



Title	温度勾配による積雪の急速硬化
Author(s)	秋田谷, 英次; AKITAYA, Eizi
Citation	低温科学. 物理篇, 44, 27-35
Issue Date	1986-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18516
Type	departmental bulletin paper
File Information	44_p27-35.pdf



温度勾配による積雪の急速硬化*

秋田谷英次

(北海道大学低温科学研究所)

(昭和60年10月受理)

I. ま え が き

山岳地域では、しばしば風成雪 (wind packed snow) と呼ばれる比較的高密度で硬い雪が形成される。また、スキーや雪上車の通ったあとの圧密された雪も時間が経つと硬度は大きくなる。

アメリカのロッキー山脈では、暴風雪のあと、表面の風成雪が1, 2日程度で急速に硬化している例が報告されている¹⁾。現地では、このような積雪を initial hard slab と呼んでいるが、その生成条件は詳しくは知られていない。initial hard slab が雪崩になると、そのデブリはブロック状となる (hard slab avalanche)。一方、やわらかい雪が雪崩となると粉々に砕けた粉状のデブリとなる (soft slab avalanche)。この2つの雪崩では、人工雪崩をおこなう手法が異なり、また雪崩の規模や、破壊力が違う。したがって、雪崩発生域で initial hard slab の有無を予知することは、雪崩対策を立てる上で必要となる。

筆者のこれまでの研究²⁾ から、密度の大きな雪が大きな温度勾配を受けると、同じ密度のしまり雪よりも丈夫なしもざらめ雪 (硬しもざらめ雪) に変わることが知られている。一方、北海道の大雪山で硬化雪と呼ばれる非常に硬い雪がしばしば見られ、硬しもざらめ雪も硬化雪の一種であることが報告されている³⁾。

この報告は、野外で自然積雪を圧密して密度の大きな雪を作り、これに温度勾配を与えたときの硬度増加を調べたものである。また、実際に観測された initial hard slab の形成時の気象条件を硬度増加の野外実験と対比し、急速硬化の機構をさぐった。さらに顕微鏡の下で、氷球の集合に温度勾配を与え、氷球の集合がどのように結合し、発達していくかを観察したものである。

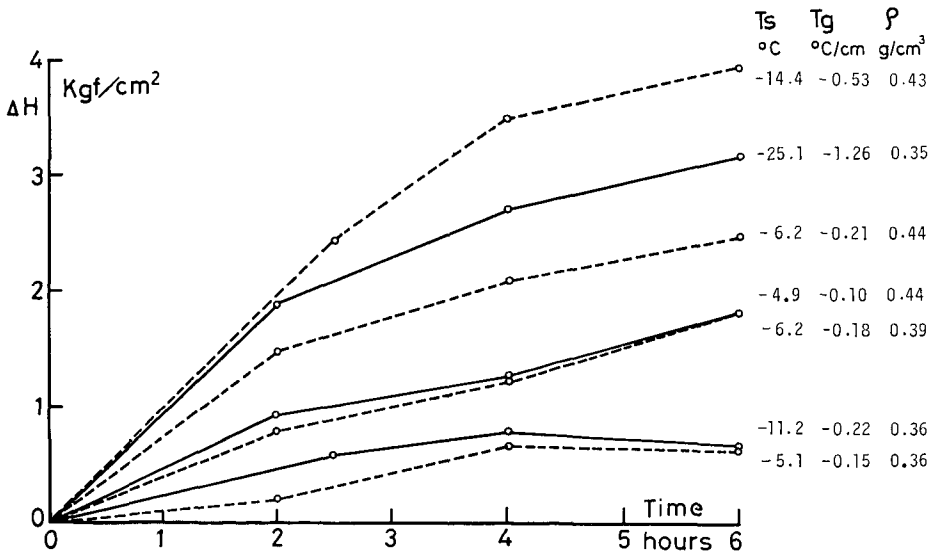
II. 野 外 実 験

野外実験はコロラド州のロッキー山脈中にあるフレーザー森林観測所 (デンバーの北西約80 km, 標高2,700 m) 内の平地でおこなった。観測地点は盆地の中央付近にあり、周囲は樹木で覆われている。そのため風が弱く、夜間の放射冷却も著しい。ここでの2月下旬の積雪は深さが約80 cm, 平均密度0.25 g/cm³の発達したもろいしもざらめ雪から成っていた。これまでの実験で密度の小さな雪 (約0.30 g/cm³以下) に温度勾配が加わると、脆いしもざらめ雪にな

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2775号

り、雪の硬化は起っていない。そこで表面の積雪（しんせつ又はこしもざらめ雪）をシャベルで均等に押しつけて密度の大きな雪を作った。晴れた日には、夕方から夜にかけて、放射冷却により表面が冷され、大きな温度勾配が生ずる。異なった大きさの温度勾配をつくるため、試験地の一部を厚さの異なった断熱材で覆いをした。実験は夕方から開始し、2時間毎に6時間後まで、表面硬度と表面と3cm下方の温度測定をおこなった。硬度測定には小型の木下式硬度計（底面の直径1cm）を用い、1回の観測には、4回の測定をおこない、その平均を硬度とした。温度計には、感温部の直径が2mmの金属針に封入されたサーミスター温度計を用いた。6時間後の測定終了後、表面から深さ3cmまでの雪の密度を測った。

第1図に測定開始時に対する硬度の増加 (ΔH) とその時間変化の一例を示した。図の右側の数列は6時間の平均表面温度 T_s 、温度勾配 T_g および終了後の表面近くの密度 ρ を表わしている。最初の2時間の硬度増加に比べ、後半の増加は小さいものが多い。また、図と右の数列から、硬度増加は、雪温、温度勾配、密度に関係のあることが推察される。第2図は硬度増加と密度、温度勾配の関係を示したもので、密度が同じなら温度勾配の大きな方が、温度勾配が同じなら密度の大きい方が硬度の増加は大きい。

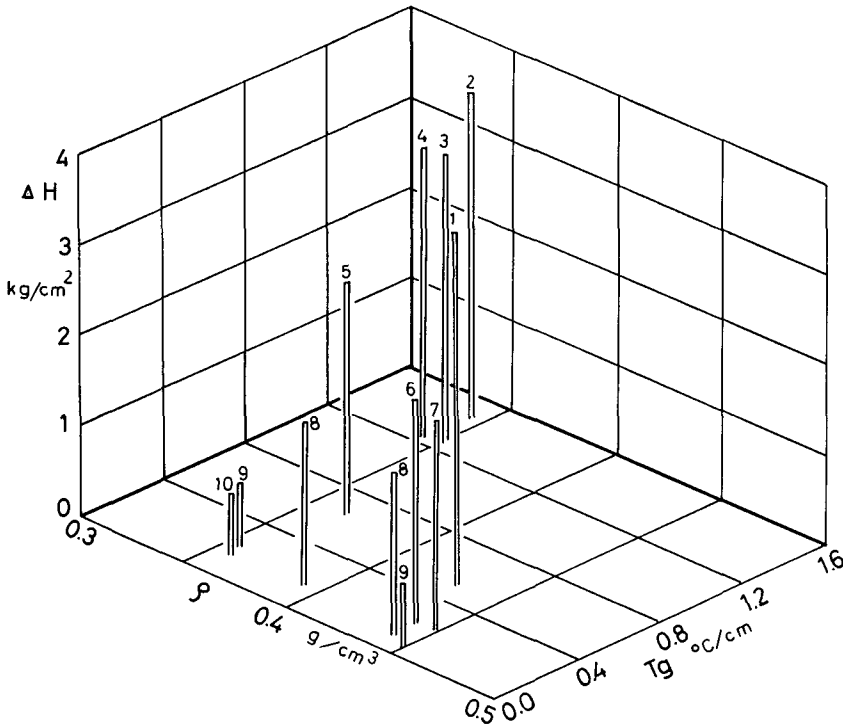


第1図 硬度の時間的变化

ΔH : 測定開始時に対する硬度の増加分, T_s : 表面温度, T_g : 温度勾配, ρ : 密度

人工的に圧密された雪の硬度増加は、第2図で示したように、密度と温度勾配に関係しているが、その他に雪の温度が高い程、硬度は増加すると考えられる。第1の理由は、人工的に圧密したことにより、新たな雪粒同士の接触が生じ、この接触部は、焼結により時間と共に接触部の結合状態は強くなる。この焼結作用は温度が高い程早く進行する。第2の理由は温度勾配が大きい程硬度は増すが（第2図）、温度勾配の大きさが同じでも、温度が高い程、飽和水蒸気圧の差が大きく、雪の中での水蒸気の移動量が大きく、雪の変態が進むからである。

上に述べた理由により、ある時間内の硬度増加は次式で表わすことができる。



第2図 硬度増加と密度，温度勾配の関係
棒グラフの上の数字は ΔH の大きさの順位

$$\Delta H \propto |T_s|^\alpha \cdot |T_g|^\beta \cdot \rho^r$$

または

$$\log \Delta H = \alpha \log |T_s| + \beta \log |T_g| + r \log \rho + K$$

ここに ΔH : 硬度増加 (kgf/cm²), T_s : 平均表面雪温 (°C), T_g : 温度勾配 (°C/cm), ρ : 密度 (g/cm³), K : 定数。

第1表には12回の実験の硬度増加と平均雪温，温度勾配および密度を示した。これらの値を用いて多変量解析をおこない，次の実験式を得た。

$$\Delta H = 4337 |T_s|^{-0.935} \cdot |T_g|^{1.360} \cdot \rho^{4.278}$$

$$r = 0.961 \text{ (重相関係数)}$$

ここに ΔH (kgf/cm²) は6時間後の硬度増加である。 $\log \Delta H$ に対する $\log T_s$, $\log T_g$, $\log \rho$ の偏相関係数をみると，それぞれ0.710, 0.916 および0.890 で温度勾配の影響が最も大きく，次いで，密度，温度の順になっている。なお対馬によると，雪の木下硬度は同じ雪でも温度が低くなると大きくなり，温度に対する硬度変化を求める実験式が得られている⁴⁾。この実験で得られた硬度は，対馬の式にしたがい，温度低下による硬度増加を考慮に入れてもなおそれ以上に硬度は増加している。

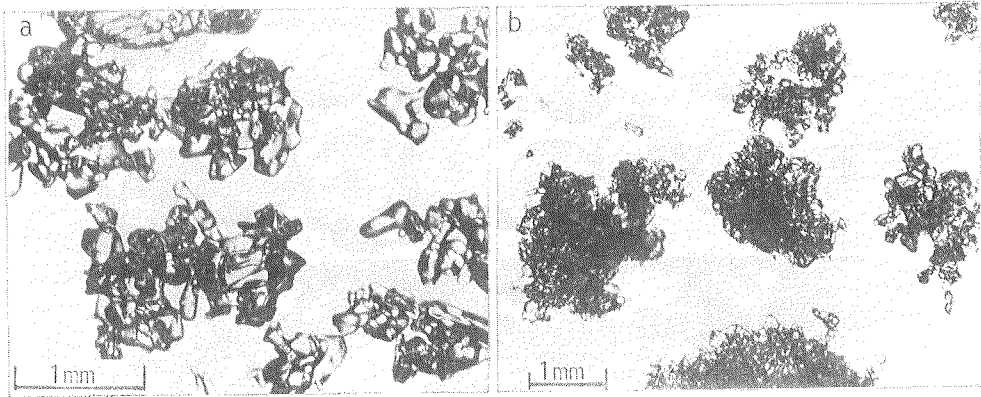
第1表 多変量解析に用いた測定値

date	ΔH	T_s	T_g	ρ
12 Dec.	2.34	-8.0	-0.23	0.45
	0.70	-6.7	-0.08	0.45
29 Jan.	0.70	-11.2	-0.22	0.36
	2.62	-14.9	-0.65	0.37
	3.96	-14.4	-0.53	0.43
6 Feb.	3.17	-24.8	-1.23	0.34
	3.19	-25.1	-1.26	0.35
	3.62	-25.0	-1.47	0.34
27 Feb.	2.49	-6.2	-0.21	0.44
	1.83	-4.9	-0.10	0.44
	0.68	-5.1	-0.15	0.36
	1.83	-6.2	-0.18	0.39

III. ロッキー山中で見られた硬化雪

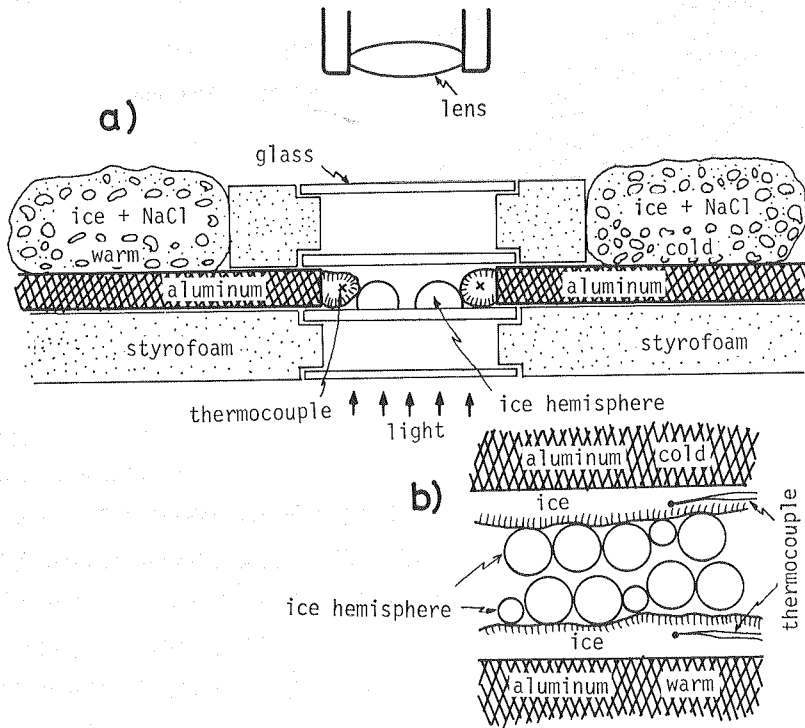
野外実験をおこなった場所から 15 km 南東にあるバーソード峠 (標高 3,500 m) に気象と雪崩の観測基地がある (USDA Forest Service に所属)。1985 年 1 月 7 日午前, この基地の実験斜面の表層に厚さ 15~20 cm の硬化雪が観測された。当時の気象データによると, 1 月 2 日から新たな降雪はなく, 1 月 5 日夕方から翌 6 日正午まで強風が吹き地吹雪が発生していた。6 時間平均風速の最大は 6 日 6~12 時の間で約 10 m/s (北) であった。その後風速は急に弱くなり, 6 日 18~24 時は 1 m/s 以下であった。風速が弱まるにつれ気温は低下した。6 日の最高気温は正午で -3.3°C , 最低気温は 19 時に -14°C であった。9 日の地吹雪は 1 月 1 日に積った雪によるもので, 気温の高い状態で発生している。この地吹雪で飛ばされた雪は風下の南東斜面に堆積し, およそ半日後には硬化雪となっていた。降雪をとまなわない地吹雪のため吹溜りの雪は密度が大きく, その後の急な気温低下で積雪表面近くには大きな温度勾配が発生したものと考えられる。なお 6 日は快晴であったため, 放射冷却の効果も加わり, 大きな温度勾配の原因となったものと思われる。7 日正午頃の観測によると, この硬化雪は密度 0.38 g/cm^3 , 硬度 3.3 kgf/cm^2 で歩いてみてもわずかに足跡がつく程度の硬さであった。第 3 図 a はこの硬化雪の雪粒の顕微鏡写真である。

1 月 23 日フレーザー森林観測所は快晴無風で, 最高気温は -4.5°C (14 時頃) であった。日没後気温は下り, 翌 24 日 6 時には -25°C まで気温が下った。23 日夕方に歩いてできた, 踏み固められた雪が翌朝には非常に固くなっていた。密度 0.42 g/cm^3 , 硬度 13.5 kgf/cm^2 で, その雪粒の顕微鏡写真を第 3 図 b に示した。第 3 図 a, b とも, 雪粒の表面はなめらかではなく, 小さな水の粒子が付着しているように見える。また, これらの写真は, 北海道で観察された硬しもざらめ雪から成る硬化雪と雪粒の形態は似ていて, initial hard slab と北海道の硬化雪と



第3図 積雪の急速硬化

a. 吹雪のあとにできた硬化雪, b. 踏みあとの硬化雪



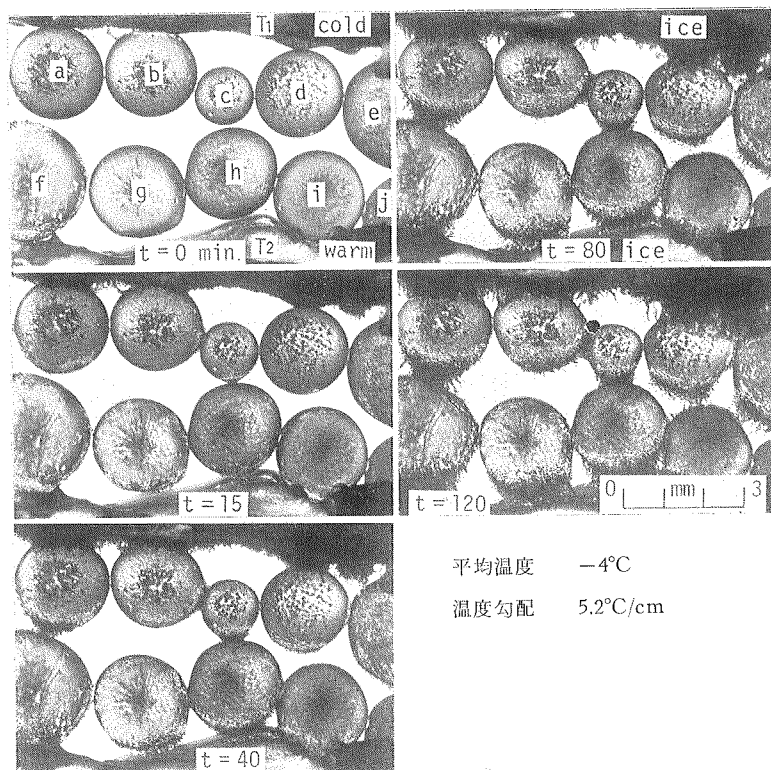
第4図 実験装置の概略図

a. 鉛直断面, b. 水平断面

は同一のものと考えられる。

IV. 氷球による硬化現象の顕微鏡観察

IIで述べたように、温度勾配の下での硬度増加は、雪の温度、密度、温度勾配の関数として求めることができた。この急速硬化現象の機構を調べるために、次のような、氷の半球を用



第5図 氷球結合部の発達状況
 T_1, T_2 : 熱電対, t : 経過時間(分)

いた実験で観察をおこなった。実験の概要を第4図に示した。

直径1~2 mmの氷の半球を水平に並び、上下からそれぞれ2重のガラス板ではさむ。氷球の左右には、それぞれ熱電対を氷で凍着させたアルミニウム板(厚さ1.6 mm)を接触させておく。左右のアルミニウム板の上には、食塩と小さな氷塊の混合物を入れたプラスチックの袋をのせ、アルミニウム板の温度を任意の一定温度に保つ。食塩と氷の混合割合を変えることにより、両アルミニウム板の間にある氷球列に、任意の温度勾配を与えることができる。氷の半球は、プラスチックフィルムの上に小さな水滴を落下し、凍らせて作った。氷球の入った装置を顕微鏡の下に固定し、氷球に温度勾配を与えながら、適当な時間間隔で写真撮影をし、氷球の結合と、発達を観察した。

第5図は温度勾配を与える直前($t=0$)と、その後、120分までの氷球の結合の様子を示した。写真で、上側にある氷は、低温側のアルミニウム板に熱電対と共に凍着している氷、下側は高温側の氷である。したがって、氷球a~e列、およびf~j列は、それぞれほぼ一様な温度と考えられる。また、写真で上下に向い合っている氷球(a-f, c-h, e-j等、実際には水平に向い合っている)の間には温度差がある。すなわち、写真の横方向には温度勾配はなく、上下方向にのみ温度勾配がある。温度勾配の方向に並び、その間隔が一番狭い氷球c-hでは、実験開始15分後($t=15$)に結合し、次いで間隔の広いa-fでは40分後に結合した。また40分

後には、氷球 d の高温側の表面に、小さな結晶が成長しはじめているのがみえる。120 分後には、d-i, e-i, も細長い結晶で連結された。一番間隔の広い b-g では、120 分後に氷球 b の表面に細長い結晶が成長したがまだ g と接触するまでにはいたっていない。一方等温方向に並んでいる氷球 (a-b, c-d, g-h 等) は、大部分は最初から接触していたが、その後の接触部の面積増加は小さい。2 つの氷球に温度差があると、しもざらめ雪の成因と同様に、高温側の氷から蒸発がおこり、低温側の氷球に昇華凝結して霜の結晶をつくる。やがて 2 つの氷球は霜の結晶で結合され、時間と共に結合部は太くなる。水の熱伝導率は、空気のおよそ 100 倍もあるので、温度差の大部分は水の中ではなく、空気中で生じている。それ故、氷球の間隔が狭い程、空隙部分での水蒸気圧の勾配が大きく、霜の成長は早くなる。等温方向 (水平方向) に接触して並んでいる氷球は、焼結により徐々に結合面積を増しているが、その成長速度は、霜の結晶による上下方向の結合部の成長速度より遅い。II, III で述べた野外での急速硬化現象は、次のように解釈される。圧密された高密度の雪では、粒子間の間隔が狭くなり、大きな温度勾配の下では、上下に隣り合った雪粒は、霜の結晶で短時間で強固につながり、急速に硬化した。

V. ま と め

高い密度と温度、大きな温度勾配の下では、積雪は急速に硬化することを野外実験で確かめ、硬度増加を求める実験式を得た。また、氷球を使った実験で、大きな温度勾配の下では、急速に氷球同士が霜の結晶で強固に結合された。R. Perla も同様な実験結果を示している。積雪に $15^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 程度の大きな温度勾配を 100 時間作用させると、雪は最初の状態より硬くなり、密度が大きい方がその傾向は著しい⁵⁾。薄片観察によると、粒状から繊維状構造 (細長い氷が温度勾配の方向に並んだもの) に変化している。

これまで述べた積雪の急速硬化は、温度勾配が作用しつづけても、ある時間継続すると次第に飽和に達し、硬度には上限があると考えられる。第 1 図に示したように、硬度増加の割合は、時間と共に小さくなっているからである。また、和泉・藤岡の実験からも、このことは推察される⁶⁾。彼等は低温室で積雪ブロックに大きな温度勾配を与えて、その熱伝導率の変化を測定した。密度 $0.49\text{ g}/\text{cm}^3$ の雪に、平均雪温 -5.5°C で $-0.94^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の温度勾配をかけながら、定常法によって熱伝導率を測定した。5 日間の実験期間中、最初の 2 日間で熱伝導率は 1.5 倍に増したが、残りの 3 日間は増加せず、その値を維持した。実験終了後の硬度は、最初の 8 倍に増加していた。熱伝導率の増加は積雪を構成している氷のつながりが、より緊密になったことを意味している。したがって硬度も最初の 2 日間で増加し、その後の増加は小さかったものと考えられる。実験後の薄片写真によると、小さな結晶が大きな骸晶状の結晶の間を埋めて、結晶同士をしっかりと結合させていた。また、ほぼ同じ期間、温度勾配をかけずに、焼結のみによる熱伝導率と硬度の増加を調べているが、それぞれ 1.2 倍と 1.5 倍で、温度勾配を与えたときよりも小さな値であった。

これまで述べたことから、コロラドロッキーで initial hard slab と呼ばれている硬化雪は、次のような気象条件の下で形成されたものと考えられる。比較的高温のもとで、降雪をともしなわれない地吹雪が発生し、風下斜面に高密度の吹溜りが形成される。地吹雪が止んだあと、

気温の急激な低下が現われ、積雪表面近くに大きな温度勾配が生じる。このとき放射冷却が発生すると、温度勾配はさらに大きくなる。積雪の表面近くでは、水蒸気の昇華蒸発、凝結により、小さな霜の結晶が発生し、雪粒同士を緊密に連結し、硬度は増加する。

この研究は、筆者が文部省在外研究員として、アメリカ合衆国コロラド州フォートコリンズに滞在中になされたものである。観測はアメリカ林野局、ロッキー山岳、森林研究所の協力のもとで行われた。同研究所 M. Loveles 所長、F. Wicher 副所長には、研究所および附属施設、備品の使用に関し、特別の御配慮をいただいた。また、A. Somerfeld 博士には、観測、実験準備に数々の援助と多くの助言をいただいた。ここに記して、これらの方々に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) M. Martinelli, Jr. 1971 Physical properties of Alpine snow as related to weather and avalanche conditions. USDA Forest service, Research Paper RM-64, 1-35.
- 2) Akitaya, E. 1974 Studies on depth hoar, Contr. Inst. Low Temp. Sci. A, **26**, 1-67.
- 3) 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.
- 4) 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, **30**, 47-52.
- 5) R. Perla and C. S. L. Ommanney 1985 Snow in strong or weak temperature gradients. Part I, *Cold Region Science and Technology*, **11**, 23-35.
- 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

Some kinds of snow, such as wind-packed snow, harden quickly below the freezing temperature. In the Rocky Mountains Region of the United States what Martinelli (1971) calls "initial hard slab" is a wind-packed snow with a high density hardened in just a few days after a strong wind storm. Another hard snow, called "hard depth hoar" in Japan, is a high-density snow which metamorphosed under a strong temperature gradient (Aburakawa 1972, Akitaya 1974); they showed that the texture of this hard depth hoar consisted of large crystals which were cemented by many fine crystals developed by the strong temperature gradient.

To make hard snow field experiments were conducted at Fraser Experimental Forest, Colorado, U. S. A. The snow around the surface layer of low-density snow was compacted with a shovel uniformly to make a high-density snow. Experiments started after the sunset, when the temperature of the surface fell rapidly and a strong temperature gradient appeared near the surface. Snow samples were subjected then to the measurements of Kinosita's hardness on the surface, along with the temperature of the surface, and at the depth of 3 cm. An increase in hardness with time is plotted in Fig. 1. The columns on the right-hand side of the figure show the mean snow surface temperature, mean temperature gradient for six hours and snow density. The slope of ΔH , the hardness increase, is larger at the beginning of the experiment than later. Figure 2 shows that the hardness increase depends on the density and temperature gradient.

The hardness increase is also a function of temperature because connections between

snow grains progress by rapid sintering at high temperatures. Then we can assume the following equation :

$$\log \Delta H = \alpha \log |T_s| + \beta \log |T_g| + \gamma \log \rho + K,$$

where ΔH : hardness increase after six hours, T_s : mean snow temperature, T_g : temperature gradient, ρ : snow density, and K : constant. The following equation was obtained by multiple regression analysis.

$$\Delta H = 4337 |T_s|^{-0.935} \cdot |T_g|^{1.360} \cdot \rho^{4.278}, \quad r = 0.961.$$

Figure 3 shows particles of quick-hardened snow :

- a. wind-packed hard slab at the snow surface formed by a strong wind storm after one day at Berthoud pass, Colorado ;
- b. snow packed by treading down which became very hard after one night under a strong temperature gradient. Snow particles shown in the pictures do not have smooth rounded surfaces but are irregular with many small ice grains. These small grains look like ice crystals formed by sublimation and deposition under strong temperature gradients similar to those which make hard depth hoar (Akitaya 1974).

Experiments using ice hemispheres to observe the quick hardening process under strong temperature gradients were conducted in a cold room as shown in the schematic diagram of Fig. 4. Figure 5 shows the time-lapse pictures of the experiments. The temperature gradient between the particles arranged vertically (a-f and b-g, etc.) is larger than the particles arranged horizontally (a-b and g-h, etc.). Particles c and h, which have the smallest air gap, are connected first with fine crystals ($t=15$) followed by a and f ($t=40$).

Particles b and g, which have the largest air gap, are not connected after 120 minutes. Water vapor is transported from the warmer (lower) particles to the colder (upper) particles by sublimation and deposition under a strong temperature gradient. Many fine, needle-like crystals of ice developed from the warmer side of the cold particles and they connected the particles arranged in the direction of the temperature gradient. On the contrary, bonding between the particles in contact from the beginning, which were arranged horizontally (a-b and g-h, etc.) and almost at the same temperature, grows slowly by the sintering process.

It can be concluded from the experiments in the field and the cold room that the initial hard slab mentioned by Martinelli is the same snow that is called hard depth hoar in Japan. The initial hard slab will appear in a few days under the following conditions: a high-density snow is deposited by a strong wind storm at relatively high air temperatures followed by rapidly falling air temperatures after the storm. Also, radiation cooling is efficient in causing a strong temperature gradient near the snow surface. Then quick hardening will occur near the surface of the high-density snow under a strong temperature gradient.