HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	しもざらめ雪の研究　I
Author(s)	秋田谷, 英次
Citation	低温科學. 物理篇, 23, 67-74
Issue Date	1965-03-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18021
Type	bulletin (article)
File Information	23_p67-74.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Eizi AKITAYA 1964 Studies of Depth Hoar. I. *Low Temperature Science, Ser. A, 23.* (With English Summary p. 73)

しもざらめ雪の研究 I*

秋田谷英次
(低温科学研究所　雪害科学部門)

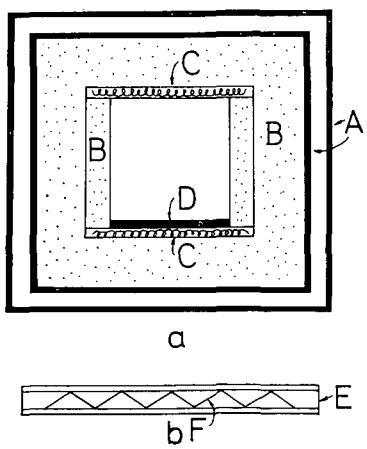
(昭和39年12月受理)

I. まえがき

積雪内部に発達した「しもざらめ雪」が北海道のような寒冷地における雪崩発生の原因の一つとして知られている[1]。この様な地方の積雪は，下層で温度が高く上層で低くなっている。この温度勾配のために，積雪の中の上下に向いあった雪粒の間に温度差ができ，下方にある温度の高い雪粒の上面の氷が昇華蒸発し，上にある温度の低い雪粒の下面に凝結して霜の結晶を作る。高い平均雪温と大きな温度勾配のもとでは，この様な昇華蒸発，凝結が盛んに行なわれ積雪内に新たに霜の結晶が発達する。これがしもざらめ雪 (depth hoar) といわれるもので，非常に脆い性質の積雪層である。温度勾配が雪粒の変形に及ぼす影響については，すでに報告されているが[2]，ここでは低温実験室でしもざらめ雪を作り，その成長の様子や組織の変化及び熱の流れについて調べた結果を報告する。

II. 実験方法

第1図aに実験装置を示した。内容積 $54\times50\times58$ cm^3 の2重張りの木箱Aの内側に断熱材(厚さ10 cmのスチロフォーム)Bをはり，上下に電熱線による熱源Cを置く。この中に雪のブロック(26 cm×26 cm×26 cm)を入れ，下の熱源の温度を高く上を低く保っておく。実験装置全体は −25°C の低温室内に入れた。こうすると自然状態と同じ条件で温度勾配を与えることができる。



第1図　実験装置

しもざらめ雪の発達過程をみるために箱の中に入れる雪のブロックを，あらかじめ縦に切目を入れて二つに分れる様にしておいた。一方の雪には下から0, 10, 20, 26 cmの4カ所に熱電対を差込み温度を記録し，他の半分は1週間おきに箱から取出して，顕微鏡で調べるための試料を切出した。試料はブロックの上，中，下の3カ所から切出し，顕微鏡で見るための積雪薄片はアニリン

* 北海道大学低温科学研究所業績　第697号

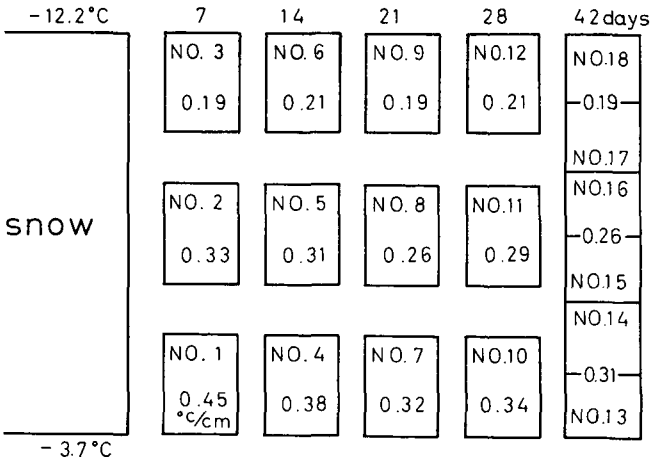
固定法[3]によって作った。

雪の中を流れた熱量を測定するために，下方にある熱源と雪との間に手製の熱貫流計Dを挿入した。第1図bに示したものがそれで，厚さ6 mmのゴム板Eを貫き，上下の面に接点を持つ30対の熱電対Fを直列にとりつけてある。ゴム板の両面には更に厚さ1 mmのゴム板をはりつけた。熱電対によって得たゴム板の中の温度勾配とゴム板の熱伝導率との積が，温度の定常状態において，熱貫流計を貫いて流れた熱量である。手製の熱貫流計の熱伝導率Kはベックマン社製の熱貫流計によって比較検定したが0°Cで$K=0.583\times10^{-3}$ cal/cm·sec·°Cであった。Kの温度による変化は小さい。図版Iの1の雪のブロックの下にこの装置が見えている。

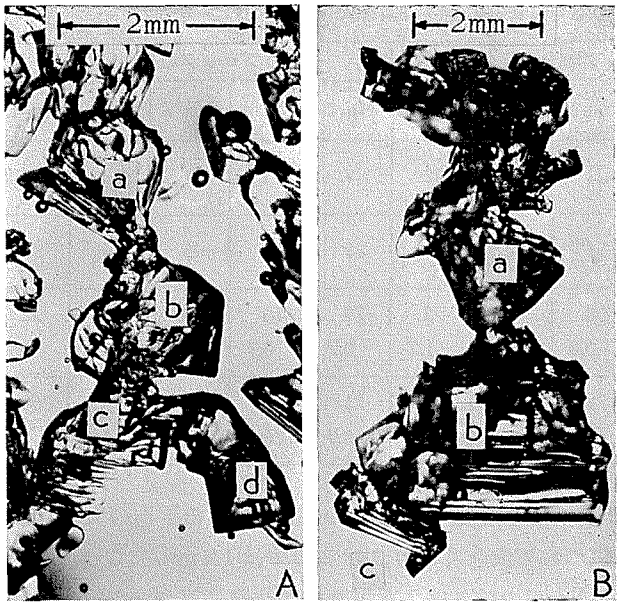
熱電対としては銅——コンスタンタン熱電対を使用し，熱貫流計用及び雪温測定用熱電対の起電力は6打点の電子管式記録器で記録し，上下熱源の温度は記録器に付けた制御器で一定に保った。使った雪は低温室内に保存されている密度約0.3 gr/cm³のしまり雪である。

III. 薄片による観察

雪のブロックに−0.2〜−0.4 °C/cmの温度勾配を42日間与えた。その間の平均雪温はブロックの下の面で−3.7°C，上の面で−12.2°Cであった。前節で述べたように，実験の途中で雪のブロックから試料を切出して薄片を作り，雪の組織を調べた。第2図に温度勾配を与えた日数，試料を切出した位置，その場所の温度勾配，試料番号を記してある。例えばNo. 7は21日目にブロックの下の部分から切出した試料の薄片で，温度勾配は−0.32°C/cmである。同じ21日目の試料でブロックの中程から切出したNo. 8，上の部分から切出したNo. 9の温度勾配はそれぞれ−0.26，−0.19 °C/cmとなっている。ブロックの上の部分になる程温度勾配は小さい。このことは他の7日，14日，28日，42日目の試料についても成り立つことで，熱の流れの一部が雪のまわりの断熱材を通して外へ流れた結果である。図版Iの2は温度勾配を与える前の薄片，図版II〜IVまでは温度勾配を与えてからの薄片の顕微鏡写真である。写真の下の



第2図 試料番号，温度勾配を与えた日数，試料を切出した位置とその場所の温度勾配



第3図　しもざらめ雪の鉛直方向のつながりを示した写真

方が温度が高く上の方が低くなっているので，水蒸気は下から上へと矢印の方向に移動したわけである。温度勾配が大きく，しもざらめ化の進んだブロック下部の写真では，全体として雪粒は鉛直方向につながっている。これは温度の高い方に向いて成長した霜の結晶の先端から，更に別の結晶が成長するということがくり返された結果である。第3図はこの様子を示した写真である。Aは薄片の写真で結晶aの先端からbが成長し，更にbの先端からc，dが成長している。Bは雪の試料をほぐしてしもざらめ雪の結晶をとり出したものでaからb，bからcの結晶が成長している。

薄片に見られるしもざらめ雪の結晶には2種類の型がある。むくの角ばった六角柱状の結晶(solid)と中空のコップ状の骸晶(skeleton)である。第4図のaがskeleton型，bがsolid型の結晶である。それでしもざらめ雪の結晶をこの二つの型に分類して各薄片についてその分布と大きさを調べた。第1表にその結果を示した。例えば雪のブロックの下の部分で42日目の試料の薄片であるNo. 13は総数37個全部のしもざらめ雪の結晶のうちsolid型が32%，skeleton型が68%，結晶の平均の大きさがそれぞれ1.1 mmと1.7 mmである。尚，薄片の面積は試料によって多少の変動がある。第1表では面積7 cm^2当りに換算した結晶の数をかかげた。また，No. 3の試料の欄にみられる横棒は，しもざらめ雪の結晶が極めて少ないことを示しNo. 6の0はskeleton型の結晶が全く無いことを示す。第1表にみられる様に，薄片にあらわれたしもざらめ雪の結晶の総数は，雪のブロックの上の部分では14日目の50ケから42日目の61ケと増加しているのに対し，温度勾配が大きく，温度が高いブロックの下の部分では，7日目の89ケから42日目の37ケと減少している。

第4図　しもざらめ雪の結晶の型
a：skeleton 型
b：solid 型

雪のブロックの上の部分は大部分がsolid型の結晶で日がたつにつれて次第にskeleton型の結晶がふえるが，そのふえ

第1表 しもざらめ雪の結晶の型と大きさ

試料の位置	雪のブロックの上の部分					雪のブロックの下の部分				
試料番号	No. 3	No. 6	No. 9	No. 12	No. 18	No. 1	No. 4	No. 7	No. 10	No. 13
温度勾配を与えてからの日数	7	14	21	28	42	7	14	21	28	42
しもざらめ雪の結晶の総数	—	50	51	57	61	89	65	45	46	37
solid 型結晶 (%)	—	100	98	85	95	79	76	29	42	32
平均の大きさ (mm)	—	0.7	0.8	1.0	1.2	0.7	0.7	1.0	1.0	1.1
skeleton 型結晶(%)	—	0	2	15	6	21	24	71	58	68
平均の大きさ (mm)	—	—	—	—	—	0.9	0.9	1.6	1.4	1.7

方は少なく 42 日間で 10% 前後の数に達するに過ぎない。solid 型の結晶の平均の大きさは 14 日目の No. 6 で 0.7 mm，日数の経過につれて大きくなり，42 日目では 1.2 mm になった。したがって，ブロックの上の部分では，solid 型の結晶は 2 週間以内に結晶の芽ができ，その後，solid 型結晶のままで成長したことになる。

雪のブロックの下の部分では，7 日目の No. 1 の試料ですでに 90 ケ近いしもざらめ雪の結晶があらわれた。日がたつにつれて結晶の数は少なくなり，21 日目の No. 7 では 45 ケと No. 1 の半数になっている。小島が述べている様に[2] 最初できた多くの小さな結晶のうち，あるものが特に大きくなり，そのために他の結晶が消費されてなくなってしまったわけである。21 日目以後，結晶の数の変化は著しくはない。ブロックの下の部分の結晶の型は，7 日目の No. 1 で solid 型が 79%，skeleton 型が 21% で日がたつにつれて solid 型が減り，skeleton 型が増加する。殊に 21 日目の No. 7 では solid 型が 29%，skeleton 型が 71% となり skeleton 型が 7 割を占めた。この比率はその後もあまり変りがない。skeleton 型の結晶の大きさも 21 日目で 1.6 mm となり，14 日目の 2 倍近い大きさになったが，その後の成長はあまり顕著ではない。

IV. 降雪の結晶形との比較

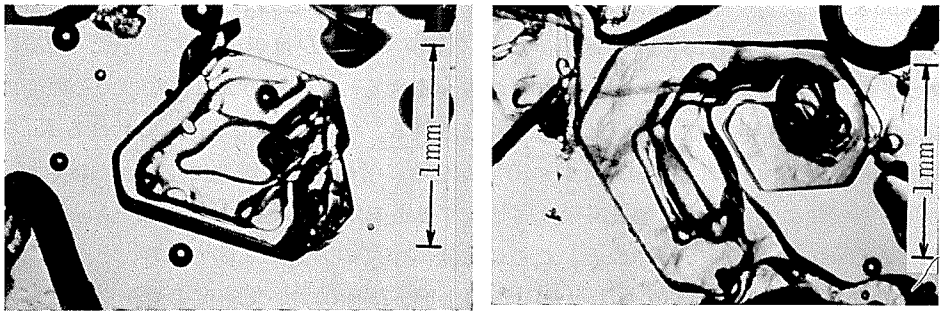
降雪の各種の結晶は温度 T_a，水蒸気の過飽和度 s を二つの軸とするダイヤグラム[4),5)] (T_a-s ダイヤグラム，又は中谷ダイヤグラム) の上で特有な領域を占めることが知られている。しもざらめ雪の結晶をその形状により降雪の結晶と比較すると，solid 型結晶は柱状結晶 (column) 又は極厚板結晶 (very thick plate) に，skeleton 型結晶はコップ状結晶 (cup) に対応する。降雪の柱状と極厚板の結晶はいずれも中のつまった solid 型の結晶で一括して solid 型結晶と呼んでもよいのであるが，しもざらめ雪の solid 型結晶とまぎらわしくなる。それでこの報告では極厚板も柱状結晶にふくめて一括して柱状結晶と呼ぶことにする。T_a-s ダイヤグラムの上で柱状の結晶は各種の結晶のうちで最も過飽和度 s が低く，且つ温度 T_a の広い範囲で成長する。但し T_a の高い所では柱状結晶の成長しうる s の範囲は狭く，T_a の低い所では広くなる。

コップ状結晶の成長する領域は $-4\sim-10$℃ の T_a の範囲で，s は柱状結晶の隣り，値の大きい方に接している。しもざらめ雪の skeleton 型結晶は雪のブロックの下の部分に多く発生したが，この部分の温度は -5℃ 前後であった。したがって降雪のコップ状結晶の成長する温度範囲に入っていることになる。solid 型結晶は雪のブロック上部の温度の低い部分で発生したが，柱状結晶は元来 T_a の広い範囲で成長するのであるから，solid 型結晶の温度もその範囲内に含まれている。

雪のブロックの中における水蒸気の過飽和度 s は測定されていない。しかし次の様に考えてよいであろう。すでに吉田が述べている様に[6]，積雪内部の隙間の部分では，平均として水蒸気はまわりの氷に対してその温度における飽和状態となっている。一方，積雪に温度勾配がある場合には，その温度勾配は殆んど隙間の空気の部分にでき，1ケの氷粒の中では一様な温度を示す。空気に比べて氷の熱伝導率の値が著しく大きいからである。このために温度勾配の方向にならんだ二つの氷粒にはさまれた隙間では，平均として水蒸気が氷に対して飽和状態になっていても，温度の高い氷粒の近くでは未飽和に，温度の低い粒の近くでは過飽和になる。温度勾配が大きい程この過飽和度は大きくなるであろう。

雪のブロックの中に成長した skeleton 型の結晶は solid 型の結晶よりも温度勾配の大きい所に成長した。skeleton 型の結晶は solid 型よりも過飽和度の大きい所で成長したと考えてよい。したがって，少なくとも定性的にしもざらめ雪の二つの結晶形は，降雪における柱状及びコップ状結晶に対応する成長条件をもつことになる。

第5図に skeleton 型結晶の成長方向，即ち温度勾配の方向に垂直な切断面を示した。偏光顕微鏡観察によると，この結晶の主軸は切断面に垂直であった。結晶は主軸の方向に成長しているわけである。この結果は，降雪のコップ状結晶の主軸の方向とも一致している。



第5図 skeleton 型結晶の切断面（温度勾配の方向に垂直な断面）

V. 熱の流れ

熱の流れは定常状態において

$$Q=-K\frac{dt}{dx}=-K_s\frac{dt_s}{dx_s}\ \mathrm{cal/cm^2\cdot sec} \qquad (1)$$

である。ここで

K, $\frac{dt}{dx}$; ゴム板の熱伝導率及び温度勾配

K_s, $\frac{dt_s}{dx_s}$; 雪の熱伝導率及び温度勾配

この熱量 Q は雪粒と空気の純粋な伝導によって運ばれた熱量 Q_c と，雪粒の間を水蒸気の拡散によって運ばれた熱量 Q_d との和である。Q_d は定常状態において次式で表わされている[6]。

$$Q_d = L \cdot k \cdot D \frac{dP_s}{dx} \text{ cal/cm}^2\cdot\text{sec} \tag{2}$$

x; 雪のブロックの下から上向きにとった距離

P_s; 飽和水蒸気圧 mmHg

D; 雪の中での水蒸気の拡散係数 cm^2/sec

k; 水蒸気の密度と圧力との比 $\text{gr/cm}^3\cdot\text{mmHg}$

L; 氷からの水蒸気の蒸発熱 675 cal/gr

P_s(mmHg) と温度 t°C との間には，$P_s = 4.58\, e^{0.0857t}$ の関係があるから (2) 式は次の様になる。

$$Q_d = L \cdot k \cdot D \frac{dP_s}{dx} = K_d \frac{dt_s}{dx_s} \text{ cal/cm}^2\cdot\text{sec} \tag{3}$$

ここで

$$K_d = L \cdot k \cdot D \cdot 0.0857 \cdot 4.58\, e^{0.0857t} \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot{}^\circ\text{C} \tag{4}$$

K_d は拡散による熱伝導率である。式中 D のみが未知数である。

実験では密度 0.28 gr/cm^3 のしまり雪を用い，温度は高さ 3 cm 毎に測定した。測定値より (1) 式における雪の熱伝導率 K_s を求めると，高さ 0〜3 cm の間で，平均温度 $t_1 = -8.3$°C で $K_{s1} = 4.65 \times 10^{-4}$, $t_2 = -6.7$°C で $K_{s2} = 4.73 \times 10^{-4}$ であった。この K_s の差は両温度における水蒸気の拡散の差によるものと考え拡散係数 D を計算する。D は雪の温度，密度，構造によって異った値をとるであろう。しかし t_1 と t_2 の差が小さく，t_2 は t_1 の 2 日後なのでその間に密度や構造にはあまり変化がなく，D は一定と考えられる。(4) 式により t_1, t_2 における K_d を求めると，$K_{d1} = 1.44\, D \times 10^{-4}$, $K_{d2} = 1.64\, D \times 10^{-4}$ となる。雪の密度や構造に変化がなければ，その間の空気と雪粒による純粋の熱伝導率は同じはずであるから，$K_{s1} - K_{d1} = K_{s2} - K_{d2}$ が成立つ。これより $D = 0.4\ \text{cm}^2/\text{sec}$ が得られた。この値は空気中でのおよそ 2 倍であり，吉田の求めた値の 1/2 である[6]。この水蒸気の拡散は当然雪の上面，下面において密度の変化をもたらすはずであるが，本実験では密度の著しい変化はみられなかった。なおしもざらめ化が進むにつれて熱伝導率がどの様に変るかは，今後更に実験を続けて調べる予定である。

VI. 要　　約

低温実験室において雪のブロックに温度勾配を与え，しもざらめ雪を作った。そして結晶の形，その成長の様子，組織の変化，熱伝導率，結晶主軸について調べた。その結果次のことが判った。

(1) しもざらめ化の進んだ雪では，雪粒が温度勾配の方向につながりをもつ様になる。これは温度の高い方に向いて成長した霜の結晶の先端から更に別の結晶が成長するということがくり返されるためである。

(2) 薄片によって観察されたしもざらめ雪の結晶形は，むくの solid 型及び骸晶の skeleton 型結晶で，降雪の柱状 (column 及び very thick plate) 及びコップ状結晶にそれぞれ対応する。

(3) Skeleton 型の結晶の主軸は熱の流れる方向に向いている。

(4) 密度 0.28 gr/cm^3 の積雪内部での水蒸気の拡散係数は 0.4 cm^2/sec で空気中でのおよそ2倍である。

終りにこの研究を行なうにあたって御指導いただいた吉田順五教授，藤岡敏夫教授に厚く感謝いたします。

文　　献

1) 吉田順五・藤岡敏夫・木下誠一・若浜五郎 1963 北海道日高の雪崩調査報告. 低温科学，物理篇，**21**, 75-94.
2) 小島賢治 1952 雪の結晶の変形 III. 低温科学，**9**, 205-209.
3) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学，物理篇，**18**, 77-96.
4) Kobayashi, T. 1963 The Growth of Snow Crystals at Low Supersaturations. Phil. Mag., **6**, 1363-1370.
5) Nakaya, U. 1954 Snow crystals, natural and artifical. Harvard Univ. Press. 510 pp.
6) 吉田順五 1950 積雪内部の水蒸気の拡散による熱の移動. 低温科学，**5**, 93-100.

Summary

The fragile structure of depth hoar layers in snow covers is known to be one of the causes of avalanches. Crystals of depth hoar grow in the snow cover if the snow temperature is fairly high, and there is a large temperature gradient. A block of compact snow (26×26×26 cm) was placed in a cold room for 6 weeks. The temperatures of the upper and lower surfaces were maintained at −12 and −4°C, respectively, and all other surfaces were thermally insulated. Once a week, pieces of snow were removed from the block. Thin sections of these pieces were made by the aniline method and their structures were observed with a microscope.

Plate I-2 shows the original structure of the sample. Plates II, III and IV show the structure of the sample after 1, 3 and 6 weeks, respectively, with a temperature gradient of −0.2∼−0.4°C/cm. The arrows in the photographs indicate the direction of heat flow.

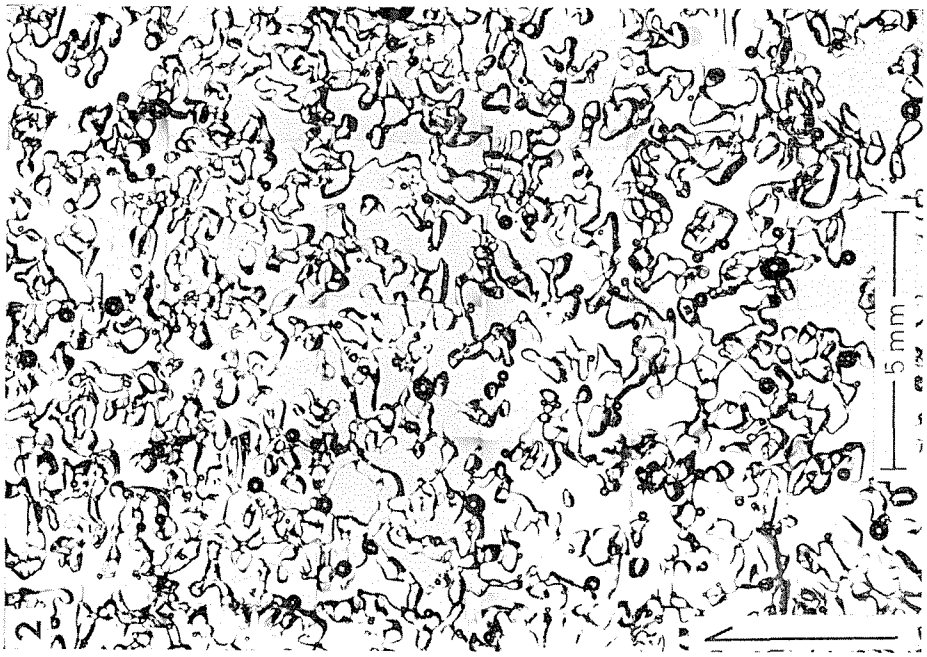
At the end of two weeks, there were depth hoar crystals 7 per cm^2 in the upper portion of the snow block, and at the end of 1 week there were 13 per cm^2 in the lower portion. And later the number of crystals showed few change in the upper portion while it fell gradually in the lower.

The temperature and the temperature gradient at the upper portion of the snow block were −10°C and −0.2°C/cm and those at the lower portion were −5°C and −0.4°C/cm. The depth hoar crystals grew in a direction opposite to that of the heat flow, and when

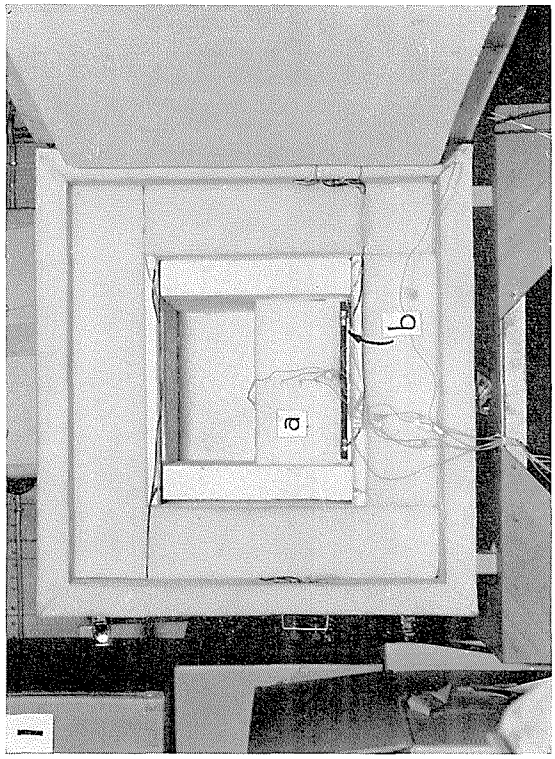
they had reached 1～2 mm in size, a new crystals developed from the tip of the old one (Fig. 3). At the end of 6 weeks, the snow sample showed a characteristic structure; series of hoar crystals arranged parallel to the direction of the heat flow in the sample, with rare lateral connections between them.

Depth hoar crystals were classified into two types from their crystal habit; (a) skeleton type and (b) solid type, as illustrated in Fig. 4. The skeleton type has the same crystal habit as "cup" snow flake crystals, and the solid type are the same as "column and very thick plate" crystals. In addition, depth hoar and snow flake crystals of the same type develope in the same temperature range.

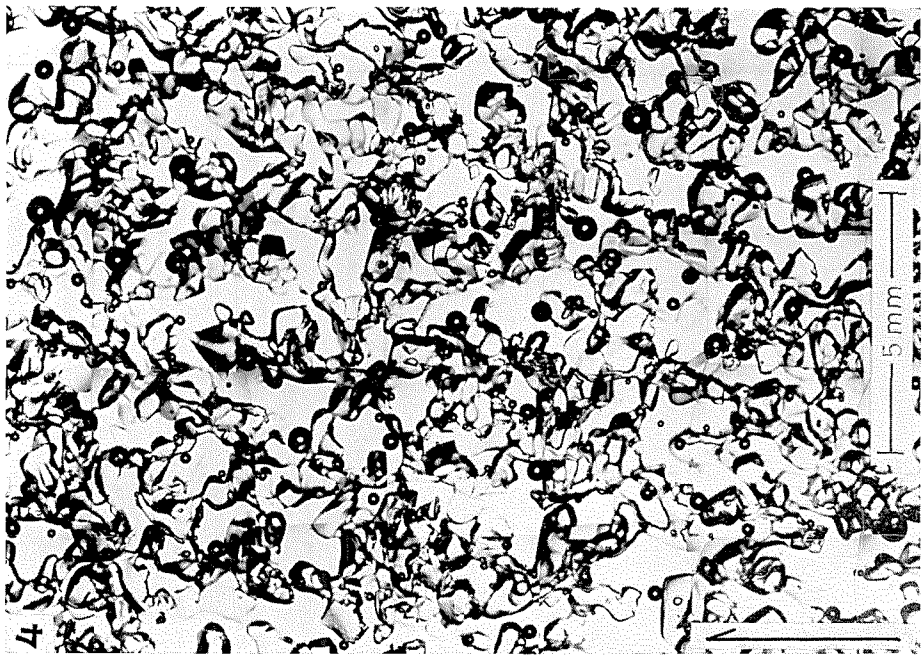
As the snow temperature was lowered, the amount of heat flow through the snow block decreased as a result of the decrease in the amount of water vapour transported by diffusion through the pores of the snow block. This results in a diffusion coefficient D of 0.4 cm^2/sec, which is about twice that of free air.



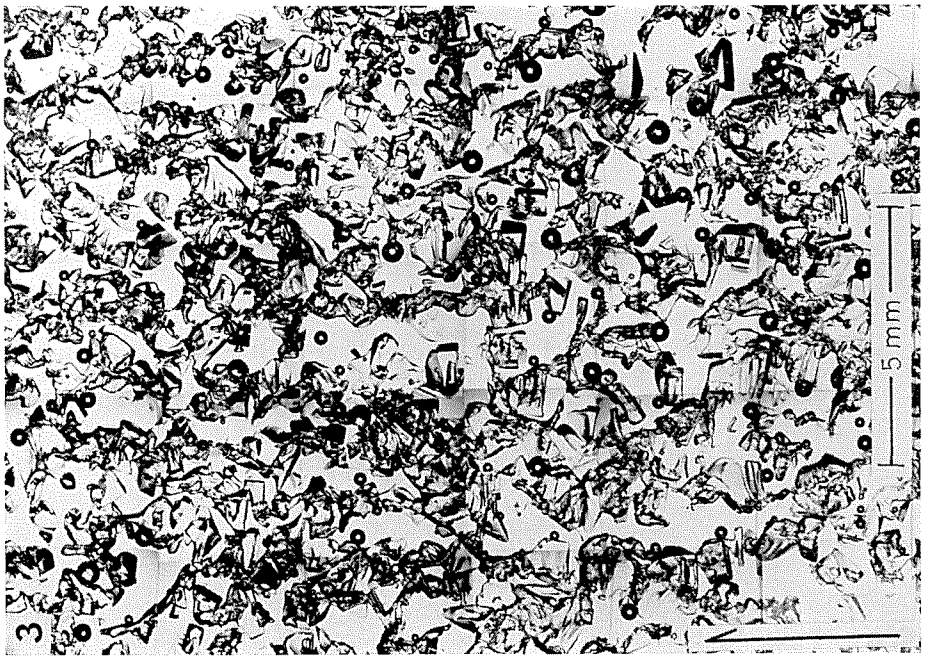
テスト前のしまり雪，密度 0.32 gr/cm³
いずれも矢印の方向が鉛直上方を示す



雪の熱伝導率測定の写真
a；雪のブロック　b；熱貫流計

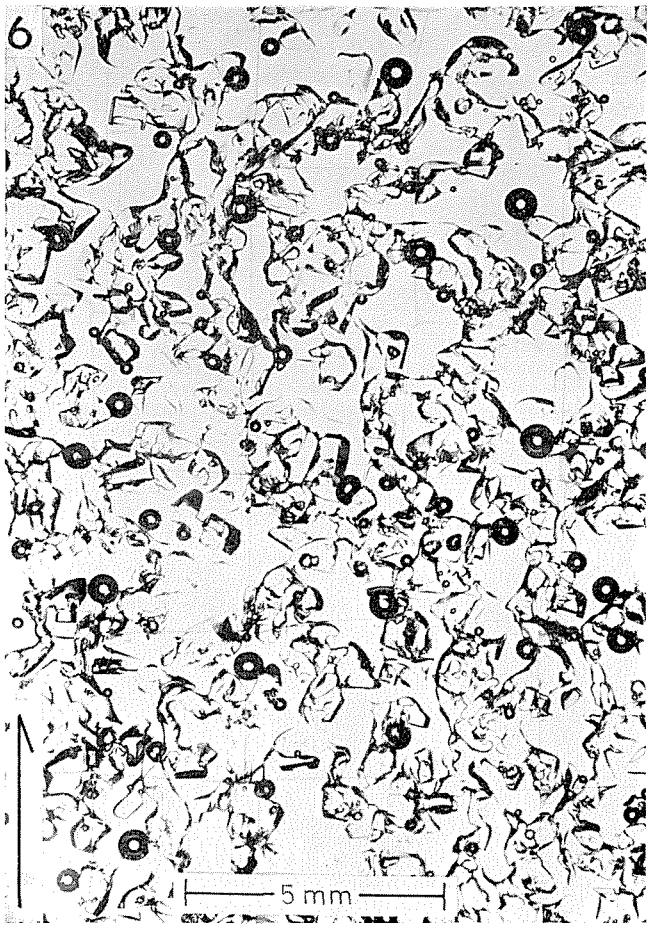


ブロック上部，試料番号 No. 3，7 日目，
温度勾配 0.19°C/cm



ブロック下部，試料番号 No. 1，7 日目，
温度勾配 0.45°C/cm

ブロック下部，試料番号 No. 7，21 日目，
温度勾配 0.32°C/cm



ブロック上部，試料番号 No. 9，21 日目，
温度勾配 0.19°C/cm

ブロック下部，試料番号 No. 13，42 日目，
温度勾配 0.31°C/cm

ブロック上部，試料番号 No. 18，42 日目，
温度勾配 0.19°C/cm

低温科学　物理篇　第23輯　訂正

頁	行	誤	正
17	1	1964	1965
67	1	1964	1965
99	2	adn	and
〃	2	1964	1965
121	1	1964	1965
129	2	1964	1965

低温科学　物理篇　第25輯　訂正

頁	行	誤	正
37	脚　註	第841号	第837号
187	5	できる。	できまる。
197	4	ヒマヤラの	ヒマラヤの
198	下から2	Socilty	Society
215	17	などを得て	などを経て
225	9	重量，凍上との	重量，凍土との
229	7	粒土分布	粒度分布

付　　録

v	積雪分科会の著者	Dumani	Doumani
vii	氷分科会-1の座長	Bonson	Benson
ix	氷分科会の座長	L. Levi	C. S. Benson
xi	名簿，8人目	*●新井	●新井
xiii	同，下から6人目	●石原	石原
xiv	同，11人目	●小泉	小泉
xviii	下から9行目	Hanovr	Hanover

viii　上から2行目　Luyet, B. J. の講演は前頁，氷分科会-2の同氏の講演に引続き行なわれた。