HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷の流動学的性質について
Author(s)	若浜, 五郎
Citation	低温科學. 物理篇, 16, 227-240
Issue Date	1957-12-13
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17937
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p227-240.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Gorow WAKAHAMA 1957 On the Rheological Properties of Ice. I. *Low Temperature Science, Ser. A, 16.* (With English résumé p. 239)

氷の流動学的性質について I.*

若浜五郎
(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和32年7月受理)

I. まえがき

ある一定の力を加えられたとき，氷はどのように変形するだろうか，という問題は，19世紀後半になつて初めて取り上げられた。先づ Reusch[1] (1864), Pfaff[2] (1875), Koch[3] (1885) らは，圧縮，引張りおよび曲げの応力を加えたときの氷の振舞について調べた結果，氷は塑性変形することを見出し，次いで Main[4] (1887), McConnel-Kidd[5] (1888) は，氷の変形速度は，温度や応力の函数であるのみならず，氷の結晶軸と応力方向との間の角度によつても変ることを見出した。

その後は，この問題はあまり手をつけられなかつたが，最近氷河の「流れ」の問題が盛に研究され，また，海氷のいろいろな機械的性質が重要視されて来たので，その方面の研究も活発になつて来た。

それらのうちでも，Haefeli[6], McCall[7] の氷河のトンネル収縮実験，Gerrard[8], Perutz[9] らの氷河の垂直速度分布の研究，それに関連した Nye[10] の理論的考察，de Quervain[11] の粘弾性実験，Glen[12] の多結晶氷のクリープに関する研究などが有名であり，また，アメリカの SIPRE (Snow, Ice and Permafrost Research Establishment) でも氷や雪の機械的性質の研究を組織的に行なつている。

海氷については，田畑[13] が海氷に圧縮応力を加えたとき得た時間—歪曲線を解析して，海氷は Maxwell-Voigt 模型で大体表わされることを確かめ，弾性係数，粘性係数などを求めた。Griggs と Coles[14] は，人工および天然の巨大な単結晶に圧縮応力を加えた結果，変形は時間と共に加速的に進行し，それは基底面の「滑り」による事を見出した。また，中谷[15] は氷河の巨大な単結晶から切り出した氷棒に弯曲試験を行なつた結果，氷の変形はその基底面に平行に無数に存在する滑り層で起る滑りによることを見出した。以上の諸実験は静的な力を加えた場合であるが，動的な力を加えたものとしては，山地—黒岩[16] の振動法 (共鳴法) による実験がある。

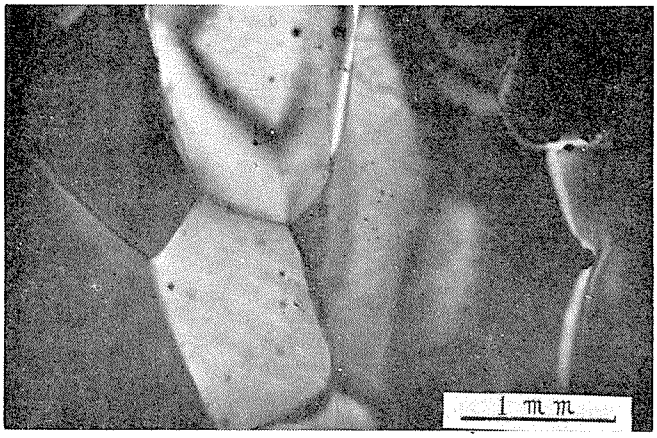
筆者は一般に氷が応力 (法線応力と剪断応力) を受けた場合，どのように振舞うかを系統的に調べるように吉田順五教授から示唆を受けて以来，その実験を計画して来たが，予備実験として，氷の角柱に引張り応力をかける実験を行なつたので，その結果をここに報告する。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第380号

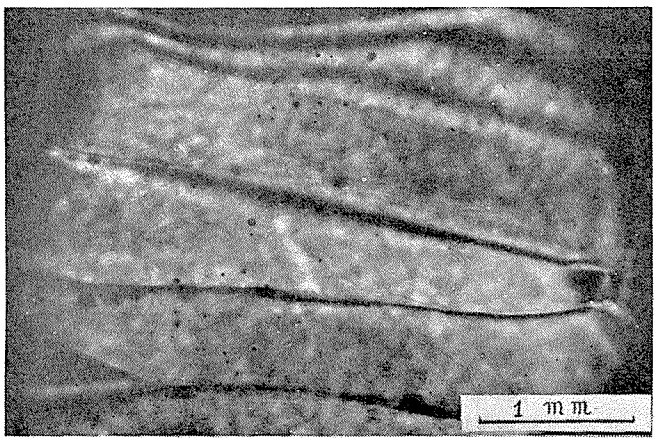
II. 測定の方法と装置

(1) 試料の作成　実験試料の材料としては「つらら」の氷を用いた。予備実験なので北海道としては最も手に入れやすい「つらら」を使つたわけである。なるべく良質の「つらら」を高速回転ノコギリで大体の寸法に切り，次に「カンナ」でていねいに削つて垂直断面が正方形の角柱になるように仕上げた。実際に使つた試料は，断面が 1.4 cm 角のものと 1.9 cm 角のもので，長さは大体 25 cm であつた。断面の寸法の誤差は ±1 mm 以内である。

この氷の柱を，その長さの方向に引張つて伸びを測定するのであるが，測定中の試料の昇華変形を防ぐために，試料全表面にレプリカ用溶液(Formvar 液の二塩化エチレン溶液)を厚め

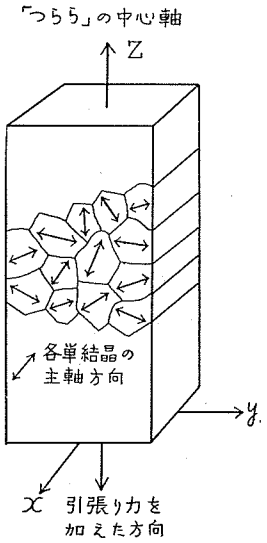


(a)



(b)

写真 1　試料から切り出した氷の薄片の偏光写真。(a) 試料の側面に平行に切り出した薄片。(b) の一部試料の中心軸に直垂に切り出した薄片の一部。



第1図　試料を構成している単結晶粒の状態，その主軸方向および引つ張り力を加えた方向を模型的に示した図。

に塗布する。これだけで昇華を完全に防ぐことは勿論出来ないが，数十時間程度の測定期間中におこる昇華変形はほとんど防止出来る。また，恒温槽内部には氷の破片や霜を多量に入れて湿度を高める。このため恒温槽のガラス窓には霜が付着して観測を阻害することもあるが，二重窓の間には乾燥剤を入れ，観測窓には排水性の Dri-film を塗布して窓霜を防止した。

試料の氷は「つらら」からとつたものなので，小さい氷の単結晶粒の集合である。各単結晶粒の大きさ，それらの結晶軸の方向，また測定中に起るかも知れない再結晶を調べるために，試料を切り出した「つらら」の一部からと実験終了時の試料からと氷の薄片を作り，直交ポラロイドを通して観察し，また，チンダル像[15]を作つて調べた。用いた「つらら」の単結晶粒は一辺が大体 1～3 mm，長さが 15 mm 位の角柱状の細長い単結晶で，ほぼ同方向に並び，その長軸方向は「つらら」全体の中心軸の方向と直交している場合が最も多かつた（写真 1）。これを模型的に示したのが第 1 図である。今，x, y, z 軸を図のように選ぶと，各単結晶粒の主軸は yz 平面内に含まれ，その向きは乱雑に分布していることがわかつた。すなわち，各結晶粒はその副軸の方向に成長したことになる。吉田[17]らも「つらら」を構成している氷を，X 線を用いて調べた結果，同様な結果を得ている。

Glen は，氷に引張り力を加えた場合は，(i) 破砕が起り易いこと，(ii) ある断面に局部的な縮みを生じた場合，そこに大きな応力が加つて伸びが不均一になる，などの点を心配して，引張り試験をやめて圧縮試験を行なつたのだと述べている。しかし，元来圧縮試験よりも引張り試験の方が秀れていることは一般的な事実である。何故ならば，立方体の試験片を試験機内に設けた 2 枚の平行平面板の間で圧縮をする場合には，一般に圧縮力が断面内に一様に分布すると仮定するのだが，実際の応力はたとえ両面が完全に密着する場合でも，はるかに複雑な分布をするからである。したがつて，圧縮試験は主として石，コンクリートなどのような脆い材料に対してしか行なわれない。氷は非常に脆い物体であるが，筆者の実験では 2～4 萬倍という高倍率で変形を拡大したため，加える力が小さくてすんだので (Glen の約 1/10)，そのため破砕は勿論のこと，ある面での部分的な縮小もほとんど考慮する必要はなかつた。また，加えた力が小さかつたため再結晶による試料の状態の変化も，顕微鏡で観察する限りではほとんど認められなかつた。

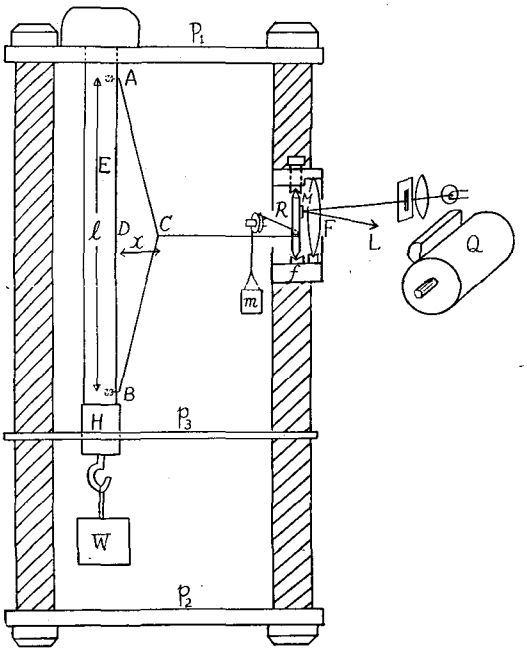
(2) 測定方法　氷の弾性変形や「流れ」は極めて小さいものであるから，高倍率の拡大装置が必要である。今の場合，氷の柱の極めて僅かな伸びを測定することになるが，ここで採用した方法は，単純引張りで針金のヤング率を求めるときによく用いる方法と同一原理のものである。第 2 図に示すように吊り下げられた試料 E の二点 A, B 間 ($\overline{AB}=l$) に l より僅かに長い細い燐青銅の線 ACB をとりつける。ACB の中点 C に連結された他の燐青銅線 CRm は垂直固定軸の周りに自由に回転しうる細い鋼製回転子 R をへて，小さな錘 m によつて水平に引張られている。今，氷の試料の下端に重錘 W をかけた場合を考えよう。加えられた力によつて $\overline{AB}$ が伸び，C はそれにつれて左に移動するので，R が回転し，同時に R に取り付けられた反射鏡 M が回転する。W による $\overline{AB}$ の伸びを dy, $\overline{AB}$ の中点 D と C の距離 $\overline{CD}=x$,

点 C の水平変位を dx とすると dx は，$dx \approx -l/x \cdot dy$ で与えられる。つまり x を l に比べて小さくとれば (l/x) は大となり，小さな伸び dy に対して C 点の変位 dx は (l/x) 倍に拡大される。

さて，光源から出た光は，鏡 M で反射され，長焦点凸レンズ F(焦点距離1 m)を通つて回転ドラム Q 上に焦点を結ぶ。C 点の変位 dx に対応して回転子 R (半径 r)は (dx/r) の角だけ回転するから，回転による光線の Q 上における移動距離 ξ は，$\overline{MQ}=L$ とすれば

$$\xi = \frac{2L}{r} \times dx = \left(\frac{2L}{r}\right) \times \left(\frac{l}{x}\right) dy$$

で与えられる。例えば，今 $L=100$ cm, $l=20$ cm, $r=0.05$ cm, $x=2$ cm とすると，$2Ll/rx=40{,}000$ となり，4万倍の高倍率が得られる。このようにして比較的簡単に，氷の棒の伸びが回転ドラムに巻いた印画紙に記録される。



第2図 試料支持用フレームと拡大記録装置

なお，ここで注意しことは，筆者が求めた試料の伸びは，試料全体のそれではなくて，試料の中間の一部 $\overline{AB}$ の伸びを直接測定したことである。こうすれば，試料の両端に生ずる不均一な応力によつて起る不規則な変形を記録しないですむ。従来発表されたこの種の測定では，あまりこの点に注意が払われていなかつたようである。

(3) 実験手続きと装置，測定上の注意　実験はすべて低温実験室(−15°〜−25°C)の一部を暗幕で仕切つたなかで行なつた。装置は(A)光源部分，(B)本体(試料固定用フレームと拡大装置)，(C)記録部分の三部分から成り，本体だけを低温恒温槽内に入れた。

(A) 光源部分　光源には6.3 V 用豆球を用い，光線はコンデンサーレンズ，スリットをへて拡大装置の鏡に向う。

(B) 本体　氷の試料を固定し，拡大装置を取りつけるためのフレームは第2図に示すように，4本の真鍮製の太い円柱(直径2.5 cm)で支えられた上下二枚の厚い真鍮板 P_1, P_2(厚さ6 mm)から成り，上の板 P_1 には一辺1.5 cm と2.0 cm の正方形の穴が抜いてある。また，P_1, P_2 の中間には円柱の上から下までの任意の場所に固定し得るようにした別の金属板 P_3 があつて，この板にも P_1 にあけたと全く同一の場所に穴があけてある。

さて，先づ(1)で述べたようにして準備した氷の角柱試料 E の上下二点 AB 間に細い燐青銅線(電磁オツシロ用 strip, 48番線) ACB をとりつける。この際，あらかじめ線の両端には小

さな金属製のフックをハンダ付けしておく。それを，試料の A, B 点に小さな穴をあけて完全にうめ込んでしまい，さらにその上から水をたらして凍結させる。そうしないで，ただ線の端を氷の中にうめ込んだだけでは，線に張力をかけたとき，長い間には線が次第に滑り抜けて来てしまうことがわかつた。次に真鍮製の重錘掛け H を試料 E の下端にはかせる。それには，あらかじめ H に 0°C の水を入れておいて E の下端にさし込み，E の中心軸と H の軸とが平行になるようにして完全に凍結させればよい。ここで，前述したように，試料の昇華変形を防ぐために試料全体にレプリカ用溶液を塗布する。こうして準備した試料 E の上端の頭をフレームの上面 P_1 の穴を通して約 2 cm 出させると同時に，中間金属板 P_3 の位置を調節して重錘掛け H が P_3 の穴にはまるようにし，P_3 をその位置に固定する。P_1 面上に出た頭の部分には四角の氷のブロックを当てがつて，そこに 0°C の水をたらしてお互に完全に凍結させる。P_1, P_3 面の穴は，その中心が同一直線上に来るように設計してあるから，試料の中心線はこれらの穴の中心線と一致する。それで P_1 面上にレベルをおいて水平になるように調節すれば，氷の試料の中心線は鉛直になる。

拡大用回転子 R は半径 0.050 cm で，特に太さが一様になるように注意して製作してある。この回転子に小さな薄い矩形鏡(電磁オッシロバイブレーター用の鏡)を，矩形の長辺が水平方向になるようにしてミラーセメントで固着させる。この回転子は真鍮製の小フレーム f に取り付けた時計用の軸受けで上下を支えて垂直に立てられる。この小フレーム f は試料支持用フレームの支柱のうちの一本の適当な高さに固定させる。回転子につけた鏡 M の直前には，長焦点凸レンズ F(焦点距離 1 m)がフレーム f に取りつけてある。さて，次に小さな軽い鉄製のフックを付けた燐青銅線 CRm を用意し，前述の線 ACB の中点 C に引つ掛けた後，この連結部を凍結固定させる。線 CRm は回転子 R に一巻き巻いたのち小重錘 m によつて張力を与えられ水平に張られる。

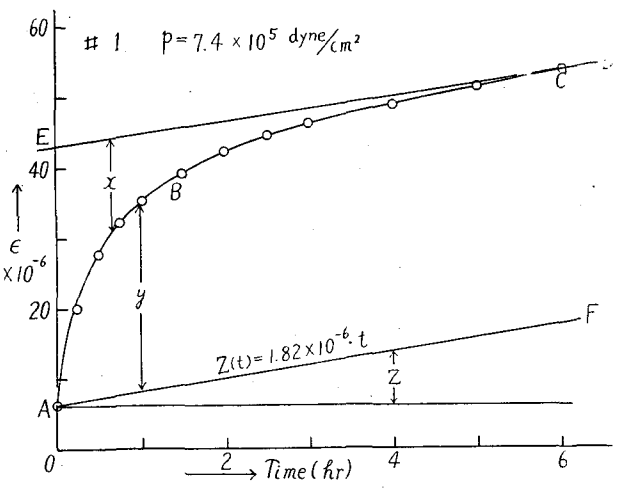
(C)　記録部分　　自記記録用ドラムは，1時間の回転速度が 90 mm, 45 mm, 30 mm, 22.5 mm の 4 段階に切りかえ可能である。光源を出た光はレンズ F を通り，鏡 M で反射され，もう一度 F を通つてから，記録用ドラムの直前に取りつけられた円壔レンズをへて，ドラムの印画紙上に焦点を結ぶ。印画紙はブロマイドでも充分だが，荷重を加えた瞬間や錘を外した直後の試料の伸びの急速な細かい変化を記録するために，感度のよいオッシロペーパーを用いた。

III. 測定結果

一定荷重を加えて単純引張りをさせた場合の時間—歪曲線の一例を第3図に示す。力を加えた瞬間に弾性歪 $\overline{OA}$ が起り，引き続いて弾粘性と固体粘性による歪 $ABCD$ が起つている。このような変形の仕方はいろいろな粘弾性物体において見られるもので，吉田[18]，小島[19]は積雪に関して，田畑[13]は海氷についてこのような時間—歪曲線を求め，積雪や海氷が短時間の範囲内では大体 Maxwell-Voigt 模型で表わされることを結論した。筆者の取扱つた「つらら」の氷もまた，このモデルで表わされるかどうかを検討してみよう。その方法は吉田，小島が積雪

の粘弾性について詳しく述べているのでそれに従つた。

第3図の時間—歪曲線で，歪の変形速度が一定になつた部分，CD に接線 $\overline{DCE}$ を引き，$\overline{DCE}$ に平行に直線 $\overline{AF}$ を引く。x, y, z は図に示す量を表わす。今，氷が弾性係数 E_1 のスプリング，粘性係数 η_1 のダッシュポットを直列に連結した Maxwell 模型と，弾性係数 E_2' のスプリング，粘性係数 η_2' のダッシュポットを並列に連結した Voigt 模型とを直列につないだ Maxwell-Voigt 模型で表わされるとすれば，これに力 p を加えたときの歪 ϵ は



第3図 時間—歪曲線の1例（実験番号 1）温度；−7°C

$$\epsilon = \frac{p}{E_1} + \frac{p}{E_1}\cdot\frac{t}{\tau} + \frac{p}{E_2'}\left(1-e^{-\frac{t}{\theta}}\right)$$

で表わされる。ここで $\tau\,(\equiv\eta_1/E_1)$ は Maxwell 模型の弾性緩和時間 (Relaxation Time), $\theta\,(\equiv\eta_2'/E_2')$ は Voigt 模型の弾性遅延時間 (Retardation Time) である。

この式の第一項 $p/E_1(\equiv\epsilon_1)$ は Maxwell 模型のスプリングによる伸びで第3図の $\overline{OA}$ に当り，第二項 $p/E_1\cdot t/\tau$ は Maxwell 模型のダッシュポットによる「流れ」で図の Z に当る。また，第三項 $p/E_2'\cdot(1-e^{-t/\theta})$ は Voigt 模型の遅延弾性によつて生ずる歪で図の y に当る。

さて，$x(t)=y_{t\to\infty}-y(t)=p/E_2'\cdot e^{-t/\theta}$ であるから

$$\log_{10} x = \log_{10} p/E_2' - (\log_{10} e/\theta)\,t$$

となる。つまり $\log_{10} x$ は時間 t に比例する筈である。そこで，実例についてこの事を検討してみよう。

例 1. 実験番号 1. $p=7.36\times10^5$ dyne/cm². 倍率；×23,000. 実験温度；−7.0°C. 時間—歪曲線は前述した第3図である。力を加えた瞬間の伸び $\overline{OA}\,(\equiv\epsilon_1)$ から

$$E_1 = p/\epsilon_1 \approx 1.2\times10^{11}\ \text{dyne/cm}^2$$

最小クリープ速度は $z=(1.82\times10^{-6})\cdot t$ であり，また，$z(t)=p/E_1\cdot t/\tau$ だから

$$\tau = 3.37\,(\text{hr}) \approx 203\,(\text{min})$$

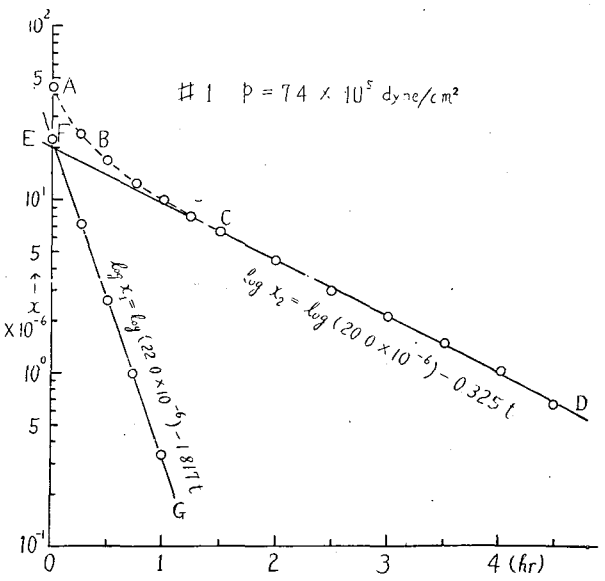
$$\therefore\quad \eta_1 = E_1\tau = 2.43\times10^{13}\ \text{dyne·min/cm}^2$$

次に $\log x$ と時間 t の関係をプロットしたのが第4図の $ABCD$ である。もし，試料の氷が Maxwell-Voigt 物体ならば $\log x$ と t とは直線関係にあるはずである。しかし，この第4図からわかるように，荷重を加えてから2時間目ころから後の部分では $\log x$ と t は大体比例しているが，

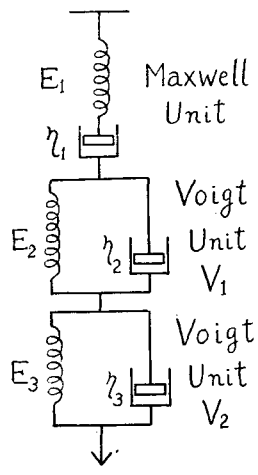
はじめの1～2時間の間 $\widehat{ABC}$ の部分では直線関係から外れている。これを説明するために模型を少を複雑にして，ひとつの Maxwell 模型とふたつの Voigt 模型とからなる第5図のような模型を考えてみよう。Voigt 模型の一方 V_1 は粘性係数の小さなダッシュポットをもち retardation time θ_1 は短く，もうひとつの V_2 は，比較的大きな粘性係数をもつていて，retardation time θ_2 が長い。すると，x は

$$x_1 = p/E_2 \cdot e^{-t/\theta_1}$$
$$x_2 = p/E_3 \cdot e^{-t/\theta_2}$$

との和で表わされることになる。θ_1 は θ_2 に比べると小さいと仮定してあるから，t の大きい値に対しては x_1 は事実上0となり，x は x_2 と一致する。したがつて，第4図の CD 間の直線部分は $\log x_2$ と t との直線関係を表わすとみて，これから E_3 と θ_2 との値が定まる。これらの値によつて x_2 を計算し，x の実測値から差引いたものが x_1 であるが，



第4図　$\log x$ と t の関係（実験番号 1）
$ABCD$ は $\overline{ED}$ と $\overline{FG}$ に分解出来ることを示す。



第5図　試料の流動学的性質は Maxwell-Voigt, V_1—Voig, V_2 の各 Unit の直列複合体のモデルで表現出来る。

$\log x_1$ と t との関係をみると，第4図に示されている通り，この関係は直線で表わされ，それから E_2，θ_1 の値も決められる。かくして，用いた氷の機械的性質は第5図のように，ひとつの Maxwell 模型と，ふたつの Voigt 模型とが直列に連結された複合体模型によつて表わされると考える事が出来る。

すなわち，力 p によつて生ずる歪 ϵ は

$$\epsilon = \frac{p}{E_1} + \frac{p}{\eta_1}t + \frac{p}{E_2}\left(1-e^{-\frac{t}{\theta_1}}\right) + \frac{p}{E_3}\left(1-e^{-\frac{t}{\theta_2}}\right)$$

で表わされる。

それぞれの Voigt 模型の常数を求めると次のようになる。

V_1：$\overline{FG}$ より

$$\log_{10} x_1 = \log_{10}(22.0\times10^{-6}) - 1.817\,t$$
$$\log_{10} x_1 = \log_{10} p/E_2 - \log_{10} e/\theta_1 \cdot t$$

$$\therefore \quad E_2 \approx 3.3\times10^{10}\ \mathrm{dyne/cm^2}$$
$$\theta_1 \approx 0.24(\mathrm{hr}) \approx 14(\mathrm{min})$$
$$\therefore \quad \eta_2 = E_2\theta_2 \approx 4.8\times10^{11}\ \mathrm{dyne\cdot min/cm^2}$$

V_2: $\overline{ED}$ より $\log_{10} x_2 = \log_{10}(20.0 \times 10^{-6}) - 0.325\,t$

V_1 と同様にして

$$E_3 \approx 3.7 \times 10^{10}\ \text{dyne/cm}^2, \quad \theta_2 \approx 1.34\,(\text{hr}) \approx 80\,(\text{min})$$

$$\eta_3 = E_3\,\theta_2 \approx 3.0 \times 10^{12}\ \text{dyne·min/cm}^2$$

例 2. 実験番号 7. $p = 5.0 \times 10^5\ \text{dyne/cm}^2$. 倍率；×45,400. 実験温度；−7.0°C

$$\epsilon_1 = 4.67 \times 10^{-6}$$

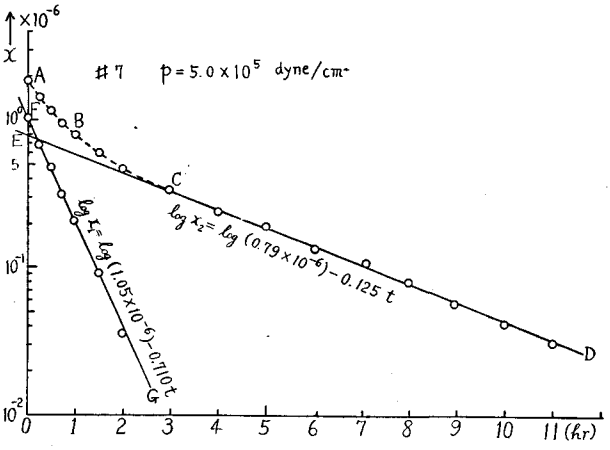
$$\therefore \quad E_1 = p/\epsilon_1 \approx 1.1 \times 10^{11}\ \text{dyne/cm}^2$$

最小歪曲線より $z(t) = 0.226 \times 10^{-6} \cdot t$

$$\therefore \quad \tau \approx 20.65\,(\text{hr}) \approx 1240\,(\text{min})$$

$$\therefore \quad \eta_1 = E_1\,\tau \approx 1.3 \times 10^{14}\ \text{dyne·min/cm}^2$$

次に $\log x - t$ をプロットすると(第 6 図), これも例 1 と同様に V_1, V_2 による部分 $\overset{\frown}{ABC}$ と V_2 だけによる部分 CD とから成り立つていることがわかる。



第 6 図 $\log x - t$ 曲線 (実験番号 7), 温度；−7.0°C

V_1: $\overline{FG}$ より $\log_{10} x_1 = \log_{10}(1.05 \times 10^{-6}) - 0.710\,t$

$$\therefore \quad E_2 \approx 4.77 \times 10^{11}\ \text{dyne/cm}^2, \quad \theta_1 \approx 38\ \text{min.}$$

$$\therefore \quad \eta_2 \approx 1.79 \times 10^{13}\ \text{dyne·min/cm}^2$$

V_2: $\overline{ED}$ より $\log_{10} x_2 = \log_{10}(0.79 \times 10^{-6}) - 0.125\,t$

$$\therefore \quad E_3 \approx 6.32 \times 10^{11}\ \text{dyne/cm}^2, \quad \theta_2 \approx 208\ \text{min.}$$

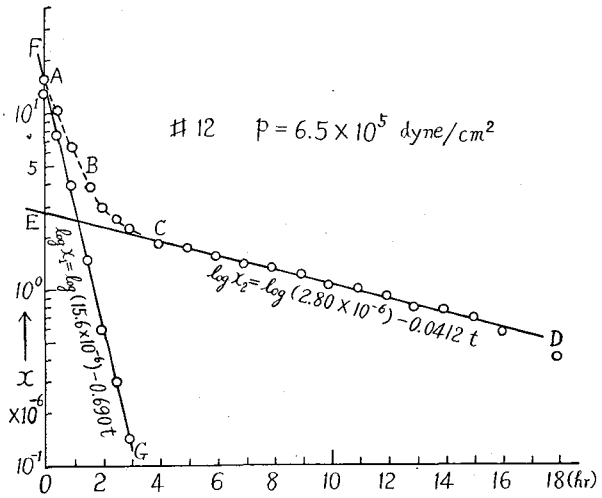
$$\therefore \quad \eta_3 \approx 1.3 \times 10^{14}\ \text{dyne·min/cm}^2$$

例 3. 実験番号 12. $p = 6.5 \times 10^5\ \text{dyne/cm}^2$, 倍率, 実験温度は例 2 と同じ。

$$E_1 \approx 1.1 \times 10^{11}\ \text{dyne/cm}^2, \quad \tau \approx 1004\ \text{min}$$

$$\eta_1 \approx 1.2 \times 10^{14}\ \text{dyne·min/cm}^2$$

第 7 図に $\log x - t$ をプロットしたが, これも力を加えてから約 3 時間後には影響がなくなつてしまう V_1 と, retardation time の長い V_2 とから成つている。



第7図　$\log x - t$ 曲線（実験番号 12），温度；−7.0°C

V_1:　$E_2 \approx 4.2 \times 10^{10}$ dyne/cm²,　　$\theta_1 \approx 38$ min

$\eta_2 \approx 1.6 \times 10^{12}$ dyne·min/cm²

V_2:　$E_3 \approx 2.3 \times 10^{11}$ dyne/cm²,　　$\theta_2 \approx 633$ min

$\eta_3 \approx 1.5 \times 10^{14}$ dyne·min/cm²

第1表　氷の弾性，粘性係数および最小クリープ速度

No.	P	E_1	E_2	E_3	τ	θ_1	θ_2	η_1	η_2	η_3	$\dot{\varepsilon}$ yr^{-1}
	bar	×10¹¹ dyne/cm²			min	min		×10¹⁴	×10¹³		×10⁻³
1	0.74	1.2	0.33	0.37	203	14	80	0.24	0.05	0.3	16.-
2*	0.74	/	0.22	1.0	/	6	443	/	0.01	0.45	/
3	0.43	2.0	/	0.9	686	/	295	1.4	/	2.7	1.7
4	0.47	1.1	/	/	/	/	/	/	/	/	/
5	0.47	0.33	0.11	/	2740	31	/	0.9	0.33	/	2.8
6*	0.29	3.5	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7	0.50	1.1	4.8	6.3	1240	38	208	1.3	1.8	13.-	2.0
8*	0.50	1.5	3.8	1.9	/	25	242	/	0.95	4.6	/
9	0.31	5.3	7.3	3.7	273	15	89	1.5	1.1	3.3	1.1
10*	0.31	2.2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	0.34	1.0	2.3	/	5680	37	/	5.6	0.85	/	0.3
12	0.65	1.1	0.42	2.3	1000	38	633	1.2	0.16	15.-	3.0
13	0.27	1.9	/	/	/	/	/	/	/	/	0.065
14	0.33	2.1	/	/	/	/	/	/	/	/	0.46

η: dyne·min/cm²,　　*印は荷重をとりさつたときの値。

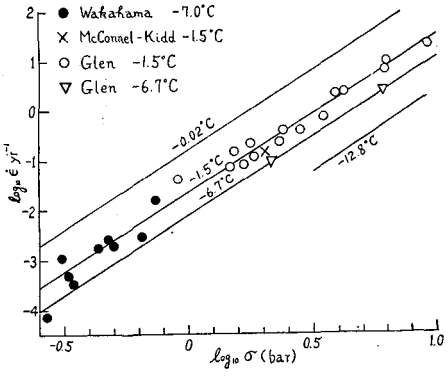
(No. 1, 2), (7, 8), (9, 10) は同一試料による対の実験値。

以上のような荷重を加えたときの振舞いのほかに，荷重を取り去つた後におこる氷の棒の縮みについても数回測定を行なつた(実験番号 2, 6, 8, 10)。この場合は Maxwell 模型のダッシュポットは働かないという差異のほかは，荷重をかけたときと同じなので，上と同じ操作によつて仮定した模型の常数を計算で求めることが出来る。このようにして得た測定結果を第1表にまとめた。

IV. 2, 3 の考察

最初に述べたように，以上の結果はすべて予備実験であり，系統的な各種の実験や理論的考察は今後にまたなければならないので，ここでは結果に対する立ち入つた吟味はさしひかえ，ただ気のつくままに 2, 3 の点について述べて今後の指針にしたいと思う。

(1) 最小クリープ速度　実験で得られた最小クリープ速度，すなわち，時間 t が充分大きくなつて，歪 ϵ の変化速度 $\dot{\epsilon}$ が大体一定になつたときの ϵ の値と加えた張力 σ との関係を第8図に黒丸印で示した。この図中の×印は McConnel-Kidd が 1888 年に「つらら」の氷を用いて行なつた実験結果(実験温度 −1℃ 前後)であり，そのほかの白丸印，三角印および直線は Glen[12] が 1955 年に多結晶の氷について得た結果である。Glen の得た直線をそのまま応力の小さい方に延長すると，筆者の得た点のグループは −1.5° と −6.7℃ の外挿線の間に入る。筆者の実験値はすべて −7.0 ℃ の値だから Glen の書いた −6.7℃ の線によくのることが期待されるが，実際は，このように，筆者の値は Glen の値に比べると大きめになつている。この値の不一致に対しては，次のような原因が考えられる。(i) Glen の用いた氷は多くの単結晶粒からなる氷で，各単結晶粒は小さいし，その結晶軸の方向も全く乱雑に分布していた。これに反し筆者の用いた氷は，II で述べたように，割合に大きな細長い氷の単結晶が互に可成りよく平行に揃つて集合したもので，Glen の場合と大分違つている。(ii) Glen の実験は圧縮試験であり，筆者のは引張り試験であること。試料が，たとえば Maxwell-Voigt 模型で完全に表わされるならば，引張り試験と圧縮試験では，生ずる現象は全く可逆的な筈である。しかるに現実には氷はこのような理想物体ではないので，現象も非可逆的に起る。小島[19] は積雪について，田畑[6] は海氷について粘弾性実験を行なつたが，両者とも荷重を加えた時と取り除いた時とでは，異なつた値の粘弾性係数を得ている。一般に荷重を取り除いた時に得られた粘弾性係数の方が大きいようである。このような非可逆性のために，圧縮と引張りとでは，異なつた現象が起るのは当然であろう。(iii) Glen の場合は応力が大きく，筆者の場合は小さかつた。応力の大きいときと小さいときとでは，歪の発生機構は必ずしも同一でない。Gerrard[8] らの Jung-



第8図 最小クリープ速度と応力の関係 Glen, McConnel-Kidd の値との比較。

fraujoch における氷河の実験結果を見ると，応力の小さい部分では Glen の得た $\dot{\epsilon}$ の値よりも大き目で，むしろ筆者の結果と類以した結果が得られている。また，Servi-Grant[21] は 1951 年に Al について同様な関係を見出している。彼等はこの現象を，クリープの初期において，結晶粒の境界面で起つていたスリップが，結晶粒内部のスリップに移行することに由するものだと解釈している。これは興味ある問題だが，ここでは深く立入らないことにする。(iv) 筆者の行なつた実験では，観測時間が 10～50 時間程度の比較的短い時間であつたため，実験の終りに果して最小クリープ速度に達していたかどうかという疑問がある。Glen はクリープが Andrade の法則[22]

$$l = l_0(1 + \beta t^{1/3}) \cdot e^{kt}$$

に従うものと仮定して，クリープ曲線を過渡部分と粘性流れの直線部分とに，計算によつて分解し，後者を測定によつて得られた最小クリープ速度と比較した結果，長時間たたないと純粋な粘性による流れの速度には達しないことを示している。従つて，筆者の場合には，測定時間が短かすぎて，純粋な粘性の流れの状態に達しなかつたことは，充分に考えられるところであるが，いろいろ検討してみても Andrade の法則には従わない場合が多く見出された。今後は少くとも，実験時間を 200～300 時間に延長するほか，いろいろな温度と応力のもとにおける実験を行なう予定である。

(2) Maxwell-Voigt 模型について　III で述べたように，一般によく用いられる Maxwell-Voigt 模型のほかに，さらにもうひとつの Voigt 模型を直列に連結した模型を用いて，実際に得られた時間—歪曲線を説明した。Voigt 模型をふたつ直列に連結することの物理的な意味は今のところ明らかではないが，それは前節 (i) で述べた結晶粒の大きさや結晶軸の方向の配列との間に何らかの関係があるものと想像される。一方の Voigt 模型は結晶粒 (grain) の集合体としての氷の性質を表わし，他方はその結晶粒を構成している氷自体の性質を表わしているのではないであろうか。このような予想のもとに今後は単結晶氷，多結晶氷，市販の氷など構成の異なるいろいろな氷について組織的に調べて行きたい。

(3) 他の研究者の結果との比較　第 1 表には筆者の得た弾性係数，粘性係数を示したが，これを他の研究者の結果と比較してみよう。

山地—黒岩[16] が振動法で求めた「つらら」の，温度 −7°C におけるヤング率は大体 9×10^{10} dyne/cm^2 で，筆者に求めた $E_1 = 1 \sim 2 \times 10^{11}$ と大よそ一致している。田畑[13][21] が海氷で得た値，$E_1 = 1 \sim 3 \times 10^9$, $E_2 = 1 \sim 11 \times 10^9$ は筆者の値より大分小さいが，用いた試料が塩水を多く含んだ海氷であるから，これは当然であろう。弾性緩和時間 τ は筆者の 200～3000 min に比べて海氷では 20～280 min で 1 桁小さい。遅延時間 θ_1 の方はそれぞれ 10～40 min と 3～20 min で大体一致している。田畑は時間—歪曲線が荷重後約 2 時間くらいまでの間は，ひとつの Maxwell 模型とひとつの Voigt 模型とから成る簡単な Maxwell-Voigt 模型で表わされると述べている。この Voigt 模型はおそらく筆者の用いた模型のうちの第 1 Voigt 模型 V_1 に相当するものと思われる。

Dorsey の教科書にのつている値と比べると，ヤング率は大体合つているが，粘性係数に関しては筆者の値は1～2桁高い値を示している。

V. むすび

一定荷重を加えて氷の流動学的性質を調べるために，高倍率の歪拡大装置を作り，予備実験として引張り試験を行ない，得られた曲線から氷の弾性，粘性係数を求めた。

測定時間は最大50時間であつたが，その範囲では氷の流動学的性質はふたつの Voigt 模型をもつ Maxwell-Voigt 模型で表わすことができ，そのそれぞれの模型の常数を求め，第1表にまとめた。一般に従来知られている値よりも大き目の値が得られたが，本格的な実験は今後行なわれる予定である。

おわりに終始御教示をいただいた吉田順五教授を中心とする雪氷研究グループの方々に，厚く御礼を申し上げます。

文　献

1) Reusch, E. 1864 Ann. Phys. Chem. V, ***1***, 573.
2) Pfaff, F. 1875 Ann. Phys. Chem. VI, ***5***, 169.
3) Koch, R. F. 1885 Ann. Phys. Chem. (N. S.), ***25***, 438.
4) Main, J. F. 1887 Proc. Roy. Soc. ***42***, 496.
5) McConnel, J. C. and D. A. Kidd. 1888 On the plasticity of glacier and other ice. Proc. Roy. Soc., ***44***, 331.
6) Haefeli, R. 1952 Observations on the quasi-viscous behaviour of ice in a tunnel in the Z'Mutt glacier. J. Glaciol. ***2***, 94.
7) McCall, J. G. 1952 The internal structure of a cirque glacier. J. Glaciol., ***2***. 122.
8) Gerrard, J. A. F., M. F. Perutz and A. Roch. 1952 Measurement of the velocity distribution along a vertical line through a glacier. Proc. Roy. Soc., A, ***213***, 546.
9) Perutz, M. F. 1950 Direct measurement of the velocity distribution in a vertical profile through a glacier. J. Glaciol., ***1***, 382.
10) Nye, J. F. 1951 The flow of glaciers and ice-sheets as a problem in plasticity. Proc. Roy. Soc., A, ***207***, 554.
11) Quervain, M. de. 1946 Kristallplastische Vorgänge im Schneeaggregat II. Mitteilungen aus dem eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
12) Glen, J. W. 1955 The creep of polycrystalline ice. Proc. Roy. Soc., A, ***228***, 519.
13) 田畑忠司 1956 海氷の粘弾性の研究. 低温科学, 物理篇, ***15***, 101.
14) Griggs, D. T. and N. E. Coles. 1954 Creep of single crystal of ice, SIPRE Report, ***11***, 1.
15) 中谷宇吉郎 1956 氷単結晶の物理, I. 科学, ***26***, 272.
16) 山地健次・黒岩大助 1956 0°～－100°C の範囲における氷の粘弾性, I. 低温科学, 物理篇, ***15***, 171.
17) Yoshida, U. and S. Tsuboi. 1929 Examination of ice-crystals by X-rays. Mem. Coll. Sci., Kyoto Univ. A, ***12***, 203.
18) 吉田順五 1950 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学, ***10***, 1.
19) 小島賢治 1954 積雪の粘弾性. 低温科学, 物理篇, ***12***, 1.
20) 田畑忠司 1955 海氷の粘弾性係数の測定. 低温科学, 物理篇, ***14***, 25.
21) Servi, I. S. and N. J. Grant. 1951 Trans. Amer. Inst. Min. (Metall). Engrs, ***191***, 909.

22) Andrade, E. N. da C. 1910 On the viscous flow in metals and allied phenomena. Proc. Roy. Soc., A, **84**, 1.

(註・1) 一般的な参考書としては

Dorsey, N. E. 1940 Properties of ordinary water substance. Reinhold Pub. Co., New York.
Reiner, M. 1949 Deformation and Flow. An elementary introduction to theoretical rheology. H. K. Lewis. London.

(註・2) 文献 1～5 は Dorsey の 教科書と Glen の論文から引用した。

Résumé

Rectangular bars of ice (dimensions: $1.5\times1.5\times20$ cm or $2.0\times2.0\times20$ cm) cut out from large icicles were subjected to constant tensile loads and the change occurring in their lengths were continually registered on photographic paper as they were elongated by the loads. Observations between crossed polaroids of thin ice plates (thickness: 1～2 mm) cut off from the bars showed that they were composed of many small columnar single ice crystals lying perpendicular to the length of the bars. The optical axes of the ice crystals were directed nearly perpendicular to their columnar axes (Fig. 1 and Photo. 1 in the text).

A strong frame work was built with four brass bars and three thick brass plates P_1, P_2, P_3 (Fig. 2 in the text) and the ice bar E was held vertically by freezing one of its ends to top plate P_1. The bar was hung through rectangular holes made at the centers of plates P_1, P_3 which were used to keep the bar in the vertical position while it was being frozen to plate P_1. In order to keep the measurement from undeterminable errors as far as possible, the change in the length of the bar was observed not on its whole length but on its central part AB. Phosphorous-bronze wire ACB of which the ends were frozen to the ice bar at points A and B was pulled sideways at its center C by another wire CRm, which, after having wound round roller R, hung over a small pulley to suspend weight m. A small mirror attached to the roller focused a light beam from an electric lamp onto the photographic paper placed round a rotating drum.

When the ice bar was pulled downwards by a large weight hung at its bottom and the distance between points A, B was increased by a small amount dy, the roller was turned around its vertical axis with the result that the focus of the light beam was displaced on the photographic paper by amounting to 20,000–45,000 times as large as dy.

The experiments were performed in the cold room attached to our Institute. The whole experimental equipment except light source and recording part was placed in an enclosure kept at the constant temperature of -7°C. To avoid the sublimation of the bar, its whole surface was coated with formvar film. The humidity inside the enclosure was kept at a high value by placing a large quantity of ice and frost within it.

The tensile stress within the ice bar was varied in the range $2.7\text{–}7.4\times10^5$ dyne/cm^2 by changing the weight hung at its bottom end. A finite elastic strain was observed at the instant of applying the loads, followed successively by a decelerating creep and then a steady one. An example of the creep curve is shown by graph in Fig. 3 of the text.

When the logarithum of x indicated in Fig. 3 is plotted against time t, curve $ABCD$ results. It is found that x can be divided into two components x_1, x_2 whose logarithums stand each in linear relation with t (Figs. 4, 6, 7). The elongation of the ice bar, therefore, could approximately be represented by that of a rheological model composed of a series connection of one Maxwell model M and two Voigt ones V_1, V_2 (See Fig. 5); the relation between its strain ϵ and the time t can be expressed by the following formula:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_1} \cdot \frac{t}{\tau} + \frac{\sigma}{E_2}\left\{1 - \exp(-t/\theta_1)\right\} + \frac{\sigma}{E_3}\left\{1 - \exp(-t/\theta_2)\right\}$$

where σ is the applied stress, E_1, E_2 and E_3 are the elastic constants of M, V_1, V_2, respectively. τ is the relaxation time of M, while the retardation times of V_1, V_2 are respectively denoted by θ_1 and θ_2. These six constants determined on the ice bars are shown in Table 1 of the text ($\dot{\epsilon}$: minimum creep rate. $*$ indicates the cases of unloading).

Young's modulus E_1 was found to be about $1\text{~}2\times10^{11}$ dyne/cm^2 which is in agreement with the results of the previous workers. Minimum creep rate of the constant creep is plotted against the stress σ in Fig. 8. The solid circles represent the author's values while the parallel straight lines are based on results gained by J. W. Glen who performed compressive experiments on ice bars at different temperatures. The present author experimented at -7°C and his values lie somewhat higher than those of Glen at the same temperature as shown in the figure.