



Title	ぬれ雪の硬度
Author(s)	和泉, 薫; 秋田谷, 英次
Citation	低温科学. 物理篇, 42, 81-87
Issue Date	1984-03-05
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/18484">http://hdl.handle.net/2115/18484</a>
Type	bulletin (article)
File Information	42_p81-87.pdf



[Instructions for use](#)

## ぬれ雪の硬度 II\*

和泉 薫

(新潟大学積雪地域災害研究センター)

秋田谷 英次

(低温科学研究所)

(昭和58年10月受理)

### I. ま え が き

前回の報告<sup>1)</sup>で、ぬれ雪の木下式硬度  $R$  は、含水率  $W$  と乾き密度  $\rho_d$  によって次式のように表わされることを明らかにした。

$$\log R = a - bW + c\rho_d \quad (a, b, c \text{ は係数}) \quad (1)$$

したがって、乾き密度が同じであれば、含水率が多くなるにつれて硬度は減少することになる。この傾向自体はこれまでもいくつか報告<sup>2,3)</sup>されているので、全体的にはこの傾向にあることは確かと言える。ところが、積雪中のひとつのぬれ雪層に着目し、硬度と含水率を時間を追って測定したところ、この全体的傾向と異なる結果が観測された。

また前回の報告で、乾きざらめ雪をほぐした雪の含水前後の硬度変化は、含水前の雪試料の焼結状態に影響を受けることを述べた。そこで、このことをさらに検討するため、しまり雪とざらめ雪の二種類の雪をほぐした後一定温度で焼結させ、その組織状態の差による含水前後の硬度変化の違いについて調べた。

今回は、これらの結果について報告する。

### II. ぬれ雪の硬度と含水率の全体的傾向と異なった関係

北海道と新潟県において、積雪中から選んだぬれざらめ雪層の木下式硬度  $R$  と含水率  $W$  を、約一日間、時間を追って測定した結果のうちから3例を第1図に示した。第1図の  $R$  は対数目盛である。

第1図の b) は、1982年2月18~19日に長岡で測定した平均乾き密度  $\bar{\rho}_d$  が  $0.321 \text{ g/cm}^3$  のぬれざらめ雪層の例である。この場合は含水率が時間とともに増加→減少→増加と変化したのに対し、硬度は反対に減少→増加→減少しており(1)式にしたがっている。これに対して a) は b) と同じ日時、場所で測定した  $\bar{\rho}_d = 0.368 \text{ g/cm}^3$  のぬれざらめ雪層の例であるが、含水率と硬度の増減傾向が時間的にはほぼ一致して起っている。これは(1)式と異なった関係である。また c) は1983年3月31日~4月1日に間寒別で測定した  $\bar{\rho}_d = 0.460 \text{ g/cm}^3$  のぬれざらめ雪層の例で、

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第2604号

中央付近では(1)式にしたがう変化をしているが、その前後では含水率と硬度の増加、減少は同じ傾向を示し、(1)式にしたがっていない。

このように、ひとつのざらめ雪層を経時的に細かく測定すると、時間経過に伴ない硬度と含水率の関係が(1)式のような全体的傾向と逆になる場合も起ることがわかった。

そこで、このような場合の起こる条件を調べるため、低温室内において、ざらめ雪の形成条件、水分の供給条件等を変えて硬度と含水率の経時変化を測定した。その結果、(1)式にしたがう場合の他に、上述のような硬度と含水率の時間的増減傾向が一致する場合もあることが確かめられた。しかし、その生起条件を明確にすることはできなかった。

このようなぬれ雪の硬度の時間的変化は、ぬれ雪の変態が早いため、積雪を構成している雪粒の結合状態が含水変化により短時間に変化することによると考えられる。よってこの現象を詳しく検討するためには、薄片や顕微鏡下でのぬれ雪の内部組織の観察が必要とされる。

なお、(1)式は異なった場所、時間で測定した多数の測定値を近似した結果でバラツキが大きい。このような全般的傾向と異なった硬度と含水率の時間変化もそれに寄与していると考えられる。

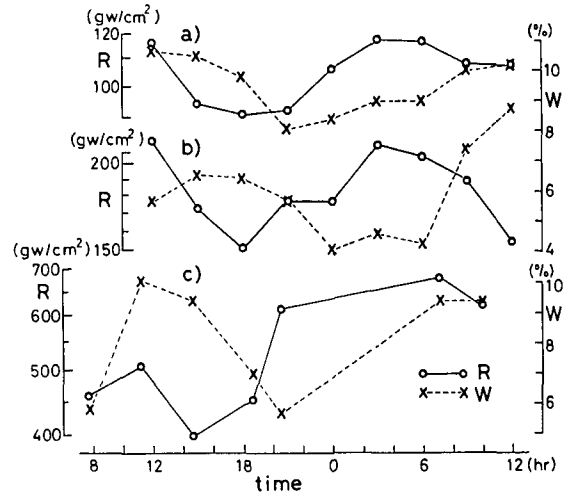
### III. 含水による硬度変化の雪の組織依存

#### 1. 測定試料および測定方法

低温室に保存しておいたしまり雪とざらめ雪の二種類の雪を、それぞれ篩でばらばらにほぐして箱に充填し、一定温度で焼結させ、その焼結時間を変えることによって雪粒同志の結合状態が異なる試料を作成した。

保存しておいたしまり雪を篩でほぐした雪粒は1 mm以下の細かい粒径となった。ざらめ雪の方は、2.83 mm目の篩でほぐした後0.84 mm目の篩で細かい粒子を除いて比較的荒い粒径の雪とした。これら雪試料の乾き密度 $\rho_d$ は充填の差により作成のつど多少異なったが、平均値はしまり雪\*で $0.425 \text{ g/cm}^3$ 、ざらめ雪\*で $0.525 \text{ g/cm}^3$ であった。焼結温度はしまり雪で $-12^\circ\text{C}$ 、ざらめ雪で $-10^\circ\text{C}$ とほぼ同じであった(\*以後ほぐした雪もほぐす前の雪質で呼ぶことにする)。

含水前の硬度を測った後、これら雪試料を $0^\circ\text{C}$ の水に10秒間浸して引き上げ、余分な水を脱落させ、一定の含水率を保った状態で、引き上げ後5分から180分の間の硬度と含水率を時



第1図 ぬれざらめ雪層の木下式硬度  $R$  と含水率  $W$  の時間変化

- a) 1982年2月18~19日, 長岡, 平均乾き密度  $\bar{\rho}_d = 0.368 \text{ g/cm}^3$
- b) 1982年2月18~19日, 長岡,  $\bar{\rho}_d = 0.321 \text{ g/cm}^3$
- c) 1983年3月31日~4月1日, 間寒別,  $\bar{\rho}_d = 0.460 \text{ g/cm}^3$

間を追って測定した。

## 2. ほぐした雪の硬度と焼結

### 時間の関係

しまり雪とざらめ雪をそれぞれほぐした雪試料の含水前の木下式硬度  $R_{-5}$  (対馬の式<sup>4)</sup> で  $-5^{\circ}\text{C}$  に換算) と焼結時間  $T$  の関係を第2図に示した。これによると、 $R_{-5}$  と  $T$  の関係は、 $a, b$  を係数とする次の式で表わされる。

$$R_{-5} = aT^b \quad (3)$$

図から、この係数  $a, b$  はどちらもざらめ雪よりもしまり雪の方が大きい。すなわち、ざらめ雪よりも粒径の小さいしまり雪の方が、硬度の値は大きく、かつ硬度の焼結時間による増加の割合が大きくなっている。

ところで、黒岩<sup>5)</sup> は小さな氷球同志の接触部の半径  $x$  と氷球の半径  $R$  の比  $x/R$  の焼結による増加と焼結時間の関係を調べ、焼結のマイクロ機構を決定しようとした。これによれば、一定温度における  $x/R$  と焼結時間  $T$  の関係は、(3) 式の  $R_{-5}$  の代わりに  $x/R$  を入れた関係式を満たし、氷球の半径  $R$  が小さい程、 $x/R$  の値は大きく、かつ  $x/R$  の焼結時間による増加の割合も大きいという結果が得られている。

木下式硬度は、雪粒間の結合部を破壊するためのエネルギーの大小に密接に関係しているから、焼結が進行して雪粒同志の結合部が太って強くなると、積雪としての硬度もそれに応じて増加する。すなわち、第2図は粒径の効果も含めて黒岩の結果をよく表わしている。このことから、硬度は粒径や雪粒間の焼結状態をよく反映していること、破壊試験のため雪試料は含水実験毎に作られているがそれらは比較的均等であることが確かめられる。

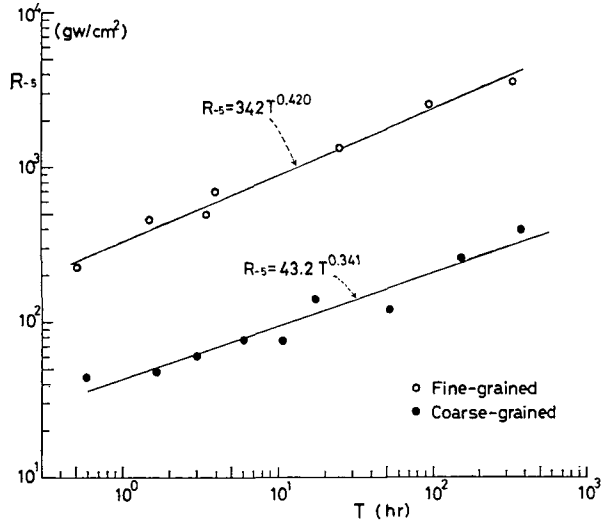
### 3. 含水前後の硬度変化と焼結時間の関係

上述の雪試料を  $0^{\circ}\text{C}$  の水に浸し、引き上げた後の硬度と含水率の変化を測定した結果の一例を、しまり雪、ざらめ雪についてそれぞれ第3図の a), b) に示した。

第3図からわかるように、含水率がほぼ一定に保たれた状態で、木下式硬度  $R$  ( $\text{gw}/\text{cm}^2$ ) は引き上げてからの時間  $t$  (min) の経過にしたがい徐々に増加している。この関係は  $\alpha, \beta$  を係数とする次の式で近似される。

$$R = \alpha t^{\beta} \quad (4)$$

前回の報告<sup>1)</sup> では、この関係を、硬度が時間とともに指数関数的に増大するとして  $a, b$  を係数に次式で近似した。



第2図 ほぐした雪の  $-5^{\circ}\text{C}$  での木下式硬度  $R_{-5}$  と焼結時間  $T$  の関係

○; しまり雪, 粒径  $\phi < 1$  mm  
●; ざらめ雪,  $0.84 < \phi < 2.83$  mm

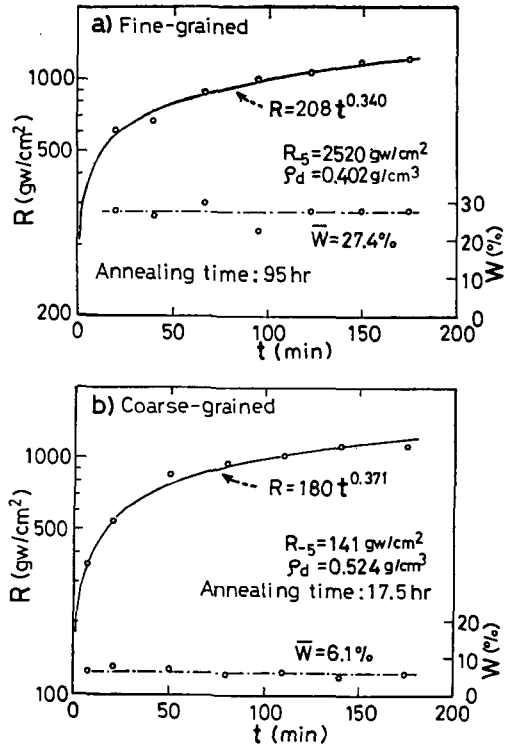
$$R = ae^{bt} \tag{5}$$

$t$  が 20~180 分位では (4), (5) 式とも大差はないが, 5 分程度以内の短い時間や, 1500 分程度にまで長い時間経過した場合には, (5) 式は測定値から大きくはずれる。そこで (5) 式より近似のよい (4) 式を採用することにした。

第 3 図に示したように, 硬度は含水により大きく変わり, その後時間の経過とともに徐々に増加している。雪害に関連した積雪の強度という観点からすると, この含水直後の大きく変化した時の硬度が重要である。しかし直後の値は測定が難しいため,  $t$  が 5~180 分間の硬度測定値によって求められる (4) 式の  $\alpha$  の値をもって含水直後の硬度とした。この  $\alpha$  は  $t$  が 1 分の時の硬度である。

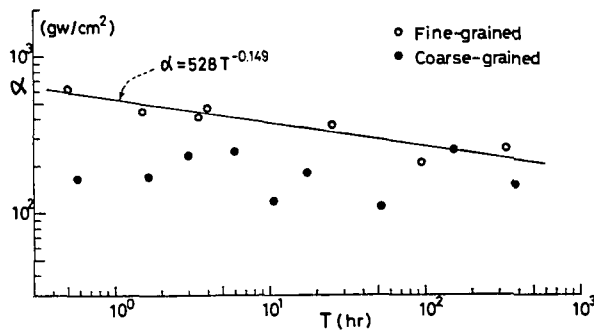
含水直後の硬度  $\alpha$  と含水前の焼結時間  $T$  との関係を図 4 に示した。この図から, しまり雪では, 焼結時間が長く雪粒間の結合状態が発達するにつれ, 含水直後の硬度はむしろ小さくなるのがわかる。この関係は図中に示したように (3) 式と同じ形の式で表わされる。一方, ざらめ雪では, バラツキが大きいので明確ではないが, 含水直後の硬度は焼結時間すなわち雪粒間の結合状態に関係なくほぼ一定の傾向にある。これらのことは, 雪粒間の結合状態の含水による変化のためと考えられるが, 詳しい機構はあきらかでない。

第 3 図と第 4 図とから, 含水前後の硬度



第 3 図 ほぐした雪の含水後の木下式硬度  $R$  と含水率  $W$  の時間変化

- $\rho_d$ : 乾き密度
- $R_5$ : 含水前の  $-5^\circ\text{C}$  における硬度
- a) しまり雪, 95 時間焼結 ( $-12^\circ\text{C}$ )
- b) ざらめ雪, 17.5 時間焼結 ( $-10^\circ\text{C}$ )

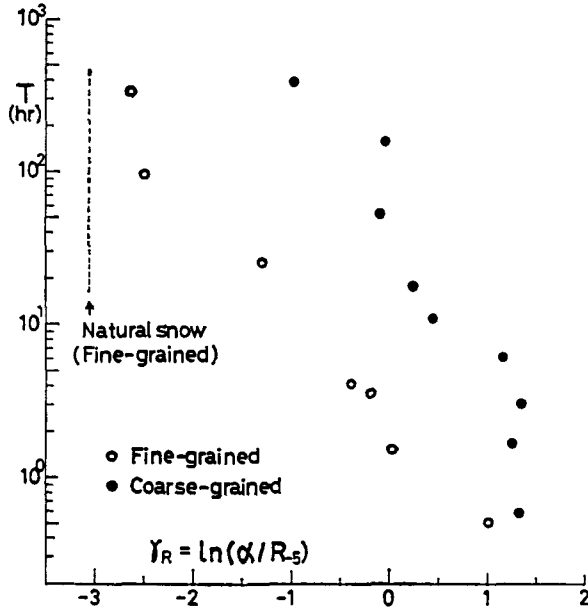


第 4 図 ほぐした雪の含水直後の木下式硬度  $\alpha$  と焼結時間  $T$  の関係  
○; しまり雪, ●; ざらめ雪

変化は含水前の雪の組織状態によって大きく変わることが考えられる。そこで、 $-5^{\circ}\text{C}$ に換算した含水前の硬度  $R_{-5}$  と含水直後の硬度  $\alpha$  によって含水前後の硬度変化  $\gamma_R$  を次のように表わし、

$$\gamma_R = \ln(\alpha/R_{-5}) \quad (6)$$

この  $\gamma_R$  と焼結時間  $T$  の関係を第5図に示した。



第5図 ほぐした雪の含水前後の硬度変化  $\gamma_R$  と焼結時間  $T$  の関係

○; しまり雪, ●; ざらめ雪

$\gamma_R = \ln(\alpha/R_{-5})$

$\alpha$ ; 水から引き上げ1分後の硬度

$R_{-5}$ ;  $-5^{\circ}\text{C}$ に換算した含水前の硬度

この図から、ざらめ雪で  $\alpha$  の影響 (第4図) による値のバラツキはあるものの、しまり雪とざらめ雪の  $\gamma_R$  は、それぞれ焼結時間  $T$  の対数と負の直線関係をなすことがわかる。焼結時間が短く雪粒間の結合が発達していない雪では、含水によってかえって硬度が増大 ( $\gamma_R > 0$ ) している。ざらめ雪は、焼結時間による  $\gamma_R$  の変化がしまり雪より小さいので、焼結時間が数十時間位までこの傾向にある。これに対してしまり雪では、この傾向は焼結時間がわずか数時間で含水により硬度が減少する傾向 ( $\gamma_R < 0$ ) に変わり、焼結時間が増し雪粒間の結合が発達するほどこの硬度減少の割合が大きくなっている。そして焼結時間が数百時間にも達すると、焼結が十分に進行したほぐす前のしまり雪 ( $\rho_d = 0.320 \text{ g/cm}^3$ ) の含水前後の硬度変化と同程度になっている。

#### IV. ま と め

自然状態のぬれ雪の硬度と含水率の経時変化を調べた。また低温室内で、ほぐした雪の含水による硬度変化の実験を行った。その結果、次のことが明らかになった。

1) ぬれ雪の硬度は含水率が增加(減少)するにしたがい減少(増加)するという全体的傾向があるが、同一のぬれざらめ雪で、これとは逆に硬度と含水率の時間的増減傾向が一致する現象が自然状態でも低温室内実験でも認められた。

2) ほぐした雪を一定温度で焼結させる過程で、木下式硬度  $R$  と焼結時間  $T$  との間に  $a$ ,  $b$  を係数とする次の関係式が成り立った。

$$R = aT^b$$

係数  $a$ ,  $b$  の値は両方とも、ほぐした雪の粒径の小さい方が大きかった。

3) ほぐした雪を  $0^\circ\text{C}$  の水に浸して引き上げた後一定含水率を保った場合の木下式硬度  $R$  ( $\text{gw}/\text{cm}^2$ ) と引き上げ後の経過時間  $t$  ( $\text{min}$ ) との関係は、 $\alpha$ ,  $\beta$  を係数とする次の関係式の方がよりよく近似していた。

$$R = \alpha t^\beta$$

4) この関係式から求まる  $\alpha$  (引き上げ1分後の  $R$  の値) を含水直後の硬度とすると、 $\alpha$  は、ほぐしたざらめ雪の場合含水前の焼結時間によらずほぼ一定であったが、ほぐしたしまり雪では焼結時間の増大によりむしろ減少する傾向が見られた。

5) 2), 4) の結果から含水前後の硬度変化は、含水前の雪の組織状態によって大きく異なった。焼結時間が短く雪粒結合の発達した雪では含水により硬度はかえって増大し、焼結時間が長く雪粒結合の発達した雪は含水により硬度は減少した。ほぐしたざらめ雪よりほぐしたしまり雪の方が、短い焼結時間で前者から後者へ傾向が変わり、焼結時間による硬度変化の増加の割合も大きかった。

終りに、この研究に御協力下さった、低温科学研究所雪害科学部門の方々、新潟大学積雪地域災害研究センター雪氷技術部門の方々に深く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 1974 湿雪の硬度. 第11回災害科学シンポジウム講演論文集, 265-266.
- 3) 秋田谷英次・遠藤八十一 1981 北海道における融雪期の積雪特性. 低温科学, 物理篇, **40**, 51-59.
- 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) 黒岩大助 1960 積雪の Ice-Bonding にともなう弾性率, 内部摩擦の変化ならびに氷の焼結機構に関する研究. 低温科学, 物理篇, **19**, 1-36.

## Summary

In the previous paper<sup>1)</sup> the authors reported on the relationship between Kinoshita's hardness, free water content and dry density of wet snow, which shows that hardness of wet snow decreases (increases) with an increase (decrease) in free water content for the same dry density. For several layers of wet granular snow in a natural snow cover, measurements were made of Kinoshita's hardness and free water content at intervals during one day or so. And it was found that hardness  $R$  and free water content  $W$  occasionally show a tendency to vary in the same manner as shown in Fig. 1-a and 1-c (except the middle part), in addition to the

general tendency according to the relationship mentioned above as shown in Fig. 1-b. This tendency opposed to the general one was also found at times in similar measurements in a cold room using wet granular snow made artificially.

A change in Kinoshita's hardness of snow between before and after supplying water was measured in a cold room. Two kinds of snow samples, fine-grained snow (grain size:  $\phi < 1$  mm) and coarse-grained snow ( $0.84 < \phi < 2.83$  mm), were prepared by crushing fine-grained compact snow and granular snow respectively and by redepositing them. And each sample was annealed at about  $-10^{\circ}\text{C}$  for different periods of time. Then, its hardness was measured. Subsequently, the annealed snow sample was supplied with water at  $0^{\circ}\text{C}$  to the extent that water infiltrated into the body of snow sufficiently. After surplus water fell out from it, measurements were made of hardness again at regular intervals, keeping free water content constant. The following results were obtained:

1) The relationship between  $R_{-5}$ , Kinoshita's hardness at  $-5^{\circ}\text{C}$ , and annealing time  $T$  before supplying water is given by the following formula (Fig. 2):

$$R_{-5} = aT^b$$

where  $a$  and  $b$  are coefficients. Both were larger for fine-grained snow than for coarse-grained snow. This formula has the same form as the formula giving the relationship between growth of intergrain bonding of small ice spheres and annealing time, including the effect of grain size. Therefore it can be considered that hardness before water is supplied reflects the degree of intergrain bonding of a snow sample.

2) The relationship between hardness  $R$  ( $\text{gw}/\text{cm}^2$ ) and lapse time  $t$  (min.) after the supply of water with free water content  $w$  (%) maintained almost constant is given by the following formula (Fig. 3):

$$R = \alpha t^{\beta}$$

where  $\alpha$  and  $\beta$  are coefficients. It regressed closely than the multiple regression formular obtained in the previous paper<sup>1)</sup>, particularly within five minutes and a long lapse time afterward.

3) Let us consider the value  $\alpha$  ( $R$  at  $t=1$  min.) of hardness one minute after water was supplied. Using  $R_{-5}$  and  $\alpha$ , a change in hardness of snow between before and after supplying water,  $\gamma_R$ , was represented as  $\gamma_R = \ln(\alpha/R_{-5})$ . From Fig. 5, which shows the relationship between  $\gamma_R$  and  $T$ , it is found that  $\gamma_R$  depends upon the snow texture before water was supplied. In case that  $T$  is short, i. e. the intergrain bonding is not yet developed,  $R$  increases rather as a result of a water supply. On the contrary, when  $T$  is long, i. e., the intergrain bonding is considerably developed,  $R$  decreases as a result of a water supply. The duration of  $T$  causing a shift from the former to the latter and a resultant decrease in  $\gamma_R$  with increasing  $T$  depend upon the grain size.