

(元函館工專)

アスファルト舗装:

	アスファルト	石 粉	細骨材	25 ^{mm} ~0	5 ^{mm} ~2.5	13 ^{mm} ~5	20 ^{mm} ~13	40 ^{mm} ~20	計
トベカ	9.0	16.0	60.0	8.3	—	6.7	—	—	100 %
粗粒式アスコン	5.0	5.0	—	22.5	9.0	22.5	13.5	22.5	100 %
安定処理	4.0	1.5	23.6	—	12.3	16.1	14.1	28.3	100 %
路 盤	—	—	—	35.3	11.6	15.5	7.6	30.0	100 %

コンクリート舗装:

表層(レザーミクストコンクリート、函館生コン)

路盤(アスファルト舗装に
同じ)

W/C	S/A	スランポ	セメント	水量	細骨材	粗骨材
65.4 %	38.7 %	7 %	240 ^{kg} /m ³	157 ^{kg} /m ³	757 ^{kg} /m ³	1260 ^{kg} /m ³

4. 実験内容、結果

前述のようにアスファルト舗装、コンクリート舗装を、図-1のように屋外に3の内容に従って築造し、深さ方向それぞれ7点、5点の経時的温度変化を記録温度計を用いて、11月~4月の寒冷期間、自動測定記録した。図-2に温度測定点の配置を示す。両者とも断面は厚さ(路盤まで)0.8mとし、路盤内の温度変化を考慮してその測定点の厚さは、アスファルト舗装、コンクリート舗装の路盤への熱伝導の比較のため同じ高さにとっている。測定結果は図-3、図-4の通りであり、舗装の温度はもちろん表面に近いほど影響が大きい。

図-3、温度と深さ方向との関係(アスファルト舗装)

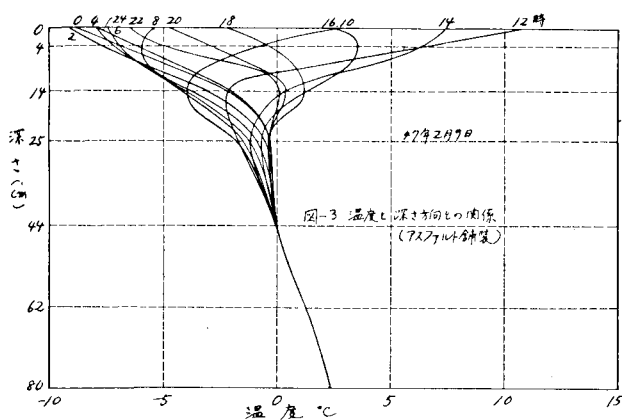


図-4、同(コンクリート舗装)

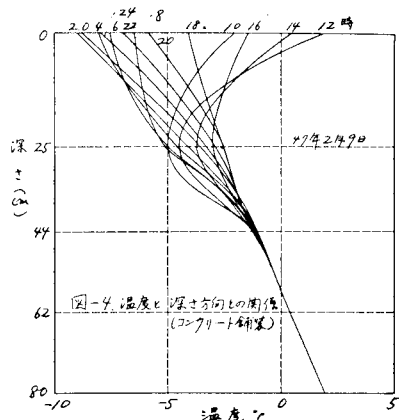
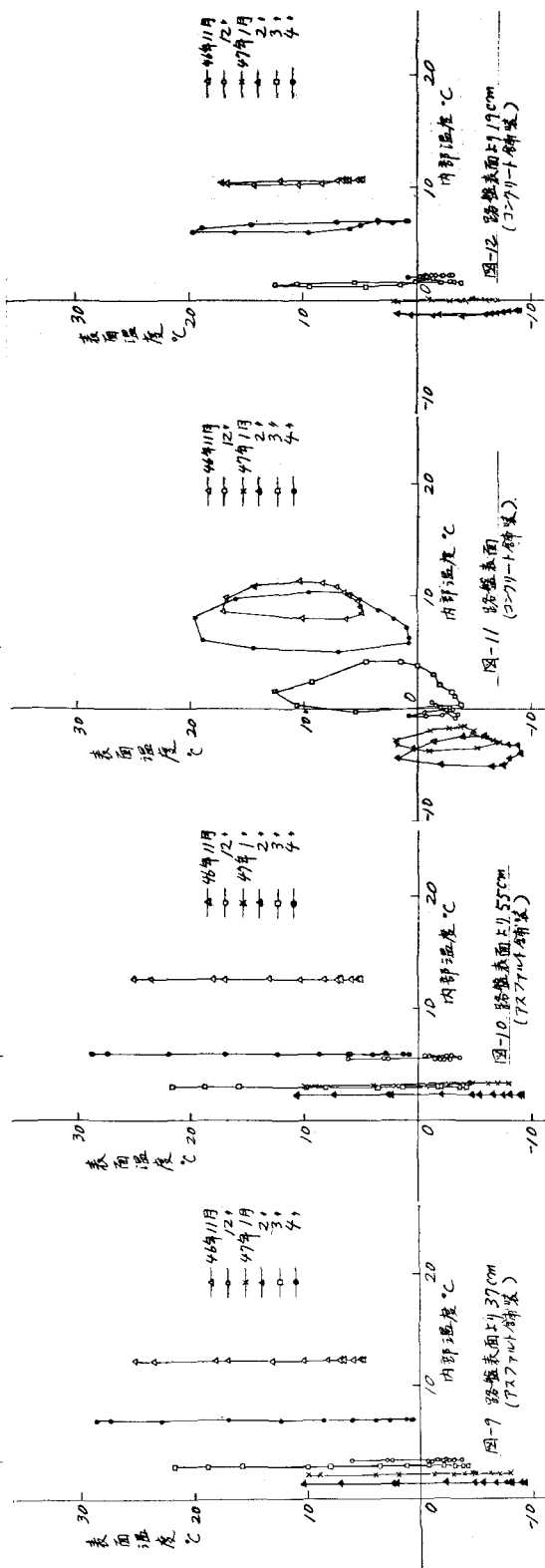
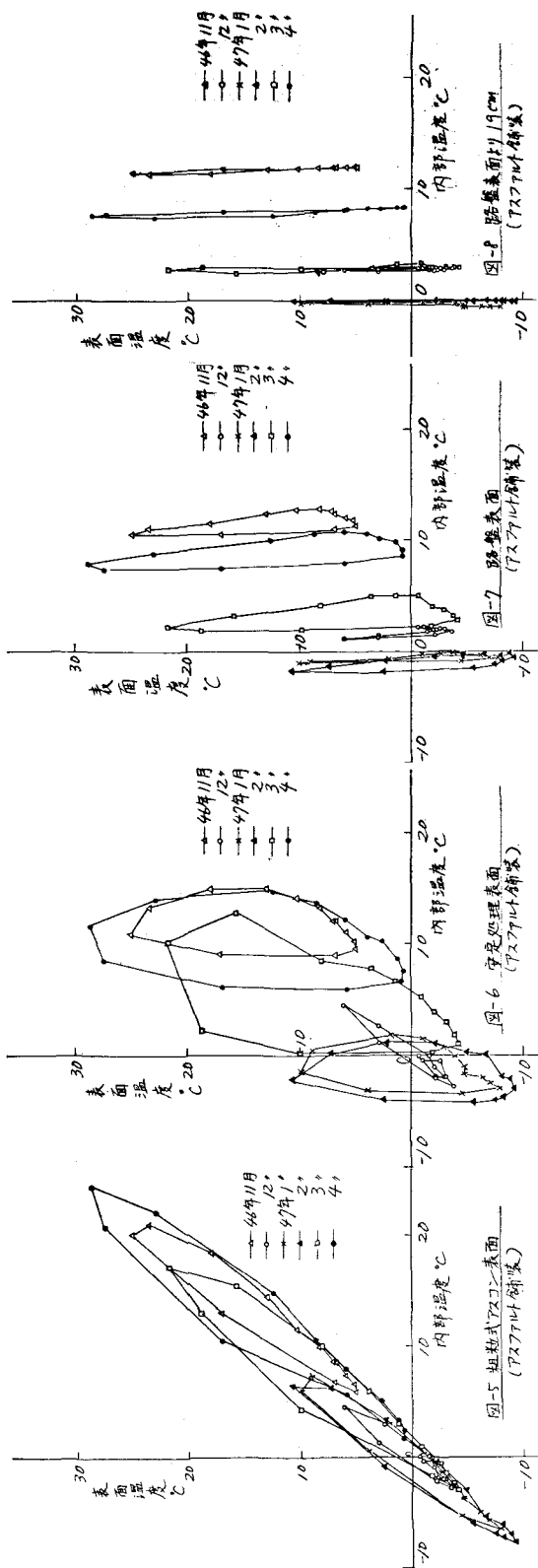
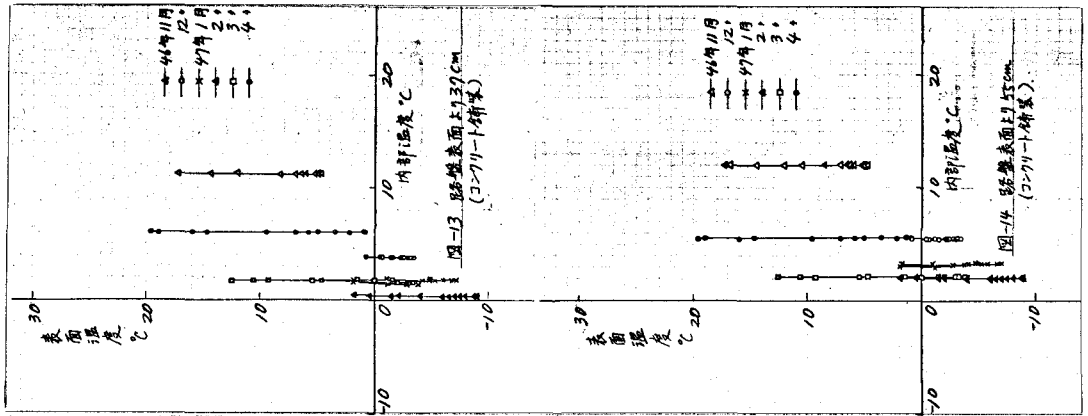


図-3、図-4は、昭和47年2月9日~10日におけるアスファルト舗装とコンクリート舗装の一昼夜の温度と深さ方向の関係を示したものであって、アスファルト舗装は10時~14時に表面温度が最高となり、14時を過ぎると熱の伝導によって深さ方向の温度が高くなる。コンクリート舗装の場合は10~16時に表面温度が最高で、16時以降は同じく深さ方向の温度が高くなる。温度の収束状態から、コンクリート舗装がアスファルト舗装の場合よりも温度が下層へ影響していることがわかる。

図-5~図-14は、アスファルト舗装、コンクリート舗装の同一日時における月別の厚さごとの内部温度と表面温度との関係を示し、構内温度は深くなるほど小さく温度変化が少なくなつて、縦線を示すようになる。ほとんど表面温度の影響がなくなる傾向を示す。表面から5cmの粗粒式アスファルトコンクリート上で構内が流れる状態にあるが、これは表面温度の影響の著しいことを示す。また、構内の横方向の経路の大きいものは、その月において、その深さにおける温度の振幅の大きいことを示している。縦型の構内は、表面温度の影響を受けながらも、その月において一定の温度範囲にあることを示し、直線に近似するほど一定温度に近づくことになる。この図において、同一深さにおけるアスファルト舗装、コンクリート舗装の路盤表面の温度をみる(図-7、図-11)、同じ気温の影響を受けながら温度変化がかなり違うことがわかる。アスファルト舗装は、表





面温度の変化は大きいが、路盤上の変化は少なく、振幅は小さく変化率は少なくなる傾向を示し、一方のコンクリート舗装は、表面温度の変化がアスファルト舗装の場合より小さいのに対し、変化率が大きく（振幅が大きく）、同じ冬期気温をうけながらアスファルト舗装より低温状態にある。これは、舗装を構成する材料の熱拡散率の違いから生ずるもので、コンクリートの熱拡散率が、今回の実験においてもアスファルト舗装のいずれの材料よりも高い値をとっていたことからでも明らかである。従つて舗装表面の温度変化が小さくても、熱拡散率の異なる、深さ方向への熱伝導が大きい場合があり、この場合のコンクリート舗装はアスファルト舗装に比し、低温の影響をうけやすく、路盤厚の設計には、それだけ十分な配慮が必要となる。今回の実測からは、最も低い2月の場合、アスファルト舗装路盤上の平均 -1.5° に対し、コンクリート舗装の路盤上では -4° であつた。他の月においても図からコンクリート舗装の方が低温であることがわかる。これは表面温度が $-9^{\circ} \sim -10^{\circ}$ の場合であるが、極寒地区にないば、なお大きい差が表われると考えられる。

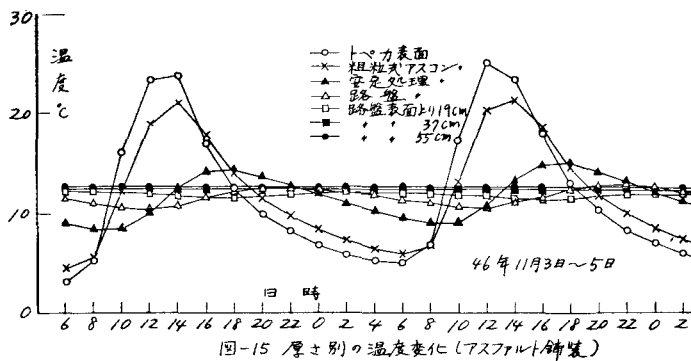


図-15 厚さ別の温度変化 (アスファルト舗装)

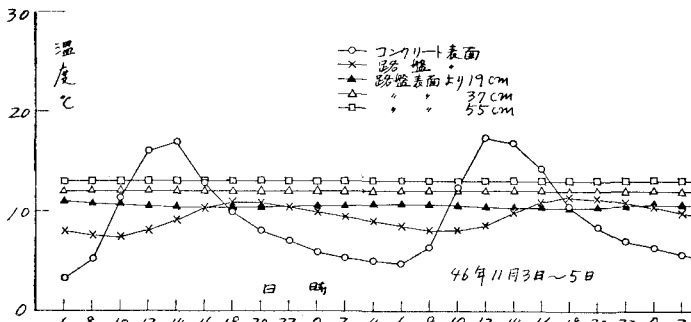
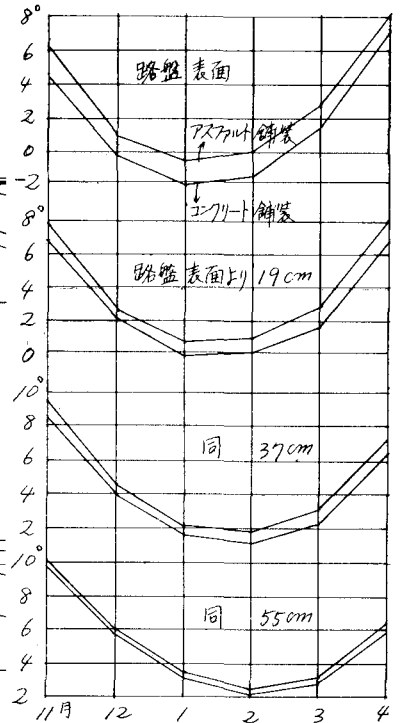


図-16 厚さ別の温度変化 (コンクリート舗装)

図-19. 月別平均温度の比較



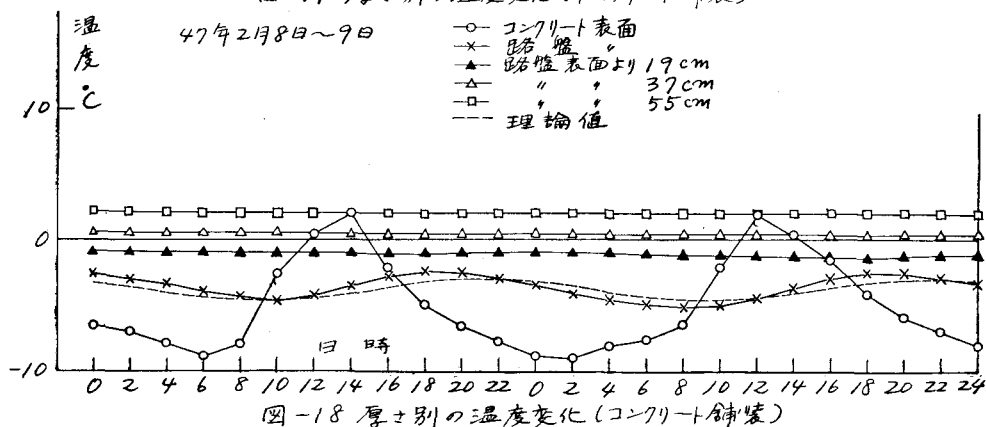
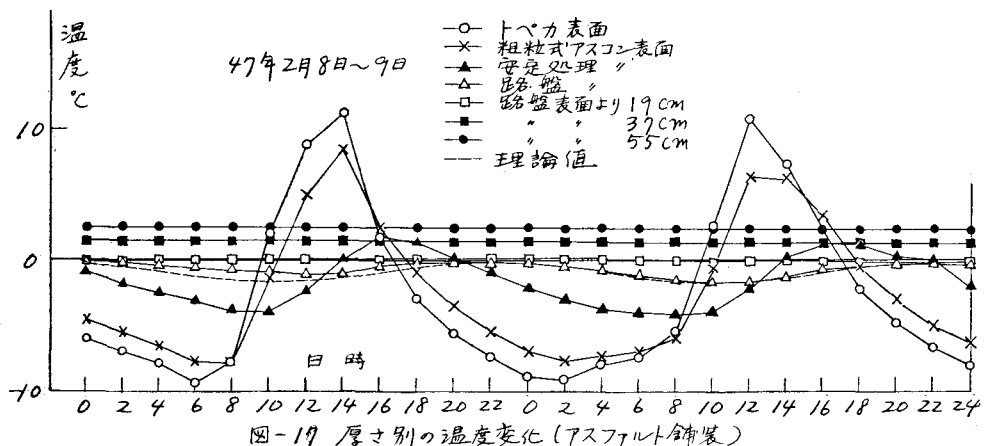


図-15~図-18は、昭和46年11月3日~5日、同47年2月8日~10日における24時間ごとの温度変化に厚さ別に示したものである。厚さによって温度こう配が異なるので、舗装内部温度もそれにともなって著しく変化しているが、アスファルト舗装、コンクリート舗装とも、路盤表面より19cmの部分になると表面温度の影響が少なくなる。それ以下はほとんど変動せず一定となつていて19cm以下は地中温度の影響をうけて両者とも上昇傾向にある。この関係をさらに同じ深さにおける両者の月別平均温度の比較をもつて示すと、図-19のようになり、深くなるとアスファルト舗装、コンクリート舗装の各層温度が地表面の影響が少なくなつて両者が次第に接近しつつ地中温度に近づくことがわかる。ただし、コンクリート舗装は、既述のように熱伝散率が大きいので全般にわたってアスファルト舗装より低温の状態を示している。

5. 熱伝導による舗装体内部温度の理論式

以上の実測結果について、次のように熱伝導論によって理論式を導出し、アスファルト舗装、コンクリート舗装の内部温度を検討してみる。ただし、式の熱伝散率 α は、それぞれの厚さの断面の混合物あるいは材料としての値を実験的に求める必要があるが、これはGloverの方法、Thomsonの方法で簡単に導かれ、結果は後記の表に示してある。

表面温度を $A \cos \omega t$ とした場合の半無限固体についての内部温度を求める。(実際には、観測された表面温度は、図に見る通りに正確には $\cos$ 関数ではないが、簡単のため近似するにこれとする。)

$$\text{熱伝導の基礎式} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \text{において}$$

はじめての温度が $f(x)$ で、表面温度が $A \cos \omega t$ と変化する場合、解を二つに分解し、

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad \text{とおく。}$$

θ_1 および θ_2 は、初期条件と、境界条件について次の表を満足するものとする。

	θ_1	θ_2
基礎式	$\frac{\partial \theta_1}{\partial x} = a \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2}$	$\frac{\partial \theta_2}{\partial x} = a \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2}$
$x=0$	$\theta_1 = 0$	$\theta_2 = f(x)$
$x=\infty$	$\theta_1 = A \cos \omega t$	$\theta_2 = 0$

これから θ_1 を周辺積分、 θ_2 を Fourier 積分 (= 重積分) によってあらわせば、次のように内部温度 θ が得られる。(計算、省略)

$$\theta = A \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) - \frac{2A}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-a\alpha^2 t) \sin \alpha x \frac{\alpha^3 d\alpha}{\alpha^4 + \omega^2/a^2} \\ + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} d\alpha \int_0^{\infty} f(x) \sin \alpha x \cdot \sin \alpha x \exp(-a\alpha^2 t) d\alpha$$

上式において、時間 t が増大するに従って第 2 項、第 3 項は次第に小さな値になる。時間が十分経過すれば温度分布が完全に周期的になり、最初の温度分布の影響は消えてしまい、定常的周期温度として

$$\theta = A \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$$

となる。温度高低の周期を τ_0 で表わせば

$$\theta = A \exp\left(-x\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_0} - x\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}\right)$$

これから位置を一変にたもち時間 t を変化させた場合、すなわち x における層を仮定してその層内の温度の時間的変化を考えた場合の x における温度変化 θ を求めることができる。 θ は x につき余弦曲線的に変化し、温度の最大振幅の変化は

$$\theta_{\max} = A \exp\left(-x\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}\right)$$

となり、 x が増加するとともに急激に減衰することになる。(すなわち、ある一定以上の深さの奥においては、温度の変動が少しもおこらない。) ここで a = 熱拡散率、 A = 表面温度の振幅最大値、 τ_0 = 表面温度の周期、 t = 経過時間、 x = 層の厚さ、また、舗装面振幅、各層の厚さ、熱拡散率を示すと次表の通りである。

$\uparrow h_1$	$\downarrow x_1$	a_1	θ_1
$\uparrow h_2$	$\downarrow x_2$	a_2	θ_2
$\uparrow h_3$	$\downarrow x_3$	a_3	θ_3
$\uparrow h_4$	$\downarrow x_4$	a_4	θ_4

名称 舗装種類	舗装面振幅 A	各層の厚さ				熱拡散率 ($\times 10^{-5}$)			
		h_1	h_2	h_3	h_4	a_1	a_2	a_3	a_4
アスファルト	20°	4 ^{cm}	10	11	55	220	202	184	136
コンクリート	11°	25 ^{cm}	—	—	55	238	—	—	136

以上から、路盤表面について理論式を求めると次のようになる。

アスファルト舗装について

$$\theta_{II} = 1.50 \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_0} - 154.7^\circ\right)$$

コンクリート舗装について

$$\theta_I = 1.40 \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_0} - 140.3^\circ\right)$$

上記の結果を図示すると、同一深さとしてアスファルト舗装、コンクリート舗装表面より 25 cm の路盤上位置の温度変化は、図-17、図-18 の実線のようになり、実測値にやや近い余弦曲線が得られる。ただし、コンク

リート舗装の場合、熱拡散率が実験値では、標準より低かったため、曲線は実験よりいくぶんずれて低く表われている。(コンクリートの熱拡散率は、高温状態で著しく低くなることを確かめられていて、常温の室内実験と低温の舗装状態との差異が結果に表われたと考えられる。)

6. 結論

実験から、アスファルト舗装とコンクリート舗装について、同一気温であっても表面温度によって各層にわたる温度差が見られ、断面を構成する材料の熱拡散率によって、理論的にも差があることが明らかである。この研究では、コンクリート舗装がアスファルト舗装に比し、舗装全厚について温度の影響する深さが大きいことがわかったが、結局、コンクリートの熱拡散率の大きいことによるもので、凍結深さを設計上考慮する場合には一般にアスファルト舗装よりも深く計算しなければならぬことになる。また、凍結深さはどこまで考慮すればよいかは、舗装面振幅、熱拡散率を実験的に求めておいて各層の温度変化から求めることとできる。以上の低温の各層温度特性から、寒冷地においては、舗装の種類によって舗装全厚を検討する余地があると考えられる。

参考文献

- 1) 岩間 滋; コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究、コンクリート・ライブラリー、第12号、土木学会、1965
- 2) 秋山政敬、細田昌夫; たわみ性舗装体の温度特性について、土木学会年次学術講演概要、第IV部門、第23回、1968、10。
- 3) I. D. Papo; Verfahren zur Ermittlung der erforderlichen Dicke flexibler Fahrbahnbefestigungen nach thermischen Gesichtspunkten. Bitumen-Teere-Asphalt-Pech und Verwandte Stoffe. 1969. 5.
- 4) 道路工事設計要領、北海道土木部。
- 5) 橋 藤雄、甲藤好郎; 熱伝導論・熱伝導論、共立出版
- 6) 藤本武助、佐藤 俊; 伝熱工学、共立出版
- 7) 川下研介; 熱伝導論、オーム社
- 8) 小平吉男; 物理数学、第2巻、文献社。