



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 急速硬化した雪の構造  |
| Author(s)        | 秋田谷, 英次; AKITAYA, Eizi  |
| Citation         | 低温科学. 物理篇, 45, 11-18  |
| Issue Date       | 1987-03-10  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/18532">https://hdl.handle.net/2115/18532</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 45_p11-18.pdf   |



## 急速硬化した雪の構造\*

秋田谷 英次

(北海道大学低温科学研究所)

(昭和61年10月受理)

### I. はじめに

積雪に長時間温度勾配が作用すると、しもざらめ雪に変わる。普通野外で見られるしもざらめ雪は脆弱な雪であるが、特殊な条件、すなわち、密度の大きい雪に大きな温度勾配が作用すると、もとの雪より著しく丈夫な雪となる。この丈夫な雪は、硬しもざらめ雪<sup>1)</sup>、又は硬化雪<sup>2)</sup>と呼ばれている。前の報告<sup>3)</sup>では、野外実験から、上に述べた特殊な条件下では、数時間程度の短い時間で、硬度が急速に増加することを報告した。そして、硬度増加を雪の密度、温度、温度勾配から計算する回帰式を求めた。

この急速な硬度増加にともなう、積雪の内部構造の変化はしらべなかつた。しかし、雪粒子の代りに氷の半球を使い、顕微鏡下の実験結果から、積雪の急速硬化は、微細な霜の結晶が雪粒同士を結合させるためと推論した。

上に述べた野外実験では、温度の高い雪が表面から急に冷却されたときに硬化がおこった。しかし、これとは反対に、温度の低い雪を表面から急に暖めても、温度勾配が生じるので硬化が起ると考えられる。

本報告では、室内実験により、1) 温度勾配の方向にかかわらず急速硬化の起ることをたしかめ、2) 薄片観察から、急速硬化した雪は雪粒同士が、多くの微細な霜の結晶で結合されていることを確認し、3) その構造的な特徴を顕微鏡断面写真から観察した。

### II. 実験方法

実験は低温実験室内で人工的に作った雪の試料に温度変化を与え、硬度の時間変化を測定した。硬度は木下硬度計を用いて測定した。

実験試料は、低温室に保存してある硬いしまり雪をほぐしてばらばらにし、1.6 mm メッシュの篩を通した雪粒子で作った。底と周囲を厚さ5 cm の断熱材で作った深さ10 cm の箱に、篩を通した雪粒子を均等につめた。ほぐした雪を用いたのは、一旦雪粒同士の結合を断った試料の方が、新しい結合発生による硬度変化を調べやすいためである。試料の表面温度を急に変えて、表面と3 cm 下の雪の温度、および表面硬度を一定時間毎に測定した。比較のため、もう一個同じ試料を作り、表面温度の変化を与えずに、すなわち試料を作製したときの温度で保存しながら表面硬度の時間的な変化を調べた。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第2901号

実験は表面を急に冷却する場合と加熱する場合の2通りの方法でおこなった。

### III. 実験結果

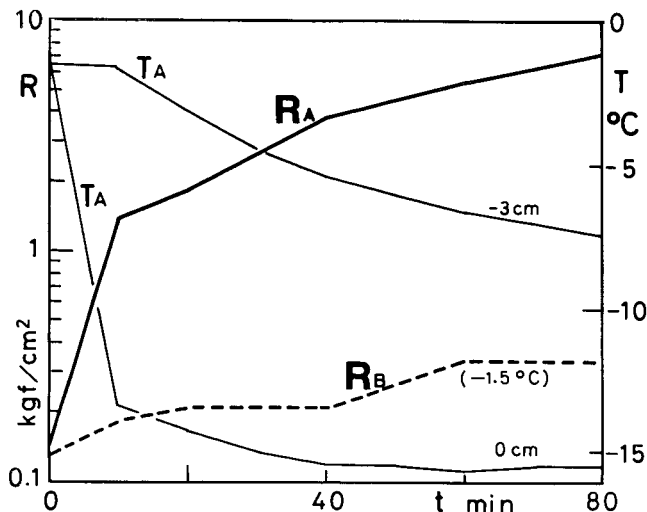
#### 1. 表面を急速に冷却する場合

冬の晴れた日には、日中は雪の表面付近の温度は高くなっているが、太陽が沈むと放射冷却で急速に冷却する。このような状況に対応させる実験として、前報の野外実験は日没から6時間後までの硬度増加を調べた。本実験は室内で人工試料を用い、表面を冷却しながら1~2時間の硬度変化を調べた。

-1.5°Cの低温室に保存した雪を、ばらばらにほぐし、箱につめ、表面と3cm下にサーミスター温度計を固定した。最初の雪の温度は一様に-1.5°Cである。表面に厚さ3mmのアルミニウム板を乗せ、その上にくだいた氷と食塩を混合した約-15°Cの寒剤の入ったポリエチレンの袋をのせ(試料A)、10分毎に2点の温度と表面硬度を測定する。硬度の測定はアルミニウム板を除いておこなう。硬度は4点の平均を用い、測定に要する時間は1分程度であった。

比較のために作ったもう一つの試料(試料B)は、そのままの状態、すなわち-1.5°Cの一定温度に保っておき、硬度の時間的変化を調べる。

第1図にAの温度( $T_A$ )と硬度( $R_A$ )、Bの硬度( $R_B$ )の時間的推移を示した。試料Aの温度は、はじめは、表面および3cm下も約-1.5°Cであるが、10分後には表面温度は10°C以上も低下し、その後約40分まではゆるやかに低下し、40分以降はほぼ一定になっている。3cm下の温度は最初からゆるやかに低下している。80分の間、表面と3cm下方では約7~10°Cの温度差が与えられたことになる。硬度は最初の10分間で約10倍に増え、その後の増加は小さくなり、80分後には最初の約50倍になっている。

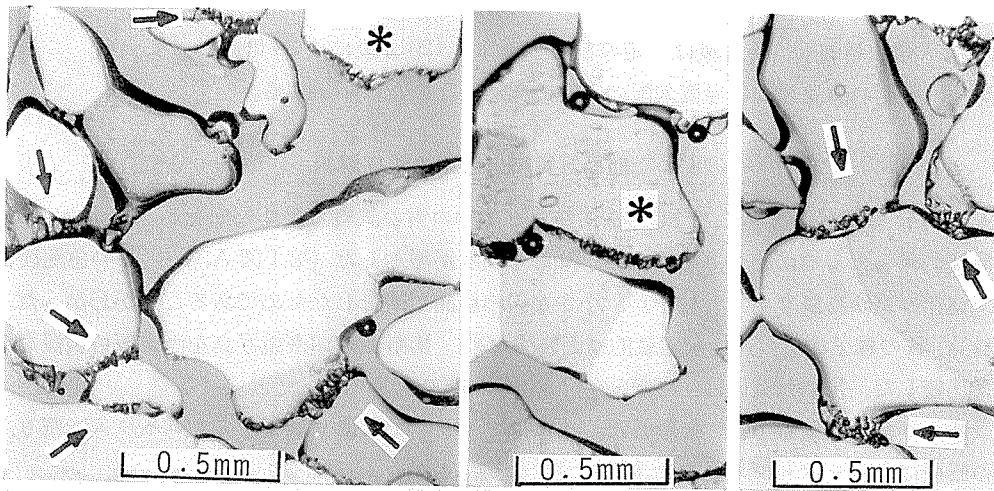


第1図 硬度と温度の時間的変化

$T_A$ ,  $R_A$ : 急速冷却した試料Aの温度と硬度,  $R_B$ : 一定温度(-1.5°C)に保った試料Bの硬度, 密度, A: 0.45 g/cm<sup>3</sup>, B: 0.42 g/cm<sup>3</sup>

一方、 $-1.5^{\circ}\text{C}$  の高い一定温度に保った試料 B の硬度増加は小さく、80 分間で 3 倍程度である。

試料 A, B とも密度は  $0.4\text{ g/cm}^3$  以上で、実験中の自重による圧密は無視できる。したがって試料 B のゆるやかな硬度増加は、高温、一定温度下での雪粒同士の焼結による結合のためと考えられる。A の急速な硬化は、焼結よりも大きな温度差による別の機構に起因している。すなわち、水蒸気の昇華蒸発、移動、凝結の結果できた霜の結晶による雪粒同士の再結合のためと考えられる。そこで薄片で粒子の結合状態を調べた。第 2 図は温度勾配を与えた試料 A の鉛直薄片である。写真の上方が低温、下方が高温になっている。矢印で示した所では、雪粒同士が多くの細い氷の柱でつながっている、又 \* 印の粒子の温度の高い側を向いた面には、多くの小さな突起がみられる。温度勾配のある雪の中では、空隙を介して向いあった 2 つの雪粒の間で、温度の高い雪粒の表面で氷は昇華蒸発し、隣りの温度の低い雪粒表面で昇華凝結して霜の結晶を作る。このことから、第 2 図の矢印をつけた雪粒の結合部や小さな突起 (\* 印) は、大きな温度勾配のもとで、急速に成長した小さな霜の結晶であることがわかる。



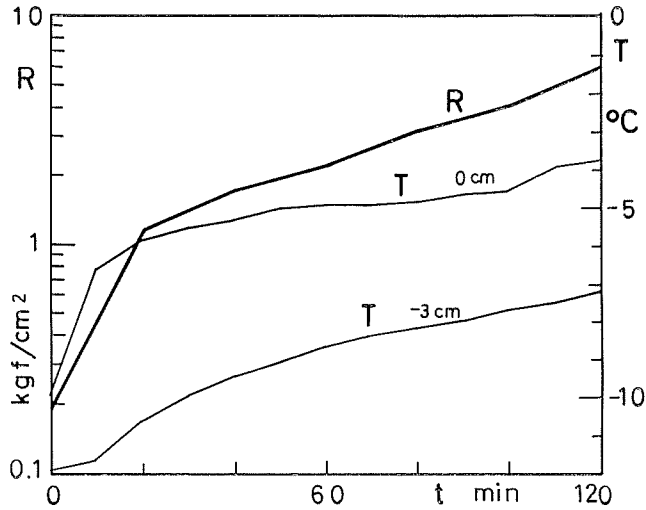
第 2 図 急速硬化した試料 A の鉛直薄片

写真の上下は試料の上下と一致、↑印：霜の結晶でできた結合部、\*印：成長しつつある霜の結晶

## 2. 表面を急速加熱する場合

上の実験では、温度の高い雪の表面を急速に冷却した。氷の温度で決まる飽和水蒸気圧の差で水蒸気は下から上に移動して、霜の結晶が成長し、雪粒同士を結合した。これと同じ理由で、温度の低い雪を表面から急に加熱すると、水蒸気は上から下へ移動し霜による粒子の結合がおこり、硬度増加が起ると考えられる。

$-12^{\circ}\text{C}$  の低温室に保存した雪を同室内でほぐし、1 と同じ方法で箱につめ、ただちに  $-2^{\circ}\text{C}$  の低温室に移動し、表面硬度と雪温を一定時間毎に測定した。その時の雪の温度と硬度の変化を第 3 図に示す。最初の 10 分間で表面温度は急上昇している。表面と 3 cm 下方の温度差は、最初の 10 分間で約  $5^{\circ}\text{C}$ 、その後小さくなり、100 分を過ぎると  $3^{\circ}\text{C}$  程度である。硬度は最初の



第3図 急速に加熱した試料の硬度と温度の時間変化  
密度  $0.48 \text{ g/cm}^3$

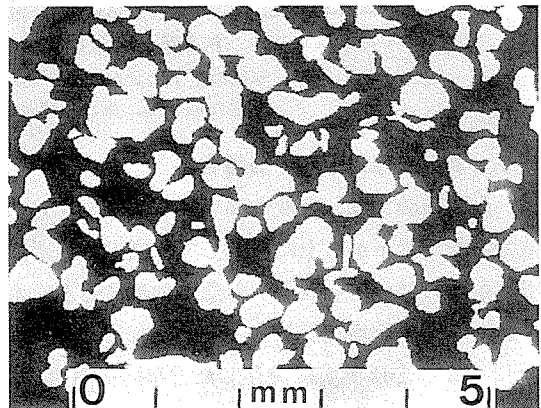
20分で大きく増加し、その後は一定の割合で増加し120分後には30倍になっている。この実験から、硬度の急速増加は温度勾配の方向に関係のないことがわかる。

#### IV. 断面写真による雪の粒度解析

前章1.で述べたように、同じ方法で作った2つの雪の試料で温度勾配をかけたものは、一定温度に保ったものに比べ80分間で数10倍も硬度が増加した(第1図A, B)。この急速硬化は、薄片写真から隣りあった粒子が、小さな霜の結晶で結合したためであることがわかった。試料A, Bの粒子構造の違いを定量的に表わすため、切断面の顕微鏡写真を画像解析装置を用いて比較した。用いた装置はエーデーエス製 PIP 4000 である。

断面写真は成田の方法<sup>4)</sup>を用いた。成田はアニリンで固めた試料をマイクロームで削り、その断面にウォーターブルーの粉末をハケで掃く。すると氷粒子の切断面のみに粉末が付着し、雪粒と空隙部(凍結したアニリン)とが明瞭に区別できる。しかし凍結したアニリンの温度が $-15^{\circ}\text{C}$ より高いとアニリンの部分にも粉末が付着して、その区別が明瞭でない。低温室での作業を容易にするため、アニリンより融点の高いフタル酸ジメチル( $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_4$ , 融点 $-4^{\circ}\text{C}$ )を用いた<sup>5)</sup>。この場合は $-10^{\circ}\text{C}$ より高い温度でもウォーターブルーは氷にのみ付着し、鮮明な断面写真が得られる。

画像解析では、各粒子の面積、周囲長、



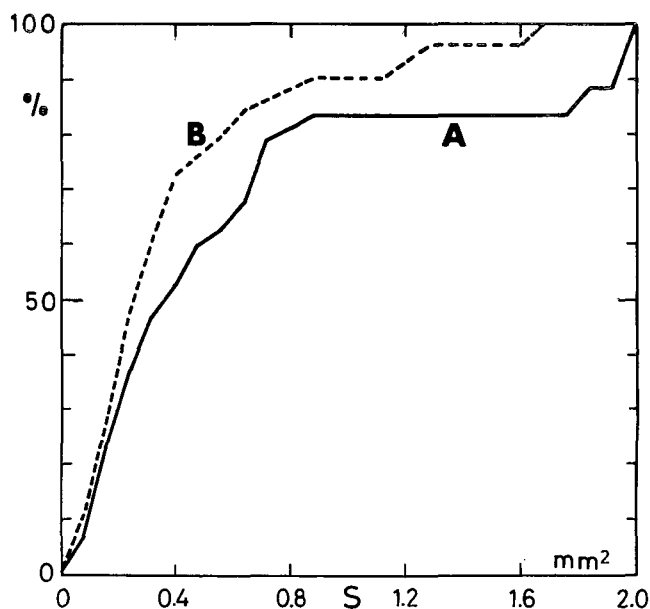
第4図 試料Aの鉛直断面  
粒度解析装置で二値化処理した後の画像、  
白い部分が氷粒子

フェレ径 (Feret 径) 等を求めることができる。解析は第 1 図で示した試料 A と B の実験後の鉛直切断面について行なった。第 4 図は画像解析装置で 2 値化処理をした後の試料 A の切断面の一部である。白い部分が雪粒子、黒い部分が空隙の断面である。

第 5 図は A, B の面積基準積算を示す。横軸が粒子の断面積, 縦軸は全粒子断面積のうち、ある粒子面積以下のものが占める割合 (粒子の全断面積に対する百分率) である。例えば面積  $0.4 \text{ mm}^2$  以下の粒子が A では全粒子面積の 52% を占め、B では 72% を占めている。図から、硬度増加の小さい B では、小さい面積の粒子が多く、一方硬化の著しかった A では小さな粒子が減って大きな粒子が増えたことがわかる。又同じ測定面積内 ( $81 \text{ mm}^2$ ) の粒子総数は B の 261 個に対し、A は 179 個であった。温度勾配をかけた試料 A では、小さな粒子が昇華蒸発でなくなったり、粒子同士が結合したため (2 個の粒子が結合すると 1 個と数えられる) 粒子総数が減り、大きな粒子が増えたものと考えられる。

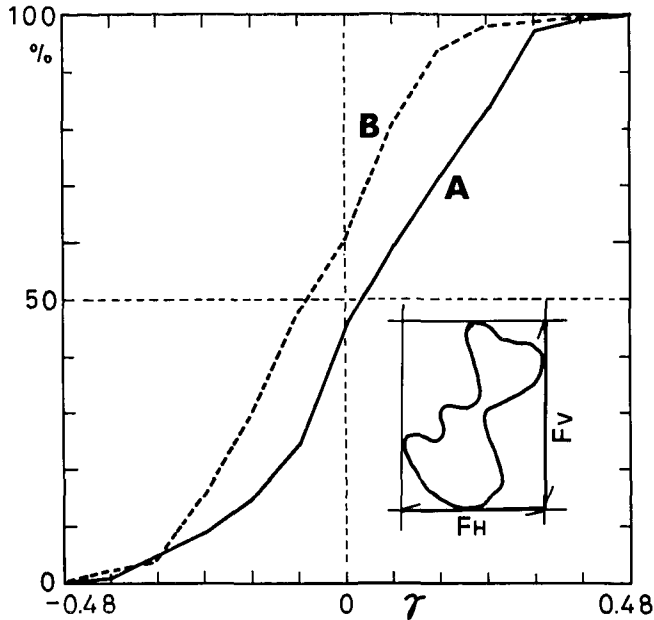
しもざらめ雪は、たて構造をもつことが知られている。自然積雪内では温度勾配の方向、即ち上下方向に粒子がつながっている。これは霜の結晶が温度の低い粒子から温度の高い方、即ち下方を向いて成長するためである。そこで大きな温度勾配のもとで、短時間で硬化した雪でもたて構造が発達しているかどうかを調べた。

一つの雪粒子断面に外接する、水平と垂直な辺をもつ長方形の辺の長さは Feret 径と定義されている (第 6 図)。水平な辺の長さを  $F_H$ , 垂直な辺の長さを  $F_V$  とすると、 $F_V > F_H$  であれば、この粒子はたて方向に長いことになる。粒子が円であれば  $F_V = F_H$  となる。又同じ大きさの上下に並んだ 2 つの粒子が結合して 1 個になると、たて方向に長くなり、 $F_H$  は変わらないが  $F_V$  は



第 5 図 面積基準積算

横軸: 雪粒子の断面積  $\text{mm}^2$ , 縦軸: 面積基準積算 (ある大きさ以下の粒子が占める面積の全粒子面積に対する割合), A, B は第 1 図の実験試料



第6図 Feret 径による粒子構造の比較

垂直 Feret 径 ( $F_V$ ), 水平 Feret 径 ( $F_H$ ) から  $\gamma = (F_V - F_H) / (F_V + F_H)$  とおくと,  $\gamma > 0$  でたて長,  $\gamma < 0$  で横長となる, A, B は第 1 図の実験試料

大きくなる。粒子がたて方向に長い横方向に長いかを比較するため,  $\gamma = (F_V - F_H) / (F_V + F_H)$  を定義した。たて方向に長ければ  $\gamma > 0$ , 横方向に長ければ  $\gamma < 0$  となる。即ちたての長さが横の長さの 2 倍であれば  $\gamma = 1/3$ , たての長さが横の半分であれば  $\gamma = -1/3$  である。

第 6 図には試料 A, B の  $\gamma$  の面積基準積算を示した。面積基準積算値の 50% が  $\gamma = 0$  と交っていると, たてに長い粒子の総面積と横に長い粒子の総面積が等しいことになる。又 50% の位置が  $\gamma$  のプラスの範囲にあると, たてに長い粒子の面積の方が大きいことになる。図から試料 B に比べ, A はたて方向に長い粒子面積が大きいことがわかる。即ち温度勾配を上下方向に加えた結果, 横に隣合った粒子と結合するより, 温度勾配に沿った上下に隣り合った粒子がより多く結合したためと考えられる。

## ま と め

雪をほぐして一旦粒子のつながりを断った雪の人工試料に急に大きな温度変化を与えると, 試料の表面付近に大きな温度勾配が生ずる。その結果, 1 時間程度の時間で雪粒子の間に小さな霜の結晶が成長し, 粒子同士を結合して急激な硬度増加が起きた。この硬度増加は, 高い温度での等温変態のみによる硬度増加より数十倍も大きかった。試料の中で起った粒子の結合状態を薄片写真で確認し, 大きな温度勾配によって成長した霜の結晶が粒子を結合していることがわかった。

断面写真から雪の粒子構造を調べると, 急速硬化した雪では, 小さな粒子の割合が減り, 大きな粒子が増えた。又粒子の形は, たて方向, 即ち温度勾配の方向に長くなっていた。実験

に用いた試料は一旦粒子の結合を断ったものであり硬度増加は粒子の再結合によって起る。即ち温度勾配を与えた結果、再結合により粒子の総数が減り、温度勾配の方向に結合した粒子が卓越する結果が得られた。

和泉の実験によると<sup>6)</sup>、密度の大きな雪 ( $0.4 \text{ g/cm}^3$ ) に上下方向の温度勾配を与えると、上下方向の雪の熱伝導率が、同じ密度の焼結のみで作った雪よりも大きくなっている。熱伝導率は、粒子の結合状態を示すと考えられるから、上下方向のつながりが焼結のみのときより、温度勾配を与えた方が著しかったことになる。

断面写真の解析から、急速硬化した雪では、一定温度に保存した雪より上下方向に長い粒子の面積割合が多くなっていた。上下方向の粒子が結合したため、和泉の熱伝導率の増加と同じ傾向を示している。

この研究に際し、低温科学研究所雪害科学部門、清水弘教授、成田英器助手からは有益な助言をいただいた。又フタル酸を用いた断面の顕微鏡用試料の作製と撮影に関し、カナダ水門研究所、R. Perla 博士の指導をうけた。これらの方々に感謝の意を表します。なお、この研究費用は文部省雪崩特別事業費から支出された。

## 文 献

- 1) Akitaya, E. 1974 Studies on depth hoar, Contr. Inst. Low Temp. Sci. A, **26**, 1-67.
- 2) 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, **30**, 129-143.
- 3) 秋田谷英次 1985 温度勾配による積雪の急速硬化. 低温科学, 物理篇, **44**, 27-35.
- 4) 成田英器 1969 積雪の比表面積の測定. 低温科学, 物理篇, **27**, 77-86.
- 5) R. Perla 1985 Snow in strong or weak temperature gradients. Part II: section-plane analysis. *Cold Regions Science and Technology*, **11**, 181-186.
- 6) 和泉 薫・藤岡敏夫 1975 積雪の変態と熱伝導率の研究 I. 低温科学, 物理篇, **33**, 91-102.

## Summary

The author reported in the previous paper on quick hardening of snow under a strong temperature gradient and on a regression equation obtained to calculate an increase in hardness as a function of snow temperature, density and temperature gradient. The mechanism of quick hardening was supposed from an experiment using ice hemisphere that small hoar crystals developed under a strong temperature gradient, connecting snow grains each other.

Examined in this paper are the snow structures of quickly hardened snow, using snow samples. For this purpose two snow samples, A and B, were prepared by sieving natural snow and redepositing them. Sample A was cooled rapidly from the surface down, but for sample B the initial temperature of  $-1.5^\circ\text{C}$  was kept through the experiment. Kinoshita's hardness of samples A and B and snow temperature of A were shown in Fig. 1. The hardness of sample A ( $R_A$ ), cooled from the surface down and exposed to a strong temperature gradient, increased several ten times, but that of sample B ( $R_B$ ), kept at a uniform temperature, increased only several times.

Figure 2 shows vertical thin sections of sample A. Arrows show the connection of snow grains with small hoar crystals and the mark \* shows the growth of many small crystals from

a cool grain to a warm grain.

A strong temperature gradient appeared near the surface in the process of quick cooling from the surface down as in sample A, but it will appear in the process of quick warming of a cold sample. Figure 3 shows changes in hardness and temperature with time during the warming process of a cold and redeposited sample. We can conclude from these experiments that quick hardening occurs in snow when it is exposed to a strong temperature gradient regardless of its direction.

Snow structures of quickly hardened snow (A) and not quickly hardened snow (B) were compared by section planes of them with a digital-image equipment. One example of digitized images of the section plane of sample A is shown in Fig. 4. The white portions represent snow grains and the black background represents pore space.

The numbers of grains appeared in the area of  $81 \text{ mm}^2$  of both section planes were 179 in A and 261 in B, respectively. Cumulative percentages of grains by area of A and B are shown in Fig. 5. In quickly hardened snow A, the number of grains decreased and the ratio of the area of large grains to the total area of grains increased, resulting from the connection with small crystals as shown in Fig. 2.

The Feret diameter as shown in Fig. 6 was measured by the equipment. If we assume  $\gamma = (F_v - F_h) / (F_v + F_h)$ , then  $\gamma$  is positive when the grain is longer vertically than horizontally. Figure 6 shows the cumulative percentages of grains by area against  $\gamma$ . It shows that in quickly hardened snow A, the ratio of the area of longer grains to the total area of grains in the vertical direction is larger than in sample B. It is considered that the connections of grains with hoar crystals under a strong temperature gradient are predominant to the direction of temperature gradients (vertically) than perpendicular to them (horizontally).