



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	踏み固められた雪の消雪の遅れ
Author(s)	藤井, 俊茂; FUJII, Toshishige; 小島, 賢治 他
Citation	低温科学. 物理篇, 32, 129-141
Issue Date	1974-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18252
Type	departmental bulletin paper
File Information	32_p129-141.pdf



踏み固められた雪の消雪の遅れ*

藤井俊茂**

(北海道大学大学院 理学研究科)

小島賢治

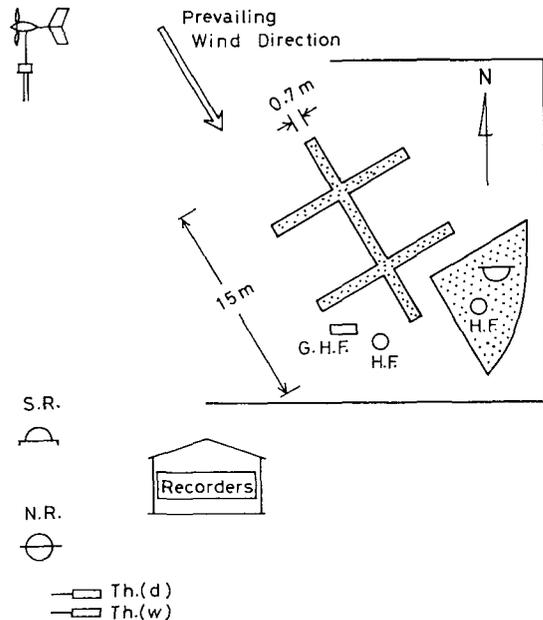
(低温科学研究所)

(昭和49年10月受理)

I. まえがき

冬期、人が歩いた雪道や広い面積にわたって圧縮した積雪の融雪期における消失時期が自然積雪に比べて遅れる。この現象自体は積雪地域ではごくありふれたことであるが、今までのところ、圧縮した積雪の消耗***の遅れの程度や原因を定量的に述べた報告は殆んどない。

圧縮された雪の消耗の遅れの程度と原因を明らかにすべく、1972年12月から1973年4月までの全冬期間にわたり、野外で自然積雪を人為的に「つばあし」で圧縮するとともに、雪の堆積量、消費量を踏み固めた雪と自然積雪とについて比較した。また微気象要素の記録もとおり、踏み固められた雪と自然積雪における熱収支も調べた。以上の結果を報告する。



II. 測定方法

1. 測定の時期と場所

実験は、根雪が始まった1972年12月13日から踏み固めた雪が消えた1973年4月3日まで、北大低温科学研究所の野外積雪実験場で行なった。実験場は秋

第1図 実験場の概略図

打点部分が踏み固め雪、S.H.F. H.F.はそれぞれ、地中熱流計、積雪内熱流計、S.R.は全天日射計、N.R.は示差放射計、Th(d)およびTh(w)はサーミスタ自記乾湿計の感部のおよその設置位置をあらわす。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1331号

** 現在、日本国有鉄道・鉄道技術研究所

*** ここでいう雪の消耗とは融解、蒸発、風や地ふぶきの侵食等による積雪水量の減少を意味し、略して消雪ということにする。

のうちに雑草を一掃して整備した後使用した。第1図に実験場の概要を示す。図中、点を打ったキ印形と△形の2つの部分が雪を圧縮したところである。

キ印形の部分は幅0.7 m、長さ15 mあり、ここで積雪断面測定、積雪水量、吹溜り量の測定を行なった。△形の部分は1辺約10 mで、圧縮した雪の雪温分布、積雪中熱流量、日射の反射率を測定した。また自然積雪では積雪断面測定、積雪水量、雪温分布、積雪中熱流量、反射量のほか、風速、気温、湿度、日射量、正味輻射量を測定し、その出力を実験場内の観測小屋に導き、連続自記した。以上の測定項目をまとめると次のとおりである。

- a) 自然積雪、圧縮した雪に共通のもの： 全層積雪水量、蒸発量、地面融雪量、雪温分布*、積雪内熱流量* (最下層)、日射量*、反射量*、降雪量
- b) 自然積雪についてだけの測定： 風速*、気温*、湿度*、正味輻射量*、地中熱流量
- c) 圧縮した雪の部分についてだけの測定： 吹溜り量

*印は連続自記測定したものである。

2. 雪の圧縮方法

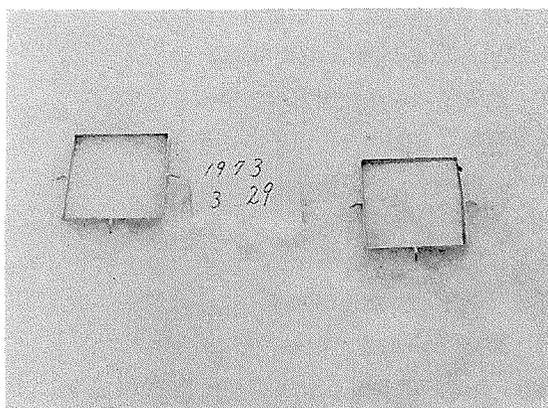
雪の圧縮は“つぼあし”で踏み固め、1月初旬からこれを連日くり返した。多量の堆雪がある降雪や地吹雪の後には、雪の層をかき乱して、できるだけ雪粒子間の結合を破壊するよう特に念を入れた¹⁾。また黒岩他²⁾によれば気温が高い時ほど踏み固めの効果が大いなので暖かい日の日中は長時間踏んだ。この作業を根雪が始まってから雪面融雪が盛んになった3月28日まで行なった。

3. 堆雪量、融雪量および蒸発量

(1) 全層積雪水量 断面積38 cm²、長さ25 cmの円筒サンプラーと雪べらを使って採取した雪試料を、上皿天坪で坪量した。1回の作業では全層を採取できないので、2~4層に分けて採取した。1回の全層積雪水量の決定には最少3回は場所をかえて雪を採取した。これを自然積雪、圧縮した雪の双方について行なった。3月末の融雪期には連日にわたり測定した。

(2) 積雪断面測定と積雪下面融雪量 1月22日、2月20日、2月26日、3月26日に自然積雪、圧縮した雪の断面測定を行ない、積雪水量、地面融雪量*、含水率を測定した。

(3) 蒸発量 断面積150 cm²、深さ6 cmのブリキ製で、表面に白ペンキを塗装して日射の吸収を防いだ角型蒸発量測定容器を2カ用意した。この容器に雪の表面状態を乱さぬようにして自然積雪



第2図 積雪の蒸発量の測定

測定用試料を入れた容器を積雪表面層に設置してある状況。2個の中、一方は踏み固め雪、他方は自然積雪、場所は第1図の△形圧雪区域の境界をはさんだ両側。

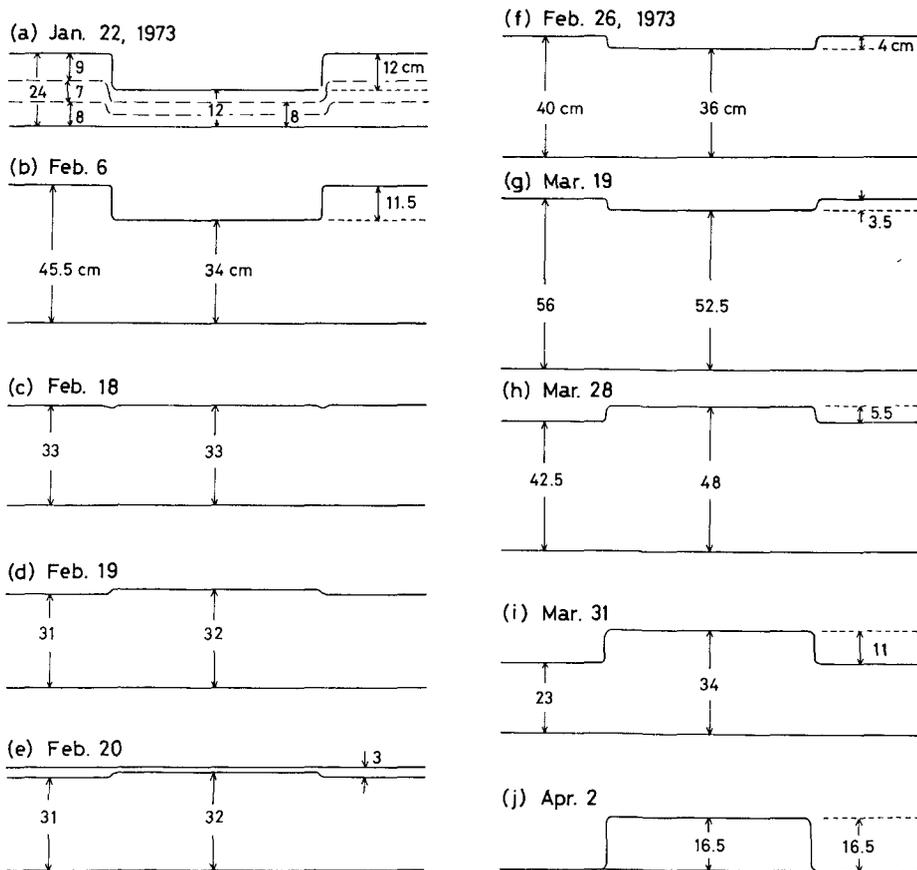
*「積雪下面融雪量」のことを地面で起きる融雪という意味で、以後「地面融雪量」と呼ぶことにする。

と圧縮した雪とを入れ、これらを第2図の写真に示すように積雪表面部分に作った穴に入れ、試料上面と周囲の雪の表面とが同じ高さになるようにした。測定前後で雪と容器の全体の重量を秤量し、その差から蒸発量を求めた。測定は晴天時に限って行ない、雪と容器との間に隙間ができたなら実験を中止した。したがって測定時間は1~3時間に限られた。

(4) 堆雪量と吹溜り量 新積雪水量を前述の円筒サンプラーと雪べらを使用して測定した。降雪に風が伴ったり、降雪のあと、その新雪粒子間の結合が弱いうちに風が吹くと地ふぶきが発生する。圧雪部分は新積雪深が約半分になるので自然積雪に比べてへこんでいる。その後発生した1回の地ふぶきでこのへこみに溜った量と自然積雪上の新積雪量を測定し、その差をこの回の地ふぶきによる圧雪部分の吹溜り捕捉量とした。吹溜り量は特に圧雪面に小さな凹凸があっては正確に測定できないので、雪面は前日に雪べらを用いて凹凸のないよう整形した。

4. 気象要素

(1) 気温, 湿度, 風速 いずれも自然積雪の区域で測定した。気温, 湿度は6点サーミス



第3図 細長く踏み固めた圧雪部分附近の垂直断面の略図

左側および中央の数字は自然積雪および圧雪部における地面から雪面までの高さ、右の数字は両者の差 ((e)を除く)。

タ記録温度計感部のうち2本ずつ計4本を雪面上の高さ1mと0.1mにおき、各感部は金属円筒に収め、常時自動通風した。1m、0.1mの高さの感部を1本ずつ湿球とした。湿球凍結時には小林・油川³⁾が試作した装置により約1時間の間隔で1~2分間温風を送り、水だめの氷をとかして湿球へ水分を捕給した。風速計は雪面上約1.5mに微風向風速計を設置し、10分間平均値を連続自記した。

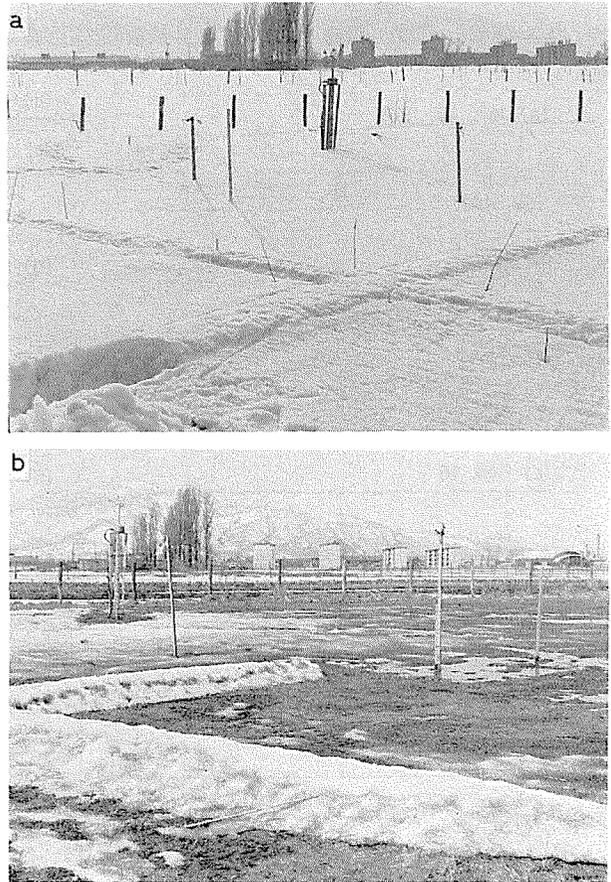
(2) 日射量、反射率および正味輻射量 英弘精機製ネオ日射計で水平日射量を、また同社製示差放射計CN-2を2台用意し、1台で正味輻射量を、もう1台の片側をアダプターで覆い、上下方向からの輻射を交互に受け、その比から雪面反射率を各々測定した。

(3) 熱流量と雪温分布 自然積雪の地面下10cmにEKO地中熱流板CN-8を、地面上約5cmの積雪最下層内にオランダTPD社製熱流計WS-32を自然積雪、圧縮した雪の双方にそれぞれ埋設し、出力を打点式記録計で自記した。また地面下13cmに1本、地面上約10cm、25cmの積雪層内に1本ずつサーミスタ温度計の感部を埋め、地温、雪温を自記した。

III. 測定結果

1. 細長く踏み固めた部分とその両側の自然積雪の表面の高さの差(凹凸)の変化

第3図に1月22日から4月2日にかけての圧雪部分と自然積雪との相対的な凹凸の時間的変化を、細長い踏み跡の長さの方向に垂直な鉛直断面の略図(a)~(e)および(f)~(i)で示した。(a)は1月22日における圧雪部分の表面の凹みと、成層構造の変形を示す。(c),(d)は2月16日から19日まで続いた融雪に伴う圧雪部分の出張りを示し、(e)は地ふぶきにより凹凸がならされた状況をあらわす。2月下旬から3月中旬にかけては頻りに降雪があって、踏み固めた直後は(f),(g)のように両側の自然積雪より凹んでいた。さかんな融雪は3月19日から始まり、25日は圧雪部分は周囲と全く同じ高さとなり、以後(h)~(i)のように凸形



第4図 細長く踏み固めた雪の融け残り

- a. 3月28日、圧雪部の表面が周囲よりやや高くなっている。写真の左下の雪の乱れは断面測定の際の跡。
- b. 4月2日、自然積雪はほとんど融け去り、圧雪部分だけが細長く残っている。

が目立つようになった。

第4図の写真(a), (b)はそれぞれ3月28日の実験場の状況と4月2日における踏み固め雪の融け残りの様子を示す。

2. 全層積雪水量の変化

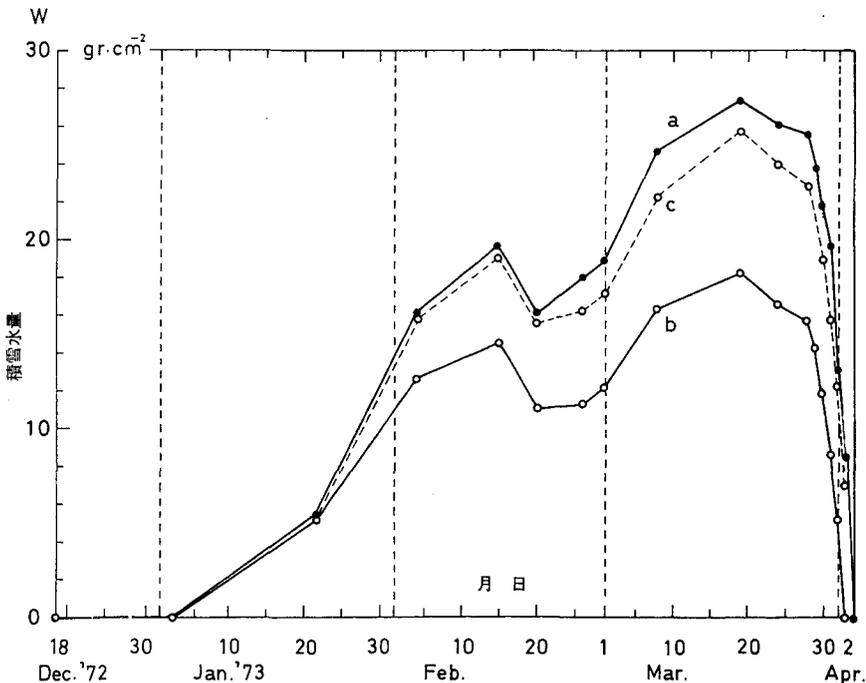
今後は自然積雪と踏み固めた雪の消耗速度の差異を主に全層積雪水量で論じることにする。第5図に自然積雪の積り始めの頃(1972年12月18日)から圧雪部分の融雪終了(1973年4月3日)までの全層積雪水量の変化を示す。図中、白丸を実線で結んだのが自然積雪、黒丸を実線で結んだのが圧縮した雪である。

1月の初めまで積雪水量は $1\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}$ に満たなかった。その後徐々に雪が積もったが、2月半ばに暖気がおとずれ、一時融雪が起きた。融雪期に入っている3月19日に最大積雪水量となり、以後減少した。

全層積雪水量に含まれる誤差は、雪試料の秤量誤差 $0.1\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、試料採取の場所のちがいによる誤差 $0.5\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}$ で双方合わせても $0.6\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}$ は越えない。

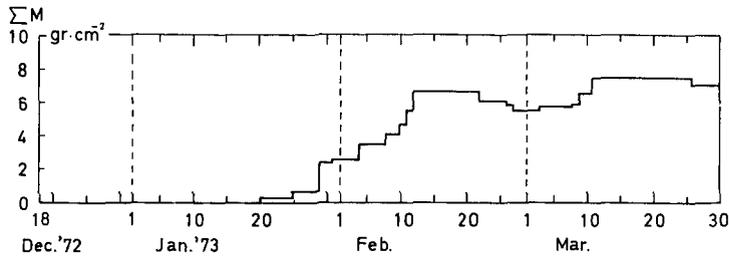
(1) 吹溜り量 一冬に圧雪部のへこみに吹溜った積雪水量と自然雪面上の堆雪量との差の時間的積算値 ΣM の変化を第6図に示す。吹溜りの起きた回数は19回で、総積算水量は $7.07\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}$ であった。第6図で右上がりの線はへこみの溜りを、右下がりの線は圧雪面が凸となり圧雪部よりも自然積雪への吹溜りが大きいことを示す。

圧雪部の吹溜り積算水量に含まれる誤差は主に試料の採取場所のちがいによるが、誤差の



第5図 全層積雪水量の変化

a 黒丸： 踏み固め雪, b 白丸(実線)： 自然積雪, c 白丸(破線)： 自然積雪水量に踏み固め部分への吹溜り補正量を加えた当水量



第6図 圧雪部への吹溜り積算量の時間変化 (圧雪部の吹溜り新積雪水量と自然積雪上の新積雪水量との差の時間的積算値)

積算が最も大きい場合を想定しても、3月28日における積算吹溜り量の誤差は $1 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ には達しない。

第5図の自然積雪の水量曲線にその時点までの圧雪部積算吹溜り量(第6図)を加算して、自然積雪に対する圧雪部分の水量超過のどれ程の割合を吹溜り量が占めるかを示したのが第5図の破線グラフである。

グラフから判るように、自然積雪の水量にその時点までの圧雪部分の総積算吹溜り量 ΣM を加えると踏み固めた場所の積雪水量の90%ほどになる。つまり、圧縮した雪が融雪末期に融け残ることの最大の原因は吹溜りによる積雪水量の増加にあることを示している。しかし圧縮した雪の水量(黒丸を実線で結んだもの)と自然積雪の水量に積算吹溜り量 ΣM を加えたもの(破線)との差は積雪期の末になる程に大きくなっている。このことは長い積雪期を通して何らかの作用が働いていることを示している。

(2) 消雪量 消雪を(i)融雪期になって盛んになる雪面融雪と(ii)1日の量は小さいが一冬を通して行なわれる地面融雪と(iii)昇華蒸発とに分けて考える。実験区域ではこの期間中強風に伴う雪の侵食は無かった。

(i) 雪面融雪量 融雪の始まった3月19日から自然積雪がすべて消えた4月2日までの14日間の消雪量は、自然積雪 $18.4 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、圧雪区域 $18.6 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ であった。したがって本格的な融雪期に関しては圧雪部と自然積雪との間に消雪速度の差は殆んどないといえる。この期間は後述する地面融雪量、昇華蒸発量に比べて雪面融雪量が甚だ大きい。よって踏み固められた雪の表面層融解が自然積雪におけるより遅れることはないといえる。

(ii) 地面融雪量 1月22日~2月20日、2月26日~3月26日の期間の積雪下面融雪量を断面測定の結果から求めた。地面融雪量 Δm は1月22日および2月26日のそれぞれの最下層の密度 ρ_0 に、最下層の高さの減り Δh を掛けて求めた。自然積雪、圧雪部とも最下層の雪質はざらめゆきだったので高さの減り Δh のうち圧密による積雪層の縮みは小島⁴⁾が求めた圧縮粘性率から推算すると、 Δh の観測値の5%以下である。

自然積雪の地面融雪量：(第7図(a),(b))

1月22日~2月10日

$$\rho_0 = 0.25 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}, \quad \Delta h = 6 \text{ cm}$$

$$\text{したがって } \Delta m = \rho_0 \Delta h = 1.5 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$$

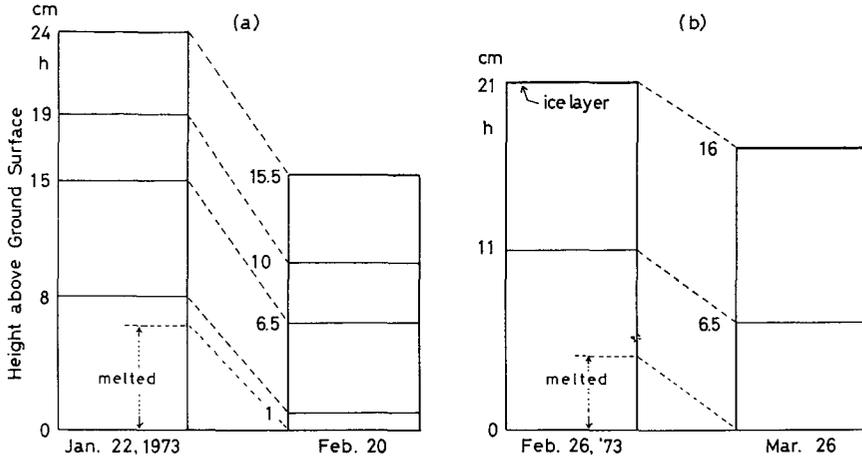
2月26日～3月26日

$$\rho_0 = 0.34 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}, \quad \Delta h = 4.5 \text{ cm}$$

したがって $\Delta m = 1.5 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}$

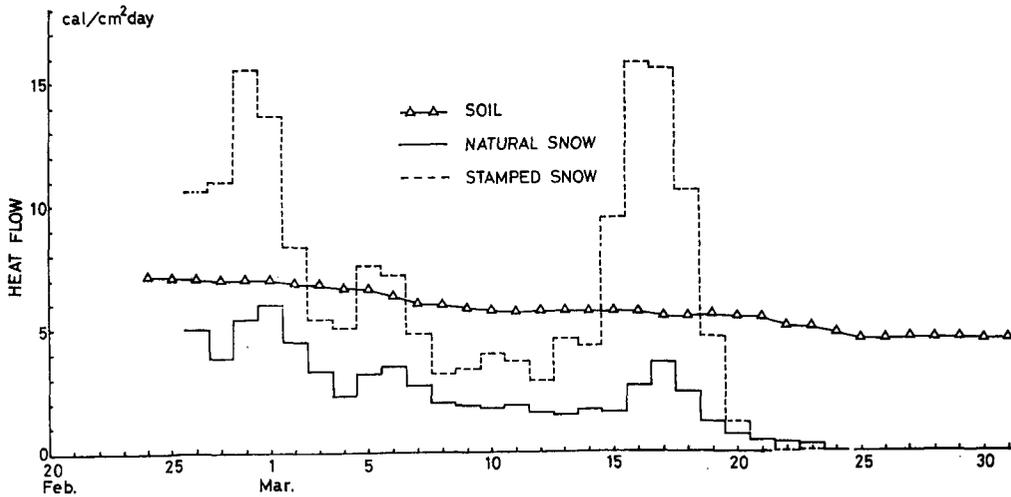
踏み固め雪の地面融雪量:

1月22日～2月10日, 2月26日～3月26日の両期間とも $\Delta h = 0 \text{ cm}$ で地面融雪量は



第7図 自然積雪の地面融雪

- (a) 期間: 1973年1月22日～2月20日, 地面融雪水量: $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$
(融解層の1月22日における厚さ6 cm, 密度 $0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
- (b) 1973年2月26日～3月26日, 地面融雪水量: $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (融解層の2月26日における厚さ4.5 cm, 密度 $0.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)



第8図 1973年2月24日から3月31日までの毎日の地中および積雪中熱流量(24時間量)

△印: 地中熱流量(地皮下10 cmを下から上へ向う熱流束), 実線階段グラフ: 自然積雪最下層内熱流量(高さ地面上約5 cm), 破線: 踏み固め雪最下層内熱流量

零であった。それどころか圧雪部の下の地面では土壌が数 cm ほど凍結していた。このことは地中から地面に流れた熱量よりも多くの熱量が積雪中を下から上へ流れ、その差に見合う分の熱量は雪の下の土壌に含まれる水分の凍結による潜熱で補ったものと考えられる。踏み固め雪の地面融雪が行なわれるのは、凍結した土壌が融解した後ということになる。

第 8 図には II・1 で述べた 3 カ所の熱流計による毎日の熱流量の 2 月 24 日から 3 月 31 日までの変化を示した。△印を実線で結んだのが地中熱流量で、実線の階段状グラフは自然積雪中の熱流量である。これ等両者の差がおおむね自然積雪下面における融雪に費された。2 月 26 日から 3 月 26 日の間の熱流量の差 $106 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ が地面融雪熱量に等しいとすると、これによる融雪量は $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ となり、積雪断面測定による直接測定値に近い値である。

一方、踏み固め雪下層の熱流量は図に破線グラフで示したように外界の気温変化に応じて大きく変動し、時に地中熱流量を大きく上廻った。このような時には、その差分が土中水分の凍結をひき起こした筈である。この地中熱流は自然積雪の下の土中で測定したものであるが、翌 1974 年冬期には踏み固め雪の下と自然積雪の下の地中熱流の双方を測定し、それ等がほぼ同量であることを確かめた。

地面融雪についての自然積雪に対する踏み固め雪の遅れは、上の結果から、1 月 22 日～3 月 26 日の期間で $1.5 + 1.5 = 3.0 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ (57 日間) である。第 5 図で踏み固め雪の水量と自然積雪の水量に積算吹溜り量を加えたものとの差が積雪末期になる程大きくなる原因は、この地面融雪の遅れと考えられる。この遅れの量は自然積雪がとけきった 4 月 2 日の踏み固め雪の積雪水量 $8.4 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ の 36% を示め、総吹溜り量 $\Sigma M = 7.07 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ の 0.43 倍に相当する。期間を 12 月 18 日から 4 月 2 日までに広げると、地面融雪についての踏み固め雪と自然積雪との差は $3 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以上になるだろう。

地面融雪量は一冬を通しての消雪量としては無視できない量である。筆者が小島^{5),6)}の観測資料から解析した結果によれば、札幌の地面融雪量は、1954 年 12 月 30 日～1955 年 3 月 31 日の 92 日間で $6.2 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、1956 年 12 月 23 日～1957 年 2 月 16 日の 56 日間で $4.2 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。

このように踏み固め雪の消雪が遅れる原因として、地面融雪量は甚だ大きなものである。

(iii) 昇華蒸発量 自然積雪、踏み固め雪についての蒸発量の測定値を第 1 表に示す。

蒸発量の測定は、降雪、地ふぶきのない晴天時しかできなかつたので測定例は少ない。しかし自然積雪と踏み固め雪の蒸発量の差の有無はみられる。

積雪期では踏み固め雪の方が多く蒸発し、平均の蒸発速度は $6.7 \times 10^{-3} \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ で、自然積雪の $5.5 \times 10^{-3} \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ の 1.2 倍であり、その差は $1.2 \times 10^{-3} \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ であった。ただし、この差は 1 日のうち最も多く蒸発する日中についてである。1 日 6 時間、12 月半ばから 3 月 20 日までの 90 日にわたり、この差を持続して蒸発したとして、この 90 日間で $0.6 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2}$ の差しかなく、しかも踏み固め雪の蒸発量の方が大きいので、かえって踏み固め雪の消雪促進作用をする。踏み固め雪の方がより多く蒸発する原因は、空気の流れにふれる雪面の雪粒の面積が自然積雪におけるより大きいことによるものと思われる。

融雪期には踏み固め雪、自然積雪の蒸発速度は共に $4.3 \times 10^{-3} \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ でその差は無

第1表 自然積雪, 踏み固め雪の蒸発量

測定月日	測定時間 (min.)	自然積雪		踏み固め雪		蒸発速度差 (mgr/cm ² ·hr)
		蒸発量 (gr)	蒸発速度 (mgr/cm ² ·hr)	蒸発量 (gr)	蒸発速度 (mgr/cm ² ·hr)	
1973. 2. 6	160	0.8	2.0	0.5	1.3	0.7
3. 8	198	2.6	5.3	3.4	6.9	-1.6
3. 12	94	2.2	9.4	2.8	11.9	-2.5
3. 12	82	1.1	5.4	1.4	6.8	-1.4
積雪期平均			5.5		6.7	-1.2
3. 20	176	2.8	6.4	2.7	6.1	0.3
3. 29	146	2.2	6.0	2.1	5.8	0.2
3. 30	110	0.1	0.4	0.3	1.1	-0.7
3. 31	60	0.7	4.7	0.7	4.7	0.0
3. 31	60	0.6	4.0	0.6	4.0	0.0
融雪期平均			4.3		4.3	0.0

かった。

また、前年(1972年)2月9日から3月31日までの間、同じ場所で測定された気象要素を、成瀬等⁷⁾が野外で求めた経験式に代入して蒸発量を算出すると、0.8 gr·cm⁻²(46日間)となり、消雪量としては非常に小さいものである。

また、Slaughter⁸⁾が雪の蒸発について記述した総説によると、密度0.28 gr·cm⁻³の雪の蒸発量とその雪を0.44 gr·cm⁻³に圧縮した雪の蒸発量は全く同じであった(Sabo, 1956)。

以上のことから昇華蒸発について次のように結論できる。

(i) 蒸発量は全冬期間の総量についてみても積雪深の変化として認められるほど大きくはない。

(ii) 積雪期では自然積雪に比べ踏み固め雪が僅かながらより多く蒸発する傾向にあるが、融雪期ではその差はない。

(iii) 全冬期間を通しての踏み固め雪と自然積雪の蒸発量の差は、非常に小さいと考えられる。

以上に述べた吹溜り量、雪面融雪量、地面融雪量、蒸発量の実測から、細長い形に踏み固めた雪が融雪期に消耗が遅れるように見える原因を百分率で示すと次のようになる。

(a) 吹溜りによる積雪水量増加70%, (b) 地面融雪量30%, (c) その他0%

ただし、(a)は圧雪部分の(少なくとも上層部の)積雪水量の減少速度を小さくするわけではないが、その密度が自然積雪より大きいために積雪深の減少を自然積雪より遅らせ、また全部融けきるまでの時間を自然積雪より長くするのに貢献する。(b)は両者の積雪水量減少速度の差異に直接関与する。

3. 圧縮した雪の組織と物理的性質

雪を圧縮することによってその組織と物理的性質に変化がみられる。特に著しく変わった性質には、密度と熱伝導率、硬度等がある。

(1) 組織 融雪期になる前の自然積雪と踏み固め雪の表面層の組織を比較するため、これらの層の鉛直薄片の顕微鏡写真を図版 I の写真 1 と 2 に示した。拡大倍率は同じである。自然積雪に比して踏み固め雪では構成雪粒子の大きさと空隙率が非常に小さく、密に詰まっている有様がよくあらわれている。

(2) 密度と熱伝導率 平均密度 0.26 の新雪層を圧縮すると厚さが約半分になった。積雪量は変わらないから密度が約 2 倍に増加したことになる。自然積雪は積り初めから雪どけまで徐々に密度を増し、3 月 19 日で全層平均密度が $0.33 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$ であった。一方踏み固め雪は初めから密度が $0.45 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以上で、特に 2 月、3 月には全層平均が $0.5 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$ 前後であった。

これに伴って熱伝導率の増大がおこる。熱伝導率 $\mu_s (\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$ を密度 $\rho_s (\text{gr}\cdot\text{cm}^{-3})$ の関数として求めた秋田谷⁹⁾ の式にしたがえば、密度が $0.6 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以下のところでは、

$$\log_{10} \mu_s = -3.6 + 1.8 \rho_s$$

となる。この関係式により自然積雪と踏み固め雪の熱伝導率を推定した。

自然積雪の全層平均密度を $0.25 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、踏み固め雪のそれを $0.5 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$ とすると熱伝導率はそれぞれ 7.1×10^{-4} および $20.0 \times 10^{-4} \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ となり、踏み固め雪の方がほぼ 3 倍の大きさになる。このことは積雪内部の熱の流れに大きな影響を与えることになり、積雪最下層に埋めた熱流板の夜間から朝にかけての記録はそれをはっきり示している。寒気の侵入に応じて熱伝導率の大きい踏み固め雪の内部での下から上へ流れる熱量は、自然積雪のそれに比べて 1 日平均 2~5 倍にもなった。

地面融雪の項でも述べたが、踏み固め雪の地面融雪の遅れの最大の原因が熱伝導率の増大であると思われる。

また、積雪表面層融解水量が同じなら、この融雪による雪面低下量は融解層の密度に逆比例するから、圧雪部分の密度が大きいことは、融雪に伴なう圧雪部分の雪面低下の遅れの原因のひとつとなる。

(3) 硬度 雪を圧縮することによって硬度が増加した。4 月 1 日の測定結果によると自然積雪の表面層 (密度 $0.38 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$) では $195 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、踏み固め雪の表面層 ($0.42 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$) の硬度は $0.88 \sim 6.3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ であった。全層 0°C なので、対馬¹⁰⁾ の経験式にしたがって、 -5°C の値に換算すると次のようになる。

自然積雪: 約 $280 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}$

踏み固め雪: $1.3 \sim 9 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

雪を圧縮することによって硬度は約 30 倍になったのである。測定日は融雪末期であったので全層に融雪水が浸み込んでいた。そのために厳冬期の水を含まないときに比べて雪粒同志の結びつきは弱いので硬度もまた

第 2 表 自然積雪と圧縮した雪のアルベド

月	日	アルベド	
		(自然積雪)	(踏み固め雪)
3.	19	0.86	0.82
	20	0.86	0.82
	21	0.86	0.82
	22	0.86	0.82
	23	0.86	0.82
	24	0.86	0.82
	25	0.86	0.82
	26	0.86	0.82
	27	0.86	0.82
	28	0.59	0.56
	29	0.59	0.56
30	0.53	0.50	
31	0.53	0.50	

小さくなったと思われる。圧雪による硬度の増大は、圧雪部分が風や地吹雪による侵蝕からとり残される原因となる。

(4) アルベド (雪面反射率) 圧縮した雪のアルベドは自然積雪よりも幾分小さかった。測定期間と測定値を第2表に示す。測定値からは0.03~0.04ほど踏み固め雪の方が小さい。また圧雪はきれいな靴で行なったので雪面の汚れはない。

大浦等¹¹⁾の報告では、ざらめゆきを人工的に圧縮すれば0.01、しまりゆきを圧縮すれば0.12のアルベドの減少がみられる。筆者の求めた値はその中間に位置する。

このような圧雪によるアルベドの低下は、踏み固めた雪の日射吸収による融雪速度を自然積雪より若干大きくした筈である。言いかえれば、踏み固めた雪の消雪の遅れに対しては負の効果を持つことになる。

IV. 結 語

以上の測定結果から圧縮した雪の消雪遅延について次のように結論できる。

1) 雪の上を繰り返し人が歩いて出来る細い雪路のように、細長い形に雪を踏み固めた場所の融雪による雪面低下が周囲の自然積雪より遅れる最も主要な原因は、融雪期以前に圧雪部分がかぼんだために起る吹溜りが冬期間にわたって累積するために積雪水量と密度とが周囲より増加することにある。

2) 踏み固めた雪は熱伝導率が自然積雪より増大し、雪の中の伝導による積雪下面での熱量損失が自然積雪より大きいため地面融雪が非常に遅れる。

3) 広い面積にわたって圧雪が行なわれた場合は、特に圧雪による吹溜り量の増加はないから、積雪期間中の地面融雪量の差が消雪の遅れの主な原因となる。

4) 蒸発量は双方の積雪とも少量で、その差は甚だ小さい。

5) 融雪期における消雪速度 (全層積雪水量の減少速度) には殆んど差がない。

6) 踏み固め雪は密度と硬度が大きいため強風と地ふぶきによる侵食を受け難いことも自然積雪に比べて積雪水量が大きくなり、したがって消雪が遅れる原因となる場合がある。この実験を行なった場所ではこの期間中、このような吹払いによる侵食はなかった。

本研究は著者の一人、藤井の北海道大学大学院理学研究科修士課程地球物理学専攻の修士研究として行なったものである。

研究を行なうにあたり、低温科学研究所小林大二助教授、油川英明、石川信敬、対馬勝年の各助手、北海道開発局土木試験所石本敬志氏等からは有益な助言ばかりでなく圧雪作業にも協力していただいた。以上の方々に深く感謝する。

文 献

- 1) 黒岩大助・若浜五郎・藤野和夫 1969 手稲山における雪ふみ試験. 低温科学, 物理篇, **27**, 213-228.
- 2) 黒岩大助・若浜五郎・藤野和夫 1969 薬剤で処理した雪面および踏みかためた雪面のスキーの実走試験による動摩擦係数の測定. 低温科学, 物理篇, **27**, 229-246.
- 3) 小林大二・油川英明 1973 冬期における通風式湿球温度計への水分補給装置. 昭和48年度 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp. 15.

- 4) 小島賢治 1956 積雪層の粘性圧縮 II. 低温科学, 物理篇, **15**, 118-135.
- 5) 小島賢治 1955 積雪層の粘性圧縮 I. 低温科学, 物理篇, **14**, 77-93.
- 6) 小島賢治 1957 積雪層の粘性圧縮 III. 低温科学, 物理篇, **16**, 167-196.
- 7) 成瀬廉二・大浦浩文・小島賢治 1970 気温融雪の野外研究. 低温科学, 物理篇, **28**, 192-202.
- 8) Slaughter, C. W. 1970 Evaporation from snow and evaporation retardation by monomolecular films.—a review of literature— *CRREL Spec. Rept.*, **130**, pp. 31.
- 9) Akitaya, E. 1974 Studies on depth hoar. *Contr. Inst. Low Temp. Sci.*, **A**, **26**, pp. 67.
- 10) 対馬勝年 1972 温度による積雪の硬度変化 II. 低温科学, 物篇理, **30**, 47-52.
- 11) 大浦浩文・小林大二 1965 積雪の光に対する散乱・吸収係数測定法試案. 低温科学, 物理篇, **23**, 87-98.

Summary

The lowering of the surface level of snow under a beaten path across a snow field usually delays during a melting period in comparison with a natural snow cover in the field; finally a long and narrow snow ridge is left behind in the place of the path after the surrounding snow completely melts away. So accustomed to the phenomenon, snow investigators have, it seems, failed to pay serious attention to it for a detailed study of its mechanism.

A series of field observations were made in Sapporo to clarify the mechanism of delay in the ablation of artificially packed snow by preparing packed paths, each of which was 15 m long and 0.7 m wide, and a broad section in a snow field as shown by dotted portions in Fig. 1. The views of the experimental site in a melting season are shown by photographs in Fig. 4. Packing was made by treading on the snow in the prepared paths and section; it was repeated almost every day and especially after each considerable accumulation of fresh snow during a period from the beginning of January through March 28, 1973, the date that heavy melting started. Observed factors were meteorological elements, the depths and water equivalents of snow both in the packed and the natural area, the rates of evaporation of snow at both, the fluxes of heat conduction in the lowest layers of both the packed and the natural snow, and the heat fluxes in the soil at a depth of 10 cm below the ground surface. The rate of snow melt caused by heat supply from the ground was also observed. The measurements of the depths and the water equivalents of snow were made several times during the accumulation period of snow and once a day during a melting period from March 19 to April 2, on which date the snow cover almost disappeared except for the packed snow.

The repeated packing of newly accumulated snow caused the paths to have denser snow and a lower surface level than the natural area, whereby the depressed paths caught a more amount of snow carried by a drift or a blowing wind than the surrounding flat field. During the accumulation period the mass (water equivalent) of the compressed snow of the path increased more and more in excess over that of the natural snow. It was found that the total water equivalent of snow at the compressed paths reached 1.5 times as large as that of the natural snow ($1.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$) on March 19 and the density of the former averaged $0.45 \sim 0.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ throughout the winter, while that of the latter averaged 0.25 on January 22 and $0.33 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ on March 19. It was concluded that such a greater amount of mass accumulation with a greater density of

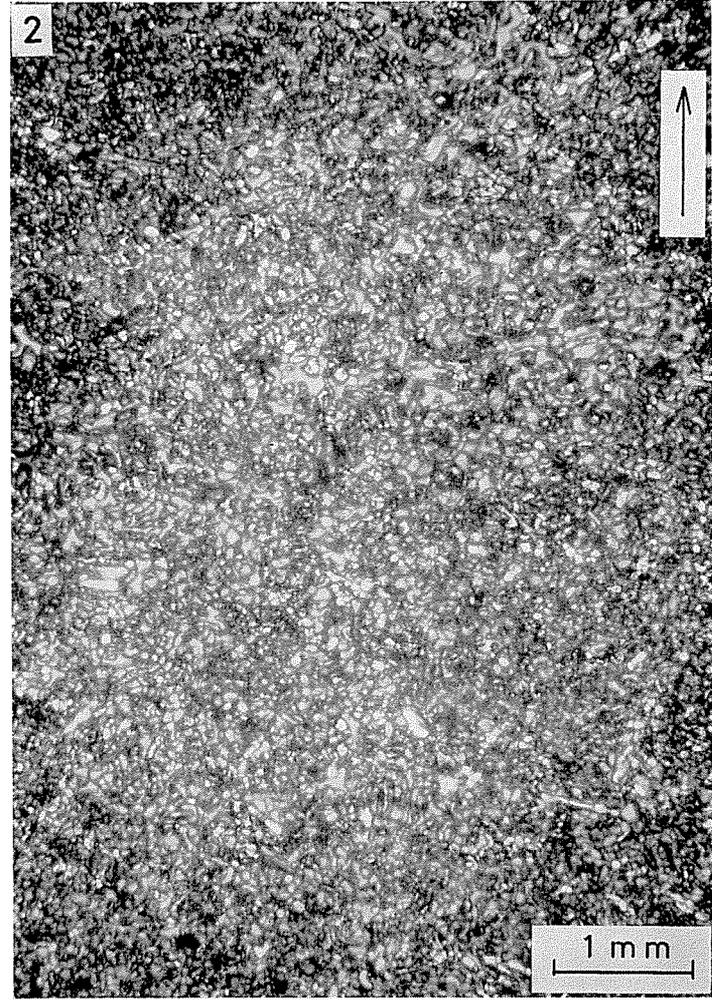
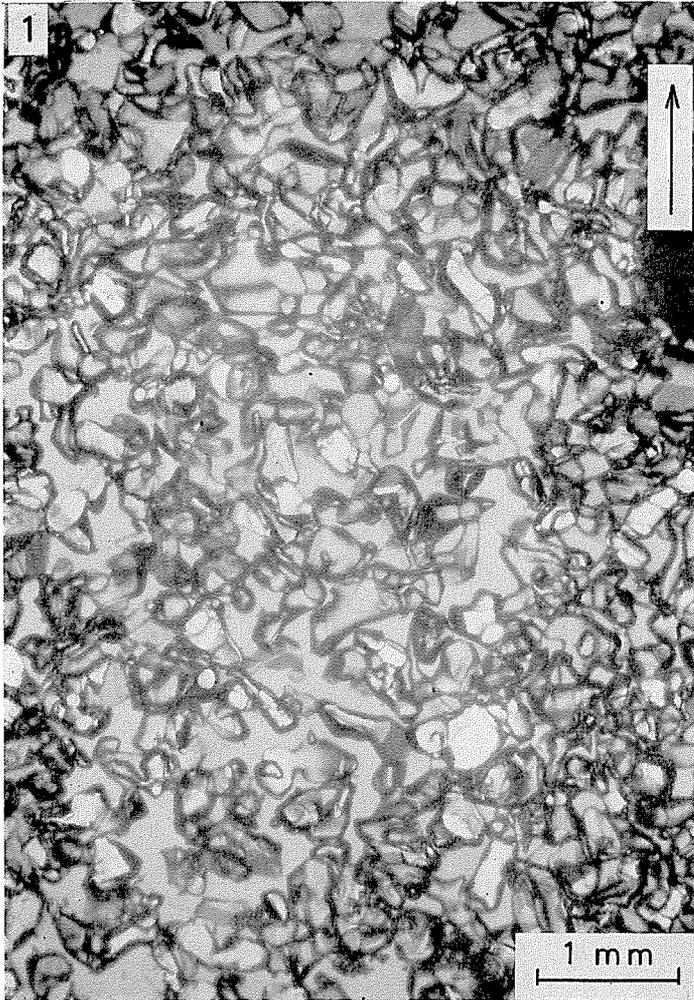
compressed snow was the primary reason why the rate of surface lowering was smaller than that of natural snow especially in the melting period and the paths of packed snow survived for a while after the natural snow disappeared.

The secondary reason was the difference of melting rate between at the bottoms of the packed and the natural snow, it was also concluded. The amount of melted snow at the bottom of the natural snow cover was observed to be $3.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ for a period from January 22 to March 26, while no melting was observed during the same period at the bottom of the packed snow. This should be attributed to a cause that, compared with the natural snow, the packed snow suffered a greater heat loss due to the greater heat conductivity of the packed snow with higher densities in spite of the same heat gain from the ground.

The rate of evaporation of packed snow was found to be almost the same as that of natural snow during the melting period, while the former was slightly greater than the latter before the melting period. Be that as it may, the amount of evaporation or sublimation of snow was so small that it neither affected the variation of the depth of a snow cover nor played any noticeable role in the phenomena concerned at least under meteorological conditions in Sapporo.

In the case of artificially packed snow covering a very wide and flat area, it should be considered that a delay in the ablation of such a snow pack was caused mainly by an increase in the heat conductivity of highly consolidated snow.

Another factor may be the difference in the strength of snow against erosion due to the action of strong wind and drifting snow between at the area of artificially packed snow and the area of natural snow. An effect on the delay in ablation by such a difference was, however, not found to appear during the test period in 1973 at this test site.



自然積雪 (写真1) および踏み固め雪 (写真2) の表面層鉛直薄片 (厚さ約 0.05 mm) の顕微鏡写真。試料採取は 1974 年 2 月中旬 (2 冬目の実験), 融雪が起っていない時に行ない, アニリン固定法により薄片とした。矢印の向きは鉛直上方を示す。