



Title	雪と雪・金属混合物の熱伝導度
Author(s)	村上, 茂樹; 前野, 紀一
Citation	低温科学. 物理篇, 48, 13-25
Issue Date	1990-03-12
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18580
Type	bulletin (article)
File Information	48_p13-25.pdf



[Instructions for use](#)

雪と雪・金属混合物の熱伝導度

村上茂樹

(北海道大学大学院理学研究科)

前野紀一

(低温科学研究所)

(平成元年10月受理)

I. はじめに

雪の中の熱輸送メカニズムとしては、1) 雪粒子の結合に沿う伝導、2) 水蒸気の昇華凝結による熱輸送、3) 対流による顕熱輸送、4) 放射などが考えられる。このうち積雪内部では、極端に大きな温度勾配下を除き対流は起きないと考えられる¹⁾、一般に放射は無視しうるほど小さい。従って1)と2)が重要なメカニズムと考えられる。このように純粋な熱伝導以外の熱輸送を含んだ、いわば実効熱伝導度のことを単に「熱伝導度」と呼ぶことにする。

積雪の熱伝導度は、密度が 600 kg/m^3 以下の範囲について Mellor (1964)²⁾、Yen (1981)³⁾によるレビューがある。多くの研究は熱伝導度を密度の関数として表しているが、その値は同じ密度の雪試料に対しても研究者によって数倍の違いがある。このばらつきの主因は和泉・藤岡 (1975)⁴⁾や Pitman and Zuckerman (1967)⁵⁾が示したように、雪粒子間の結合の違いによると思われる。しかし、積雪について熱伝導度と構造とを対応づけた研究は少ない。また、密度 600 kg/m^3 以上の範囲での熱伝導度の測定はほとんどない。

自然界には岩石氷河、凍土、氷衛星、彗星などの鉱物粒子を含んだ雪氷も存在する。凍土の熱伝導度についてはいくつかの測定があるが^{6,7)}、鉱物粒子及び氷の含有率、空隙率といったパラメーターを広い範囲にわたって変えて測定した例はない。

雪や鉱物粒子を含んだ雪氷の熱伝導度は、氷、空気、鉱物粒子の体積含有率と構造に依存すると考えられる。本研究の目的は、これらの要素と熱伝導度の関係を調べることにある。雪試料は密度 246 kg/m^3 から 917 kg/m^3 (純氷)までの天然と人工のものをを用い、熱伝導度測定後、薄片解析も行った。鉱物粒子を含んだ雪氷には鉱物粒子のモデル物質として銅粒子と鉛粒子を使った。これらの金属を使ったのは、物性が既知であるためと氷との熱的コントラストを明確にするためである。熱伝導度の測定にはサーマル・プローブ法を用いた。測定はすべて -11°C で行った。

II. 測定法

熱伝導度の測定には非定常線状熱源法のサーマル・プローブ法^{8~10)}を用いた。この方法は

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3304号

測定のとくに試料に与える温度勾配が小さく、測定時間が数分程度と短いので試料が変質を起こしにくいという特徴がある。

線状の熱源が均一で等温な無限試料内に存在する場合を考える。初期温度 $T = T_0$ の試料に時刻 $t=0$ より熱源から単位時間、単位長さあたり q の熱量を連続的に加える。加熱開始後、時刻 $t=t$ において熱源から距離 L だけ離れた試料内の点の温度は

$$T(L, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi K} \int_{L^2/4at}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

となる¹¹⁾。ここで K は試料の熱伝導度、 a は試料の熱拡散係数、 u は積分変数である。式(1)を漸近展開すると

$$T(L, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi K} \left\{ -\gamma - \ln\left(\frac{L^2}{4at}\right) + \frac{L^2}{4at} - \frac{1}{2 \cdot 2!} \left(\frac{L^2}{4at}\right)^2 + \frac{1}{3 \cdot 3!} \left(\frac{L^2}{4at}\right)^3 - \dots \right\} \quad (2)$$

となる。ここで γ はオイラー定数 (0.5772...) である。式(2)は加熱後の時間 t が十分大きく L が小さいとき ($L^2/4at$ が小さいとき)

$$T(L, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi K} \left\{ \ln\left(\frac{4at}{L^2}\right) - \gamma \right\} \quad (3)$$

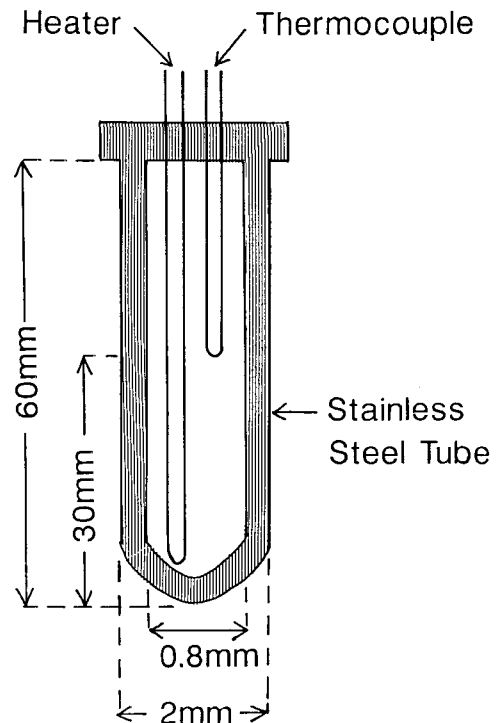
となる。時刻 t_1, t_2 間の温度差を ΔT とすると、式(3)より

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi K} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (4)$$

と書ける。式(4)から q と ΔT を測定すれば試料の熱伝導度 K が求まる。

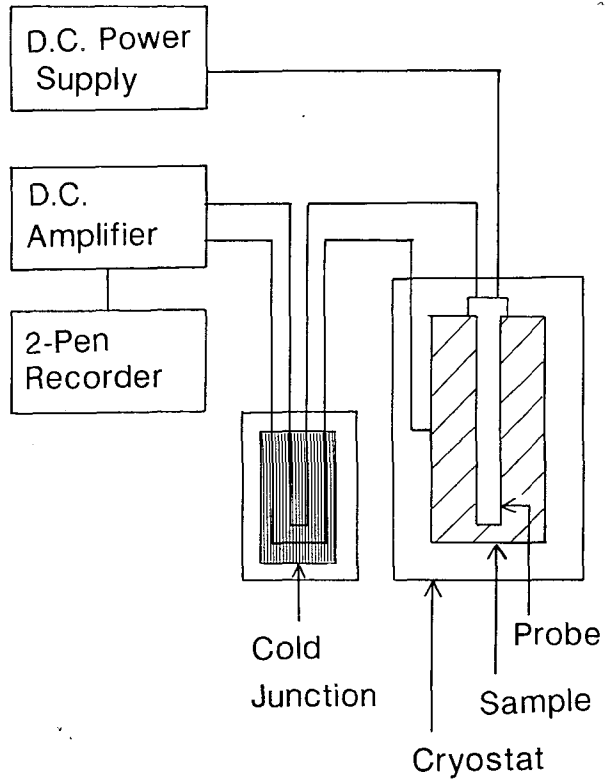
第1図に実験に用いた手製のプローブの構造を示した。長さ60mm、外径2mmのステンレス・スティール・チューブ内に、直径0.076mmのコンスタンタン線を2往復させたヒーターと、同じ直径の銅・コンスタンタン熱電対が入っている。さらにチューブ内の熱伝導を良くするためにチューブ内にはロウを注入して固めてある。プローブを試料に挿入するとき、プローブの表面にグリースを塗った。軟らかい試料に対してはプローブを直接突き差し、硬いものにはドリルで直径2mmの穴をあけてから挿入した。

第2図に測定システムの概略を示した。恒温槽 (HAAKE F3型) には、 -11°C のエチルアルコールを循環させ、精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ で



第1図 プローブの構造の模式図

温度を一定に保った。直径 4~6 cm、長さ 6~15 cm の円筒型の試料を恒温槽内に入れ、その中心部にプローブを挿入した。試料の側面には熱電対が取り付けられている。この熱電対とプローブに内蔵された熱電対からの出力は冷接点と直流増幅器（三菱 6 M 72 および大倉 AM 1001）を経て、2チャンネルペンレコーダー（横河電機タイプ 3053）に記録される。試料の中心と側面の温度差が 0.1°C 以下となり、両者の変動が 0.01°C 以下の状態が 10 分以上持続したとき、直流定電流源（高砂 GPT 601）から一定の電流が供給され測定が始められた。測定はひとつの試料について 2 回以上行い、その平均値を測定値とした。



第 2 図 システムの概略図

III. 試 料

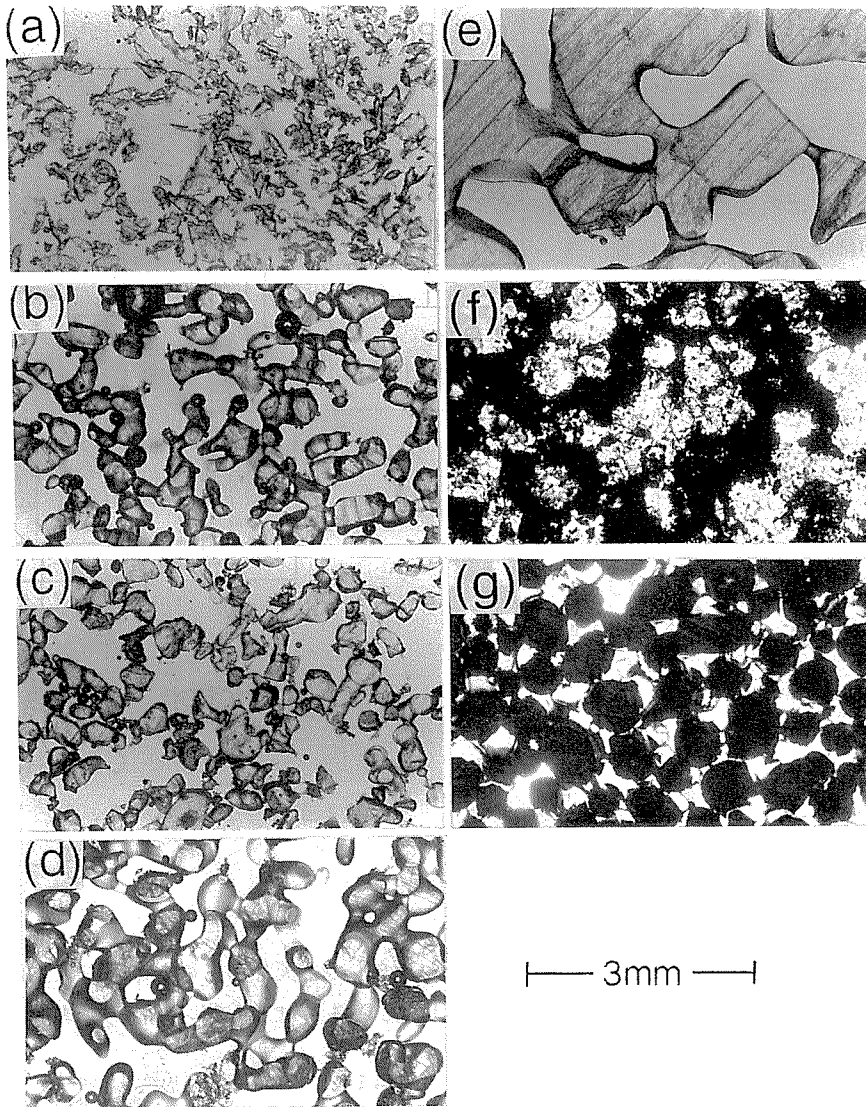
試料は、1. 雪と氷、2. 金属粒子を含む氷、3. 金属粒子を含む雪の 3 種類を用いた。

1. 雪 と 氷

第 1 表に雪と氷の試料をまとめた。試料は人工のものと天然のものがある。天然のものは温度勾配を水平にかけたときの熱伝導度を測定した。試料 A は氷を削って作った雪をシリンダーにつめ、一軸圧縮して密度に変化を与えたものである (第 3 図 (a))。圧縮する際の圧力は最大で 1 MPa、温度は -10~-5°C、圧縮時間は 10 分~数時間であった。天然試料である B₀ (しまり雪)、C₀ (こしもざらめ雪) をそれぞれふるいに通して結合を切り、A と同様にして圧縮したものが人工試料 B、C である。第 3 図 (b), (c) に B₀, B の薄片写真を示す。また、第 3 図 (d), (e) に試料 D₀ (硬いしまり雪)、南極みずほコアの薄片写真を示した。そのほ

第 1 表 雪氷試料の平均粒径と密度

	試 料 名	平均粒径 [μm]	密 度 [kg/m ³]
人	A	240	246~812
	B	390	389~807
工	C	660	433~702
天	B ₀	390	354
	C ₀	660	399
	D ₀	560	429
然	MIZUHO	1320	537~820
	BUBBLE ICE	—	897



第3図 試料の薄片写真 (a) 試料 A, 397 kg/m³, (b) 試料 B₀, 354 kg/m³, (c) 試料 B, 389 kg/m³, (d) 試料 D₀, 429 kg/m³, (e) みずほコア, 587 kg/m³, (f) 銅粒子 (平均粒径 22 μm) を 9% 含む氷, (g) 鉛粒子 (平均粒径 640 μm) を 15% 含む氷

か、密度 897 kg/m³ で気泡を含むコア (地下集塊氷)^{12,13)} も使用した。

2. 金属粒子を含む氷

鉛粒子と銅粒子が鉱物粒子のモデル物質として用いられた。熱伝導度は、氷、鉛、銅がそれぞれ 2.3, 36, 405 W/m・K であり氷とのコントラストが明確である。金属粒子の平均粒径は銅粒子が 22 μm、鉛粒子は 16 μm と 640 μm の 2 種類である。試料は金属粒子と雪試料 B を混合し、それに 0°C の水を加えて作った。測定終了後、試料を融かして金属の体積含有率 V_M を求めた。 V_M は試料全体の体積に占める金属の体積として定義し、3~43% まで変化させた。

一方、試料は平均数 % の空気を含んでいたが測定値は Woodside (1958)¹⁴⁾ のモデルに従い補正した¹⁵⁾。第 3 図 (f), (g) に平均粒径 22 μm の銅粒子を 9% 含んだ試料と平均粒径 640 μm の鉛粒子を 15% 含んだ試料の薄片写真を示した。黒く見える部分が金属粒子である。鉛粒子はほぼ均一に分布しているが (第 3 図 (g)), 銅粒子は凝集している可能性がある (第 3 図 (f))。同じことは平均粒径 16 μm の鉛粒子についてもいえる。

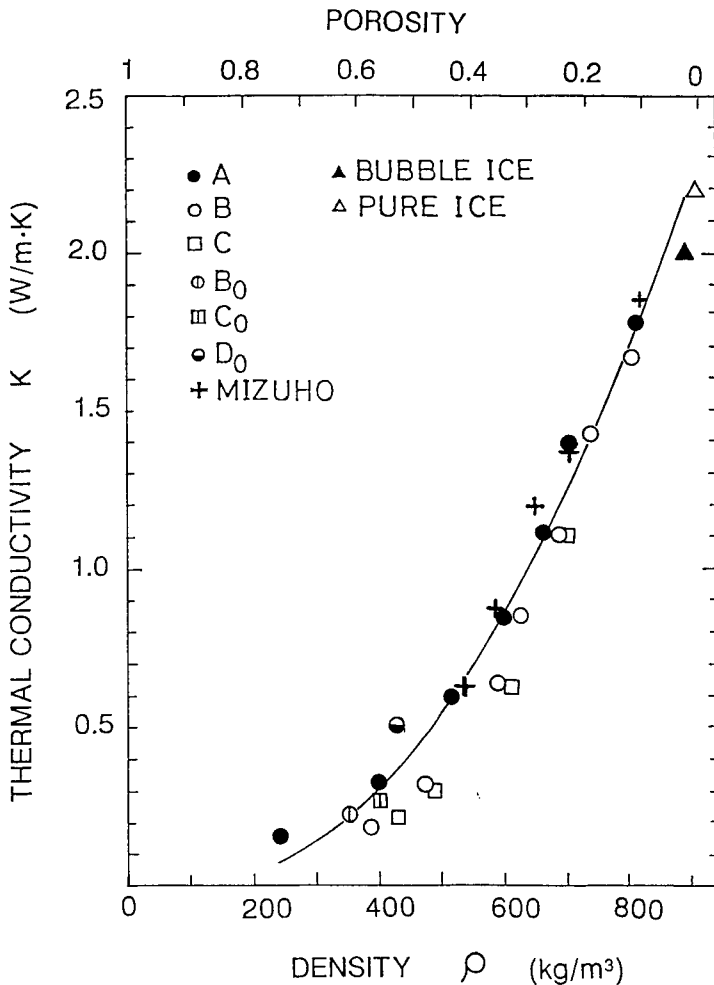
3. 金属粒子を含む雪

この試料は平均粒径 640 μm の鉛粒子と雪試料 B とを混合し、雪試料 A, B, C と同様の圧縮を行って作った。但し、圧縮時の温度は 0°C であった。鉛の体積含有率 V_{Pb} は 15% と 30% の 2 種類とした。

IV. 実験結果

1. 雪 と 氷

第 4 図に試料の密度 ρ と測定された熱伝導度 K との関係を示した。図中の曲線は最小二



第 4 図 雪と氷の熱伝導度と密度の関係

乗法で求めた回帰曲線で(5)式で表される。ただし、 K と ρ の単位は、それぞれ(W/m·K)および(kg/m³)、適用範囲は $250 \leq \rho \leq 917$ kg/m³である。

$$K = 0.102 - 1.04 \times 10^{-3} \rho + 3.73 \times 10^{-6} \rho^2 \quad (5)$$

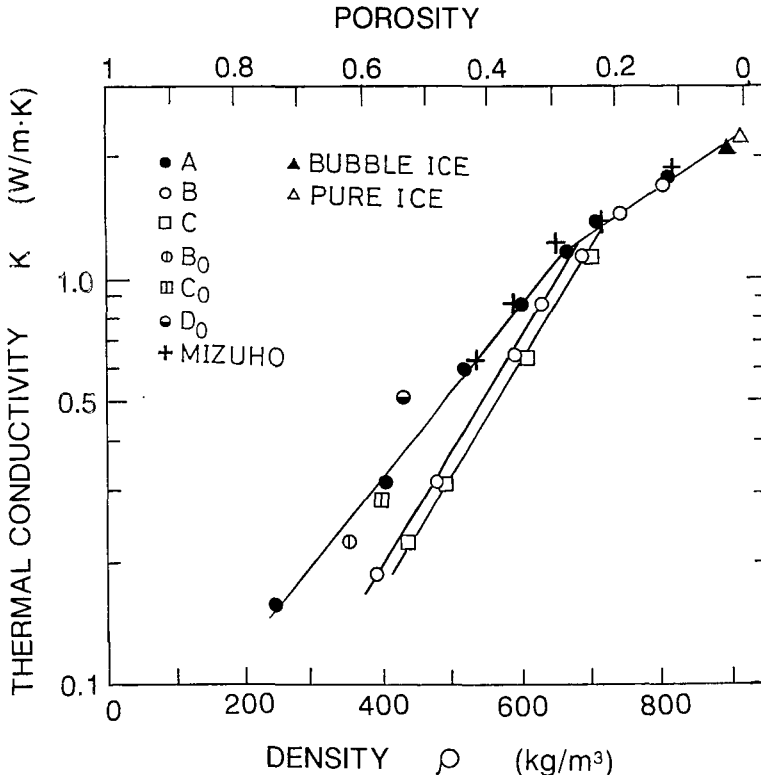
一方、第5図は密度に対して試料の熱伝導度の対数をプロットしたものである。試料B₀、C₀、D₀以外の試料については近似的に次の式が成り立つ。

$$\ln K = m\rho + n \quad (6)$$

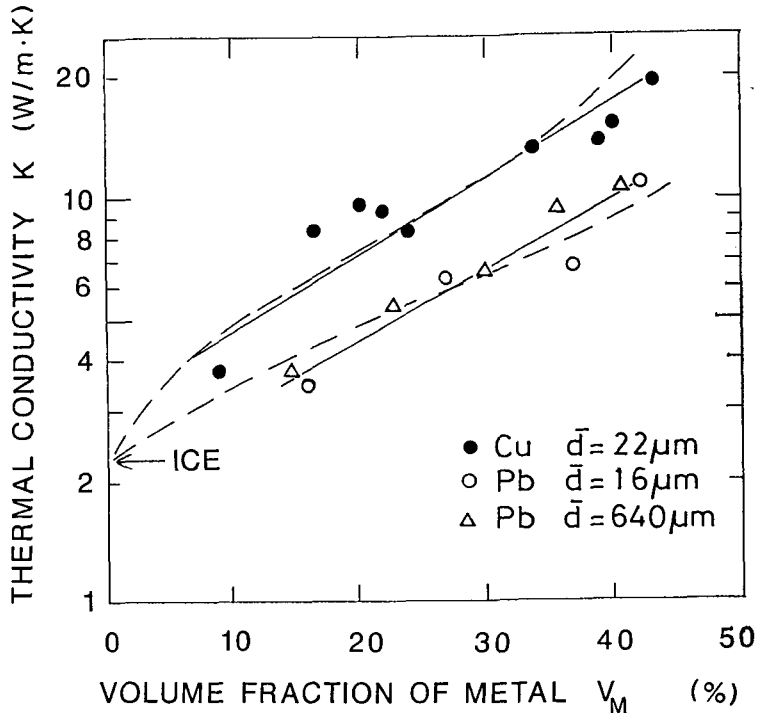
ここで m 、 n は定数である。密度約650 kg/m³以下ではそれぞれの試料ごとに m 、 n の値は異なるが、これ以上の密度では m 、 n の値は試料によらない。つまり試料B₀、C₀、D₀以外の測定結果は2本の直線で近似でき、密度約650 kg/m³で折れ曲がる。ところで密度約650 kg/m³以下の任意の密度でA、B、Cの熱伝導度を比べると、A、B、Cの順に小さくなっている。すなわち平均粒径の増加に伴って熱伝導度が減少している。この理由については後に議論する。天然試料であるB₀、C₀は、それぞれこれらをつるいに通し結合を切って作ったB、Cより大きな熱伝導度を示す。

2. 金属粒子を含む氷

第6図に熱伝導度 K の対数と金属粒子の体積含有率 V_M の関係を示した。 $\ln K$ と V_M とはほぼ比例関係にあり、式(6)と同様に



第5図 雪と氷の熱伝導度の対数と密度の関係



第6図 金属粒子を含む氷の熱伝導度の対数と金属の体積含有率の関係。実線は測定値の回帰直線，破線は Woodside (1958)¹⁴⁾ のモデルに基づく計算値

$$\ln K = mV_M + n \tag{7}$$

が成り立つ。図中の2本の直線(実線)は、銅と鉛についての回帰直線である。鉛粒子については、熱伝導度の粒径依存性が認められない。これは平均粒径 $16 \mu\text{m}$ の鉛粒子が凝集し、実質的には粒径 $640 \mu\text{m}$ の粒子と同じ効果を及ぼしているからと考えられる。

3. 金属粒子を含む雪

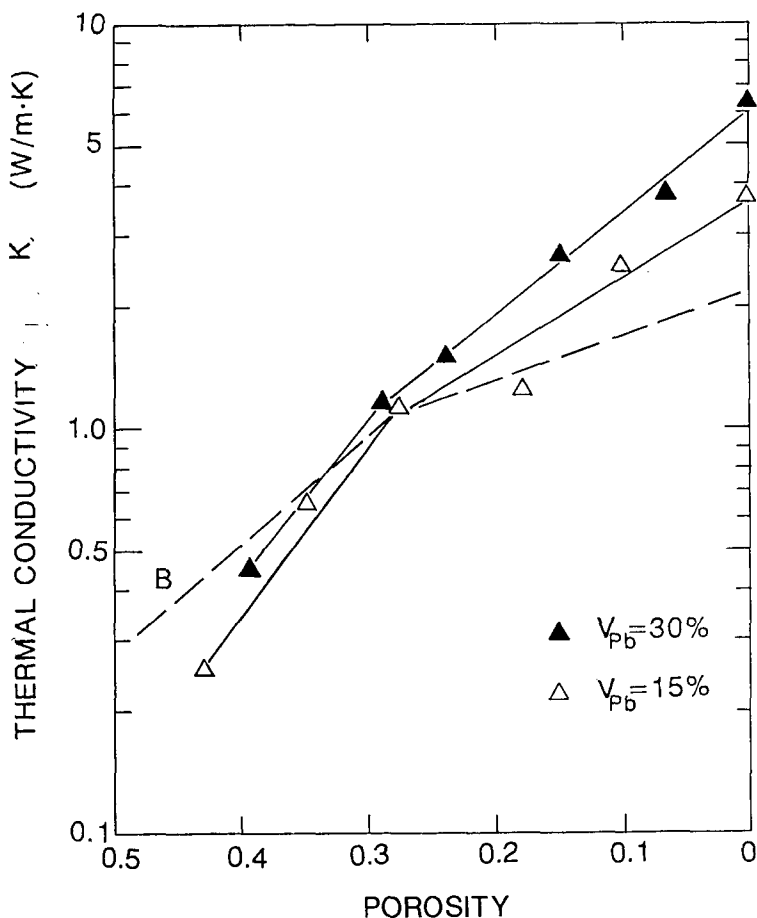
金属粒子(鉛粒子)を含む雪について、熱伝導度の対数と空隙率の関係を第7図に示した。 $V_{\text{Pb}} = 15\%$ の場合も 30% の場合も雪の場合と同様に、結果が2本の直線で近似でき空隙率約 0.3 で折れ曲がりが見られる。破線は雪試料Bについての結果で、折れ曲がりB(破線)と同じ空隙率のところできている。このことからこの折れ曲がり雪のものと同じメカニズムで起きていると考えられる。

また金属粒子を含む雪の熱伝導度は、空隙率約 0.3 以上ではBよりも小さく、それ以下の空隙率ではBよりも大きい。この結果は、後で述べるように、雪氷試料の熱伝導度に対する金属粒子の効果を考える上で重要な点である。

V. 考 察

1. 雪 と 氷

熱伝導度の測定後、雪試料の薄片を作り写真撮影し、雪粒子間の結合部の太さ $2X$ を測定

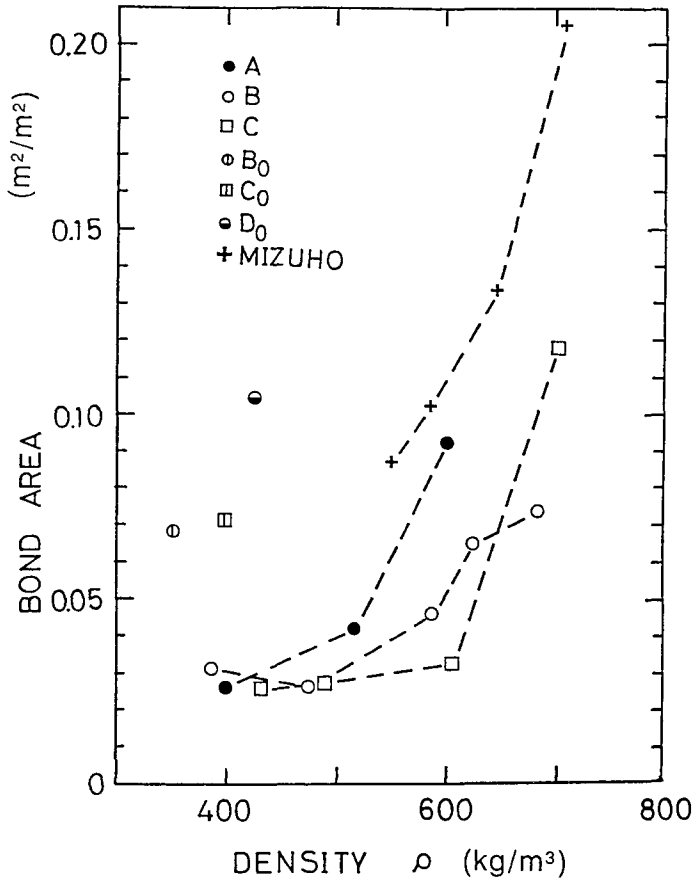


第7図 金属粒子(鉛粒子)を含む雪の熱伝導度の対数と空隙率の関係。
破線は試料Bの測定値を示す

した。この測定にはデジタイザ(グラフテック(株), マイタレット II-KD 4030)を用いた。結合部の切口が写真に垂直な円板であると仮定して $\Sigma(\pi X^2)$ を求め、これを測定した面積で割って単位面積あたりの結合部面積 (m^2/m^2) を求めた。第8図に密度と結合部面積の関係を示した。天然の試料 B_0 , C_0 , D_0 は大きな値を示している。それ以外の試料は密度約 650 kg/m^3 で急速に結合部面積が増大している。

第8図で B_0 , C_0 は結合部の面積が同一密度のほかの試料より大きく、 D_0 は特に大きい。第5図の熱伝導度はそのことに対応して、Bより B_0 のほうが、Cより C_0 のほうがそれぞれ大きくなっているし、 D_0 の熱伝導度はほかのものより特に大きくなっている。これらのことから粒子間結合は熱輸送に大きく寄与していることがわかる。また、結合部の面積は密度約 650 kg/m^3 で急速に増加しているが、熱伝導度は同じ付近で折れ曲がりがあり、両者が対応している可能性がある。

海老沼・前野(1984)¹⁶⁾ は雪の圧密過程において、歪速度の対数と密度との間には近似的に直線関係が得られ、直線がある密度で折れ曲がることを見つけた。彼らは、この密度で氷粒



第8図 薄片単位面積当りの雪粒子間の結合面積と密度の関係

子の充填状態が一つの安定な状態に達し、それまで卓越していた粒子の再配列メカニズムが重要でなくなるという意味でこの点を「限界密度」と定義した。限界密度は加える圧力に依存する。彼らの実験結果によれば、本実験のように約1 MPaでサンプルを作った場合、限界密度は約650 kg/m³となるが、第5図に見られる直線の折れ曲がり密度は約650 kg/m³となっている。

ここまでは雪の構造と熱伝導度の関係を考察してきたが、先に述べたように水蒸気の昇華凝結による熱輸送も無視できない。吉田・黒岩(1950)¹⁷⁾ はマイナス数°Cにおいて積雪の熱輸送における水蒸気の寄与率は約50%であることを示した。また、前野(1986)¹⁸⁾ は Woodside(1958)¹⁴⁾ と Pitmann and Zuckerman(1967)⁵⁾ の方法を使って積雪中の熱伝導度における水蒸気の寄与率を計算した。その結果、-10°Cにおいて密度200 kg/m³の場合40~50%、密度450 kg/m³の場合20~30%という値を得た。

第8図に示されたように密度約500 kg/m³以下では試料A, B, Cの結合部面積はほぼ一定である。しかし試料A, B, Cの熱伝導度はそれぞれ違っている。この違いは熱伝導度に対する水蒸気の寄与率が試料A, B, Cで異なるためと考えられる。第1表に示したように試料A

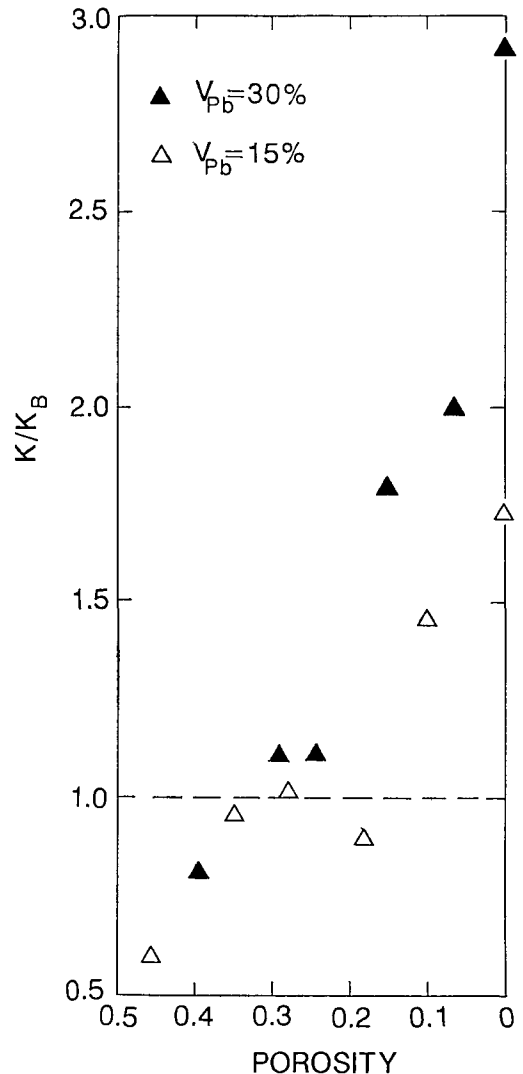
は粒径がいちばん小さく、ついでBそしてCという順になっている。ゆえに比表面積の大きさはAが最大、続いてB、Cの順となる。従ってこれらの試料が同じ温度勾配下にさらされたとき、最大の水蒸気フラックスを持つものはA、続いてB、最小のものはCであると考えられる。これが第5図でA、B、Cの熱伝導度が違うことの説明である。つまり同一密度の雪の場合、粒径が大きいほど熱伝導度に占める水蒸気の寄与は小さくなると思われる。事実、Sawada *et al.* (1982)¹⁹⁾ は粒径の大きな雪試料を使った熱伝導度の測定を行い、小さな測定値を得ている。

2. 金属粒子を含む氷

この試料に対して Woodside (1958)¹⁴⁾ のモデルを適用してみる。気体中に立方格子に配列した均一な固体の球を考える。そして次の2つの仮定のもとに、気体と固体の熱伝導度からこの系の熱伝導度を求める。第一の仮定は気体の占める部分が小さく、対流による熱輸送が無視できること、第二の仮定は等温面は平面で熱流の方向に垂直であるということである。ここで気体を氷に、固体の球を金属粒子にそれぞれ置き換えて金属を含む氷にこのモデルを適用してみた。第6図に破線で計算結果を示した。銅、鉛ともそれぞれの回帰線とほぼ一致することがわかる。

3. 金属粒子を含む雪

第7図において空隙率約0.3以上では、氷よりも1桁も熱伝導度のよい鉛の粒子を雪に混ぜているにもかかわらず、熱伝導度の値が雪試料Bの値より小さくなっている。この原因として次の2つが考えられる。第一に金属粒子を含む雪の場合、金属粒子自体は昇華を起こさないために同一の空隙率を持つ雪に比べて熱伝導度に対する水蒸気の寄与率が小さくなる。この効果は空隙率が大きいほど大きいと考えられる。なぜなら、熱伝導度に対する水蒸気の寄与率は、空隙率が大きいほど（密度が小さいほど）大きいからである¹⁸⁾。第二に雪の中に金属粒子が混じることによって、雪粒子間の結合の発達が妨げられる可能性が考え



第9図 試料Bの熱伝導度で規格化した鉛粒子を含む雪の熱伝導度と空隙率の関係

られる。

第7図の空隙率約0.3以下では、空隙の減少にともない、雪粒子間および雪粒子・金属粒子間の結合が発達すると思われる。そのため金属粒子の大きな熱伝導度の効果が効いてきて同一の空隙率を持つ雪より熱伝導度が大きくなる。

このように金属粒子を含む雪は、含まない雪に比べて熱伝導度が大きくなる場合と小さくなる場合がある。この様子を第9図に示した。横軸は空隙率、縦軸は雪試料Bの熱伝導度で規格化した熱伝導度、 K/K_B が取ってある。 K/K_B は空隙率約0.3以上で1より小さく、空隙率約0.3以下では1より大きいことがわかる。

VI. ま と め

天然および人工の雪と、金属粒子を含む雪氷について -11°C で熱伝導度を測定した。人工の雪試料は一軸圧縮して密度に変化を与えた。金属粒子は鉱物粒子のモデル物質として用いた。

雪の熱伝導度の対数と密度との間には近似的に直線関係が得られ、密度約 650 kg/m^3 で直線の折れ曲がりが見られた。この折れ曲がりには圧縮して作った人工の雪試料にも南極のみずほコアにも見られた。これらの試料の薄片解析を行った結果、密度約 650 kg/m^3 で結合が急速に発達することがわかった。結合の発達が折れ曲がりのメカニズムと対応していると考えられる。

金属粒子を含んだ氷の熱伝導度の測定結果は、Woodside (1958)¹⁴⁾のモデルを用いた計算結果とほぼ一致した。

金属粒子を含む雪の熱伝導度の対数と空隙率との間にも、雪の場合と同様の直線関係が得られ、空隙率約0.3で直線の折れ曲がりが見られた。また、金属粒子を含む雪の熱伝導度は、空隙率約0.3以上では同じ空隙率を持つ雪より小さく、空隙率約0.3以下では同じ空隙率を持つ雪より大きくなった。空隙率約0.3以上で金属粒子を含んだ雪の熱伝導度が雪より小さくなる原因は2つ考えられる。第一に金属粒子が混じったことにより、熱伝導度に対する水蒸気の寄与率が低下すること、第二に金属粒子が混じったことにより雪粒子間の結合の発達が妨げられることが考えられる。

本論文は著者のひとり(村上)が理学研究科修士課程の修了研究として実施したものをまとめたものである。終始助言をいただいた成瀬廉二助教授、西村浩一助手、サーマル・プローブ法について助言をいただいた福田正己助教授、南極みずほコアを提供いただいた成田英器講師、地下集塊氷の試料を提供くださった藤野和夫教授に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Akitaya, E. 1974 Studies on Depth Hoar. Contr. Inst. Low Temp. Sci., A 26, 1-67.
- 2) Mellor, M. 1964 Properties of Snow. CRREL Monograph III-A 1, AD-611023.
- 3) Yen, Y.-C. 1981 Review of Thermal Properties of Snow, Ice and Sea Ice. CRREL Report 81-10.
- 4) 和泉 薫・藤岡敏夫 1975 積雪の変態と熱伝導率の研究 I. 低温科学, 物理篇, 33, 91-102.

- 5) Pitman, D. and Zuckerman, B. 1967 Effective Thermal Conductivity of Snow at -88°C , -27°C and -5°C . *J. Appl. Phys.*, **38**(6), 2698-2699.
- 6) King, M. S. 1979 Thermal Conductivity Measurements on Saturated Rocks at Permafrost Temperatures. *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 73-79.
- 7) Sawada, S. and Ohta, T. 1985 Laboratory Studies on Thermal Conductivity of Clay, Silt and Sand in Frozen and Unfrozen States. Proc. Fourth Intl. Symp. on Ground Freezing, Vol. **2**, 53-58.
- 8) D'Eustachio, D. and Shreiner, R. 1952 A Study of a Transient Heat Method for Measuring Thermal Conductivity. *Amer. Soc. Heating Ventilating Engr., Journal Section*, **24**, No. **6**, 1-5.
- 9) Blackwell, J. H. 1954 A Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk. *J. Appl. Phys.*, **25**, No. **2**, 137-144.
- 10) 斎藤 武・岡垣 理 1956 不定常熱流による熱伝導率の迅速測定について. 北大工学部研究報告, **14**, 83-102.
- 11) Carslow, H. and Jeager, J. C. 1973 Conduction of Heat in Solids. 2nd ed., Oxford Univ. Press. 216 pp.
- 12) Fujino, K. 1986 Characteristics of the Massive Ice Body in the Western Canadian Arctic Related to Paleoclimatology. Inst. Low Temp. Sci. Hokkaido Univ.
- 13) Mackay, J. R. 1971 The Origin of Massive Ice Beds in Permafrost, Western Arctic Coast, Canada. *Can. J. Earth Sci.*, **8**, No. **4**, 397-422.
- 14) Woodside, W. 1958 Calculation of Thermal Conductivity of Porous Media. *Can. J. Phys.*, **36**, 815-823.
- 15) 村上茂樹 1987 雪氷の熱伝導メカニズム. 北海道大学大学院理学研究科修士論文.
- 16) 海老沼孝郎・前野紀一 1984 加圧焼結現象としての雪の圧密の研究 (I). 雪氷, Vol. **46**, No. **4**, 153-161.
- 17) 吉田順五・黒岩大助 1950 積雪内部の昇華. 低温科学, 物理篇, **3**, 89-100.
- 18) 前野紀一・福田正己編 1986 雪氷の構造と物性. 古今書院, 173-178.
- 19) Sawada, S. Seki, N. and Fukusako, S. 1982 Effective Thermal Conductivity of Deposited Snow. In Proc. Third Japan Symp. on Thermophysical Properties, 137-140.

Summary

Effective thermal conductivity of snow, ice, snow/metal mixtures and ice/metal mixtures was measured at -11°C . Snow samples are natural and artificial ones having a density of $246\sim 917\text{ kg/m}^3$. Metal (lead and copper) particles were used as model material for rock and soil particles. We employed a thermal probe method (non-steady state line source method) for conductivity measurements.

Both natural and artificial snow samples have a linear relation between the logarithm of thermal conductivity and density (or porosity) while the line bends at a density of about 650 kg/m^3 (or at a porosity of about 0.3). Thin section analysis shows rapid growth of intergranular bonds at the same density.

Snow/metal mixtures also have a linear relation between logarithm of thermal conductivity and porosity while the line bends at a porosity of about 0.3. This is the same porosity at which the bend occurs for snow samples. Thus the mechanism of bend for snow and snow/metal mixtures may be the same. Snow/metal mixtures show a smaller value of thermal conductivity than that of snow over a porosity about 0.3, but have a larger value under a

porosity about 0.3.

We applied Woodside's model (1958) to the experimental results for ice/metal mixtures. Calculated value from the model approximately agrees with the measured value.