



Title	ぬれ雪の硬度
Author(s)	和泉, 薫; IZUMI, Kaoru; 秋田谷, 英次 他
Citation	低温科学. 物理篇, 41, 89-97
Issue Date	1983-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18460
Type	departmental bulletin paper
File Information	41_p89-97.pdf



ぬれ雪の硬度*

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57年10月受理)

I. ま え が き

北陸地方では、冬期、気温が比較的高いので、降水のうち雨や水を含んだ雪の占める割合が多く、かつ堆積後に融雪によって、温暖変態が進みやすい条件下にある。このため、厳冬期でも、積雪は多少とも水を含んでいることが一般的である。また融雪期ともなれば、北陸地方のみならず、北海道のような寒冷地においても、積雪は全層水を含むことになる。

積雪の力学的性質は、密度や雪の組織や雪温ばかりでなく、こうした含水の如何によっても、大きく影響される。ところが、従来の積雪の力学的性質に関する研究は、ほとんど 0°C 以下の、乾いたしまり雪を対象としてきた。このため、湿雪雪崩の発生、暖候地積雪の除排雪等にも関連する、ぬれ雪の力学的性質の研究が必要とされている。

そこで本報告では、自然積雪の種々の含水率をもつぬれ雪の硬度を調べるとともに、低温室内で、乾き雪を含水させた場合の硬度の時間変化を調べたので、その結果について述べる。

II. ぬれ雪の硬度と密度・含水率との関係

ぬれ雪の調査は、1982年1~4月に新潟県の長岡、新潟等(以下単に新潟と呼ぶ)において、及び1982年3月に北海道の札幌、長沼(以下単に北海道と呼ぶ)において行なった。調査地では積雪断面を作成し、ぬれ雪の密度、硬度、含水率を測定した。硬度の測定には木下式硬度計¹⁾を、含水率の測定には筆者の一人、秋田谷が考案した熱量式含水率計²⁾を用いた。

北海道における二カ所の調査は、数日に亘る連続観測であったが、融雪期の水を含んだ積雪は、水道などにより不均一性が大きいため、同一地点でも、積雪断面を掘り進めることによって、種々の密度、含水率のぬれ雪の硬度を測定することができた。

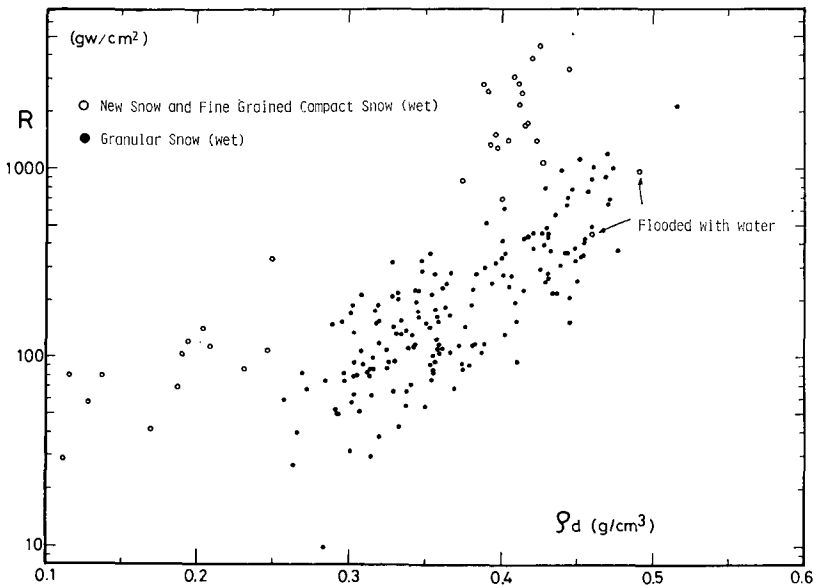
調査したぬれ雪の木下式硬度(R)と乾き密度(ρ_d)の関係を第1図に示した(ぬれ雪の密度を ρ 、含水率を $W(\%)$ としたとき、乾き密度 ρ_d は $\rho - \rho W/100$ であらわされる)。ぬれ雪の雪質を新雪・しまり雪(○印)と、ざらめ雪(●印)に分けて示してある(以下特にことわらない限り、対象とする雪はすべてぬれ雪であるので、雪質の前につける「ぬれ」の字をはぶく)。新雪・しまり雪については、新潟での測定のみで、北海道のものはない。図中には種々の含水

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2488号

率のぬれ雪を、一括して載せてあるが、次のことを知ることができる。

まず、新雪・しまり雪とざらめ雪とでは、その分布範囲が明瞭に分れている。ざらめ雪の分布範囲に入っている2点のしまり雪は、積雪内の止水面上にあって、その密度での飽和含水率近くまで含水していた。このような特殊な場合を除くと、今回の測定範囲内では、含水率の多少にかかわらず、ざらめ雪は同密度のしまり雪より硬度が小さい。

また、新雪・しまり雪とざらめ雪の両方のグループとも全体的な傾向としては、乾き密度の増加につれて、木下式硬度は指数関数的に増大している。硬度は、雪粒の網目結合を破壊し、雪粒を押しつめる時の抵抗であるから、積雪の密度が大きくなると、単位体積中の雪粒や網目結合の数が多くなって硬度が増大する。ぬれ雪の場合のこの関係は、第1図のように硬度の対数が乾き密度に比例する形になることがわかる。



第1図 ぬれ雪の木下式硬度 R と乾き密度 ρ_d の関係

(○): 新雪・しまり雪, (●): ざらめ雪

また、密度一定のしまり雪を種々の含水状態にして、木下式硬度と含水率の関係を調べた結果³⁾によると、硬度は含水率の増加につれ指数関数的に減少することがわかっている。また、湿雪の圧縮強度も、含水率の増加とともに指数関数的に減少することが報告⁴⁾されている。

そこで、以上のことから木下式硬度と含水率、乾き密度の関係は次の重回帰式で表わされる。

$$\ln R = a - bW + c\rho_d \quad (1)$$

ここで R ; 木下式硬度 (gw/cm^2)

W ; 含水率 (%)

ρ_d ; 乾き密度 (g/cm^3)

a, b, c ; 係数

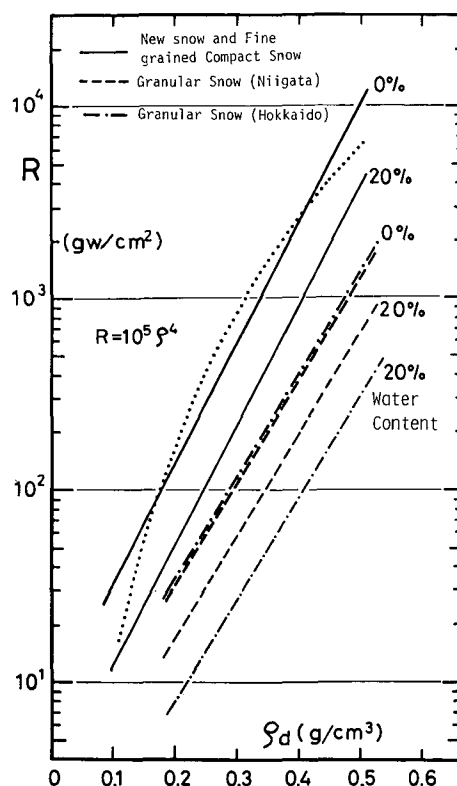
第1表 雪質ごとの木下式硬度 $R(\text{gw/cm}^2)$ と含水率 $W(\%)$ 、乾き密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$ との重回帰式、 $\ln R = a - bW + c\rho_d$ の定数

雪質	a	b	c	W に関する ρ_d と $\ln R$ の 偏相関係数	ρ_d に関する W と $\ln R$ の 偏相関係数	重相関係数	個数 n
新雪・しまり雪	2.10	0.0512	14.3	0.972	-0.793	0.972	33
ざらめ雪	1.00	0.0339	12.1	0.807	-0.304	0.824	175
新潟	1.00	0.0323	12.3	0.746	-0.255	0.822	95
	北海道	1.05	0.0732	12.4	0.855	-0.540	80

この重回帰式の雪質ごとの係数は第1表のようになる。第1表には、ざらめ雪を測定地域別に新潟と北海道に分け、重回帰をとった時の係数と、各雪質毎に求めた偏相関係数も合わせて示した。これによると、含水率に関する乾き密度と硬度の対数の偏相関係数は、新雪・しまり雪、ざらめ雪とも比較的大きく、含水率の影響を除いた乾き密度と硬度の相関が高いことを示している。このため、第1図のように単純に乾き密度と硬度の関係をとってもよい相関関係があらわれた。

一方、乾き密度に関する含水率と硬度の対数の偏相関係数は、新雪・しまり雪では大きいですが、ざらめ雪、特に新潟で測定したざらめ雪では小さい。つまり、密度の影響を除いた含水率と硬度の相関は、新雪・しまり雪では高いものの、ざらめ雪で低く、特に新潟のざらめ雪は低く、ばらつきが大きいことを示している。これは、ざらめ雪自体が、様々な温暖変態過程によって形成されたものであるため、同じ密度であっても、雪粒の大きさ、形、配列、雪粒子同士を結合する網目組織が違い、ある含水状態に応じた硬度の値に幅が生ずるためであろう。特に新潟においては、厳冬期から融雪末期まで、種々の温暖変態過程にあるざらめ雪を測定したため、ばらつきが大きくなったと考えられる。

ところで、ぬれ雪の硬度がどの程度の値であり、それが含水率によって、どう変化するかの目安を図上で得るとわかりやすい。そこで、第1表の係数をもつ新雪・しまり雪、新潟のざ



第2図 含水率を一定(0%; 20%)とした時の木下式硬度 R と乾き密度 ρ_d に関する回帰線

- : 新雪・しまり雪
- : ざらめ雪(新潟)
- · - ·: ざらめ雪(北海道)
- : 乾き雪についての木下の式

らめ雪、北海道のざら雪についての重回帰式で、含水率を0%と20%の一定の値にした時の、木下式硬度と乾き密度の関係を表わす回帰線を第2図に示した。

第2図によると、含水率の変化よりも密度の変化の方が、硬度に与える影響がはるかに大きい。これは、第1表の乾き密度の係数 c の最も小さい値12.1をとって、密度を 0.1 g/cm^3 から 0.5 g/cm^3 まで変化させると、硬度は130倍にも大きくなるのに対し、第1表の含水率の係数 b で最も大きい値0.00732をとって、含水率を0%から40%まで変化させても硬度は1/20にしかならないことから理解できる。また、同じ乾き密度のしまり雪とざらめ雪の硬度差は第1図のところで述べたように、全体的には、しまり雪が含水率20%まで含水し硬度が減少しても、なおざらめ雪よりも硬度が大きいことがわかる。

第2図の点線で示した曲線は、乾き雪について得られた木下式硬度 $R(\text{gw/cm}^2)$ と密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$ の関係式¹⁾

$$R = 10^5 \rho^{4*}$$

を表わしている。新雪・しまり雪についての含水率0%の回帰線がこの曲線と近似していることは、今回の測定が過去に得られた結果と矛盾しないことを示している。

一方、ざらめ雪に関しては、新潟及び北海道での測定とも含水率0%の回帰線はほぼ一致しており、ざらめ雪の硬度に及ぼす乾き密度の影響が測定地域によって変えることはなかった。ところが、第1表に示した係数 b の値が2倍程違っているため、含水率20%の回帰線の方には違いが現われている。すなわち、北海道で測定したざらめ雪の方が、新潟で測定したざらめ雪よりも、含水率増大による硬度減少の割合が大きくなっていた。

なお、含水率0%の硬度に対する含水率10%及び20%の硬度の比は、それぞれ、新雪・しまり雪で0.60及び0.36、新潟のざらめ雪で0.72及び0.52、北海道のざらめ雪で0.48及び0.23、ざらめ雪全体で0.71及び0.51であった。

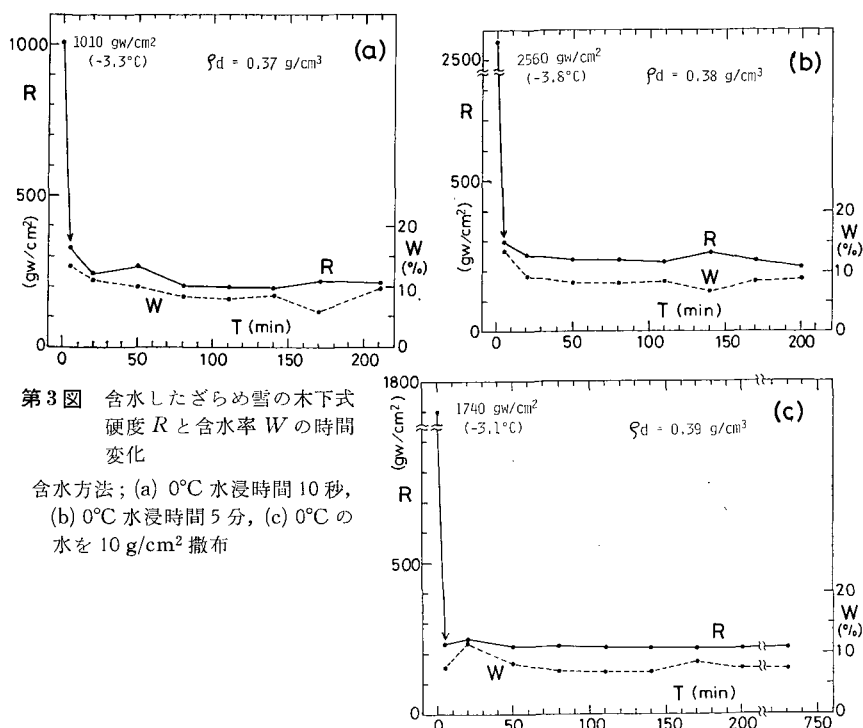
III. 含水した雪の硬度の時間変化

ぬれ雪の変態速度は早いので、水を含んでからの時間経過が、硬度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで乾いた雪が水を含んだ場合、硬度が時間とともにどのように変化するかを低温室内で調べた。今回使った試料は、ざらめ雪とざらめ雪をほぐした雪の二種類である。この雪試料を十分含水させた後、 $1 \pm 1^\circ\text{C}$ の低温室で、水を脱落させながら時間間隔をおいて、木下式硬度と含水率を測定した。

ざらめ雪の試料は、しまり雪が温暖変態によりぬれざらめ化した雪を -5°C の低温室に保存しておいたものである。含水状態のざらめ雪を凍結させたため試料は硬く、 $-3 \sim -4^\circ\text{C}$ での木下式硬度は、 $1000 \sim 3000\text{ gw/cm}^2$ の大きな値を示した。乾き密度は $0.37 \sim 0.39\text{ g/cm}^3$ であった。

この同一雪試料を使った実験のうち、 0°C の水に浸して、全体に水が行きわたってから10秒ほどおいて引き上げた場合、その水浸時間を5分とした場合、 0°C の水を5分間に10g/

*. 硬度の単位を kgf/cm^2 から gw/cm^2 に変えてある。



第3図 含水したざらめ雪の木下式
硬度 R と含水率 W の時間
変化

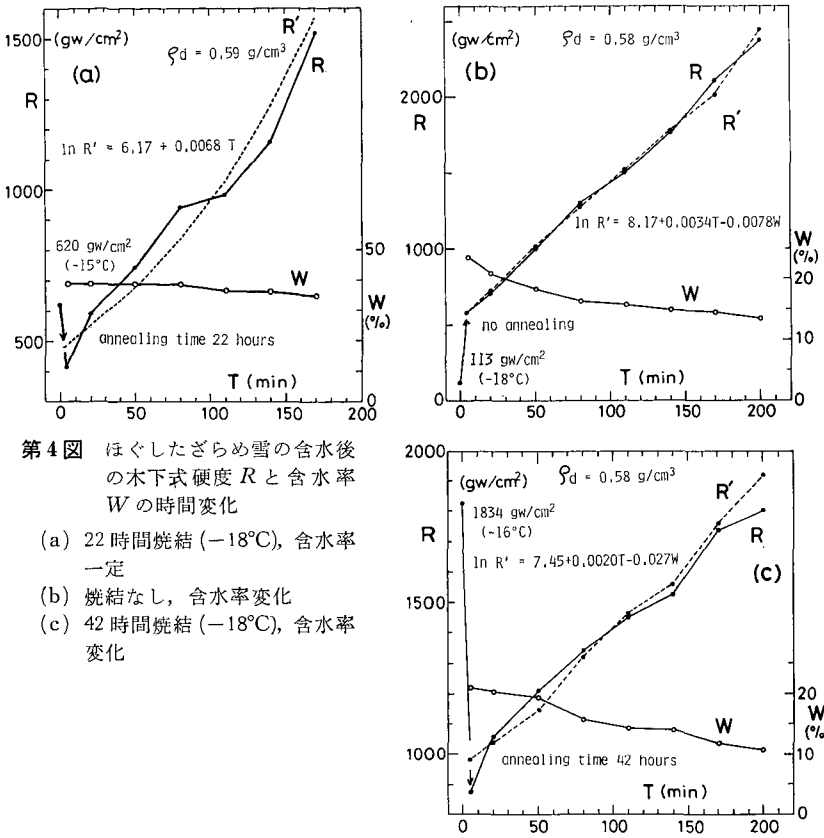
含水方法; (a) 0°C 水浸時間 10 秒,
(b) 0°C 水浸時間 5 分, (c) 0°C の
水を $10 \text{ g}/\text{cm}^2$ 撒布

cm^2 程度上面に撒布した場合の結果をそれぞれ一例ずつ第3図 (a), (b), (c) に示した。水を供給した後は含水率 W が一定に保たれるようにし、水を供給し終わってからの経過時間 T による硬度 R の変化を調べた。なお、 $T=0$ には含水前の硬度の値を入れた。

これによると、水の供給により硬度は急激に小さくなり、その後余分な水が試料から抜けた50分以降の硬度はほぼ一定の状態になっている。これは水に浸けた場合でも、水を撒布した場合でも同様で、水の供給方法によらないことがわかる。また、測定を行なった5実験例とも、一定状態の硬度は $200\sim 300 \text{ gw}/\text{cm}^2$ 、含水率は $7\sim 9\%$ の値で一致していた。この含水率 8% と密度 $0.38 \text{ g}/\text{cm}^3$ を第1表のざらめ雪全体に対する重回帰式に代入すると、硬度は $206 \text{ gw}/\text{cm}^2$ と求められ、測定値とよく合っている。また、第3図 (c) に示したように、含水率をほぼ一定の状態に保つと、硬度は700分を経過しても変化しないことがわかる。

次に、低温室に保存しておいたざらめ雪を、目の荒さ 5 mm の篩に通してほぐし、堆積させた雪試料を用いて、同様の実験を行なった。水の供給は、雪試料を 0°C の水に浸け、水が十分浸透してから10秒後に水中から引き上げる方法で行ない、その後、 $1\pm 1^\circ\text{C}$ の低温室で硬度と含水率を時間間隔をおいて測定した。堆積状態の違いにより乾き密度は $0.56\sim 0.62 \text{ g}/\text{cm}^3$ の範囲で異なった試料となったが、いずれにせよ自然状態の積雪に較べ高密度である。しかも雪粒子は、ほぐしたことにより、網目結合が壊され、ばらばらの状態になっていた。この雪試料を 0°C 以下の温度に保つと、焼結現象により雪粒子間の網目結合が時間とともに再び発達する。この雪粒子間の網目結合の状態が、含水による硬度変化に与える影響も調べた。

含水後に含水率をほぼ一定に保った場合の実験例を第4図 (a) に示す。この雪試料は、ほ



第4図 ほぐしたざらめ雪の含水後の木下式硬度 R と含水率 W の時間変化
 (a) 22時間焼結 (-18°C), 含水率一定
 (b) 焼結なし, 含水率変化
 (c) 42時間焼結 (-18°C), 含水率変化

ぐして堆積させた後 -18°C の低温室で 22 時間焼結させた、密度 0.59 g/cm³ の雪である。図中の T は水中から引き上げてからの経過時間で、 $T=0$ には含水前の硬度の値を入れた。これによると、含水率がほぼ一定の状態、木下式硬度 R (gw/cm²) は時間 T (min) とともに指数関数的に増大している。この関係は次の回帰式で示される。

$$\ln R = a + bT \tag{2}$$

ここで a, b は係数である。

第4図 (a) の場合の係数 a, b の値を第2表の No. 3 に示した。この回帰式から得られる硬度 R' を図中に示してある。また、ほぐして堆積させた直後の雪試料を用いて同じ実験を行った場合も、(2) 式で近似できる結果が得られた。これらについての回帰式の係数、乾き密度、含水前の硬度等を第2表 No. 1, 2 に示した。

II で述べたように、ぬれ雪の木下式硬度は含水率が増加するにつれ指数関数的に減少する。この関係と (2) 式により、含水率が変化する場合の木下式硬度 R (gw/cm²) と含水後の経過時間 T (min), 含水率 W (%) との関係は、次の重回帰式になる。

$$\ln R = a + bT - cW \tag{3}$$

ここで a, b, c は係数である。

第2表 ほぐしたざらめ雪の木下硬度 $R(\text{gw/cm}^2)$ と含水してからの時間 $T(\text{min})$, 含水率 $W(\%)$ との重回帰式 $\ln R = a + bT - cW$ の定数

No.	焼結時間 (-18°C) (hour)	乾き密度 ρ_d (g/cm^3)	含水前硬度 (gw/cm^2)	雪温** ($^\circ\text{C}$)	a	b	c	重相関 係数 R	備考
1	0	0.56	215	(-14)	5.83	0.0056	—*	0.850	
2	0	0.62	260	(-14)	6.70	0.0054	—*	0.914	
3	22	0.59	620	(-15)	6.17	0.0068	—*	0.960	第4図(a)
4	0	0.58	113	(-18)	8.17	0.0034	0.078	0.998	第4図(b)
5	42	0.58	1834	(-16)	7.45	0.0020	0.027	0.952	第4図(c)

* 含水率一定のため No. 1, 2, 3 の重回帰式は $\ln R = a + bT$, ** 含水前硬度測定時の雪温

この含水率が変化する場合の実験を第4図(b)及び(c)に示す。これら実験について、得られた重回帰式の係数、焼結時間、乾き密度、含水前の硬度等は、それぞれ第2表のNo. 4, 5に示した。図から(3)式の重回帰式で得られる硬度 R' と硬度の実測値 R はよく一致していることがわかる。

上述のような経過時間による硬度増大の理由は、次のことがらに関連していると考えられる。ざらめ雪をほぐして堆積させた雪試料の乾き密度 $0.56 \sim 0.62 \text{ g/cm}^3$ は、雪の密度としては非常に大きく、大きさの同じ球の最密充填に相当する密度 0.55 g/cm^3 ⁵⁾ を超えている。これは、篩でほぐした際、雪粒子の大きさの分布に幅ができ、それら各種の大きさの雪粒子が、隙間を埋めるように、密に堆積したことによる。このため、雪粒子1個当りの近接粒子数は密度 0.5 g/cm^3 程度以下の自然積雪に較べて多く、雪粒子間の網目結合が焼結により発達しやすい状態にある。この状態に加え焼結が最も進みやすい雪温 (0°C) で、しかも水と共存する条件が加わったことが、硬度増大に関連しているのであろう。

また、この硬度増大を表わす(2), (3)式は、硬度が経過時間の指数関数に比例して時間とともに際限なく大きくなる形となっているが、これは200分程度内ではこの式がよくあてはまるということだけで、雪の組織状態が変ってくるような長時間に亘って成り立つものではない。

次に、含水前の雪粒子間の結合状態が、含水による硬度変化に与える影響を調べてみた。第2表の実験No. 1, 2, 4のように、ほぐして堆積させた直後の雪の硬度は、雪粒子間の網目結合が壊されていることを反映して非常に小さい。この状態に 0°C の水を供給すると、第4図(b)に示したように最初の短時間に硬度は急増し、その後は(2), (3)式に従って増加している。また、実験No. 3, 5のように、ほぐして堆積させた後 -18°C の低温室で焼結させた雪資料は、雪粒子間の網目結合が焼結により成長するので、焼結時間に応じて含水前の硬度が大きくなっている。これに 0°C の水を供給すると、第4図(a), (c)のように一旦硬度は減少し、それから(2), (3)式に従って増加している。

以上のような現象を詳しく検討するためには、薄片や顕微鏡下での観察によって、ぬれ雪

の変態過程を解明してゆくことが必要である。

IV. ま と め

1981~82年冬期、新潟県と北海道において自然状態のぬれ雪の硬度を調べた。また、低温室内において、含水した雪の硬度の時間変化を調べた。その結果、次のことがらが明らかになった。

1) 飽和含水状態を除いた通常の含水状態では、ぬれしまり雪の木下式硬度は同じ乾き密度のぬれざらめ雪のそれよりも大きい。

2) 木下式硬度 $R(\text{gw/cm}^2)$ と含水率 $W(\%)$ 、乾き密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$ との間には、雪質別に次の重回帰式で表わされる関係が得られた。

$$\ln R = a - bW + c\rho_d.$$

係数 a , b , c の値は第1表に示した。

3) この重回帰関係における硬度と乾き密度の偏相関は高い。一方硬度と含水率の偏相関は、新雪・しまり雪で比較的高いが、ざらめ雪では低くばらつきが大きい。また、硬度に及ぼす影響は、含水率の変化よりも密度の変化の方がはるかに大きい。

4) 乾きざらめ雪 ($\rho_d \approx 0.38 \text{ g/cm}^3$) に 0°C の水を十分供給した後含水率を一定に保つと、硬度は最初の短時間に急減するが、その後は経過時間 T によらず一定となった ($T < 750 \text{ min}$)。

5) 乾きざらめ雪をほぐした雪 ($\rho_d \approx 0.6 \text{ g/cm}^3$) を 0°C の水に十分浸して引き上げた場合、含水後の短時間の硬度変化は、含水前の焼結状態により異なった。その後200分程度までは、木下式硬度 $R(\text{gw/cm}^2)$ と経過時間 $T(\text{min})$ と含水率 $W(\%)$ の間に a , b , c を係数として次の関係が成り立った。

$$\ln R = a + bT - cW.$$

終りに、この調査に御協力いただいた、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研究部門の方々に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 木下誠一 1960 積雪の硬度 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-134.
- 2) 秋田谷英次 1978 熱量計による積雪含水率計の試作. 低温科学, 物理篇, **36**, 103-111.
- 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) 大前宏和・若浜五郎 1980 湿雪の圧縮実験. 低温科学, 物理篇, **39**, 17-24.
- 5) 前野紀一・成田英器 1978 氷の焼き物—南極の氷. 自然, **33**, 12, 86-96.

Summary

With a view to elucidating mechanical properties of wet snow, field observations were made in the winter of 1981-1982 in Hokkaido and Niigata Prefecture. Using samples of wet snow measurements were made of Kinosita's hardness together with density and free water content. The following results were obtained:

1) The relationship between Kinoshita's hardness (R) and dry density (ρ_d) which is the density of wet snow without free water in Fig. 1 indicates that wet fine-grained compact snow except the one flooded with water is harder than wet granular snow with the same density.

2) The relationship between hardness and free water content and dry density of wet snow is given by the following multiple regression formula :

$$\ln R = a - bW + c\rho_d$$

where R : Kinoshita's hardness in gw/cm²,

W : free water content in %,

ρ_d : dry density in g/cm³,

a, b, c : 2.10, 0.0512, 14.3 for new snow and fine-grained compact snow ; 1.00, 0.0323, 12.3 for granular snow in Niigata Prefecture ; 1.05, 0.0732, 12.4 for granular snow in Hokkaido.

3) Figure 2 shows regression curves obtained from the above formula for constant free water contents 0% and 20%. It is found in Fig. 2 that in case of wet snow the dry density has a greater influence on hardness than on free water content.

The time dependency of Kinoshita's hardness of snow containing free water was examined in a cold room at $1 \pm 1^\circ\text{C}$. Snow samples used in experiments were granular snow ($\rho_d \approx 0.38$ g/cm³) and artificial snow ($\rho_d \approx 0.6$ g/cm³) prepared by crushing granular snow and re-depositing it. After a snow sample was supplied with water at 0°C to the extent of infiltrating sufficiently, measurements were made of hardness and free water content at regular intervals as surplus water fell out from the snow sample. The following results were obtained :

1) When the free water content is maintained constantly after water supply, the hardness of granular snow is almost constant independent of time after its rapid decrease at the beginning, as shown in Fig. 3.

2) In the case of crushed snow, hardness increases exponentially with time after its rapid change at the beginning, as shown in Fig. 4. Initial hardness change is influenced by the annealing time before water supply. The relationship between hardness and free water content and lapse time after water supply is given by the following multiple regression formula :

$$\ln R = a + bT - cW \quad (20 \leq T \leq 200 \text{ min.})$$

where R : Kinoshita's hardness in gw/cm²,

T : lapse time in min. after 0°C water supply,

W : free water content in %,

a, b, c : coefficients.

The hardness calculated from this formula is shown in Fig. 4 as R' .