の試料の測定結果は $\theta=90$ 度及び 0 度の場合の中間の値になることを期待したが、測定例も少なく且つ測定中の氷の温度、塩分などの条件の違いが大きいかも原因して予期どおりの値とはならなかつた。なお、大浦・木下⁷⁾ が海水から切り出して両端を支持した棒 (2×2×7 cm) の曲げ破壊より海水の破壊強度を求めた実験によると、海水の表面に垂直に応力を加えた場合には

垂直に立っている短冊状の薄氷片の間に滑りが生ずるので海水の表面に平行に応力を加えた場合に較べて破壊強度が小さいことが指摘されている。

第I表に示した結果は、歪力の方向について言えば、第II表の $\theta=0$ 度の場合にあたる。したがって当然のことではあるが両者を比較すると得られた値の order が一致している。ただ τ_1 , τ_2 をのぞいては前者の場合の値が明かに大きい傾向にある。これは測定の方法が異なることも影響しているかもしれないが、もつとも大きい原因は加えられた歪力の大きさの違いと測定時の氷の温度の違いによるものと考えられる。と云うのは、純氷や金属、岩石等においては圧縮の際の歪力を大にすれば E_2 , η_2 が小さくなることが知られており、筆者の測定の場合にも歪力を大きくした時に同じ傾向があらわれている。又氷の温度が低くなれば粘弾性係数は大きくなるが、第II表の $\theta=0$ 度の場合の測定時の氷の温度は第I表の場合よりも低いことも関係しているのであろう。ちなみに両者の場合の歪力の大きさは、第I表即ち、氷の棒の弯曲の場合は $20\sim 27\text{ g/cm}^2$ で第II表即ち、氷柱の圧縮の場合は $2.7\sim 3.8\text{ kg/cm}^2$ であった。氷柱の圧縮を行なう際に、歪力の違いによる粘弾性係数の相違を知る目的で歪力を約 2.7 kg/cm^2 と約 3.8 kg/cm^2 の2群に分けて測定を行なつたが、他の条件の違いが影響して第II表ではその違いは明かでない。

第I表の B_2 の測定に用いた氷から上下2個の円柱を切り出して行なつた測定はNo. 15, 16で、No. 16が上の方である。この2個の円柱は氷厚凡そ21 cmの B_2 の測定に用いた氷の上面から3 cm 下面から約5 cm 切りすてた残りの部分から切出した。No. 15即ち下面に近い方がNo. 16より大きな粘弾性係数を示している。 B_2 の場合は歪力は結氷板に平行で、No. 15, 16の場合は垂直であるから、円柱を用いて比較した結果によると既に述べた様に、後者の方が大きな粘弾性係数を示す筈であるが、この場合は逆である。測定中の氷の温度は後者の方が低いし、歪力の大きさの違いによるものとしては差異が大きすぎる様で説明に苦しむ所である。

得られた結果についていくつかの気付いた点を述べたが、少数の特に注目すべきものを除いては表に示した温度、塩分、荷重などの条件のもとでは、海水の結氷板に垂直に歪力を与えた場合と平行に加えた場合にその粘弾性的性質が相異なることが明かになつた。歪力を同一の方向に加えたいくつかの測定の際に期待される海水の物理的・化学的諸条件の差異によるその粘弾性的性質の違いは、今回の測定の範囲内ではあまりはつきりしなかつた。

IV. 吟 味

海水の結氷板上に作つた氷の棒及び切り出した円柱に力を加えた結果記録された時間—歪曲線を近似的に(1)式で表わし、それより海水の弾性及び粘性係数を求めた。後者の測定方法による場合には、測定に用いた円柱の上下両面を平行に且滑らかに整形することが相当難かしいので、ある時間力を加えたのちに力を取り去つた場合の歪量の減少を測定したほうが円柱の上下両面の整形に原因する誤差が少なくなると思われる。更に、力を加えた時と取り去つた

時との両方の場合について測定を行なうことが望ましいのは勿論であるが、筆者の用いた拡大装置が不備なために力を取り去つた後の測定を行なうことが出来なかつた。今後この点を改良して両方の場合についての測定を行ないたいと思つている。前節で指摘した様に、力を加えた時に第1図に示した海水の試料を入れる円筒が多少動くことがあつたので之を固定する方法を構ずる必要がある。又この円柱に加える圧力をもつと大幅に変えることが出来るように改良することが望ましいと思われる。

海水の温度と塩分とその粘弾性的性質の関係について2, 3の定性的議論を行なつて来たが、それらの間の定量的な関係をいくらかでも明かにするためには低温実験室における人工海水についての実験が望ましい。歪力と粘弾性係数との関係についても同様である。

得られた時間歪曲線と(1)式のあらわす曲線は、希には第4図に示したNo. 3の場合の様に荷重後凡そ1時間位で一致しなくなる場合もあつたが、多くの場合は測定時間が少なくとも2~3時間の範囲ではよく一致した。今年の冬に行なつた測定は2~19時間に及ぶ測定を含んでいるが粘弾性係数を比較するためには測定時間を一致させることが望ましいので、一応すべての測定は2時間位しかなされなかつたものとして以上に述べて来た結果を得たのである。その際には時間—歪曲線は(1)式であらわされるので海水はMaxwell-Voigt bodyと見做すことが出来ることは既に述べた。しかしそれ以上の永い時間を経過した時の測定については、(1)式を得られた曲線の方程式として用うると可成り誤差が多くなるが多かつた。具体的に言うと、荷重後の時間が永く経過した部分の曲線に(1)式を適用すると2~10分位の間の測定値と(1)式のあらわす値との誤差が歪量の5~10%に達した。逆に荷重直後の2~20分位の間の誤差を1%以下にすると(この報告で述べた場合)3~4時間以後の誤差は可成り大きくなることが多い。この報告では前の報告で示した値との比較を容易にするためとすべての測定の測定時間を揃えるために時間の永く経過した方を犠牲にしたが、もし逆に荷重直後の測定値にあまり重きを置かないと、 τ_1 , τ_2 は可成り大きな値となつて求まり、 E_2 は小さく τ_2 は大きくなる。しかしそのorderが変ることはない。言いかえると、長時間にわたつて測定を行なつてみると、海水を単純なMaxwell-Voigt bodyとして考えることに可成り無理が伴なう様である。この点については現在考察中であるが、例えばAndrade²⁵⁾の式などを用うることも一法であろう。

何れにしても、海水はその構造からわかる様に、結晶としての氷の性質と、それらのモザイク的集合体としての性質を有しているので問題は複雑である。それを出来るだけ簡単にするために、数枚の短冊状の薄氷片の集合体についてその機械的性質の測定を行なうことは海水自身の研究に役立つばかりでなく、モザイク構造の力学の見地からも必要であろうと思われる。

以上にのべた測定はすべて海水に静的な力を加えた場合であるが、実際に氷を破壊したりする場合には問題は動的なものとなる。ある物体に静的な力を加えてその機械的性質を測定した場合と動的な力を与えて測定した場合とでは結果が必ずしも一致しない場合があるので、筆者も結氷板より切り出した試料の振動法による粘弾性係数の測定の準備中であり、更には弾性

波を用いてそれらの測定を行ないたいと考えている。

V. 結 語

荷重による海水の棒の弯曲及び結氷板より切り出した円柱を圧縮した際の歪量を自記させた結果、得られた時間—歪曲線は、測定時間が2~3時間の範囲内では、(1)式であらわされること、即ちその程度の時間の範囲内の測定では海水は Maxwell-Voigt body と見做し得ることがわかった。この結果から海水の粘弾性係数を求めて、 $E_1=0.6\sim 3\times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$ 、 $E_2=1.3\sim 11\times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$ 、 $\eta_1=0.2\sim 9\times 10^{11} \text{ dyne}\cdot\text{min/cm}^2$ 、 $\eta_2=0.9\sim 7\times 10^{10} \text{ dyne}\cdot\text{min/cm}^2$ 、 $\tau_1=20\sim 280 \text{ min}$ 、 $\tau_2=3\sim 19 \text{ min}$ の結果を得た。

海水に結氷面に垂直な方向に歪力を加えた場合と平行な方向から加えた場合とでは前者の方が大きな粘性及び弾性係数値を示すこともわかった。

粘性及び弾性係数と海水の温度、塩素量、構造その他の諸要素との関係については今の所明かではないが将来の測定によつて確かめたいと思つている。

この研究に要した費用の一部は北海道科学研究費(沿岸結氷の流結氷の予報の基礎資料としての海水の機械的性質の研究、担当者、楠宏)によつた。測定に際しては北見紋別市当局、紋別漁業協同組合より便宜を得た。又、楠宏・鈴木義男両氏には種々の御協力御支援をいただいた。ここに厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 福富孝治・楠 宏・田畑忠司 1954 海水の研究(第21報)、北海道オホーツク海岸の海水調査。低温科学, *Ser. A*, **13**, 59.
田畑忠司 1955 海水の粘弾性係数の測定。低温科学, *Ser. A*, **14**, 25.
Tabata, T. 1955 A Measurement of Visco-Elastic Constants of Sea Ice. *Jour. of the Oceanographical Society of Japan*, **11**, No. 4, 1.
- 2) Vutyagin, I. P. 1955 Isslyegovaniye Prochnosti Lyegyanogo Pokrova r. Obi v vyesyennii Pyeriod. *Metyeo. i Gidrol. No. 3*, 42.
Dyeryugin, K. K. Lyedovyie Nabryugeniya na Moryakh. Leningrad. 1954.
- 3) 楠 宏 1956 採氷用コアドリル。低温科学, *Ser. A*, **15**, 197.
- 4) Glen, J. W. 1955 The Creep of Polycrystalline Ice. *Proc. Roy. Soc. A*, **228**, 519.
Perutz, M. F. 1947 A Description of the Iceberg Aircraft Carrier and the Bearing of the Mechanical Properties of Frozen Wood Pulp Upon Some Problems of Glacier Flow. *The Jour. of Glaciology. 1*, No. 1, 95.
- 5) 楠 宏・田畑忠司 1954 海水の試料採取方法について。低温科学, *Ser. A*, **12**, 87.
- 6) 福富孝治・斎藤光郎・工藤義夫 1953 海水の研究(第17報)、海水の組成、特に氷殻における純氷率と短冊状集片、氷片集塊について。低温科学, **9**, 113.
- 7) 大浦浩文・木下誠一 1956 凍土・海水・池氷の曲げ強度及び圧縮強度の測定について。低温科学, *Ser. A*, **15**, 137.
- 8) Andrade, E. N da C. 1910 On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena. *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, **84**, 1.
Ditto 1914 The Flow of Metals under Large Constant Stresses. Also *Ser. A*, **90**, 329.

Résumé

For the purpose of studying the visco-elastic properties of sea ice, some measurements were carried out at Monbetsu harbour located on the Okhotsk sea coast of Hokkaido in February. Two procedures were used for measurement. One of them utilized the bending of a rectangular ice bar under static loading. The ice bar was sawed out as shown in plate 2. The load was 16.8 kg; the dimension of the bar were about $20 \times 40 \times 250$ cm. The other method was the compression of an ice cylinder, which was cut off from the coastal land ice by using the hand core drill. Diameter and length of ice cylinders were about 6 cm and stress was $2.7 \sim 3.8$ kg/cm².

Strain was magnified about a hundred times by magnifying apparatus and recorded in the self recording drum as shown in plate 1 and 2, 3. Measurements were carried out for periods of 2~19 hours.

Fig. 2 shows an example of strain time curve obtained from bending of an ice bar; Figs. 3 and 4 were obtained as the results of compression of ice cylinders. If one pays attention to the first two hours of these strain-time curves, they may be seen to be expressed as follows

$$s = A + Bt - Ce^{-at}$$

where s is the strain, A , B , C and a are the constants for each curve. Let these constants be denoted by formula (2), then formula (3) will be derived. Formula (3) means that sea ice may have the same character as the model that constructed by a series connection of Maxwell unit and Voigt unit. Elastic constants E_1 and E_2 , viscous constants η_1 and η_2 of Maxwell unit and Voigt unit respectively can be determined from formulas (1) and (3).

The results obtained from the limit of the first two hours of strain-time curves are made into tabular form in Tables I and II. In the Table II, θ means the angle between the main axis of ice cylinder and the surface of sea ice. As the chlorinity of ice cylinder changes with time because of the falling of the brine contained between the small ice crystals, the values of chlorinity measured before and after the strain measurement are shown in Table II.

It will immediately be understood that the elastic constants E_1 , E_2 and viscous constants η_1 , η_2 observed in the case when the stress is perpendicular ($\theta = 90^\circ$) to the surface of the ice, are larger than those observed when stress is parallel ($\theta = 0^\circ$) to the surface of ice.

In the bending method, though the direction of stress is parallel to the surface of ice, elastic and viscous constants observed (Table I) are larger than those of the same cases when compression method was employed (Table II). This will be caused by the differences of temperature and chlorinity of ice and by the difference of stress. But in the present study, dependency of elastic and viscous constant on the temperature and chlorinity was not ascertained.