



Title	ボスニア湾海氷調査 : 静荷重によるたわみ
Author(s)	青田, 昌秋; 鈴木, 義男; 田畑, 忠司
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 195-200
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/18312">http://hdl.handle.net/2115/18312</a>
Type	bulletin (article)
File Information	34_p195-200.pdf



[Instructions for use](#)

## ボスニア湾海水調査 IV.\*.\*\*

— 静荷重によるたわみ —

青田昌秋・鈴木義男・田畑忠司

(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

### I. ま え が き

海水の力学的性質は、その温度と塩分量に依存する。ボスニア湾の海水の塩分量は4~6%でふつうの海水のその数分の一にすぎないので、そこで生成する海水の塩分量もきわめて少ない。このような低塩分の海水の力学的性質についての報告はない。

筆者らは、1975年2~3月のボスニア湾海水調査に際し、ノルビッツァー島(北緯63°、東経20°)周辺で、海水の曲げ強度と静荷重による氷の梁のたわみとの測定を行った。曲げ強度についてはすでに報告した<sup>1,2)</sup>。ここでは、静荷重による海水の粘弾性挙動について報告する。

### II. 測定方法

測定は、前報<sup>1)</sup>第1図のA, B2地点で行なった。A点の氷厚は約34cmで、これから長さ2m前後、幅約30cmの氷の梁を切り出し、氷上にひきあげ両端を氷塊で支えた上、更に中央に荷重し、たわみを6~7時間にわたって記録した。B点は氷厚約50cmで、ここでは氷板を一部切りとり、長さ2, 3m、幅約30cmの水に浮んだ片持梁を作り、自由端に荷重し、さらにある時間後、荷重を除去し、たわみの変化を調べた。たわみは電磁式変位差計で連続記録した。

### III. 測定結果

#### 1. 海水の状況

測定時の氷温は全層融点に近く、A点では $-0.4 \sim -0.3^{\circ}\text{C}$ 、B点では $-0.7 \sim 0.0^{\circ}\text{C}$ 、また海水と海水の塩分量はA点で4.2‰と0.66‰、B点で4.0‰と0.67‰であった。

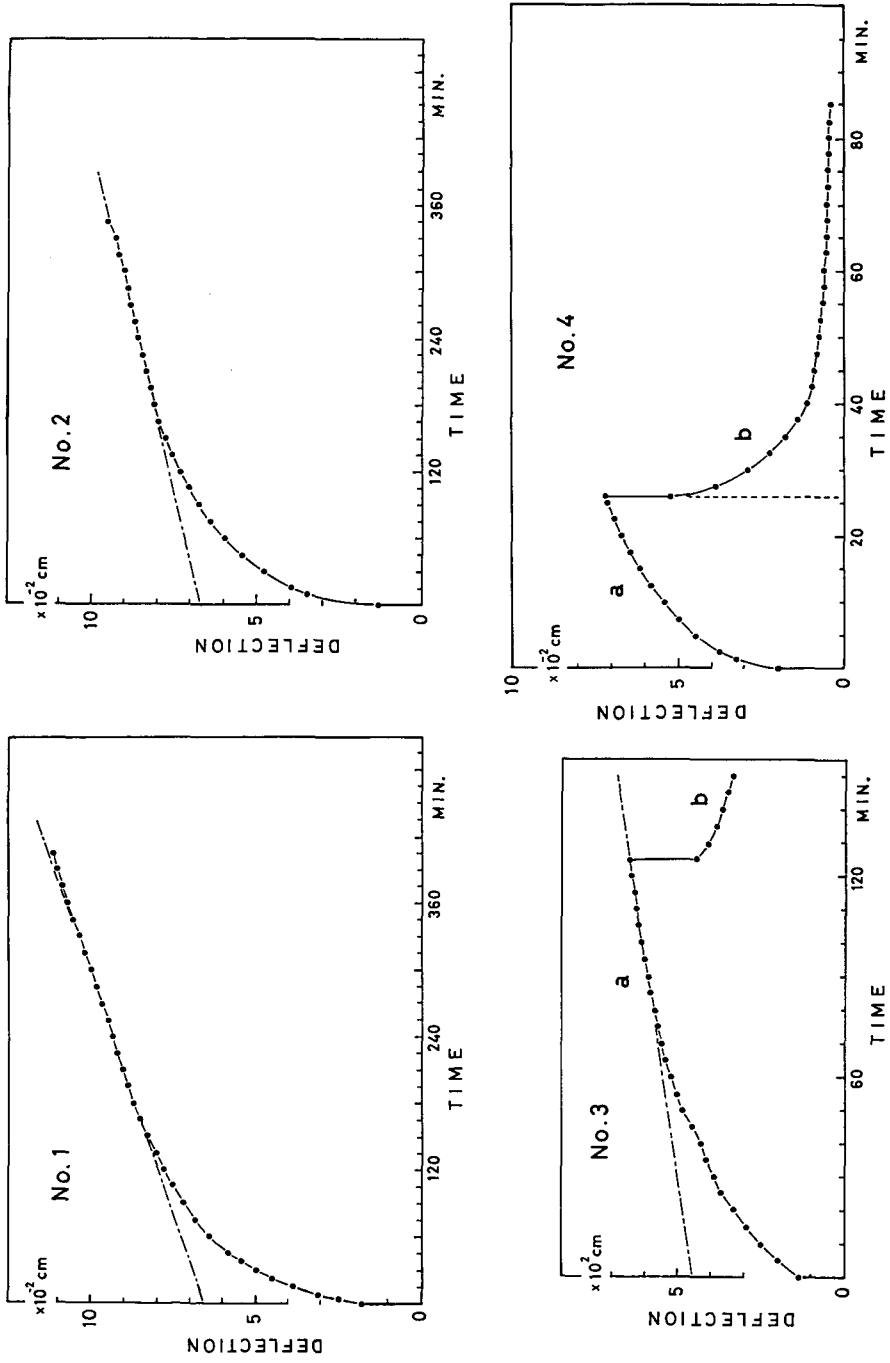
このような低塩分にもかかわらず、海水の結晶構造は、塩分量4~10‰のふつうの海水と同様で、A点で表層12cm、B点で表層8cmが粒状構造で、下層はモザイク構造であった<sup>1)</sup>。

#### 2. 時間一たわみ曲線

えられた時間一たわみ曲線を第1図に示す。No. 1, 2はA点、No. 3, 4はB点での測定である。荷重時(No. 1, 2と3, 4のaの部分)では、荷重の瞬間ある有限量Aだけたわみ、以

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1795号

\*\* 北海道大学低温科学研究所 流水研究施設 研究報告 第48号



第1図 時間-たわみ曲線

後たわみは次第に増加するが、たわみの変化率は次第に減少してある一定値  $B$  に近づいている。これらの曲線は、

$$S = A + Bt + C(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

でよく近似される。除荷時 (No. 3, 4 の **b** の部分) では、除荷の瞬間に荷重瞬間たわみ  $A$  にほぼ等しいだけたわみは減少し、以後たわみは有る有限値  $G$  に近づくようにみえる。No. 4 の **b** については、このたわみは

$$S = G + He^{-(t-t_0)/\tau} \quad (2)$$

でよく近似できた。これらの定数の値は、第2表に与えてある。

#### IV. 結果の解析

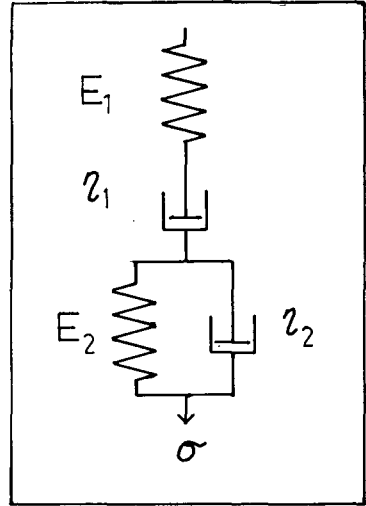
##### 1. バーガス模型

たわみの上述の性格は、ばねと緩衝器の直列模型 (マクスウエル模型) と並列模型 (ケルビン模型) を直列につないだバーガス模型 (第2図) でよく説明できる。粘弾性係数を図のようにきめ、応力  $\sigma$  を与えた時の、マクスウエル模型のばねと緩衝器の歪を  $\epsilon_0, \epsilon_1$ , ケルビン模型の歪を  $\epsilon_2$  とすると、

$$\sigma = S_0 E_1 \quad (3)$$

$$\sigma = \dot{\epsilon}_1 \eta_1 \quad (4)$$

$$\sigma = \epsilon_3 E_2 + \dot{\epsilon}_2 \eta_2 \quad (5)$$



第2図 バーガス模型

$t=0$  で  $\epsilon_0 = \epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$  とし、定応力  $\sigma_0$  が作用すると全体の歪  $\epsilon$  は、

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 + \epsilon_2 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-E_2 t / \eta_2}) \quad (6)$$

時刻  $t=t_0$  で応力を  $\sigma_1$  に変えると以後は、

$$\epsilon = \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t_0 + \frac{\sigma_1}{\eta_1} (t - t_0) + \left\{ \epsilon_0(t_0) - \frac{\sigma_1}{E_2} \right\} e^{-E_2(t-t_0)/\eta_2} + \frac{\sigma_1}{E_2} \quad (t \geq t_0) \quad (7)$$

ただし、

$$\epsilon_2(t_0) \equiv \sigma_0 (1 - e^{-E_2 t_0 / \eta_2}) / E_2 \quad (8)$$

除荷は (7) で  $\sigma_1 = 0$  とすることに等しい:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_1} t_0 + \frac{\sigma_0(1 - e^{-E_2 t_0 / \eta_2})}{E_2} e^{-E_2(t-t_0)/\eta_2} \quad (9)$$

測定 No. 3, 4 では、梁の自重は浮力にほぼ釣合っているのだから、たわみは荷重によってのみ起ると考えてよい。したがって、荷重時は (6) 式、除荷時は (9) 式で、たわみを  $\epsilon$  に、荷重の作用を  $\sigma_0$  に対応させればよい。一方測定 No. 1, 2 では、梁の両端を支えた時から自重によるた

わみが始まり、 $t=t_0$  で荷重を加えるとその作用が追加される。実際に測定したたわみは、 $t=t_0$  でのたわみを差引いたものだから、(7) と、(6) で  $t=t_0$  とした値との差、

$$\varepsilon - \varepsilon(t_0) = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} (t - t_0) + \left\{ \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-E_2 t_0 / \eta_2}) \right\} (1 - e^{-E_2 (t - t_0) / \eta_2}) \quad (10)$$

で、 $\varepsilon - \varepsilon(t_0)$  がたわみに、 $\sigma_0$  が自重の作用に、 $\sigma_1$  が荷重と自重の作用の和に対応し、また、時間も  $t_0$  を起点に測るのであるから、 $t - t_0$  を改めて  $t$  と考えればよい。

## 2. 自重および荷重の作用

模型の歪  $\varepsilon$  にたわみ  $S$  を対応させる時、 $\sigma$  に荷重もしくは自重をどう対応させるかは自明ではない。均質等方弾性体の梁のたわみと荷重および自重との関係から類推する。

弾性率  $E$  の均質等方弾性体について<sup>3)</sup>、

イ) 支点間距離  $l$ 、厚さ  $h$ 、幅  $b$  の両端単純支持梁の自重  $W_0$  による中心のたわみ  $S_0$  は、

$$ES_0 = 5 W_0 l^3 / 32 h^3 b = F_0 \quad (11)$$

ロ) 上記で自重を無視、中点に  $W$  の集中荷重した時のたわみ  $S_1$  は、

$$ES_1 = W l^3 / 4 h^3 b = F_1 \quad (12)$$

ハ) 厚さ  $h$ 、幅  $b$  の片持梁に支点より  $l$  の点に  $W$  の集中荷重した時 (自重無視)、荷重点のたわみ  $S_2$  は

$$ES_2 = 4 W l^3 / h^3 b = F_2 \quad (13)$$

で与えられる。測定 No. 1, 2 で (10) 式の  $\sigma_0$  に  $F_0$ 、 $\sigma_1$  に  $F_0 + F_1$  を、また No. 3, 4 では (6), (9) 式の  $\sigma_0$  に  $F_2$  を対応させるのが自然である。

## 3. 粘弾性常数の決定

模型の粘弾性係数と実験式 (1), (2) の係数との関係を整理すると次の通りである。

第1表 粘弾性常数の算出式

実験番号	1, 2	3 a, 4 a	3 b, 4 b
$E_1$	$F_1/A$	$F_2/A$	$F_2/\varepsilon(t_0) - G - H$
$\eta_1$	$(F_1 + F_0)/B$	$F_2/B$	$F_2 l / G_0$
$E_1$	$(F_1 + F_0 e^{-t_0/\tau})/C$	$F_2/C$	$F_2 (1 - e^{-t_0/\tau})/H$
$\eta_2$	$E_2 \tau$	$E_2 \tau$	$E_2 \tau$

第1表による計算結果を関係ある諸元とともに第2表に示した。No. 1, 2 の  $E_2$  の計算では  $t_0$  として 10 分をとった。梁の両端を支持した後、変位差計の設置調整のため、荷重までに約 10 分を要したのである。

## V. 結 語

ボスニア湾の海水の粘弾性を定荷重法で調べた。沿岸氷からきりだした梁を水上にあげ、両端を単純支持し、中央に荷重した時のたわみの測定 2 例と、沿岸氷を適当にきり、片持梁を

第2表 粘弾性常数值

実験番号	1	2	3 a	3 b	4 a	4 b
長さ $l$ (cm)	203.5	167.0	295.0	295.0	244.0	244.0
厚さ $h$ (cm)	33.9	32.9	48.3	48.3	51.3	51.3
幅 $b$ (cm)	27.0	29.5	27.6	27.6	29.9	29.9
自重 $W_0$ (kg)	170.0	150.0	—	—	—	—
自重力 $F_0$ (dyne/cm)	$2.09 \times 10^8$	$1.02 \times 10^8$	—	—	—	—
荷重 $W$ (kg)	15.8	29.3	29.3	除荷	42.0	除荷
荷重力 $F_1, F_2$ (dyne/cm)	$0.31 \times 10^8$	$0.32 \times 10^8$	$9.48 \times 10^8$	除荷	$5.92 \times 10^8$	除荷
$A, G$ (cm)	$1.9 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$		$2.0 \times 10^{-2}$	$0.4 \times 10^{-2}$
$B$ (cm/min)	$1.17 \times 10^{-4}$	$0.8 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$		$1.5 \times 10^{-4}$	
$C, H$ (cm)	$4.7 \times 10^{-2}$	$5.4 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-2}$		$5.0 \times 10^{-2}$	$4.8 \times 10^{-2}$
$\tau$ (min)	34	44	30	30	7	7
$E_2$ 補正用 $e^{-t_0/\tau}$	0.75	0.80	—		—	0.028
$E_1$ (dyne/cm <sup>2</sup> )	$1.63 \times 10^9$	$2.45 \times 10^9$	$6.77 \times 10^{10}$	$4.74 \times 10^{10}$	$2.96 \times 10^{10}$	$2.96 \times 10^{10}$
$\eta_1$ (dyne·min/cm <sup>2</sup> )	$2.0 \times 10^{12}$	$1.7 \times 10^{12}$	$5.9 \times 10^{12}$		$3.95 \times 10^{12}$	$3.85 \times 10^{12}$
$E_2$ (dyne/cm <sup>2</sup> )	$0.4 \times 10^{10}$	$0.2 \times 10^{10}$	$3.0 \times 10^{10}$		$1.18 \times 10^{10}$	$1.20 \times 10^{10}$
$\eta_2$ (dyne·min/cm <sup>2</sup> )	$1.4 \times 10^{11}$	$0.9 \times 10^{11}$	$8.9 \times 10^{11}$		$0.82 \times 10^{11}$	$0.84 \times 10^{11}$

作り海に浮んだままの状態から自由端に荷重した時のたわみの測定2例について報告した。個々の測定は途中除荷の場合も含め、単一のバーガス模型でよく説明できたが、この模型に基づいて求めた粘弾性常数は、同種の氷の同様な実験 (No. 1 と 2, No. 3 と 4) でもあまりよい一致を示さなかった。これは、2層構造の上、下層は明らかに異方性の氷を、均質方体として取り扱かうことに無理があったのであろう。測定4の緩和時間 $\tau$ が、他に比べ小さいのはこの時の氷温がとくに融点に近かったとして説明できるかも知れない。測定1, 2と測定3, 4で $E_1$ の値が10~40倍も違った理由は明らかでない。今後、充分検討する必要がある。

この調査は文部省科学研究費海外学術調査費により行なわれた。

現地観測に際しては、スウェーデン国立気象海象研究所主任研究員 Thompson 博士、ならびにウメオ大学研究員 Åke 氏夫妻をはじめ、ノルビッチャー島の方々の御援助をうけ、また、石田、小野の両調査隊員には測定に種々御協力を頂いた。データ整理については、大学院生、納口恭明君の助力を得た。厚く感謝します。

## 文 献

- 1) 田畑忠司 1975 ボスニア湾海水調査. 低温科学, 物理篇, **33**, 191-198.
- 2) 田畑忠司・鈴木義男・青田昌秋 1975 ボスニア湾海水調査. II. 曲げ強度の測定, 低温科学, 物理篇, **33**, 199-206.
- 3) 例えは. P. Black Strength of Materials 1966 PERGAMON PRESS. 第10章.

### Summary

Visco-elastic behaviors of sea ice were investigated in situ off Norrbyskär Island, Sweden, in March 1975 as a part of the project "Ice Study in the Gulf of Bothnia".

Two kinds of measurements were adopted: In the one kind (Test Nos. 1 and 2), a rectangular ice beam, sawed out from and pulled up on the shore ice, was supported by two ice blocks at its both ends. Then, a load was applied on the center of the beam and deflection was continuously recorded. The deflection was caused by both the applied load and the weight of the beam.

In the other kind (Test Nos. 3 and 4), an appropriate portion of the shore ice was taken off so as to leave a cantilever ice beam in the shore ice. A load was then applied on the free end of the beam, followed by continuous recording of the deflection. The weight of the beam being approximately canceled out by the buoyancy of sea water, the deflection was considered to be caused only by the load. The recovery of the deflection was also observed by removing the load during the recording.

The ice had a very low salinity of about 0.7‰ but its structure was very similar to that of an ordinary sea ice with a salinity of 4-10‰. The temperature of the ice during the observations was near to the melting point.

The obtained deflection-time curves are shown in Fig. 1. The curves are well interpreted by the Burgers model (Fig. 2), which gives the following expressions for a deflection-time curve:

$$S = A + Bt + C(1 - \exp(-t/\tau)) \quad \text{during constant loading}$$

$$S = G + H \exp(-t/\tau) \quad \text{after removal of load}$$

The constants  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $G$ ,  $H$  and  $\tau$  are determined from the obtained curves, and the visco-elastic coefficients of the model are calculated. They are tabulated in Table 2. The relaxation time  $\tau$  was short in Test No. 4, which may be explained by an assumption that the ice temperature in this test was nearer to the melting point than in the other tests. No reasonable explanation has been given to a large discrepancy between the values of Young's modulus  $E_1$  in Test Nos. 1, 2 and those in Test Nos. 3, 4.