



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の反復荷重試験
Author(s)	対馬, 勝年; TUSIMA, Katsutosi
Citation	低温科学. 物理篇, 31, 57-68
Issue Date	1973-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18220
Type	departmental bulletin paper
File Information	31_p57-68.pdf



積雪の反復荷重試験*

対馬勝年
(低温科学研究所)
(昭和48年9月受理)

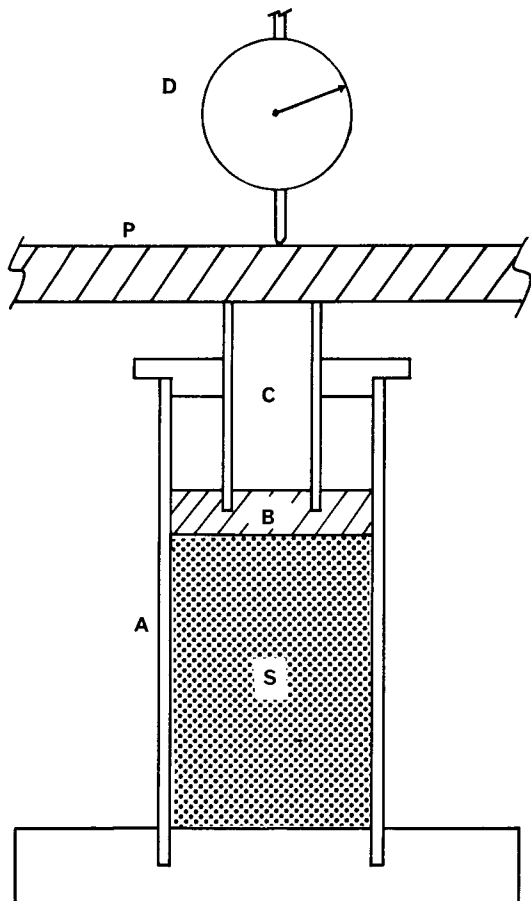
I. まえがき

道路に積った雪は走行する自動車のタイヤによって何度も何度もくり返し圧縮される。この反復圧縮によって路面の雪は密度の大きな硬い雪へと変わってゆく。この圧密された硬い雪は道路除雪及び冬期交通の障害となっている。

反復荷重による圧密過程の研究は、路面積雪対策にとって重要であるにも拘らず、従来ほとんどなされた例がない。そこで筆者は、市販の繰り返し荷重試験機を用いて、反復荷重による積雪の圧密過程を調べた。筒に入った雪柱に1.3ないし3.9 kg/cm²の圧力で2,500回にわたる反復荷重を加え、この間の密度変化の様子を、いろいろの温度、雪質のものについて調べた。

II. 実験装置及び方法

実験には市販の繰り返し荷重試験機(繰り返し式荷重一軸圧縮試験機 S67, 岩崎KK)を用いた。その主要部を第1図に模式的に示した。図中Sが雪の試料で、直径5.37 cm、底蓋のついた長さ13 cmの亚克力製筒Aの中に入っている。筒内の雪柱の上面には厚い塩化ビニールの円板Bがのり、この円板と圧縮棒Pとの間をアクリルの丈夫な筒Cがつな



第1図 実験装置の主要部

S: 雪柱, A: アクリルの筒, B: 塩化ビニール円板,
P: 荷重棒, C: 荷重伝達筒, D: ダイアルゲージ

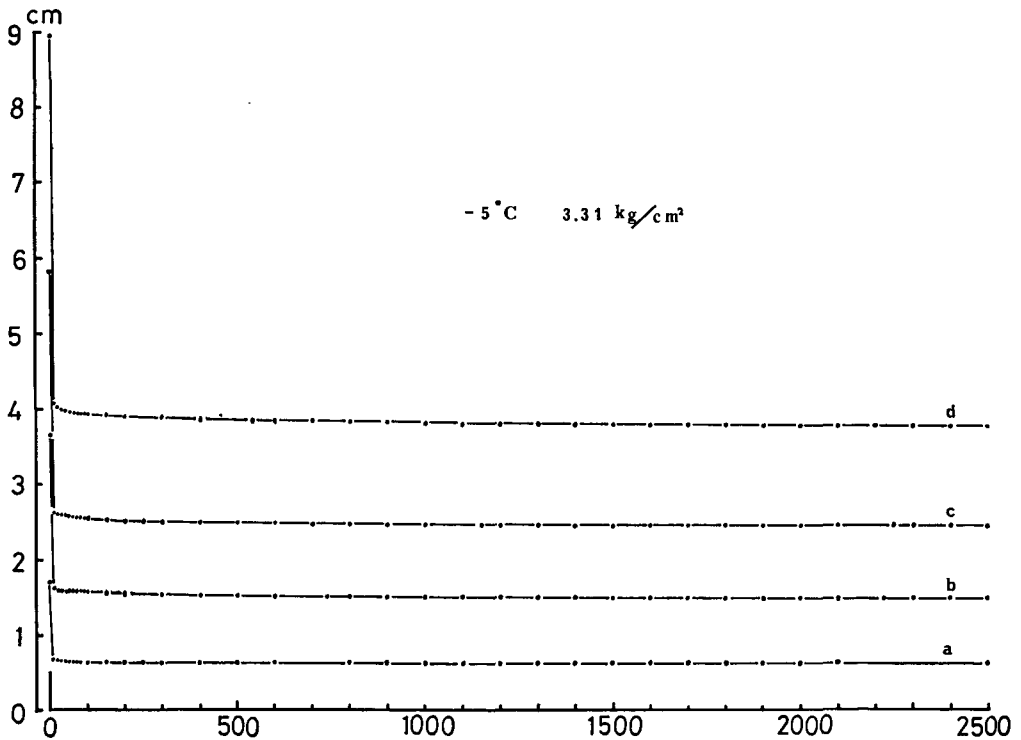
* 北海道大学低温科学研究所業績 第1275号

いでいる。荷重棒の振幅は約 0.3 cm で、毎分 36 回の割合で上下する。P の高さは 2 cm にわたって自由に変えることができる。雪柱の圧縮が 2 cm を越えるときは、筒 C の長さをいろいろのものに変えた。P の各周期の半分を負荷状態、残り半分を除荷状態となるように、常時 P の位置を調整した。P が雪柱を押す圧力は乗用車やトラックが路面を押すときの圧力（タイヤ圧）を参考に 1.3 ないし 3.9 kg/cm² とした。各反復荷重による雪柱の圧縮量はダイヤルゲージ D の先端を P の上面に接触させ、P の位置変化から読みとった。以上の方法で -5°, -10°, -20°, -30°C 及び湿り雪についての反復荷重試験を行なった。

III. 実験結果

1) 反復荷重回数と雪柱の高さの変化

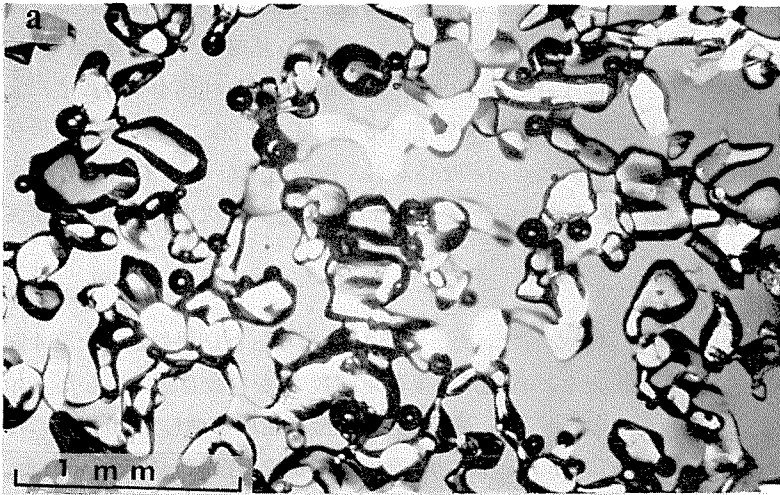
最初の雪柱の高さを 9 cm から 1.7 cm までいろいろに変えて反復荷重試験を行なった。反復回数と雪柱の高さの変化の様子を示したのが第 2 図である。雪柱の高さが最初 9 cm のものについてみると、始めの数回の間は試験機の最大圧縮量に等しい 0.6 cm 位ずつ縮む。しかし、10 回を越える頃から 1 回当りの圧縮量が急速に小さくなった。10 回目には 0.35 cm に始めの約 2 分の 1 に減少し、100 回目には 5×10^{-4} cm、1,000 回目には 6×10^{-6} cm と回数の増加と共に桁違いに小さくなった。この間の雪の組織の変化を第 3 図に示した。図中 a は 2 回目、b は



第 2 図 反復荷重による雪柱の高さの変化

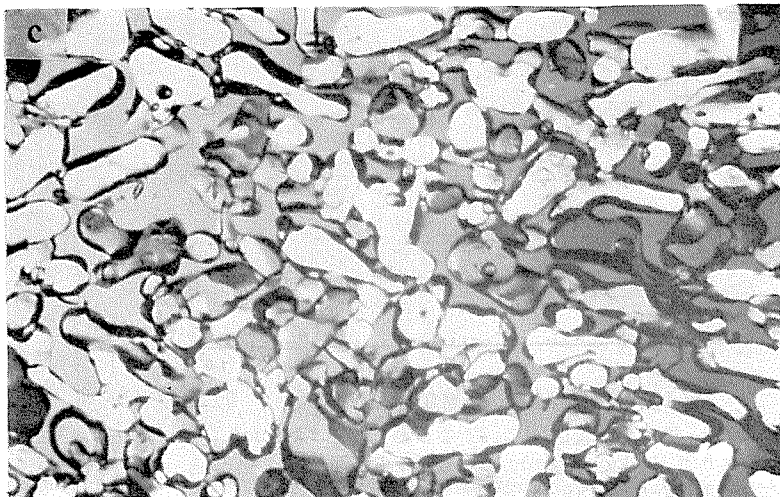
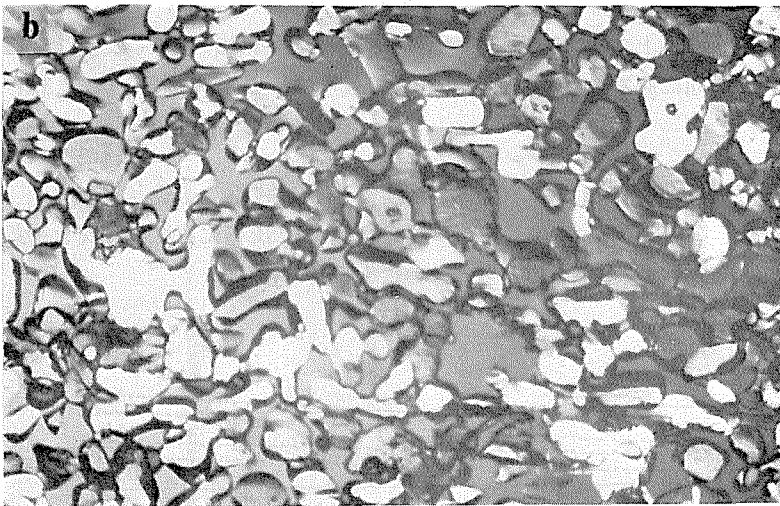
縦軸：雪柱の高さ，横軸：反復荷重回数。最初の柱高 (cm)；

a: 1.71, b: 3.67, c: 5.82, d: 8.95



第3図 反復回数による積雪組織の変化

- a) 2回目
 - b) 10回目
 - c) 1,000回目
- こしまり, -5°C



10回目, cは1,000回目の反復荷重に於ける垂直薄片写真である。2回目から10回目の間では著しく組織が変化しているが, 10回目から1,000回目の間ではあまり組織上の変化はない。

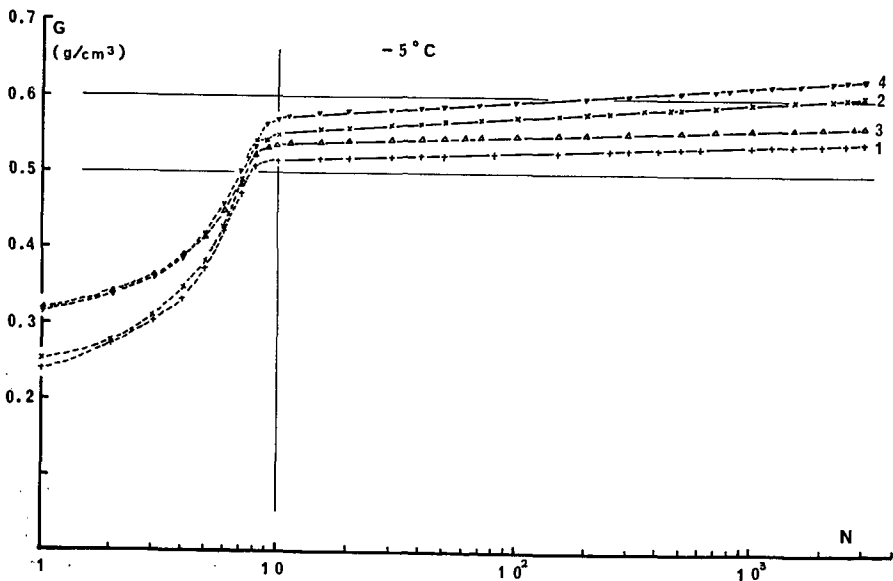
いずれの反復試験の場合にも, 雪柱は最初の10回の反復荷重の間に柱高を半分程度にまで減じ, この間に試験中に行なわれる全圧縮量の90%以上が完了している。雪柱は, 反復荷重により高さ h を減ずるだけで, 横方向には伸縮がないから, 雪の密度を G とすると, $hG = \text{一定}$ である。従って, 高さ h の逆数からその時の密度が得られる。そこで次に反復回数と密度との関係を調べてみよう。

2) 反復荷重回数と密度との関係

通常, 雪柱の高さを8cmとして試験を行なった。-5°Cで行なった結果の数例を第4図に示した。縦軸に雪柱の平均密度 G をとり, 横軸に反復荷重回数 N を対数目盛で示した。始め密度が0.25及び0.32 g/cm³だったものが, 反復回数と共に急激に密度を増して10回目には0.52ないし0.57 g/cm³に達した。この10回のうち最初の数回は荷重棒の振幅一杯に縮小した。従って, 荷重棒の振幅が変われば圧縮量も変わったはずである。そういうわけで, 図にはこの区域の曲線を破線で示した。10回以上では2,500回に到るまで密度は直線的に増加した。この直線関係は別に行なった10,000回に渡る反復荷重試験に於ても成り立つことがわかった。これらの直線は一般に,

$$G = k \log N + G_0 \quad (\text{但し, } N \geq 10, k, G_0 \text{ は定数})$$

の形で表わすことができる。log N の係数 k は直線の傾き, つまり圧密化速度の目安を与える。そういうわけで, k をここでは圧密化係数と名づけることにする。



第4図 反復荷重回数と密度との関係

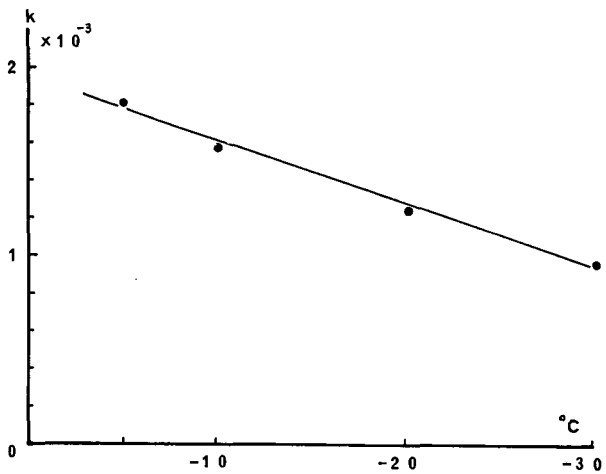
縦軸: 密度, 横軸: 反復回数。 1: こしまり雪 (1.3 kg/cm²), 2: こしまり雪 (3.9 kg/cm²), 3: こしもざらめ雪 (1.3 kg/cm²), 4: こしもざらめ雪 (3.9 kg/cm²)

No. 1 と No. 3 及び No. 2 と No. 4 の各直線はそれぞれ互いに平行になっている。圧力 1.3 kg/cm^2 での圧密化係数は No. 1 のこしまり雪で 0.011, No. 3 のこしもざらめ雪で 0.012, 3 倍の圧力の 3.9 kg/cm^2 の場合には No. 2 のこしまり雪で 0.021, No. 4 のこしもざらめ雪で 0.022 である。いずれの場合も雪質による違いはあまりなく、圧密化係数は圧力によって大きく左右されるようである。

中谷・黒岩¹⁾はグリーンランドの積雪を調べ、密度が 0.3 g/cm^3 から 0.5 ないし 0.55 g/cm^3 までは単純に増加してゆくが、それを越えると密度増加が急に小さくなると述べている。一方雪粒を球としたときの最稠密充填密度は 0.68 g/cm^3 である。従って、最初の 10 回の間に密度が 0.52 ないし 0.57 g/cm^3 に達する過程は空隙をうめてゆく単純な機械的圧密過程と考えてよからう。10 回目以降の圧密機構ははっきりしないが、雪粒同士のすりつぶしや個々の雪粒自身の変形が起っているものと考えられる。

3) 温度の圧密化係数に及ぼす影響

圧密化に及ぼす温度の影響を調べるため、同一のこしまりゆきから切り出された 4 つの試料について、荷重を一定 (3.31 kg/cm^2) にしながら -5° , -10° , -20° 及び -30°C の各温度で反復荷重試験を行なった。圧密化曲線の挙動は前節に述べたのと同様であるが、温度の低下と共に直線の傾きが小さくなった。圧密化係数で示すと、 -5°C で 0.018, -10°C で 0.016, -20°C で 0.012 及び -30°C で 0.009 であった。この関係を第 5 図に示した。圧密化係数は温度の低下と共にほぼ直線的に減少しているのがわかる。



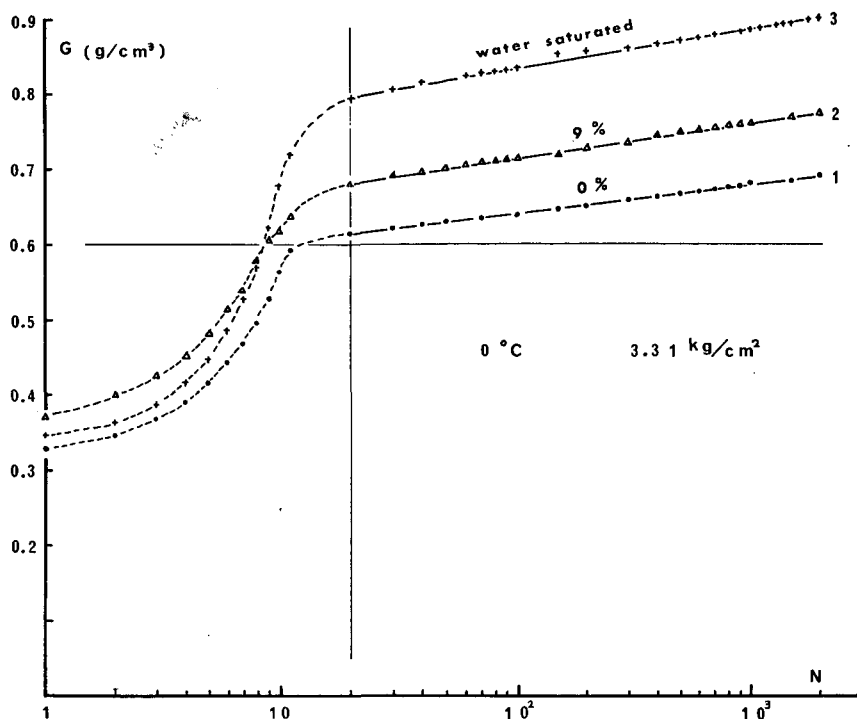
第 5 図 温度と圧密化係数との関係

縦軸：圧密化係数，横軸：温度。
圧力 3.31 kg/cm^2 ，こしまりゆき

4) 湿り雪の反復荷重試験

路面に積った雪は、太陽放射や自動車のタイヤ熱によって融かされ、湿雪となることが多い。これら湿雪の圧密過程を調べるため、いろいろの含水率をもつ湿雪について反復荷重試験を行なった。

試験結果を第 6 図に示した。No. 1, No. 2 及び No. 3 は実験開始時の含水率が夫々 0%, 9% 及び水浸しの場合を示している。水浸しの No. 3 の場合、縦軸の密度には乾き密度の値を示した。乾き雪の場合は $N=10$ 以上で密度 G が $\log N$ に比例する関係に入ったが、 0°C の場合には $N=20$ まで密度の急激な増加が続き、 G と $\log N$ が比例関係に入るのは N が 20 を越えてからである。しかも、 $N=20$ に於ける G の値は 0.62 ないし 0.8 g/cm^3 で乾き雪の 0.52 ないし 0.57 g/cm^3 にくらべると非常に大きな値である。一方、 $N=2,000$ における G の値も乾き



第6図 湿雪の反復荷重試験結果

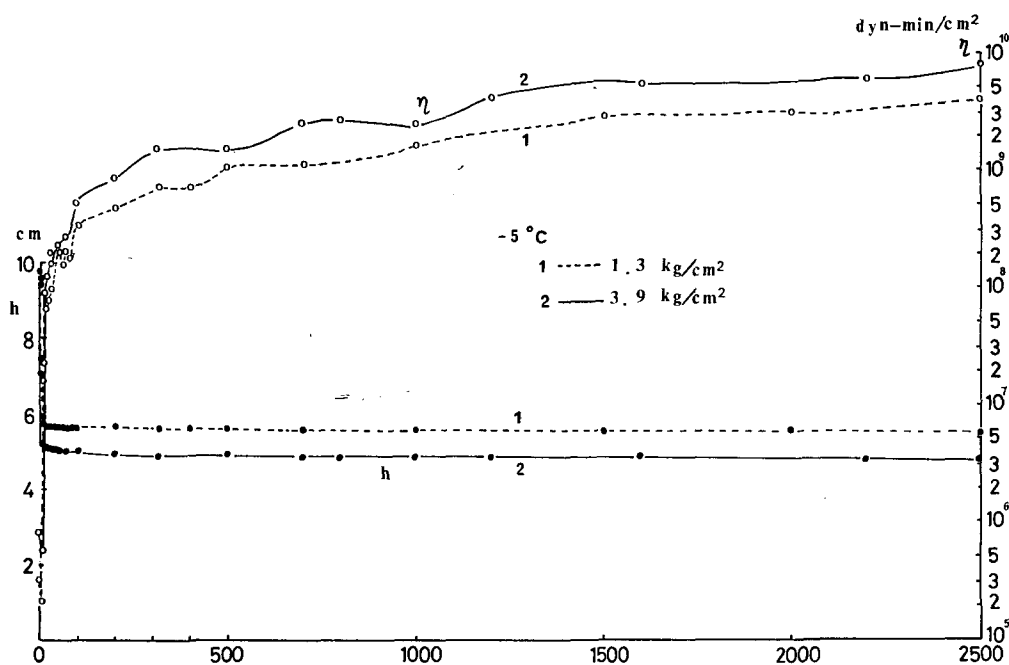
縦軸：密度，横軸：反復回数。試料の含水率はそれぞれ，
1: 0%，2: 9%，3: 水浸し

雪が 0.55 ないし 0.65 g/cm^3 だったのに比べると，湿雪では 0.7 ないし 0.9 (氷) g/cm^3 という具合に非常に大きな値となった。 G と $\log N$ との関係式をみると，直線の傾きを与える $\log N$ の係数 k は含水率によって異なり， 0% で 0.036 ， 9% では 0.046 ，水浸しの場合には 0.049 となった。これらの圧密化係数は乾き雪の 0.01 ないし 0.02 にくらべると， 2 ないし 3 倍も大きな値になっていることがわかる。

5) 圧縮抵抗係数について

2,500 回に渡る反復荷重試験の間に，試験雪柱は高さを半分以下にまで減じた。圧密の特に激しい最初の 10 回の反復荷重に於ては雪粒の結合が破壊されながら圧縮される。しかし，10 回以上 2,500 回の間には全体で 0.2 cm 高々 0.4 cm しか縮まない。従ってこの間に於ては雪粒の破壊は殆んどないと考えてよいであろう。

一般に積雪の圧密化の難易を現わすのに雪圧 τ と圧縮速度 $\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$ の比 $\eta = \tau / \left(\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} \right)$ で定義される圧縮粘性係数 η が用いられる。小島²⁾ は平地に積った積雪層の圧縮粘性係数を測定して，圧縮粘性係数が密度の対数に比例するという関係を得ている。また木下³⁾ は湿った雪及び 0°C の水に浸った雪の圧縮実験を行ない，圧縮粘性係数が乾き雪にくらべ一桁以上も小さくなることを示している。従って，いろいろの条件下で行なわれた反復荷重試験に於ける圧密化の難易を圧縮粘性係数と類似の圧縮抵抗係数(擬似粘性係数)を用いて比較すると便利である。



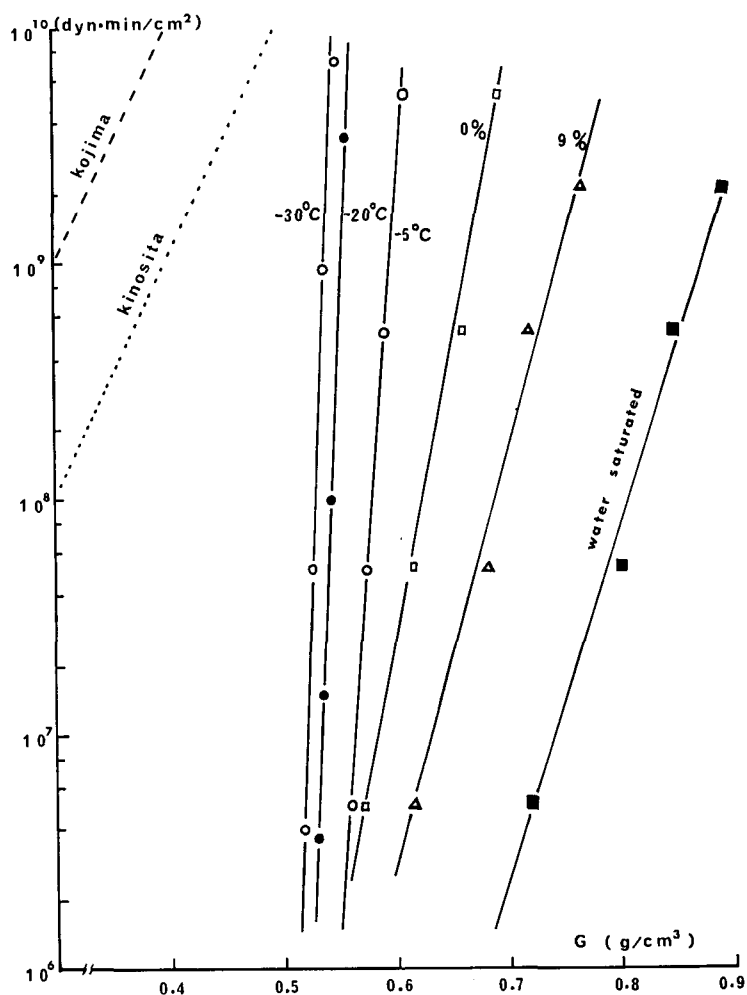
第7図 反復回数と圧縮抵抗係数

縦軸：左は雪柱の高さ（黒丸），右は圧縮抵抗係数（白丸），横軸：反復回数。
1: 1.3 kg/cm², 2: 3.9 kg/cm²。-5°C, こしもざらめ雪

第7図に-5°Cで行なった反復荷重試験に於ける圧縮抵抗係数の変化の様子を示した。縦軸に圧縮抵抗係数 (dyn-min/cm²) を対数目盛で示し、横軸には反復回数を示した。図中黒丸及び白丸はそれぞれ雪柱の高さ及び抵抗係数である。始め9.7 cmもあった雪柱は10回目には5.7及び5.2 cmとそれぞれ半分近くまで縮んでいる。これに伴い抵抗係数は、始めの10⁵から10⁸のオーダーへと1,000倍も大きくなっている。10回目から2,500回目に到る雪柱の変化は極めてわずかである。破線は圧力が1.3 kg/cm²、実線は3.9 kg/cm²の場合である。圧力の大きい方が圧縮抵抗係数も大きくなっているが、この方法では密度の影響がわからない。それで、密度増加に伴う抵抗係数の変化を第8図に実線で示した。左側3本の直線は乾き雪に関するもので、左からそれぞれ-30°、-20°、-5°Cのばあい、右側3本は、いろいろな含水率の湿り雪のばあいである。比較のため、小島が自然積雪の粘性圧縮について求めた値を破線で、また、木下が水に浸した雪の粘性圧縮から得た値を点線で示した。

乾き雪では温度が低い時ほど、また、湿り雪では含水率が小さい時ほど、密度増加に伴う圧縮抵抗係数の増加率が大きい。逆に言えば、温度が高い時ほど、また含水率が大きい時ほどたやすく圧縮される事を示している。

小島と木下が圧縮粘性を調べた雪は、密度が0.5 g/cm³未満のものであるが、粘性係数の値は、われわれが反復荷重試験で得た値よりもはるかに大きい。反復荷重試験のばあいは、本来、小島ら得たような大きな粘性係数をもった雪の組織が、最初の数回の反復荷重で破壊され、それがその後の反復荷重の間に焼結その他で回復する過程の抵抗係数を求めたことになる。



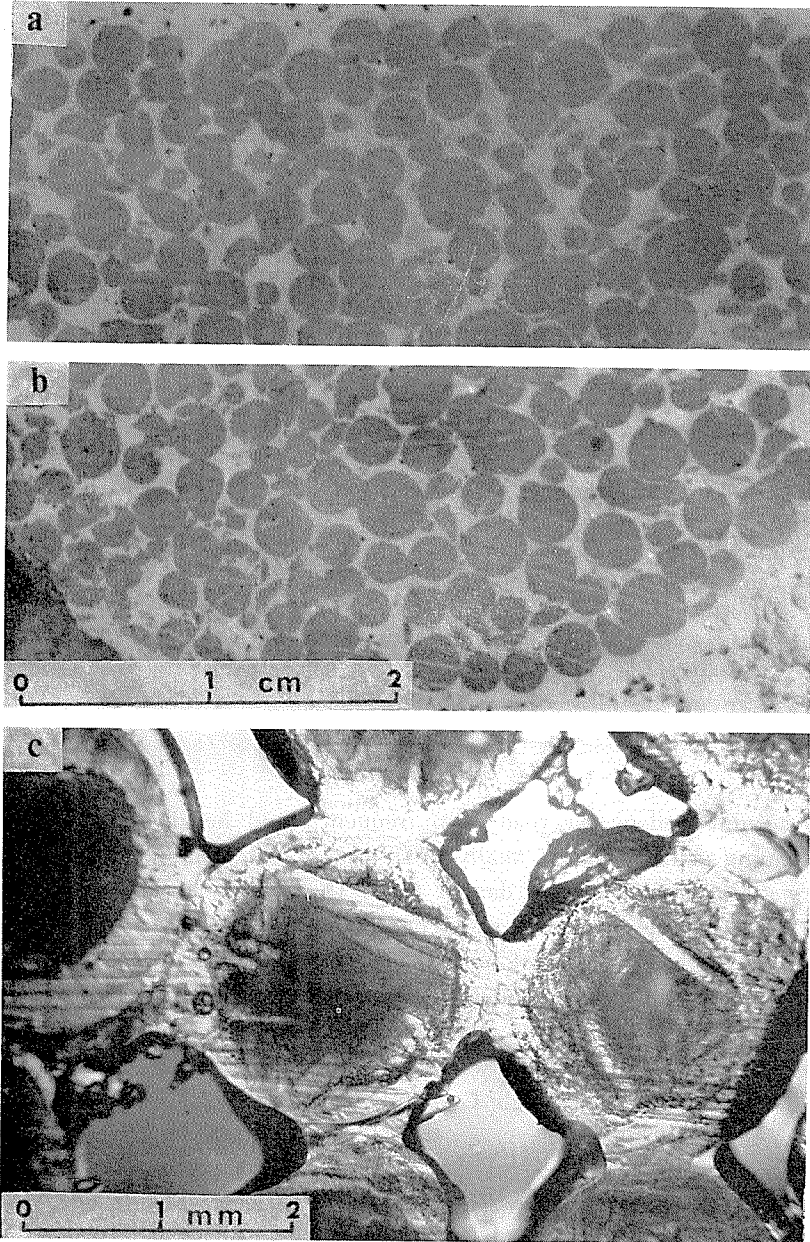
第8図 密度と圧縮抵抗係数

縦軸：圧縮抵抗係数，横軸：密度。破線は小島の値，点線は木下の値。

反復荷重を行なっている間に、一たん破壊された組織がどの程度回復するかを調べるために直径約2mmの小さな氷球で作った人工雪について、反復荷重試験を行なった。氷球は、水滴を液体窒素に落下させ急速凍結させて作り、それを試験機の筒(第1図A)につめて試験に供した。2,500回の反復荷重に於ける試料の垂直断面及び水平断面を第9図a, bに示した。殆んど氷球はほぼ完全な形で保存されている。同図cは垂直断面の薄片写真である。もともとばらばらだった氷の球が、わずか2時間の反復荷重の間に強く結合した。この間に結合部は氷球直径の0.4倍の太さにまで成長したが、これは黒岩⁴⁾が無応力状態で得た氷の焼結速度よりはるかに大きい。反復荷重を与えたことが焼結現象を促進させたものと思われる。

IV. ま と め

以上の結果をまとめると次の如くなる。



第9図 氷球の反復荷重試験

a: 垂直断面, b: 水平断面, c: 垂直断面の薄片写真。
-5°C, 2,500 回目

- i) 反復回数が始めの 10 回までの間に密度は急速に増加し、単純な機械的圧密で到達する密度の 0.52 ないし 0.57 g/cm^3 に達した。
- ii) 10 回以上の反復荷重では密度が反復回数に比例して増加した。
- iii) 圧密化係数は、反復圧力に強く依存し、雪質にはよらなかった。

- iv) 湿り雪では最初の急激な密度増加が20回目程度まで続いた。この間に密度は0.6ないし0.8 g/cm³の大きいものになった。
- v) 湿り雪の圧密化係数は乾き雪の2~3倍であった。
- vi) 積雪の密度が急速に増大する最初の約10回の反復荷重の間は組織の破壊過程であり、10回目以降の反復荷重は組織の回復過程に当る。

本研究は、文部省科学研究費自然災害特別研究費によって行なわれた。

低温科学研究所木下誠一教授には実験遂行上数多くの助言をいただいた。また若浜五郎教授には論文の推敲に当り多大のご指導を受けた。ここに厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Nakaya U. and Kuroiwa D. 1370 Physical properties and internal structure of Greenland snow, *CRREL Res. Rept.*, **89**, 29 pp.
- 2) 小島賢治 1955 積雪の粘性圧縮 I. 低温科学, 物理篇, **14**, 77-93.
Kojima K. 1967 Densification of seasonal snow cover. *In* Physics of Snow and Ice, Part 2 (H. Ôura, ed.), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo. 929-952.
- 3) 木下誠一 1963 0°Cに浸した雪の圧縮 I. 低温科学, 物理篇, **21**, 13-22.
- 4) 黒岩大助 1960 積雪の Ice-Bonding にもなる弾性率, 内部摩擦の変化, ならびに氷の焼結機構に関する研究. 低温科学, 物理篇, **19**, 1-36.

Summary

Snow accumulated on the road is so frequently and heavily compressed on to the road by running vehicles that it finally transforms into icy snow. This makes the road so slippery as to entail a serious danger to all the traffic. In order to investigate in detail the densification process of snow on the road by vehicles, experimental studies were made on the compression of both dry and wet snow by applying a large number of periodically repeated load. The apparatus used in the experiment is schematically shown in Fig. 1. The snow S in a cylindrical acrylite container A was periodically compressed by the head B which was driven up and down 36 times per minute by a repeated loading device through C and P. The load applied to the snow ranged from 1.3 kg/cm² to 3.9 kg/cm².

The snow S subjected to repeated loadings by this apparatus was compressed very easily by the first 10 strokes of loading, and thereafter it became very hard to compress the snow. The observed shortening of the height H of the snow against the number N of loadings is shown by the curves in Fig. 2. Since the snow was confined by the walls of the acrylite container, the density of the snow was inversely proportional to its height at any stage of repeated loadings. The density G of the snow thus converted from the height of the snow was plotted against the number N of loadings in Fig. 4. The density G increased very rapidly by the first 10 strokes of loading. The increasing rate of density became very small there after, and the density G increased linearly with the logarithm of the number of repeated loadings: $G = k \log N + G_0 (N \geq 10)$ where k and G_0 are constants.

Curves 1 and 3 in Fig. 4 respectively show the changes in density of a fine grained compact snow and a solid-type depth hoar snow under a repeated load of 1.3 kg/cm². Curves 2 and 4 respectively give those for each of the snow under a repeated load of 3.9 kg/cm². Curves 1, 3 and 2, 4 are parallel with each other. This means that the value of k , a measure of the compressibility of a snow, is independent of the quality of the snow used in the present experiments. The value of k linearly decreased with the lowering of the temperature of snow as shown in Fig. 5. The repeated-compression tests were also made on a wet snow at 0°C. The densification curves obtained for the snow with different free water contents are shown in Fig. 6. The wet snow was much easier to densify than the dry snow, and the snow with higher free water contents was easiest to compress. The snow saturated with water became to a bubbly ice by 1,000 strokes of a load of 3.31 kg/cm².

A rapid increase in density of a wet snow was observed until the 20 strokes were made, and then the increasing rate of density decreased markedly. The density G in the later stage of the compression increased in proportion to the logarithm of the number N of strokes, which was the case for a dry snow. The compressibility k of a wet snow, however, was three times larger than that of a dry snow.

Kojima studied the densification of a natural snow cover and defined the coefficient of viscosity η of a snow for compression by the formula: $\eta = \tau / \left(\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} \right)$, where h is the thickness of a snow layer and dh/dt is the compressing rate of the snow cover under the compressive stress τ . The dashed line in the upper-left in Fig. 8 shows the relation between the coefficient of viscosity and the snow density G obtained by Kojima for dry snow layers. The broken line in the figure is that for a wet snow obtained by Kinoshita in his experimental studies on compression of a wet snow.

The coefficients of apparent viscosity of both dry and wet snow in the present compression tests were calculated by the use of the formula defined by Kojima. The relation between the obtained viscosity η and the density G of the snow was shown by the solid curves in Fig. 8. Although the value of η is much smaller than those obtained by both Kojima and Kinoshita, it increases strikingly with the increase of the snow density. This strongly suggests that the texture of snow was heavily broken in the early stage of the repeated loading, but separated snow grains must have been rebonded very quickly with each other by the sintering during the later stage of the repeated loading.

Thin sections of snow were cut out from the snow to examine their microscopic texture at a different stage of the repeated compression. Three photographs a, b and c in Fig. 3 respectively show the texture of snow after 2, 10 and 1,000 strokes of loading were made. Heavy compaction of snow grains was made by the first 10 strokes of loading as seen in Photo b. It was observed in Photo c that the snow grains were connected with each other by ice bonds developing between the grains, though the compaction did not proceed further after the first 10 strokes were made.

These processes of break-down followed by the recovery of the texture of snow during the repeated loading were more clearly observed in a model experiment. Namely a large number of artificially made ice spheres were packed into the acrylic container (A in Fig. 1) in place of snow; they were subjected to repeated loadings.

Photos a and b in Fig. 9 respectively show the vertical and horizontal thin sections of the ice spheres cut after the 2,500 strokes of loading. It is seen in these photographs that most of the ice spheres were not broken, but just compacted by the repeated loadings. These ice spheres were connected with each other by the thick ice bonds which had grown during the repeated compression, as shown in Photo c.