



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の変態と熱伝導率の研究 I
Author(s)	和泉, 薫; IZUMI, Kaoru; 藤岡, 敏夫 他
Citation	低温科学. 物理篇, 33, 91-102
Issue Date	1976-03-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18276">https://hdl.handle.net/2115/18276</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	33_p91-102.pdf



## 積雪の変態と熱伝導率の研究 I\*

和 泉 薫

(北海道大学大学院理学研究科)

藤 岡 敏 夫

(低温科学研究所)

(昭和50年10月受理)

### I. はじめに

過去の積雪の熱伝導率の測定結果は、Mellor<sup>1)</sup>によって密度の関数としてまとめられている。しかし、同じ密度の積雪でも、熱伝導率の値は測定者によって数倍も異なる結果となっている。その原因は、積雪の熱伝導率の測定精度が、他の熱の測定と同様にあまりよくないことにもよるのであろうが、一方、積雪の性質を密度だけで表わし、積雪の組織状態にはいっさい触れていないことにもよると考えられる。積雪の熱伝導率は、密度が同じでも、積雪組織の違いによって異なった値を持つことが知られている<sup>2)</sup>からである。

一旦降り積った雪は、時間とともに組織が変化してゆく。すなわち積雪の変態が起こり、同時に熱伝導率も変化する。

そこで、積雪の熱伝導率を密度のみならず、積雪組織をも考慮して求め、積雪組織やその異方性、そしてそれらの変態による変化と積雪の熱伝導率との関係を調べてみた。

### II. 測定方法

積雪の熱伝導率は低温室内の装置で定常法によって測定した。積雪試料の上下に置かれた密閉箱の熱源の温度を下を高く上を低くして、温度勾配を自然状態と同じ条件で与えた。この熱源に、0.1°Cの精度で温度制御できる2つの恒温槽より、それぞれ一定温度の灯油を循環して熱源の表面の温度を均一にした<sup>2)</sup>。定常状態において、熱電対により温度勾配  $dT/dz$  (°C/cm) を、熱流量計により積雪試料中を下から上に流れる熱流量  $Q$  (cal/cm<sup>2</sup>·s) を測定し、試料の熱伝導率  $k$  (cal/cm·s·°C) を次の式によって求めた。

$$Q = k \frac{dT}{dz}.$$

熱流量計は、シリコン樹脂製の熱伝導率の標準試料により比較検定した。その結果、測定に使用した温度範囲において、熱流量計の起電力  $E$  (mV) と  $Q$  との間に次の関係が得られた。

$$Q = 1.68 \times 10^{-3} E.$$

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1715号

熱伝導率の測定は、積雪層に対して垂直方向ばかりでなく、必要に応じて平行方向にも行った。一方、木下式硬度を $-10^{\circ}\text{C}$ で測定し、積雪層に対して垂直方向及び平行方向の薄片写真の撮影も行った。しかし、測定した積雪層はほとんど水平に近かったので、積雪層に対し垂直方向・平行方向と書く代りに、鉛直方向・水平方向と書くことにする。

積雪試料に、熱伝導率測定のため与える温度勾配を長時間継続して与えると、後に述べるように、試料はしもざらめ雪に変態する。特にしもざらめ雪の発達過程と熱伝導率の関係を調べる時以外は、試料内の温度が定常状態に達するところの2~3時間以上にわたって試料に温度勾配を与えるようなことはしなかった。

### III. 測定結果

#### 1. 崩形変態下の積雪の熱伝導率

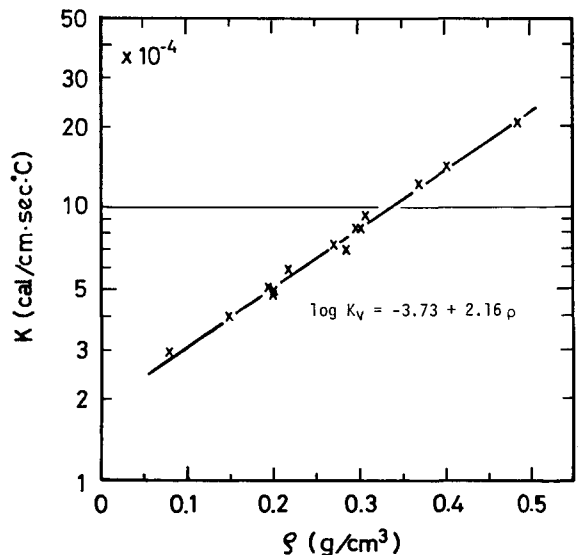
北海道のような寒冷地では、冬期、融解なしに、新雪→こしまり雪→しまり雪と変化する一連の変態過程が一般的である。この変態は、初め降雪時の結晶形を持っていた雪が丸みを帯び、互いに結合し、均質な雪に変る変態で、崩形変態 (Destructive metamorphism) と名付けられている。この変態は、変態の進行につれて、密度 $\rho$ が増加することがまず第一の特徴である。

北海道の天塩地方演習林山地、中山峠、大雪山系旭岳の崩形変態下にある均一な積雪層の雪を採取して、札幌の低温実験室に持ち帰り、鉛直方向の熱伝導率 $k_v$ と密度 $\rho$ を測定した。

この際、輸送が雪に及ぼす影響が心配される。そこで、天塩地方演習林山地で、実際の積雪中に水平に熱流量計を埋め込み、その上下に熱電対を等間隔に差し込んで、実験室内と同じ方法で定常状態における熱流量計の上下のしまり雪の鉛直方向の熱伝導率 $k_v$ を測定し、その雪をすぐ札幌の低温実験室に持ち帰り、前述の測定装置で $k_v$ を測定した。その結果、両者は1割程度の差で一致した。野外測定は実験室での測定に比べて精度が劣ることを考慮すると、この程度の差は、輸送途中における雪の変質はさほどの問題ではないことを示すと推察される。

第1図に、測定した新雪、こしまり雪、しまり雪の $k_v$ と $\rho$ の関係を示した。図からわかるように、 $\log k_v$ と $\rho$ の間には直線関係が見られ、その実験式は次のようになった。

$$\log k_v = -3.73 + 2.16 \rho \quad (1)$$



第1図 山地の新雪、こしまり雪、しまり雪の鉛直方向の熱伝導率 $k_v$ と密度 $\rho$ の関係

上記の結果は、3カ所の山の積雪から採取された種々の密度の雪について得られたもので、次に、札幌の一つの積雪層の雪について、崩形変態の進行に伴う  $k_v$  と  $\rho$  の関係の推移を調べてみた。

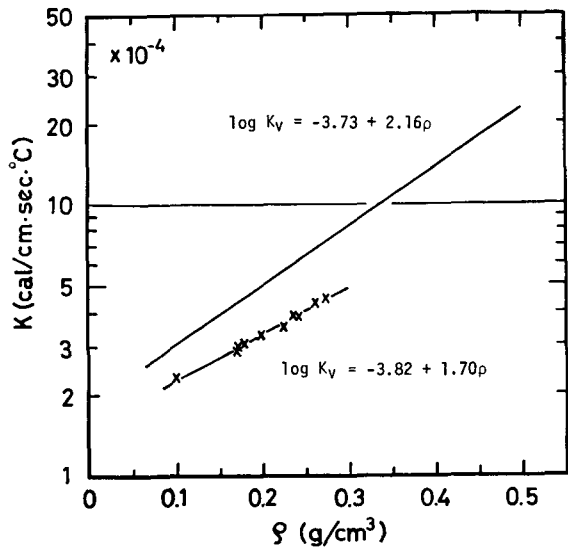
1974年12月14日から15日にかけて、札幌に比較的多量の雪が堆積した。この堆積層の雪を低温実験室に層ごとを持ち込んで保存し、日数を置いて  $k_v$  と  $\rho$  の測定を行った。他方、自然状態のままのこの層の雪も、日数を置いて低温実験室内に持ち込み、すぐ  $k_v$  と  $\rho$  の測定を行った。自然状態の積雪は  $-10^{\circ}\text{C}$  で保存された積雪に比べ、温度が比較的融点に近く、かつ変動する環境下に置かれ、その後の降雪の重みもあって、密度増加の割合が大きく崩形変態が速く進行した。しかし、密度増加に対する  $k_v$  の増加の割合は、

両方の雪において、ほとんど等しく、第2図の下の線に示すように、 $\log k_v$  と  $\rho$  とが直線関係をなし、その実験式は次のように表わされた。

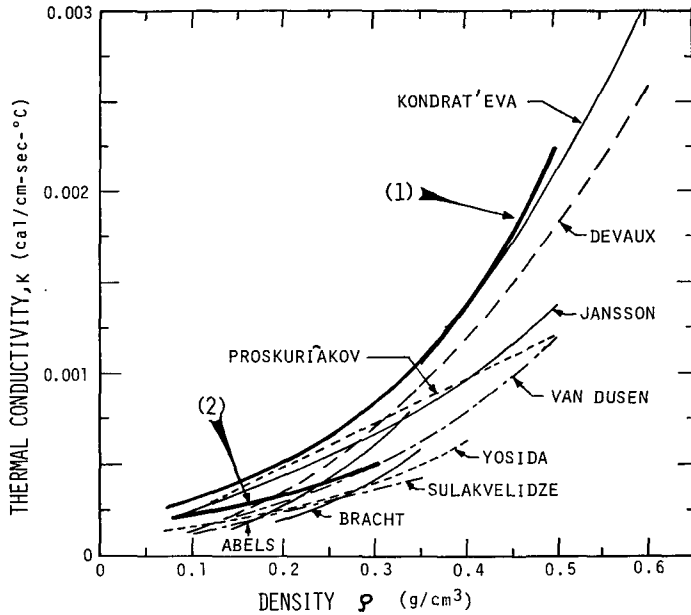
$$\log k_v = -3.82 + 1.70 \rho. \quad (2)$$

第2図から、1回の降雪で堆積した一つの積雪層の雪では、その後の崩形変態過程において  $\log k_v$  と  $\rho$  との間一つの直線関係が成り立つことがわかった。そして、雪は一旦降り積ってしまえば、低温実験室内で  $-10^{\circ}\text{C}$  に保存するといった自然状態とは異なる環境を与えても自然状態と同じ  $k_v$  と  $\rho$  の関係を満たすことも示された。又、小島<sup>4)</sup>は、新雪の時の結晶型が積雪層によって異なっていると、その影響は層毎の力学的性質にかなり長期間残ることを述べている。積雪の崩形変態は、堆積後少々環境が変化しても、層毎に、 $\log k_v$  と  $\rho$  との間一つの直線関係をなして進行し、その直線関係の係数は、層毎に、新雪の結晶型やその組成の違いによって異なると推論される。

ところが、3カ所の山の雪を測定した結果である第1図においても、 $\log k_v$  と  $\rho$  との間に相関のよい直線関係が成り立っている。それぞれの山の積雪の実際の堆積時における様子は不明であるが、次のように考えるのが妥当であろう。採取した山の雪は、いずれも一度に多量の降雪があってできた厚い均一層の雪で、こういった多量の降雪をもたらした雪の結晶型やその組成がかなり似ていたことが考えられる。又、密度  $\rho$  の小さい雪は堆積後の早い時期に、 $\rho$  の大きい雪は厚い積雪の内部から採取されたために、しもざらめ化等の、崩形変態以外の変態過程を経ることはなかった。このため、幸運にも同質の雪を採取して測定することができ、第1



第2図 札幌の一つの堆積層の雪が新雪からしまり雪に崩形変態した場合の鉛直方向の熱伝導率  $k_v$  と密度  $\rho$  との関係(上の直線は第1図の直線)



第3図 積雪の熱伝導率  $k$  と密度  $\rho$  との関係 (Mellor<sup>1)</sup> の図に (1)式と(2)式を書き入れたもの

図のような結果が得られたと推察される。

次に、過去の熱伝導率の測定例と上述の結果を比較してみよう。Mellor<sup>1)</sup> より引用した積雪の熱伝導率と密度の関係の図に (1) 式と (2) 式を書き入れて、第3図に示した。(1) 式と (2) 式は過去の測定結果の、それぞれほぼ上限と下限を示すことになった。尚、今回得られた結果を除く他の人々の測定値は、それぞれ人名を付した線の囲りにかなりばらついているのであって、第1図、第2図に示したように相関よく一つの線上に並んでいるのではない。このように測定値の分散が表われる原因としては、密度が同じでも雪質の異なる雪や、次に述べるしもざらめ雪のように崩形変態以外の変態を受けた雪までも含んで、積雪の熱伝導率を測定し、密度の関数として表わそうとしたことが十分考えられる。

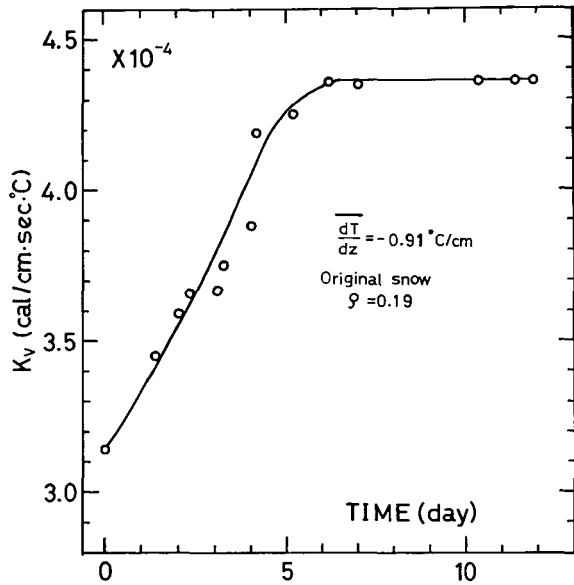
2. 積雪のしもざらめ化に伴う熱伝導率の変化

積雪中に温度勾配があると、そのために飽和水蒸気圧の勾配ができ、積雪中の空隙を隔てて向いあった雪粒間で、温度の高い雪粒から昇華蒸発がおり温度の低い雪粒に昇華凝結する。温度勾配が大きく平均雪温が高いほど、昇華蒸発・昇華凝結が促進され、雪の中に水蒸気移動による霜の結晶が発達してしもざらめ雪ができる。このような変態は、しもざらめ化あるいは成形変態 (Constructive metamorphism) と言われている。秋田谷<sup>4)</sup> が述べているように、このしもざらめ化は、雪質がなんであろうと温度条件さえ整えば起こり、その変態の様相は積雪中の温度勾配、その継続時間、平均雪温、しもざらめ化する前の雪の組織状態や密度によって異なる。しかも、この変態を通じて、雪の密度はほぼ一定であることが知られている。したがって、この変態の結果できる種々の発達段階のしもざらめ雪の熱伝導率は、単に密度の関数として表わせない。そして、しもざらめ化によって、雪は温度勾配の方向に粒子の繋がりによ

い縦構造を持つ組織に変わり、鉛直方向の熱伝導率  $k_v$  が水平方向の熱伝導率  $k_H$  より大きくなっていく。

熱伝導率測定に用いた定常法は、積雪試料に温度勾配を与えるため、長時間続けると試料をしもぎらめ化しながら刻々の熱伝導率を測定することができる。そこで、自然状態を考慮して温度勾配は鉛直上方に負となるよう与え、しもぎらめ化に伴う  $k_v$  の推移を調べた。

(i) こしまり雪のしもぎらめ化：密度  $0.19 \text{ g/cm}^3$  のこしまり雪に、平均雪温  $-5^\circ\text{C}$  で、平均温度勾配  $-0.91^\circ\text{C/cm}$  を12日間与えてしもぎらめ雪に変化させた。一方、比較のため、同じこしまり雪を13日間  $-13^\circ\text{C}$  で保存し崩



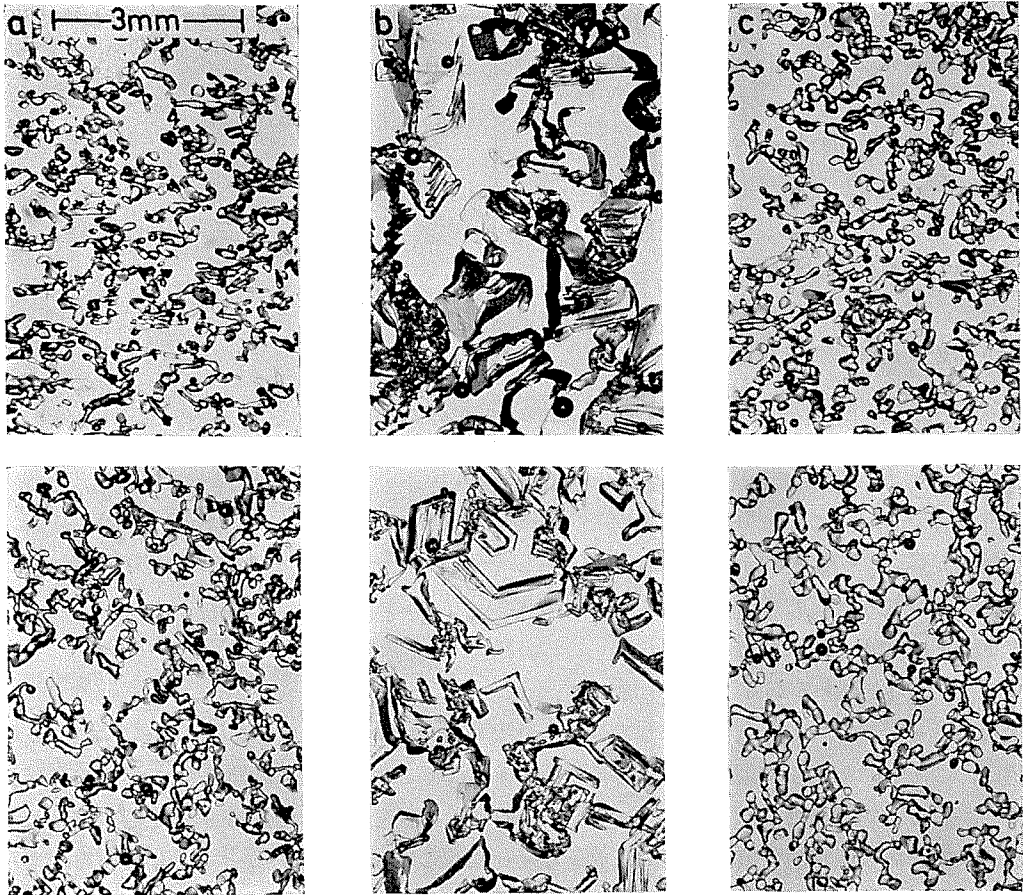
第4図 こしまり雪のしもぎらめ化に伴う温度勾配の方向(鉛直方向)の熱伝導率  $k_v$  の時間的变化

形変態させた。このこしまり雪のしもぎらめ化に伴う  $k_v$  の時間的变化を第4図に示す。 $k_v$  の値は、しもぎらめ化の初期段階で急速に増加し、6日程ではほぼ一定値に達した。積雪の熱伝導率は、積雪粒子の配列の仕方、すなわち組織に依存することから考え、 $k_v$  が一定値に達したことは、雪全体の組織的性質が時間的に大きな変化を起こさなくなったことを示している。すなわち、しもぎらめ雪の発達が最終段階に近い状態になったのである。

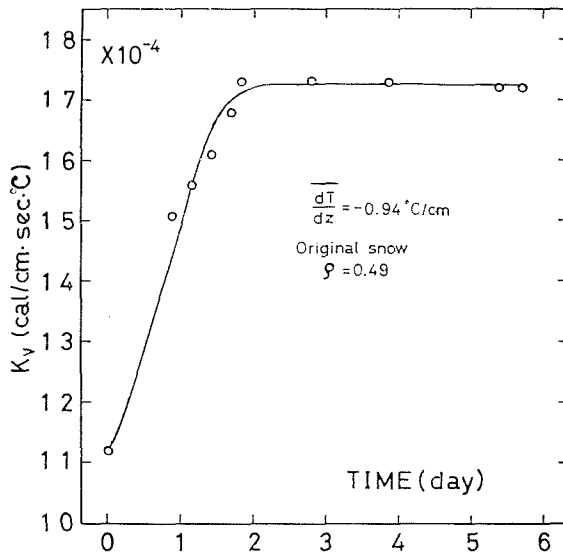
変態前のもとの雪、しもぎらめ化してできたしもぎらめ雪、 $-10^\circ\text{C}$  で崩形変態させた保存雪の薄片写真を、それぞれ第5図の **a**, **b**, **c** に示す。上段は鉛直の、下段は水平の薄片写真である。密度は両変態のいずれの場合にもわずかに増加し、 $0.20 \text{ g/cm}^3$  となった。 $k_v$  はもとの雪が  $3.1 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$  で、しもぎらめ化により1.4倍の  $4.4 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$  に、崩形変態により1.1倍の  $3.5 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$  になった。 $-10^\circ\text{C}$  での木下式硬度はもとの雪が  $0.10 \text{ kg/cm}^2$  で、しもぎらめ化により1/2の  $0.05 \text{ kg/cm}^2$  に、崩形変態により5倍の  $0.50 \text{ kg/cm}^2$  になり、しもぎらめ雪は保存雪の1/10の硬度しかない脆い雪となった。

これは薄片写真からわかるように、しもぎらめ雪は、縦構造が発達したために  $k_v$  が増大し、結晶粒が大きくなった割に結合部が細くて壊れやすい組織になり、硬度が減少したものである。一方、保存雪は、自重によって圧密され、雪粒同志の焼結による連結の程度が進んだために  $k_v$  も硬度も増加したものである。しかし、しもぎらめ雪の  $k_v$  は、第5図 **b** に見られるような顕著な縦構造を反映して、保存雪の  $k_v$  より大きくなった。

(ii) 再焼結雪のしもぎらめ化：中山峠で採取されたしまり雪を、雪粒をほぐしてばらばらにし  $0.83 \text{ mm}$  メッシュの篩を通し、 $-4^\circ\text{C}$  で5日間保存した。この雪は焼結によって、しまり雪に似た等方的な組織を持つ密度  $0.49 \text{ g/cm}^3$  の雪になった。この雪を再焼結雪と書くことに



第5図 鉛直及び水平薄片写真。a；こしまり雪，b；aからつくられたしもざらめ雪，c；aを-10°Cで保存しておいた雪。写真の上列が鉛直薄片，下列が水平薄片

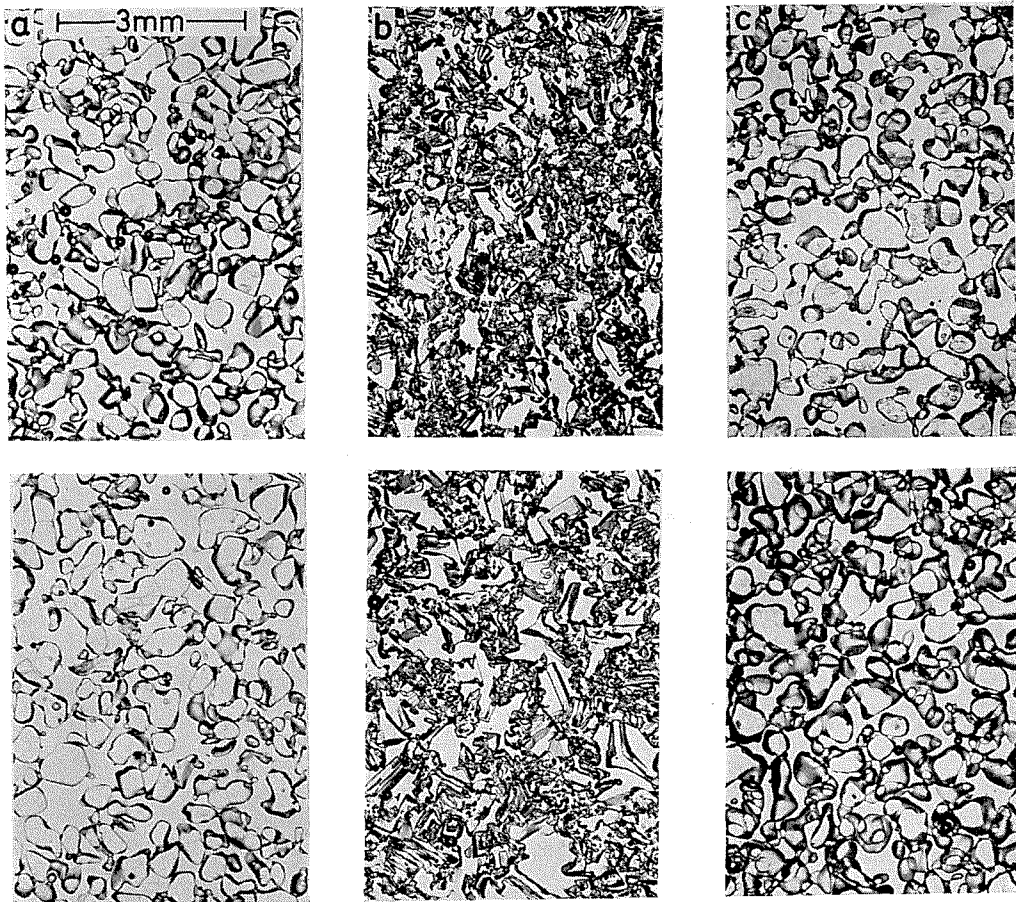


第6図 再焼結雪のしもざらめ化に伴う温度勾配の方向(鉛直方向)の熱伝導率 $k_v$ の時間的变化

する。再焼結雪に、平均雪温  $-5.5^{\circ}\text{C}$  で、平均温度勾配  $-0.94^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  を 5 日半与えてしもざらめ雪に変化させた。一方、比較のため、同じ再焼結雪を 6 日半  $-4^{\circ}\text{C}$  で引き続き保存しておいた。ほぐして篩を通し焼結させた再焼結雪のしもざらめ化に伴う  $k_v$  の時間的变化を第 6 図に示す。これも (i) のこしまり雪の場合と同様、 $k_v$  はしもざらめ化の初期段階で急激に増加し、わずか 2 日程で一定値に達した。ほぼ同じ平均温度勾配を与えてしもざらめ化させたにもかかわらず、この一定値に達する時間及びその値が違うのは、しもざらめ化する前の雪の密度・雪質の違いによるものである。

もとの再焼結雪、できたしもざらめ雪、 $-4^{\circ}\text{C}$  で保存しておいた雪の薄片写真を、それぞれ第 7 図の **a**, **b**, **c** に示す。上段は鉛直の、下段は水平の薄片写真である。

密度は 3 つの雪ともほとんど変わらず  $0.49\text{ g}/\text{cm}^3$  であった。 $k_v$  は再焼結雪が  $11.2 \times 10^{-4}\text{ cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$  で、しもざらめ化により 1.5 倍の  $17.2 \times 10^{-4}\text{ cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$  に、保存により 1.2 倍の  $13.5 \times 10^{-4}\text{ cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$  になった。 $-10^{\circ}\text{C}$  での木下式硬度は再焼結雪が  $6.4\text{ kg}/\text{cm}^2$  で、しもざらめ化により 8 倍の  $52\text{ kg}/\text{cm}^2$  に、保存により 1.5 倍の  $9.9\text{ kg}/\text{cm}^2$  になった。薄片写真からわ



第 7 図 鉛直及び水平薄片写真。**a**; 再焼結雪, **b**; **a** からつくられたしもざらめ雪, **c**; **a** を  $-4^{\circ}\text{C}$  で保存しておいた雪。写真の上列が鉛直薄片, 下列が水平薄片

かるように、しもぞらめ雪は、縦構造が発達したために  $k_v$  が非常に大きくなり、小さな結晶が大きな骸晶型の結晶の間を埋めて結晶同志をしっかりと結合したため非常に硬くなったものである。一方、保存しておいた雪は、すでに5日半焼結させてあったため、その後の6日半の保存中の焼結作用では大きな変化は起こらず、 $k_v$  と硬度は少し増加したにすぎない。

又、もとの再焼結雪と、できたしもぞらめ雪の薄片写真は、それぞれ油川他<sup>5)</sup>の撮った大雪山の風成雪と硬化雪の薄片写真によく似ている。大雪山の硬化雪の形成される条件は未だ明らかでない点が多いが、この実験のように、もし風成雪に大きな温度勾配が加われば、極めて短時間で硬化雪が形成されると推察される。

秋田谷<sup>4)</sup>は、 $0.3 \text{ g/cm}^3$ 程度の密度を境にして、それよりも  $\rho$  の小さい雪はしもぞらめ化によって脆い雪に、 $\rho$  の大きい雪は丈夫な雪に変わることを見出したが、上記の再焼結雪の  $\rho$  は大きい方に、(i) のこしまり雪の  $\rho$  は小さい方に当る。ただし、秋田谷の行った実験の場合よりも硬度の増減が著しかったことが、今回の実験の特徴である。

積雪中でしもぞらめ化により霜の結晶が成長してゆく時は、選択的に大きな霜の結晶が成長し、大きく伸びた霜の先端がその成長方向にある他の結晶に追いつき、これと結合して温度勾配の雪粒の繋がりが優越して第5図 **b**、第7図 **b** のような組織になる。すなわち、しもぞらめ雪特有の縦構造組織ができ、一方第4図、第6図のように温度勾配の方向(鉛直方向)の熱伝導率  $k_v$  は一定値に飽和する。ここで、この  $k_v$  の一定値と飽和するまでの時間を、それぞれ「飽和値」;  $k_{sv}$  と「飽和時間」;  $T_s$  とすると、この  $k_{sv}$  と  $T_s$  の値はしもぞらめ化する前の雪の密度・雪質に依存して変る。又、与える温度勾配にも依存すると考えられる。

尚、 $T_s$  に達した後、積雪中での水蒸気の移動が停止するわけではない。しもぞらめ雪の結晶の縦構造は、空隙の方も縦構造を持つことを示しているので、空隙には依然として縦構造の方向に温度勾配が存在し、したがって、水蒸気の移動は依然として継続している筈である。しかし、温度勾配の方向の熱伝導率  $k_v$  が一定値になっていることから、この水蒸気の昇華蒸発・昇華凝結による雪の組織変化は、 $k_{sv}$  を変化させるような形では起こらなかったという注目すべきことがわかる。

### 3. 変態に伴う積雪の熱伝導率異方度の変化

積雪の熱伝導率には積雪組織の違いが敏感に反映されるので、もし積雪組織に異方性があれば、熱伝導率の値によってそれを表わすことができるはずである。そこで、同じ積雪層から2個の試料を切り出し、一方は鉛直方向の熱伝導率  $k_v$  を、他方は水平方向の熱伝導率  $k_H$  を測定し、この  $k_v$  と  $k_H$  の値から、積雪の熱伝導率に関する異方度  $\gamma$  (以後単に異方度又は  $\gamma$  と書く) を次のように定義した。

$$\gamma = \frac{k_v - k_H}{k_v + k_H}.$$

この  $\gamma$  は山田他<sup>2)</sup>の定義した異方度  $\gamma_k$  を簡略化したものである。

第8図に、測定された異方度  $\gamma$  と密度  $\rho$  の関係を示す。新雪、こしまり雪、しまり雪、ほぐして篩を通した再焼結雪の測定値を(●)で示し、しもぞらめ雪の測定値は(×)で示した。密度が  $0.15 \sim 0.25 \text{ g/cm}^3$  の(●)はこしまり雪で、 $\gamma$  は負、すなわち  $k_v < k_H$  であった。しかし、こし

まり雪が崩形変態し密度を増したしまり雪の $\gamma$ は、ほぼ0であった。しもざらめ雪では常に $\gamma$ は正、すなわち $k_V > k_H$ であった。これは、こしまり雪が第5図 a, cに見られるように雪粒が水平方向に並んだ組織を持っていたために $\gamma$ が負に、しまり雪が第7図 a, cの再焼結雪のように等方的な組織を持っていたため $\gamma$ がほぼ0に、しもざらめ雪が縦構造組織を持っていたために $\gamma$ が正になったものである。

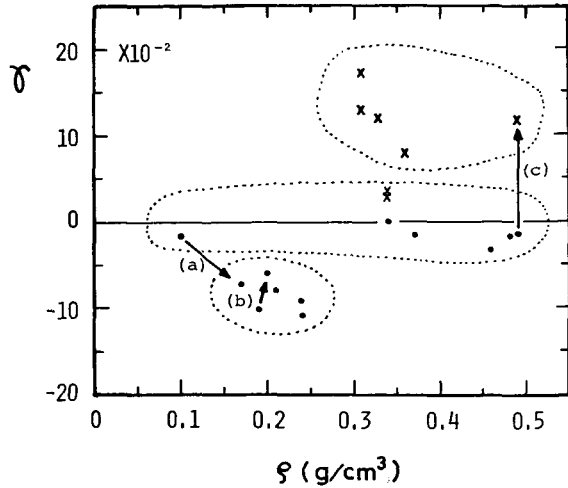
又、積雪は変態するにつれ組織が変化するので、この変態による組織変化が異方度 $\gamma$ の変化となって表われるはずである。そこで、変態前後の異方度と密度を測定し、それらの推移を見た。その結果を3例、第8図に矢印(a), (b), (c)で示した。

矢印(a)は、密度 $0.10 \text{ g/cm}^3$ の新雪を3日間 $-10^\circ\text{C}$ で保存して、密度 $0.17 \text{ g/cm}^3$ のこしまり雪に崩形変態させた場合である。 $\gamma$ がほぼ0であった新雪が $\gamma$ を減少してこしまり雪になった。それらの薄片写真をそれぞれ第9図の a, bに示す。上段が鉛直の、下段が水平の薄片写真である。これからわかるように、新雪の針状等の結晶が比較的無秩序に配置している組織が、崩形変態し、こしまり雪の水平方向に雪粒の並び方が発達した組織に変わったために $\gamma$ が減少した。一般に、新雪、ことに針状や板状又は樹枝状結晶が乱雑な結晶方位をとって堆積するかどうかは不明であるが、少なくともこの場合は、降雪結晶が堆積時に無秩序な結晶方位をとっていた。そして、この新雪がこしまり雪に変態する途中で、雪粒の配列が水平方向に回転したと推察される。

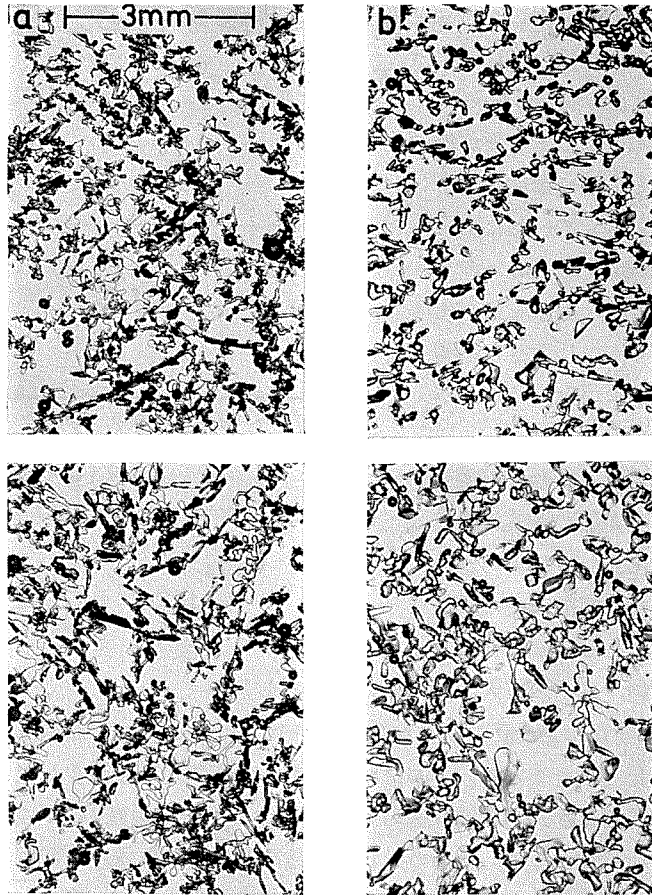
矢印(b)は、2の(i)で述べた、こしまり雪を $-10^\circ\text{C}$ で13日間保存しておいた場合で、 $\gamma$ が増大した。これは、 $\gamma$ が負で雪粒が水平方向に発達したこしまり雪の組織(第5図 a)が、 $-10^\circ\text{C}$ で崩形変態するにつれ、しまり雪の等方的な組織に近づいた組織(第5図 c)に変わったことによるものである。

矢印(c)は、2の(ii)で述べた再焼結雪をしもざらめ化した場合である。これは、再焼結雪の等方的な組織(第7図 a)から、しもざらめ雪特有の縦構造を持つ組織(第7図 b)に変わったことによるものである。

以上のように、積雪の熱伝導率異方度 $\gamma$ の値で、積雪組織の異方性及び変態によって生じたその変化を表わせることがわかった。このことから、 $\gamma$ の値は変態の進行段階を記述する因子として使えると考えられる。



第8図 積雪の熱伝導率異方度 $\gamma$ と密度 $\rho$ の関係。(●)は新雪、こしまり雪、しまり雪、再焼結雪についての、(x)はしもざらめ雪についての測定値を示し、矢印(a), (b), (c)は変態による $\gamma$ と $\rho$ の変化を示す



第9図 鉛直及び水平薄片写真。a; 新雪, b; aが崩形変態してできたこしまり雪。写真の上列が鉛直薄片, 下列が水平薄片

#### IV. ま と め

定常法により積雪の熱伝導率を測定した結果、積雪の熱伝導率は積雪組織に大きく依存していることが確められ、具体的に次の事項がわかった。

1. 崩形変態下にある積雪は、圧密とともに  $\log k_v$  と  $\rho$  との間に直線関係、

$$\log k_v = a + b\rho,$$

を保って変態する。この係数  $a$ ,  $b$  は、その積雪の新雪時の結晶型やその組成によって決まる。

2. 積雪に大きな温度勾配 ( $\approx 1^\circ\text{C}/\text{cm}$ ) を与えてしもざらめ化した場合、温度勾配の方向の熱伝導率は増大するが、しもざらめ雪の結晶化が進むにつれて短時間で一定値に達する。

3. 積雪の熱伝導率異方度  $\gamma$  は雪粒の繋がり方を示している。新雪  $\rightarrow$  こしまり雪  $\rightarrow$  しまり雪  $\rightarrow$  しもざらめ雪という変態で、 $\gamma$  は 0, 負, 0, 正の値に変わり、雪粒同志の連結の変化に対応していた。

この研究に際し、低温科学研究所雪害部門、清水弘助教授、秋田谷英次、成田英器助手からは種々の有益な御助言や御尽力をいただいた。ここに心からの感謝の意を表します。

なお、この研究の費用は文部省雪崩特別事業費から支出された。

## 文 献

- 1) Mellor, M. 1964 Properties of Snow. *CRREL Monograph*, III-A 1, 105 pp.
- 2) 山田知充・長谷見達雄・和泉 薫・佐藤篤司 1974 積雪組織の異方性と弾性波の伝播速度及び熱伝導率について. 低温科学, 物理篇, **32**, 71-80.
- 3) 小島賢治 1968 雪の結晶の変態に関する二三の実験. 雪氷, **30**, 141-148.
- 4) Akitaya, E. 1974 Studies on depth hoar. *Contr. Inst. Low Temp. Sci.* **A 26**, 67 pp.
- 5) 油川英明・対馬勝年・佐藤尚之 1972 大雪山系旭岳における硬化雪の研究 II. 低温科学, 物理篇, **30**, 129-143.
- 6) 吉田順五・岩井 裕 1950 積雪塊の熱伝導率の測定, 低温科学, **3**, 79-87.

## Summary

Thermal conductivity of snow which varies sensitively with its texture was measured by using a stationary state method for a variety of snow with different structures and with metamorphism, destructive and constructive, it underwent. The results are summarised as follows:

(1) As shown in Figs. 1 and 2, snow which underwent destructive metamorphism gave the relation,

$$\log k_v = a + b \rho,$$

where  $k_v$  (cal/cm·s·°C) is thermal conductivity of snow in the vertical direction, that is, vertical to the surface of snow layers,  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) density of snow, and a and b constants decided from forms and compositions of snow crystals when new snow was accumulated.

(2) When a snow sample was subjected to a large temperature gradient in the range of 1°C/cm in the vertical direction, it was observed, as shown in Figs. 4 and 6, that thermal conductivity increased remarkably at the first stage, and then it stayed at a constant value. It is presumed from the sensitivity of thermal conductivity of snow with its texture that the stage in which thermal conductivity increased corresponds to the stage in which depth hoar was growing and the stage of saturation to the stage in which the growth of depth hoar was almost completed.

(3) Whereas thermal conductivity of snow is anisotropic, the degree of anisotropy  $\gamma$  was defined as

$$\gamma = \frac{k_v - k_H}{k_v + k_H}$$

where  $k_v$  and  $k_H$  are thermal conductivities measured in the vertical and horizontal directions respectively. It is presumed that  $\gamma$  reflects how anisotropic snow is in its texture; namely, it gives a description of a texture comprising different vertical and horizontal connections of snow grains. Observations showed that the values of  $\gamma$  vary depending on the structure of snow and the metamorphism it underwent, as shown in Fig. 8.

As to its dependence on the structure,  $\gamma$  is positive for depth hoar (shown by  $\times$  in this figure), zero for fine grained compact snow and sieved snow (shown by  $\bullet$ ) and negative for lightly compact snow with  $\rho$  ranging from 0.15 to 0.25 g/cm<sup>3</sup> (also shown by  $\bullet$ ), whereupon they are grouped by dotted lines in this figure according to the signs of  $\gamma$ .

As to its dependence on metamorphism, when it is destructive, as shown in Fig. 8 (a), a new snow of  $\gamma \approx 0$  with the texture shown in Fig. 9 (a) changes to a lightly compact snow of  $\gamma < 0$  with the texture shown in Fig. 9 (b); as shown in Fig. 8 (b), the texture of another lightly compact snow shown in Fig. 5 (a) changes to the texture shown in Fig. 5 (c), where  $\gamma$  shows an increase. In case of constructive metamorphism, as shown in Fig. 8 (c), a sieved snow of  $\gamma \approx 0$  with the texture shown in Fig. 7 (a) changes to depth hoar of  $\gamma > 0$  with the texture shown in Fig. 7 (b).