HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海氷の粘弾性係数の測定
Author(s)	田畑, 忠司
Citation	低温科學. 物理篇, 14, 25-31
Issue Date	1955-12-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17895
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p25-31.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Tadashi TABATA 1955 A Measurement of the Visco-Elastic Constants of Sea-Ice. *Low Temperature Science, Ser. A, 14.* (With English résumé p. 31)

海氷の粘彈性係數の測定*

田畑忠司

(低温科学研究所　海洋学部門)

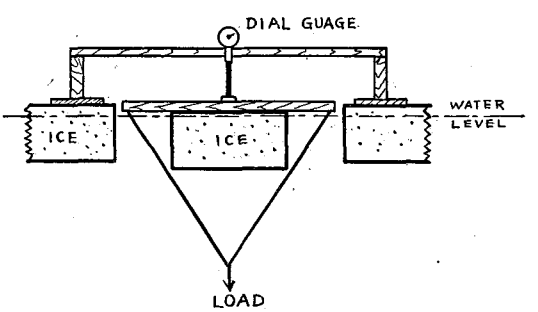
(昭和30年10月受理)

まえがき

砕氷船またはその他の船で海の氷を破壊しながら航海したり，港内に張りつめた氷を打ちくだいたり又押し寄せる流氷の圧力に耐え得る防波堤ないしは防護設備を作ろうとするような場合には，基礎的資料の一つとして海氷の粘彈性に関する智識を必要とすることはいうまでもない。しかし現在までにこの様な研究はあまり行われていない様である。筆者は数年前より海氷の棒を作つてそれを弯曲させるという方法でそれらの測定を行い[1]，海氷の彈性係数，粘性係数として夫々大凡 $10^{10}dyne/cm^2$, $10^{10}dyne\cdot min/cm^2$ の値を得た。しかしその当時の測定にはいろいろと問題になる点もあり，又測定の精度も不足であると思われたので測定方法に多少の改善を施して，1955年2月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それらの測定を行つた。

I. 測定方法

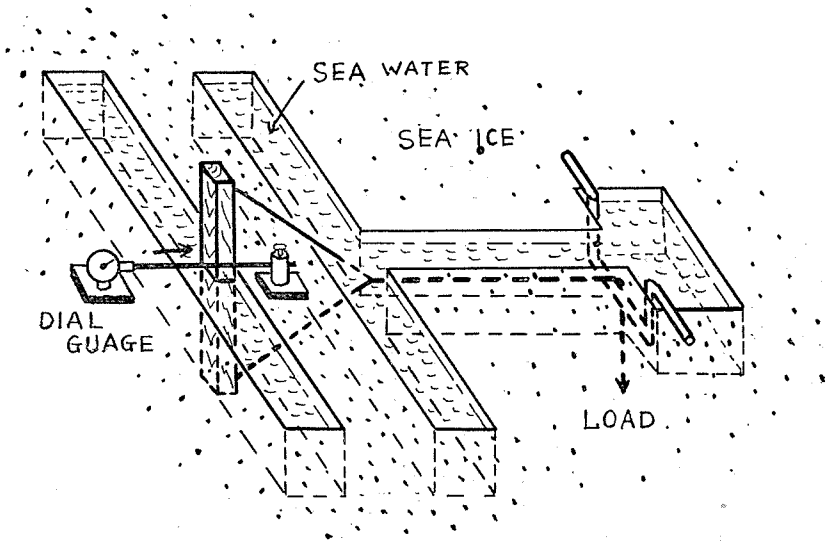
測定には前回と同様に海氷の棒を作り，荷重を加えた時のその弯曲から粘彈性係数を求める方法を用いた。荷重には中に穴の開いた鉄の塊を用い，棒の撓みは dial guage を用いて読みとつた。測定に用いた氷の棒は第1図(b)及び写真に示す様にして作つた。その長さは1.5～3 m，幅は20～30 cm であり，氷の棒の厚さ即ち氷厚は15～25 cm であつた。この様な棒の中央に荷重を加えて弯曲せしめたが，荷重には鉄塊 (1個の重量は約13 kg) を1個もしくは数個用いた。



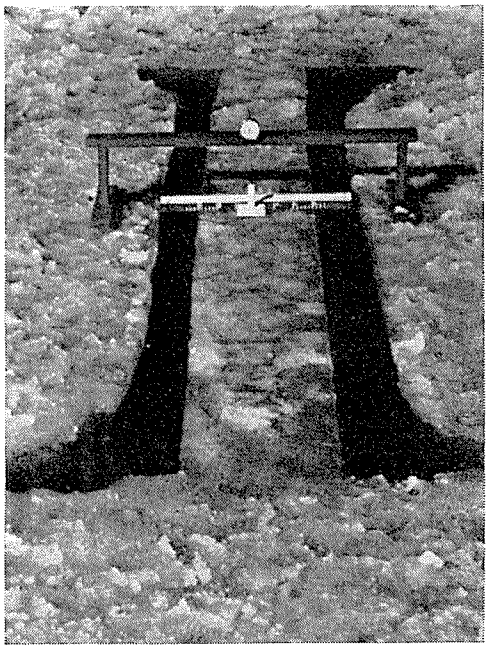
第1表 (a)　海氷に鉛直に荷重を加える方法

海の氷は垂直にならんだ小さなたんざく状の薄氷片の集合体であり，しかも各薄片の結晶の主軸は水平方向を向いている。

* 北海道大学低温科学研究所業績　第292号



第 1 圖 (b) 海氷を水平方向に引張る方法



粘彈性係数の測定方法 (荷重は海水中)

したがつて結氷板に垂直な方向と水平の方向とではその機械的性質が異なることが考えられる。この点を考慮して荷重を作られた氷の棒に対して上及び側方の二方向から加えてその各々の場合の時間歪曲線を求めた。

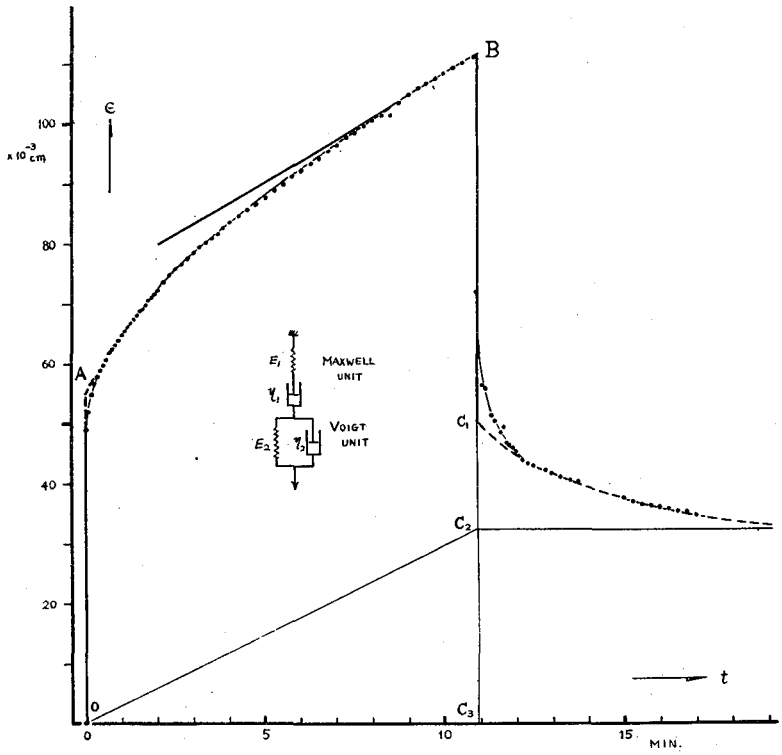
第1図(a)及び写真1は鉛直方向に荷重を加えた場合の測定方法である。荷重は丈夫な木の棒の両端から鋼鉄線で海水中に吊したり又は氷の棒の上に載せた。dial guage は図及び写真に示した様に周囲の不動氷に対して固定し，更に氷の棒の上に置いた小さな錘と細い鋼鉄棒で連絡せしめておいた。氷の棒が荷重によつて沈降すると dial gauge の先端が下に引つ張られそのため指針が回転するので氷の棒の沈下量を簡単にしかも 1/500 mm 位の精度で読みとることが出来る。

第1図(b)は氷の棒に水平方向に荷重を加えた時の測定方法である。図の様に丈夫な木の棒の両端に掛けた鋼鉄線によつて氷の棒をはさみその鋼鉄線を氷に固定された鉄の棒をまわして先端に荷重を釣り下げた。氷の棒の移動量は図に示したように，不動氷に固定された dial guage の先端が氷の上に固定した錘によつて引つ張られるようにしてあるので直ちに読みとることが出来る。

何れの測定においても氷の棒に捻れの力を与えない様に注意した。測定は次々に荷重を加えることは止めて単一の荷重を加えて行つた。荷重を加える前に dial guage を読み，荷重を加えた瞬間から5～15 sec おきに棒の変位を読みとり3～10分間経て dial guage の読みの変化が直線的になつた時を見はからつて荷重をとり去つた。その後も氷の棒が殆んど安定な位置に来るまで測定を続けた。測定時間は場合によつて異なるが大凡6～25分間であつた。測定の際の氷の棒の最大沈下量及び最大移動量は 0.04～0.1 cm であつた。氷が水中に沈下すると浮力が増すので荷重の実効重量は減少することになる。しかしこの程度の沈下量に対してはその浮力の増大量は 150 g 位であり，加えた荷重は 15～60 kg であつたから殆んど問題にするにはあたらない。dial guage は非常に感度が良いので，測定している周囲を人が歩きまわるために起る僅かな氷の変位や，露出した水面に風で生ずる波によつて起る氷の棒の振動にも感じた。そのために測定は，沖合に流氷があつて殆んどうねりがなく且つ風も弱くて水面に波が立たない様な日をえらぶ必要があつた。観測期間中にこの様な天候の日は極めて少なく測定はあまり数多くは出来なかつた。

II. 時間—歪曲線

第2図に上に述べた測定の結果得られた時間—歪曲線の一例を示す。図から明らかな様に荷重を加えた瞬間に先ず弾性変形が起り引きつづいて retarded elastic deformation が生じているがそれは間もなく viscous deformation に移つていることがわかる。荷重をとり去つた時にも——測定時間が短いのでおわりの方は図にはあまりはつきり現われていないが——先ず弾性変形があらわれつづいて retarded elastic deformation が測定され，最後に viscous deforma-



第 2 圖 時間—歪曲線の一例

tion が残つている。ある力を加えた時にこの様な変形をする物質は数多く知られて居り，その物質の粘弾性的性質は第2図に同時に記入した Maxwell Unit と Voigt Unit を直列につないだ機械的模型でおきかえられることが粘弾性の理論から良く知られている。例えば吉田，小島[2]によると積雪の粘弾性は全く同様な模型であらわされる。この場合には Maxwell Unit と Voigt Unit の弾性係数と粘性係数を図に示したように夫々 E_1, E_2, η_1, η_2 とすれば歪 ϵ は次の式であらわされる。

$$\begin{aligned}\epsilon &= \text{Elastic deformation} + \text{retarded elastic deformation} + \text{Viscous deformation}\\ &= AO(BC_1) + C_1C_2 + C_2C_3\\ &= \frac{s}{E_1} + \frac{s}{E_2}\left(1-e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}\right) + \frac{s}{\eta_1}t\\ &= \frac{s}{E_1} + \frac{s}{E_2}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) + \frac{s}{E_1}\left(\frac{t}{\tau_1}\right)\end{aligned}$$

但し s は歪力であり，この場合には荷重の重量を W，氷の棒の長さ，厚さ及び幅を夫々 l, d 及び b とすると $s=Wl^3/4d^3b$ である。又 $\tau_1=\eta_1/E_1$ 及び $\tau_2=\eta_2/E_2$ は夫々弾性緩和時間 (relaxation time)，弾性遅延時間 (retardation time) と呼ばれる量である。全く同様な関係が荷重をとり去つた時の変形についても成り立つ。

観測された時間—歪曲線から上に述べた式の各係数を求めることによつて容易に海氷の粘弾性係数を知ることが出来る。海氷が理想的な Maxwell-Voigt body であれば例えば荷重を加えた時と取り去つた時に測定された弾性歪は等しく，したがつてそれより求めた弾性係数も等しい筈であるが実際にはのちに述べる様に必ずしも一致しなかつた。

III. 測定の結果

以上に述べた方法で得られた海氷の粘弾性係数を次の第1表に示した。表中の E_1 は荷重を加えた瞬間に生じた弾性歪から求めた弾性係数で，E_1' は荷重をとり去つた時に測定された弾性歪から求めた弾性係数である。E_2 と E_2'，η_2 と η_2'，τ_2 と τ_2' についても同様の関係である。

第 1 表　海氷の粘弾性係数

		E_1	E_1'	E_2	E_2'	η_1
8/II 12h	1	4.83×10^{10}	5.91×10^{10}	8.93×10^{10}	14.7×10^{10}	9.07×10^{11}
11/II 16h10	2	9.04×10^{10}	10.3×10^{10}	10.3×10^{11}	21.6×10^{10}	12.23×10^{11}
19/II 10～12h	3	2.37×10^{10}		11.1×10^{10}		9.24×10^{11}
〃	4	2.51×10^{10}	2.23×10^{10}	7.46×10^{10}	7.76×10^{10}	4.82×10^{11}
〃	5	3.21×10^{10}	3.66×10^{10}	$18.2\times10_{10}$	$7.82\times10_{10}$	$11.95\times10_{11}$
		η_2	η_2'	τ_1	τ_2	τ_2'
8/II 12h	1	4.31×10^{11}	1.96×10^{11}	18.8	3.59	1.33
11/II 16h10	2	3.54×10^{11}	1.51×10^{11}	13.6	3.43	0.70
19/II 10～12h	3	0.96×10^{11}		39.0	0.86	
〃	4	1.79×10^{11}	2.47×10^{11}	19.2	2.39	3.19
〃	5	1.19×10^{11}	2.22×10^{11}	37.2	0.65	2.84

E_1, E_1', E_2, E_2': $dyne/cm^2$; η_1, η_2, η_2': $dyne\cdot min/cm^2$; τ_1, τ_2, τ_2': min.

表から明らかなように，海氷のそれぞれの係数の測定値は割合に良く一致している。ただ No. 2 の測定例の E_2 の値が他の例の値よりも可成り大きいのが目につく。海氷の弾性係数は氷の温度，塩分などによつて可成り異なることが勿論考えられるが，この場合には温度も塩分も他の測定例とあまり異なつていないので E_2 がこの様に大きな値を示した理由はよくわからない。海氷が理想的な Maxwell-Voigt Unit であるならば既にのべた様に，$E_1=E_1'$，$E_2=E_2'$，$\eta_2=\eta_2'$，$\tau_2=\tau_2'$ となる筈である。しかし測定の結果によると必らずしも一致していないことがわかる。この違いは E_1 では殆んど問題にならない程度であるが，E_2 及び η_2 したがつて τ_2 においては可成り見られる。E_1 と E_1' が割合に良く一致しているのに，E_2 と E_2' の違いが相当大きいことの原因は測定例が少ないので良くわからないが一応は注目すべきことであろう。傾向としては，E_2' が E_2 より大きな場合には η_2' が η_2 より減少してをり，E_2' が E_2 より小さい場合には η_2' は η_2 より大きくなつているようである。

測定例のうち No. 2, No. 5 は結氷面に平行に力を加えたものである。僅か2個の測定値なのであまりはつきりしないが，海氷の水平方向の粘弾性係数は垂直方向のそれらよりは大きい傾向があることはわかる。この傾向は海氷の結晶の主軸が結氷面に垂直であることからも期待されるところである。なお将来の測定によつて更に確かめ度いと思つている。

筆者が1948, 1950年に網走港，能取湖等で行つた測定によると海氷の弾性係数は1～6 $10^{10}dyne/cm^2$ であつた。この結果は本報告で述べた測定結果とも一致する。したがつて，海氷の弾性係数はこの程度のものであると見做してもそう大きな過ちではあるまいと思われる。

IV. 結　　語

海氷の棒を作つてその中心に荷重を加えた場合の時間—歪曲線を測定した結果，海氷の粘弾性的性質は Maxwell-Voigt body であらわれることがわかつた。その粘弾性係数は $E_1=2\sim9\times10^{10}dyne/cm^2$, $E_2=8\sim18\times10^{10}dyne/cm_2$, $\eta_1=4\sim12\times10^{11}dyne\cdot min/cm^2$, $\eta_2=1\sim4\times10^{11}dyne/cm^2$, 弾性遅延時間 $\tau_1=14\sim39$ min, 弾性遅延時間 $\tau_2=0.9\sim4$ min の程度であつた。弾性係数は既に数年前に筆者が別の方法で測定した結果とも一致している。

海氷の粘弾性的性質はその温度，塩分及び成長の仕方による構造上の相違その他の条件によつて可成り変化するものと思われる。しかし何分にも測定回数が少ないので現在までのところそれらの要素もしくは条件との関係を議論することは出来ない。なお測定を続けてこれらの諸点を明らかにしたいと思つている。

この研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によつた。測定の労を分担された楠宏，鈴木義男両氏に厚く感謝いたします。

文　　献

1) 福富孝治・楠　宏・田畑忠司 1954 海氷の研究 (第21報), 北海道オホーツク海沿岸の海氷調査. 、低温科学, *Ser. A*, ***13***, 59.
2) 吉田順五 1953 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学, ***10***, 1.
3) 小島賢治 1954 積雪の粘弾性. 低温科学, *Ser. A*, ***12***, 1.

Résumé

Measurements of visco-elastic constants of sea ice have been carried out in February at Monbetsu located on the Okhotsk sea coast of Hokkaido. The principle of measurement was the bending method which is frequently applied to obain Young's modulus of solid specimen. An ice bar was deflected under static loading and its stress was measured by using a dial gauge. Visco-elastic constant was obtained from the strain-time curve. Fig. 2 shows an example of such curve of ice bar. In applying the dynamical model of rheology, the observed strain-time curve of ice bar may have the

same character as that constructed by a series connection of Maxwell unit and Voigt unit. As is shown in Fig. 2, elastic constants of spring and viscosity of dashpots of the model are taken as E_1, E_2 and η_1, η_2 respectively, the total stress ϵ being expressed as follows;

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

where $s=Wl^3/4d^3b$, W is the weight of load, l the length of ice bar, b the width and d the thickness, $\tau_1=\eta_1/E_1$, $\tau_2=\eta_2/E_2$; τ_1 and τ_2 are relaxiation time and retardation time respectively. The results are made into tabular form in the Table. It will be recognized that E_1 and E_2 of sea ice have the same order of magninude, and η_1 and η_2 also have the same order. It will easily be understood that the elastic constant of sea ice will depend on the temperature, salinity and other conditions. However, in the present study, the dependencies on those factors were not clearly ascertained.