

北海学園大学工学部

正員 武市 靖

北海道開発局開発土木研究所

正員 久保 宏

まえがき

比較的積雪の多い地域の道路、特に軽交通道路では従来から路面積雪の断熱効果を考慮して、置換厚を低減した経済的な舗装断面で施工している場合が多いが、経験に基づくものがほとんどである。また、積雪の熱伝導率に関する研究では、平地部や山地部の積雪の研究は多いが、道路工学の観点から舗装設計や路面の雪氷管理に関わる路面積雪についての研究事例は少なく、断片的である。そこで、本研究は交通量や路面積雪状態の異なる道路等において、路面積雪の熱伝導率と密度との関係を調べると同時に、熱的性質についてアスファルト混合物との比較検討を行ったので、その概要について述べるものである。

1. 調査及び測定方法

路面積雪の調査は、今年の冬1月から2月末にかけて、札幌市内(主に、本学周辺)の国道230号線、生活道路のわだち凹部・凸部、路肩から道路端部の堆雪層、団地内道路、歩道及び本学構内道路を兼ねた駐車場について行った。全体で、約80か所の調査を行い、そのうち61か所について現場で、あるいは試料を実験室に持ち帰って、積雪層の温度、厚さ、密度、及び熱伝導率の測定をした。室内および現場で用いた熱伝導率計の仕様は表-1に示す通りである。

・室内測定・・・密度が比較的大きい路面積雪は採取した積雪塊を断熱箱に入れて実験室に持ち帰り整形して恒温室内で-10℃以下で一日養生し、試料全体の温度を一様にした後、密度、熱伝導率を測定した。

・現場測定・・・密度が小さく採取した積雪塊が輸送中に乱れ易い堆雪層については雪面を整形し、日射を遮りながら針状プローブを堆雪層内に挿入して直接、熱伝導率を測定した。その際、測定終了時の温度が-1℃以下であることを確認し、密度は体積既知のサンプラーで採取した積雪塊をその場所で電子天秤を用いて測定した。

・熱伝導率計の原理・・・両方の熱伝導率計の原理は同じである。無限円筒と見なせる形状の試料の中心に線熱源ヒーターを挿入して一定熱量(q)を与え続けると、ヒーター線の温度は時間とともに指数関数的に上昇し、時間(t₁-t₂)に対する温度上昇(T₂-T₁)の割合(温度勾配)から試料の熱伝導率(K)が $K=\{q \cdot \ln(t_1/t_2)\} / 4\pi(T_2-T_1)$ の式より求められる。

2. 測定結果と考察

測定箇所全体における路面積雪の熱伝導率(K)と密度(ρ)との関係は図-1に示す通り、 $\log K = -4.04 + 2.18\rho$ の関係式(曲線③)で表すことができた。この式は吉田の式(曲線④・ $\log K = -4 + 2\rho$)とほぼ一致した。一方、和泉らによる札幌周辺の積雪層についての測定結果(曲線②・ $\log K_v = -3.82 + 1.70\rho$ 、K_vは積雪層の垂直方向の熱伝導率を示しており、本計測も堆雪層以外はK_vである)とは近似しているが、山地部の積雪層のそれ

表-1 室内及び現場測定に用いた熱伝導率計の仕様

	室内測定	現場測定
熱伝導率計	Shotherm QTM迅速熱伝導率計	THERMO TEC熱伝導率計
測定方法	非定常(QTM式) プローブ法	非定常プローブ法
測定温度範囲	-10 ~ 200 °C	-20 ~ 80 °C
ヒータの発熱量	$8.3 \times 10^{-3} - 83 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec}$	0 - 0.36 cal/cm·sec
プローブ寸法	針状 1.6φ x 100 mm	100(H) x 50(W) x 110(L) mm
测温センサー	CA熱電対	白金測温抵抗体Pt100n
ヒーター線	電気抵抗の温度依存性が極小の金属箔線	コタツ用線 50 Ω

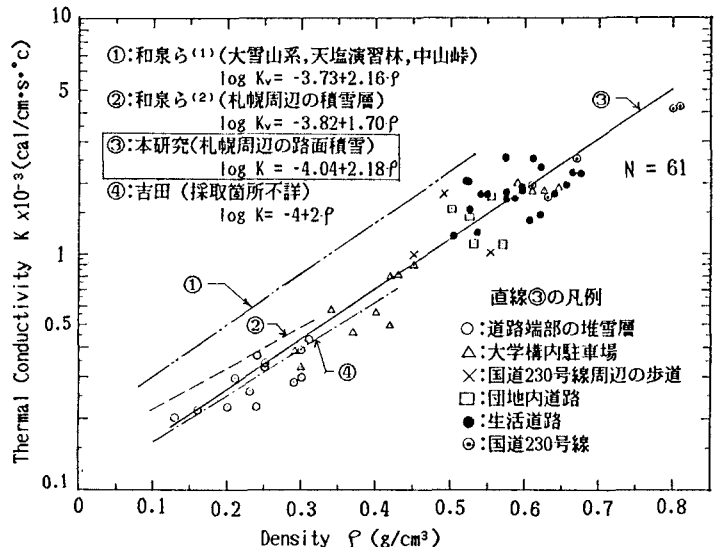


図-1 路面積雪の熱伝導率と密度との関係(北海道の各採取箇所における調査結果をも書き入れた)

（曲線①・ $\log K_v = -3.73 + 1.70\rho$ ）とは違いが出ている。これは和泉らが指摘しているように、密度が同じでも積雪組織やその異方性、変態によってその熱伝導率が異なるためであると考えられる。

路面雪氷について、前野は新たに 新雪、粉雪、圧雪、粒雪、氷板及び氷膜の7種類に大分類している。

一方、寒冷地での自然積雪は融解なしに、新雪、こしまり雪、しまり雪の変態過程（崩形変態）をたどる。その際に、雪温が高く積雪中に温度勾配があると、昇華蒸発・昇華凝結が促進され“しもざらめ雪”になる（成形成態）。路面上の新雪は車両によって破壊され粉雪に変化し、繰り返し輪荷重によって圧密され、ち密で丈夫な圧雪に変わる。圧雪は自然積雪分類における“しまり雪”に類似しているが、車両による雪構造の破壊、再分布が自然積雪より著しく大きく、不均質である。曲線①、②はしまり雪に関するもので、本研究の直線③は大部分が圧雪で、交通量の多い道路では圧雪層の下部が氷板になっている。

図-2はMellorが各国の研究者による積雪の密度に対する熱伝導率の測定例としてまとめたものに、図-1における①-④の測定結果を書き入れて比較したものである。Abels, Jansson及びDevauxの関係式を $K(\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ と $\rho(\text{g/cm}^3)$ で示すと次の通りである。

$$\text{Abels} : K = 0.0068 \rho^2$$

$$\text{Jansson} : K = 0.00005 + 0.0019\rho + 0.006\rho^4$$

$$\text{Devaux} : K = 7 \cdot (1 + 100\rho^2) \cdot 10^{-5}$$

各測定例はある巾でばらついており、①の山地部の積雪と本研究③の路面積雪の測定結果は上限と下限を示している。これは前述した通り、各測定例の中には崩形変態以外の成形成態をも受けた雪を含んでいること、また本研究のように路面積雪では車両による加圧焼結、スパイク状による機械的な変成、融雪剤やタイヤとの摩擦熱による凍結融解を受けた雪を主に対象にしていること等に帰因していると考えられる。

図-3は道内で一般的に用いられている細粒度ギャップアスコンを路面積雪の試料と同様の方法で測定した熱伝導率と温度との関係を示したものである。アスコン試体の熱伝導率は $0 \sim 32^\circ\text{C}$ の温度範囲でほとんど変化せず、その平均値は $0.00313(\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ であった。このアスコンの熱伝導率と各路面積雪の熱伝導率との比から、同じ温度勾配でアスコン層は路面積雪のおおよそ何倍の熱を伝えるかを示したのが表-2である。すなわち、断熱効果の点からは例えば、堆雪層1cmはアスコン層の7～12.5cm、生活道路の路面積雪では1.3～2.6cmに相当する。厳密には、道路気象条件を考慮した雪面ないし路面での熱収支問題として考える必要があるが、本研究では長期路面積雪（根雪）状態における定常熱伝導に対する考え方を示したものである。

3. 結論

路面積雪の熱伝導率を他の積雪層と同様に、密度の関数 $\log K = -4.04 + 2.18\rho$ として表すことができた。また路面積雪とアスコン層の熱伝導率の比から路面積雪の断熱効果をおおよそ知ることができた。実際の設計に適用する場合には、長期路面積雪が発生する時期の設定とそれまでに侵入する凍結深等の検討を要する。

参考文献 1) 吉田ら：積雪塊の熱伝導率の測定，低温科学，1947. 2) 和泉ら：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，低温科学，32号，1974. 3) 前野ら：道路雪氷の構造と新分類，低温科学，46号，1987. 4) Mellor：Properties of snow, CRREL Monograph, 1964.

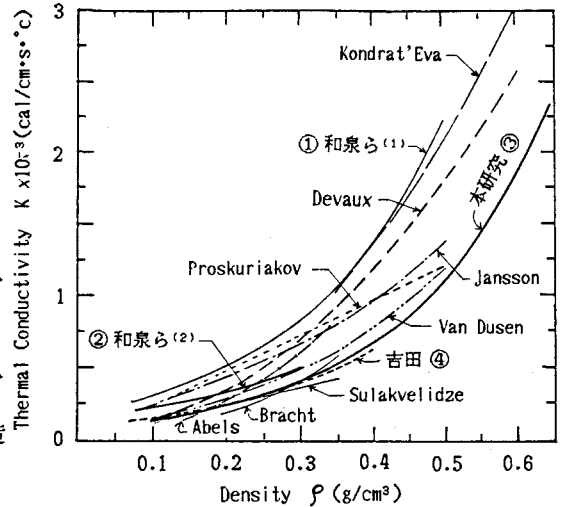


図-2 積雪の熱伝導率と密度との関係（Mellorの図に図-1で示した①-④の曲線を書き入れたもの）

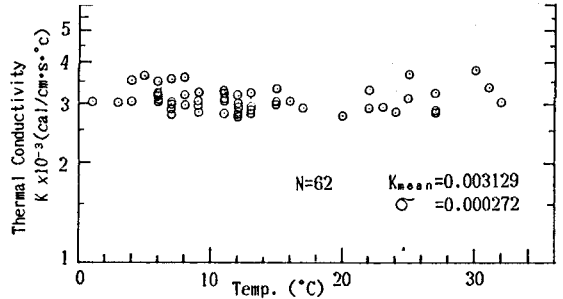


図-3 アスコンの熱伝導率と温度との関係

表-2 各路面積雪の熱伝導率とアスコンとの比較

積雪区分	熱伝導率(K_s) $10^{-3} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$	密度(ρ) g/cm^3	熱伝導率の比(K_a/K_s)
○	0.25～0.45	0.13～0.30	7.0～12.5
△	0.35～0.90	0.30～0.45	3.5～8.9
×	1.00～1.80	0.45～0.55	1.7～3.1
□	1.10～1.80	0.50～0.55	1.7～2.8
●	1.20～2.50	0.50～0.65	1.3～2.6
⊙	1.08～4.20	0.60～0.80	0.7～1.7

アスコンの熱伝導率： $K_a = 3.13 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$