



Title	積雪の粘弾性
Author(s)	小島, 賢治
Citation	低温科学. 物理篇, 12, 1-15
Issue Date	1954-03-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/17871
Type	bulletin (article)
File Information	12_p1-15.pdf



[Instructions for use](#)

積雪の粘弾性

小島賢治*

(低温科学研究所 応用物理学部門)

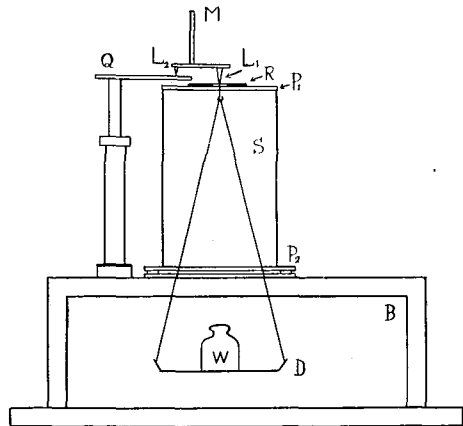
(昭和29年3月受理)

I. ま え が き

積雪の中から雪の柱を切り出して鉛直に立て、その上に静かに錘をのせると、錘をのせた瞬間まず弾性による歪を生じ、その後粘性による歪が一定の速度で進行することを前に吉田、笹谷、内海が報告¹⁾した。しかし実際には、はじめの弾性歪の後急に一定速度の雪の縮みが始まるのではなく、縮みの速さは最初の弾性歪の後次第に小さくなり、1分ないし3分経てから始めて一定の速度で歪が進行するようになる。前の報告¹⁾では、雪の歪をレオロジーで云う Maxwell Unit (スプリングと油緩衝器とを直列に連結した模型) の歪と見做したことになり、弾性係数と粘性係数とを夫々一つづつ求めたに過ぎないが、これだけでは荷重を加えてから1分ないし3分間の雪の歪を正しく表現することが出来ない。そこで筆者は荷重を加え始めてから再び荷重を取去つた後雪の歪の變化が止る迄の間、出来るだけくわしく歪の時間的變化を測定した。その結果、雪の「歪-時間曲線」は上に述べた Maxwell Unit と Voigt Unit (スプリングと油緩衝器とを並列に組合せた模型) とを縦に連結した模型の歪-時間曲線と同じ形であることを確かめ、雪の粘弾性をこの模型の持つ2組の弾性係数と粘性係数であらわした。これについては既に吉田順五が一部分報告²⁾したが、筆者はこれらの係数の値を性質の異なる種類の雪につき 0°C から -20°C の間のいろいろな温度で測定し、あわせて、雪の粒子構造の壓力による變形の経過を顕微鏡で観察した。

II. 測定法

第1圖が測定装置である。積雪の中へブリキ製の圓筒を差込むことによつて、直徑 5 cm の圓筒形の雪の柱を取出し、長さ 7~14 cm に切つてその上下の切口に夫々厚さ 1 mm の鐵板 P_1, P_2 をつけ、木の臺 B の上に鉛直に立てる。Sがこの雪の

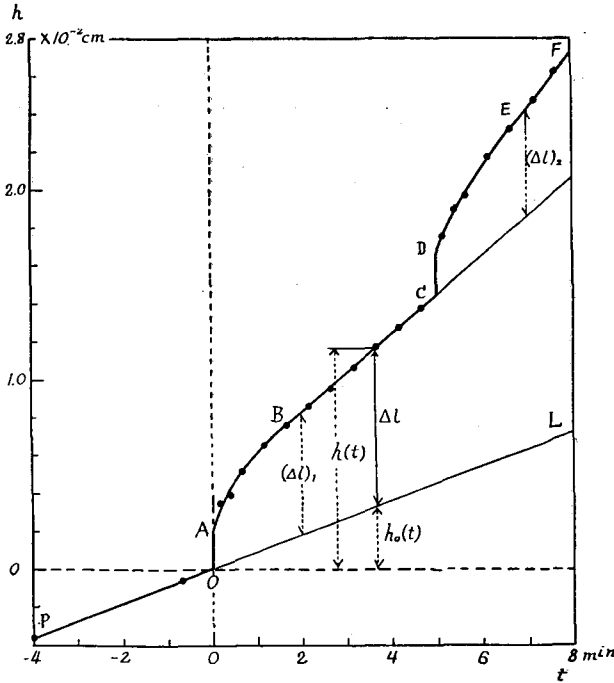


第1圖 測定装置

* 北海道大學低温科学研究所業績 第249號

柱である。 P_1 と P_2 はあらかじめ手で暖めておいて雪の柱の切口に軽くのせると、切口の雪の結晶を僅かに融かして凍りつく。こうして壓縮に際しての端の影響を防いだ。 P_1 の上に薄い金属板 R をわたし、その両端から紐を下げ、錘をのせる皿 D を吊す。 Q は高さを調節出来る臺で、 M は鏡である。鏡の後足 L_2 を Q の上におせ、前足 L_1 は R の中央にあけた穴を通して直接 P_1 の上におせる。皿に錘をのせると S が縮み、 P_1 が下つて M が前に傾くので、この傾きをスケール付望遠鏡で測り、それから S の縮みを求めた。 $L_1 L_2$ の距離は 2.43 cm、鏡とスケールとの距離は 66~88 cm で、スケールは 0.1 mm まで讀んだので實際の S の上面の沈下を 2×10^{-4} cm まで讀んだことになる。錘をのせてから 2~3 分の間は 10~15 秒おきに、その後は 30 秒おきに雪の縮みを測つた。

温度の影響を調べるためには -1°C 、 -10°C 、 -19°C の三つの低温實驗室を用いた。なお、此の實驗は融雪期になつてから行つたので、測定に用いた雪はあらかじめ野外の積雪の各層から $60 \times 60 \times 30 \text{ cm}^3$ の塊を切り出して -20°C の低温實驗室に保存しておいたものを用いた。保存温度より高い温度の室で實驗を行うときには、測定に用いる雪の柱 S の外に、これと同質で同じ大きさの雪の柱 S' を別に用意し、これらをあらかじめ測定を行う場所に並べ、 S' の中央部に直径 3 mm ほどの細い寒暖計を差込んでおいて雪の柱の温度が室温と一致した時に片方の雪 S を用いて測定を始めるようにした。雪の柱は何れも雪の層から水平方向に切出したものである。



第 2 圖 雪の縮みの時間的變化の例

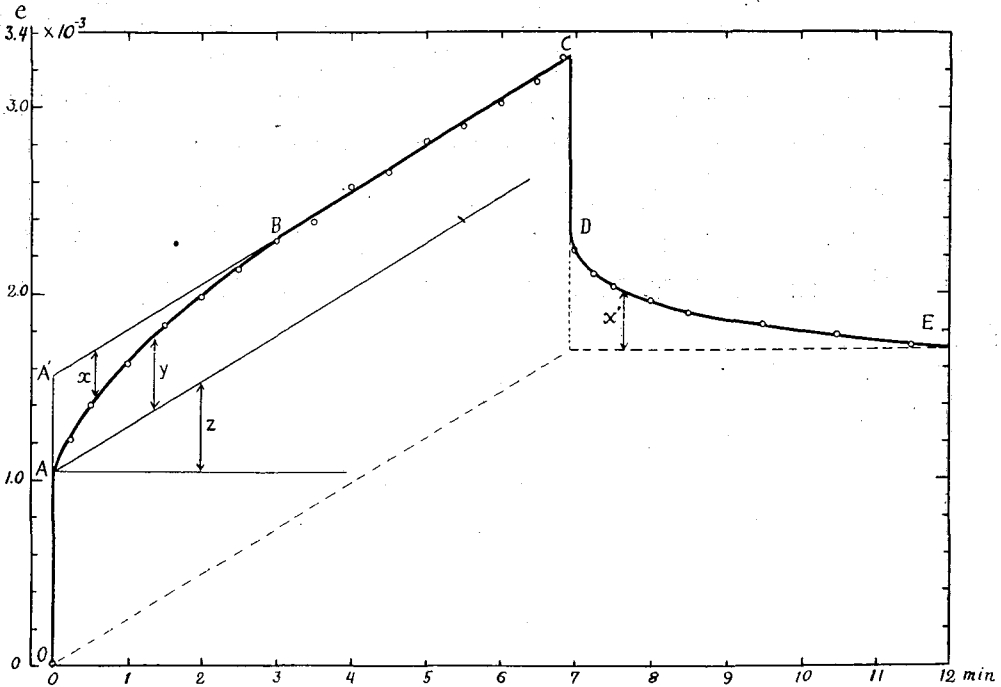
h : 縮み, t : 時間

温度 -1°C , 雪の密度 0.16 gr/cm^3 , 長さ 12.1 cm

III. 歪一時間曲線とそれから弾性係数及び粘性係数を求める方法

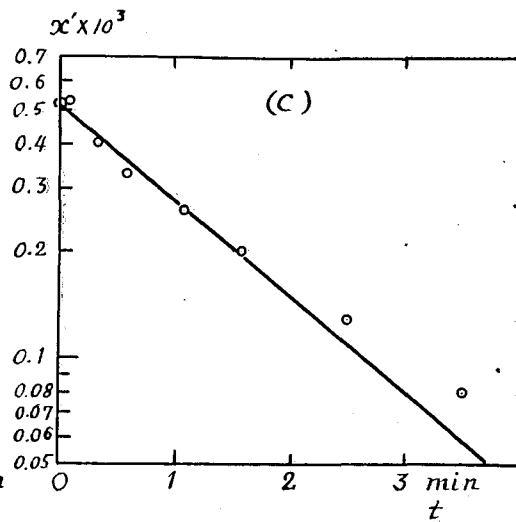
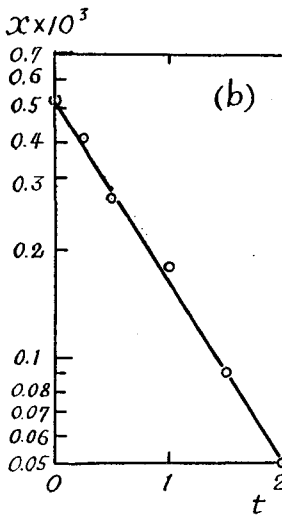
第 2 圖は上に述べたようにして測つた雪の「縮み」の時間的變化を示した一例である。縦軸 h は cm であらわした縮みの量で、横軸は分で測つた時間をあらわし、どちらも荷重がこれからかかるとうとする瞬間を原点にとつてある。錘をのせる前に、雪の上の金属板 P_1 , R , 皿 D の重さ及び鏡の重さのうち雪が受持つ分 (これらの合計を w' とする) などによる雪の縮みを約 10 分間測定した。第 2 圖で PO はこれにあたり、此の例では $w' = 2.01 \text{ gr weight/cm}^2$ であ

る。錘 W をかけた瞬間、錘が雪に及ぼす圧力 w のために先ず OA だけ縮み、その後次第に縮み方がゆつくりになり、 BC では一定の速度で縮んでいる。併し ABC 部分の縮みは W と金属板その他の重さの和 $w+w'$ のために起つているので ABC 部分も OA と同じく新に加えた圧力 w だけによる縮みになおしておいた方が都合がよい。そこで、時刻 t での h の測定



第3圖 (a) 雪の歪-時間曲線の1例

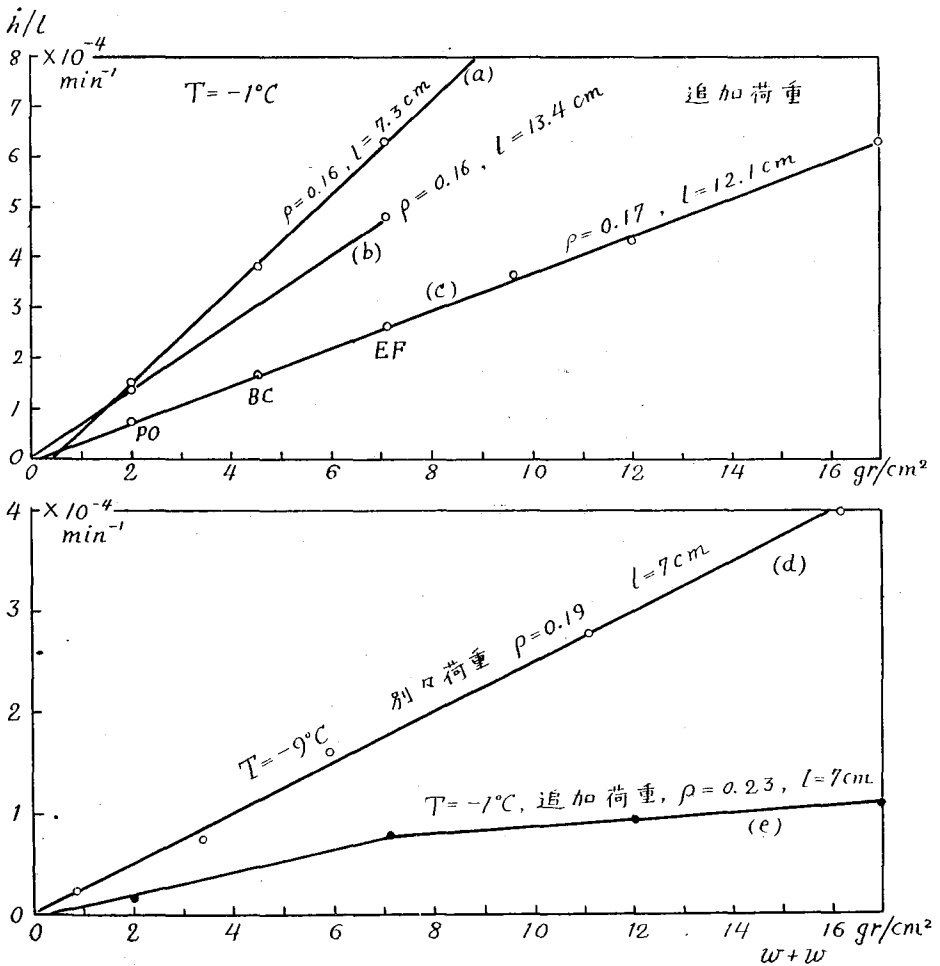
雪の密度 0.19 gr/cm^3 、長さ 7.1 cm 圧力 $1.00 \times 10^4 \text{ dyne/cm}^2$ 、温度 -8.9°C



第3圖 (b), (c)

値 $h(t)$ と PO を延長した直線 OL の t に於ける高さ $h_0(t)$ との差 $\Delta l(t) = h(t) - h_0(t)$ を h の各測定値毎に求めて、これらを錘 W の重さ w だけによる雪の縮みとした。こうして求めた雪の縮み Δl をその雪の長さ l で割つた値 $\Delta l/l \equiv e$ でその雪の柱の歪をあらわした。錘をかけた瞬間からこの歪 e が時間と共に變るありさまを示した別の 1 例が第 3 圖 (a) で、歪-時間曲線は \overline{OABCDE} である。錘を再び取去るとその瞬間 CD という「伸び」が生じ、その後 AB 部分に對應する形でゆつくり DE のように變化し、最後に E に至つて伸びが止る。

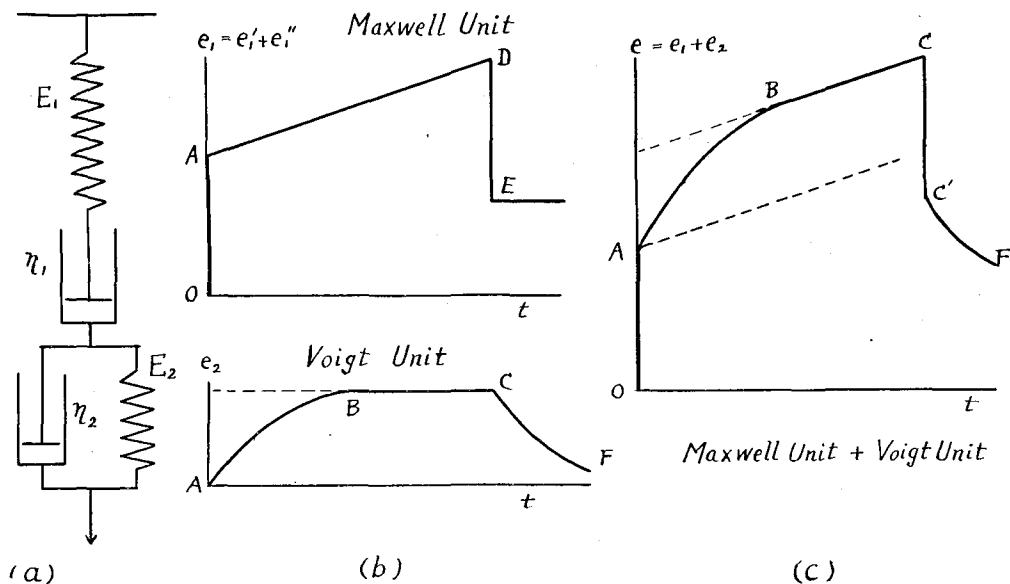
測定したままの歪-時間曲線から w' による分を差引いて錘の壓力 w による歪-時間曲線を求めるには、直線 BC であらわされる「雪の縮む速さ」(これを creeping の速さということにする) が荷重の大きさに比例して増すことを假定しているのであるが、この假定が正しいか否かを試してみた。第 4 圖は雪の creeping の速度 \dot{h}/l と壓力との關係を示したもので、比重 0.16 の雪ではよく比例關係が成立つことを示している。この圖のなかに追加荷重と書いた



第 4 圖 雪の creeping (一定速度の縮み) の速さと壓力との關係

のは、同じ雪に次々と錘を加えて圧力を増した場合であり、別々荷重とあるのは、積雪の同じ層から何本も同じ長さの雪の柱を切出しておいて各々の柱に始めから別々の重さの錘をかけた場合である。前の第2圖の曲線に \widehat{CDEF} と記した部分は追加荷重による雪の縮み方を示した一例である。O 點で加えた荷重 (この場合は $w=2.55 \text{ gr wt/cm}^2$) と等しい荷重を C 點で追加すると、やはり \widehat{OABC} と同じような増し方で新な歪が \overline{BC} の延長 \overline{CR} であらわされる歪に重つて現われる。第4圖のグラフ (c) に PO, BC, EF とある點は第2圖に同じ記號で示した部分の *creeping* の速度をあらわしている。この圖から、測定に用いた三種類の雪の中、比重 0.16 の雪では追加荷重の場合も別々荷重の場合でも *creeping* の速度は荷重に比例し、しかも外からの荷重がない時には縮みが起らないことがわかる。雪自身の重みによる歪の進行は長さ 12 cm 程度の雪について 20 分間くらいの測定では認められないわけである。

第2圖に $(\Delta l)_1, (\Delta l)_2$ と記したのは、荷重を加えてから2分後の縮みと荷重を加える前の縮みの直線の延長であらわされる縮みとの差であるが、同じ荷重の増加に對して、あきらかに $(\Delta l)_1$ の方が $(\Delta l)_2$ より大きい。この場合、*creeping* の速度は荷重の大きさに比例したのであるから、これは、荷重を加えた瞬間の弾性歪が2回目には1回目より小さくなつたことを示すものである。併し別の雪では反對に2回目の弾性歪の方が大きくなる場合もあるので、弾性係数の測定には、なるべく追加荷重の場合を用いないようにした。*creeping* の速度についても第4圖のグラフ (e) のように、比重 0.23 の雪では荷重を追加して行くに従つて次第に h/l の増しかたが小さくなつてゐる。しかし、このような比較的堅い雪に對しては測定の便宜上大きい壓力 ($w \geq 10.2 \text{ gr wt/cm}^2$) を加えて歪時間曲線を求めたから、錘をのせる前の縮みは載せた後の縮みにくらべて非常に小さかつた。



第5圖 雪の粘弾性をあらわす模型とその歪-時間曲線

このような結果から、さきに述べた方法で第 5 圖のような「歪-時間曲線」を書くことは何れの場合にも差支えないとみなし、次に述べるようにして粘弾性の係数を求めた。

第 3 圖 (a) の歪時間曲線は第 5 圖 (a) に示したようなスプリングと油緩衝器とを組合せた模型の歪時間曲線と同じ形である。この模型は弾性係数 E_1 のスプリングと粘性係数 η_1 を持つ油緩衝器とを直列につないだ Maxwell Unit と、弾性係数 E_2 のスプリングと粘性係数 η_2 の緩衝器を並列に組合せた Voigt Unit とを縦に連結したものである。各々の Unit だけの歪時間曲線は第 5 圖 (b) に示したようになり、これらを重ねると同圖 (c) のようになる。つまり (c) 圖の曲線で OA, ABC, CC', CF と記した部分は夫々 (b) 圖の OA, ABC, DE, CF に相當する。今この模型に力 p をかけた瞬間 Maxwell Unit のスプリングに e'_1 という歪を生じ、時間 t の後に Maxwell Unit の緩衝器に歪 $e'_1(t)$, Voigt Unit に $e_2(t)$ という歪を生じたとすると

$$\left. \begin{aligned} E_1 e'_1 &= p \\ \eta_1 \frac{de'_1}{dt} &= p \\ E_2 e_2 + \eta_2 \frac{de_2}{dt} &= p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

という関係が成立つ。これらの式に $t=0$ で $e'_1=0, e_2=0$ という初期条件を入れ、 p を變らないとして求めた解は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} e'_1 &= \frac{p}{E_1} \\ e'_1 &= \frac{p}{\eta_1} t \\ e_2 &= \frac{p}{E_2} \left(1 - \varepsilon^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

但し、 ε は自然對數の底をあらわす。一方、二つの Unit を結んだ模型全体の歪を e とすると $e = e'_1 + e'_1 + e_2$ であるから、

$$\eta_1/E_1 = \tau_1, \quad \eta_2/E_2 = \tau_2 \dots\dots\dots (3)$$

とにおいて全体の歪 e が次のようにあらわされる。

$$e = \frac{p}{E_1} + \frac{p}{E_1} \cdot \frac{t}{\tau_1} + \frac{p}{E_2} \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

τ_1 は弾性緩和時間 (relaxation time), τ_2 は弾性遅延時間 (retardation time) といわれる量である。

第 5 圖 (c) の曲線は (4) 式で厳密にあらわされるわけであるが、雪の縮みを測定して得られた第 3 圖 (a) のグラフも x, y, z 及び \overline{OA} を第 3 圖 (a) に示したようにとつて

$$\overline{OA} = \frac{p}{E_1}, \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$y = \frac{p}{E_2} \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$z = \frac{p}{E_1} \frac{t}{\tau_1} \dots\dots\dots (7)$$

とすればこの式で全く再現される。(6)式で第3圖(a)の曲線のAB部分があらわされるため

には $x(t) = y_{t \rightarrow \infty} - y(t) = \frac{p}{E_2} \epsilon^{-\frac{t}{\tau_2}}$

従つて $\log x = \log \frac{p}{E_2} - \frac{1}{\tau_2} t$

又は $\log_{10} x = \log_{10} \frac{p}{E_2} - \frac{\log_{10} \epsilon}{\tau_2} t \dots\dots\dots (8)$

でなければならない。つまり $\log_{10} x$ が時間 t に比例すればよい。実際に x と t との関係を x を対数目盛にとつて圖に畫くと、第3圖(a)の曲線ABに対しては、同圖(b)に示したように

$$\log_{10} x = \log_{10} 0.52 \times 10^{-3} - 0.508 t \dots\dots\dots (9)$$

であらわされる直線になる。他の測定例についても同様に $\log x$ は t に比例し、OAとBCの部分直線になるから、雪の歪-時間曲線はすべて上に述べた模型の粘弾性係数を用いて(4)式であらわすことが出来る。

(8)と(9)とをくらべると、 $p/E_2 = 0.52 \times 10^{-3}$ 、 $(\log_{10} \epsilon)/\tau_2 = 0.508$ となり、 p はこの實驗では $10.20 \text{ gr wt/cm}^2 = 1.00 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2$ 、であつたから、 $E_2 = 1.92 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2$ 、 $\tau_2 = 0.85 \text{ min}$ が求められる。一方、第3圖(a)で $\overline{OA} = 1.04 \times 10^{-3}$ であるから(5)から $E_1 = p/\overline{OA} = 0.960 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2$ となり、 $z(t) = 0.245 \times 10^{-3} t$ と(7)式とを比較すれば $\frac{p}{E_1 \tau_1} = 0.245 \times 10^{-3}$ 、 $\frac{p}{E_1} = \overline{OA} = 1.04 \times 10^{-3}$ であるから $\tau_1 = 4.25 \text{ min}$ が得られる。 E_1 、 τ_1 及び E_2 、 τ_2 の値から(3)の關係を用いて η_1 及び η_2 も夫々求められる。なお、 $\overline{OA} = e_1$ の値は直接に測定することがむづかしいので、 $\log_{10} x$ と t の關係をあらわす直線から $t=0$ での x の値として先ず $\overline{AA'}$ を求め、これから \overline{OA} を求めた。

荷重を取去つた後の雪の「伸び」の曲線からも前と同様の手續で粘弾性の係数を求めることが出来る。この場合は Maxwell Unit の緩衝器は働かないから、第3圖(a)の曲線CDEから求められる弾性係数を E'_1 、 E'_2 、retardation time を τ'_2 とし x' を圖に示したようにとると、

$$\overline{CD} = \frac{p}{E'_1} \quad x' = \frac{p}{E'_2} \epsilon^{-\frac{t}{\tau'_2}}$$

となる。若し雪の柱が理想的な Maxwell-Voigt body であるならば E'_1 、 E'_2 、及び τ'_2 は夫々前に求めた E_1 、 E_2 及び τ_2 と等しくなる筈であるが、實際には等しくならぬことも多い。第3圖(c)は x' と t との關係を x' を対数目盛にとつて示したものである。これで見られるように、 $\log_{10} x'$ と t との比例關係も前の場合ほどよく成立たない。併し、荷重を取去つた後2分までの點を直線で結ぶと、その方程式は $\log_{10} x' = \log_{10} 0.52 \times 10^{-3} - 0.364 t$ となり、これから求められる E'_2 と τ'_2 の値は次の通りである。

$$E'_2 = 1.92 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2, \quad \tau'_2 = 1.19 \text{ min}$$

\overline{CE} は $\overline{OA'}$ と此の例では等しいので、

$$E_1' = 0.960 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2$$

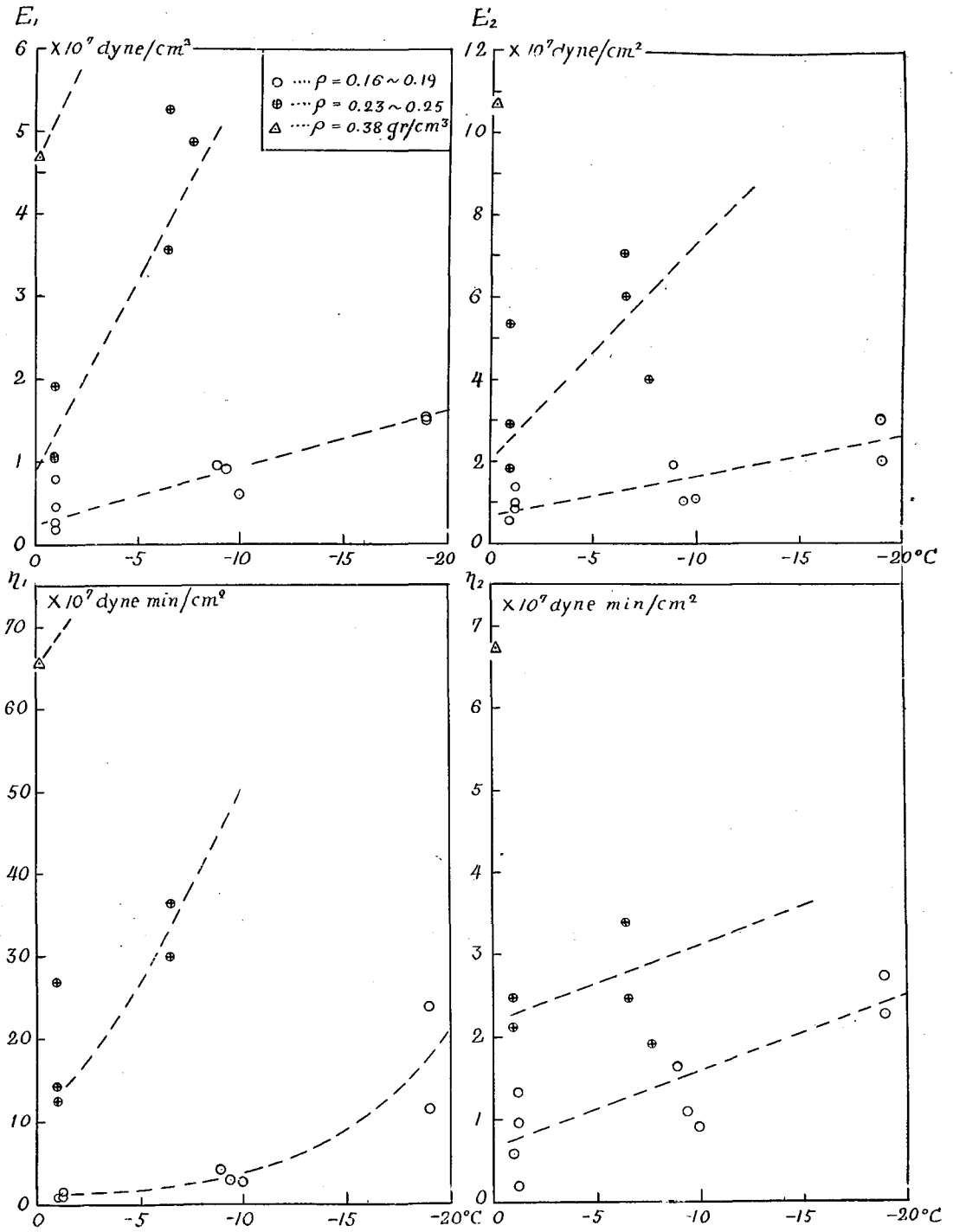
となり、 E_1' 、 E_2' は E_1 、 E_2 と夫々一致したが τ_1' は τ_2 より大きくなつたわけである。 E_1' と E_2' も兩方共或いは何れかが測定誤差の範圍を越えて夫々 E_1 、 E_2 より大きくなる場合が少なくない。これは荷重を加えた爲に雪の性質が變ることを意味するのであるが、追加荷重の場合の弾性及び粘性係数の變化とあわせて改めて検討する必要があると考えられる。

IV. 粘弾性係数の測定結果

歪時間曲線を測定した雪は、未だ降つた當時の結晶形が残つているやわらかい雪(比重 0.16~0.19)と、幾分しまり雪となつた時に融雪水が少量全体に滲み込んだ後再び凍つてそのまま積雪の中層に埋もれた雪(比重 0.23~0.25 で、かさかさした感じ)とそれに堅いしまり雪(比重 0.38)の3種類である。寫眞1はこれらの雪の結晶の顯微鏡寫眞で、(a)、(b)、(c)は夫々比重 0.16、0.25、及び 0.38 の雪からとつた結晶である。歪の測定は合計 24 本の雪の柱について行つたが、この中、雪の密度と温度の影響を代表する 16 例について前章に述べた方法で弾性係数と粘性係数な

第 1 表 積雪の弾性係数 E_1 、 E_2 、粘性係数 η_1 、 η_2 、
弾性緩和時間 τ_1 及び 弾性遅延時間 τ_2

温度 °C	-1.2	-1.2	-1.2	-1	-1	-1	-1	-1
密度 gr/cm ³	0.16	0.19	0.16	0.16	0.25	0.26	0.23	0.38
長さ cm	7.2	7.2	7.2	6.1	5.7	7.3	11.9	6.9
壓力 dyne/cm ²	1.00×10 ⁴	0.50×10 ⁴	0.25×10 ⁴	0.50×10 ⁴	1.00×10 ⁴	1.00×10 ⁴	1.00×10 ⁴	1.00×10 ⁴
$E_1 \times 10^{-7}$ dyne/cm ²	0.18	0.25	0.78	0.45	1.03	1.05	1.92	4.70
τ_1 min	5.58	4.23	1.31	2.00	13.9	11.5	14.0	14.0
$\eta_1 \times 10^{-7}$ dyne min/cm ²	1.00	1.06	1.02	0.89	14.3	12.5	26.9	65.8
$E_2 \times 10^{-7}$ dyne/cm ²	1.00	1.39	0.83	0.57	1.82	2.94	5.27	10.7
τ_2 min	0.97	0.98	0.22	1.04	1.15	0.71	1.47	0.63
$\eta_2 \times 10^{-7}$ dyne min/cm ²	0.97	1.37	0.18	0.59	2.48	2.11	7.75	6.73
温度 °C	-8.9	-10.0	-9.4	-6.5	-6.5	-7.7	-19	-19
密度 gr/cm ³	0.19	0.17	0.17	0.25	0.25	0.25	0.18	0.18
長さ cm	7.1	7	6.4	6.9	6.9	6.7	0.6	6.6
壓力 dyne/cm ²	1.00×10 ⁴	0.50×10 ⁴	0.50×10 ⁴	1.00×10 ⁴	2.00×10 ⁴	1.00×10 ⁴	0.50×10 ⁴	1.00×10 ⁴
$E_1 \times 10^{-7}$ dyne/cm ²	0.960	0.63	0.91	3.57	5.29	4.87	1.52	1.53
τ_1 min	4.25	4.39	3.27	10.2	5.65	25.6	15.7	7.44
$\eta_1 \times 10^{-7}$ dyne min/cm ²	4.08	2.78	2.98	36.4	29.9	(125.)	23.8	11.4
$E_2 \times 10^{-7}$ dyne/cm ²	1.92	1.11	1.09	6.02	7.08	4.00	2.00	3.02
τ_2 min	0.85	0.80	0.57	0.56	0.35	0.47	1.36	0.75
$\eta_2 \times 10^{-7}$ dyne min/cm ²	1.64	0.89	3.79	3.38	2.46	1.89	2.72	2.26

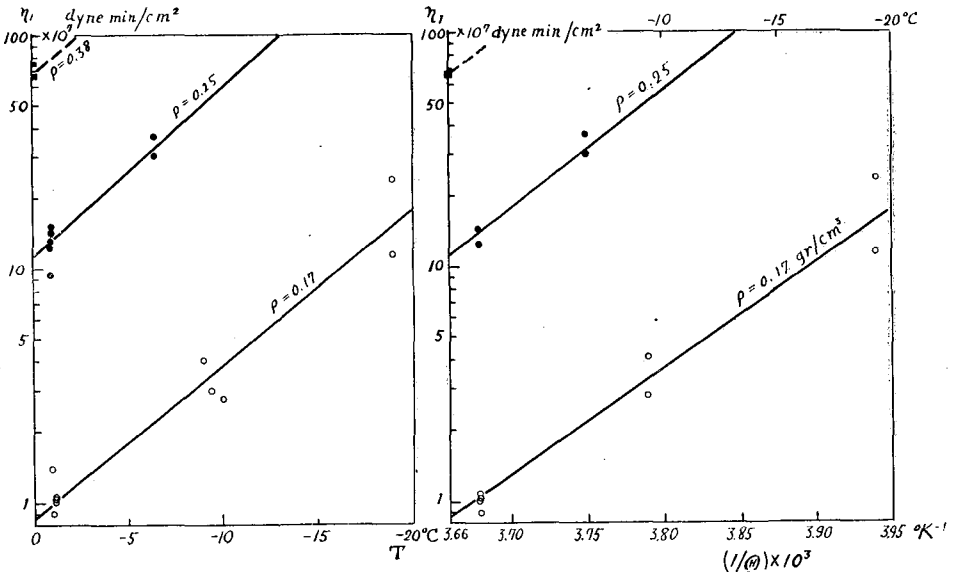


第6圖 雪の弾性係数 E_1 , E_2 及び粘性係数 η_1 , η_2 と温度との関係

らびに τ_1, τ_2 を測定した結果を表にしたのが第1表である。第6圖は主に第1表に掲げた測定結果について E_1, E_2, η_1, η_2 の各々と温度との關係を圖示したものである。 E_1, E_2, η_2 は此の温度範圍では温度 $-T$ に大体比例して増し、 η_1 は温度が低くなるにつれて指數函数的に増す。 η_2 以外は密度が大きい雪ほど増し方が激しい。 E_1 と E_2 は同じ程度の大きさであるが η_1 は η_2 にくらべて1桁大きい値を持つている。温度低下による増し方も η_2 より η_1 の方が大きい。第7圖(a)は η_1 を對數目盛にとつて温度 $T^\circ\text{C}$ との關係を示したものである。 $\log \eta_1$ は大体 $-T$ に比例して増し、比例常數はここにあげた2種類の雪で殆んど等しい。 η_1 と T の關係は自然對數の底を e として大体次の式であらわされる。

比 重 0.17 の雪: $\eta_1 = 0.85 \times 10^7 \cdot e^{-0.152 T}$ dyne min/cm²

比 重 0.25 の雪: $\eta_1 = 12.0 \times 10^7 \cdot e^{-0.157 T}$ dyne min/cm²



(a) 第7圖 粘性係數 η_1 と温度との關係 (b)
 T: 攝氏の温度, θ : 絶對温度

第7圖(b)は η_1 と絶對温度 θ の逆數との關係を圖示したもので、 $\log \eta_1$ は $1/\theta$ にも大体比例する。この圖から次の關係式が得られる。

比 重 0.17 の雪: $\eta_1 = 0.82 \times 10^7 \cdot e^{10.4/\theta}$ $\frac{\text{dyne min}}{\text{cm}^2}$

比 重 0.25 の雪: $\eta_1 = 1.08 \times 10^8 \cdot e^{11.9/\theta}$ $\frac{\text{dyne min}}{\text{cm}^2}$

従つて、creeping の起り易さを η^{-1} であらわせば、 η^{-1} は A, B を常數として、

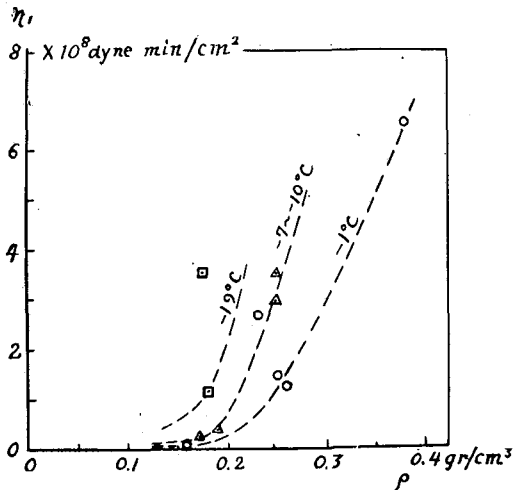
$$\eta^{-1} = A e^{-\frac{B}{\theta}}$$

の形であらわすことが出来る。A は雪の密度で大きく變る。

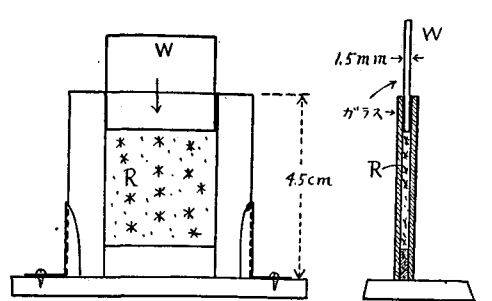
又、同じ温度ではどの粘弾性係数も雪の密度が大きくなると著しく大きな値になる。第8圖に η_1 を例にとつて密度 ρ との関係を示した。他の係数もこれと大体似た傾向を示す。しかし、これは低温實驗室に何日間も保存しておいた雪についての測定結果であるから、なまの雪についてはまた違った関係が得られるかも知れない。

V. 雪の粒子構造の塑性變形
(顯微鏡による觀察)

雪の結晶の集りが破壊壓より小さい壓力を受けながら靜かに變形する過程を顯微鏡で觀察した。



第8圖 粘性係数 η_1 と雪の密度 ρ との関係



第9圖 壓力による雪の結晶の變形を見るために結晶を入れる容器

雪の結晶の集りが破壊壓より小さい壓力を受けながら靜かに變形する過程を顯微鏡で觀察した。第9圖はガラス板を張り合せて作った容器で薄い隙間 R に雪の結晶を入れ、この隙間と同じ厚さと幅を持つたガラス板 W を上から差込んで結晶の集りの上面とガラス板の下端とを接觸させる。容器内の結晶を餘り密に入れると寫眞に撮り難いので、實際の積雪よりはまばらに入れた。そこで、これらの結晶の作る粒子構造が幾らかでも實際の積雪に近いようにするため、壓力を加える前に容器を水平

にしたまま2日間 -20°C の實驗室において結晶同志につながりを持たせた後、容器を靜かに立てた。W による壓力は 7.2 gr wt/cm^2 であつた。 -20°C の室内では壓力の爲の變形が遅すぎて觀察に不便なので -8°C の恒溫箱に入れた。一定時間毎に取出して顯微鏡 M で R 内の結晶の寫眞を撮影した。寫眞 2 はその中の一例で、(a) は壓力をかける前、(b) は壓力を加えたまま -8°C に6時間30分おいた後のものである (a) で結晶に A, B と記號をつけた部分は、(b) の A, B と記したところと夫々同じ結晶の同じ部分である。A は上からの壓力のために、幹のつけ根の細い所 A_0 で塑性變形を起して曲り、B は非常に長い樹枝狀結晶の大枝の一部であるがやはり捩れたように曲つている。又 (a) の寫眞には見られなかつた上部の結晶が (b) では上から A を押曲げて A のあつた位置に下りて來ている。雪の結晶が靜止したまま接觸していると、接觸點では水蒸氣の凝結が起つて互に凍りつくことをその顯微鏡寫眞によつて前に筆者が報告³⁾した。結晶の集りが壓力を受けると結晶自身上に述べたように塑性變形をする一方、結晶同志が互に密につまつて行く。従つて結晶同志が接觸する箇所も増すわけであるが、この實

験で観察した所によると、互に相對的に移動しながら二つの結晶が接觸しても、その接觸點には水蒸氣の凝結が見られず、接觸したままずれて行く。又、結晶が厚みのある形のあるときには、一つ一つの結晶の變形は殆んどみられないのに、結晶同志はやはり密につまつて行く。この場合にも、もともと結晶同志が接觸して凍りついていた箇所が他の部分より細いために、特にそこに歪力がかかつて曲げられるということはあるであろうが、それだけにしては、雪粒のつまり方が速すぎるように思われる。何れにしても、積雪が破壊壓より小さい壓力を受けて壓縮される場合の粘性は、寫眞2に見られるような結晶の細い部分とか細長い結晶或いは結晶同志が接觸點で凍りついた部分などの塑性變形に於ける粘性と、それに結晶同志の滑りの摩擦が原因となつていふと考えられる。

氷の結晶自身の粘性も温度が低い程大きいし、又、Bowden⁴⁾によれば氷と氷との靜止摩擦係数は 0°C から -30°C の間で温度が降ると急に大きくなる。この事實と上述の顯微鏡による觀察結果とから、積雪の粘性係数 η_1 と温度 T との關係の測定結果が定性的に説明される。

VI. あ と が き

積雪のレオロジー的性質を四つの粘弾性係数 E_1, E_2 及び η_1, η_2 であらわし、これらの係数を雪の密度と温度の函数であらわすことが目的であつたが、測定の数が少いため十分に目的を達することが出来なかつた。此の報告に述べた實驗はみな測定時間が 20 分内外であつたから、その間に弾性係数と粘性係数に甚だしい變化はなかつた。しかし、更に長く時間をかけておいた場合の粘弾性係数の變化、特に荷重を加えておいた時間ならびに荷重の大きさとの關係などについて改めて調べる豫定である。又、雪が壓力を受けて creeping (一定速度の縮み) を起す際に縮み方が雪の中で壓力の方向に一樣であると假定して粘性係数を求めたが、果してその通りであるか否かについてなおよく検討したい考である。

最後に、此の研究は吉田順五教授の指導によつて行われ、又計算の一部分は堂腰紀子嬢を患わした。研究に要した費用は文部省科學研究費に依つた。ここに記して感謝の意をあらわす。

文 献

- 1) 吉田順五・笹谷雅信・内海威彦 1948 積雪の弾性と匍匐. 低温科學, 4, 11.
- 2) 吉田順五 1953 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科學, 10, 1.
- 3) 小島賢治 1953 雪の結晶の變形 II. 低温科學, 9, 187.
- 4) Bowden F.P. & Tabor D. 1950 The Friction and Lubrication of Solid.

Résumé

A column of snow (diameter of the section: 5 cm, length: 7~14 cm) was compressed vertically by a constant pressure p which was smaller than the break down pressure of the sample. The strain e produced by p was continually measured by means of an optical lever. An elastic strain e_1 was observed at the instant of applying p and the strain

increased gradually. But the increasing rate of e decreased exponentially and reduced to a constant rate after the lapse of two or three minutes from loading. The observed curve (Fig. 3 (a)) of the relation between the strain e and the time t was found to have the same type as that (Fig. 5 (c)) of a model (Fig. 5 (a)) constructed by connecting the Maxwell unit and the Voigt unit in series. The curve could be represented by the formula:

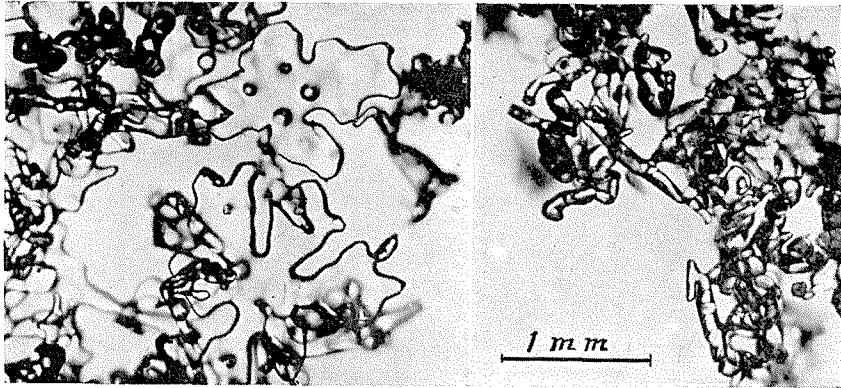
$$e = \frac{p}{E_1} + \frac{p}{E_1} \cdot \frac{t}{\tau_1} + \frac{p}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right)$$

where E_1 and E_2 are two elastic constants while τ_1 and τ_2 are the relaxation time and the retardation time respectively. Two viscosities of the snow η_1 and η_2 are given by the formulas: $\eta_1 = E_1 \tau_1$ and $\eta_2 = E_2 \tau_2$. The values of these visco-elastic constants of snow columns with different densities were measured at various temperatures below 0°C . The results are tabulated in Table 1 and are graphed in Fig. 6. All values of E_1 , E_2 , η_1 and η_2 increase as the temperature decreases. The relation between η_1 and the temperature T ($^\circ\text{C}$) of snow was found to be represented by

$$\eta_1 = 0.85 \times 10^7 \cdot e^{-0.152T} \text{ dyne min/cm}^2 \text{ (density of snow: } 0.17 \text{ gr/cm}^3\text{)}$$

$$\eta_2 = 12.0 \times 10^7 \cdot e^{-0.157T} \text{ dyne min/cm}^2 \text{ (density of snow: } 0.25 \text{ gr/cm}^3\text{)}.$$

Plastic deformation of snow crystals under a constant pressure was observed by a microscope. A large number of snow crystals were lightly packed in the narrow space between two vertical glass plates as shown in Fig. 9 and they were compressed by the weight of a glass plate W . The whole set was kept in a thermostat with temperature $-8^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ and the crystals were photographed by a microscope at intervals of several hours. It was found that some of the rod-like snow crystals were bent plastically at their narrow part while the whole assembly of crystals was gradually compressed to make a dense structure. An example of crystal deformation by pressure is shown in Photo. 2.



(a)

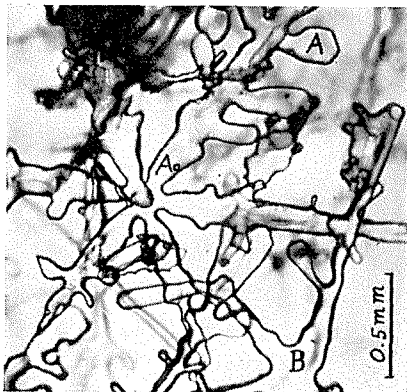


(b)

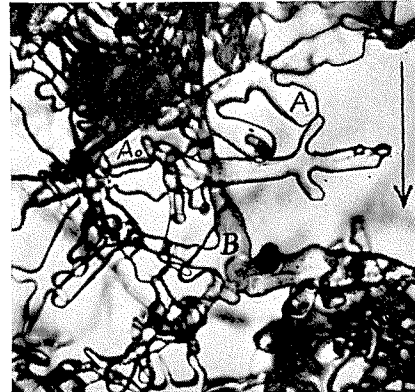


(c)

寫眞 1. 粘弾性係数の測定に用いた雪からとつた結晶の顕微鏡寫眞
 (a) 比重 0.16, (b) 比重 0.25, (c) 比重 0.38 の雪の結晶



(a)



(b)

寫眞 2. 壓力による雪の結晶の塑性變形
 (a) 壓力を加える前
 (b) 壓力を加えたまま -8°C に 6.5 時間おいた後
 (矢印は壓力の方向を示す)