HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	0℃の水に浸した雪の圧縮　I
Author(s)	木下, 誠一
Citation	低温科學. 物理篇, 21, 13-22
Issue Date	1963-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17993
Type	departmental bulletin paper
File Information	21_p13-22.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Seiti KINOSITA 1963 Compression of Snow Immersed in Water of 0°C. I. *Low Temperature Science, Ser. A, 21.* (With English résumé p. 21)

0°C の水に浸した雪の圧縮 I*

木下誠一
(低温科学研究所　応用物理学部門)

(昭和37年10月受理)

今冬，筆者は尾瀬沼のスノージャム調査の機会を得て，積雪が沼に浮んでいる状態を観察した[1]。この調査において，雪が0°Cの水の中に浸されると，僅かの荷重をうけても，きわめて速く縮む現象に気付いた。筆者はこれまでに0°C以下の温度で雪を圧縮する研究を，広汎におこなってきたのであるが，そのいずれの場合にくらべても，0°Cの水に浸された雪は遙かに縮み易いと思われた。それで，実験室において，0°Cの水槽を作り，その中で雪を圧縮する実験をおこなった。この論文はその実験の報告である。

I. 実験方法

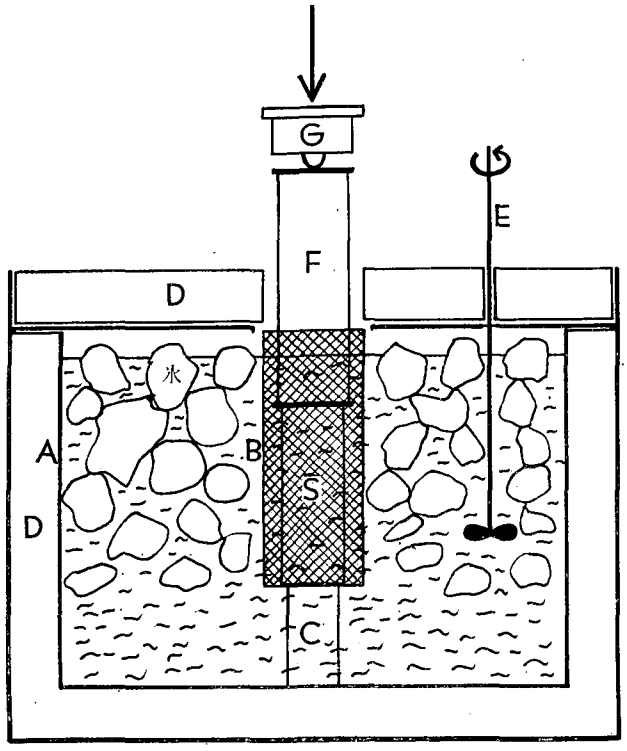
実験装置の略図を第1図に示す。0°Cの水を入れる水槽として，深さ35 cm，断面40 cm×40 cmのブリキ箱Aを用いた。この水槽Aの中央には，高さ25 cm，直径10 cmの金網円筒Bがある。円筒Bは水槽Aの底面の上に高さ10 cmの丈夫な枠Cでささえられる。水槽Aは全体が厚さ5 cmの断熱剤（ホームスチレン）Dで蔽われる。水槽Aの中に水と氷塊を入れ，たえず電動攪拌器Eで攪拌する。ただし，金網円筒Bの中には氷塊を入れない。0°Cの水だけが金網の目を通してBの中を出入りする。

高さ15～20 cm，直径6.6 cmの雪の円壔を，低温室内に保存してある積雪塊から切り取り，−2°C位の温度で2時間ほど放置する。それから，その雪の円壔を金網円筒Bの中に静かに入れる。第1図Bの中の円壔Sがそれである。こうすると，0°Cの水の中に雪を入れても，新しく氷ができることはほとんどない。

雪の円壔Sの上に，断熱剤の一種であるエアライトホーム（組成ポリウレタン）の棒Fをのせる。棒Fの長さは26 cm，断面は9 cm×9 cmの正方形で，重さは89 grである。この重さのため，雪の円壔Sには2.6 gr/cm² の荷重がかかり，Sは浮上を押えられて，その下面が金網円筒Bの下面に接した。あらかじめ装置全体を万能試験機にのせておき，試験機の下降枠にはロードセルGをとりつけておく。このロードセルGが，棒Fの上面をおす。ロードセルとして50 kgまで測定可能のものを用いた。ロードセルにかかる力をストレンメーターを通して，電子管式記録器に記録した。

* 北海道大学低温科学研究所業績　第634号

0°C の水に浸した雪は，僅かな力で変形するので，おし棒 F としては軽いものがよい。又棒を通して外気から熱が伝わることのないよう良好な断熱剤を用いる必要がある。このような点を考慮して，エアライトホームを用いたのである。用いたエアライトホームの密度は 0.04 gr/cm³ という軽いものではあるが，その降伏応力は 3～5 kg/cm² という強いものである[2]。降伏のときの歪は，2% 位である。今の場合，雪にかかる応力は高さ 500 gr/cm² であるにもかかわらず縮みは数 cm にも達した。したがって，おし棒 F は剛体として扱ってよい。



第1図 実 験 装 置

A: 水 槽，B: 金網円筒，C: 支 持 台，D: 断熱剤
E: 電動攪拌器，F: おし棒，G: ロードセル，S: 雪円壔

II. 実験結果の一例

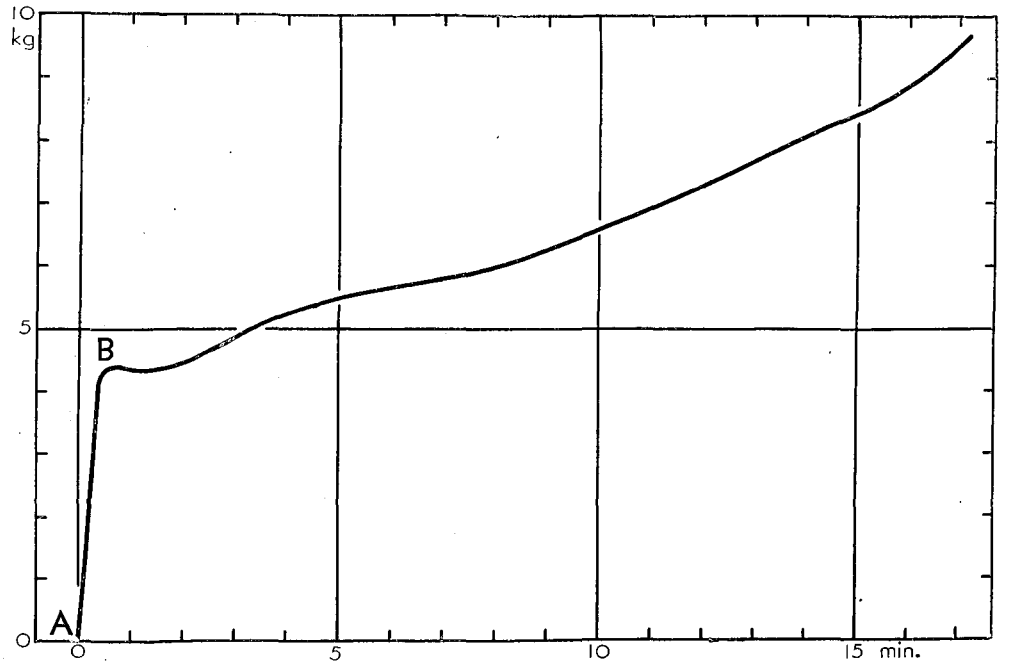
密度 0.42 gr/cm³ のしまり雪の円壔 (高さ 21.8 cm，直径 6.6 cm) を 0°C の水の中に浸して，2.9 mm/min の速度で圧縮したときの記録を，第 2 図に示す。縦軸が圧縮力で，横軸は時間である。圧縮速度を雪の円壔の高さで割ったもの，すなわち，歪速度は $2.2\sim3\times10^{-4}$/sec である。第 2 図では，A 点で圧縮が開始され，はじめ曲線は直線的に急上昇する。B 点 (4.3 kg, 127 gr/cm²) に達すると，曲線は暫くほぼ一定な値を保つが，その後ゆるやかに上昇する。つまり，B 点以後は，圧縮力があまりふえないのに，雪円壔はどんどん縮むのである。力が 9.3 kg

に達したときに，圧縮をやめた。雪の円壔は 4.9 cm 縮み，16.5 cm の高さになった。又，横に少しふくれ，直径が 6.8 cm になった。そして，密度ははじめの 0.42 gr/cm³ から 0.51 gr/cm³ にました。

この最後の密度は，次のようにして求められた。圧縮後の雪円壔からその一部(一定体積)を切りとり，水槽からとり出す。適当に水をきってから，その試料の含水率を求める。含水率の値から試料内に含まれる氷の量を求めて，雪円壔の密度を計算するのである。含水率計として吉田が考案した結合型熱量計方式の積雪含水率計[2]を用いた。この水に浸った雪の密度を求める方法の詳細は，藤岡・田畑及び筆者の「尾瀬沼スノージャム調査報告[1]」に述べられている。

このようにして求めた密度と，圧縮前と圧縮後の雪円壔の体積変化から求めた密度とは，ほとんど同じであった。

空気中で雪の円壔を塑性圧縮するときには，後で述べるように，圧縮力の値は大きいけれども，力曲線はこの第2図の場合と同じように変化する。



第2図 圧縮力-時間曲線の一例

初密度 0.42 gr/cm³，高さ 21.8 cm，直径 6.6 cm の雪の円壔を 0°C の水の中に浸して，圧縮する場合。圧縮速度 2.9 mm/min。

III. 雪円壔内の応力状態

0°C の水の中で，雪の円壔をおす場合と，空気中でおす場合とで，内部の応力状態がどのように違うかを検討してみよう。

円壔の下面から上方に z 軸をとり，円壔の高さを h とする。又，空気或いは水の密度を ρ'，雪の密度を ρ，重力の加速度を g とすると，z 方向の応力 σ は，次の平衡の式

$$\frac{d\sigma}{dz}-(\rho-\rho')g=0 \qquad (1)$$

で与えられる。境界条件として

$$z=h \text{ で}, \quad \sigma=-F$$

がなりたつ。F は圧縮力で，ロードセルに現われる力とおし棒重量との和である。したがって

$$-\sigma=F+(\rho-\rho')g(h-z) \qquad (2)$$

がえられる。雪の密度 ρ は 0.25～0.6 gr/cm³，ρ' は，空気の場合，0.001 gr/cm³，水の場合，1 gr/cm³ である。雪の円壔の高さ h は 10～20 cm であるから，(2) 式の第 2 項 $(\rho-\rho')g(h-z)$ は空気中で圧縮の場合には，円壔の上面で 0 gr/cm²，上面から下へ行くほど大きくなり，下面で最大になるが，たかだか 12 gr/cm² である。又，水中で圧縮の場合には，円壔の上面で 0 gr/cm²，上面から下へ行くほど小さくなり，下面で最小になるが，たかだか −15 gr/cm² である。第 2 図の場合のように，圧縮力 F が，圧縮が開始して直ちに 100 gr/cm² をこすような場合には，(2) 式の第 2 項は無視してよいであろう。したがって，円壔全体にわたって，$\sigma=-F$ と考えてよいわけである。

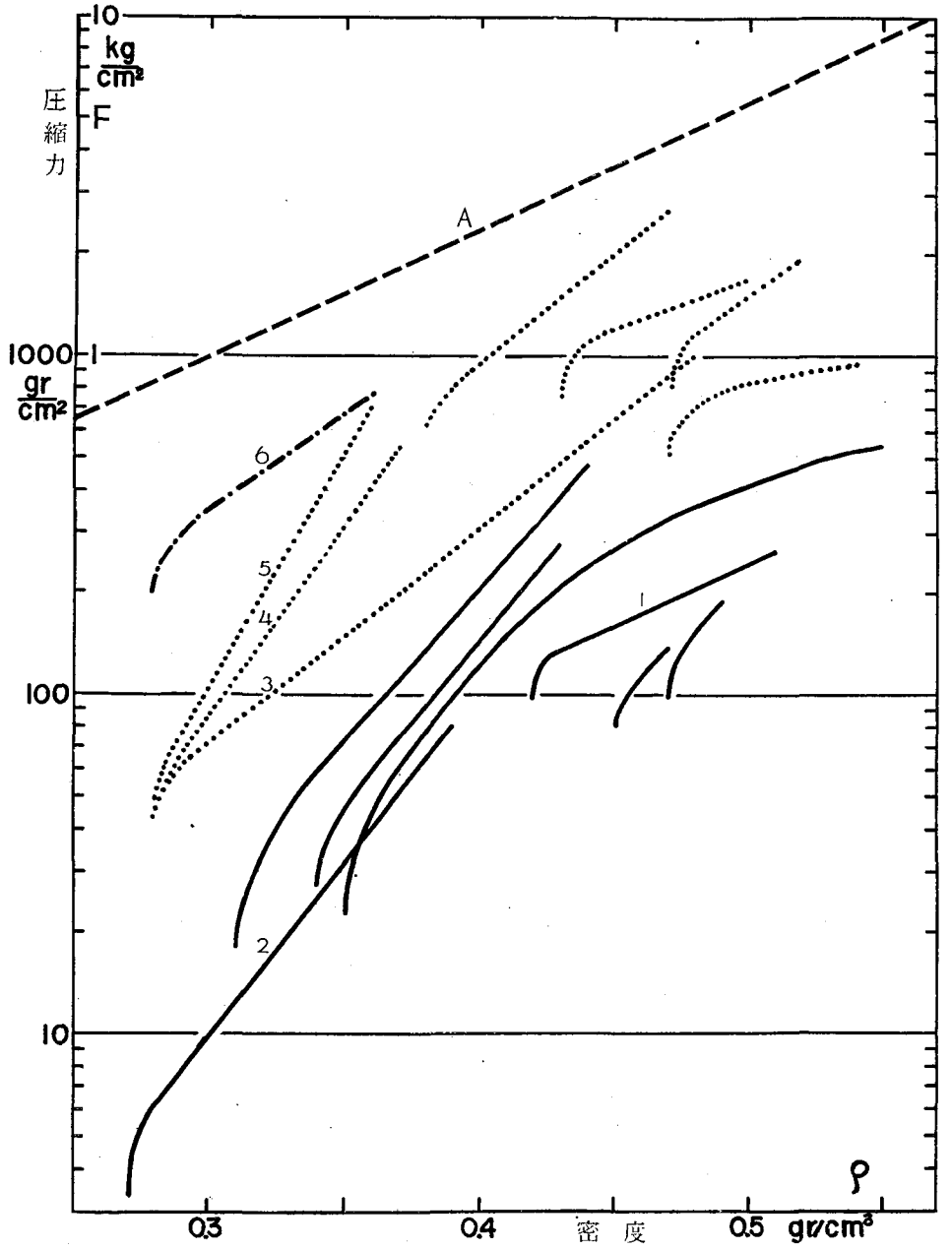
筆者の実験では，空気中で圧縮する場合も，水中で圧縮する場合も，圧縮力が 100 gr/cm² をこすことが，ほとんどすべてであった。したがって，円壔全体にわたって，$\sigma=-F$ として取扱うことにする。

IV. 圧縮力と密度との関係

圧縮が進むにつれ，雪円壔の密度はまして行く。一つの圧縮過程における圧縮力 F と雪の密度 ρ との関係を，第 3 図の片対数グラフに示す。このグラフの中の実線の曲線が，0°C の水の中に雪を浸して圧縮する場合である。圧縮速度は 2～5 mm/min，圧縮歪速度は $3\sim10\times10^{-4}$ /sec であった。第 2 図にあげた例は，第 3 図の曲線 1 である。第 3 図の曲線 2 の場合は，はじめの密度が 0.27 gr/cm³ という小さい場合で，このときには，雪円壔は，その上におし棒をのせただけで，すでに縮みはじめた。それで，圧縮の降伏点を正確に求めることは出来なかった。又，この場合は，(2) 式の第 2 項を無視できないので，雪円壔の上下の位置で応力が異なるのであるが，ここでは圧縮力 F の値をそのままグラフに示した。

第 3 図のグラフには，0°C の水の中に雪を浸して圧縮する場合の他に，空気中で雪を圧縮する場合の圧縮力と密度との関係も示してある。点線の曲線は，空気中で湿った雪を圧縮した場合である。そのなかで，3，4，5 の番号を附した曲線は，含水率 2.6%，はじめの密度 0.28 gr/cm³ の雪の円壔を，それぞれ次の圧縮速度で圧縮した場合である。

3	28 mm/min	$3\sim7\times10^{-3}$/sec
4	18	2～3



第3図 圧縮力と密度との関係

実線： 0°C の水中に浸した雪， 点線： 湿った雪，
鎖線： 0°C の乾いた雪， 破線： 0°C 以下の雪。

5 11.5 mm/min $1.3\sim1.8\times10^{-3}$/sec

圧縮速度が大きいほど，同じ密度に対する力が小さい。他の点線の曲線では，圧縮速度は

1.3～20 mm/min，圧縮歪速度は 4×10^{-4}～7×10^{-3}/sec である。

鎖線の曲線は，0°C ではあるが，湿っていない雪の圧縮の場合である。点線 3，4，5 の場合と同じ初密度で，圧縮速度は 3.8 mm/min，圧縮歪速度は $4\sim6\times10^{-4}$/sec であった。

第 3 図のグラフの一番上の破線 A は，0°C 以下 −20°C 位までの雪の塑性圧縮の実験[3]において，平均として得られたものである。雪の温度，歪速度で多少違うが，圧縮力と密度の関係はほぼ曲線 A で表わされる。

同じ密度に対する圧縮力は，水に浸して圧縮する場合が一番小さく，それから空気中における圧縮の，湿った雪の場合，0°C の乾いた雪の場合，0°C 以下の雪の場合の順である（第 3 図で，実線，点線，鎖線，破線の順に上になっている）。すなわち，圧縮をうける雪の水を含む度合がつよいほど，力が小さい。一番力が小さい水に浸して雪を圧縮する場合の力は，一番大きい空気中で 0°C 以下の雪を圧縮する場合の，僅か数十分の一にすぎない。

湿った雪が乾いた雪よりも縮み易いことは，氷河の沈降速度の観測からも知られている。シュムスキー[4]によると（文献 4 の 298 頁参照），アルプスの氷河では，表面から 2 m の深さの密度 0.4 gr/cm³ の湿った雪は，一昼夜の間にはじめの厚さの 0.23% だけ縮むが，一方，グリーンランドの氷河では，同じだけの荷重をうけている乾いた雪の沈降の速度は，僅かにその 1/20 にすぎないことが観測されている。

同じく 0°C でありながら水を多く含む雪ほど，同じ密度のときの圧縮力が小さい。この理論的説明については，次の機会に考えてみたい。

V. 粘性係数と密度との関係

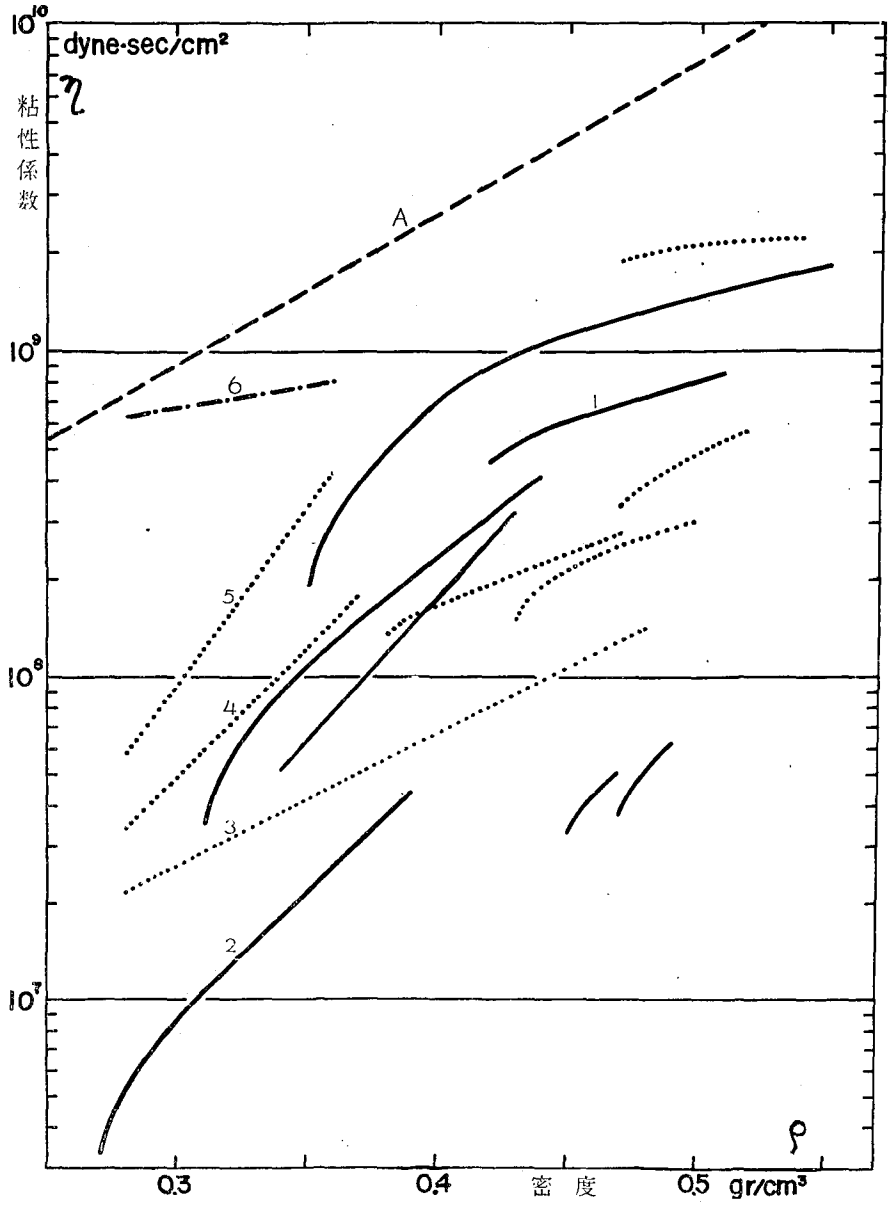
降伏点をすぎると圧縮力 F と歪速度 $\dot{\varepsilon}$ との間に，$F=\eta\dot{\varepsilon}$ の関係がある。完全塑性体では η は常数であるが，雪の塑性圧縮の場合には，圧縮が進むとともに，η の値がます。この η を圧縮の粘性係数とよんでいる。η と ρ の関係を第 4 図の片対数グラフに示す。グラフの実線は，0°C の水の中に浸した雪を圧縮する場合で，点線は，空気中で湿った雪を圧縮する場合，又，鎖線は，0°C の乾いた雪を圧縮する場合である。曲線に附した番号は，第 3 図の曲線に附した番号にそれぞれ対応する。破線 A は，0°C 以下の雪の塑性圧縮の場合について求められたものである。

筆者は，0°C 以下の雪の塑性圧縮を広汎におこなった結果，歪が 5% のときの粘性係数 η が，温度 T°C，密度 ρ gr/cm³，歪速度 $\dot{\varepsilon}$/sec と次の関係にあることをみつけた[5]。

$$\log_{10}\eta = -0.04\,T+4.6\,\rho-0.87\log_{10}\dot{\varepsilon}+4.55 \qquad (4)$$

(4) 式で $T=-4$°C，$\dot{\varepsilon}=5\times10^{-4}$/sec の場合の，$\eta$ と ρ の関係を，第 4 図の破線 A に示したのである。

(4) 式から解るように，粘性係数 η は歪速度 $\dot{\varepsilon}$ にも関係するから，η と ρ だけをとり出して，その関係をグラフに書いても，比較することは難しい。それでも 0°C 以下の場合の方が，0°C



第4図 圧縮粘性係数 η と密度 ρ との関係

実線： 0°C の水の中に浸した雪， 点線： 湿った雪； 鎖線： 0°C の乾いた雪， 破線： −4°C の雪 (歪速度 5×10^{-4} 1/sec)。

の水に浸っている場合よりも，同じ ρ に対する η の値は大きい。この傾向は，第3図の圧縮力の場合と同じである。

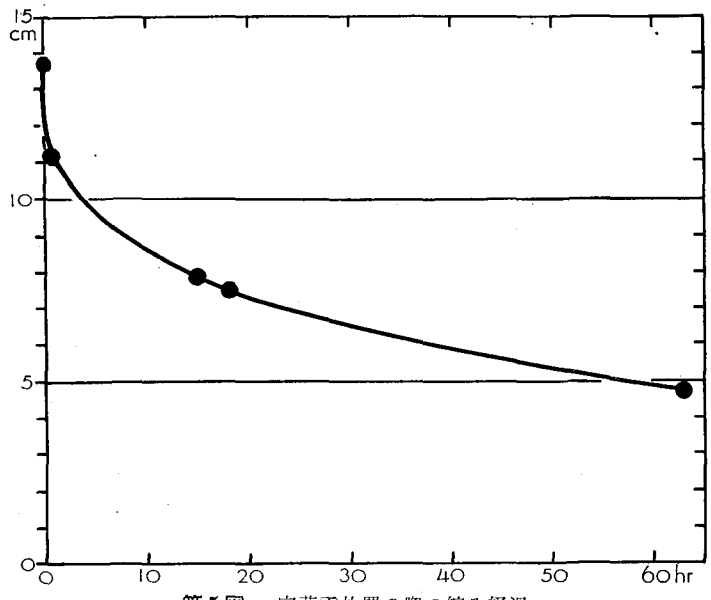
同じ初密度で，しかも同じ含水率をもつ湿った雪を，異なる圧縮速度でおした場合の曲線

3, 4, 5 では，圧縮速度(圧縮歪速度も)が大きいほど，同じ ρ に対する η の値が小さい。このように湿った雪についても，歪速度 $\dot{\varepsilon}$ が大きいほど η が小さいという関係がなりたつわけである。

VI. 定荷重放置の際の圧縮経過

0°C の水の中に浸した雪の円壔に，一定の荷重をかけたままで，縮む経過を調べた。第5図は，初密度 0.3 gr/cm³，高さ 13.7 cm，直径 6.6 cm の雪の円壔を，0°C の水の中に浸し，530 gr (15 gr/cm²) の荷重をかけておいたときの縮みの経過を示す。はじめは，急に縮むが，次第に縮み方はゆるやかになる。1日後には，はじめの高さのほぼ 50% に，2日後にはほぼ 40% に，63 時間後にはほぼ 30% に縮んだ。

この場合の雪の円壔の内部の応力は，(2) 式から上面では荷重に等しい 15 gr/cm² で上面から下に行くほど小さくなる。一番小さい下面では，はじめ 5 gr/cm² で，圧縮の進むにつれ大きくなり，最後には，13 gr/cm² になった。



第5図 定荷重放置の際の縮み経過
初密度 0.3 gr/cm³ の雪の円壔を 0°C の水の中に浸して，
その上に荷重 15 gr/cm² をかける。

第3図の圧縮力 F と密度 ρ の関係のグラフでは，初密度が 0.3 gr/cm³ 位の雪を 0°C の水に浸して圧縮する場合，密度が倍にもなるほどに雪が縮むときには，力 F が 200 gr/cm² 以上になっている。ところが，この第5図の実験例では，僅か 15 gr/cm² の荷重のままでも，時間がたつとはじめの高さの 30% にも縮み，又，密度もはじめの密度の2倍の 0.6 gr/cm³ にもなる。これは一見矛盾するようにみえるが，このことは歪速度の違いによって説明される。第3図の場合には，歪速度が 3×10^{-4}～10^{-3}/sec であったが，この第5図の場合には，歪速度は時間とと

もに小さくなり，荷重をかけてから1日後には歪速度は 10^{-6}/sec の程度になる。第3図の場合の約1/3000である。0°C 以下の雪や，湿った雪について，歪速度 $\dot{\varepsilon}$ が大きいほど，粘性係数 η が小さいことを述べたが，その関係は 0°C の水の中に浸した雪についてもなりたっと思われる。0°C 以下の雪の場合，(9)式から，ρ，T が一定なら，力 $F(=\eta\dot{\varepsilon})$ は

$$F \propto \dot{\varepsilon}^{0.13} \tag{10}$$

で表わされる。この場合歪速度 $\dot{\varepsilon}$ が1/3000になれば，力 F は約1/3になる。0°C の水の中に浸っている場合には，力 F が1/10以下にもなるのである。縮みかたがゆっくりなときには，力は小さくてよいのである。そして，0°C の水の中に雪が浸っている場合には，この傾向は非常に強いのである。

結　び

0°C の水の中に浸した雪は僅かの圧縮力で非常に縮むことが解った。今回の実験では外的な現象面だけをみたのであるが，次の機会には，雪の内部組織の変化について調べる積りである。

終りに，この研究に際し色々と御指導をいただいた吉田順五教授に，厚く感謝の意を表します。なお，この研究に要した費用の一部は，文部省科学研究費によるものである。

文　献

1) 藤岡敏夫・田畑忠司・木下誠一 1963 尾瀬沼スノージャム調査報告. 低温科学, 物理篇, ***21***, 95-115.
2) 木下誠一 1963 網状組織をもつ物質の圧縮 I. エアライトホーム(ポリウレタン)の圧縮. 低温科学, 物理篇, ***21***, 23-29.
3) 吉田順五 1959 積雪含水率測定用熱量計. 低温科学, 物理篇, ***18***, 17-28.
4) Шумский, П. А. 1955 Основы Структурного Ледоведения. Академия Наук СССР. Москва.
5) 木下誠一 1960 積雪における変形速度と変形形式との関係 III. 低温科学, 物理篇, ***19***, 135-146.

Résumé

Dry snow becomes very easy to compress when it is immersed in water of 0°C. As an extension of the series of experiments made by the present author on compression of dry snow, snow pillars immersed in water were compressed at constant speeds and the compressive forces were registered electrically during the compression. The result of one experiment is graphed in Fig. 2. (In this experiment, density of snow before immersion was 0.42 gr/cm^3, initial height and diameter of the snow pillar were 21.8 cm and 6.6 cm respectively and the speed of compression was 2.9 mm/min.) The compressive force changed with time as shown by the curve in that figure; the shape of the curve is almost the same as in the case of "plastic compression (Ref. 4)" of dry snow. But there is a great differ-

ence in the magnitude of compressive force according to whether a snow pillar is immersed or not. The force in Fig. 2 is so small as to be only a few hundredths of the forces observed on pillars of dry snow in the author's former experiments.

The density of snow increases as the pillar of snow is compressed. In Fig. 3 the compressive forces F registered in many experiments are plotted against the increasing density ρ of snow pillars. Different types of line refer to different kinds of snow in the following manner:

thick line……snow immersed in water,
dotted line……wet snow (free water content: several %),
dash-and-dotted line……dry snow of 0°C,
broken line marked A……dry snow below 0°C.

Actually each curve in Fig. 3 is continued at its left end by a straight line going down almost vertically, but that straight line is omitted for the sake of clearness of the figure. As seen from Fig. 3 compressive force F becomes very much the less, that is, snow becomes very much the easier to compress, the more water it comes to contain. The curves in Fig. 4 give relationships between compressive viscosity η and density ρ of snow. The compressive viscosity η is the ratio $F/\dot{\varepsilon}$, where $\dot{\varepsilon}$ denotes the strain rate, that is, the compressing speed divided by the height of snow pillar. Unlike in Fig. 3, the thick curves are positioned widely separated from one another in Fig. 4; this is the case with the dotted curves as well. That comes from the fact that those curves were obtained in experiments conducted by the use of different compressing speeds. Generally the viscosity η increases as the compressing speed, consequently the strain rate $\dot{\varepsilon}$, decreases.

The curve in Fig. 5 shows how the immersed snow pillar of density 0.3 gr/cm^3 contracts when loaded with a constant weight of 15 gr/cm^2. The height of the pillar was reduced to one-third of the initial value in 60 hours, which is a very rapid contraction such as is never observed in the cases of dry snow.