



Title	雪崩観測所実験室実験斜面積雪の特質
Author(s)	藤岡, 敏夫; 清水, 弘; 秋田谷, 英次; 成田, 英器
Citation	低温科学. 物理篇, 26, 169-185
Issue Date	1969-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18085
Type	bulletin (article)
File Information	26_p169-185.pdf



[Instructions for use](#)

雪崩観測実験室実験斜面積雪の特質

藤岡敏夫・清水 弘

秋田谷英次・成田英器

(低温科学研究所 雪害科学部門)

(昭和43年10月受理)

I. ま え が き

われわれは数年前から、北海道北部の間寒別にある雪崩観測実験室の実験斜面で、山地積雪の調査を行ってきた。調査結果の一部はすでに報告^{1),2)}されているが、この地方では、こしもざらめ雪やしもざらめ雪が発達することが特徴としてあげられる。これらの雪は積雪が長い間、一定方向の温度勾配のもとにおかれたためにできたもので、時には非常にもろく、底雪崩の原因になることが知られている。

この報告は積雪層を追跡し、こしもざらめ雪やしもざらめ雪の発達のように、密度、硬度が時間と共にどのように変化したかを調べ、この地方の積雪の特質を述べたものである。又地面付近にできた、しもざらめ雪などのもろい積雪層の性質と、底雪崩発生時期との間に一定の関係が見出されたので、あわせて報告する。

なお先に述べた、天塩地方演習林山地積雪の雪質調査報告 I、雪崩観測実験室実験斜面の雪質調査報告 II を、今後単に報告 I, II と呼ぶことにする。報告 I, II は、実験斜面の雪質調査に関する一連の報告で、雪崩観測実験室の設置を機に表題をかえたものである。

II. スノーカメラによる積雪深の測定

報告 II にあるように、雪質調査は、雪崩観測実験室のある中の峯と呼ばれる小尾根の南北両斜面に設けた A, B, C, D 4つの観測地点で行なわれた。今冬(昭和42~43年)は毎日の積雪深を知るために、南斜面の尾根に近い観測点 A 地点に写真機を取り付け、毎日2回定時刻に、写真機の前方3mの積雪中に立てた雪尺を撮影した。雪尺は赤と白のペンキで1cm間隔の目盛をつけた、幅5cm、長さ1.5mの木製の物差しである。この雪尺から読取った毎日の積雪深と、2週間毎に行なった積雪断面観測の結果から、各層の雪がいつ降り、その後どのような変態過程をたどったかを知ることができる。

使用した写真機は、オリンパスペン EM で、単3乾電池2本を使用した自動露出、フィルム自動巻き機構を備えたもので、35mmフィルムを使用し、ライカ版の半分の大きさの写真

* 北海道大学低温科学研究所業績 第944号

をうつす。フィルムは 35 mm, 36 枚どり(この写真機では 72 枚どりになる)のネオパン F で、1 日 2 枚の撮影で 1 カ月以上フィルム交換の必要はない。

防雪のため、写真機は前面にガラス板をはりつけた木箱の中に入れ、ガラス板の内側には、レンズおよび露出計受光窓の障害とならない位置に、60 W の半田ごて用ヒーター 3 個を直列にはりつけ、100 V で加熱した。木箱内の温度は、温度制御器で +20°C に保っておいた。ヒーターをはりつけたガラス板の温度は、+40°C あまりに熱せられ、かなりの量の降雪の時でもガラス板に付着した雪はすぐ融けて、撮影のさまたげにならなかった。しかし、1 月上旬に数回はげしい吹雪があり、このときは、3 m 前方にある雪尺が見えず、積雪深の測定はできなかった。

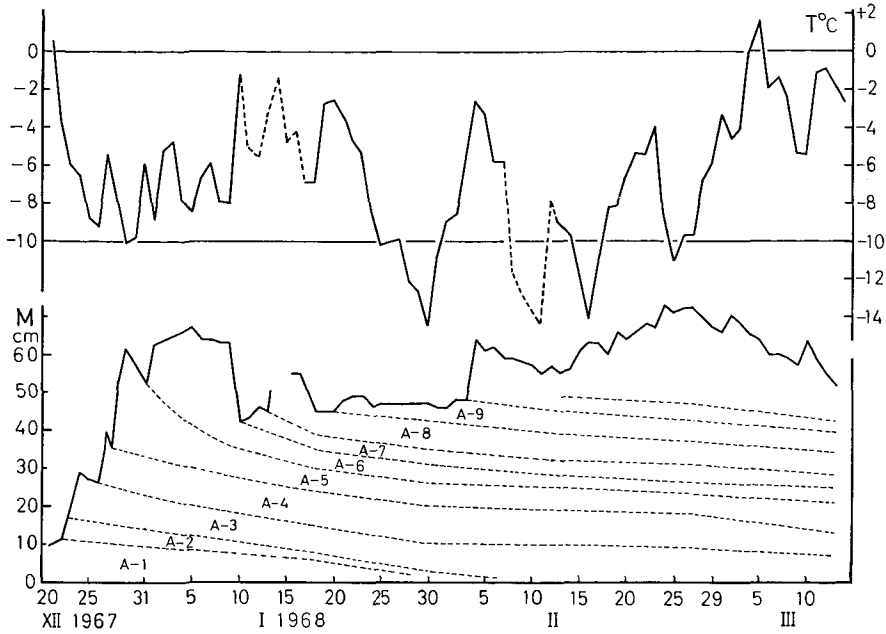
毎日定時刻に写真機のシャッターを切るためには、電気接点付の掛時計(マルゼンベルタイマー)を使用した。これは、交流 100 V を使ったモーターでゼンマイを巻き上げる方式の振り子時計で、1 日 24 時間中の任意の時間に、5 秒から 1 分間の間だけ電気接点を閉じることができる。停電の場合でも、3 日間はゼンマイのみによって動くようになっている。シャッターボタンを押すためには、直流 100 V による電磁石を用いた。毎日午前 9 時と午後 3 時にシャッターが切れるように時計の接点を設定し、昭和 42 年 12 月 21 日から 43 年 3 月 11 日まで雪尺を撮影した。温度制御器、時計、直流電源は尾根の上にある、雪崩観測実験室に置いた。雪尺と写真機を用い、毎日の積雪深の写真をうつす装置を「スノーカメラ」と名付けた。

III. 積雪層の追跡と降雪日の判定

青インクで着色した色水を雪の壁面に噴霧すると、地面に平行な多くの縞模様が表われ、雪が成層構造をして積っていることがわかる。一つの層の雪の密度、硬度、雪粒の大きさや形は一様で又時間と共に変化していく。しかし、層が異なればこれらの雪の性質もまた異なる。これは、降雪時の気象条件、降雪強度や結晶形の違い、更にその上に積った積雪から受ける荷重、積雪内の温度等によって、積雪の変態のしかたが異なるためである。各層の雪が降り積ってからたどった変態過程は、適当な時間毎に積雪の断面観測を行ない、層の追跡をすることによって知ることができる。

第 1 図に、今冬の A 地点における積雪深一雪層変化図と日平均気温の変化を示した。積雪の層構造は断面観測の際のスケッチと、積雪断面の写真とから判定したため、スケッチだけにもとづいた報告 II の層構造と多少異なるものがある。各層には下から順に番号をつけてあり、層の上下の境界線と積雪深を示したグラフとの交点から、その層の降雪日がわかる。例えば A-4 層は 12 月 26 日から 27 日にかけて降った雪である。日平均気温のグラフで、点線で示した部分は、雪崩観測実験室に置いた温度の自記記録計が故障したため、約 4 km はなれた演習林庁舎における測定値から推定した値である。

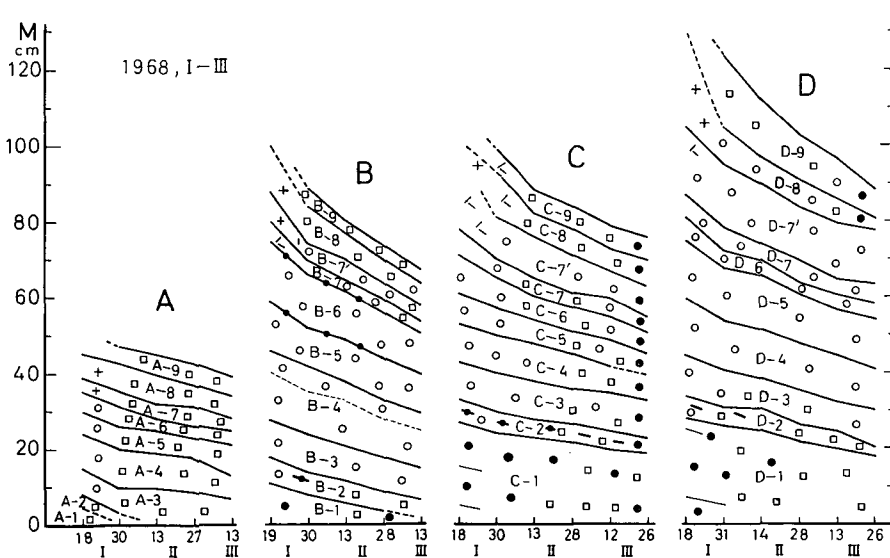
スノーカメラを設置した A 地点は、南斜面の尾根から少し下った場所で、積雪深は非常に少なく、つねに他の 3 つの観測地点の半分以下であった。これは尾根に近い風によって雪が吹き飛ばされてしまうからである。この様に雪が少ないため雪質は他の地点におけるもの



第1図 A地点における積雪深—雪層変化と日平均気温の変化

と異なっていた。しかし、第1図に示した積雪深—雪層変化図から、他の3地点における各種雪層の降雪日と雪層変化を推定することができた。

第2図は、A, B, C, D 4つの観測地点で、1月31日以前に積った雪の層と雪質の変化を



第2図 A, B, C, Dの4観測地点において1月31日以前に積った雪の層と雪質の変化図。雪質の分類と記号は報告I, IIのものとおなじである

表わしたものである。各地点における層の番号の同じものは、同じ日に降ったものである。A 地点以外の場所で見られる 7' 層は、吹雪によって形成された硬くしまった雪で、1 月 15 日前後の降雪によるものと思われる。実際、1 月 17 日には最大風速 25.5 m/秒の強風が記録された。強風のため、尾根に近い A 地点では、雪が吹き飛ばされて積らなかった訳である。

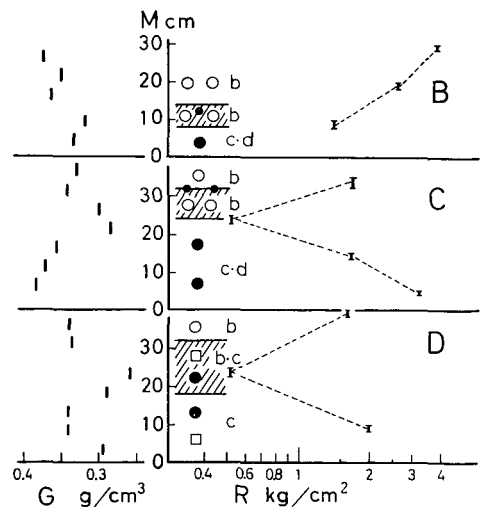
A 地点において、12 月 21 日からスノーカメラによる撮影を開始したが、それ以前の積雪深は数 cm 以下で、斜面の笹の先端は全部積雪面上に露出していた。12 月 21 日以前に積っていた雪が A-1 層である。12 月 21 日から 24 日にかけて、20 cm あまりの新積雪があったが、21 日には雪尺全面に多量の雪が付着したこと、21 日の平均気温が +0.6°C であったことから、この時の降雪は、水を含んだ湿雪であったことがわかる。

22 日から 24 日にかけて気温が次第に下り、22, 23, 24 日の平均気温は、それぞれ、-3.5, -6.0, -6.5°C であった。A-2 層は 12 月 21 日に積った湿雪、A-3 層は 22 日から 24 日にかけて積った乾いた雪である。これ以後の降雪で、雪尺に雪が付着したことはなかった。A-2 層に相当する B-2, C-2, D-2 層には、氷板やざらめ雪の層を含んでいることから、12 月 21 日の湿雪によるもの間違いのないであろう。

地面のすぐ上にある第 1 層は、1 月 18 日に A 地点でこしもざらめ雪、他の 3 地点ではざらめ雪で、その後こしもざらめ雪に変わっている。積雪中に長期間、一定な向きの温度勾配があると、しもざらめ雪やこしもざらめ雪に変態することが知られている。A 地点では積雪が少ないために、雪の中の温度勾配が大きく、他の地点に比べて早い時期にざらめ雪からこしもざらめ雪に発達したのである。

第 1 層は冬の始めに降った雪で、この頃は日中の気温が高いため融解をおこし、融雪水を含んだ積雪は、温暖変態³⁾を行なってざらめ雪になった。その後、気温の低下につれて雪温も低下し、積雪内部に温度勾配が生じて昇華変態が進み、こしもざらめ雪に発達した。第 3 層より上の雪では、春先の融雪期までざらめ雪が見られないことから、冬の間は積ってから一度も温暖変態を行なわなかったことになる。

第 2 層も上に述べた 2 つの変態過程を経過した積雪である。降った当時は湿雪であり、その後まもなく気温が低下しているから、積った当時の短期間だけ温暖変態を行ない、その後は昇華変態を行なっている。第 2 層は第 1 層に比べて、温暖変態を行なった期間が短かったわけである。A 地点における第 2 層 (A-2 層) は 1 月下旬で消失したが、他の 3 地点では春先まで存在した。この第 2 層は密度、硬度とも上下の層より小さく、この傾向は融雪期になるまで続



第 3 図 1 月下旬の B, C, D 地点における弱層付近の密度と硬度。斜線部分が弱層

いた。この層を今後弱層と呼ぶことにする。

第3図に、43年1月下旬のB, C, D地点における弱層付近の密度と硬度を示した。斜線をほどこした部分が弱層で、42年12月21日に積り、1月下旬に密度では、上下の層より10%以上小さく、硬度は1/2~1/3の値を示している。この様な弱層は、報告IIで述べた昭和40~41, 41~42年冬期にもみられたし、昭和38~39年冬期の札幌平地積雪⁴⁾にも見られた。

札幌における弱層は、38年12月30日に降った雪で、1月7日には密度0.20 g/cm³、硬度0.03 kg/cm²のこざらめ雪、3月3日には密度0.30 g/cm³、硬度0.36 kg/cm²のしもざらめ雪に発達し、密度、硬度とも上下の層より小さくなっている。この場合も1月7日にこざらめ雪であったことから、積ってから少しの間だけ温暖変態を、その後長い間昇華変態を行なって、しもざらめ雪に発達したことになる。

春先になって融雪が進み、積雪が水を含む様になると温暖変態が行なわれ、全層がざらめ雪化し、弱層の成層構造は消失し、密度、硬度においても他の層と区別できなくなる。

IV. 変態過程による積雪の分類

A, B, C, D 4カ所の観測地点で、2週間毎に積雪断面観測を行ない成層構造の観察をした。しまり雪の間にうすいざらめ雪の層や氷板を含むもの、吹雪によってできた硬い層など顕著なものは、毎回の観測で追跡出来たが、あまり明瞭でない層は、途中で他の層と区別できなくなることがしばしばあった。又地面近くの層は途中で消失したり、地形のわずかな起伏が影響して、層の厚さが一様でなくなるなど、層の追跡が困難であった。

今冬は斜面積雪の内部歪測定に新しい方法⁵⁾をとり入れたが、この方法は雪層の追跡にも重要な手がかりを与えた。雪の壁に、地面に平行にあけた多くの細い穴は、次回の観測までに雪の塑性流動によって、雪層と共に移動していた。各穴の位置の変化から、前回の層に対応する層を見出すことは容易であった。第2図に示した雪層図は、この様にして層の追跡を行なって得られたものである。

4つの地点における雪層の追跡の結果から、各層の雪質、粒度、密度、硬度が時間と共にどのように変化したかを調べた。ある層は春先までしまり雪のままで残り、別の層はしまり雪からこしもざらめ雪へと変態した。この様な積雪の変態の違いによって、密度や硬度の変化にも差がみられたので、変態過程によって積雪を次の5種類に分類した。なお、春先になって融雪水が積雪内に浸透すると全層がざらめ雪になるが、ここでは、融雪の始まる以前の雪について取り扱っている。

- 1) しまり雪のまま残るもの
- 2) しまり雪からこしもざらめ雪に変態するもの
- 3) ざらめ雪からこしもざらめ雪に変態するもの
- 4) 新雪からこしもざらめ雪に変態するもの
- 5) しまり雪からこしもざらめ雪、更にしもざらめ雪に変態するもの

なお、ざらめ雪からしもざらめ雪に変態するものも実験では知られているし⁶⁾、実際にも

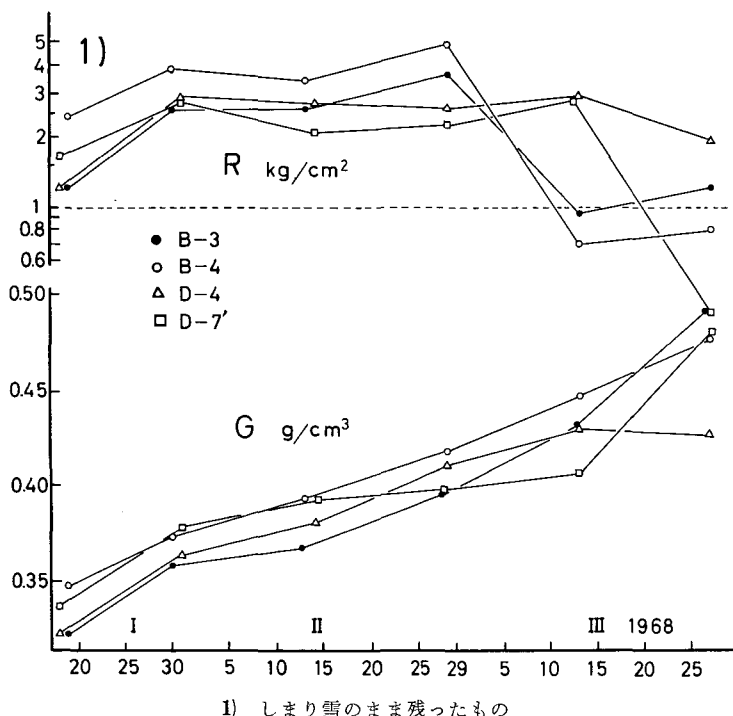
現地を観察したが、観測例が少ないため、ここでは省略した。5)のしまり雪からしもざらめ雪に変態したものは今冬の観測例が少ないため、昨年冬期(昭和41~42年)の資料を用いた。第4図1~5は、上の分類にしたがった密度と硬度の関係を、第5図1~5は、それらに対応する雪粒の典型的な写真である。写真は雪粒をばらばらにしてガラス板上にのせ、透過光で撮った顕微鏡写真である。次に各種雪の種類についてその特徴をのべる。

1) しまり雪のまま残るもの

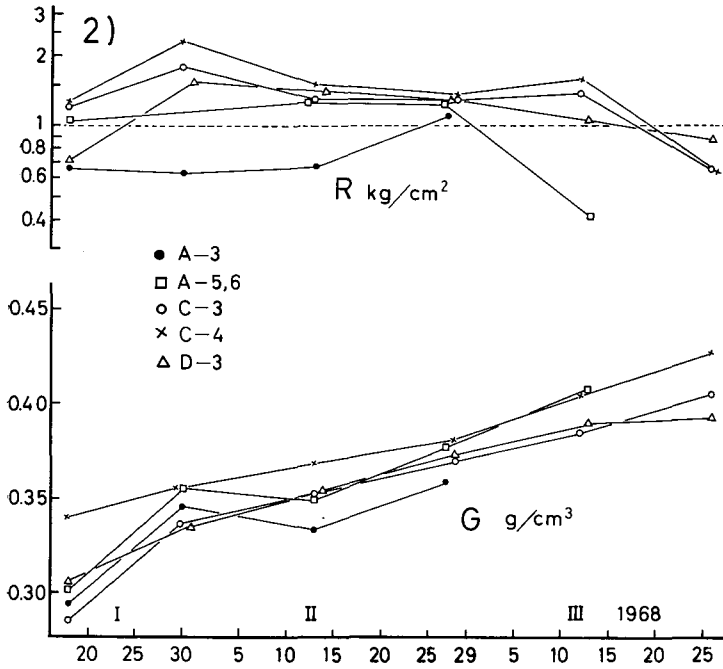
融雪期までしまり雪の状態に保たれ、硬くしまった丈夫な積雪である。北海道でも、多雪地帯に多く見られる雪である。積雪中の温度勾配が非常に小さいために、こしもざらめ雪やしもざらめ雪に発達しなかったのである。

第4図-1に示したB-3, B-4, D-4は、12月22日から26日にかけて積ったもの、D-7'は1月15日前後の吹雪によって形成された層である。D-7'層は積ってから3日後、その他の層では3週間後の1月18日に密度は0.32~0.35 g/cm³の範囲にあり、その後直線的に増加して、3月13日には0.40~0.45 g/cm³になった。

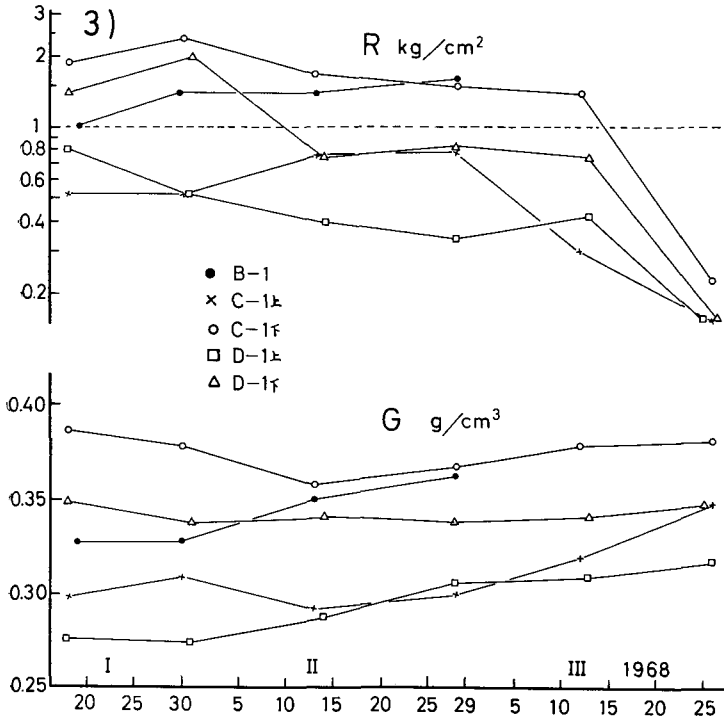
硬度は1, 2月で1~5 kg/cm²の間にあり、この地域では最も丈夫な雪である。融雪期になって水を含むようになると、硬度は急激に減少するが、南斜面では融雪期が早いため、B-3, B-4層は北斜面の雪(D-4, D-7'層)に比べて、約半月早く硬度の急激な減少が見られる。



第4図 変態過程により分類した積雪の密度と硬度の変化

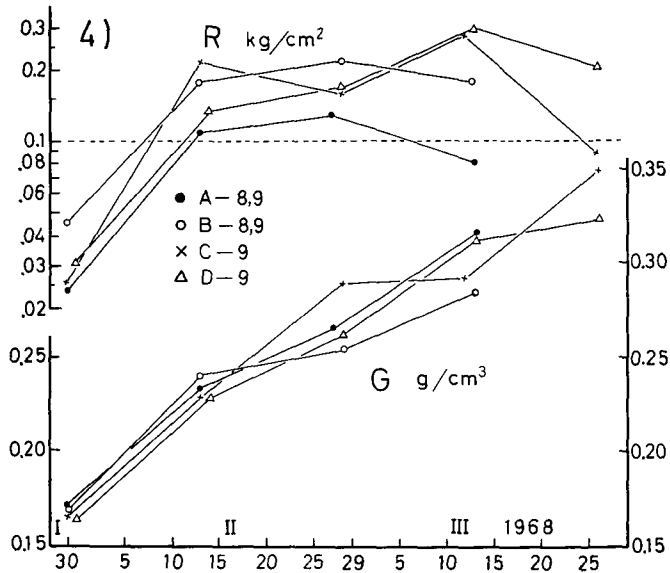


2) しまり雪からこしもざらめ雪に変化したもの

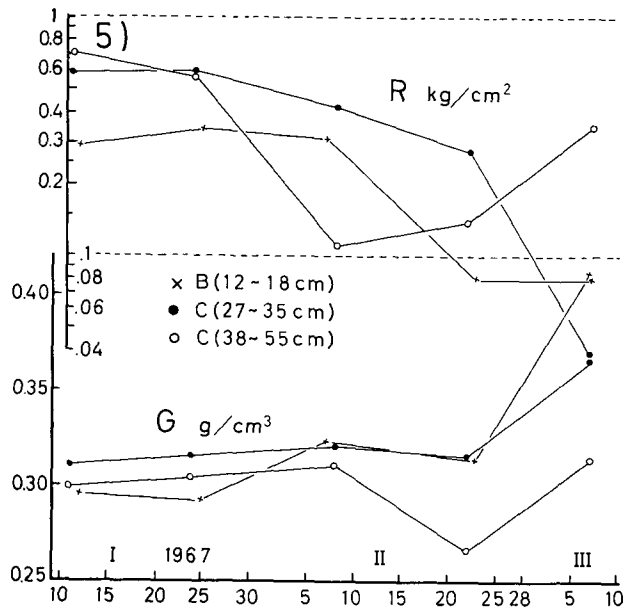


3) ざらめ雪からこしもざらめ雪に変化したもの

第4図 変態過程により分類した積雪の密度と硬度の変化

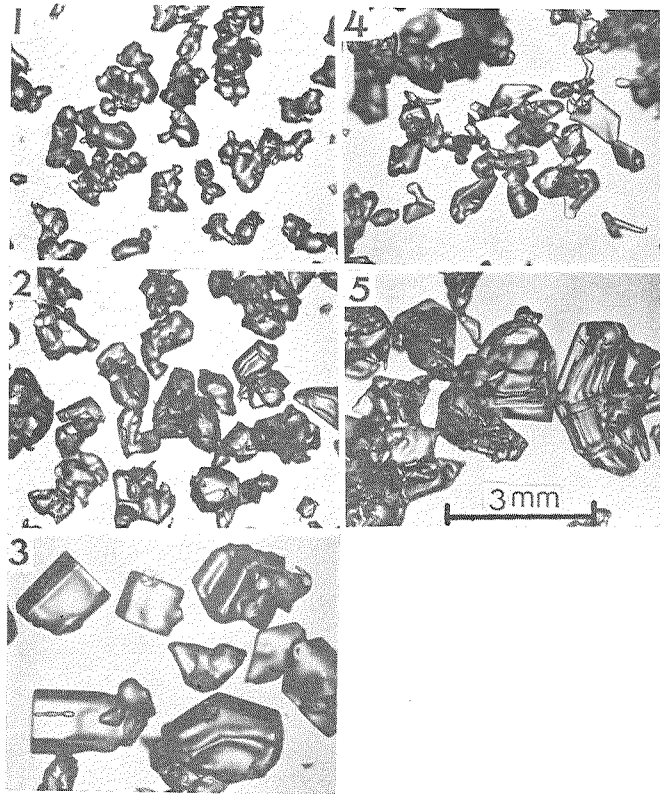


4) 新雪からこしもざらめ雪に変化したもの



5) しまり雪からこしもざらめ雪, さらにしもざらめ雪に変化したもの

第4図 変態過程により分類した積雪の密度と硬度の変化



第5図 変態過程により分類した積雪粒子の写真。
写真の番号は第4図の番号に対応している

2) しまり雪からこしもざらめ雪に変態するもの

雪崩観測実験室付近で非常に多く見られる雪で、平らな面を持った、角ばった雪粒に変態したものである。特に積雪深の少ない尾根近くでは、毎年この種類の雪が多く発達する。密度は日にちがたつにつれて増加しているが、その割合は1)のものより小さく、融雪期の前で 0.40 g/cm^3 程度である。硬度も1)のものより小さく、厳冬期で 1 kg/cm^2 あまりである。ここに示した例の降雪時期は1)と同じで12月末から1月中旬までである。

3) ざらめ雪からこしもざらめ雪に変態するもの

地面付近に見られる雪で密度の変化が少なく、雪粒は角柱状又は厚板状の整った結晶形をし、粒径は2)のしまり雪から変態したものより大きい。先に述べた弱層の下にある雪で、12月21日以前の降雪によるものである。降雪時には水を含んだ湿雪であったり、積ってからの暖気によって融けたため、ざらめ雪となり、その後こしもざらめ雪に発達したものである。1月中旬にはまだざらめ雪で、密度は 0.30 g/cm^3 から 0.40 g/cm^3 に近いものまでであるが、その後時間が経過してもあまり増加していないのが特徴である。硬度はB-1, C-1上層がわずかに増加しているが、他は減少する傾向にあり、大体 0.5 kg/cm^2 から 2 kg/cm^2 の間にある。

4) 新雪からこしもざらめ雪に変態するもの

新雪からこしもざらめ雪に変態したもので、こしまり雪から変態したものも含んでいる。密度、硬度は小さく、角板状の結晶に発達した雪である。

A, B, C, D の各地点で、1月18日頃から23日にかけて新雪が積もり、23日以降2月3日まで降雪はほとんどなかった。積ってから間もない1月20日の平均気温は -2.6°C で、それ以後気温は低下しつづけ、1月30日には、 -14.5°C にまで下った。この層の上には2月3日までしばらくの間、雪が積らなかつたため、上からの積雪による荷重をうけず、しかも低温の期間が長かつたために、しまり雪に変態せずに、こしもざらめ雪に発達した。この層の雪が降り終ってから7日後の1月30日には、すでに、こしもざらめ雪に変態したが、この時の密度は 0.15 g/cm^3 程度で、3月中旬には 0.30 g/cm^3 となった。

雪の硬度は3月中旬が最大であったが、それでも 0.3 kg/cm^2 以下に過ぎない。この層の上に積った雪でしまり雪に変態したものは、上からの積雪による荷重が少ないにもかかわらず密度、硬度とも大きくなった。特にC地点で3月上旬には、上に述べたこしもざらめ雪の密度と硬度はそれぞれ、 0.24 g/cm^3 , 0.28 kg/cm^2 であるのに対し、その上に積ったしまり雪では 0.33 g/cm^3 , 0.88 kg/cm^2 と大きな値を示した。

5) しまり雪からこしもざらめ雪、さらにしもざらめ雪へと変態するもの

地面付近に発達するものが多く、散晶状の結晶に発達し、密度は 0.30 g/cm^3 前後でその後増加しないまま融雪期を迎える。硬度は1月中旬に $0.3\sim 0.7\text{ kg/cm}^2$ 程度で、その後時間と共に減少し、2月下旬には 0.3 kg/cm^2 以下となっている。

北海道における底雪崩の発生原因の一つとして、しもざらめ雪の発達があげられているが、この様に硬度が減少し、しかもその値がしまり雪に比べて1桁も小さいことは、しもざらめ雪の層が脆くてこわれやすい雪であることを示している。図に示したものは昨年冬期(昭和41~42年)のもので、1昨年および本年冬期は、しもざらめ雪の発達は顕著でなかつた。図の中のB, Cは観測地点、かっこ内の数字はその層の1月11日における地面からの高さを表わしている。

この3冬期間の中で、昨年冬期にしもざらめ雪が特に発達した理由として、気温が低かつたこと、積雪量が少なかつたことの2つがあげられる。昭和40~41, 41~42, 42~43年の3冬期の1月20日から2月28日までの40日間の日平均気温の積算は各々、 -326.4 , -387.8 , $-343.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ である。又、B地点における冬期間の積雪深は、2月に2回行なつた観測値を平均すると、それぞれ、125, 74, 102 cmである。昨年冬期はこの様に気温が低く、積雪深も少ないことから積雪中の温度勾配も当然大きく、B地点の地面付近の最大温度勾配は、1月下旬に -0.17°C/cm で前後の年の3倍あまりの大きさであった。積雪中の温度勾配が大きい程、しもざらめ雪が発達しやすいことは、秋田谷⁶⁾が実験で明らかにしている。

V. 雪崩発生時期と積雪との関係

北大天塩地方演習林内にある雪崩観測実験室付近では、毎年春先になると南斜面一帯で底

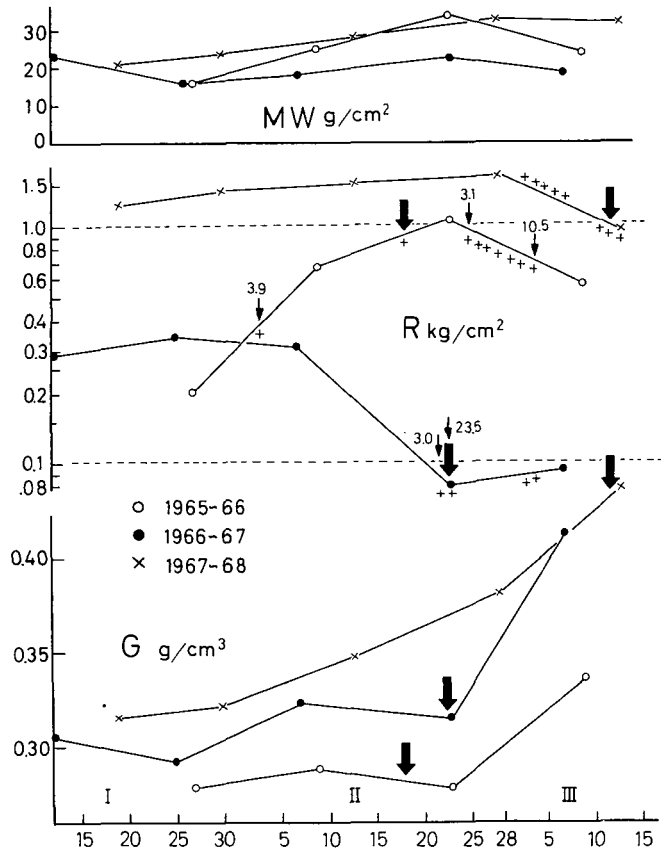
雪崩が発生する。昭和36年1月には、実験室から3 km 余り離れた、国鉄宗谷本線問寒別一雄信内間で雪崩が発生し、列車が28日間も不通になった大事故がおきた。

積雪断面観測を行なっている尾根の南斜面は、年により雪の積り方が異なり、積雪の少ない年には、2月頃から地面の笹が雪面上に出してしまうことがある。この様な年には春先になっても雪崩は発生せず、そのまま融雪が進む。一方、実験室の建っている中の峯の尾根の北側において、中の峯と平行に走る尾根の南斜面では、積雪が多く、厳冬期に笹が雪面上に露出することはなく、毎年春先に底雪崩が発生している。2つの南斜面の形状、植生は非常によく似ている。簡単のためこの尾根を北尾根と呼ぶことにする。

北尾根南斜面の雪崩発生時期は、過去3冬期について知ることが出来た。しかし、この斜面では積雪の観測を行なっていないため、積雪の物理学的性質と雪崩発生時期との関係を直接比較することは出来ない。しかし次の2つの理由により、北尾根南斜面の雪崩発生時期と雪質との関係を推定することができる。

第1は、中の峯と北尾根は直線にして約400 m しかはなれていないので、両斜面の雪質はあまり差がないと考えられること。第2は、北尾根南斜面の雪崩発生地点は、毎年同じ位置で、中の峯南斜面のB地点に相当する高度である。先に地面付近には上下の層よりも密度、硬度ともに小さい弱層が存在することを述べた。地面近くに弱い積雪層があると斜面上の積雪は不安定なものとなり、この層が底雪崩の原因となるに違いない。

第6図は、過去3冬期間の中の峯南斜面B地点における弱層の密度、硬度および弱層上に積った積雪水量の変化と、北尾根南斜面の雪崩発生時期を示したものである。図の太い矢印が雪崩発生日を、細い矢印と数値は降雨日と降



第6図 中の峯南斜面B地点における弱層の密度、硬度および弱層上に積った積雪水量の変化図

太い矢印は北尾根南斜面における雪崩発生日。細い矢印と数値は降雨日と降雨量。+の記号は最高気温が正になった日。積雪水量は斜面に垂直に測ったもの

雨量 (mm), + の記号は最高気温が 0°C 以上になった日を示している。降雨量は演習林庁舎での観測値である。昭和 43 年は 3 月 13 日午後 4 時頃, 作業中に雪崩が発生したのを目撃した。42 年は雪崩観測実験室に滞在していた 2 月 22 日から 23 日にかけてかなりの降雨があり, この間に発生したが詳しい時間は不明である。41 年は 2 月 9 日の観測時にはまだ雪崩は発生していなかったが, 2 月 23 日の観測時にはすでに発生していたので, この 2 週間の間に発生したことになる。42, 43 年の雪崩が発生した日は, とともに最高気温が 0°C 以上になっていた。41 年 2 月 9 日から 23 日の間で, 最高気温が正になったのは, 2 月 18 日であった。このことから 41 年の雪崩は, 2 月 18 日に発生したものと判断したが, あまり大きな違いはないであろう。

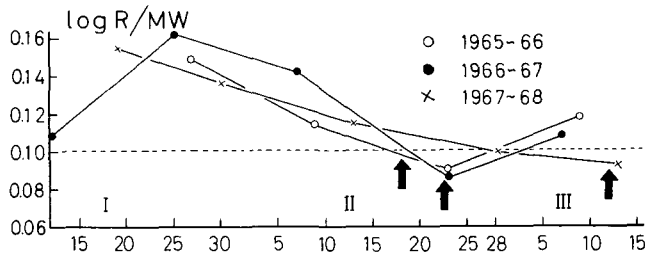
弱層の密度についてみると, 昭和 40~41 年冬期は, 1 月末から 2 月末まで 0.28 g/cm^3 程度で変化がほとんどなく, 3 カ年で一番小さい。41~42 年はもう少し大きく 0.30 g/cm^3 あまりで, この年も 2 月末まではあまり変化がない。しかし, 42~43 年は 1 月中旬において密度が一番大きく, その後も増加を続け, 雪崩が発生した 3 月 13 日には 0.44 g/cm^3 の大きな値を示した。雪崩の発生時期は, 弱層の密度が一番小さい 40~41 年が一番早く, 41~42, 42~43 年と密度が大きい年程遅く発生した。つぎに, これら 3 冬期の 1 月における弱層の雪質についてみると, 2 月中旬に雪崩が発生した 40~41, 41~42 年には, ざらめ雪にしまり又はこしもざらめ雪の混ったものであった。3 月中旬になって発生した 42~43 年は降雪時には湿雪であったが, ざらめ雪にまで変態が進まず, 間にざらめ雪のうすい層をはさんだしまり雪であった。2 月下旬の弱層の雪質は, 41~42 年がしもざらめ雪で他はこしもざらめ雪であった。

積雪の密度の増加する原因の主なもの, 積雪自身の重さのために粒子構造が塑性変形し, 雪粒がつまることによる。これは積雪層の粘性圧縮と呼ばれ, 小島⁷⁾によって研究されてきた。第 6 図には, 3 冬期間の弱層の上に積った積雪水量 ($MW\text{ g/cm}^2$) も示してある。最も密度の小さかった 40~41 年の積雪水量は, 1 月下旬には 41~42 年の積雪水量とほぼ等しいが, その後増加をつづけ, 2 月下旬には 3 冬期間で最も多くなっている。それにもかかわらず, 40~41 年の密度が最も小さく, 増加もしていないが, これはこの年の弱層の圧縮粘性率が他の年に比べて大きかったからである。これは雪質の違いにより, 積雪の粒子構造に差異があったためであろう。

硬度と密度との関係についてみると, 密度の一番大きな 42~43 年には硬度も最も大きい, 他の 2 冬期については逆の関係になっている。図から明らかのように, 雪崩の発生時期は硬度の小さい順になっていないため, これらの間に相互関係はないことになる。

底雪崩が発生する場合, 地面付近の雪が弱くても, その上に積っている積雪量が少なければ, 斜面にそって下方に働く力は小さく, 雪崩は起きにくい。反対に地面付近の層がかなり丈夫でも積雪量が多い場合には, 底雪崩の発生することもあるであろう。

第 7 図は以上のような考えにもとづき, 弱層の硬度とそこに積っている積雪水量との関係を示したものである。横軸には時間, 縦軸は硬度 $R\text{ g/cm}^2$ の対数と弱層上の積雪水量 $MW\text{ g/cm}^2$ (斜面に垂直に測った値) との比 $\log R/MW$ をとったものである。図からわかるように, 3 冬期ともこの値が 0.1 以下で雪崩が発生している。



第7図 弱層の硬度とそこに積った積雪水量の関係
(積雪水量は斜面に垂直に測った値)

C. C. Bradrey と D. Bowles も同様な考えにより雪崩発生限界について述べている⁹⁾。Bradrey, Bowles は地面近くのしもざらめ雪の発達した層のラムゾンデによる硬度 $S \text{ g/cm}^2$ とその層の上に積っている雪の鉛直方向に測った重量 $L \text{ g/cm}^2$ との比 S/L を用いている。 S/L が2以下では雪崩の発生することがあるので、安全限界を4~5としている。われわれの用いた木下式硬度計とラムゾンデによる硬度との違い、積雪深の測定が斜面に垂直 (M) と鉛直 (H) との違い、更にわれわれは硬度 R の対数を用いているので、両者の数値を直接比較することはできない。

実際の雪崩の発生には積雪の密度や硬度などの物理学的性質の他に、地形的要因、更に気温や降雨などの気象的な要因が加わっているので、積雪のみから雪崩の発生を予知することはできない。しかし上に述べたように、弱層の発達状況やその物理学的性質を知ることは、底雪崩発生時期を予知する一つの重要な手掛りとなるであろう。

VI. 雪質と密度、硬度との関係

第8図に3冬期間の1月から3月までのA, B, C, D 4つの観測地点で測定した積雪の密度と硬度との関係を示した。図-a はしまり雪 (255例) とざらめ雪 (89例) について示したもので、横軸は密度 $G \text{ g/cm}^3$ 、縦軸は硬度 $R \text{ kg/cm}^2$ である。測定値はかなりばらついてはいたが大體図で示した範囲内に入った。図中の点線は乾いた雪と水を含んだ雪の境界を表わし、しまり、ざらめの雪とも共通で

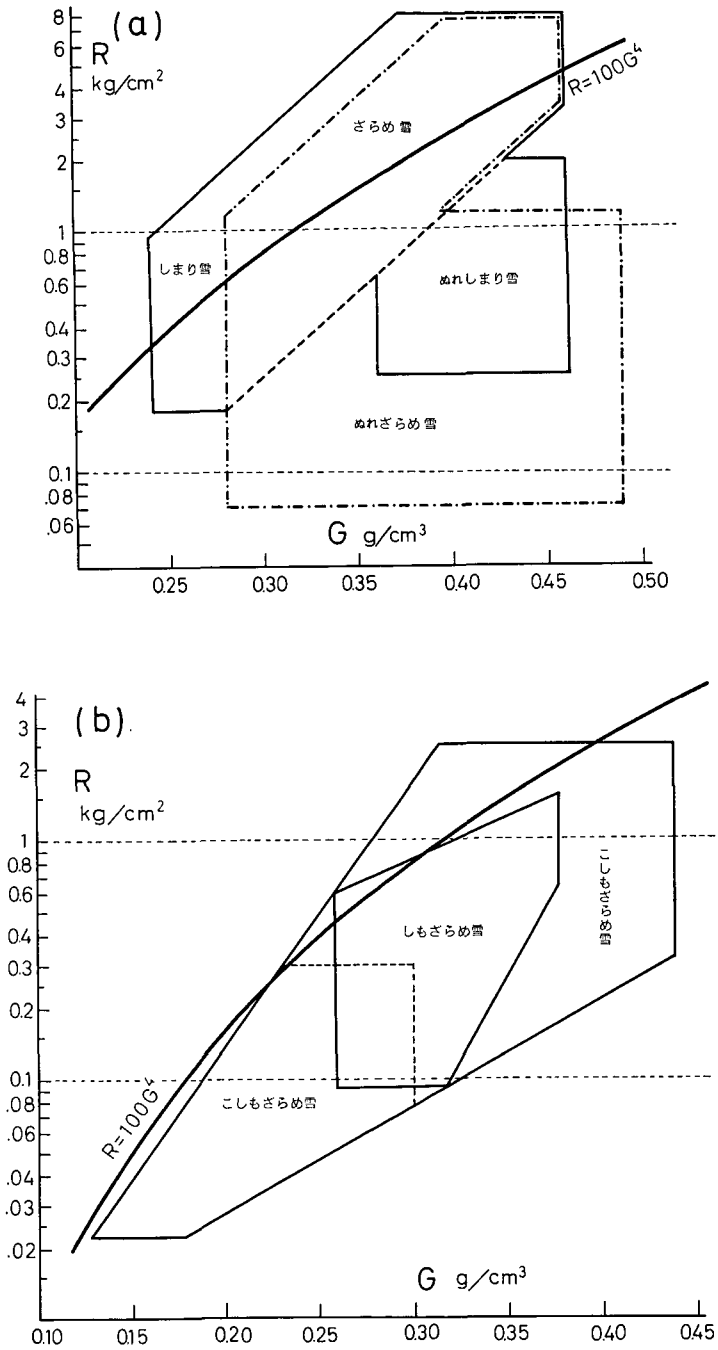
$$\log R = 7G - 1.7$$

なる式で表される。水を含んだ雪については、含水率測定を行なったもの、含水率の測定は行なわなかったが、雪温が 0°C で明らかに水を含んでいると認められた雪の両方を用いた。

乾いた雪については、密度の増加につれて硬度も増す傾向を示しているが、水を含んだ雪ではばらつきが大きく、必ずしもその様な傾向を示さない。特に水を含んだざらめ雪では、密度が 0.28 g/cm^3 から 0.49 g/cm^3 の広い範囲にわたって、硬度が 0.1 kg/cm^2 以下のものが10%あまりあった。

木下は母子里と札幌での乾いた雪について、密度 $G \text{ g/cm}^3$ と硬度 $R \text{ kg/cm}^2$ との関係から

$$R = 100G^4$$



第8図 積雪の密度と硬度との関係

過去3冬期間、A、B、C、D 4つの視測地点で1月から3月まで測定したもの。図中の曲線は木下が母子里と札幌で乾いた雪について求めたもの

なる式を求めている⁹⁾。図に示した曲線がそれで、我々が求めた乾いた雪の範囲内に入っている。

第8図-bは、しもざらめ雪(28例)とこしもざらめ雪(108例)について示したものである。これらの種類の雪については、水を含んだ測定例が少なく、かつ乾いた雪との差があまり顕著でなかったため、数例の水を含んだ雪をも加えた。しもざらめ雪については測定値が少なかったため、昭和38~39, 39~40年冬期をも含め、過去5冬期について求めたものである。硬度の範囲の大部分は先に述べた木下の式で表わした曲線の下側にあり、この種の雪は乾いたしまり雪やざらめ雪より弱いことがわかる。こしもざらめ雪で密度が 0.30 g/cm^3 、硬度が 0.3 kg/cm^2 以下のものは、新雪又はこしまり雪から、それ以上のものはしまり雪又はざらめ雪から発達したものが多し。

VII. 要 約

スノーカメラによる積雪深の自動測定と2週間毎の積雪断面観測の結果から、各層の降雪日を推定することが出来た。地面付近に密度、硬度とも上下の層より小さい弱層が形成されるが、この層は冬の初期に積ったもので、積った当時、短期間だけ温暖変態を行ない、その後昇華変態を行なってしもざらめ雪やこしもざらめ雪に発達したものである。

変態過程から積雪を5つの種類に分類した。この地方の積雪の特徴は、こしもざらめやしもざらめ雪が多いことである。こしもざらめ雪は、新雪、しまり雪、ざらめ雪のいずれからも発達するが、地面付近のざらめ雪から発達したものは、他のものに比べて、密度、硬度の変化が少ない。密度 0.30 g/cm^3 程度のしまり雪から発達したしもざらめ雪は、密度の変化が少なく、硬度は日が経つにつれて減少する。このようなしもざらめ雪は積雪量が少なく、1, 2月の気温が低い年に多く発達する。

3冬期間の底雪崩発生時期と積雪との関係を調べた。弱層の密度の小さい年ほど雪崩は早く発生する。又弱層の硬度 $R \text{ g/cm}^2$ の対数と弱層上の積雪水量 $MW \text{ g/cm}^2$ との比 $\log R/MW$ が0.1以下になり、最高気温が 0°C 以上になるか、又は多量の降雨のあった時に雪崩が発生している。

しもざらめ雪やこしもざらめ雪は、同じ密度のしまり雪やざらめ雪より硬度が小さい。しまり雪やざらめ雪が水を含んだ場合、硬度は減少し、特にざらめ雪では 0.1 kg/cm^2 以下になるものもある。

終わりに、この研究に御協力をいただいた北大天塩地方演習林の方々、気象データーを提供された同演習林工藤哲也氏、資料整理を手伝わされた永山修氏に深く感謝の意を表わします。この研究は文部省特定研究費によって行なわれた。

文 献

- 1) 藤岡敏夫・清水 弘・秋田谷英次・成田英器 1966 北大天塩地方演習林山地積雪の雪質調査報告 I. 低温科学, 物理篇, **24**, 177-199.
- 2) 藤岡敏夫・清水 弘・秋田谷英次・成田英器 1968 雪崩観測実験室実験斜面積雪の雪質調査報告 II. 低温科学, 物理篇, **26**, 169-185.
- 3) Shumskii, P. A. 1954 Principles of Structural Glaciology (1964 Translated from Russian by D. Kravs), Dover Publications Inc., New York, 497 pp. 255-303.
- 4) 小島賢治 他 1965 札幌の平地積雪断面測定資料報告, 昭和 38~39 年冬期. 低温科学, 物理篇, **23**, 99-199.
- 5) 清水 弘 1968 斜面積雪の内部歪 I. 低温科学, 物理篇, **26**, 143-168.
- 6) 秋田谷英次 1967 しもぞらめ雪の研究 II. 低温科学, 物理篇, **25**, 37-47.
- 7) 小島賢治 1958 積雪層の粘性圧縮 IV. 低温科学, 物理篇, **17**, 53-64.
- 8) Bradrey, C. C. and Bowles, D. 1966 Strength-Load Ratio, An index of deep slab avalanche conditions. *In* Physics of Snow and Ice, Part 2 (H. Ôura, ed.), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo, 1243-1253.
- 9) 木下誠一 1960 積雪の硬度 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-134.

Summary

From several years ago the properties of snow cover and their changes under natural conditions have been investigated at Toikanbetsu where the Avalanche Research Station of the Institute of Low Temperature Science was established in 1965. In the winter of 1967-68, the snow depth was recorded continuously by a snow camera which was devised to take recording pictures of a snow pole automatically twice a day. The properties of snow were examined every two weeks at four research sites of A, B, C and D. The sites A and B are on the south slope and C and D are on the north slope of the same ridge.

Fig. 1 shows the mean air temperature, snow depth and thickness of each snow layer at sit A. The thickness and snow types of each layer at the four research sites are illustrated in Fig. 2. Figs. 1 and 2 show the date of accumulation and the course of metamorphosis of each layer throughout the winter season.

Fragile layers of depth hoar were found near the ground every winter at all sites. The density and hardness of this snow were smaller than those of snow in the upper and lower layers. (Fig. 3)

The snow from which the depth hoar was derived accumulated at the beginning of winter and thereafter melted and refroze. First the snow changed into very coarse granular snow containing large air voids. Next during the cold spells of mid-winter the snow underwent a process of cold-metamorphosis and some of the snow particles changed into depth hoar crystals under a steep temperature gradient. The large air voids between the particles of very coarse granular snow favoured the growth of depth hoar crystals.

The snow in each layer was classified into 5 types according to the mode of changes in the form of snow particles by constructive metamorphism (Figs. 4, 5). Each type of

snow showed characteristic variations in density and hardness throughout the winter season (Fig. 4). At Toikanbetsu, two types of depth hoar crystals were found, solid type (column or thick plate) and skeleton type (cup or scroll). (Fig. 5-2, 3, 4, 5). The hardness of the snow layer of the depth hoar was smaller than that of dry fine or coarse granular snow of the same density (Fig. 8). The decrease in the hardness of the skeleton type depth hoar with time is shown in Fig. 4-5. But some layers of fine granular snow did not change their grain shape even by the end of winter when the snow was wet by melt water while the hardness was several times larger than that of the snow layer of the skeleton type depth hoar.

The date of the occurrence of ground avalanches on the south slope for the past three winters shows that the snow cover withstood avalanching for a considerable length of time when the density of the fragile layer was large. In Fig. 7 the ratio of hardness to water equivalent ($\log R/MW$) is plotted against time and it was noted that avalanches occurred when the value of the ratio decreased below 0.1 at the avalanche starting zone. (R ; hardness measured by Kinosita's hardness meter g/cm^2 , MW ; water equivalent of the snow cover deposited on the fragile layer and measured perpendicularly to the slope g/cm^2)