



Title	大雪山における硬化雪の研究
Author(s)	山田, 知充; YAMADA, Tomomi; 対馬, 勝年 他
Citation	低温科学. 物理篇, 28, 155-164
Issue Date	1971-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18148
Type	departmental bulletin paper
File Information	28_p155-164.pdf



大雪山における硬化雪の研究*

山田知充・対馬勝年

油川英明・中尾正義

(低温科学研究所)

佐藤尚之

(北海道大学大学院 理学研究科)

(昭和45年8月受理)

I. 緒 言

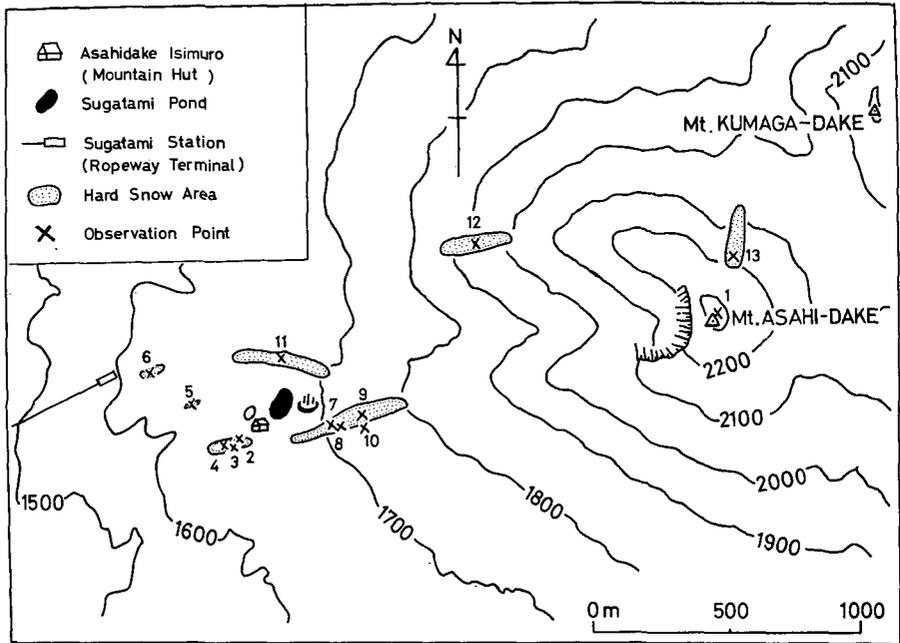
一般に山岳地帯には平地とは違った特異な雪の堆積状態が見られる。例えば、巨大な雪庇、発達したサスツルギーのような表面模様、アイスバーンや風成雪と呼ばれる非常に堅い雪である。山岳地帯では地形や気象条件が平地と異なって複雑であるため、このような平地とは様相を異にした堆積状態が見られるのである。このような山岳特有の雪の堆積状態は甚だ興味ある現象であるにもかかわらず、これまでわが国の雪氷学者の注意をあまりひいてこなかった。従って、その実態や形成機構等についてはまだ不明な点が多い。我々が今回調査したのは北海道大雪山におけるアイスバーンや風成雪と呼ばれる堅い雪についてである。この堅い雪は平地の積雪が自重による粘性圧縮によって自然に圧密されてゆく過程では到底考えられないほどの大きな密度と硬度（しばしばスキーのストックがささらない程である）を示す。この意味でわれわれはこれを硬化雪と呼ぶ。黒岩他^{1),2)}は大雪山の積雪調査で便宜的にアイスバーンを硬化雪と呼び、風成雪を堅雪と呼んで区別しているが、われわれは、山岳地帯にみられる積雪のなかで自重による圧密では到底期待できないほど大きな硬度をもつ自然の堅雪をすべて硬化雪と名づけ、このような硬化雪がどのような過程で形成されてゆくのかを調査した。

我々が調査した大雪山の硬化雪はこれまでに黒岩他^{1),2)}によって1968年2月と1969年3月とに調査され、その実態（密度、硬度、粒度、雪質、雪温、積層構造等）が一部明らかにされた。しかしその分布とか形成、発達の様子などの詳しい観測はまだ十分にはなされていなかった。我々の行なった今年（1970年）の2月と3月の2回の観測によって、これら未知の部分がある程度明らかになったので以下に報告する。

II. 観 測 結 果

観測地点は第1図に示す如く、大雪山の主峯旭岳周辺の1~13の各地点（×印）である。地点7と9では2月と3月の2回にわたって断面観測を行なった。また地点9は黒岩他のこれ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1100号



第1図 旭岳周辺の硬化雪の分布図。地点1~13 (×印) は観測地点
 Distribution of hard snow around Asahi-Dake.
 Numbers 1~13 indicate observation points

まで (1968, 1969) の観測地点とほぼ同じ場所に当る。2月の観測は山田, 中尾が, 3月は山田, 対馬, 油川, 佐藤, 中尾が行なった。

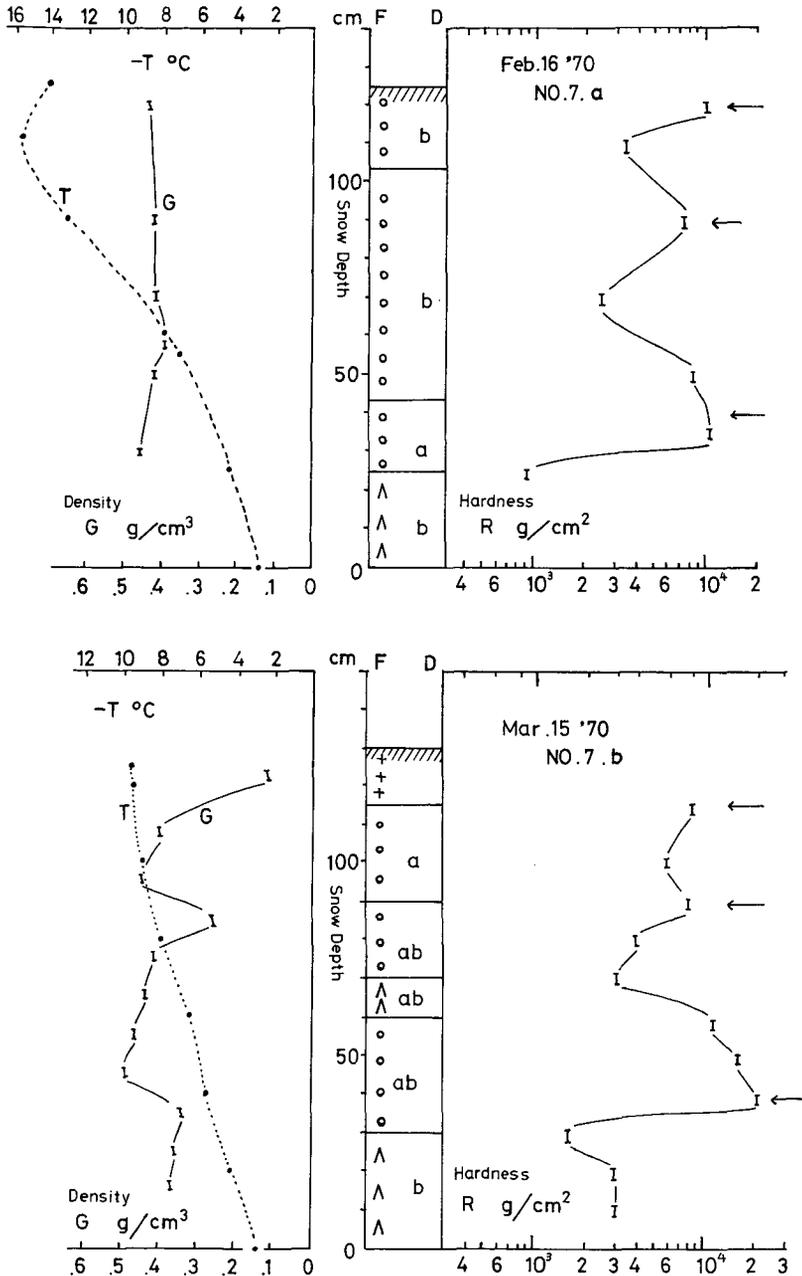
1. 硬化雪の分布

第1図は大雪山, 旭岳付近で我々が観測した硬化雪のあった場所と大体の面積を図示したものである。新雪で覆われた硬化雪は発見しがたい。従って, この分布図の場所にしか硬化雪がなかったというわけではない。黒岩他が硬化雪を観測した地点9を含めて, 観察された硬化雪は, 主として風の強い尾根の上か, または周囲に比べて風が強く吹き抜けるような場所に存在することがわかった。旭岳周辺の冬期の風向の観測資料はないが, 冬期は北西の風が卓越しているとみなされるから, これら硬化雪もすべて尾根の北から西の側にあり, 尾根の風上側に発達しているように思われる。こうした分布の状況は, これら硬化雪の形成に風が重要な役割を演じていることを暗示している。

2. 硬化雪の種類

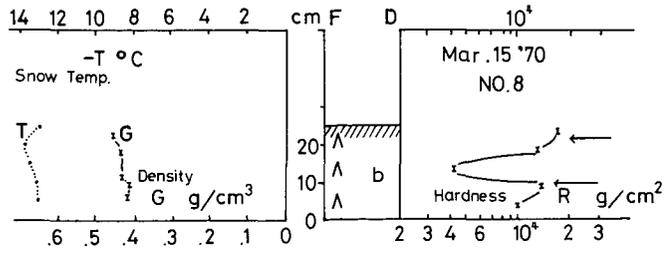
積雪表面が硬化しているからといって底まで全層堅いわけではなく, 表面からある深さまでの積雪が硬化している場合が多い。断面観測を行なった地点7, 8, 9 (第2, 3, 4図) では積雪内部にも異常に堅い硬化雪の層が何層も見られた。積雪表面にある堅い雪も内部にある堅雪も, 共に異常に堅いという意味では何ら差がないので硬化雪と呼ぶ。我々が普通目にするのは積雪表面に露出している硬化雪で第1表にその層厚, 硬度, 密度, 雪質を観測年月日と共に示した。積雪表面の硬化雪の層厚は6~30 cm, 木下式硬度 8.5~20 kg/cm², 密度 0.4 g/cm³ 以上

で、雪質には堅しもざらめ雪と堅しまり雪の2種類があった。断面観測を行なった地点7, 8, 9の積雪内部の硬化雪についても、積雪表面の硬化雪と何ら質的な差はなく、雪質も堅しまり雪(地点7)と堅しもざらめ雪(地点8, 9)の2種類であった。このことから硬化雪には細かい粒



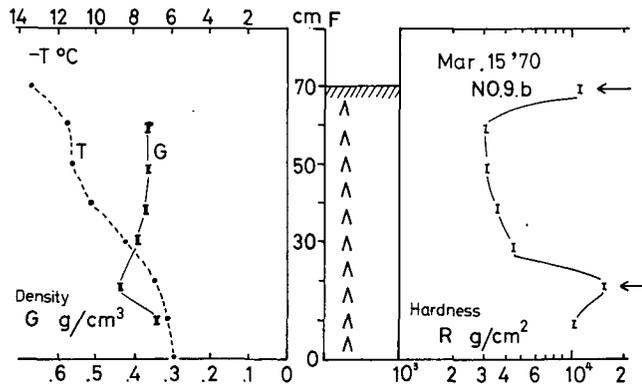
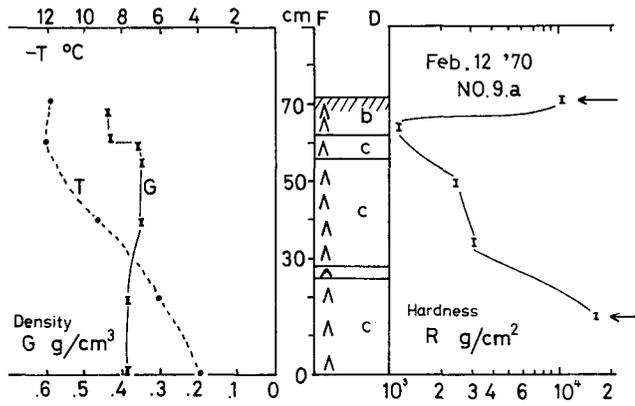
第2図 地点7における積雪(風成雪)の断面観測結果。←印の部分が硬化雪(第3, 4図についても同様)(aは1970年2月16日, bは3月15日)

Profiles of hardness, density and grain size of hard snow found at observation point 7. Arrows indicate hard snow layers



第3図 地点8における積雪(アイスバーン)の断面観測結果(1970年3月15日)

Profiles of density, hardness and temperature of icy hard snow found near observation point 8



第4図 地点9における積雪(風成雪)の断面観測結果(aは1970年2月12日, bは3月15日)

Profiles of density, hardness, and grain size of wind packed snow found near observation point 9

子が堅くしまつて出来た硬化雪と、しもざらめが堅く結合して出来た硬化雪との2種類があるようである。

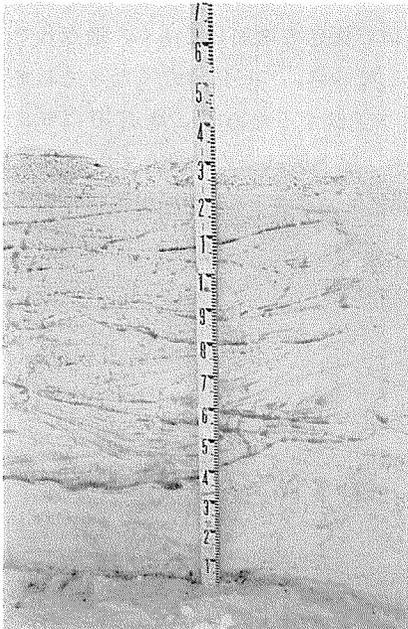
しまり雪の硬化した硬化雪は、地点7での積雪断面の乱れた層構造(第5図)からわかるよ

第1表 地点1~13 (第1図) における表面硬化雪の観測結果
Observed results of hard snow exposed at the surface
of snow near observation points 1~13 (Fig. 1)

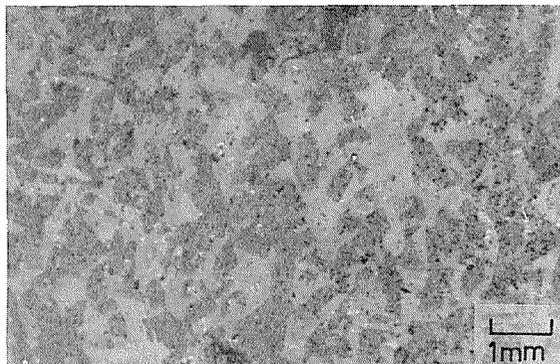
Observation point	date '70	thickness cm	hardness kg/cm ²	density g/cm ³	type of snow
1	Feb. 14	30	18	0.41	hard compact snow
2	Feb. 16	24	14	0.41	”
3	”	11	19	0.44	—
4	”	7	14	0.43	hard depth hoar
5	”	8	14	0.41	—
6	”	13	20	0.44	hard compact snow
7	”	8	10	0.43	”
	Mar. 15	7	8.5	0.40	”
8	”	8	15	0.47	hard depth hoar
9	Feb. 12	6	10	0.44	”
	Mar. 15	6	12	0.36	”
11	Mar. 22	—	15	0.46	—
12	”	—	12	0.44	—
13	”	—	10	0.47	—

うに、風成雪であった。また堅しもざらめ化した硬化雪は第6図の切断面顕微鏡写真⁶⁾に示すように粒度の大きい密なしもざらめからなりたっていた。この後者の硬化雪は通称アイスバーンとよばれているものである。地点8, 9でのアイスバーンの断面観測によると全層がこのよ

うなしもざらめであった。7, 8, 9の3地点で行なった断面観測の結果によると、堅しまり化した硬化雪(風成雪)の積雪深は堅しもざらめ化した硬化雪(アイスバーン)の積雪深より一般に深い。(第2, 3, 4図) 硬化雪の雪質と積雪深とは何らかの関係がありそうである。しかし比較的深い堅しまり化した硬化



第5図 地点7における積雪断面の層構造
Disturbed layer structure of snow deposited at the observation point 7



第6図 地点8における硬化雪切断面写真, 黒い部分が氷
Cross section of the hard snow sampled at the observation point 8

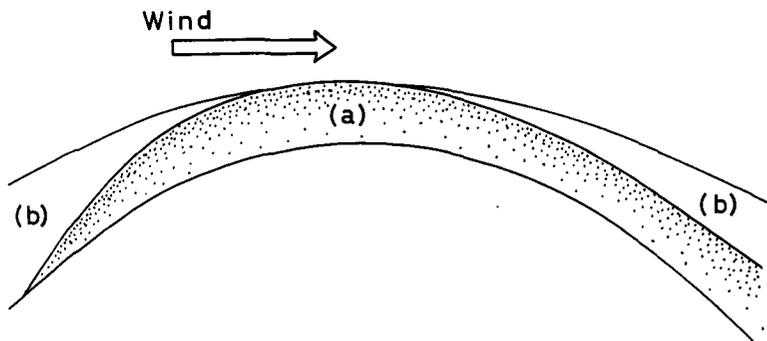
雪（風成雪，地点7）の積雪深（1.3 m）と言えども尾根筋以外の場所の積雪深（4~5 m）に較べると非常に浅いものであった。

3. 硬化雪の発達

地点7では2月16日，3月15日，地点9では2月12日，3月15日のそれぞれ2回断面観測を行なった。第2図及び第4図でaは2月，bは3月の結果を示す。2月と3月とでは正確に同一地点を断面観測したわけではないが（第2図のaとb及び第4図のaとbは互に数m離れている），積雪深や硬度の垂直分布は殆んど同じであった。このことは2月から3月の約1カ月の間に，新たな積雪の堆積がなかったことを意味する。また硬化雪の表面にはサスツルギー，リップルマーク，その他の模様は認められず，非常に平らで滑らかであった。一度，硬く平滑な雪面が形成されてしまうと，そこが尾根筋のような強風地帯である場合には，雪はその上に堆積しにくいであろう。たとえ風の弱いときに堆積したとしても，強い風が吹けば完全に吹きはらわれてしまうものと思われる。事実，我々はこの観測期間中に硬化雪の上に積もった雪が強風で吹きはらわれてしまうのをしばしば観察した。風のこのような作用によって地点7，9におい硬化雪は1カ月後の3月までその状態を殆んど変えずに保ったものと思われる。従って地点7，9の硬化雪はすでに2月以前に形成されていたもので，時間とともにだんだんと発達したものではない。

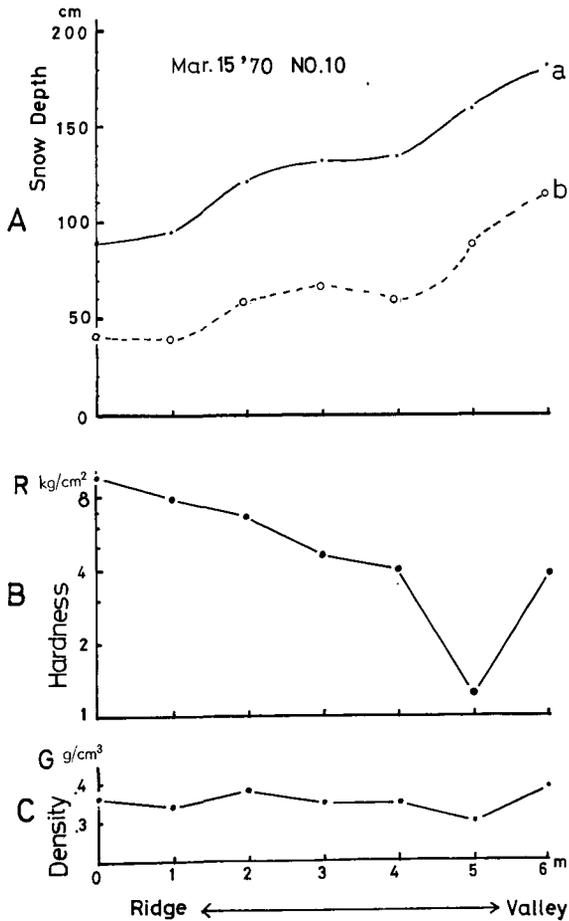
4. 硬化雪の広がり

地点8と10において硬化雪の広がりを調べるため軟雪面との境界部分で，尾根の最大斜面に直角にトレンチを掘り，硬化雪が軟雪面の下にもぐり込んでゆく様子を調べた。その結果を第7図に模式的に示す。積雪の表面層を形成している硬化雪は尾根の背から離れるにつれて軟雪面の下へ深くもぐってゆく。尾根の両側では積雪全体の深さも増加してゆく。地点8では硬化雪自体の厚さは軟雪面下へもぐるとだんだんと減少してゆき，ついにはなくなってしまった。ところが地点9に露出している硬化雪の横の広がりを追跡するために，地点10にトレンチを掘ったが，その厚さは谷側になると共に増していった。第8図はその埋没していた地点10での硬化雪の表面の硬度と密度及び全体の積雪深(a)と硬化雪の厚さ(b)とを尾根から谷側への



第7図 地点8, 10における硬化雪の模式図
(a) 硬化雪部分 (b) 軟雪部分

Cross-section of the hard snow deposited near observation points 8, 9. (a) hard snow (b) soft snow



第8図 地点10における埋没硬化雪の観測結果。この硬化雪は地点9の表面に続いている。尾根から谷への積雪深、硬度、密度の変化。

A; a. 全体の積雪深, b. 埋没硬化雪の厚さ
B; 同上の表層硬度, C; 同上の表層密度

Variation of snow depth, hardness and density of hard snow measured along slope at observation point 9

また硬化雪は積雪表面が硬化しているだけではなく、積雪内部にも一層から二層硬化雪が見出されることもあった。積雪内部に見出された硬化雪は積雪内部で2次的に硬化されたとは思えないから、積雪内部の硬化雪もかって表面に露出していたとき硬化雪になったと考えねばならない。そうすると、硬化雪が形成されるようなある自然の条件(気象条件等)が大雪山系旭岳周辺に降雪が開始されてから、我々が観測を開始した2月までの間に、2回から3回あったと考えることができる。

我々の観測した硬化雪の密度は 0.43 g/cm^3 程度(第1表, 第2, 3, 4図)で黒岩他の報告している硬化雪の平均密度 0.53 g/cm^3 よりもかなり小さい。そして硬化雪の密度は表面にときた

距離の関数として図示したものである。地面は左から右へ平均斜度 17° で傾斜していた。測定は1m間隔で行なった。その結果、硬化雪が軟雪面の下へ埋没する深さが深くなるほど、又は尾根の背から谷側へ下るほどその表層硬度は減少してゆく。そして雪質も少しずつ変化しているのが観測された。しかし表層密度にはあまり変化がなかった。これらの観測から硬化雪がその特徴であるストックがささらないぐらゐの硬度を保っているのは常に強風にさらされている尾根筋に露出した部分であるといえる。

III. 硬化雪の形成に関する考察

今回の我々の調査はすでに出来上っていた硬化雪を観察したもので、実際に硬化雪が形成されてゆく過程を観察したものではない。そのため硬化雪の形成機構に関しては、直接役にたつ情報は得られなかったが、しかし観測結果からある程度の推測は可能である。

地点7, 9の2月12日と3月15日の断面観測結果によると、この地点の硬化雪はすでに2月以前に形成されていたものと考えられる。硬化雪は主として尾根筋の強風地帯に見出された。

ま積もった新雪を除くと、底から表面までほとんど等しい。このような圧密のされかたを自重による粘性圧縮で説明することは、雪の厚さがたかだか1 m 程度なので圧力が小さいし、気温も山岳では平地に比べ一般に低いのでほとんど問題にならないであろう。また風成雪は一方では Wind packed snow といわれるように風圧で圧密されると考えられてきた。実際、Wind packed snow は尾根筋の風の強いところに発達しているのである。しかし風の機械的圧力だけで積雪が圧密されると考えるには、風圧はあまりにも小さすぎるようである。その次に考えられるのは、過冷却水滴や微小飛雪粒子の積雪内部への侵入による効果である。過冷却水滴は付着と同時に積雪粒子をのりづけするであろうし、粒子と粒子との空隙に侵入した微小な飛雪粒子は接触点を増し、やがて焼結によって硬度を増す原因となりうるであろう。この点を確かめるため我々は次のような実験を行なった。

過冷却水滴の代りにエオシンで着色した水を噴霧器で噴霧し、細かい霧粒をつくりこれを積雪表面に吹きつけ、色のついた霧粒が積雪内部のどの深さまで侵入するかを調べた。また飛雪粒子の代りには固体のままのエオシン粉末を積雪表面に散布し、これが風によって積雪内部にどこまで侵入しうるかを調べた。実験を行なった場所は地点8付近で、そのときの平均風速は5 m/s、気温 -16.5°C であった。今一つの実験は低温風洞で風速20 m/s、気温 -20°C の条件で行なった。しかし何れの場合も、エオシンの霧粒、エオシン粉末ともに積雪内部への侵入は認められず、たんに表面に付着したに過ぎなかった。従って積雪内部の空隙の奥深くまで過冷却水滴や飛雪微粒子があとから侵入してみかけ密度を増してゆくとは考えられない。しかし過冷却水滴が飛雪粒子と混在していて積雪表面に同時に着雪してゆく場合は話は別である。

この他に雨や融雪水が積雪内部へ浸透し凍結して硬度を増すことが考えられる。しかし我々が観測した真冬の大雪山ではそのような証拠は見当らなかった。もし日射融雪水が積雪の硬化に寄与するとすれば硬化雪はせまい尾根筋に限らず広範囲に生じうるはずである。地点7で観測された堅しまり化した硬化雪は、第5図に示すような風成雪であって薄片観測によっても融解がおこったような形跡はなかった。

従って、以上の推論が正しいとすると、硬化雪は密度の小さいフワフワの新雪が堆積したあとで機械的に圧密されて密度と硬度を増したのではない。堆積のはじめから 0.4 g/cm^3 程度の密度で堆積されたと考えるべきである。篠島他⁵⁾は激しい風にとまわれた堆積の場合には、このような高密度の積雪がつくられ得ることを報告している。しかし、気温が低くて粒子間の付着力が小さいとき、風がどのようにして積雪粒子を高密度に圧密してゆくかは、現在のところまだはっきりと解明されていない。また山岳地帯では急峻な岩壁に付着した雪がいわゆる氷壁に転化することが知られている。この場合の圧密硬化の機構も単に機械的なもの他に熱的作用が関与しているに違いないが、詳しい研究は殆んどなされていない。

最後に硬化雪の雪質について述べよう。我々の観測では硬化雪には2種類あって、積雪深が浅いと粒子の大きい堅しもざらめ(地点8, 9, 第3, 4, 6図) 深いと粒子の細かい堅しまり(地点7, 第2, 5図) になっていることを述べた。秋田谷⁴⁾は、密度が 0.4 g/cm^3 程度のしまり雪に大きな温度勾配 (0.9°C/cm 程度) をかけて変態させると、もとのしまり雪より何倍も硬度が大きい堅しもざらめ雪ができるということを実験的に示した。積雪深が浅いと、深い場合に比

べて積雪内部の温度勾配は大きくなる。そのため最初の堆積が粒子の細かいしまり雪であっても、積雪深が浅ければ強い温度勾配のため変態してしもざらめ化する。このとき硬度が増すためには少なくともみかけ密度が 0.4 g/cm^3 以上なければならぬであろう。もし密度がこれ以下だと空隙率が大きく、しもざらめゆきができて硬度はかえって弱くなってしまおうと考えられる。なお硬化雪の形成機構については、今後の研究に待たねばならない。

IV. ま と め

冬の山岳積雪の中には、平地積雪の自重による圧密過程では到底考えられないような大きな密度と硬度を持った、乾いた堅雪が存在する。これを硬化雪と呼ぶ。硬化雪の詳しい実態を調べ、その形成機構の手がかりをうるため、1970年2月12~16日と3月13~24日の2回、大雪山系旭岳周辺(第1図地点1~13)の硬化雪を調査した。地点7, 8, 9では断面観測を行ない(第2, 3, 4図)、地点8と10ではトレンチを掘削して、積雪表面に見られる硬化雪が軟雪面下にもぐり込んでゆく様子を調べた。ここで地点7と9は2月と3月の2回、断面観測を行なった(第2, 4図のaは2月、bは3月の結果)。その結果次のようなことが明らかとなった。

1. 大雪山系旭岳周辺の硬化雪は第1図のような分布で、いずれも尾根筋の風上側に位置していた。このことは硬化雪の形成に風が重要な役割を演じていることを暗示している。
2. 硬化雪の雪質には堅しまり雪と堅しもざらめ雪の2種類があった。堅しまり化した硬化雪は風成雪(第2, 5図)であった。堅しもざらめ化した硬化雪は一般にアイスバーンと言われる粒の大きなしもざらめ(第6図)からなっており、積雪は全層しもざらめであった。堅しまり化した硬化雪の積雪深(1.3m)は堅しもざらめ化した硬化雪(0.25~0.7m)よりも深い。それでも付近の積雪深(4~5m)に比べると非常に浅い。
3. 硬化雪は普通積雪表面に6~30cmの層厚で見い出されるが、積雪内部にも、1層から2層、ある厚さで存在していて(第2, 3, 4図)両者に質的な違いはない。
4. 地点7と9の断面観測の結果によると(第2, 4図, a, b)、2月と3月の積雪深や硬度の垂直変化の様子は全く変化していない。このことは2月から3月の約1カ月の間、2月に観測された積雪表面の硬化雪の上の新たな硬化雪の発達や、積雪の堆積がなかったことを意味している。従って地点7, 9の硬化雪はすでに2月以前に形成されていて、時間経過と共に連続的に発達してゆくようなものではなさそうである。又積雪内部の硬化雪も、かつては積雪表面にあったと考え、我々が観測を開始した2月以前に2回から3回硬化雪の出来るような自然条件(主に気象条件)があったと考えられる。
5. 積雪表面の硬化雪を追跡した結果(第7図)、積雪の表面層を形成している硬化雪は尾根から谷へ向うにつれて、軟雪面下へと埋没し、その埋没深も次第に深くなると、第8図(第1図地点10)のように表面硬度は減少し、雪質も変化していった。

謝 辞

この研究は北大低温科学研究所の黒岩大助教授、若浜五郎助教授の指導によって行なわれた。観測を援助していただいた前野紀一氏の協力に感謝する。なおこの研究に用いた費用の一

部は札幌オリンピックの科学研究費及び文部省の科学研究費から支出された。

文 献

- 1) 黒岩大助・小林禎作・若浜五郎・藤野和夫・堀口 薫・田沼邦雄・鈴木重尚・成瀬廉二・北原武道・佐藤尚之 1968 下藤野リュージュコース, 北の峯アルペン競技コース, 及び大雪山アイスバーンの雪質調査. 低温科学, 物理篇, **26**, 249-267.
- 2) 黒岩大助・若浜五郎・藤野和夫 1969 大雪山及び八方尾根における硬化雪の調査. 低温科学, 物理篇, **27**, 247-254.
- 3) 黒岩大助・若浜五郎・藤野和夫 1969 手稲山における雪ふみ試験. 低温科学, 物理篇, **27**, 213-228.
- 4) 秋田谷英次 1965 しもざらめ雪の研究 II. 低温科学, 物理篇, **25**, 37-47.
- 5) 篠島健二・他 1966 積雪断面の研究. 雪氷, **28**, 83-99.
- 6) 成田英器 1969 積雪の比表面積の測定 I. 低温科学, 物理篇, **27**, 77-86.

Summary

Deposits of very hard snow are frequently found at the summit or ridges of mountains in winter. The values of density and Kinoshita's hardness of the hard snow exceed 0.4 g/cm^3 and 10 kg/cm^2 . These high values of density and hardness may not be achieved by ordinary densification or sedimentation processes of snow. In order to investigate the natural hard snow formed in mountainous regions, numerous observations were made in the vicinity of Mt. Asahidake in the Daisetsuzan Mountain Range, Hokkaido (Fig. 1) on 12~16 Feb. and 13~21 Mar. 1970. The obtained results are as follows;

- (1) Two types of hard snow were found: "hard compact snow" and "hard depth hoar" (Table 1). A typical stratification of hard compact snow is shown in Fig. 2. This type of snow may be formed as a result of wind packing. The hard depth hoar consisted of large grains of depth hoar. This hard depth hoar may be formed as a result of metamorphism of wind compacted snow. These two types of hard snow were found not only on the snow surface but also within the snow cover.
- (2) The distribution of the hard snow is shown in Fig. 1. As seen in this figure, the deposited areas of hard snow were found mainly on ridges, suggesting that strong winds may play an important role in their formation processes.
- (3) Pit wall observations of the hard snow were made at points 7 and 9 in February and March. Vertical distributions of Kinoshita's hardness and snow depth observed in March was almost the same as those obtained in February (A and B of Figs. 2, 4. The arrows indicate hard snow layers found in snow cover). This means that there were no further accumulation of snow in the period from February to March. Therefore, it should be noted that the hard snow found at Points 7 and 9 were formed before February and that the hard snow layers found within the snow cover were formed at the snow surface and thereafter they were buried deeply in the snow.
- (4) Fig. 7 shows a schematic illustration of a cross-section of hard snow (dotted area *a*) deposited on the mountain ridge. The surface of the hard snow was exposed to the air along the ridge, but both sides of it were buried under soft snow (*b*) transported by wind. According to our observation, the value of surface hardness of this snow decreased gradually from the ridge to the valley sides (Fig. 8).