



Title	北海道における融雪期の積雪特性
Author(s)	秋田谷, 英次; AKITAYA, Eizi; 遠藤, 八十一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 40, 51-59
Issue Date	1982-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18437
Type	departmental bulletin paper
File Information	40_p51-59.pdf



北海道における融雪期の積雪特性*

秋田谷英次・遠藤八十一

(低温科学研究所)

(昭和56年10月受理)

I. ま え が き

筆者らは、過去4冬期間、北海道内の主に平野部において、積雪調査をおこない、積雪の地域特性を調べ、それらの一部をすでに報告した^{1~4)}。平地では、雪質、密度、硬度等が、地域によりどのように違うかを、気象条件と対比しながら調べてきた。積雪は積るときの気象条件(温度、風速、降雪の結晶形)により最初の状態がきまる。積ったあとは気象条件(主に雪の中の温度条件)と荷重条件(あとからその層の上に積った雪の荷重)により、その特性がきまる。前者は雪質をきめ、後者は密度や硬度に影響する。

北海道では、根雪になるとまもなく、積雪内の温度は氷点下となる。このような乾き雪の変態を寒冷変態といい、変化はゆっくりしている。これまでは、厳冬期(2月中)の積雪調査を主におこなってきたが、この頃は最も寒い時期で雪温も低く、変態の速度は遅い。そのため、全地域の調査を終えるのに、多少の期日を要しても、相互の比較は可能であった。

一方春になって、雪が融けはじめ、水を含むと変態(温暖変態)は急速に進むので、調査時期のづれによる観測値の変動が大きい。ここでは、融雪期の積雪の特質をみるため、融解や再凍結、含水率の変化に注目して調査した結果を報告する。又室内実験による含水率と硬度の関係についても述べる。

II. 調査方法

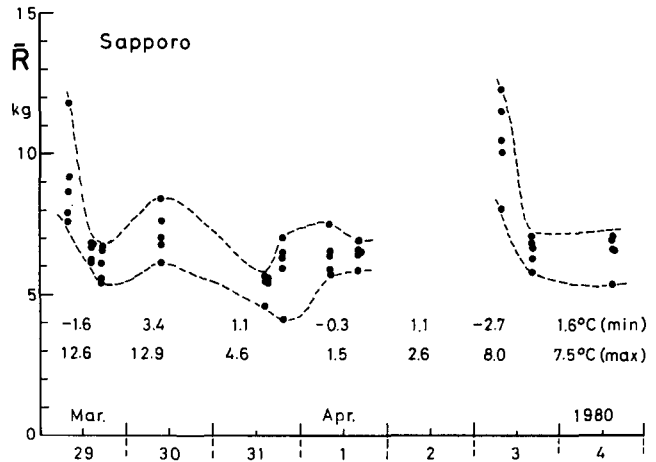
これまでの調査方法と同じであるが、今回は3月、4月の観測に重点をおいた。雪質、成層構造、積雪深、積雪水量、平均密度の測定には、スノーサンプラー(断面積20 cm²)を用いた。又、硬度の測定にはラム硬度計を用いた。今回の調査から積雪の含水率を測定したが、これには、筆者の一人、秋田谷が考案した熱量式含水率計⁵⁾を使用した。新しい含水率計の測定原理は、従来使われていた結合型熱量計(吉田式)と同じであるが、現場で測定しやすいように改良されている。現場での測定は、デジタル温度計による2回の温度の測定のみで、所要時間は5分程度である。測定に用いる湯と試料の雪の質量は、測定の前後に別の場所で測れば良い。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2385号

III. 融雪期の積雪のラム硬度

融雪初期には、寒気と暖気が交互にくり返し、数日の周期で雪温は変動する。1日の中でも、雪は日中は融解、夜間は凍結をくり返すので、雪の性質の変動は大きい。融雪末期になると、1日を通して、気温は 0°C 以上となり、雪は融ける一方で、再凍結することは少ない。日中と夜間の気温の違いにより含水率の変動はあるが、融雪初期の融解、再凍結をくり返す頃に比べると、硬度の変動は、はるかに少ない。第1図は凍結、融解をくり返している札幌の積雪の平均ラム硬度の変化を示してあ

る。融雪期になると、融け水が雪の中を下方へ流下する水みちが形成され、厳冬期に比べると、雪質は不均一になる。このため、同一時刻、同一場所での密度や硬度の測定値もばらつきが大きくなるので、1カ所について5回の測定をおこなった。図には3月29日から4月4日までの硬度の測定結果が示されている。この頃は、すでに全層がぬれざらめ雪となっているが、晴れた夜には、放射冷却で冷え、表層が凍結し、いわゆる、かた雪とな



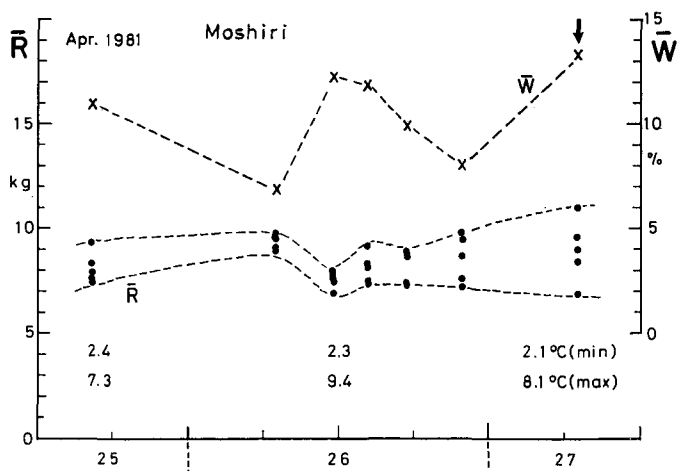
第1図 平均ラム硬度の変化

凍結、融解をくり返している積雪について、数値は1日の最高および最低気温、 \bar{R} : 平均ラム硬度

り、雪の上を歩いて、かすかに足跡がつく程度である。最初の測定は3月29日午前8時15分のもので、積雪深70 cm、平均硬度9 kg、平均密度 0.37 g/cm^3 である。前夜からの冷えこみで凍結していた表層の雪も、日射で表面から2~3 cmはすでに融けていた。その下層10 cmあまりは凍結したままで、この凍結層の雪の硬度は最大80 kgに達している。この凍結層から下方はぬれざらめ雪で(含水率6~9%)硬度は7 kg程度であった。同日の昼過ぎには凍結層はなくなり、硬度の最大は22 kg、平均硬度は6 kgと減少した。その後、強い冷え込みはなかったが、硬度は多少変化している。4月3日の早朝には最低気温が -2.7°C まで下り、再び表層は凍結し、平均硬度も10.5 kgとなった(8時20分測定、積雪深45 cm)。しかし、測定時の気温はすでに $+4.7^{\circ}\text{C}$ まで上昇し、日射も強く、早朝には凍結していた表層の雪も、ほとんど融けかかっていた。そのため凍結層の雪の最大硬度は22 kgあまりで、3月29日の凍結層の数分の1となっている。6時間後には、平均含水率は10%となり、平均硬度は6~7 kgに減少した。

このように、凍結、融解をくり返す頃は、硬度の日変化が大きく、又硬い凍結層の寿命も短い。そのため、同時観測以外には、この時期の積雪特性の場所による違いを調べるのはむずかしい。

第2図には、北海道北部の多雪地、母子里の4月下旬のラム硬度を示した。(積雪深64 cm、

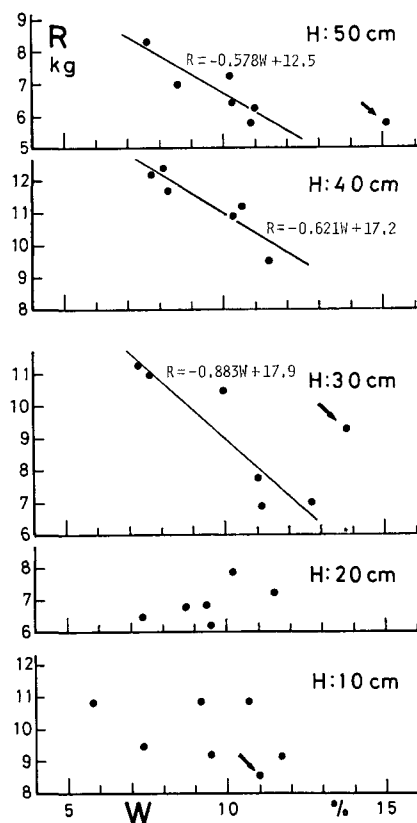


第2図 融雪末期の平均ラム硬度の変化

数値は1日の最高、最低気温、矢印は降雨を示す、 \bar{R} : 平均ラム硬度、 \bar{W} : 平均含水率

平均密度 0.46 g/cm^3 、ぬれざらめ雪)。又、図には深さ10cm毎に測った6点の含水率の平均も示してある。平均含水率が増加すると硬度は減少しているが、第1図の凍結、融解の時期に比べると変動は小さい。矢印で示した最後の観測(27日午前7時)のとき平均含水率は13%で一番多くなっているが、硬度は減少していない。含水率の増加は、観測の2時間前から降り出した雨のためで、含水率がふえても、2時間程度の時間内なら、まだ硬度には影響を与えていないことになる。

第2図に示した含水率は、10cm毎に測った6点の平均含水率であるが、第3図には、含水率を測った各層毎に硬度と含水率の関係を示した。図に記入されている $H: 50, 40 \dots 10 \text{ cm}$ は地上50cm付近 $\dots 10 \text{ cm}$ 付近の雪の層という意味である。上から3層 ($H=50, 40, 30 \text{ cm}$) までは、含水率と硬度の間には、かなり良い相関がみられ、図に示したような一次式で近似される。矢印で示した値は、第2図のものと同じく、雨が降ったときの値で、含水率は増加しているのに硬度は減少していない(回帰式の計算には矢印で示した値は用いていない)。下から2層 ($H=20, 10 \text{ cm}$) は含水率と硬度の間に相関がみられないが、その理由はいまだ明らかでない。

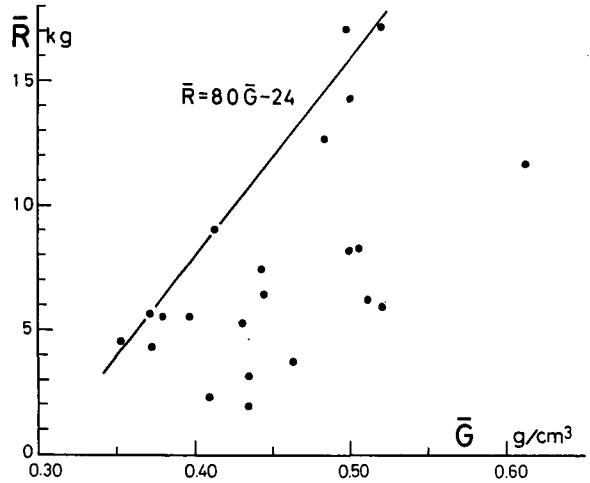


第3図 層毎の含水率とラム硬度
矢印は降雨を示す、 R : ラム硬度、 W : 含水率

IV. ざらめ雪末期の特性

前の章で述べたように、融雪期の末期になると、気温も氷点下に下ることは少なく、観測時刻の違いによる測定値のばらつきが少なくなる。そのため、異った場所の、異った時刻の測定値を相互に比較することも可能となる。それで、北海道のざらめ雪は、融雪末期にどのような性質をもっているか、又地域により差があるかどうかを、過去の観測データも含めて調べてみた。

融雪が進み、積雪深が30~50 cmになった頃の密度と硬度の関係を第4図に示した。観測時期は地域により、また、雪の多い年と少ない年とで違うが、3月末から4月末までが、この時期にあたる。図には一点のみ平均密度が 0.6g/cm^3 以上のものがのせてある。これは地盤の低い所で、融雪水がたまり、積雪深の80%以上の深さが水に浸っていたものである。雪の試料から水がぬけない様にサンプラーで採取してすぐ測定した値で、他の測定条件とは異なるため、今後この測点は除いて考える。平均密度の範囲は $0.35\sim 0.52\text{g/cm}^3$ 、平均ラム硬度は $2\sim 17\text{kg}$ である。密度の小さなざらめ雪は、



第4図 ざらめ雪末期の硬度と密度

\bar{R} ; 平均ラム硬度, \bar{G} ; 平均密度

オホーツク海に面した地域の、しもざらめ雪から変態したものが多い。積雪の少ない地方や、しもざらめ雪の地方では、冬の間も密度は小さいが、春のざらめ雪になっても密度はそれ程大きくなっていない。

図に示したように、平均ラム硬度 (\bar{R} kg) の上限は、直線であらわされ、平均密度 (\bar{G}/cm^3) との間に

$$\bar{R} = 80 \bar{G} - 24,$$

の関係がある。

V. 平均ラム硬度の雪質別最大値

積雪の平均硬度や平均密度が、冬の全期間を通してどのように変化し、それらの値の最大はどれ程かを調べた。北海道の厳冬期の雪質を地域的にみると、しもざらめ雪の多い地域としまり雪の発達する地域に大別することができる。しもざらめ雪の密度や硬度は普通、しまり雪に比べてかなり小さい。したがって、密度と硬度の最大値を求めるためには、しまり雪の地域についてだけ考えれば良い。

各冬期毎に、しまり雪からざらめ雪に変る過程で、特に硬度の大きなものをえらび、第5

図に示した。図から、北海道の積雪は、平均ラム硬度に注目すると、次の3つの段階に分けることができる。

1. しまり雪優勢の積雪：多雪地の2月中の積雪で、しまり雪が多く発達している。積雪全体が乾いた雪では一番丈夫である。平均ラム硬度と平均密度の最大値は、それぞれ、45 kg、0.36 g/cm³である。

2. 融雪初期の積雪：融雪初期には、上半分がぬれざらめ雪、下半分が乾きしまり雪の時期がある。この頃は積雪水量も最大に近く、積雪の全期間を通して、平均ラム硬度が一番大きい。平均ラム硬度と平均密度の最大は、それぞれ65 kg、0.46 g/cm³である。

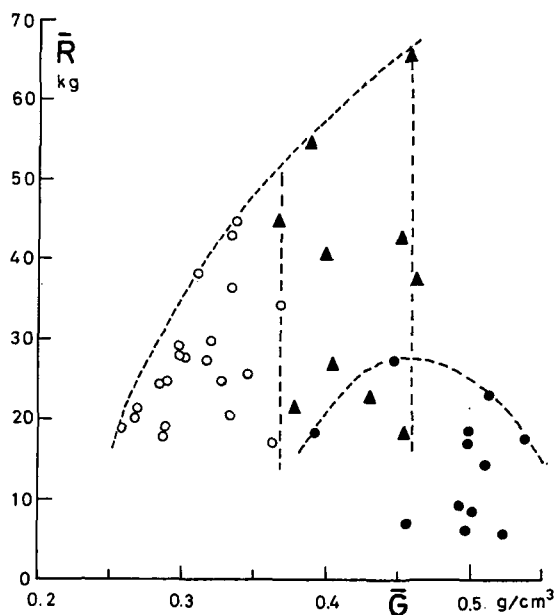
3. 融雪最盛期の積雪：全層ぬれざらめ雪で、平均密度が一番大きいが、平均硬度は、前の2者に比べてかなり小さい。平均ラム硬度、平均密度の最大は、それぞれ25 kg、0.54 g/cm³である。

なお、全層が乾きざらめ雪という例は、筆者らの観測の中には1例しかなかったので、上の分類には入れていない。III. で述べたように融雪期の積雪で、夜間の冷え込みで表層が凍結し、著しく硬くなるものがある。これは、積雪の中でもかなり特徴的なものであるが、このような状態が持続するのは一日のうちでも早朝の短時間であること、又、早朝の観測例が少ないことのため、上の分類には入っていない。

VI. 含水率と木下式硬度の関係

前章で述べたように、積雪のラム硬度は、密度の他に、含水率の影響を大きくうけている。そこで、室内実験で、含水率と硬度の関係を調べた。ただし、実験に使う試料(40×40×30 cm)に比べ、ラム硬度計は大きすぎるため(長さ1 m)、木下式硬度計を使用した⁶⁾。この硬度計は、ラム硬度計に比べ、厚さのうすい、小さな試料でも精度よく硬度の測定ができる。なお、両硬度計の測定方式が異なるため、両者の測定値を直接比較することはできない。

低温室に保存しておいた密度0.36 g/cm³のしまり雪のブロックを、0°C以上の温度の室内に放置し、それが融解する過程の硬度と含水率を、適当な時間間隔で測定した。同じ試料から切り出した4個の雪のブロックを、それぞれ異った室温の部屋に放置した。部屋の温度は、最低のものは+1°C(低温実験室)、最高は常温の実験室で+20°Cであった。0°C以上の温度の部屋に試料を放置してから、測定を開始するまでの時間は、短いもので15分後、長いものは12時



第5図 雪質別にみたラム硬度と密度

\bar{R} ; 平均ラム硬度, \bar{G} ; 平均密度, ○; 乾きしまり雪, ▲; 上層ぬれざらめ雪, 下層乾きしまり雪, ●; ぬれざらめ雪

間後であった。温度の高い部屋では、すぐ融けはじめるので早く測定を開始し、又測定終了時間も早かった。一方 1°C の部屋に入れたものは、融解の開始が遅いため、12 時間後に測定を開始した。

第 6 図に測定結果を示した。含水率の増加につれ、木下式硬度は減少し、測点のばらつきは大きい、両者の間には次の関係がある。

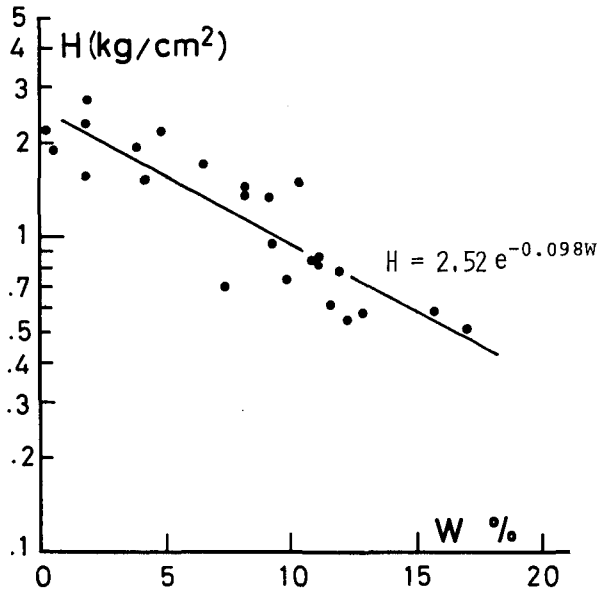
$$H = 2.52 e^{-0.098 W},$$

ただし H ; 木下式硬度 kg/cm^2

W ; 含水率 %

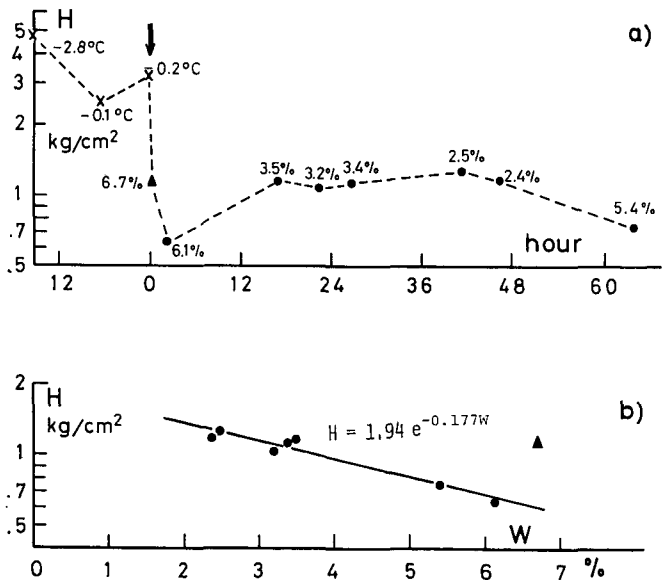
この実験結果で、測定値のばらつきが大きい理由の一つとして、雪が水を含んでからの時間を考慮に入れていないことが考えられる。ぬれ雪の変態速度は早いので、水を含んでからの時間経過が、硬度にも影響を与えるはずである。そこで、なるべく含水率を一定に保ったとき、硬度がどのように変化するかを調べた。第 7 図 a) には、硬度の時間経過を、b) には、上の結果を硬度と含水率の関係に書き換えたものである。

密度 0.39 g/cm^3 のしまり雪のブロックを、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ に保たれた低温室内に 10 時間以上放置しておいた。この段階では、雪温は、わずかに 0°C 以下で、まだ水を含んでいなかった。雪温が -0.2°C のとき、試料の上か



第 6 図 木下式硬度 H と含水率 W

乾き密度 0.36 g/cm^3 のしまり雪, H ; 木下式硬度 kg/cm^2 , W ; 含水率 %



第 7 図 木下式硬度 H と含水率 W

乾き密度 0.39 g/cm^3 のしまり雪

- a) 硬度の時間変化, 矢印は試料に水をかけた時刻。横軸は水をかけてからの経過時間
- b) 硬度と含水率の関係

ら 0°C の水を約 1ℓ 注いだ (第7図 a の矢印)。大部分の水は、試料の中を流下して排出された。注水後、12分後、1.5時間後、16時間後と時間間隔をおいて、硬度と含水率を測定した。注水により含水率は急激に増加し、硬度は小さくなる。その後、余分な水が試料からしたりおちて、含水率は低下し、硬度は再び増加している。注水50時間後に、室温を $+2^{\circ}\text{C}$ に上昇させると、含水率は上昇し、硬度は減少した。b図には、硬度と含水率の関係を示した。注水12分後 (▲印) を除くと、両者の間には、かなり良い相関がみられる。この結果、含水率が数%以下ならば、1.5時間以上、60時間までの範囲では、硬度は経過時間の影響をあまりうけていないことがわかる。ただし、水を含んだ直後 (12分後) ではまだ含水率の影響が十分にでない。木下式硬度 H と含水率 W の関係は次の指数関数で表わされる。

$$H = 1.94 e^{-0.177W},$$

ただし H, W の単位は、それぞれ $\text{kg}/\text{cm}^2, \%$ である。

VII. ま と め

北海道内の過去5冬期の積雪調査結果と、今回の含水率測定をとり入れた観測から、融雪期の積雪特性を調べた。その結果、次のことが明らかとなった。

1) 融雪期で、気温の寒暖がはげしく、融解再凍結をくり返す頃は、ラム硬度にも大きな日変化がみられる (第1図)。しかし、融雪末期になると、積雪は融ける一方で、ラム硬度の日変化は小さくなる。

2) ラム硬度 ($R \text{ kg}$) と含水率 ($W \%$) の関係は次の一次式で表わされる (第3図)。

$$R = R_0 - \alpha W$$

ただし R_0 ; 雪温 0°C で、含水率 0% のときのラム硬度

α ; $0.6 \sim 0.9$ (ざらめ雪の場合)

3) 融雪末期のざらめ雪にも、厳冬期の積雪の特性が反映している。即ち、しまり雪から変態したものは密度が大きく、しもざらめ雪から変ったものは、密度が小さい。

4) 積雪の全期間を通して、平均ラム硬度が一番大きいのは、融雪初期である。この頃は、上層がぬれざらめ雪、下層がかわきしまり雪の頃で、平均ラム硬度の最大は 65 kg である。この値は北陸で観測されたものより少し小さい⁷⁾。

5) 木下式硬度は含水率の増加につれて、指数関数的に減少し、次の回帰式が得られた。

$$H = H_0 e^{-\alpha W}$$

ここに H ; 木下式硬度 kg/cm^2

H_0 ; 雪温 0°C で含水率 0% のときの硬度

α ; $0.1 \sim 0.2$ (しまり雪の場合)

W ; 含水率 $\%$

なお、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されている⁸⁾。

終りにこの調査に御協力いただいた、雪害科学部門の方々、母子里融雪観測室を利用して下さった融雪科学部門の方々に深く感謝いたします。なお、この研究に要した費用の一部は、文部省雪崩特別事業費、昭和55年度北海道科学研究費から支出された。

文 献

- 1) 遠藤八十一・他 1976 石狩・勇払平野における積雪の特性. 低温科学, 物理篇, **34**, 133-145.
- 2) 秋田谷英次・遠藤八十一 1977 石狩・空知地方の積雪調査. 低温科学, 物理篇, **35**, 105-115.
- 3) 秋田谷英次・遠藤八十一 1979 北海道の平地積雪の特性(1977-'79年冬期). 低温科学, 物理篇, **38**, 33-40.
- 4) 秋田谷英次・遠藤八十一 1980 北海道内平地における厳冬期の積雪特性. 低温科学, 物理篇, **39**, 55-61.
- 5) 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.
- 6) 木下誠一 1960 積雪の硬度 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-134.
- 7) Yamada, Y. and Ikarashi, T. 1980 Study on the snow cover stratigraphy in the Uono Basin. *Report of the National Research Center for Disaster Prevention*, No. **23**, 215-229.
- 8) 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.

Summary

Characteristics of a snow cover were investigated in the melting season during the last five winters beginning the winter of 1976-1977 in a plain field of Hokkaido. Most of observations were carried out in March and April, when the snow cover began to wet, using devices including the Ramsonde, snow sampler and caloric meter. Ram hardness, mean density, snow types, stratigraphy and free water content of the snow cover were measured with those devices, with the following results obtained from the observations:

1. A marked change occurs in Ram hardness by melting of snow in the daytime and refreezing at night due to a change in air temperature below and above 0°C in the early stage of the melting season (Fig. 1). On the contrary, as air temperature rises above 0°C during the entire day in the late stage of the melting season, a small change takes place in Ram hardness as a result on an increases in free water content in snow. Mean values of both Ram hardness and free water content are plotted against the lapse of time in Fig. 2, which shows that the hardness does not change so much as in the early stage shown in Fig. 1 and is inversely proportional to the water content except the plot in a rainy day shown with an arrow.

2. Relations between hardness and free water content in individual layers, 50, 40 and 30 cm in height, of the snow cover in Fig. 2 indicate that the hardness decreases with an increase in water content except the plot in the rainy day (Fig. 3). It is concluded that a rapid increase in water content as a result of a rainfall starting two hours earlier does not lead to a decrease in hardness. The relation between hardness and water content is given by the following formula:

$$R = R_0 - \alpha W$$

where R : Ram hardness in kg,

R_0 : Ram hardness of dry snow at 0°C,

α : regression coefficient (0.6-0.9 in coarse-grained granular snow),

W : free water content in %.

3. Figure 4 shows mean values of both Ram hardness and density of wet coarse-grained granular snow at the last stage of the melting season all over Hokkaido. Metamorphosed snow from depth hoar is smaller in hardness and density than that from fine-grained compact snow.

4. Figure 5 shows the maximum mean Ram hardness throughout the each stage of the winter season, from which it is clear that hardness can be classified into three types based on the stage of metamorphosis. In midwinter fine-grained compact snow shows the maximum hardness of dry snow (○○); in the whole stage of the winter season the snow cover composed of wet granular snow at the upper half and dry compact snow at the lower half which appears in early spring shows the maximum hardness (▲▲); meanwhile, wet granular snow throughout the snow cover appearing in late spring shows the minimum hardness (●●).

5. The relation between Kinoshita's hardness and free water content was examined in laboratories. Snow blocks of fine-grained compact snow stored in a cold room were brought out, whereupon each was left alone above 0°C at a room different in temperature from each other. Then, measurements were made of hardness and water content as a snow block underwent a melting process. These results are illustrated in Figs. 6 and 7. The relation between Kinoshita's hardness and free water content is given by the following formula :

$$H = H_0 e^{-\alpha W}$$

where H : Kinoshita's hardness in kg/cm²,

H_0 : hardness of dry snow at 0°C,

α : regression coefficient (0.1–0.2 in fine-grained compact snow),

W : free water content in %.