



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪組織の異方性と弾性波の伝搬速度及び熱伝導率について
Author(s)	山田, 知充; YAMADA, Tomomi; 長谷美, 達雄 他
Citation	低温科学. 物理篇, 32, 71-80
Issue Date	1974-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18246
Type	departmental bulletin paper
File Information	32_p71-80.pdf



積雪組織の異方性と積雪の弾性波の伝搬速度 及び熱伝導率について*

山田 知 充

(低温科学研究所)

長谷美達雄

(低温科学研究所研究生)

和泉 薫・佐藤 篤司

(北海道大学大学院理学研究科)

(昭和49年11月受理)

I. はじめに

積雪の物理的性質は密度のみならず積雪の組織によって大きな違いのあることが知られている。ここに述べる積雪の弾性波速度や熱伝導率は、積雪組織に非常に敏感な物理的性質である。例えば1971年第12次南極地域観測隊によって、東南極大陸のみずほ観測拠点で採集された深さ75mのコア（密度範囲 $0.35\sim 0.89\text{ g/cm}^3$ ）について超音波領域での弾性波の伝搬速度を測定した結果、縦波の速度が積雪の組織に特に大きく依存していることが見出された^{1,2)}。またみずほ観測拠点の雪温観測結果から計算された積雪の熱伝導率の鉛直分布と積雪組織を比較したところ、密度が同じでも雪質によって熱伝導率の値は大きく異なることが示された³⁾。

積雪の組織やその異方性が積雪の物理的性質にどのように反映されるかを明らかにすることは興味ある課題である。ここでは自然積雪の縦波と横波の伝搬速度と熱伝導率が、積雪組織（雪質）やその異方性にどの程度依存しているかを調べた。測定は広い密度範囲にわたる様々の雪質が見られる北海道大雪山糸旭岳中腹の姿見の池付近の山岳積雪について行なった。雪質は新雪、しまり雪、しもざらめ雪であった。弾性波速度の測定は現場で1974年3月末に行なった。また試料を低温実験室に持ち帰り、定常法によって熱伝導率の測定を行なった。測定結果は南極やグリーンランドの積雪の測定結果と比較された。

II. 測定方法

1. 弾性波速度の測定

自然積雪から鉛直面と水平面が出るように切り出された約5cmの立方体試料について、縦波の速度 (V_P) と横波の速度 (V_S) が超音波パルス法²⁾によって測定された。測定に用いた

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1344号

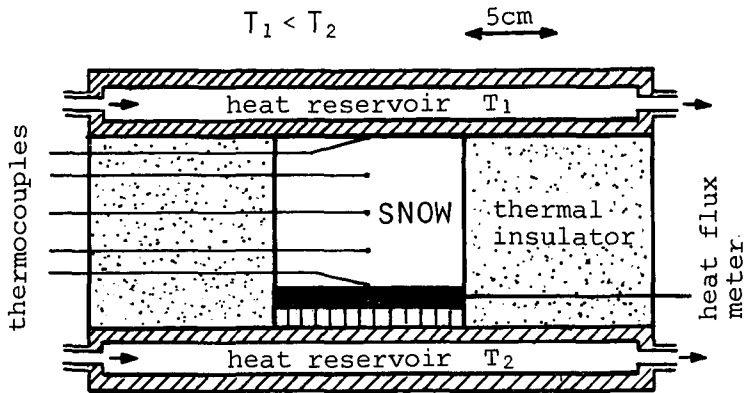


Fig. 1. Experimental device for the measurement of the thermal conductivity of snow by a stationary state method.

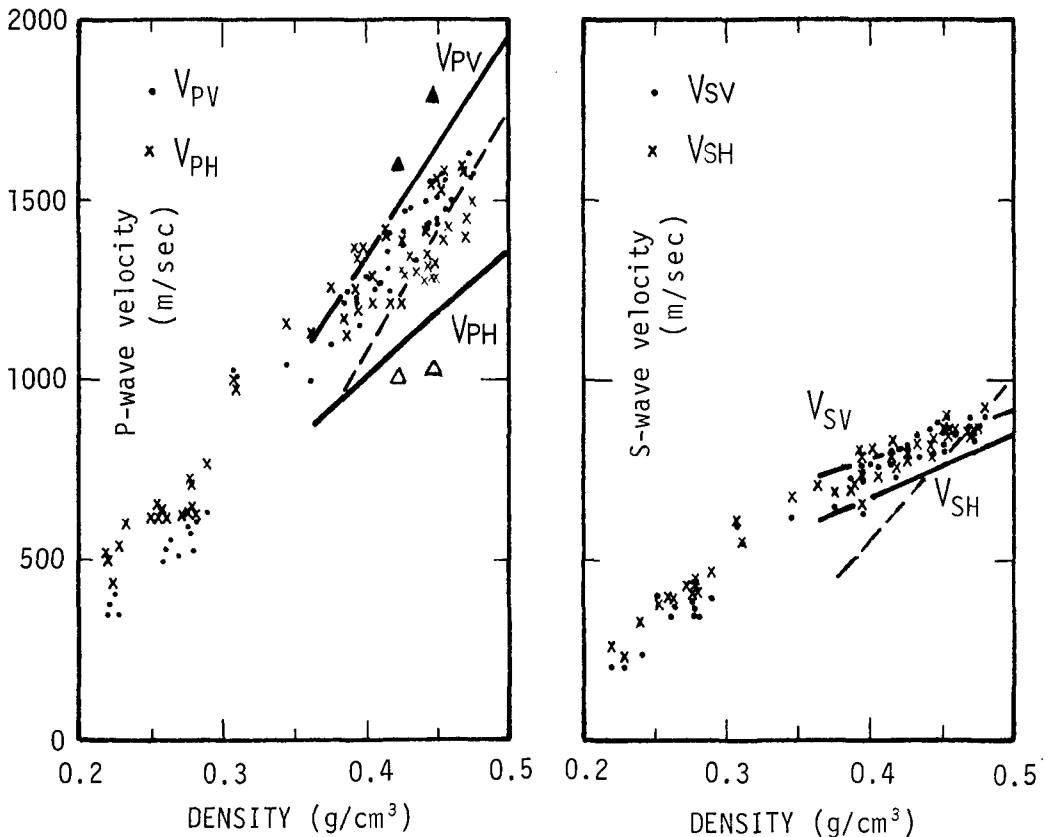


Fig. 2. Relations between the P- and S-wave velocity and the density of snow.

(a) P-wave velocity (V_P) (b) S-wave velocity (V_S)

V_{PV} , V_{SV} : measured in the vertical direction to snow strata

V_{PH} , V_{SH} : measured in the horizontal direction to snow strata

Solid lines represent V_{PV} ; V_{PH} , V_{SV} and V_{SH} of depth hoar at Mizuho Camp, Antarctica.

Dashed lines represent V_P and V_S measured by Smith at Camp Century, Greenland.

パルスの周波数は V_P が 400 KHz, V_S は 40 KHz であった。同一の試料について、試料温度 $-4^{\circ}\text{C} \sim -8^{\circ}\text{C}$ で鉛直方向 (V) と水平方向 (H) の伝搬速度, V_{PV} , V_{PH} , 及び V_{SV} , V_{SH} の測定を行なった。立方体試料の水平の2対の方向の V_{PH} , V_{SH} を測定したところ、測定誤差の範囲内で同じ値が得られたので、以後は任意の水平方向の伝搬速度を測定した。

2. 熱伝導率の測定

縦横 10×10 cm, 厚さ 8 cm の積雪試料を Fig. 1 のように設置し、定常法によって熱伝導率を求めた。すなわち試料の上下を一定温度に保たれた高・低熱源で挟んで試料中に温度勾配をつくり、熱流量板で測定された熱流量を、試料中の温度勾配で割ることによって熱伝導率が算出された。試料の平均温度は -9°C 付近に保たれ、 $0.6 \sim 0.9^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の温度勾配で測定がなされた。同じ均一な積雪のブロックから2個の試料が切り出され、一方は鉛直方向、他方は水平方向の熱伝導率の測定に用いられた。なお試料の上下に温度差を与えてから温度勾配が一定に落ち着くまでに要した時間は最高で3時間程度であった。

III. 測定結果

1. 縦波・横波の伝搬速度

Fig. 2 (a) に今回大雪山の積雪で測定した縦波 (P 波) の伝搬速度 V_P と積雪の密度との関係を、(b) に横波 (S 波) の伝搬速度 V_S と密度との関係を示した。今回の測定では密度が $0.2 \sim 0.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ の範囲の雪質は新雪、密度が $0.3 \sim 0.48 \text{ g}/\text{cm}^3$ の範囲の雪質はしまり雪であった。それぞれ、鉛直方向の伝搬速度を (●) で、水平方向の伝搬速度を (×) で表わした。新雪としまり雪の V_P , V_S は密度の増加と共に直線的に増加した。図に見られるようにしまり雪の V_{PV} と V_{PH} 及び V_{SV} と V_{SH} には顕著な差は認められなかったが、新雪では $V_{PV} < V_{PH}$, $V_{SV} < V_{SH}$ と

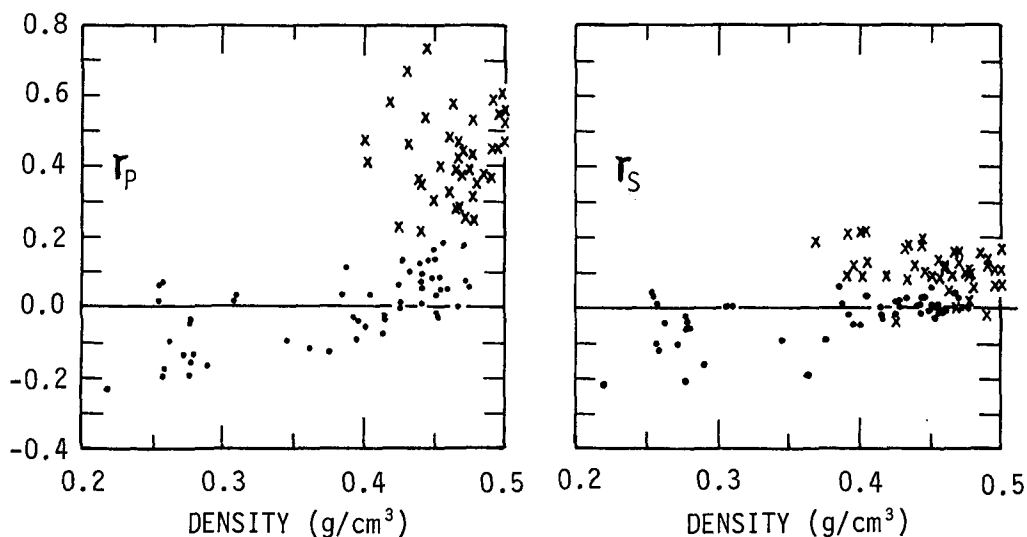


Fig. 3. Relations between the density of snow and the degree of anisotropy of snow (γ_P , γ_S) as to the P- or S-wave velocity.

×: depth hoar

●: new snow and fine grained compact snow

いう傾向がみられた。また姿見の池付近の標高 1,750 m の尾根上にあった密度が 0.420 と 0.445 g/cm^3 の 2 種類の非常に硬いしもぎらめ雪の測定値を比較のため \blacktriangle (V_{PV}) と \triangle (V_{PH}) で (a) 図のなかを示した。これらのかたいしもぎらめ雪は P 波に関する異方性が非常に大きく、 V_{PV} は V_{PH} の 1.4 倍もあった。これと同じ密度のしまり雪の V_{PV} の値はしもぎらめ雪の V_{PV} (\blacktriangle) と V_{PH} (\triangle) の間に分布していた。ところが P 波に対し強い異方性を示したしもぎらめ雪も S 波に対しては V_{SV} が V_{SH} よりわずかに大きいだけで、絶対値はしまり雪の値とほとんど同じであったので (b) 図には示さなかった。

Fig. 2 (a), (b) の太い実線は、著者の一人山田が南極大陸みずほ観測拠点のしもぎらめ雪について測定した V_{PV} , V_{PH} , V_{SV} , V_{SH} と密度との関係を示したものである。また同じ図の太い破線は Smith⁴⁾ がグリーンランドのキャンプセンチュリーで測定した V_P , V_S と密度の関係である。これらと今回の大雪山の測定結果を比べてみると、密度による V_P , V_S の増加の割合に大きな違いのあることがわかった。Smith は測定の方法を明らかにしていないが、弾性波速度の密度依存性を示す破線の勾配はわれわれの測定値のそれに比べて著しく大きかった。

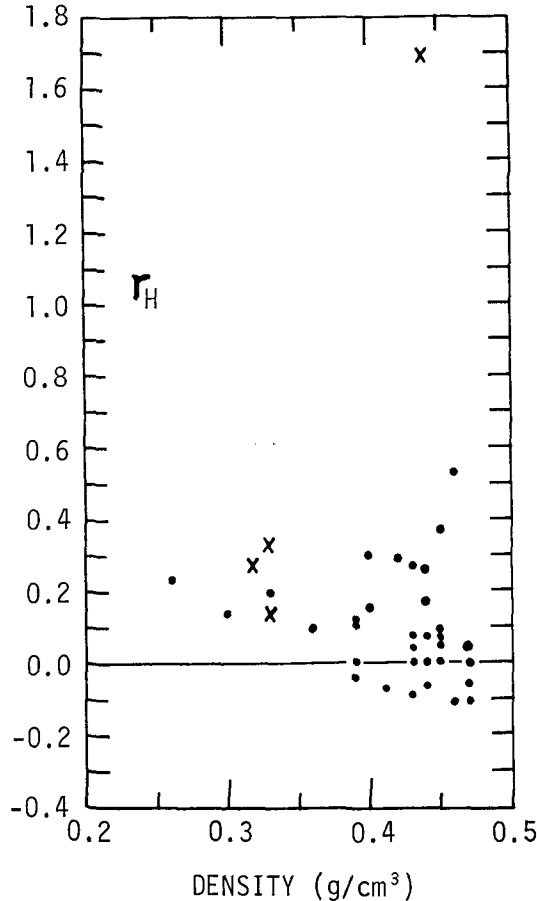


Fig. 4. Relations between the density of snow and the degree of anisotropy of snow (γ_H) as to Kinoshita's hardness.

- \times : depth hoar
- \bullet : new snow and fine grained compact snow

南極のしもぎらめ雪は常に $V_{PV} > V_{PH}$, $V_{SV} > V_{SH}$ で、密度と共に V_{PV} が増加する割合は今回のしまり雪よりわずかに大きく、 V_{PH} のそれは逆にわずかに小さかった。一方 V_{SV} , V_{SH} の密度依存性は今回のしまり雪とほぼ同程度であった。大雪山のしもぎらめ雪は V_{PV} , V_{PH} を南極のしもぎらめ雪と比べてみると、P 波に関する異方性がより大きい積雪であることがわかった。

上述したように大雪山における新雪としもぎらめ雪とは鉛直方向と水平方向で V_P , V_S が違っていった。そこでこの違いを、弾性波速度に関する異方度 γ_P , γ_S (以後、単に異方度と呼ぶ) を次のように定義することによって、個々の試料について調べてみた。

- i) $V_{PV} \geq V_{PH}$ のとき $\gamma_P = (V_{PV}/V_{PH}) - 1$
 $V_{SV} \geq V_{SH}$ のとき $\gamma_S = (V_{SV}/V_{SH}) - 1$
- ii) $V_{PV} < V_{PH}$ のとき $\gamma_P = -(V_{PH}/V_{PV}) + 1$
 $V_{SV} < V_{SH}$ のとき $\gamma_S = -(V_{SH}/V_{SV}) + 1$

Fig. 3 (a) に P 波, (b) に S 波に関する異方度と密度の関係を示した。新雪としまり雪を (\bullet) で示し、しもぎらめ雪は南極のしもぎら

め雪の結果とあわせて (×) で示した。新雪においては γ_P, γ_S 共に負、すなわち伝搬速度は水平方向の方が鉛直方向より一般に大きかった。密度が増加してしまり雪へと変態するにつれて γ_P は次第に正へと変化し、 γ_S はほぼ 0 となった。しもざらめ雪については常に $\gamma_P, \gamma_S > 0$ で、特に P 波に関する異方度 γ_P は大きく、かつ広範囲にばらついた。

大雪山におけるしまり雪としもざらめ雪について、試料の鉛直方向と水平方向の木下硬度 (H_V) と水平方向のそれ (H_H) も測定した。 γ_P, γ_S と同様に木下硬度に関する異方度 γ_H を求めたところ Fig. 4 に示したように γ_P と同様の異方性がみられた。

2. 積雪の熱伝導率

今回測定された新雪としまり雪の鉛直方向の熱伝導率 k_V (●) と水平方向のそれ k_H (○) 及びしもざらめ雪の k_V (▲) と k_H (△) を Fig. 5 に示した。

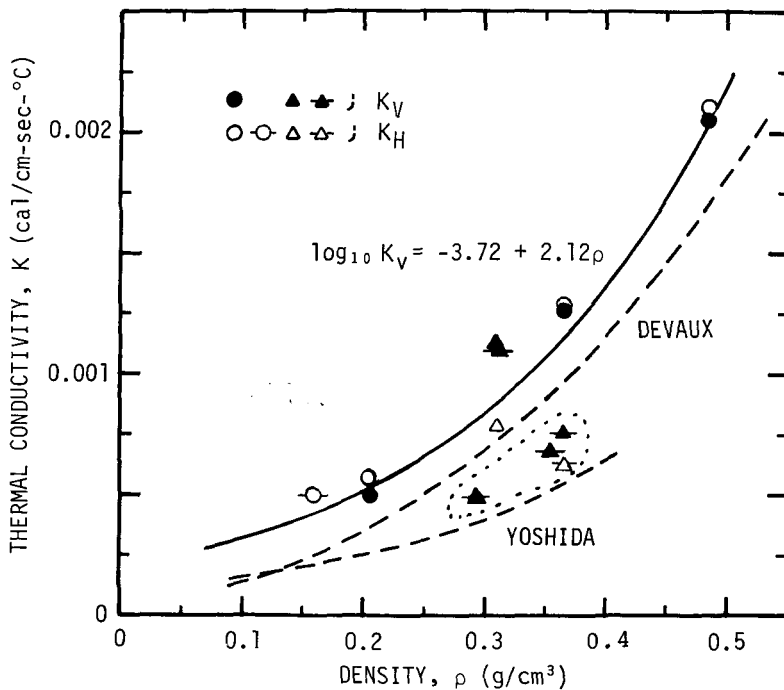


Fig. 5. Relations between the density of snow and the thermal conductivity of snow.

- ▲: measured in the vertical direction to snow strata (k_V)
- △: measured in the horizontal direction to snow strata (k_H)
- : new snow and fine grained compact snow
- ▲△: depth hoar

A solid curve represents k_V of new snow and fine grained compact snow.

和泉が大雪山の積雪試料ではなく、別の地域の自然積雪について定常法で求めた積雪の熱伝導率の実測値も参考のため ○○ (新雪の k_H)、-▲-, -△- (しもざらめ雪の k_V, k_H) で同じ図に示した。ただし点線で囲まれた -▲-, -△- は低温実験室で長期間ゆるい温度勾配がかかって生じた非常にもろいしもざらめ雪の k_V と k_H の値である。密度 0.37 g/cm^3 のもろいしもざらめ

雪以外は k_v と k_H が同時に同一試料で測定されていない。また、和泉は定常法によって求めた新雪としまり雪の k_v が積雪の密度 ρ と

$$\log_{10} k_v = -3.72 + 2.12\rho$$

という関係にあることを見出した。これを Fig. 5 に実線で示した。新雪としまり雪の k_v と ρ のこの実験式は 12 個の実測値から求められたが、実測値のこの曲線からの最大のずれはわずかに 11% であった。Fig. 5 には比較のため吉田⁵⁾ と Devaux (Meller)⁶⁾ の求めた熱伝導率と密度との関係も示した。

今回測定した新雪としまり雪の k_v , k_H はこの曲線にほぼ乗っていたが、しもざらめ雪の k_v , k_H は曲線の上下に大きくばらついた。粒子の結合の密な、硬いしもざらめ雪の場合はその k_v は曲線の上に k_H は下にずれた。一方粒子の結合の疎なもろいしもざらめ雪の場合は k_v , k_H ともに曲線の下にずれた。新雪の k_H は k_v より約 20% 大きく、しまり雪の k_v と k_H は実験誤差の範囲内 (3%) で等しく、しもざらめ雪の k_v は k_H の約 20~40% も大きかった。

積雪の熱伝導率に関する異方度 γ_k を、 γ_P , γ_S と同様に定義し、これと密度との関係をも求め Fig. 6 に示した。新雪及びしまり雪は (●) で、しもざらめ雪は (×) で示されている。新雪では $\gamma_k < 0$ 、しまり雪では $\gamma_k \approx 0$ 、しもざらめ雪では $\gamma_k > 0$ で、P 波に関する異方度 γ_P との良好な一致が認められた。

3. ま と め

(i) 同じ密度のしまり雪としもざらめ雪の P 波、S 波の伝搬速度と熱伝導率の値を積雪層に対し、鉛直と水平方向に測定して比較したところ次のような関係が見いだされた。

$$\begin{aligned} V_{PH} < V_P < V_{PV} \\ V_{SH} < V_S < V_{SV} \\ k_H < k < k_v \quad \text{or} \quad k_H < k_v < k \end{aligned}$$

ここで、 V_P , V_S , k はほとんど異方性を示さないしまり雪についての値で、他の V_{PH} , V_{SH} , k_H 等はしもざらめ雪についての値である。

(ii) 密度と共に V_P , V_S が増加する割合は、大雪山と南極とグリーンランドの積雪とで違っていた。

(iii) 弾性波の伝搬速度と熱伝導率についての異方度と雪質 (積雪組織) との関係は以下の表のようにまとめられた。

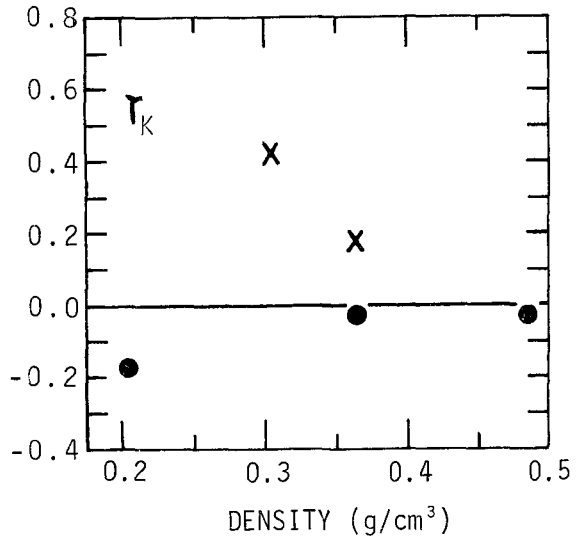
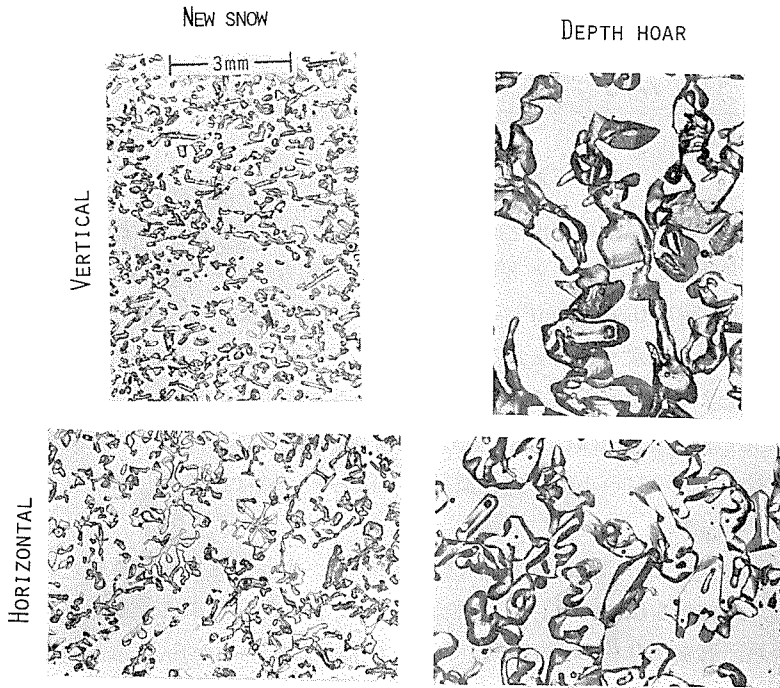


Fig. 6. Relations between the density of snow and the degree of anisotropy of snow as to thermal conductivity.

×: depth hoar
●: new snow and fine grained compact snow

(A) THIN SECTION



(B) CROSS SECTION

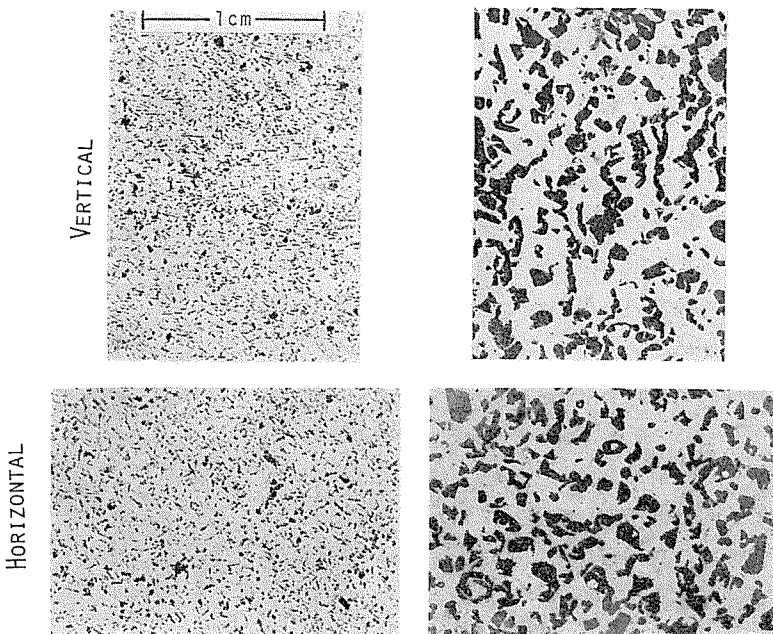


Fig. 7. Vertical and horizontal sections of new snow and depth hoar.

- (a) thin sections
- (b) cross sections

	P 波	S 波	熱 伝 導 率	木 下 硬 度
新 雪	$\gamma_P < 0$	$\gamma_S < 0$	$\gamma_k < 0$	—
し ま り 雪	$\gamma_P, \gamma_S, \gamma_k, \gamma_H \cong 0$ (大部分は $\gamma_P, \gamma_S, \gamma_k, \gamma_H \approx 0$)			
し も ざ ら め 雪	$\gamma_P > 0$	$\gamma_S > 0$	$\gamma_k > 0$	$\gamma_H > 0$

IV. 考 察

雪質の違いにより、P波とS波の伝搬速度と熱伝導率に大きな異方性が認められた。これらの異方性は積雪組織の異方性によるものと考えられる。そこで異方性のみられた新雪（密度 0.206 g/cm^3 ）としもざらめ雪（密度 0.308 g/cm^3 ）の組織を調べた。それらの薄片写真及び断面写真を Fig. 7 (A), (B) に鉛直方向と水平方向とに分けて示した。新雪の組織には板状の降雪結晶が板面を水平にして堆積した様子を残しており、鉛直方向より水平方向に良く繋がっていた。しもざらめ雪は粗大化した雪粒が鉛直方向に伸び、かつその方向に良く繋がった組織を持っていた。積雪粒子の繋がり方の良い方向に弾性波は早く伝わり、熱は良く伝わるのがわかった。

積雪を構成している氷の実質部分に加えられた弾性波振動は、氷と空気との音響インピーダンスの差が大きいため、氷部分を伝搬する。また熱流の場合も氷の熱伝導率は、水蒸気の拡散を含む見かけの空気の熱伝導率より約 50 倍も大きい⁵⁾と見積られているから、積雪の氷部分が圧倒的に熱を伝える。

いま積雪組織の極端な場合として Fig. 8 (a), (b), (c) のように断面が正方形の氷の角柱と空気が交互にならんでいる積雪模型を考え、図の矢印方向に弾性波動や熱が伝わるとする。積雪の弾性波の伝搬速度 V は見かけの距離 L を伝わるに要する時間 t を測定して、 L/t で求めた。(a), (b) の場合は長さ L の氷を伝わる弾性波の伝搬速度と同じとなるはずであるが、(c) の場合は弾性波の伝搬経路の実質の長さが L よりも長くなるため、見かけの伝搬速度は小さくなる。例えば密度 0.2 g/cm^3 程度の積雪の P 波の伝搬速度は氷のその約 1/10 であった。従って密度 0.2 g/cm^3 の積雪の氷部分の実際の伝搬経路は見かけの伝搬距離 L の約 10 倍程度あることになる。実際の弾性波の積雪中の伝搬の機構はこのように単純ではないと思われるので積雪の組織を解析することによってこの点を確かめる必要がある。一方熱流は熱の伝わる方向の氷の断面積が大きいほど多く流れ、熱が伝わっていく経路が見かけの距離 L に近いほど経路に沿った温度勾配も大きいから、見かけの熱伝導率は大きくなる。従って(a)の方が(b)よりも、(b)の方が(c)よりも熱伝導率は大きくなるであろう。これらの模型は異方性の極端な場合であるが、実測された積雪の弾性波の伝搬ならびに熱流に対する異方性はこれらの模型を参考にすることにより理解されるであろう。つまり、以上のことから、例えばしもざらめ雪の場合は、積雪粒子の繋がり方の良

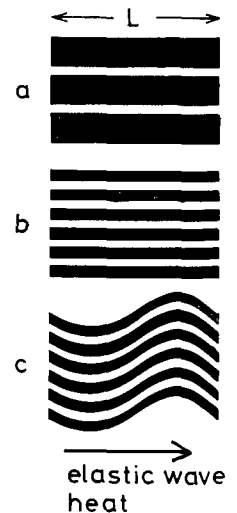


Fig. 8. Models of snow texture consisted of ice columns.

い鉛直方向の方が水平方向よりも氷部分の経路が短く、かつ氷部分の断面積が大きいと考えられる。

Fig. 2 に示したようにしまり雪は新雪に比べて V_P , V_S についての顕著な異方性は示さなかった。しかし、しまり雪に温度勾配がかかってしもぎらめ雪へと変態していく初期の段階で、わずかではあっても氷の粒と粒が鉛直方向へ繋がりを強めた場合には V_P , V_S に関する異方性が観測される。Fig. 3 に示したしまり雪の異方度 γ_P , γ_S の $\gamma_P, \gamma_S=0$ からのずれがそれである。大雪山や南極のしもぎらめ雪の異方度は γ_P , γ_S , γ_A , γ_H とも正で、同じ密度のしもぎらめ雪でも広い範囲にばらついていた。このことはしもぎらめ雪に変態する以前の積雪組織の違いや、しもぎらめ雪への変態の程度に応じて異方性の程度が異なるためであろう。

今回測定したしまり雪と南極のしもぎらめ雪、Smith の測定したグリーンランドの積雪の密度増加による V_P , V_S の増加の割合には、Fig. 2 に示されたような違いがあった。異なる気象条件のもとでは、変態の程度とそれに伴う積雪の密度増加との関係が異なるためにこのような違いが生じたものと考えられる。

上に示したように弾性波速度と熱伝導率の異方度は、積雪組織の特性、例えば粒子の大きさと形、平均粒子間隔、面密度、粒子の結合部の太さなどの異方性を量的に表現する因子として使える可能性のあることがわかった。

謝 辞

この研究に際し、いろいろとお世話頂いた、株式会社大雪山ハイランドの皆様へ深く感謝の意を表します。なお、当研究は昭和 48 年度文部省科学研究費総合研究 (A) の費用によって行なわれた。

文 献

- 1) 山田知充 1973 みずほ観測拠点より採取されたデープコアの P 波 S 波の伝播速度. 低温科学, 物理篇, **31**, 291-294.
- 2) 山田知充 1974 みずほ観測拠点より採集された深層ボーリングコア (深さ 75 m) の構造・組織と縦波・横波の伝搬速度との関係. 極地氷床氷の物理的・化学的研究, 23-27.
- 3) 山田知充・長谷美達雄 1974 みずほ観測拠点における表面積雪層の組織と熱伝導率との関係について. 極地氷床氷の物理的・化学的研究, 57-63.
- 4) Smith, J. L. 1965 The elastic constants, strength and density of Greenland snow as determined from measurements of sonic wave velocity. *CRREL T.R.*, **167**, 18 pp.
- 5) 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.
- 6) Meller, M. 1964 Properties of snow. *CRREL Monograph*, III-A1, 105 pp.

Summary

The velocity of an elastic wave through snow and the thermal conductivity of snow are strongly sensitive to its texture. Measurements of P-wave (V_P) and S-wave (V_S) velocities in snow were carried out by an ultrasonic pulse method, and the thermal conductivity of snow was measured by a stationary state method. Various types of snow, that is, new snow, fine grained compact snow and depth hoar, were used as spe-

cimens and thin sections and cross sections in both vertical and horizontal directions to snow strata were observed to find their textures.

It was found that the P-wave velocity of depth hoar measured in the vertical/horizontal direction to snow strata was larger/smaller than that of fine grained compact snow with the same density, and that the same was true for the S-wave velocity of depth hoar. For the thermal conductivity of depth hoar, k_v (the thermal conductivity in the vertical direction) of hard depth hoar was distributed above the solid line, which showed density dependence of the thermal conductivity of fine grained compact snow, but k_H (the thermal conductivity in the horizontal direction) of hard snow and both k_v and k_H of loosely bonded depth hoar were distributed below the solid line as shown in Fig. 5.

The degree of anisotropy of P-wave velocity in snow was defined as follows :

$$\tilde{\gamma}_P \begin{cases} = (V_{PV}/V_{PH}) - 1 & (V_{PV} \geq V_{PH}) \\ = -(V_{PH}/V_{PV}) + 1 & (V_{PV} < V_{PH}), \end{cases}$$

where V_{PV} and V_{PH} are the P-wave velocity measured in the vertical and the horizontal direction to snow strata. The similar definition, $\tilde{\gamma}_S$, $\tilde{\gamma}_k$, could be made to express anisotropies as to the velocity of an S-wave and the thermal conductivity. The anisotropy observed for various types of snow were :

	P-wave velocity	S-wave velocity	thermal conductivity
new snow	$\tilde{\gamma}_P < 0$	$\tilde{\gamma}_S < 0$	$\tilde{\gamma}_k < 0$
fine grained compact snow	$\tilde{\gamma}_P, \tilde{\gamma}_S, \tilde{\gamma}_k \cong 0$ (in most cases $\tilde{\gamma}_P, \tilde{\gamma}_S, \tilde{\gamma}_k \approx 0$)		
depth hoar	$\tilde{\gamma}_P > 0$	$\tilde{\gamma}_S > 0$	$\tilde{\gamma}_k > 0$

Microscopic observations of thin sections and cross sections of the specimens indicated that grains in new snow were joined together more strongly to the horizontal direction than to the vertical direction as seen in Fig. 7. On the other hand, snow grains of depth hoar were developed and tightly bonded to the vertical direction. However, fine grained compact snow was isotropic.