

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	低温科學. 物理篇, 48, 13-25	
Issue Date	1990-03-12	
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18580	
Туре	Type bulletin (article)	
File Information	48_p13-25.pdf	



Shigeki MURAKAMI and Norikazu MAENO 1989 Thermal Conductivity of Snow and Snow/Metal Mixtures. Low Temperature Science, Ser. A, 48. (With English Summary p. 24)

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し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/m³ 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/m³ 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/m³ から 917 kg/m³ (純氷) までの天然と人工のものを用い、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℃ 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

低温科学 物理篇 第48 輯 平成元年

測定のとき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

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

$$T(L, t) = T_{0} + \frac{q}{4\pi K} \left\{ -\tilde{r} - \ln\left(\frac{L^{2}}{4at}\right) + \frac{L^{2}}{4at} - \frac{1}{2 \cdot 2!} \left(\frac{L^{2}}{4at}\right) + \frac{1}{3 \cdot 3!} \left(\frac{L^{2}}{4at}\right) - \cdots \right\}$$
(2)

となる。ここで \tilde{r} 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)

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

となる。時刻 t_1 , t_2 間の温度差を4Tとすると、式(3)より

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

と書ける。式(4)から*q と 4T* 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60 mm,外径2 mmのス テンレス・スティール・チューブ内に,直径 0.076 mm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 ン熱電対とが入っている。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 2 mm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(HAAKEF3型)には, −11℃のエ チルアルコールを循環させ, 精度±0.1℃で



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 栄6M72および大倉AM1001)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℃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。



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1MPa、温度 は $-10\sim-5$ °C,圧縮時間は10分~数 時間であった。天然試料である B_0 (し まり雪)、 C_0 (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 B_0 ,B の薄片写真を示す。また、第3図(d), (e)に試料 D_0 (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

第2図 システムの概略図

	試 料 名	平均粒径 [µm]	密 度 [kg/m ³]
人	A	240	246~812
	В	390	389~807
I	С	660	433~702
天然	B ₀	390	354
	C ₀	660	399
	D ₀	560	429
	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 μ m、鉛粒子は 16 μ m と 640 μ m 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 $V_{\rm M}$ を 求めた。 $V_{\rm M}$ 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 μ m 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Κとの関係を示した。図中の曲線は最小二



POROSITY

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

$$K = 0.102 - 1.04 \times 10^{-3} \,\rho + 3.73 \times 10^{-6} \,\rho^2 \tag{5}$$

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。

$$\ln K = m\rho + n \tag{6}$$

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、それぞれこれらをふ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。 $\ln K \ge V_M$ とはほぼ比例関係にあり、式(6)と同様に





* 6 図 玉柄和子を含む木の蒸伝導度の内奴と金属の体積含有率の肉伝。 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

$$\ln K = mV_{\rm M} + n \tag{7}$$

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 µm の鉛粒子が凝集し、実質 的には粒径640 µm 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。 $V_{Pb}=15\%$ 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、折れ曲がりは B (破線) と同じ空隙率のところで起きている。このことからこの折れ曲がりは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(㈱, マイタブレット 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 B₀, C₀, D₀ は大きな値を示している。それ以外の試料は密度約 650 kg/m³ で急 速に結合部面積が増大している。

第8図で B₀, C₀は結合部の面積が同一密度のほかの試料より大きく, D₀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 B₀のほうが, Cより C₀のほうがそれぞれ大 きくなっているし, D₀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/ m³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1MPaでサンプルを作った場合、限界密度は約650kg/m³となるが、第5図に見られる直線の折れ曲がりは密度約650kg/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500kg/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、間 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℃ 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/m³ で直線の折れ曲がりが見られた。この折れ曲がり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/m³ 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.
- King, M. S. 1979 Thermal Conductivity Measurements on Saturated Rocks at Permafrost Temperatures. Can. J. Earth Sci., 16, 73-79.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Woodside, W. 1958 Calculation of Thermal Conductyvity 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.
- 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/m³ (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 ٩

porosity about 0.3.

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