



Title	北極圏海水調査 II : 圧縮強度・応力緩和の測定
Author(s)	青田, 昌秋; AOTA, Masaaki; 田畑, 忠司 他
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 209-220
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18314
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p209-220.pdf



北極圏海水調査 II^{*,**}

— 圧縮強度・応力緩和の測定 —

青田昌秋・田畑忠司・石川正雄

(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

I. ま え が き

氷野の運動の研究や凍る海域の構造物の設計には氷の力学的性質についての知識が必要である。昭和51年4月下旬から約1カ月間アラスカ北端バローにおいて海水の圧縮破壊強度と応力緩和の測定を行なった。

試料は北極海に面するバロー沿岸の定着氷(氷厚約2 m)から採取した。圧縮は定歪速度の一軸圧縮で、圧縮速度は20.0, 6.5, 2.0×10^{-3} cm/secの3段階である。

海水の強度は水温、水中の塩分量、結晶構造によって変化する。さらに試料の大きさや結晶軸に対する圧縮の方向、圧縮の速度によっても変わることが知られている¹⁻²⁾。

今回の観測においては海水の圧縮強度と以上の諸条件との関係を知ることを主な目的とした。次に海水の応力緩和の測定によって、粘弾性係数の算出を試みた。海水の応力緩和は静荷重による曲げと同じく弾性係数一定のスプリングと粘性係数が時間変化する油緩衝器を連結した力学模型で説明し得ることがわかった。

II. 実験方法

第1図が実験装置の略図である。試料Sは電動機Mの駆動で上下する圧縮板Fで圧縮される。Fの下降速度はプーリーPの交換によって 20.0×10^{-3} cm/sec, 6.5×10^{-3} cm/secおよび 2.0×10^{-3} cm/secを選ぶことができる。

海水の反抗力は、400~1,500 kgであった。この範囲では、圧縮板の下降速度の変化は認められなかった。よって歪は電動機の駆動時間に比例するとみなすことができる。また試料に加わる力は電気式荷重計Lによって測定し連続的に記録した。

試料は北極海沿岸のバロー沖の定着氷(氷厚約2 m)の上層および中層から50 cm × 50 cm × 30 cm ぐらいの氷塊十数個を切り出し、これらの氷塊から底面が5 cm × 5 cm、高さ7, 10 および13 cmの氷の角柱を作った。

海水の構造はその厚さの方向には均一でないので表面からの距離のちがいによって試料を

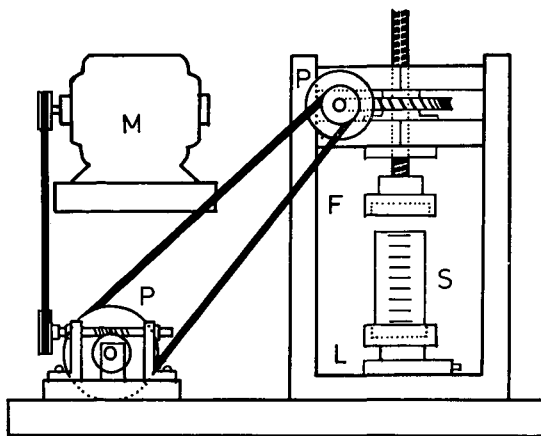
* 北海道大学低温科学研究所業績 第1805号

** 北海道大学低温科学研究所 流水研究施設研究報告 第50号

区分した。すなわち表面の雪氷 6 cm を除きその下層の約 25 cm を A 層、その下の約 30 cm を B 層とした。

測定期間中の気温は比較的緩かく -11°C 以上であった。現地には低温実験室がなかったので、室温を換気扇と電熱器で調整して氷温を一定に保った。圧縮強度の測定直後に試料にドリルで細い穴をあけてアルコール温度計を挿入して氷温を測った。コアドリルで全層の採氷を行ない薄片を作り結晶構造を観察した。また、圧縮試験を行なった試料からも薄片を作って結晶構造の変化を観察した。

塩分に関しては試験後試料を融かしてモールの銀滴定法によって塩素量を求めた。

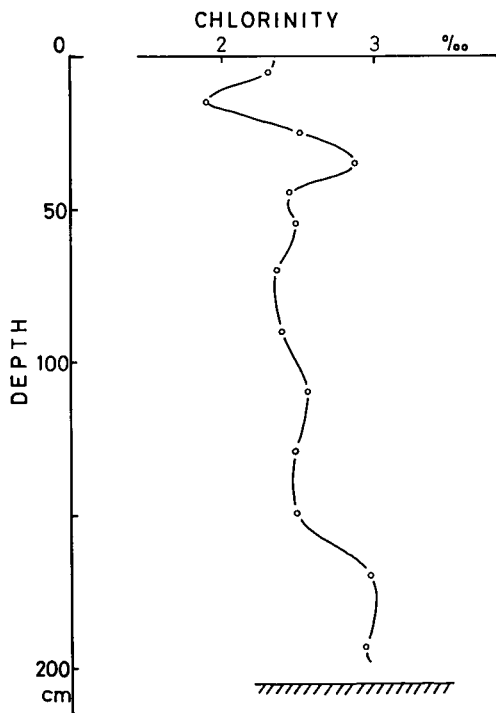


第1図 実験装置の略図

III. 測定結果

1. 海水中の塩分および結晶構造

試料の採取点附近でコアドリルを用いて全層の氷を採取した。円柱試料を約 10 cm 毎に切断して融かし、モールの銀滴定によって塩素量を測定した。海水中の塩素量の鉛直分布を第2図に示す。

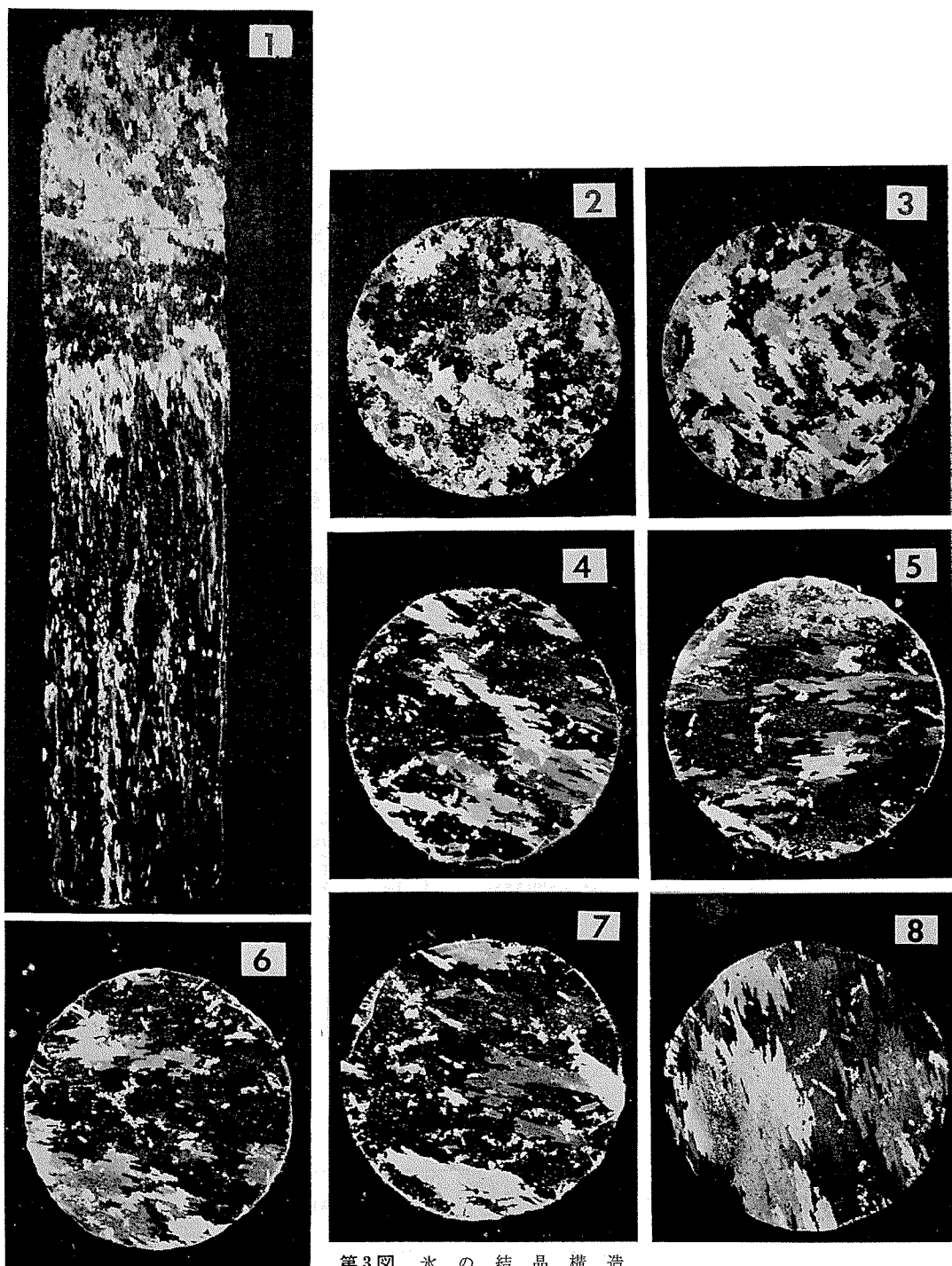


第2図 バロー沖の定着水中の塩素量の鉛直分布 (1976年5月7日)

第2図に示すように現場の海水の塩素量は $1.9\sim 3.0\%$ で平均は 2.5% である。なお海水の塩素量は 18.6% であった。

各試料は圧縮試験の後に融解してその塩素量を測定した。A層の試料の試験時の平均塩素量は 1.9% 、B層のそれは 1.7% であった。第2図に示した現場の塩素量の鉛直分布より少ないのは採取した氷塊を1~3日間陸上に置いた後試験を行なったためである。

氷の円柱試料のうち表面から 35 cm までの垂直断面およびいくつかの水平断面の偏光写真を第3図に示す。第3図の1および2から明らかなように表面から 15 cm ぐらまでは粒状氷で結晶も小さい。それ以深の部分は海水に特有なモザイク状結晶構造を示しており、17.5 cm の深さではまだ結晶粒が小さい



第3図 氷の結晶構造

1 表層～35 cm の鉛直断面 2 2.5 cm 層の水平断面 (直径 7.5 cm, 以下同じ), 3 17.5 cm 層, 4 50 cm 層, 5 100 cm 層, 6 125 cm 層, 7 150 cm 層, 8 175 cm 層

が(第3図の3)垂直断面を見ると20 cm ぐらいから結晶粒が大きくなっているようであり、第3図4~8に見るように深くなるに従って結晶粒は多少大きくなっているようである。圧縮試験を行なったB層(深さ30~60 cm)では結晶構造は一様でありA層(6~30 cm)では結晶粒はそれより小さいが結晶構造はほぼ一様であったと見なすことが出来る。

2. 海水の圧縮強度

海水の力学的性質は氷の温度、氷の中に含まれる塩分および結晶構造によって変化する。また外力の加わり方や測定しようとする氷の大きさによっても異なることが知られている。

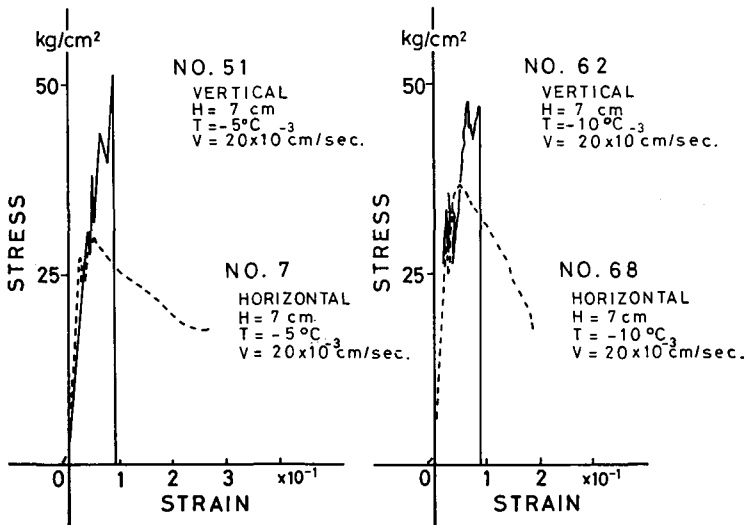
ここでは主に、(a) 海水の圧縮強度と氷温の関係、(b) 圧縮の方向による強度の違い、(c) 歪速度と強度の関係、(d) 氷の長さの影響の4項目に注目して圧縮試験を行なった。

温度条件は -5°C と -10°C とした。圧縮の方向は圧縮軸の方向が氷の成長方向と同じ場合——垂直圧縮と呼ぶことにする——と圧縮軸の方向が氷の成長方向に直交する場合——水平圧縮と呼ぶ——の2方向で、圧縮速度は20.0, 6.5, 2.0×10^{-3} cm/secであった。氷の形状は底面は同じく $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ とし高さを7, 10および13 cmの3種にした。

なお同じ条件下でおのおの5本の試験を行ないその平均値を採用したがそれらの強度には大きなちがいはなくほぼ均一な値を示した。

第4~6図に異なる条件の下のいくつかの測定例を示す。横軸は歪、縦軸は氷中に加わった応力を表わしている。図中に氷温、圧縮速度、氷柱の長さおよび圧縮方向を示した。図から明らかなように歪の増加に対する内部応力の変化は一様ではない。

たとえば第4図のNo. 62に示すように垂直圧縮で低温でかつ歪速度が速い場合はいくつかの亀裂が生じた後爆発的に破壊する場合が多かった。いっぽう特に第6図No. 22にみるよ

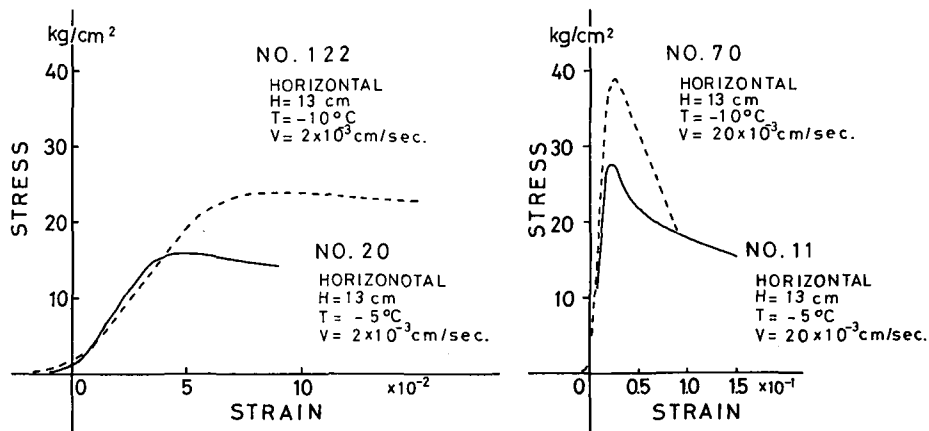


第4図 応力—歪曲線の例

No. 7 と No. 51 および No. 62 と No. 68 の各組はそれぞれ圧縮方向による圧縮強度の相違を示している。垂直圧縮 (No. 51 と No. 62) では数回亀裂が生じた後爆発的に粉砕した。いっぽう水平圧縮 (No. 7 と No. 68) では爆発的な破壊は起らず塑性変形が生じた

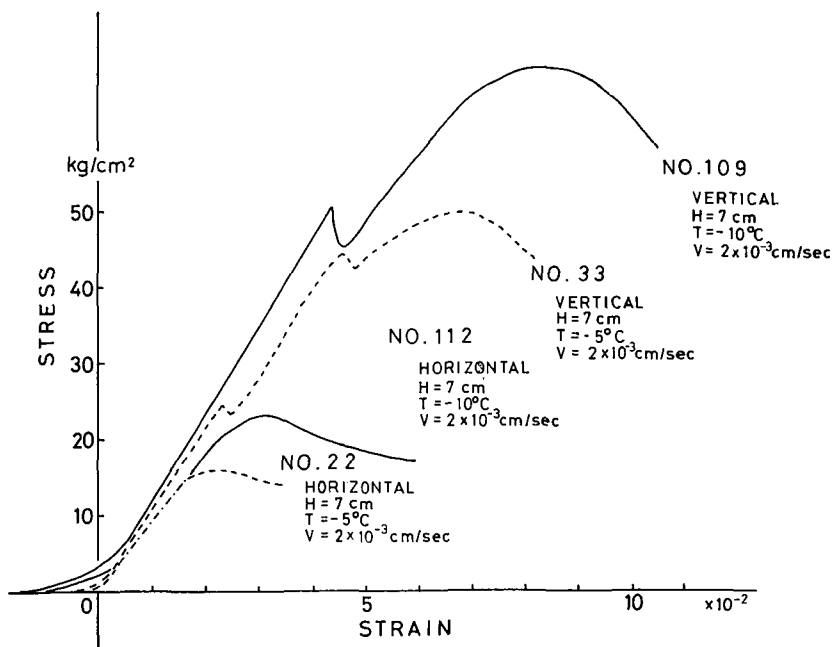
うに水平圧縮で比較的高温かつ圧縮速度が遅い場合には亀裂は発生せず塑性的変形を起こすのみであった。

このため海水の圧縮強度を示す量として亀裂の発生時の内部応力および測定中に生じた内部応力の最大値を採用することとした。この結果を第1表に示す。さきにも述べたように同一



第5図 応力—歪曲線の例

No. 20 と No. 122 および No. 11 と No. 70 の各組はとも水平圧縮で前者は圧縮速度が 2×10^{-3} cm/sec, 後者は 20×10^{-3} cm/sec の場合の圧縮強度に対する水温の影響を表わしている。ともに塑性変形を示している



第6図 応力—歪曲線の例

圧縮速度はすべて 2×10^{-3} cm/sec である。垂直圧縮 (No. 33 と No. 109) では1, 2回亀裂が生じたあと塑性変形した。水平圧縮 (No. 20 と No. 112) では塑性変形のみでありかつ最大内部応力は前者に較べて極めて小さい

第1表 海水の圧縮強度

試料分類		氷温 Crosshead speed Length	亀裂発生時の内部応力 kg/cm^2					
			-5°C			-10°C		
			20.0 kg/cm^2	6.5	$2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$	20.0 kg/cm^2	6.5	$2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$
6~30 cm 層 A	Horizontal Comp.	7 cm	29.1	24.3	16.0	37.3	31.4	22.5
		10	31.7	/	17.4	36.1	/	21.2
		13	30.3	/	16.2	39.8	/	20.3
	Vertical Comp.	7	30.9	31.9	23.2	29.0	28.7	40.6
30~70 cm 層 B	Horizontal Comp.	7	25.5	25.4	17.8	32.0	32.7	26.2
		10	31.5	/	16.6	37.9	/	20.1
		13	28.7	/	15.5	35.7	/	17.6
	Vertical Comp.	7	36.6	57.8	23.2	33.1	33.8	44.4

試料分類		氷温 Crosshead speed Length	最大内部応力 kg/cm^2					
			-5°C			-10°C		
			20.0 kg/cm^2	6.5	$2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$	20.0 kg/cm^2	6.5	$2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$
6~30 cm 層 A	Horizontal Comp.	7 cm	30.0	2.65	16.0	38.9	31.4	22.5
		10	32.8	/	17.4	37.4	/	21.2
		13	30.3	/	16.2	42.6	/	20.3
	Vertical Comp.	7	59.1	60.6	53.9	41.7	65.2	63.7
30~70 cm 層 B	Horizontal Comp.	7 cm	30.9	25.4	17.8	38.7	32.7	26.2
		10	31.5	/	16.6	37.9	/	20.1
		13	23.7	/	15.5	36.7	/	17.6
	Vertical Comp.	7	69.0	64.9	23.2	52.1	75.4	62.0

条件の下で各5本の試験を行なった。表中の強度は各5個の平均値である。

第1表から海水の圧縮破壊強度は $16 \sim 75 \text{ kg/cm}^2$ で氷温、圧縮速度(歪速度)などの条件によって大きく変化していることがわかる。

(a) 氷温の影響

氷温が -5°C と -10°C のときの強度の比較によって次のことがわかる。水平圧縮の場合には温度の低下によって圧縮強度は増大している。すなわち氷温が -10°C のときの圧縮強度は -5°C のときのそれに較べて平均して20~30%大きい。一方垂直圧縮のときは歪速度によって傾向が異っている。

(b) 圧縮方向による圧縮強度の相違

海水は第3図に見られるように特有のモザイク状の結晶構造をしており、圧縮の方向によってその強度が異なることが期待される。

ここでは圧縮軸の方向が氷の成長方向と同じ場合——垂直圧縮——と圧縮軸の方向が氷の

成長方向に直交する場合——水平圧縮——の強度を高さ 7 cm の氷柱で比較した。

1, 2 の例外を除くと一般的に垂直圧縮強度の方が水平圧縮強度より大であり, 3 倍以上になる場合もみられる。

(c) 歪速度と圧縮強度の関係

垂直圧縮の場合圧縮強度は歪速度が大きくなるに従って増大する。すなわち圧縮速度が 2.0×10^{-3} cm/sec の場合にくらべて圧縮速度が 6.5×10^{-3} cm/sec の場合は 1.2~1.7 倍となり, 平均して 1.4 倍である。さらに圧縮速度が 20.0×10^{-3} cm/sec になると圧縮速度 20.0×10^{-3} cm/sec のときの 1.4~2.1 倍で平均 1.8 倍となっている。一方水平圧縮の場合は圧縮速度が増大すると強度が極端に増大する場合と減少する場合があり一般的傾向は認められない。

(d) 氷柱の形状の効果

試料はすべて底面は 5 cm × 5 cm の正方形で, 高さは 7, 10 および 13 cm の 3 種の角柱である。試料の大きさによって圧縮強度が変化するか否かは, 表から角柱の高さは圧縮強度に影響しないことが明らかである。

3. 海水の応力緩和

海水の圧縮強度の測定と同時に応力緩和の測定を行なった。装置は圧縮試験に用いたものを利用した。海水が破壊する直前で圧縮機の駆動を停止, すなわち歪を一定に保った状態で応力の時間変化を記録した。測定時間は 5~10 分である。試料は 5 cm × 5 cm × 7 cm の角柱である。圧縮の方向が氷の成長方向と一致する 3 例と直交する 4 例を測定した。第 7 図にそれらの応力緩和曲線を示す。

第 7 図から応力 $\sigma(t)$ の時間的变化は実験式

$$\ln \sigma(t) = A - Bt + c \cdot e^{-t} \quad (1)$$

で近似できることが明らかである。

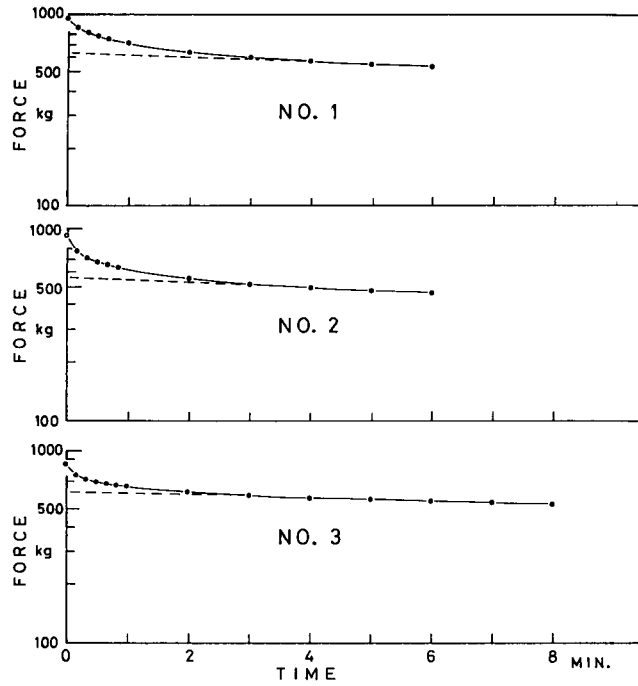
静荷重による海水の梁の曲げや圧縮などの力学的性質は粘弾性理論のいわゆる Maxwell-Voigt 模型でよくあらわされることが知られている。Maxwell-Voigt 模型とは, 弾性係数 E_1 のスプリングと粘性係数 η_1 の油緩衝器からなる Maxwell 模型と, 弾性係数 E_2 のスプリングと粘性係数 η_2 の油緩衝器からなる Voigt 模型を直列につないだ力学模型である。

いま定歪による海水の応力緩和 $\sigma(t)$ をさきに述べた Maxwell-Voigt 模型によってあらわすと

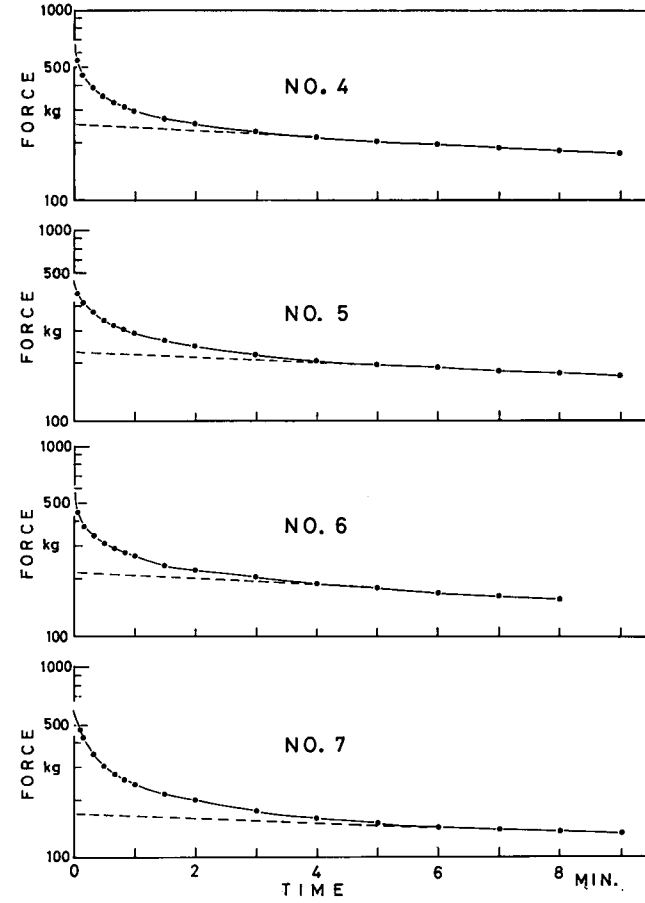
$$\begin{aligned} \sigma(t) = & C_1 \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_2} \right)^2 - 4 \frac{E_1}{\eta_1} \cdot \frac{E_2}{\eta_2}} \right\} t \right] \\ & + C_2 \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_2} \right)^2 - 4 \frac{E_1}{\eta_1} \cdot \frac{E_2}{\eta_2}} \right\} t \right] \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで t は時間, c_1 および c_2 は積分定数である。この Maxwell-Voigt 模型で表わした応力緩和(2)式と実験式(1)から海水の粘弾性係数 E_1 , η_1 , E_2 および η_2 を求めることは困難である。

定歪の応力緩和の実験から海水の粘弾性係数を求めるため力学模型の簡略化を試みた。



第7図 応力緩和曲線
 No. 1~No. 3 垂直圧縮
 No. 4~No. 7 水平圧縮



いま定歪の応力緩和を弾性係数 E のスプリングと時間変化する粘性係数 $\eta(t)$ の油緩衝器を連結した力学模型で表わし得るとする。

スプリングおよび油緩衝器の歪を ε_1 および ε_2 、系全体の歪を ε 、この系の応力を σ とすると

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_1 \quad (4)$$

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (5)$$

となる。

ここで歪 ε を一定 ε_0 に保つときの応力の時間変化 $\sigma(t)$ 、すなわち応力緩和を求める。

(3)~(5)式から

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0 \quad (6)$$

(6)式から

$$\ln \sigma(t) = \int \left(-\frac{E}{\eta} \right) dt + C \quad (7)$$

ここで $t=0$ における応力を σ_0 とすると (7)式は

$$\ln \sigma(t) = \ln \sigma_0 - \int_0^t \frac{E}{\eta} dt \quad (8)$$

となる。

(8)式が実験式(1)を満足するとして $\eta(t)$ を求めると

$$\eta(t) = \frac{1}{a + b \cdot e^{-\alpha t}} \quad (9)$$

となる。ここで a 、 b および α は定数である。

逆に定歪の応力緩和は弾性係数 E のスプリングと (9)式に示すような時間変化をする粘性係数の油緩衝器を直列につないだ力学模型で表わせるといえる。この力学模型によって実験式(1)から海水の粘弾性係数を求めた。実験式(1)の係数 A 、 B 、 C および γ とこの力学模型の各定数 E 、 a 、 b および α との関係は

$$\begin{cases} A = \ln(E \cdot \varepsilon_0) - E \frac{b}{\alpha} \\ B = E \cdot a \\ C = \frac{b}{\alpha} \\ \gamma = \alpha \end{cases} \quad (10)$$

である。ここで ε_0 は氷柱に加えた歪である。

第7図の歪—時間曲線から定まる実験式(1)の係数 A 、 B 、 C および γ と (10)式の関係から粘弾性係数 E および η が求まる。それらの結果を第2表に示す。なお粘性係数 η は (9)式に示したように $\eta(t=0) = \frac{1}{a+b}$ から時間がたつに従って $\eta(t=\infty) = \frac{1}{a}$ へと増大する。従って表に

第2表 海氷の粘弾性係数

No.	圧縮方向	ϵ_0	A	B	C	r	E
		$\times 10^{-2}$					$(\times 10^9 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2})$
1	Vertical Comp.	3.52	17.1	0.030	0.41	0.95	1.11
2		3.22	16.9	0.027	0.476	1.28	1.14
3		3.15	17.0	0.017	0.358	1.33	1.13
4	Horizontal Comp.	4.17	16.2	0.035	0.971	1.28	0.67
5		2.11	16.1	0.030	0.797	0.96	1.00
6		2.01	15.9	0.036	0.992	0.99	1.17
7		2.01	15.8	0.025	1.227	0.768	0.17

No.	圧縮方向	$\eta_{(0)}$	η_{∞}	a	b	$\tau = \frac{1}{a}$
		$(\times 10^9 \frac{\text{dyn}\cdot\text{mm}}{\text{cm}^2})$	$(\times 10^9 \frac{\text{dyn}\cdot\text{mm}}{\text{cm}^2})$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-10}$	(min.)
1	Vertical Comp.	2.64	36.8	0.27	3.5	1.05
2		1.78	42	0.24	5.4	0.78
3		2.23	68	0.15	4.2	0.75
4	Horizontal Comp.	0.52	11	0.54	18.9	0.78
5		1.24	33	0.30	7.7	1.04
6		1.16	33	0.3	8.4	1.01
7		1.21	47	0.21	8.0	1.30

は $\eta_{(t=0)}$ と $\eta_{(t=\infty)}$ を記した。

応力緩和の観測から求めた海氷の弾性係数は $(0.7\sim 1.2)\times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ で、粘性係数 $\eta_{(0)}$ は $(0.5\sim 2.7)\times 10^9 \text{ dyn}\cdot\text{min/cm}^2$ 、 $\eta_{(\infty)}$ は $(2\sim 7)\times 10^{10} \text{ dyn}\cdot\text{min/cm}^2$ である。これらの粘弾性係数には圧縮の方向のちがいによる顕著な相違は認められない。

IV. 結 語

1976年4月～5月アラスカ北端パローにおいて海氷の圧縮破壊強度および応力緩和の測定を行なった。圧縮は定歪速度の一軸圧縮で歪速度は 20.0, 6.5, $2.0\times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ とした。これにより氷の温度、結晶方向、氷の形状および歪速度と圧縮破壊強度との関係を求めた。また定歪のときの応力緩和を測定し、その結果を弾性係数 E のスプリングと粘性係数が $\eta_{(t)} = \frac{1}{a_0 + b_0 e^{-at}}$ なる時間変化をする油緩衝器を連結した変形 Maxwell 模型であらわした。これによって粘弾性係数 E 、 $\eta_{(0)}$ および $\eta_{(\infty)}$ を求めた。得られた結果を以下に要約する。

(i) 海氷の圧縮破壊強度は $16\sim 75 \text{ kg/cm}^2$ で、氷温、圧縮方向および歪速度で大きく変化する。

(ii) 圧縮軸が氷の成長方向と直交する場合（水平圧縮）は氷の温度が低下することによって圧縮強度は増加の傾向を示す。いっぽう、圧縮方向が成長方向に平行な場合（垂直圧縮）は

歪速度によって傾向が異なる。

(iii) 垂直圧縮の場合の強度は水平圧縮のときよりも大きい。

(iv) 歪速度が速くなると垂直圧縮では強度は大きくなるが、水平圧縮では歪速度は、あまり強度に影響しない。

(v) 氷柱の長さは圧縮強度に大きな影響を与えなかった。

(vi) 海氷の応力緩和から $E: (0.7\sim 1)\times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$, $\eta_{(0)}: (0.5\sim 2.7)\times 10^9 \text{ dyn}\cdot\text{min/cm}^2$, $\eta_{(\infty)}: (2\sim 7)\times 10^{10} \text{ dyn min/cm}^2$ が得られた。

おわりにのぞみ、現地観測に際しては、アラスカ大学の Shapiro 博士ならびに Metzner 氏の暖かい御協力を得た。この報告の作製にあたっては鈴木義男助教授、大学院生納口恭明君の御協力をいただいた。厚く感謝の意を表します。

また NARL の施設使用の便宜を与えられた OFFICE of NAVAL RESEARCH および同所北極研究主任・McGregor 氏および NARL の Denner 博士、Shaws 氏をはじめ NARL の皆様の御協力に厚く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Butkovich, T. R. 1956 Strength studies of sea ice. USA SIPRE Res. Rep. **20**, pp. 15.
- 2) Butkovich, T. R. 1958 Recommended standard for small-scale ice strength tests. Trans. Engineering Inst. of Canada. **2**, 112-115.
- 3) Войткоўский, К. Ф. 1960 Механические свойства льда. Изд. Академии Наук СССР, Москва pp. 99.
- 4) Peyton, H. R. 1966 Sea ice strength. Final Report to ONR, Geophysical Institute, Univ. of Alaska.
- 5) Croasdale, K. R. 1974 Crushing strength of Arctic Ice. The Coast and Sheef of the Beaufort Sea, Arctic Institute of North America (J. C. Reed and J. E. Sater ed.) 377-399.
- 6) Hawkes, I. and Mellor, M. 1972 Deformation and Fracture of Ice uniaxial Stress. J. Glaciol. **2**, 103-131.

Summary

To obtain the compressive strength of sea ice and especially to ascertain the effects of such parameters on the compressive strength as length of a sample, speed and direction of compression, and ice temperature, measurement was carried out off Barrow, Alaska, of uniaxial compressive strength of a rectangular ice sample with a cross section of 5 cm×5 cm and a length of 7, 10, or 13 cm. Three crosshead speeds for compression selected were 2.0, 6.5 and 20×10^{-3} cm/sec. Test temperatures were -5 and -10°C .

Ice blocks were sawed out from the uppermost 60 cm of the shore fast ice. As seen in Fig. 3, the ice had a typical sea ice structure only below 15 cm depth. Hence, the uppermost 15 cm layer of each block was discarded. The samples were then cut out from the blocks so that their long axis was either vertical or horizontal to the original ice surface. In the former case, the length of the sample was restricted to 7 cm to make its structure as homogeneous with length as possible.

Obtained compressive strength was 15-40 kg/cm² (Table 1). The results of this measurement follow: The length of samples has little effect on the compressive strength; the compressive strength of samples with their long axis vertical to the ice surface is greater than that of samples with their long axis parallel to the ice surface, as had been pointed by Butkovich; the compressive strength increased remarkably with an increase in crosshead speed, as in expected; the strength was greater at -10°C than at -5°C.

The relaxation of an induced force due compression applied was also measured. Before a sample reached a point of failure, the movement of the crosshead was stopped and a decrease of force due to a creep of ice was measured, as seen in Fig. 7. The modified Maxwell unit model was used to calculate Young's modulus and viscosity (Eqs. 1-7). The results are shown in Table 2.