

圧雪硬度の温度および密度による変化

小林 俊 市*

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

The Temperature and the Density Dependences on Hardness of Artificially Compacted Snow

By

Toshiichi Kobayashi

*Institute of Snow and Ice Studies, National Research Center for Disaster
Prevention, Suyoshi, Nagaoka, Niigata-ken 940, Japan*

Abstract

The temperature and the density dependences on the hardness of snow were investigated by the use of Kinosita's hardness gauge in a cold room.

Test specimens were prepared in such a way that the snow particles which passed a sieve (0.42 mm mesh) were compacted to a desired density (0.45 to 0.74 g/cm³) by a compressing machine.

The results of the tests are as follows:

(1) The hardness increased linearly with decreasing temperature in the range from -0.9 to -30 °C for the density of 0.45 to 0.74 g/cm³.

(2) The rate of increase of hardness with decreasing temperature, α , increased with density.

(3) The relationship between the hardness H kg/cm² and the density G g/cm³ is represented by the equation $H=1.64 \times 10^3 G^5$.

(4) The snow pushed down by the Kinosita's hardness gauge made a distinctly bordered region of compressed snow underneath the bottom of the hole. The depth of the compressed region was larger than the depth of the hole. At -30 °C the compressed region was about 2.5 times as large as the depth of the hole.

(5) Specimens of density 0.57 g/cm³ were kept at temperatures of -2 °C, -6 °C, -11 °C, -21 °C and -29 °C for the duration of 21 to 23 days; the lower the annealing temperature was, the larger was the hardness value.

1. はしがき

雪寒地においては、道路上に降り積った雪は通行車両に踏み固められて、硬く密度の大きい圧雪となる。

特に、北陸地方のように0°Cを中心とした気温変化の激しいところでは、日中気温の上昇につれて圧雪の表面が軟化し、通行車両のタイヤチェーンやスパイク等により局部的に削られて路面に凹凸が発生しやすい。そのため、走行中ハンドルをとられて対向車に衝突した

* 第3研究室

り、雪堤に突入したりする事故が頻発している。さらに凹凸がひどくなると走行不能を来し、延々数 km にわたる交通渋滞をもたらすこともある。また、夜間から明け方にかけての冷え込みとともに路面はすべりやすくなり、スリップ事故が多発したり、急な勾配の箇所では、登りきれなくなった車両が原因で交通渋滞を引き起こすこともしばしば見られる。

これらの障害を防止するため、国立防災科学技術センターでは、昭和49年度より「圧雪の発生機構および処理工法に関する研究」のテーマの下に、圧雪の発生機構と特性の解明および圧雪を効率良く処理する方法の確立をめざして一連の実験研究を行っている。その際、硬度は圧雪の強度を表わす指標として用いられてきた。

ところで、現在圧雪の硬度を測定する器具として最も一般的に使用されているのは、写真1に示す木下式硬度計である。これは、本来地面に積った自然積雪を対象に考案されたもので(木下, 1960)、先端のアタッチメントを交換することにより、圧雪の硬度測定にも適用している。そこで、同硬度計を用いて得られた自然積雪の硬度の特性について述べてみたい。

自然積雪の硬度は、温度と密度依存性が極めて強く、温度に関しては、 0°C から -40°C 近辺にかけて直線的に増加し、それよりさらに低い領域では、変化がほとんど認められないことが対馬 (1971, 1972, 1975) により報告されている。圧雪についても、道路上での調査(小林ら, 1976) および室内実験(対馬, 1975; 小林ら, 1976) により、密度 0.6 g/cm^3 近辺までの測定はなされているが、それより密度の高い領域での測定は、これまでほとんど試みられた例がない。

また、自然積雪の硬度と密度との関係については、いくつかの実験式が導かれているが、圧雪についてのものは少ないようである。

そこで、今回高密度の圧雪の硬度について、その温度依存性および密度依存性を調べるため、しまり雪を定速度圧縮試験機または繰返し荷重式一軸圧縮試験機により圧密した、密度 $0.45\sim 0.74\text{ g/cm}^3$ の人工圧雪について、 -0.9°C から -30°C までの温度範囲における硬度の測定を行った。

2. 実験方法

今回の実験に用いた雪は、1977年3月に中山峠から採取し、低温実験室に保存されていたしまり雪をほぐし、目の開き 0.42 mm のふるいにかけて、できるだけ均一に堆積させたものである。写真2に、その水平および鉛直方向の顕微鏡組織を示す。その雪を、写真3, 4および表1, 2に示す万能引張圧縮試験機または繰返し荷重式一軸圧縮試験機により、 -2°C で所定の密度まで圧密した。圧密条件および試料の数を表1に、またそれぞれ圧密された雪の顕微鏡組織を写真5~12に示す。これらのうち、定速度圧密による試料の中で密度が 0.57 g/cm^3 のものについては、 $0.1, 1, 10, 100\text{ mm/min}$ の4種類の圧密速度で圧雪を作

成した。

実験は、生成された各圧雪を -2°C の恒温箱に 12~24 時間焼鈍したのち、ほぼ -2 、 -6 、 -10 、 -20 、 -30°C の一定温度の低温実験室に、それぞれ 3~12 時間保存しつつ硬度の測定を行った。

圧雪の硬度は、木下式硬度計の先端に、直径 4, 6, 8, 10, 25mm の 5 種類の円柱形アタッチメントをつけたものを用い、先端部の直径、おもりの質量および落下高さの違いによるばらつきをなくすため、各密度の試料については、表 2 に示すようなそれぞれ一定の条件の下で測定を行った。各温度条件下では、原則として 5 回測定を行い、それらの平均値をデータとして採用した。ただし、直径 25 mm のアタッチメントを使用した密度 0.45 g/cm^3 の試料については、衝撃による破壊面積が大きいため、各温度で 1~4 回の測定しか行わなかった。また、気温および雪温は、 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ ではサーミスタ温度計(タカラ STM-01-1, 測定範囲 $-10\sim 10^{\circ}\text{C}$, 感度 $1/10^{\circ}\text{C}$)を、それ以下の温度についてはアルコール棒状温度計(測定範囲 $-50\sim 20^{\circ}\text{C}$, 感度 $1/1^{\circ}\text{C}$)を用いて測定した。

3. 実験結果

3.1 定速度圧密度による圧雪の硬度変化

(1) 密度 0.45 g/cm^3 の場合

図 1 に示すように、全体としては温度の低下とともに硬度は直線的に増加し、温度が低くなるにつれてばらつきが次第に大きくなる傾向が見られた。しかも、作成時の圧密抗力が大きいものほど、同じ温度での硬度の値は大きかった。

これは、写真 5 からわかるように空隙の部分が比較的多く、しかも雪の粒子相互の結合が

表 1 圧密条件と試料の数

Table 1 Conditions for compression and the number of specimens.
(定速度圧密)

試料番号	圧密後の密度 (g/cm^3)	圧密抗力 (kg/cm^2)	圧密速度 (mm/min)	試料の数 (個)
1	0.45	0.95- 1.2	0.5	4
2	0.57	4.4 - 4.7	0.1	2
3	0.57	6.0 - 6.4	1	4
4	0.57	6.8 - 7.6	10	3
5	0.57	1.6 - 1.7	100	3
6	0.64	12.1 -13.6	1	5
7	0.74	26.2 -28.0	1	4

(繰返し荷重による圧密)

試料番号	圧密後の密度 (g/cm^3)	圧力 (kg/cm^2)	載荷回数 (回)	試料の数 (個)
8	0.57	1.7	1,000	4

表 2 硬度測定条件

Table 2 Conditions for measurements of hardness.
(定速度圧密)

試料番号	おもり (kg)	先端部直径 (mm)	落下高さ (cm)
1	1	25	5-30
2	1	6	25
3	1	6	25
4	1	8	20
5	1	10	20
6	1	6	25
7	1	4	30

(繰返し荷重による圧密)

試料番号	おもり (kg)	先端部直径 (mm)	落下高さ (cm)
8	1	8	20

弱い組織構造であるため、見掛け上の密度は等しくてもかなり不均一な部分もあって、圧密抗力の微小変化が硬度の値に大きな影響を与えたものと考えられる。

(2) 密度 0.57 g/cm^3 の場合

図2～5に示すように、4種類の圧密速度で作成した圧雪の硬度の温度特性は、いずれも直線の変化が見られた。さらに、圧密速度の影響を見るため、図2～5の直線の勾配と圧密速度との関係を示したのが図6で、図中縦軸 α は直線の勾配すなわち硬度の増加率を、また横軸は圧密速度を示す。図から明らかなように、 α は 1 mm/min の場合が最も大きく、それよりも速くなくても遅くなくても小さくなっている。

これは、組織構造で比較した場合それほ

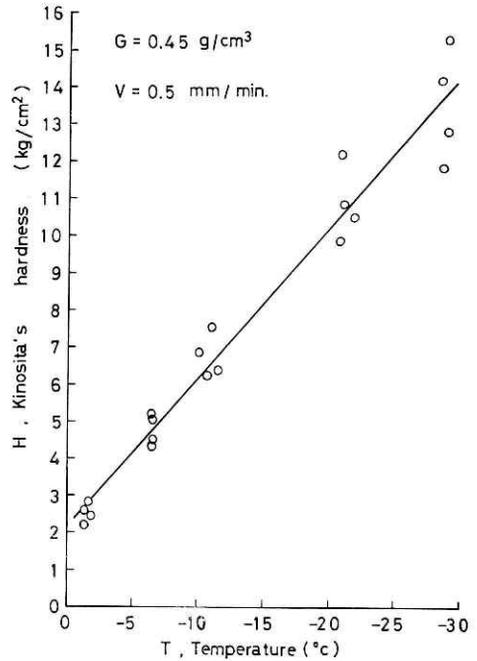


図1 雪温と硬度との関係(その1)

Fig. 1 Relation between the temperature and the hardness (No. 1).

※ 図中、Gは電圧の密度を、Vは圧密速度を表わす。

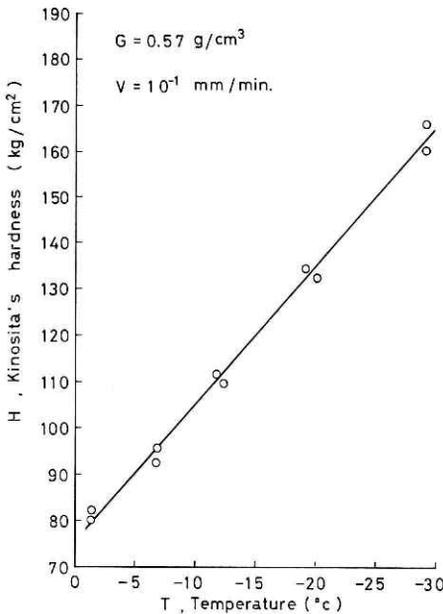


図2 雪温と硬度との関係(その2)

Fig. 2 Relation between the temperature and the hardness (No. 2).

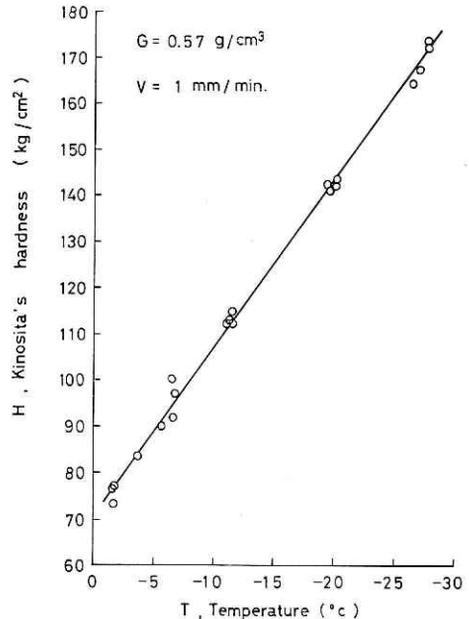


図3 雪温と硬度との関係(その3)

Fig. 3 Relation between the temperature and the hardness (No. 3).

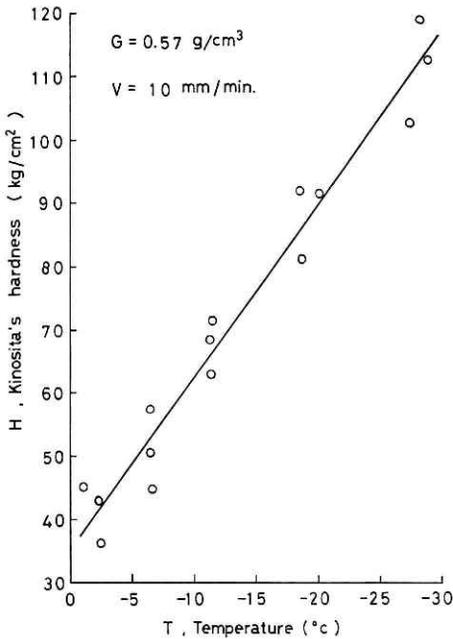


図 4 雪温と硬度との関係 (その 4)
Fig. 4 Relation between the temperature and the hardness (No. 4).

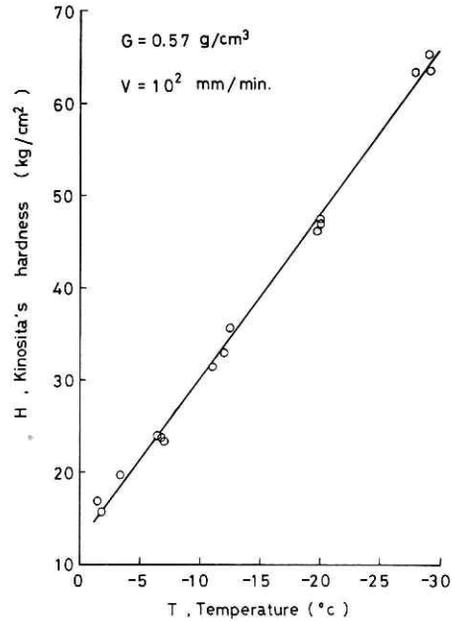


図 5 雪温と硬度との関係 (その 5)
Fig. 5 Relation between the temperature and the hardness (No. 5).

ど顕著な差はないものの、どちらかという速い圧密速度の写真 8, 9の方が、遅い圧密速度の写真 6, 7よりも、大きな粒と粒の間に破壊された細かい粒が多くはさまっていて、もろいことが想像される。しかも、表 1 から明らかなように、圧密抗力の大きさは 0.1 mm/min よりも 1 mm/min の場合の方が、また 100 mm/min よりも 10 mm/min の場合の方がそれぞれ大きいため、このような結果を生じたものと考えられる。

また、わずかに 2 例ではあるが、1 mm/min で圧密された圧雪を、1 ~ 3 日間にわたり一定の温度で焼鈍させながら硬度の測定を行った結果を図 7 に示す。図中実線で示したのは、焼鈍時間が 3 時間程度のものについて得られた結果で、図 3 と同じものである。硬度の値は焼鈍時間の長いものほど大きくなっているが、硬度増加率を示す直線の勾配はほぼ平行と見

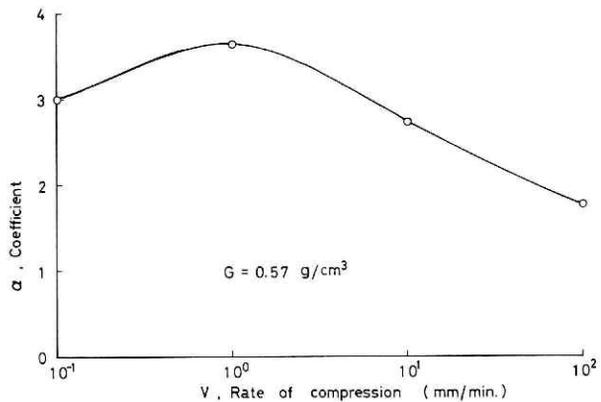


図 6 勾配 α と圧密速度との関係
Fig. 6 Relation between the coefficient α and the rate of compression.

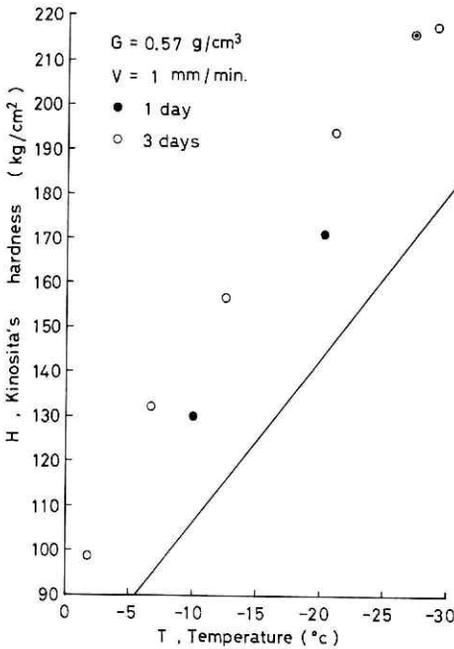


図7 焼鈍時間のちがいによる硬度の変化
Fig. 7 Variation of the hardness with different annealing time.

なすことができる。また、●印で示したものは、先に -10°C 、 -20°C で1日ずつ焼鈍させたのち、さらに -27°C で3日間焼鈍させたものである。その結果、初めから -27°C で3日間焼鈍させた○印のものとはほぼ同じような結果が得られた。

(3) 密度 0.64 および 0.74 g/cm^3 の場合

測定結果を図8、9に示す。写真10、11を見てもわかるように、双方共空隙部分の極めて少ない、粒子の結合状態の強い組織構造である。硬度測定の際、木下式硬度計により圧雪面に衝撃を加えた場合、密度が高くなればなるほど、また温度が低くなればなるほど、割れたり欠けたりする例が非常に多かった。

これは、木下式硬度計の特性として、木

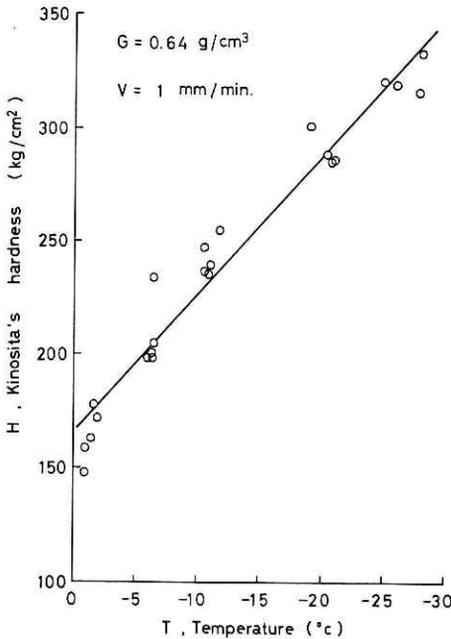


図8 雪温と硬度との関係 (その6)
Fig. 8 Relation between the temperature and the hardness (No. 6).

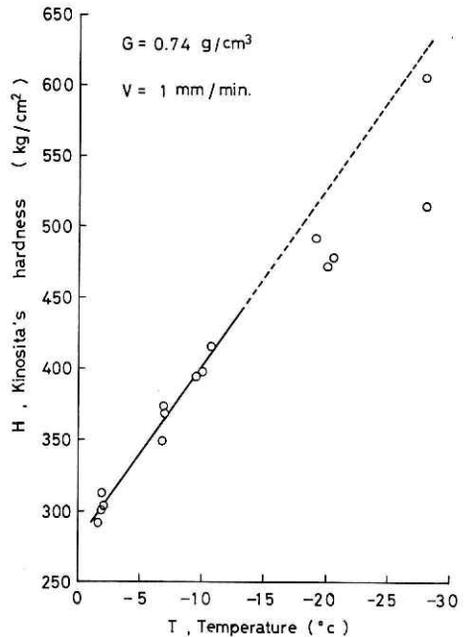


図9 雪温と硬度との関係 (その7)
Fig. 9 Relation between the temperature and the hardness (No. 7).

下 (1960), 油川ら (1975) により報告されているように, 硬度計の衝撃により破壊される部分と圧縮される部分が, それぞれある厚さをもって発生するわけであるが, 高密度になればなるほど逆にはっきりした圧縮部分ができにくくなり, 衝撃によるエネルギーのほとんどが破壊のために費やされるためではないかと考えられる. 雪粒を球とした時の最大充填 (じゅうてん) 密度は 0.68 g/cm^3 であるから, 0.64 g/cm^3 くらいまでははっきりした圧縮部分を確認することができたのに, 0.74 g/cm^3 の試料については圧縮部分をはっきりと観測できなかったのであろう.

以上述べてきたようなことから, 特に密度が 0.74 g/cm^3 の試料については, -10°C 以下の温度条件下では, 割れたり欠けたりする例が極めて多く, 測定データも少ないため, この場合の実験式は $0\sim-10^\circ\text{C}$ 近辺での測定値のみから求めた.

3. 2 繰返し荷重による圧雪の硬度変化

3.1 と同じようにして, 低温実験室に保存されていたしまり雪をふるいでふるった雪を, 写真 4 に示した試験機により, $1,000 \text{ cc}$ クラスの小型乗用車タイヤの標準空気圧に相当する 1.7 kg/cm^2 の圧力で, $1,000$ 回の繰返し荷重を加えて圧雪を作成した. その結果, 密度はいずれも 0.57 g/cm^3 程度になった. これに, 3.1 と同様の方法で, 温度変化による硬度の測定を行った結果を示したのが図 10 である.

全体として, 温度の低下につれて硬度は直線的に増加している. また組織構造は, 写真 12 に示すように, 10 mm/min の速度で定速度圧密を行った写真 8 の場合とよく似ている. しかし, 硬度の増加率を示す勾配 α は, 繰返し荷重で作った圧雪の方が大きく, 1 mm/min で定速度圧密した場合に近い. これは, 対馬 (1973) により報告されているように, 繰返し荷重による圧密の場合, 最初の 10 回くらいまでのいわゆる破壊過程の際に破壊された部分, その後の $1,000$ 回という衝撃回数の中に再び相互に焼結して, 全体として均一に圧密されたためではないかと考えられる.

3. 3 破壊部分および圧縮部分の厚さの温度による変化

木下式硬度計については, その先端部の衝撃により, 図 11 に示すような破壊部分と圧縮

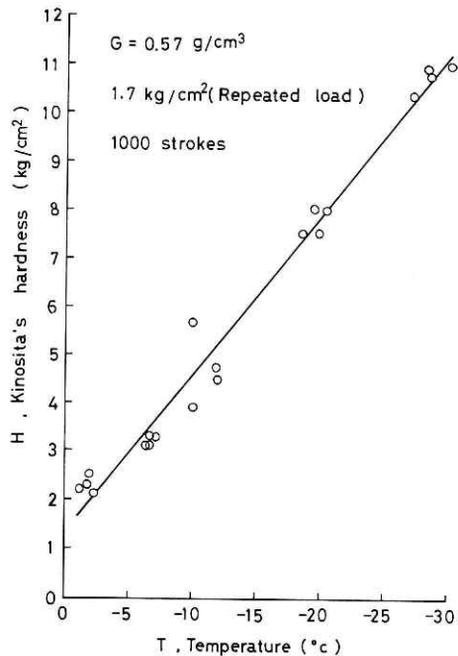


図 10 雪温と硬度との関係 (その 8)
Fig. 10 Relation between the temperature and the hardness (No. 8).

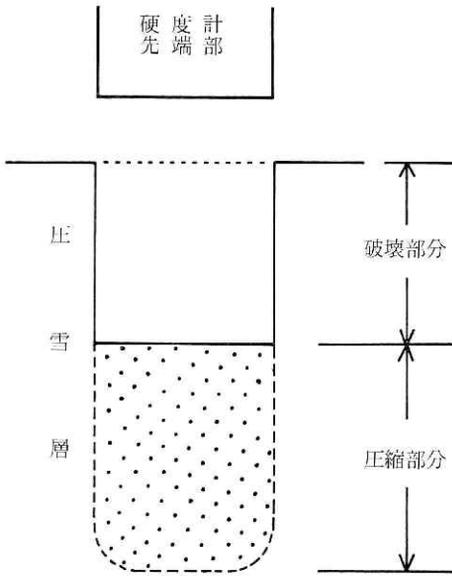


図11 木下式硬度計によって生ずる破壊部分と圧縮部分
 Fig. 11 The hole region and the compressed region caused by Kinosita's hardness gauge.

部分の発生することが、木下 (1960), 油川ら (1975) により報告されている。特に後者により、直径 10mm および 25mm の先端アタッチメントを用いてできた破壊部分と圧縮部分の厚さの関係が示され、圧縮部分の厚さは、いずれの場合でも、最大に見積って破壊部分の厚さと同程度と報告されている。

今回の実験では、1 mm/min の定速度圧密により得られた、密度が 0.57, 0.64 g/cm³ の各圧雪に対して、おもり 1 kg, 先端アタッチメントの直径 6 mm, 落下高さ 25 cm の一定の条件で圧雪に圧痕を作り、破壊部分の厚さを測定した。さらに、鉛直方向の断面を切り取って薄片試料とし、顕微鏡写真から圧縮部分の厚さを測定した。

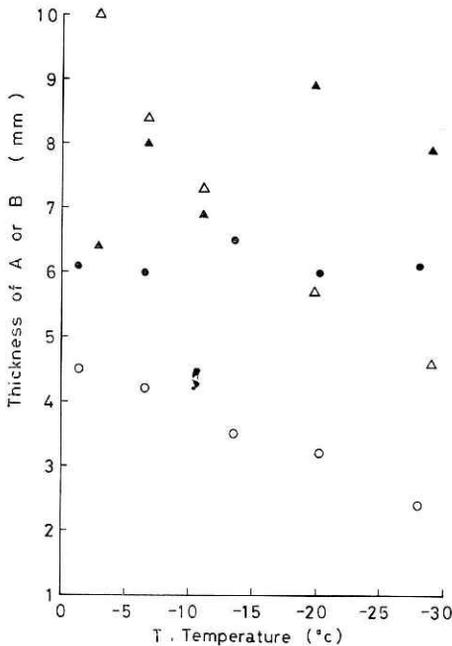


図12 破壊部分、圧縮部分の厚さの温度による変化
 Fig. 12 Variation of the thickness of A or B with temperature.

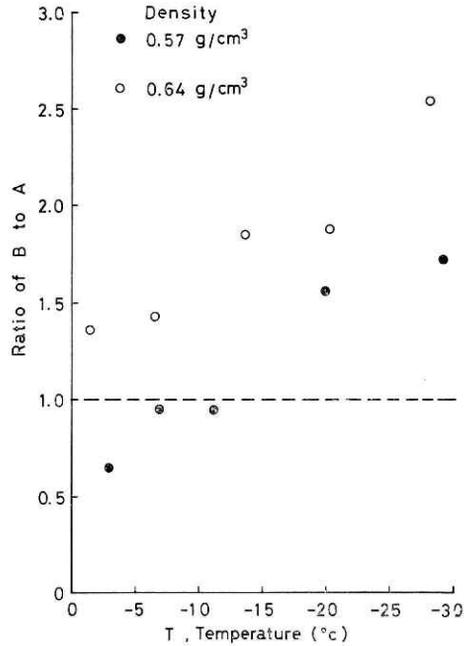


図13 圧縮部分と破壊部分の厚さの比の温度による変化
 Fig. 13 Variation of the ratio of B to A with temperature.

それらの結果を図 12, 13 に, また, -30°C 近辺における圧縮部分の顕微鏡組織を写真 13, 14 に示す. 図 12 の中で△印で示したのは, 密度が 0.57 g/cm^3 の試料についての破壊部分の厚さ (A), そして▲印がその圧縮部分の厚さ (B) を, また, ○印は 0.64 g/cm^3 の破壊部分の厚さ (A), ●印はその圧縮部分の厚さ (B) をそれぞれ表わす.

図から明らかのように, 破壊部分の厚さは温度の低下につれて小さくなっている. しかし, 圧縮部分についてははっきりした傾向が認められない.

これに対して図 13 は, 圧縮部分の厚さ (B) と破壊部分の厚さ (A) の比を, 各温度毎にプロットしたものである. 各温度条件下において, 各々 1 回ずつの測定しか行っていないので確定的なことは言えないが, かなりばらつきはあるものの, 全体としては, 温度の低下とともに破壊部分の厚さに対する圧縮部分の厚さの割合は大きくなっている. 図中破線で示したのは, 圧縮部分の厚さ (B) と破壊部分の厚さ (A) の比が 1:1, すなわち両方の厚さが等しいことを示す.

特に, 破壊部分と圧縮部分の厚さがほぼ等しくなるのは, 密度が 0.57 g/cm^3 では大体 -10°C 近辺で, それより高い温度では破壊部分の厚さの方が大きく, またそれ以下では圧縮部分の厚さの方が大きい. また, 0.64 g/cm^3 の試料については, $0^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ の温度範囲ではいずれも圧縮部分の厚さの方が破壊部分の厚さよりも大きく, 中でも -30°C 近辺においては, 破壊部分の厚さの約 2.5 倍にもなっている.

以上の結果から, 木下式硬度計を用いて圧雪の硬度を測定する場合, 特に密度が 0.64 g/cm^3 を越えるような場合には, 破壊部分の厚さすなわち先端部の沈下量が, 圧雪の厚さの $1/3$ 以下になるように, 先端アタッチメントの直径やおもりの落下高さ等を選定しなければならぬ.

しかし, あまり沈下量が小さくなると, そのわずかの違いが硬度の値の上では大きな変化をもたらすので, 厚さが 1 cm 以下といったような薄い圧雪に対しては, 下の舗装版等の影響を大きく受ける恐れがある.

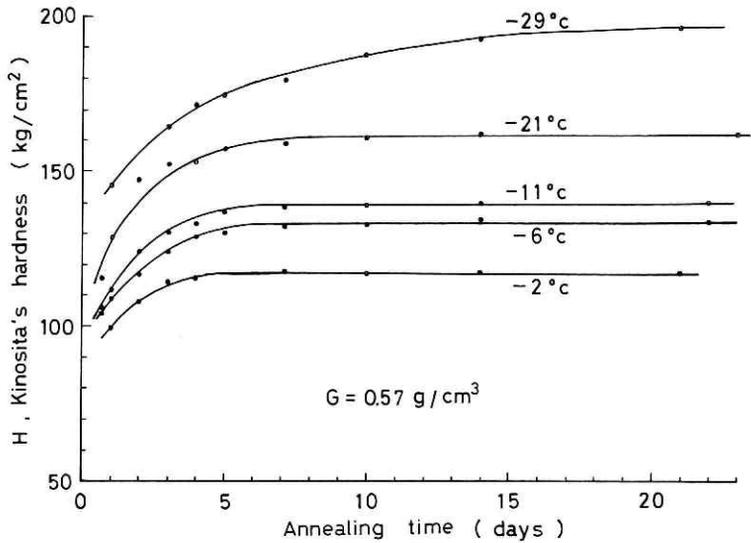
さらに, 実際の道路上においては, 上から下までほぼ同じ密度で均一な組織を有するいわゆる単一層よりも, 石平 (1977) により報告されているように, 積雪層が 2 種類以上の雪質から構成されている多層の場合 (例えば, 圧雪, 氷板といった場合) の方が多く, 硬度の測定には充分な注意を払う必要がある.

これらのことから, 厚さが 1 cm 以下といったような薄い路面積雪の硬度を測定する場合, 積雪の下の状態を考慮に入れなくてもいいような硬度計の開発が待望されるわけである.

3. 4 長時間焼鈍による圧雪の硬度変化

3. 1 および 3. 2 では, 一つの圧雪試料について, ほぼ $-2, -6, -10, -20, -30^{\circ}\text{C}$ の 5 段階の温度変化を 3 時間から 3 日間にわたって与え, 硬度の測定を行った. 次に, 今度は

図14 長時間焼鈍による硬度の変化
Fig. 14 Variation of the hardness with annealing of long duration.



上記5段階の温度条件下で、ふるった雪を1 mm/minの定速度により、密度がいずれも0.57 g/cm³になるように圧密して圧雪を作成し、5種類の一定の温度の低温実験室に保存して、それぞれ3週間程度の長時間焼鈍を行った。その効果による硬度の変化を測定した結果が図14である。図から明らかなように、硬度の

表3 長時間焼鈍による硬度測定結果
Table 3 Results of the measurements of hardness with annealing of long duration.

焼鈍温度 (°C)	焼鈍時間 (日)	その時の硬度 (kg/cm ²)	1日後の硬度 (kg/cm ²)	硬度増加率
-2	4	118	100	1.18
-6	7	134	109	1.23
-11	7	140	112	1.25
-21	10	162	129	1.26
-29	21	199	146	1.36

値は焼鈍温度の低いものほど大きい。また、測定結果から、硬度の値がほぼ一定になるまでに要する焼鈍時間、その時の硬度の値、およびその値、焼鈍開始1日後の硬度の値に対する比、すなわち硬度の増加率をそれぞれ焼鈍温度毎にまとめたのが表3である。1例ずつの測定しか行っていないので確定的なことは言えないが、焼鈍温度の低い場合ほど硬度の値がほぼ一定になるまでに要する焼鈍時間は長くかかり、硬度増加率についても大きな値を示した。参考までに、-2°Cおよび-29°Cの試料について、1日後(水平)、3日ないし4日後(水平、鉛直)、7日後(水平)および21日後(水平、鉛直)の顕微鏡組織を写真15、16に示す。これらの写真から、時間の経過とともに、雪の粒と粒との結合が次第に強くなって行く様子がよくわかる。しかし、その定量的な解析については別の機会に譲りたいと思う。

4. 考察

4.1 硬度と雪温との関係

3.1および3.2の実験結果から求めた、各試料別の雪温 T (°C) と木下式硬度 H (kg/cm²)

表 4 求められた硬度 $H(\text{kg/cm}^2)$ と雪温 $T(^{\circ}\text{C})$ との実験式
 Table 4 Experimental equations describing hardness and temperature. (定速度圧密)

試料番号	実験式
1	$H = -0.4T + 2.2$
2	$H = -3.0T + 75.4$
3	$H = -3.6T + 70.9$
4	$H = -2.7T + 35.6$
5	$H = -1.8T + 12.5$
6	$H = -6.1T + 165.6$
7	$H = -12.4T + 279.3$
(繰返し荷重による圧密)	
試料番号	実験式
8	$H = -3.3T + 13.6$

に関する実験式を表 4 に示す。また図 15 は、硬度の増加率を表わすこれらの式の勾配 α の中で、0.5 または 1 mm/min の定速度で圧密した試料から得られたものについて密度との関係を示したものである。今回は、0.45 g/cm³ 以上の高密度の圧雪についてしか測定を行っていないので、参考のために、対馬 (1972) により報告されている自然積雪を対象として測定されたデータを●印で示した。

図から明らかなように、硬度の増加率は、密度 0.4 g/cm³ 近辺を境として、それ以下では極めて小さいものの、それ以上の高密度になればなるほど急激に増大することがわかる。

この結果は、Butkovich (1956) による密度と破壊強度との関係を示した図 16 のグラフに非常によく対応している。

4. 2 硬度と密度との関係

積雪の硬度と密度との関係については、

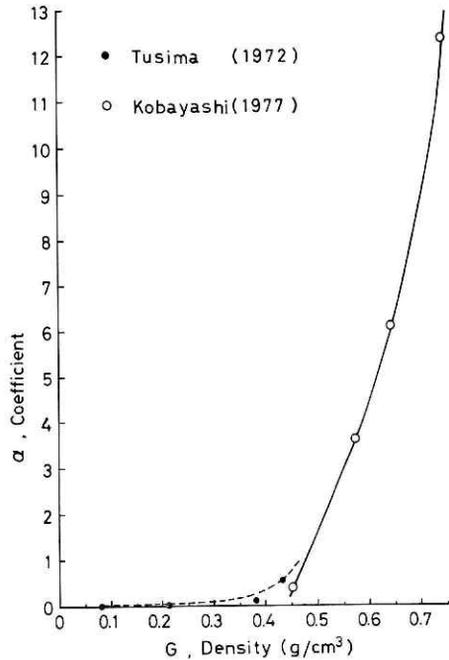


図15 密度と勾配 α との関係
 Fig. 15 Relation between the density and the coefficient α .

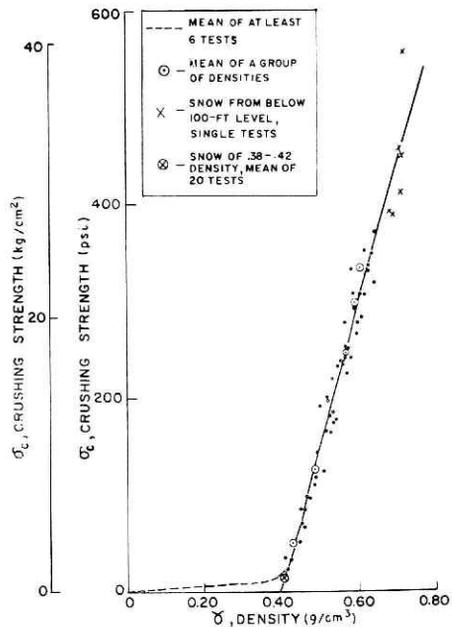


図16 密度と破壊強度との関係
 Fig. 16 Relation between the density and the crushing strength.

表5 密度 G (g/cm^3) と硬度 H (kg/cm^2) に関する実験式
 Table 5 Experimental equations describing hardness and density.

文献番号	測定者	測定年	実験式	密度の範囲 (g/cm^3)	摘要
6	木下誠一	1958—60	$H = 100G^4$	0.07—0.47	しまり雪
15	若浜五郎ほか	1969	$H = 700G^7$	0.3—0.75	ぬれ雪
7	木下誠一ほか	1969—70	$H = 400 \sim 600G^4$	0.45—0.85	路面の圧雪および氷板
9	成瀬廉二ほか	1972	$H = 4000G^8$	0.4—0.6	南極の積雪
1	油川英明ほか	1970—71	$H = 4.84 \times 10^4 G^9$	0.25—0.45	旭岳の硬化雪
"	"	1971—72	$H = 5.68 \times 10^4 G^9$	0.3—0.4	"
13	対馬勝年	1975	$H = 1700G^6$	0.1—0.68	しまり雪
	小林俊市	1977	$H = 1.64 \times 10^3 G^5$	0.57—0.74	圧雪

※ 硬度測定器は9のみカナディアンゲージ, それ以外はすべて木下式硬度計による。

これまでも表5に示すようにいくつかの実験式が報告されている。

本実験の場合, 先に得られた各密度別の硬度と雪温との実験式から硬度と密度との関係式を導き出すためには, それぞれの密度において基準温度を設定する必要がある。そこでここでは, 対馬 (1971) により示されているように, -5°C を基準温度にとり, $1\text{ mm}/\text{min}$ と圧密速度の等しい密度 $0.57, 0.64, 0.74\text{ g}/\text{cm}^3$ の3つの実験式から, -5°C における硬度の値を内挿値として計算した。求められた硬度 H (kg/cm^2) と密度 G (g/cm^3) との関係を示したのが図17で, これを実験式で表わすと,

$H = 1.64 \times 10^3 G^5$ となる。

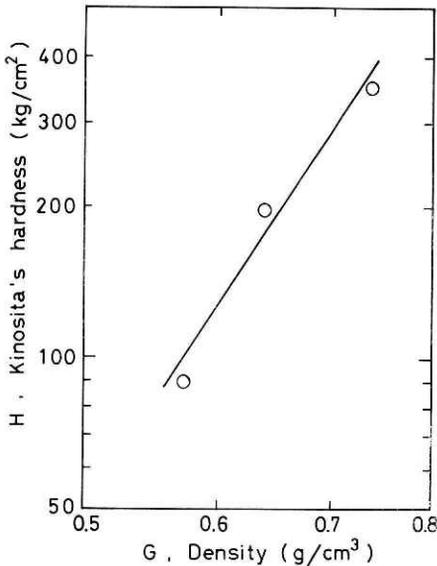


図17 密度と硬度との関係
 Fig. 17 Relation between the density and the hardness.

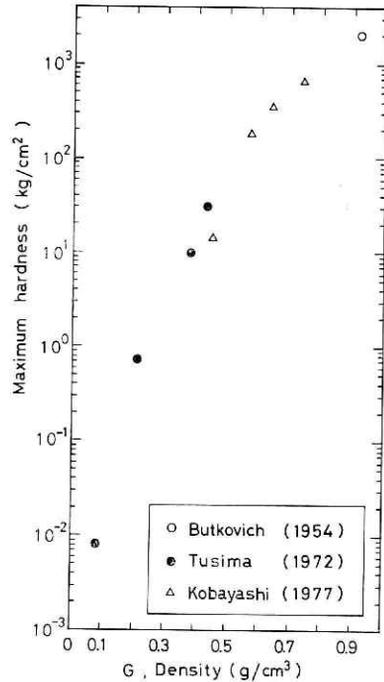


図18 密度と最大硬度との関係
 Fig. 18 Relation between the density and the maximum hardness.

この結果から、圧雪の硬度は密度依存性が極めて強く、わずかの密度のちがいに、硬度が著しく変化することがよくわかる。

ところで、「はしがき」にも述べたように、自然積雪の硬度については、対馬 (1972, 1975) により、雪温が -40°C 以下になると変化がほとんど認められないことが報告されているが、本実験のような高密度の圧雪についても、そのような傾向があると考えたい。

図 18 は、これまで報告されている各密度毎の硬度の最大値をプロットしたものである。●印で示したのは、対馬 (1972, 1975) により報告されている、自然積雪について木下式硬度計を使用して求められた値である。また○印で示したのは、Butkovich (1954) により報告されている、プリネル硬度計を用いて氷の単結晶を対象として測定されたデータの中から、 c 軸に平行な面に対して、 -42°C 近辺の温度条件下で、1 秒の押し込み時間により得られた値を kg/cm^2 に直してプロットしたものである。

図から明らかなように、これら 5 点からは 1 本の曲線を引くことができそうである。そして図の中に、今回の実験において 0.5 または $1 \text{ mm}/\text{min}$ の定速度圧密により得られた 4 つの実験式から、 -30°C の時の硬度の値を求めて (密度 $0.74 \text{ g}/\text{cm}^3$ のものについては外挿値) \triangle 印でプロットしてみると、いずれの場合もこの関係の中に入っている。

5. ま と め

以上の結果をまとめると、次のようになる。

(1) 圧雪の硬度は、温度依存性が極めて強く、密度が $0.45\sim 0.74 \text{ g}/\text{cm}^3$ の圧雪では、 $-0.9\sim -30^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、温度の低下とともに直線的に増加する傾向が見られた。

(2) 硬度と雪温との関係を示す実験式の勾配 (硬度の増加率) α と密度との関係を見ると、ほぼ密度 $0.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 近辺を境として、それ以下では α は極めて小さいものの、 $0.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 以上になると急激に増大する傾向が見られた。

(3) 圧雪の硬度 H (kg/cm^2) と密度 G (g/cm^3) との関係は、 $H=1.64\times 10^3 G^5$ で示された。

(4) 木下式硬度計の先端部の衝撃によって生ずる圧縮部分と破壊部分の厚さを比べると、おもりの質量、先端アタッチメントの直径、落下高さ等の条件を一定にして測定を行った場合には、密度が $0.57 \text{ g}/\text{cm}^3$ では、雪温が -10°C 以下になると圧縮部分の厚さの方が破壊部分の厚さよりも大きくなった。また、密度 $0.64 \text{ g}/\text{cm}^3$ については、雪温が $0\sim -30^{\circ}\text{C}$ の範囲では、いずれも圧縮部分の厚さの方が破壊部分の厚さよりも大きく、特に -30°C 近辺では、圧縮部分の厚さは破壊部分の厚さの約 2.5 倍に達した。

(5) -2 、 -6 、 -11 、 -21 および -29°C の 5 種類の一定温度条件下で、密度 $0.57 \text{ g}/\text{cm}^3$ の圧雪について 3 週間程度の長時間焼鈍を行った結果、硬度の値は焼鈍温度の低いものほど大きく、さらに硬度の値がほぼ一定になるまでに要する焼鈍時間および硬度増加率についても、焼鈍温度の低い場合ほど大きい値を示した。

謝 辞

本研究は、筆者が昭和52年度国内留学生として北海道大学低温科学研究所に派遣された期間(昭和52年8月1日～昭和53年1月31日)になされたものである。実験を遂行するに際しては、凍上学部門木下誠一教授、応用物理学部門対馬勝年助手をはじめ同研究所の方々から有益な御指導、御助言をいただいた。また、本論文の推敲にあたっては、雪害実験研究所栗山弘所長、磯部金治第3研究室長より有益な御助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 油川英明・対馬勝年・佐藤尚之(1972):大雪山における硬化雪の研究 II. 低温科学, 物理篇, 第30輯, 129-143.
- 2) 油川英明・対馬勝年(1975):雪氷の変態機構とすべり. 寒冷地における高速道路の雪害と対策の研究, 82-89.
- 3) Butkovich, T. R. (1954): Hardness of single ice crystals. SIPRE Res. Pap., 9, 1-12.
- 4) Butkovich, T. R. (1956): Strength studies of high-density snow. SIPRE Res. Rep., 18, 1-19.
- 5) 石平貞夫(1977):道路上の圧雪および凍結に関する基礎研究. 1-12.
- 6) 木下誠一(1960):積雪の硬度 I. 低温科学, 物理篇, 第19輯, 119-134.
- 7) 木下誠一・秋田谷英次・田沼邦雄(1970):道路上の雪氷の調査 II. 低温科学, 物理篇, 第28輯, 311-323.
- 8) 小林俊市・磯部金治・青木鉄朗(1976):圧雪の工学特性. 昭和51年度日本雪氷学会予稿集.
- 9) 成瀬康二・遠藤八十一・成田英器・山田知充(1972):南極昭和基地付近の内陸地域で採取された10 m 深の積雪コア解析(英文). 南極資料45, 33-46.
- 10) 対馬勝年(1971):温度による積雪の硬度変化. 低温科学, 物理篇, 第29輯, 51-55.
- 11) 対馬勝年(1972):温度による積雪の硬度変化 II. 低温科学, 物理篇, 第30輯, 47-52.
- 12) 対馬勝年(1973):積雪の反復荷重試験. 低温科学, 物理篇, 第31輯, 57-68.
- 13) 対馬勝年(1975):積雪の反復荷重試験. 寒冷地における高速道路の雪害と対策の研究, 75-82.
- 14) Tusima, K. (1975): The temperature dependence of hardness of snow. Snow Mechanics-Symposium, IAHS-AISH Publ., No. 114, 103-109.
- 15) 若浜五郎ら(1969):大雪山の雪渓調査 IV. 低温科学, 物理篇, 第27輯, 181-194.

(1978年6月5日 原稿受理)

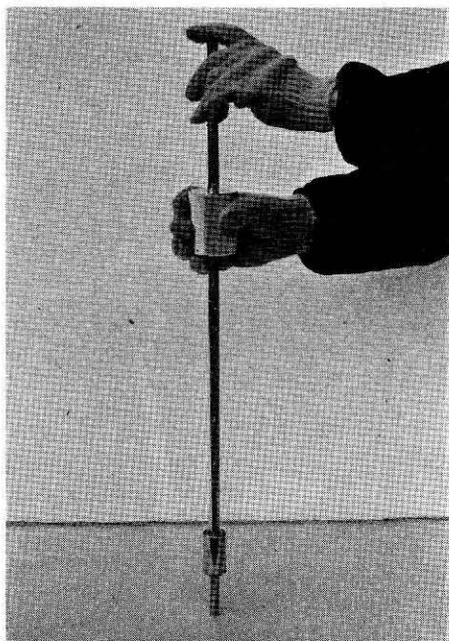


写真 1 木下式硬度計

Photo. 1 Kinosita's hardness gauge.



(水 平)



(鉛 直)

写真 2 ふるったあとの組織

Photo. 2 Texture of the snow after sifting.

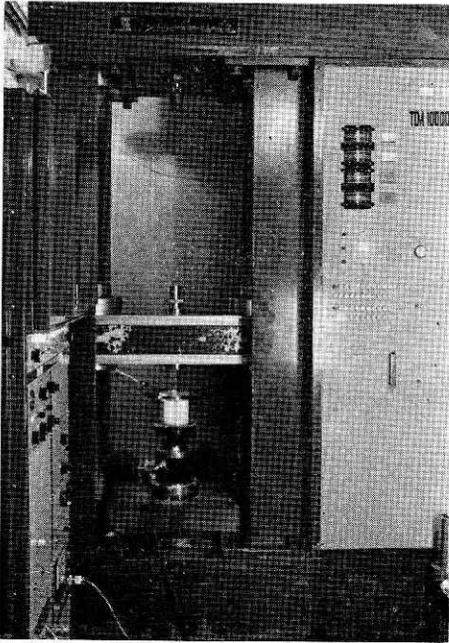


写真 3 万能引張圧縮試験機

Photo. 3 Universal tension and compression apparatus.

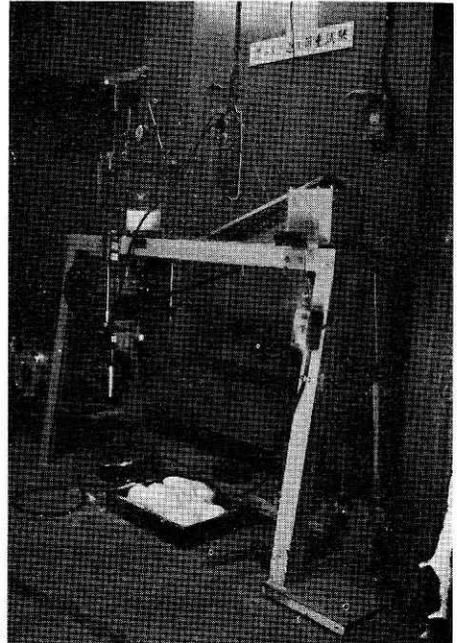
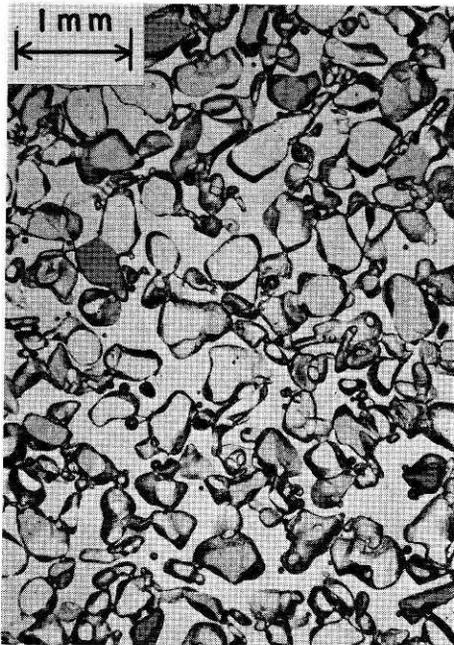
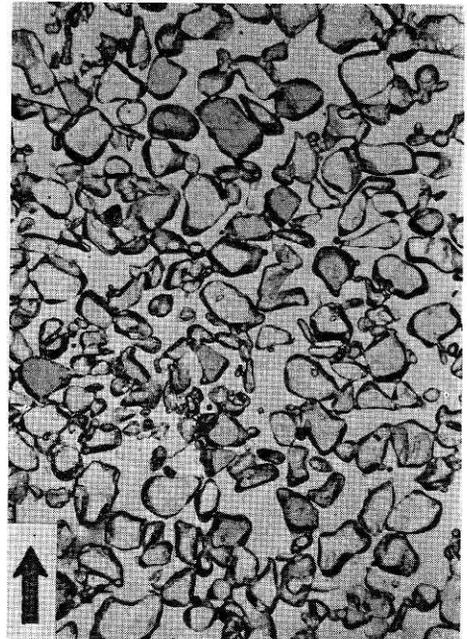


写真 4 繰返し荷重式一軸圧縮試験機

Photo. 4 Mechanical repeated loading apparatus.



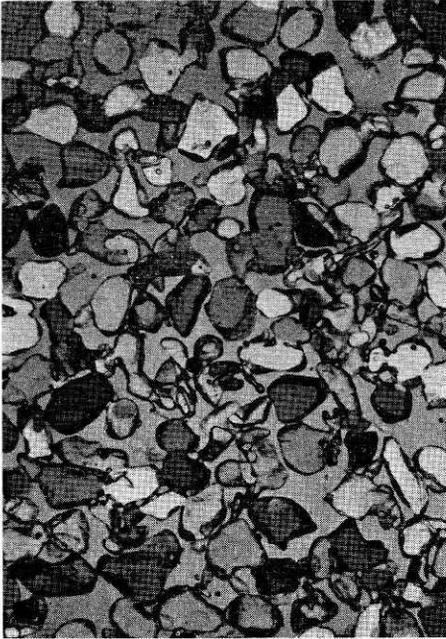
(水 平)



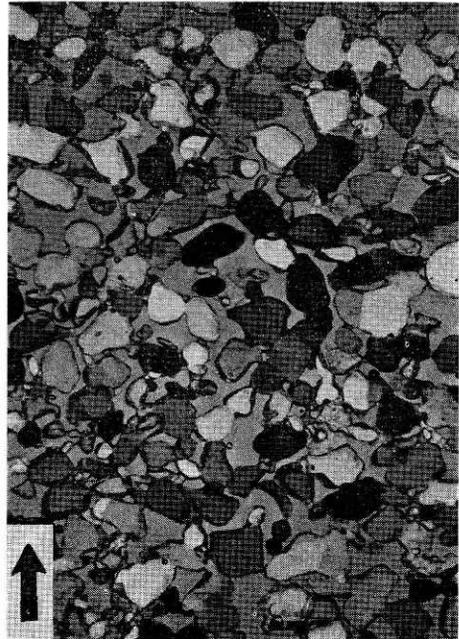
(鉛 直)

写真 5 $G=0.45 \text{ g/cm}^3$ (定速度圧密, $V=0.5 \text{ mm/min}$) の組織

Photo. 5 Texture of the specimen with density 0.45 g/cm^3 ($V=0.5 \text{ mm/min}$).



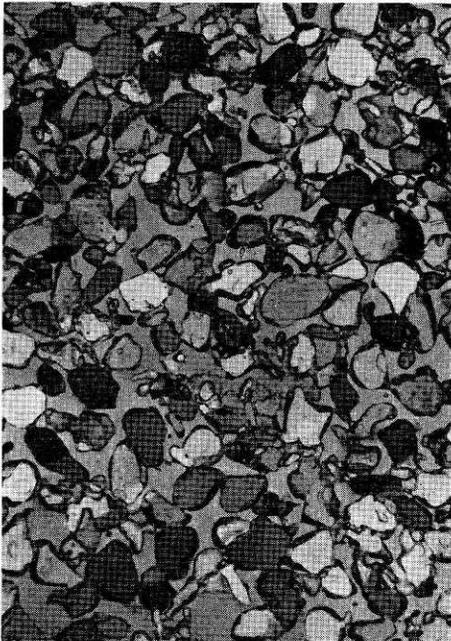
(水 平)



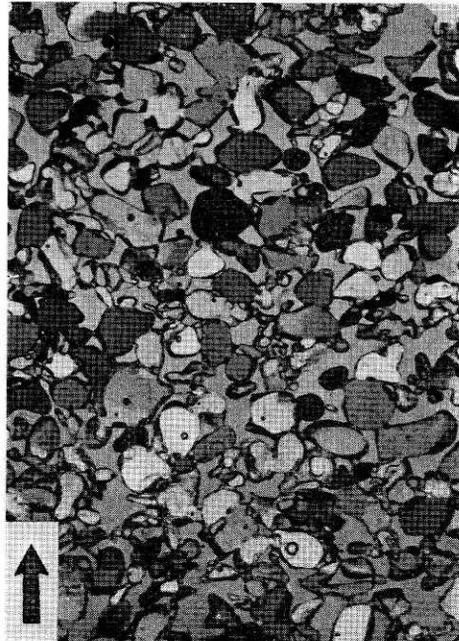
(鉛 直)

写真 6 $G=0.57 \text{ g/cm}^3$ (定速度圧密, $V=0.1 \text{ mm/min}$) の組織

Photo. 6 Texture of the specimen with density 0.57 g/cm^3 ($V=0.1 \text{ mm/min}$).



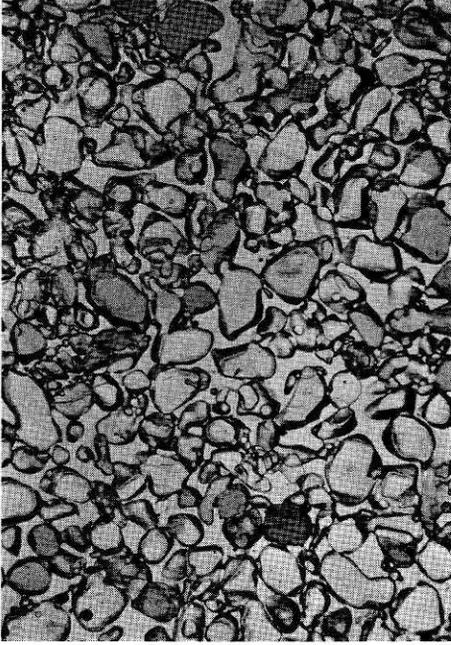
(水 平)



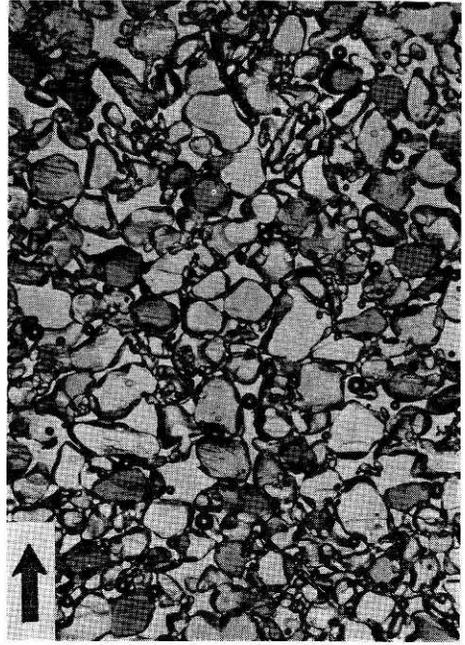
(鉛 直)

写真 7 $G=0.57 \text{ g/cm}^3$ (定速度圧密, $V=1 \text{ mm/min}$) の組織

Photo. 7 Texture of the specimen with density 0.57 g/cm^3 ($V=1 \text{ mm/min}$).



(水平)



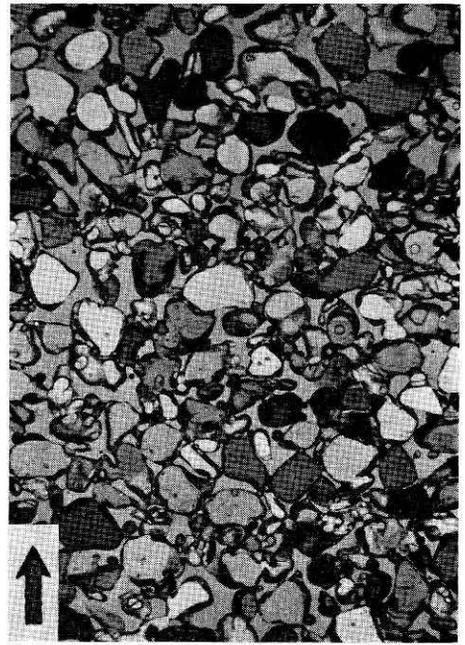
(鉛直)

写真 8 $G=0.57 \text{ g/cm}^3$ (定速度圧密, $V=10 \text{ mm/min}$) の組織

Photo. 8 Texture of the specimen with density 0.57 g/cm^3 ($V=10 \text{ mm/min}$).



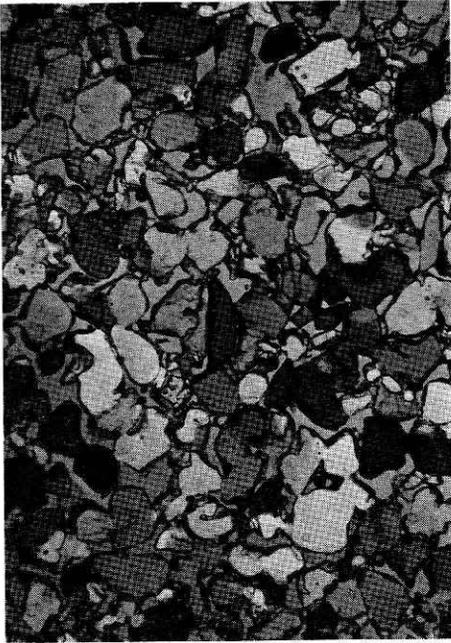
(水平)



(鉛直)

写真 9 $G=0.57 \text{ g/cm}^3$ (定速度圧密, $V=100 \text{ mm/min}$) の組織

Photo. 9 Texture of the specimen with density 0.57 g/cm^3 ($V=100 \text{ mm/min}$).



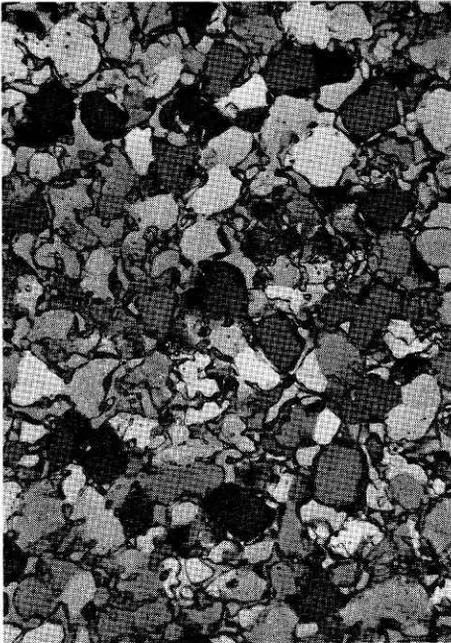
(水 平)



(鉛 直)

写真 10 $G=0.64 \text{ g/cm}^3$ (定速度圧密, $V=1 \text{ mm/min}$) の組織

Photo. 10 Texture of the specimen with density 0.64 g/cm^3 ($V=1 \text{ mm/min}$).



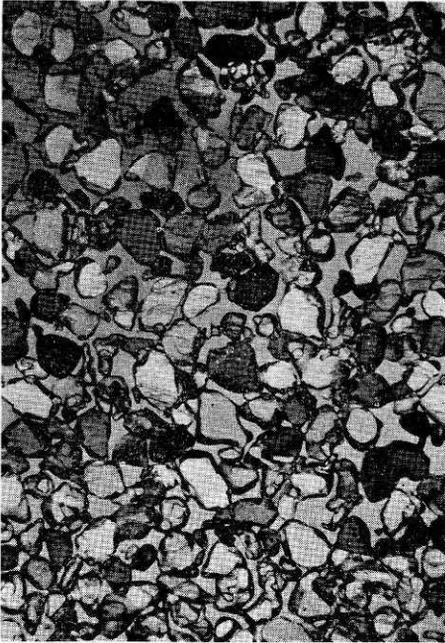
(水 平)



(鉛 直)

写真 11 $G=0.74 \text{ g/cm}^3$ (定速度圧密, $V=1 \text{ mm/min}$) の組織

Photo. 11 Texture of the specimen with density 0.74 g/cm^3 ($V=1 \text{ mm/min}$).

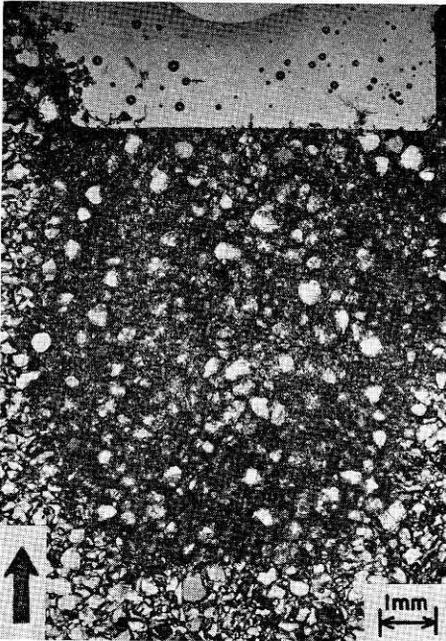


(水平)



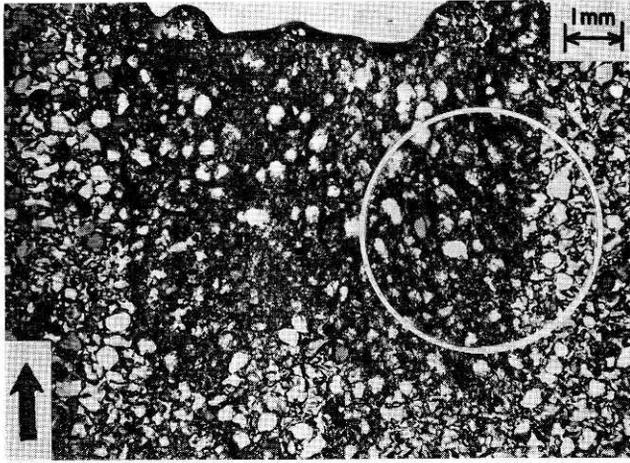
(鉛直)

写真 12 $G=0.57 \text{ g/cm}^3$ (繰返し荷重 1,000 回) の組織
Photo. 12 Texture of the specimen with density 0.57 g/cm^3
(after 1,000 strokes of repeated loading were made).

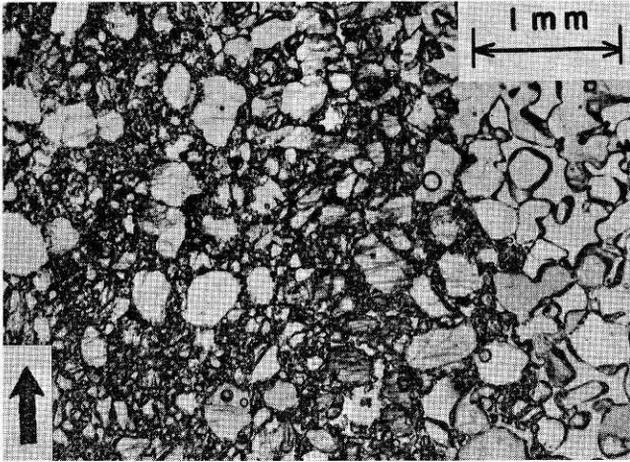


(鉛直)

写真 13 $G=0.57 \text{ g/cm}^3$ の圧縮部分 (-29°C)
Photo. 13 The compressed region with density 0.57 g/cm^3 (-29°C).

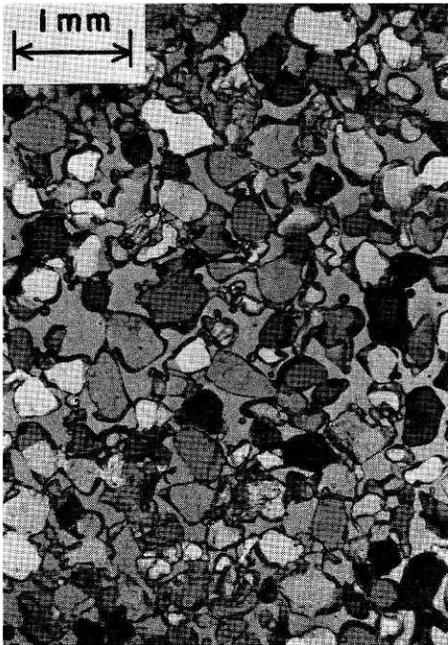


(鉛直)

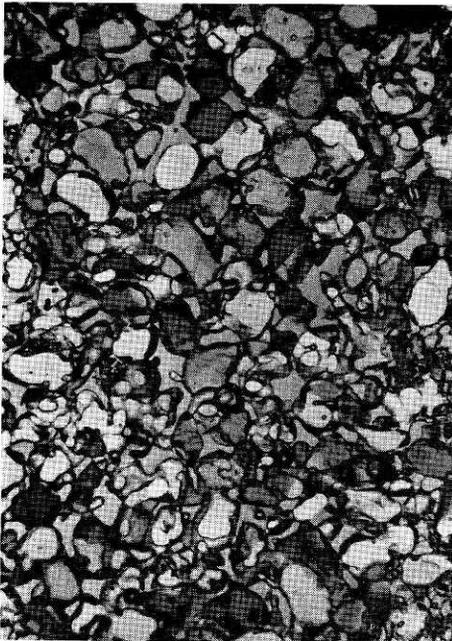


(上記○部分拡大写真, 鉛直)

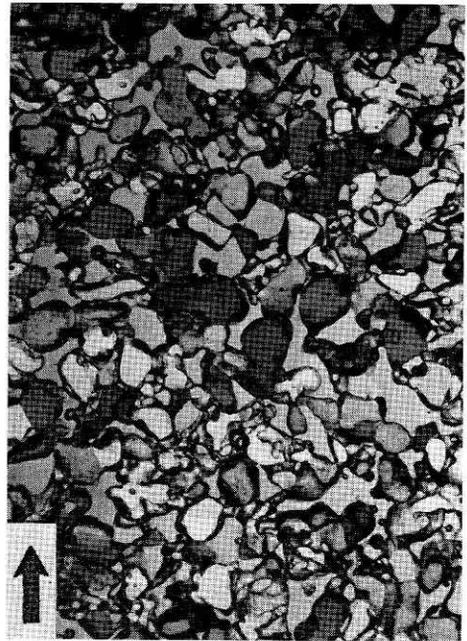
写真 14 $G=0.64 \text{ g/cm}^3$ の圧縮部分 (-28°C)
Photo. 14 The compressed region with density 0.64 g/cm^3 (-28°C).



1日後 (水平)



3日後 (水平)



3日後 (鉛直)

写真 15 長時間焼鈍による組織の変化 (-2°C)

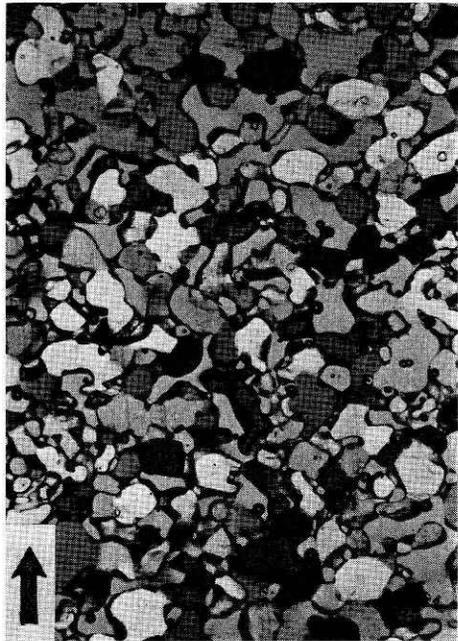
Photo. 15 Variation of the texture with annealing of long duration (-2°C).



7日後 (水平)



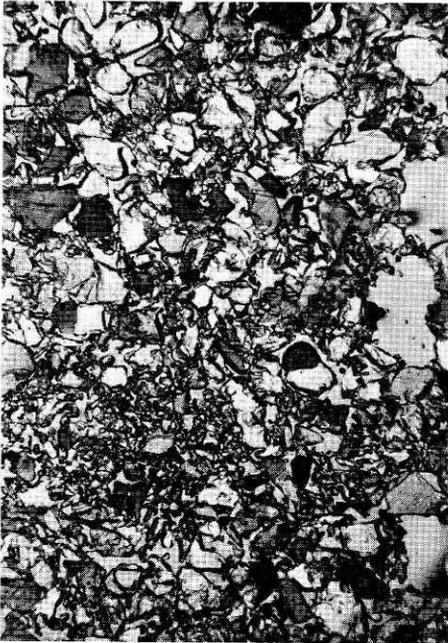
21日後 (水平)



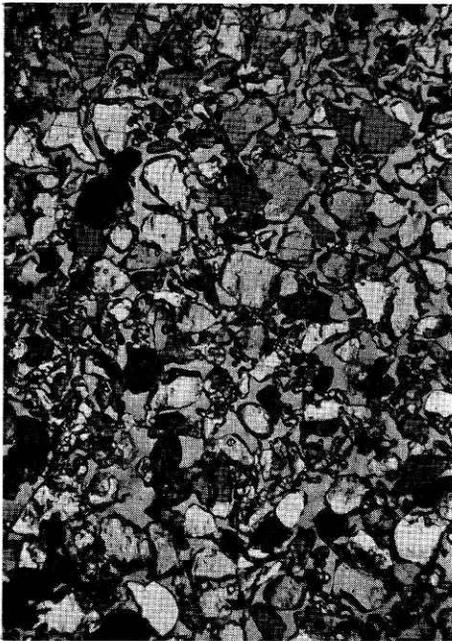
21日後 (鉛直)

写真 15 長時間焼鈍による組織の変化 (-2°C)

Photo. 15 Variation of the texture with annealing of long duration (-2°C).



1日後 (水平)



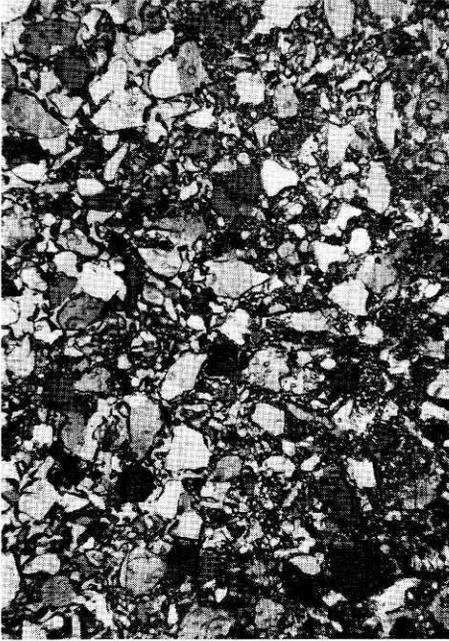
4日後 (水平)



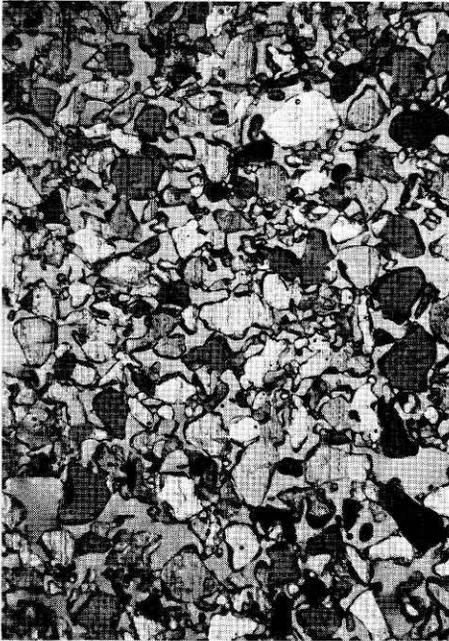
4日後 (鉛直)

写真16 長時間焼鈍による組織の変化 (-29°C)

Photo. 16 Variation of the texture with annealing of long duration (-29°C).



7日後 (水平)



21日後 (水平)



21日後 (鉛直)

写真 16 長時間焼鈍による組織の変化 (-29°C)

Photo. 16 Variation of the texture with annealing of long duration (-29°C).

付表 1 万能引張圧縮試験機の仕様
 Appendix 1 Specifications of the universal tension and compression apparatus.

項 目	仕 様
型 式	新興通信工業 TOM/10000X
荷 重 形 式	クロスヘッド下降式
最大荷重容量	10 ton
圧 縮 速 度	0.005—500 mm/min
供 試 体 寸 法	100 φ × 100 mm (内径)
クロスヘッド	直流サーボモータ 1.5 kW
駆動方式	SCR方式

付表 2 繰返し荷重式一軸圧縮試験機の仕様
 Appendix 2 Specifications of the mechanical repeated loading apparatus.

項 目	仕 様
型 式	丸東製作所 S67—54
繰返し載荷機構	レバー分銅による電動式荷重わく 下方けん引式機構 レバー水平調整装置および計数器付 レバー比 1 : 10
繰 返 し 荷 重	13.3 kg (圧力 1.7 kg/cm ² に相当)
繰返し載荷速度	約 37 回/分
供 試 体 寸 法	100 φ × 100 mm (内径)
電 動 機	0.2 kW (1/4 HP) 単相 100 V