



Title	ぬれ雪の硬度 : 水浸または日射による硬度減少
Author(s)	和泉, 薫
Citation	低温科学. 物理篇, 44, 37-48
Issue Date	1986-03-10
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/18517">http://hdl.handle.net/2115/18517</a>
Type	bulletin (article)
File Information	44_p37-48.pdf



[Instructions for use](#)

## ぬれ雪の硬度 III\*

—— 水浸または日射による硬度減少 ——

和 泉 薫\*\*

(新潟大学積雪地域災害研究センター)

(昭和60年10月受理)

### I. ま え が き

ぬれ雪の硬度は、含水率の増加につれて減少することを以前報告した<sup>1)</sup>。その関係に従えば、雪の中の空隙部分がすべて水で占められた状態（この報告を通じて、飽和含水状態と呼ぶことにする）の時に、硬度値が最小となる。湿雪雪崩の発生に関連した積雪の力学的強度を考える場合、含水による硬度の減少過程と、その最小値が問題となる。そこで、自然積雪を0°Cの水に浸して飽和含水状態とした際の、硬度の時間変化を調べた。

一方、筆者らによる自然状態のぬれ雪の硬度測定値の中には、未飽和含水状態にもかかわらず、同じ乾き密度での飽和含水状態の硬度より小さな値が存在した。これらは、ほとんどが積雪表面層の測定値であったことから、含水以外に硬度減少を引き起こす原因として日射の影響が考えられた。そこで、自然積雪に人工的な日射を照射し、その際の硬度の時間変化についても調べた。

### II. 水浸による積雪の硬度減少

#### 1. 実験方法

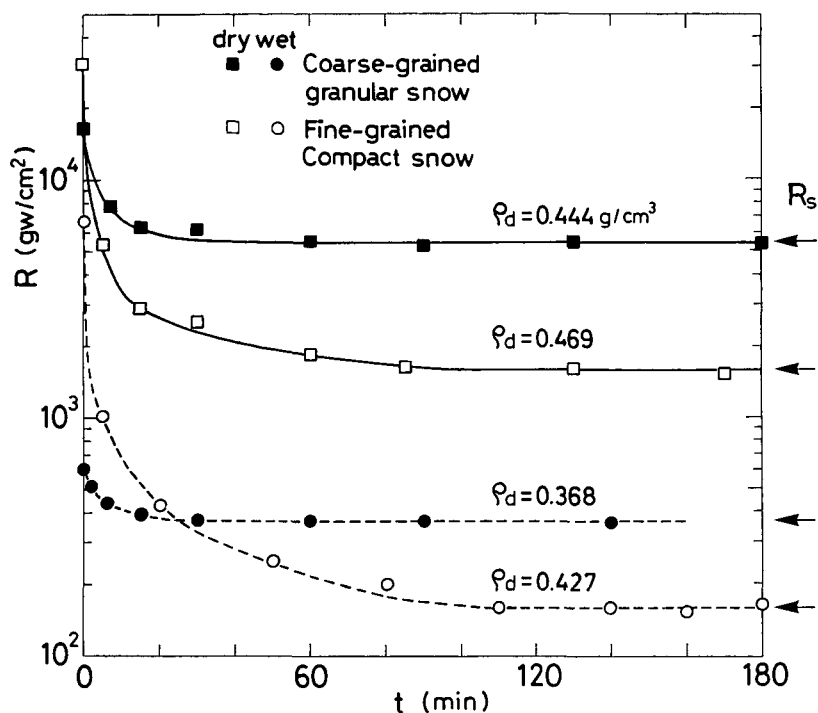
自然積雪内部から採取した雪ブロックの様な部分を、高さ10 cm、縦横30 cm×20 cm程度に切り出して水槽に入れ、そこに0°Cの水を静かに注いで水浸させ、積雪試料上面の木下式硬度を水浸後3時間程度まで時間を置いて測定した。水浸した雪の中に気泡が残る場合もあったが、その量はわずかでほぼ飽和含水状態とみなせた。使用した積雪はしまり雪(こしまり雪を含む)とざらめ雪で、それぞれ乾いている場合とすでに含水率で1~15%含水している場合の両方について実験を行った。乾き雪の雪温は-1°C付近(-0.2~-1.5°C)または-10°C付近(-8.5~-11.8°C)で、実験は1±1°Cの低温室内で行った。

#### 2. 実験結果

水浸した雪試料の硬度の時間変化のうち、代表的な4例を第1図に示した。図中の水浸時間0分の値は水浸前の硬度値で、雪温が0°Cより低い乾き雪の場合には対馬の式<sup>2)</sup>を用いて0°Cに換算した値である。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第2780号

\*\* 昭和60年度文部省内地研究員



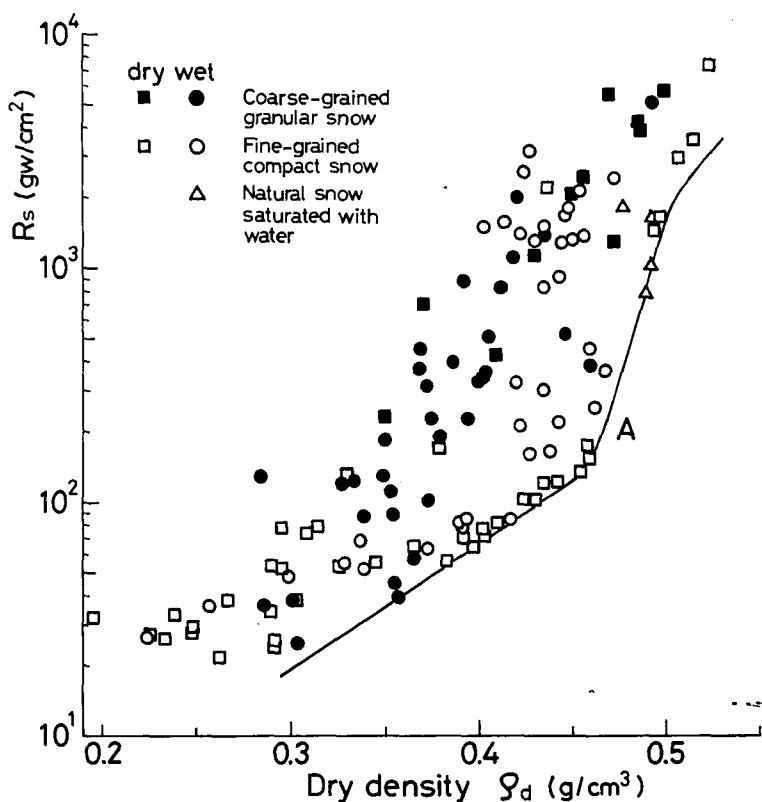
第1図 水浸雪の硬度  $R$  の時間変化

■: 乾きざらめ雪, ●: ぬれざらめ雪  
□: 乾きしまり雪, ○: ぬれしまり雪

第1図によると、硬度  $R$  は水浸直後に急速に減少したあと、遅くとも3時間以内でほぼ一定の状態に達した。この傾向は、この例以外でも実験した122の雪試料すべてにおいて観測され、飽和含水による硬度の時間変化は、試料の雪質や水浸前の乾湿にかかわらず、ほぼ3時間以内で一定値に落ち着くことがわかった。水浸した雪の硬度変化は雪の組織変化によると考えられる<sup>3)</sup>ので、水浸直後の急速な組織変化状態から、ほぼ3時間以内にゆるやかな組織変化状態へと移行したと言えよう。

また、この硬度がほぼ一定となるまでの時間および硬度変化量は、ざらめ雪に比べてしまり雪の方で大きい。これについても雪の硬度と組織の対応からすると、すでに温暖変態を受けて雪粒が粗大化したざらめ雪に比べ、温暖変態の進行していない細かな雪粒のしまり雪は、水浸による組織変化が大きく、一定硬度に達するまでの時間は長くかかり、硬度変化量も大きいと考えられる。

第1図中に  $R_s$  で示した水浸後のほぼ一定状態の硬度を、水浸安定硬度と呼ぶことにする。全部で122の雪試料について測定した水浸安定硬度  $R_s$  と乾き密度  $\rho_d$  の関係を第2図に示した。図中の□印と○印はそれぞれ水浸前の雪の乾湿を表わし、黒塗りはざらめ雪を、白抜きはしまり雪を表わしている。また△印は自然積雪内の止水面上にあって、ほぼ飽和含水状態になっていた水ベタしまり雪の硬度測定値を、水浸安定硬度とみなして示したものである。なお、乾き雪の試料を水浸した場合、水温 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) と雪温の温度差だけ積雪中に水分が凍結す



第2図 水浸安定硬度  $R_s$  と乾き密度  $\rho_d$  の関係

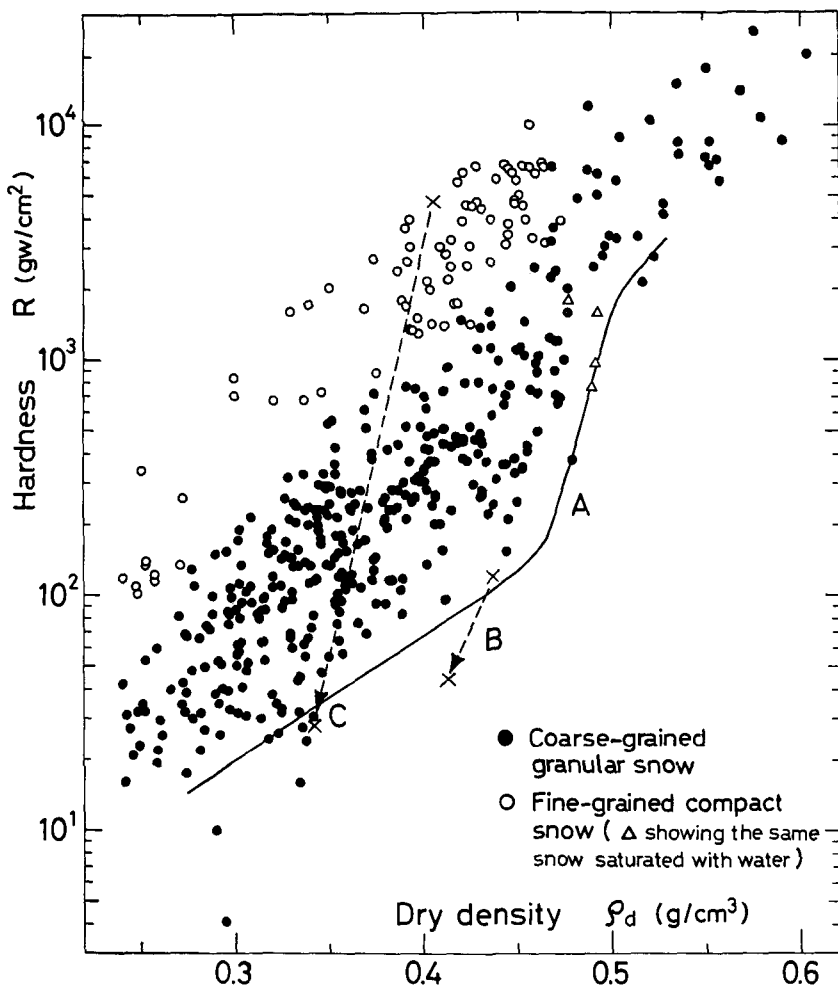
- : 乾きざらめ雪, ●: ぬれざらめ雪
- : 乾きしまり雪, ○: ぬれしまり雪
- △: 自然状態の水ベタしまり雪

るので、ここではこの凍結分を雪の実質部分として加えた密度を乾き密度とした。

これによれば、水浸安定硬度は全体として乾き密度とともに増大している。また同じ乾き密度について見ると、ざらめ雪よりもしまり雪の方が小さく、その内でも乾きしまり雪の水浸安定硬度が最も小さい傾向にある。さらに、水浸安定硬度には、第2図の曲線Aのような乾き密度に対応した最小値があることがわかった。これをここでは、水浸安定硬度の下限値と呼ぶことにする。

これまで筆者らによって測定された、自然状態のぬれ雪の木下式硬度  $R$  と乾き密度  $\rho_d$  の関係を表わす図 ( $0.22 \leq \rho_d \leq 0.62 \text{ g/cm}^3$ ) に、曲線Aを書き加えたものを第3図に示した。△印は、第2図と同様、飽和含水状態の水ベタしまり雪の測定値である。これを除くと、他のプロットはすべて未飽和含水状態での測定値である。曲線Aは未飽和含水状態でのぬれ雪の硬度の、ほぼ下限を表わしていることがわかる。

まえがきで述べたように、ぬれ雪の硬度が含水率の増大につれて減少する関係からすれば、飽和含水状態の時に、硬度がその雪の乾き密度に対応した最小値となるのであるから、未飽和含水状態の雪について測定された第3図の硬度の値は、この曲線A以下にはないことになる。



第3図 自然状態のぬれ雪の硬度  $R$  と乾き密度  $\rho_d$  の関係

●: ざらめ雪, ○: しまり雪, △: 水ベタしまり雪

ところが第3図中には、未飽和含水状態にもかかわらず、曲線 A 付近やそれ以下の硬度の測定値がいくつか見られる。これについて次に検討する。

### III. 日射による積雪の硬度減少

前節では、未飽和含水状態の自然積雪において、水浸安定硬度の下限值以下の硬度値が観測されていることを述べた。これを説明するには、含水以外に硬度を減少させる原因がなければならない。

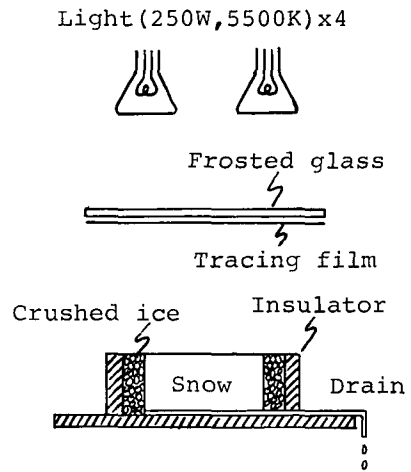
ところで、これら水浸安定硬度の下限值付近、およびそれ以下の硬度値を示した雪は、ほとんどが積雪表面または表面近くに存在した雪であった。また若浜・他<sup>9)</sup>は、融雪期の積雪表面のざらめ雪層では、日中の日射によって氷の粒同志の結合が切れ、氷の粒が単に機械的に充填した組織のものに変わり、硬度が減少することを述べている。よって、第3図の曲線 A 付近

およびそれ以下の硬度値は、積雪表面付近の含水した雪層が日射を受けて、さらに硬度を減少させた結果観測されたと考えられる。

そこでこの日射の硬度に与える影響を、低温室内で自然積雪に人工的な日射を照射し、木下式硬度を間欠的に測定することで調べた。

### 1. 実験方法

実験装置の概略を第4図に示した。放射源としては、波長特性が日射に近い、100 V, 250 W, 色温度 5500 K のフラッドランプ (カラー用コピーランプ) を4個使用し、スリガラスとトレーミングフィルムで散乱させた。トレーミングフィルムと雪試料表面との距離は20 cm程度であった。



第4図 実験装置の概略

雪試料は20 cm × 20 cm程度の大きさで、高さは6~17 cmと試料によって違っていた。この側面を厚さ2.5 cmの断熱材で覆い、雪試料との間隙を砕氷で埋めた。雪試料の下には白い布を敷きそれを通して融雪水が外に排出されるようにした。

使用した積雪は低温室に保存しておいたしまり雪 (こしもざらめ雪も含む) とざらめ雪で、それぞれ乾いている場合と、含水率で2~8%含水している場合の両方について実験を行った。乾き雪は保存温度(-15°C)を0°C付近(-1~-2°C)に上昇させてから使用した。これは、0°C付近の雪温の積雪表面層に日射が当たる、融雪期の状況を想定したためである。

雪試料表面に入射する放射量は実験の前後に日射計(EKO社, MS-42)によって測定した。その値は0.3~0.4 kW/m<sup>2</sup>程度で、深見<sup>5)</sup>によれば、札幌で1月中旬から2月上旬の晴天時によく観測される値である。なお、ランプの波長特性が日射に近いことから、これ以後はランプの照射を日射と呼ぶことにする。

低温室内の温度は、1±1°Cと0°C近くに保たれたが、日射開始とともに長波長放射の吸収による表面融雪で、雪面は低下していった。そこで測定面は試料内部に設定し、それが融雪によって露出した時点で測定を終えることにした。

なお比較のため、日射を与えたのと同じ雪試料を25°C前後の室内に放置し、日射なしで融雪させる実験も合わせて行った。その際も雪試料の回りは砕氷と断熱材で覆って周囲からの融雪を抑えた。

### 2. 実験結果

#### 1) 日射の有無による融雪時の硬度減少の比較

乾き密度0.396 g/cm<sup>3</sup>、含水率2.2%、硬度1010 gw/cm<sup>2</sup>のぬれしまり雪に日射を与え融雪させた際の、積雪深  $HS$ 、含水率  $W$ 、乾き密度  $\rho_a$ 、硬度  $R$  の時間変化を第5図に●印で示した。積雪表面における平均日射量は、0.33 kW/m<sup>2</sup>であった。同時に、同じ試料を24°Cの室内に日射なしで放置し、顕熱および潜熱伝達により融雪させた結果も図中に×印で示した。測定面は両方とも実験開始時の表面から4.4 cm下に設定し、この位置まで融雪した時点で実験を終

了した。

図中の積雪深  $HS$  の変化に見られるように、日射を与えた場合、日射なしの場合ともに融雪による雪面低下は同様に進行した。含水率  $W$  は日射なしの方が6%程度まで増えた後安定しているのに対し、日射を与えた方は時間とともに増大し12%にまで達した。乾き密度  $\rho_d$  は日射なしの方がほぼ  $0.4 \text{ g/cm}^3$  と一定で大きな変化が見られないのに対し、日射を与えた方では内部融解のため  $0.370 \text{ g/cm}^3$  にまで減少した。硬度  $R$  は、日射を与えた方が時間の経過すなわち日射量(積算量)の増大とともに急激に減少し  $74 \text{ gw/cm}^2$  にまでなったのに対し、日射なしの方は含水率の増加時に硬度は減少しているものの、含水率がほぼ一定になった3時間後位から約  $400 \text{ gw/cm}^2$  で安定した。

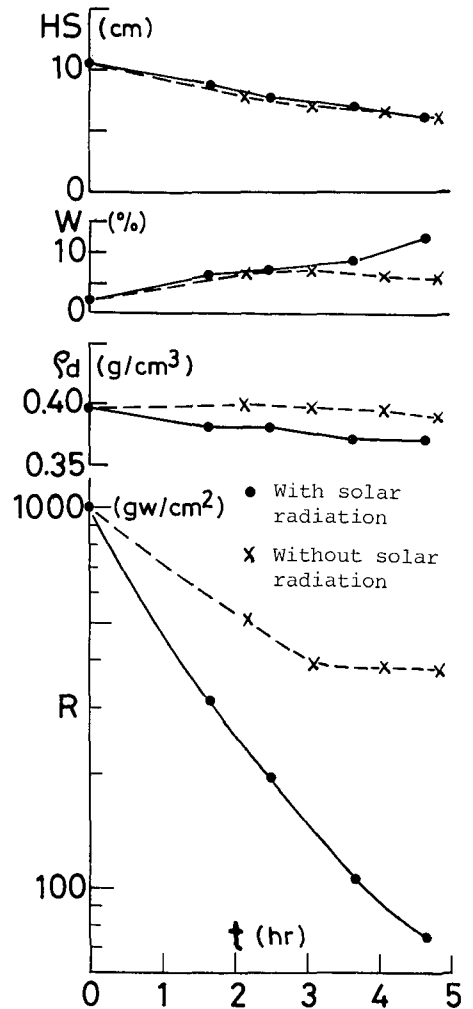
第6図には、この実験に使用した雪試料の測定面から下約  $1.5 \text{ cm}$  間の鉛直アニリン薄片を示した。(a)が実験前で、実験後は、(b)が日射なし、(c)が日射を与えた方である。実験前の(a)では、粒度  $a$ 、 $b$  の雪粒が網目構造を形成して互いに硬く結びついている。この雪が日射なしで融雪した後の(b)では、含水増加によって粒径は全体的に大きくなり、所々雪粒同志の集合したクラスターも見られる。このため空隙の広がったところもあり、(a)に比べて全体的な粒子結合数は減少している。一方、日射を与えた後の(c)では、粒子の球形化と空隙の増大が顕著で、粒径は(a)に比べて大きくなり、全体的な粒子の結合数も、(a)はもちろん(b)に比べても少なくなっ

ている。日射による融雪の方が日射なしでの融雪よりも硬度減少が著しいこと、日射による融雪で乾き密度が小さくなるのがこれら薄片の形態的变化からもうかがえる。

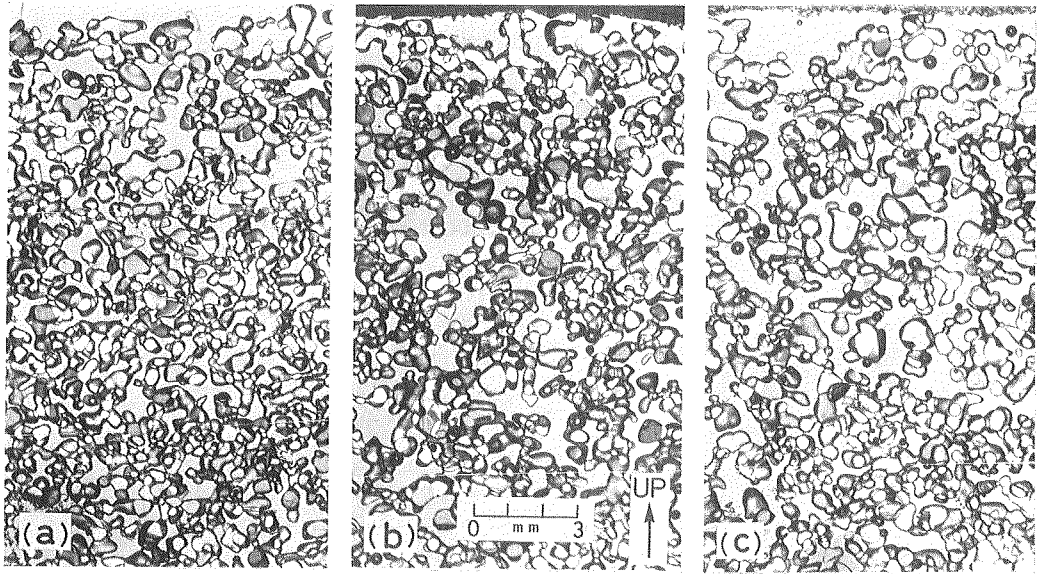
以上のような比較実験はしまり雪とざらめ雪につき、それぞれ4例ずつ行ったが、そのいずれもが上に示したのと同様、日射なしよりも日射を与えた方の硬度減少が大きく、日射融雪後の硬度は顕熱・潜熱伝達融雪後の硬度の80~10%にまで小さくなった。

## 2) 日射による水浸安定硬度の下限値以下への硬度減少

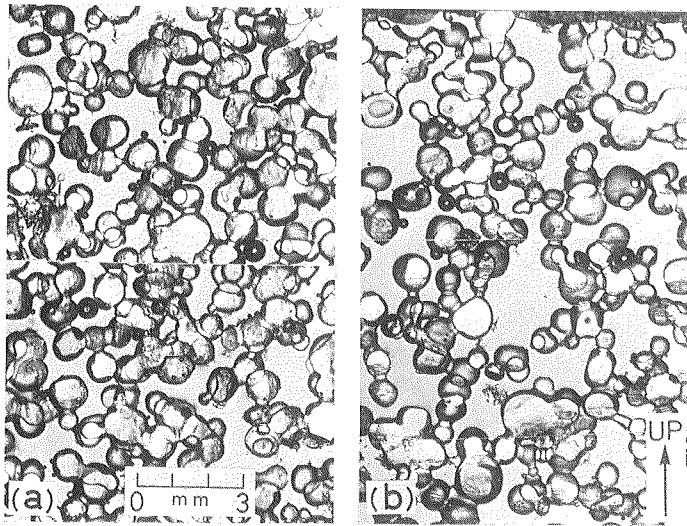
次に、日射によって硬度値が水浸安定硬度の下限値以下になる場合を調べてみた。第3図に示したように、自然状態のぬれ雪の硬度測定値が水浸安定硬度の下限を示す曲線Aを下回った例は数が限られている。また自然積雪内部から採取してきた雪試料に、そのまま日射を与え



第5図 日射融雪(●)と顕熱・潜熱伝達融雪(x)によるしまり雪の積雪深  $HS$ 、含水率  $W$ 、乾き密度  $\rho_d$ 、および硬度  $R$  の時間変化



第6図 実験前後における雪試料鉛直薄片写真  
(a) 実験前, (b) 顕熱・潜熱伝達融雪後, (c) 日射融雪後



第7図 水浸雪の日射照射前後の薄片写真  
(a) 照射前, 表面付近水平薄片  
(b) 照射後, 表面下鉛直薄片

ただで、曲線 A 以下にまで硬度が減少した実験例はなかった。曲線 A は水浸安定硬度の下限であり、小さな値であるから、それ以下に減少するのは特別な場合と考えなければならない。

そこで次のような二つの実験を試みた。第一の実験は、水浸状態にした雪に日射を与える実験である。低温室内に長期保存されこしもざらめ雪に変態した雪を、 $0^{\circ}\text{C}$  の水中に水浸し、水浸安定硬度に達した状態のものを試料とした。乾き密度は  $0.438\text{ g/cm}^3$  で、水浸安定硬度は

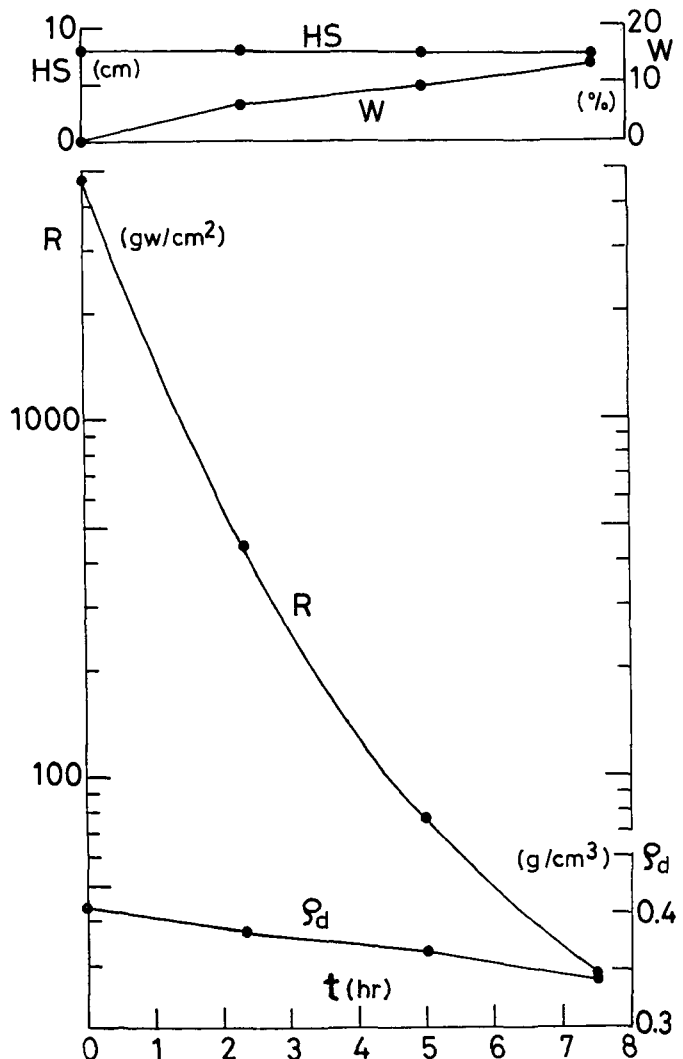


120 gw/cm<sup>2</sup>と曲線 A 付近の値であった。この試料を 0°C に保った水中に水浸したまま、積雪表面における平均日射量 0.39 kW/m<sup>2</sup> を 290 分間照射したところ、乾き密度は 0.412 g/cm<sup>3</sup> と減少し、硬度は 44.1 gw/cm<sup>2</sup> と曲線 A 以下の値となった。この変化を第 3 図中に破線 B と ×印で示したが、密度の減少とともに、試料の硬度は曲線 A 以下にまで減少した。すなわち、日射によって、含水だけではなりえない小さな硬度値に達したことになる。

この実験試料のアニリン薄片写真を第 7 図に示した。(a) は日射照射前の表面付近の水平薄片で、水浸安定硬度に達した雪は組織が等方的であるから鉛直薄片と大きな差異はない。これを見ると、雪粒は水浸した積雪に特徴的な、粗大化し球形化した形態をしているが、粒子結合はかなり残っている。(b) の方は日射照射後の鉛直薄片で、試料の表面から下約 1.5 cm の部分である。(b) は (a) に比べて空隙が多く、わずかな粒子結合によって組織が保たれている。このような日射による積雪の組織変化によって、密度の減少とともに、硬度が曲線 A 以下に減少したものと解される。

第二の実験は表面融雪を抑制して、同じ積雪が長時間日射を受け内部融解するように行った実験で、その例を第 8 図に示す。長波長放射による表面融雪は 1 cm 程度の氷の板を雪試料表面にのせることで抑えた。氷の板は融解しきる前に次々と新しいものと交換したため、7 時間半にわたる照射の間の表面融雪は 0.5 cm に抑えられた。測定面は実験開始時の表面から 0.5 cm 下にとった。

試料は密度 0.405 g/cm<sup>3</sup> の乾きざらめ雪で、積雪表面における日射量は 0.38 kW/m<sup>2</sup> であった。第 8 図に示したように、表面融雪を抑えたため、内部融解により乾き密度  $\rho_d$  は時間とともに 0.341 g/cm<sup>3</sup> まで減少した。硬度  $R$  は時間とともに急激



第 8 図 表面融雪を抑えて日射を照射した際のざらめ雪の積雪深  $HS$ 、含水率  $W$ 、乾き密度  $\rho_d$  および硬度  $R$  の時間変化

に減少し、最終的には、第3図中の破線Cと×印で示したように水浸安定硬度の下限以下の  $28 \text{ gw/cm}^2$  まで減少した。

このように、自然状態のぬれ雪の硬度が水浸安定硬度の下限以下になるのは、特殊な条件が加わった場合に限られる。水浸状態の雪のように日射以外の条件ですでにその組織状態が脆弱化して硬度値が曲線A付近に達している場合や、氷板などによって長波長放射による表面融雪が抑えられ、そこに長時間日射が照射された場合には、日射によって硬度値が曲線A以下に小さくなりうることを示された。

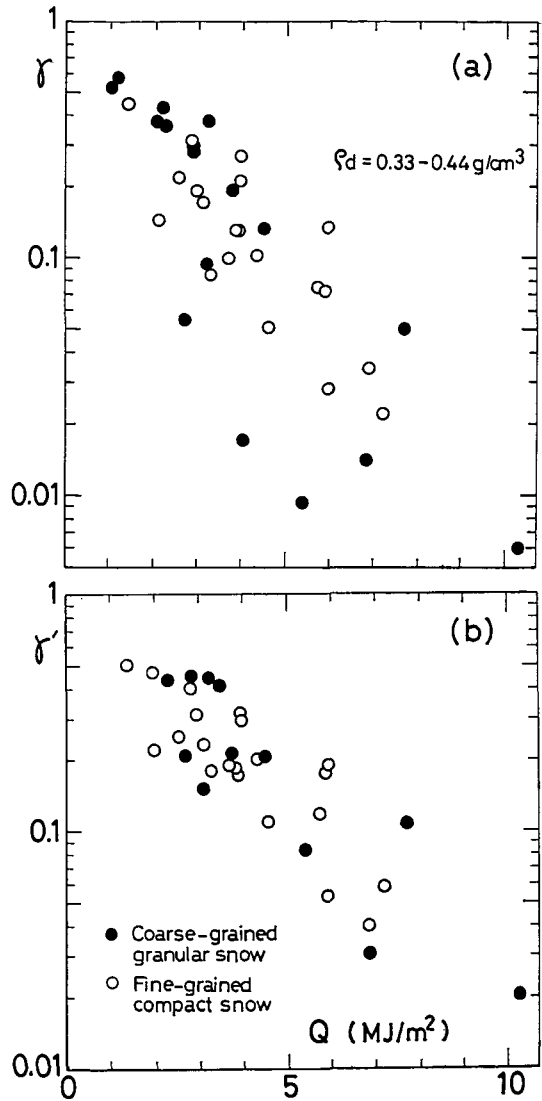
### 3) 日射量と硬度変化量の関係

日射による硬度変化を調べる実験では、試料の雪質、照射前の含水の有無、実験条件としての表面融雪の抑制の有無など種々の場合について行った。14回の実験のすべての場合に、雪試料は日射によって硬度が減少した。そこで、日射量と日射前後の硬度変化量の関係について調べてみた。

第9図(a)に、雪面における日射量  $Q$  (積算量) と、日射前後における雪の硬度比  $\gamma$  の関係を示した。日射前の雪の温度が  $0^\circ\text{C}$  より低い場合には、対馬の式<sup>2)</sup>によって  $0^\circ\text{C}$  の値に換算した。図中の●印がざらめ雪を、○印がしまり雪を表わしている。実験前の乾き密度  $\rho_d$  は、 $0.33 \sim 0.44 \text{ g/cm}^3$  の範囲内にあった。図には

実験途中での測定値も含んでいる。この第9図(a)は、日射量  $Q$  が増えるにつれ、硬度比  $\gamma$  が指数関数的に小さくなることを示している。また、雪質による違いは見られない。日射量が約  $5 \text{ MJ/m}^2$  で、雪の硬度は日射前のおよそ  $1/10$  に減少した。

しかし、日射を受けることによって、雪試料の密度や含水率も変化する。含水率の増大と密度の減少は、両方とも硬度を減少させる働きをする。もし、日射前の雪試料の硬度を、密度と含水率の変化分だけ補正できれば、日射の影響がより明瞭となるはずである。和泉・秋田谷<sup>1)</sup>



第9図 日射照射前後における硬度比  $\gamma$  と雪面における日射量  $Q$  (積算量) との関係

$\gamma'$  は照射前の硬度を日射による含水率と乾き密度の変化分補正して得られた硬度比

●: ざらめ雪, ○: しまり雪

によって求められた、ぬれ雪の木下式硬度  $R$  と乾き密度  $\rho_a$ 、含水率  $W$  の関係を表わす回帰式を使い、日射前の硬度を日射による密度および含水率の変化分だけ補正し、その硬度から求めた硬度比  $R'$  と雪面における日射量  $Q$  (積算量) の関係を第9図(b)に示した。

実験途中で、含水率と乾き密度が測定されなかったものを除いたので、第9図(a)よりも測定例は少なくなっているが、日射量が増えるにしたがって硬度比が指数関数的に減少することは、第9図(a)よりも明瞭にあらわれている。この場合、硬度に及ぼす日射の影響は、主として雪粒同志の結合部における結晶粒界を選択的に融解することと考えられるが、含水や密度変化による影響を除いても、この日射の影響は大きい。

#### IV. ま と め

積雪を0°Cの水に浸した際と、積雪に人工的な日射を照射し融雪させた際の硬度変化を調べた結果、次のことが明らかになった。

- 1) 水浸直後、硬度は急速に減少するが、水浸後3時間以内には雪質によらずほぼ一定の硬度(水浸安定硬度)になる。
- 2) 水浸安定硬度には乾き密度に対応した下限値があり、この下限値は乾き密度とともに増大する。
- 3) ほぼ同じ雪面低下でも、日射融雪後の硬度は同じ雪による顕熱・潜熱伝達融雪後の硬度の80~10%の小さい値となる。
- 4) 日射前にすでに硬度が水浸安定硬度の下限値付近の小さな値になっている場合や、表面融雪が抑えられ長時間日射が同じ表面に照射された場合には、日射によって硬度値が水浸安定硬度の下限値以下になりうる。
- 5) 日射量が増大するにつれ、日射前の硬度に対する日射後の硬度の比は指数関数的に減少し、硬度減少に及ぼす日射の影響は大きい。

終りに、本研究を進めるに当たり、多くの示唆、助言をいただいた雪害科学部門秋田谷英次助教授、融雪科学部門石川信敬博士、本論文を校閲していただいた雪害科学部門藤岡敏夫教授に心から感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 和泉 薫・秋田谷英次 1982 ぬれ雪の硬度. 低温科学, 物理篇, **41**, 90-97.
- 2) 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.
- 3) 対馬勝年 1974 湿雪の硬度. 第11回災害科学総合シンポジウム講演論文集, 265-266.
- 4) 若浜五郎・中村 勉・遠藤八十一 1968 積雪内における融雪水の移動 II. 低温科学, 物理篇, **26**, 53-76.
- 5) 深見浩司・小島賢治 1980 積雪の内部昇温. 低温科学, 物理篇, **39**, 109-117.

### Summary

It was reported in the previous paper<sup>1)</sup> that Kinoshita's hardness of wet snow decreases with an increase in free water content for the same dry density. According to this relationship, the hardness of wet snow should have the minimum value when the pore space in snow is filled with water. With relation to problems such as the release of a wet snow avalanche, it is important to have the knowledge of the changing process of hardness and the minimum value of it for a dry density when the snow contains free water. So, a change in Kinoshita's hardness of natural snow was measured in a cold room at  $1 \pm 1^\circ\text{C}$ , when it was immersed in water at  $0^\circ\text{C}$ .

Hardness  $R$  of the immersed snow rapidly decreased immediately after the immersion and then came to reach a nearly constant value at least within three hours (Fig. 1). This constant hardness which is indicated by  $R_s$  in Fig. 1 might be termed a stable hardness when snow is saturated with water. This tendency of change in hardness was found in all of the 122 samples independent of the snow type and water content before the immersion.

The relation between stable hardness  $R_s$  and dry density  $\rho_d$  before the immersion is shown in Fig. 2. The lower limit of  $R_s$  is found in Fig. 2, as indicated by curve A. Figure 3 shows the relation between hardness  $R$  and dry density  $\rho_d$  of natural wet snow not saturated with water (plus four plots, denoted by  $\triangle$ , of natural fine-grained compact snow saturated with water), together with curve A. This curve nearly represents the lower limit of hardness of natural wet snow.

In case of samples of wet snow not saturated with water in Fig. 3, several values of hardness are smaller than the lower limit (curve A) of stable hardness of water-saturated samples for the same dry density. These values were measured at the surface snow layers. Therefore, it is considered that this decrease in hardness to below curve A was brought about by solar radiation.

To examine the above an artificial solar radiation consisting of long and short waves was supplied on the upper surface of natural snow, and a change in hardness was measured in a cold room at  $1 \pm 1^\circ\text{C}$ . The experimental apparatus is shown in Fig. 4. Snow samples were 20 cm in length, 20 cm in width and 6~17 cm in height. The amount of the solar radiation supplied was  $0.3 \sim 0.4 \text{ kW/m}^2$  at the snow surface. Because surface melting due to the absorption of long-wave solar radiation lowered the snow surface, the measurement level was taken several centimeters below the snow surface before the solar radiation was supplied. The experiment was continued till this level was exposed as the snow surface.

An example of the result of the experiment is shown in Fig. 5. Shown also in Fig. 5 for comparison are plots of hardness change of the same snow sample which also melted from the snow surface due to the sensible and the latent heat transfer in the absence of solar radiation. The snow sample was wet fine-grained compact snow, which had the free water content  $W$  and dry density  $\rho_d$  of 2.2% and  $0.396 \text{ g/cm}^3$ , respectively. Despite the same decrease in snow height  $HS$  with the lapse of time  $t$ , hardness  $R$  maintained a constant value after the initial decrease in the absence of solar radiation, and rapidly decreased in the presence of it. Shown in Fig. 6 (a), (b) and (c) are microscopic snow textures of vertical thin sections about 1.5 cm below the level of measurement, before solar radiation, after melting in the absence of solar radiation and after melting in the presence of it, respectively. From Fig. 6,

it can be seen that the decrease in snow hardness is related greatly to the decrease in the number of bonds between ice grains. In all the comparative experiments such as Fig. 5, hardness after melting due to solar radiation decreased to 80~10% of that after melting due to the sensible and the latent heat transfer with the nearly same descent in the snow surface.

Snow hardness could decrease to below curve A by solar radiation only in the following two cases: One is the case that snow hardness before the supply of solar radiation has already been small enough to be near this curve. An example of this case is shown by the marks ( $\times$ ) and dashed line B in Fig. 3. The sample was the snow immersed in water which had a small stable hardness. By the total amount of solar radiation of  $6.7 \text{ MJ/m}^2$ , the hardness of this sample decreased to below this curve. Thin sections before and after the experiment are shown in Fig. 7 (a) and (b), respectively.

The other is the case that it is possible for a snow sample to be supplied with solar radiation on the surface for a long time by setting on the snow surface an ice plate which restrains the surface from melting under the plate. An example of this case is shown in Fig. 8. The sample was the dry coarse-grained granular snow, the hardness  $R$  of which decreased to below curve A as shown by the marks ( $\times$ ) and dashed line C in Fig. 3 by solar radiation of  $0.38 \text{ kW/m}^2$  for 7.5 hours.

In all the experiments it was observed that snow hardness decreased by solar radiation. Then it is shown in Fig. 9(a) that the ratio  $\gamma$  of hardness after solar radiation to hardness before it decreases exponentially with an increase in total amount of solar radiation  $Q$  independent of the snow type. It can be seen from Fig. 9(a) that snow hardness before solar radiation decreases to about 1/10 when  $Q$  amounts to  $5 \text{ MJ/m}^2$ .

Not only hardness  $R$  but also dry density  $\rho_d$  and free water content  $W$  of snow samples changed by solar radiation, as shown in Figs. 5 and 8. In order to indicate the influence only of solar radiation on hardness, the correction of hardness before solar radiation was made for these changes in  $\rho_d$  and  $W$  using the relation<sup>1)</sup> among  $R$ ,  $\rho_d$  and  $W$  of wet snow. The relation between  $Q$  and the ratio  $\gamma'$  of hardness after solar radiation to this corrected hardness is shown in Fig. 9(b). It is seen that  $\gamma'$  decreases exponentially with an increase in  $Q$ , and when it is compared with Fig. 9(a) snow hardness decreases mainly as a result of the influence of solar radiation itself, considered to be short-wave solar radiation which melts selectively the grain boundaries in bonds between ice grains within snow.