

# アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究

## ON THE PREDICTION OF TEMPERATURE IN PAVEMENT STRUCTURES

近藤佳宏\*・三浦裕二\*\*  
By Yoshihiro KONDO and Yuji MIURA

### 1. まえがき

舗装体内温度を正確に把握することは、舗装の合理的設計を行う際に必要不可欠なことである。コンクリート舗装にあっては、温度応力に対する配慮からすでに舗装体内温度が版厚設計の上に組み込まれているが、アスファルト舗装の場合交通荷重に対する種々の応答が温度に大きく依存しているにもかかわらず、設計上舗装体内温度に対する考慮が払われていない<sup>1)</sup>。これは設計法そのものが今日まで経験中心に発展してきたことに起因しているが、近時アスファルト舗装の構造設計も力学的数学的解析を基礎とするようになり、コンクリート舗装同様舗装体内温度を定量的に把握し正確な構造解析が要求されるようになった<sup>2)</sup>。しかしながら、舗装体内の温度特性は自然条件に支配される問題であって長期間にわたる実測データの積み重ねが必要であり、多大の費用と時間を要することもあって、舗装体内温度の推定に関する研究はこれまで決して十分であったとはいえない。

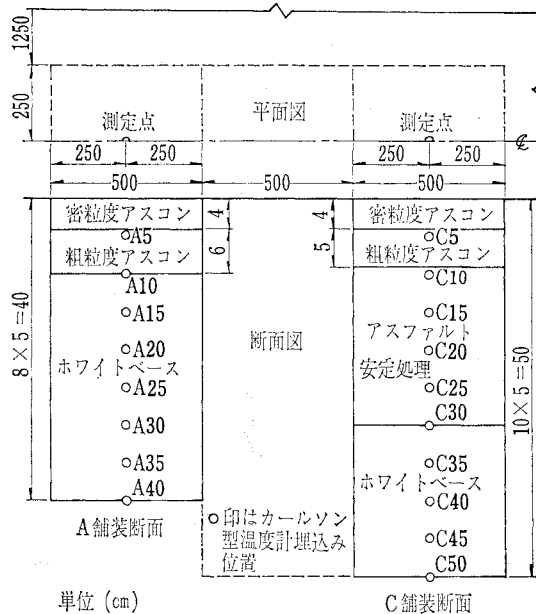
そこで本論は、舗装体内温度の時間的変化および分布について1年間にわたり実測し、同時に大気温度などの気象条件をも観測し、それらの資料を基礎として次に示す項目について解析的研究を行ったものである。

- 1) 温度に関する資料を確率統計的に解析し、その特性を明らかにする。
- 2) 大気温度および舗装表面温度から、任意深さにおける舗装体の最高および最低温度の推定式を求める。
- 3) 大気温度および舗装表面温度から、任意時間および深さにおける舗装体内温度の推定式を導く。
- 4) 非定常熱伝導方程式の解として得られる舗装体内温度との比較を行う。

### 2. 気象観測と温度測定

この研究で用いた気象および舗装体内温度のデータは、千葉県船橋市習志野台日本大学理工学部校舎内の交通総合試験路とその近隣地で得られたものである。温度測定のための舗装構造は、図-1に示すA, C 2種類でありそれぞれ深さ5 cmごとにカールソン型温度計を埋設し温度測定を行った。

舗装体内温度に直接または間接的に影響をおよぼす環境条件は、日射量、気温、風向、風速、湿度、雲量、降雨量などの気象条件<sup>3)</sup>と路床土の含水比や熱特性、または地熱などの地下条件など、さまざまな要因が考えられる。今回の研究では、これらの要因の中より大気および外気温度、輻射温度を取り上げ、舗装体内温度推定のた



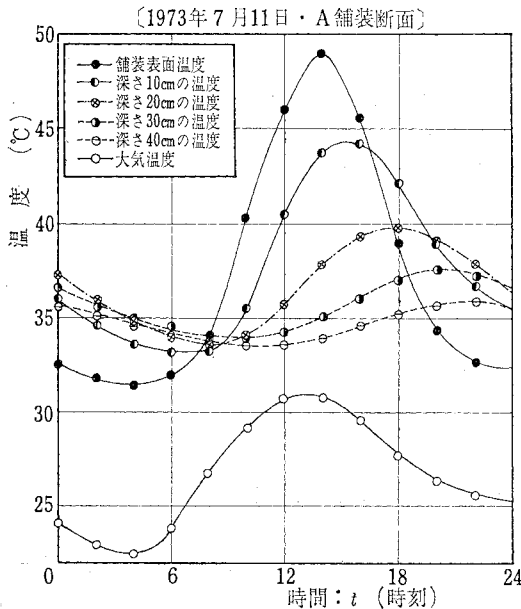
単位 (cm)

C 舗装断面

図-1 温度測定に用いた舗装構造

\* 学生会員 日本大学理工学部大学院修士課程在学中

\*\* 正会員 日本大学助教授 理工学部交通工学科



図一 観測結果 (各温度の経時変化および分布)

めの資料とした。ここで大気温度とは、百葉箱中で地上 1.2 m の高さで測定された温度であり、外気温度とは地上 1.2 m の高さで外気にさらされた温度計の示す温度であり、さらに輻射温度とは地上 1.2 m の高さで感温部をアスファルトで被服した温度計の示す温度である。これらの温度は、太陽輻射熱の吸収の強弱を付けるために試験的に求めたものである。

さらに気象と舗装体内温度を結び付ける媒介として舗装表面温度をも測定因子とした。表面温度は、降雨や風などに影響され時々刻々変化するので、その正確な測定は非常に困難である。そこで表面温度以外に舗装表面に深さ 3 および 5 cm の小孔を設けグリセリンで満たし、温度計をさし込むことによって表面付近の平均的な温度を測定した。

温度測定期間は、昭和 48 年 7 月から昭和 49 年 6 月までの 1 年間であり、測定は 0 時から 6 時までは 2 時間ごとに、そのほかは毎時間ごとに行った。図一は温度測定結果の一例である。

### 3. 温度測定結果

図一に示したように、舗装体内の各温度および大気温度は、時系列変動の中の循環変動をしており、その周期は 24 時間とみなすことができる<sup>8)</sup>。また年間を通してみると、いかなる月でも各温度の最高、最低を記録する時間はほぼ一定であり、大気温度および表面温度は 12~14 時に最高となり、3~6 時に最低を示し、舗装体内温度が最高あるいは最低となる時間は、5 cm 深くな

るごとに約 1 時間のおくれが生じ、かつ最高温度と最低温度の差は減少する。

舗装体内温度の深さ方向の分布もまた時々刻々変化する。昼間と夜間では周知の通り温度勾配は逆転する。これらの傾向は、他地域での観測研究結果にもみられる<sup>1)~4)</sup>。

### 4. 数値解析方法

気象条件や舗装体内温度は、長期的にみれば極めて規則的であるといえる。しかしそれはあくまでも年間あるいは月間を通しての平均的変動に対していえることであり、時々刻々変動する気象や舗装体内温度を物理的法則に従う公式で表現することは非常に困難なことであり正確な予測は不可能としてよいであろう。したがって気象条件の変動に伴う舗装体内温度を定性的、定量的に把握するためには、多くの資料を基礎とした統計的確率的な処理が必要となる。

そこで得られたデータの数値解析にあたっては、統計量が高い信頼度を持つことに努力し、また工学的利用が容易になされるよう、実験式作成にあたってはその複雑化を避けるよう努めた。

数値解析にあたっての統計的手段は周期分析、単純相関分析、回帰分析であるが、それぞれの分析の目的と内容は次に説明する通りである<sup>10)</sup>。

#### (1) 周期分析 (P.A.)

周期解析にあたって測定因子の周期性を有為水準 5% で  $F$  分布検定を行い、測定因子が単なる偶然変動ではなく、一定の規則性を持った変動であることを確定し、調和解析にあたっては、周期曲線の各調和項が有為であるか否かを有為水準 5% の  $F$  分布検定によって行った。

#### (2) 単純相関分析 (C.A.)

各測定因子間の単純相関係数 ( $r$ ) を算出し、相関関係の有無を有為水準 5% の  $t$  分布検定によって検定し有為であれば回帰直線を求め、推定の標準誤差 ( $S_e$ ) を求めた。

#### (3) 回帰分析 (R.A.)

各変数要素の深さおよび時間に対する回帰を有為水準 5% の  $F$  分布検定によって検定し、有為であれば回帰方程式を求め、推定の標準誤差を求めた。

数値解析をフローチャートで示したのが図一<sup>3</sup>である。図に示したように、解析は舗装体内温度分布あるいはその時間的変化を

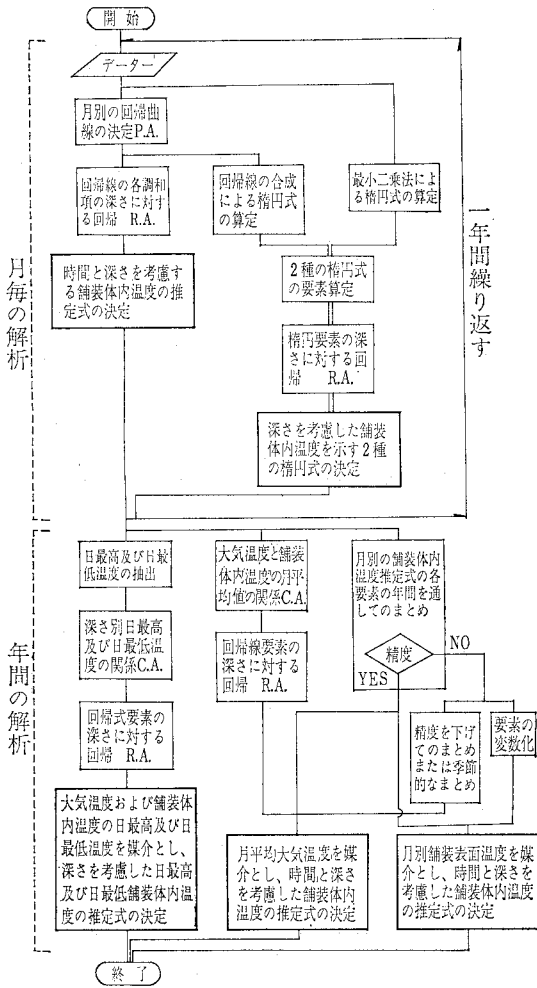


図-3 数値解析フローチャート

- 1) 舗装体内の最高および最低温度の推定
  - 2) 時間と深さを考慮した舗装体内温度の推定
  - 3) 舗装体内温度の楕円解析
- の3通りの方法により解析した。

### 5. 数値解析の結果と考察

大気温度、外気温度および輻射温度と舗装表面および表面下 3 cm ならびに 5 cm までの舗装表面付近の温度との関係について単純相関分析を行った結果、年間を通して大気温度 ( $T_A$ ) と表面下 3 cm までの舗装表面付近の温度 ( $T_{S3}$ ) の相関係数が安定して高かったため、舗装表面付近の温度として ( $T_{S3}$ ) を用いることとした。以後単に舗装表面温度とは ( $T_{S3}$ ) を指すものとする。

#### (1) 舗装体内の最高および最低温度の推定

舗装体内の任意の深さにおける日最高舗装体内温度

( $T_{PZmax}$ ) および日最低舗装体内温度 ( $T_{PZmin}$ ) を容易にデータの入手できる日最高大気温度 ( $T_{Amax}$ ) および日最低大気温度 ( $T_{Amin}$ )、または直接的に日最高および最低舗装表面温度 ( $T_{S3max}$  および  $T_{S3min}$ ) から推定することは、環境条件を考慮した舗装の構造解析にあたって重要である。

( $T_{Amax}$ ) とある深さにおける ( $T_{PZmax}$ ) および ( $T_{S3max}$ ) と ( $T_{PZmax}$ ) との間には、図-4 および図-5 に示すように直線関係

$$T_{PZmax} = a(T_{Amax}) + b \dots\dots\dots(1)$$

$$= a'(T_{S3max}) + b' \dots\dots\dots(2)$$

が認められる。この関係を試験断面別にまた深さ別に明らかにするために単純相関分析を行った。その結果をA

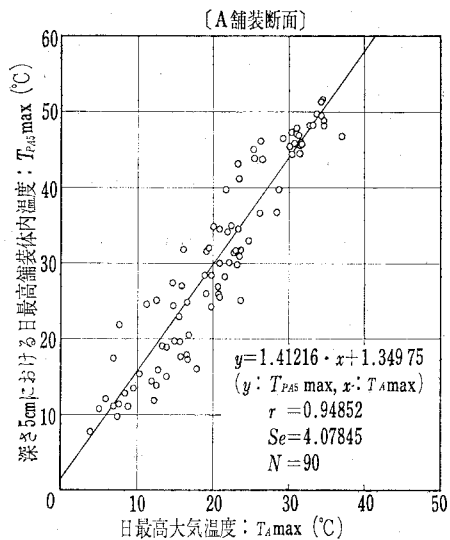


図-4 日最高大気温度と日最高舗装体内温度

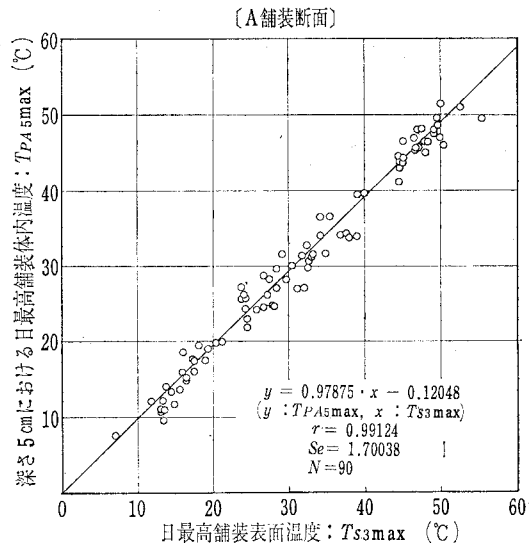
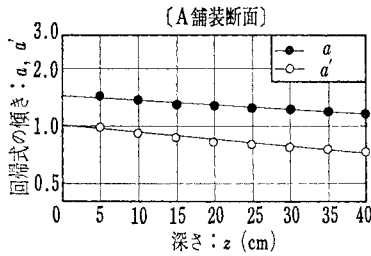


図-5 日最高舗装表面温度と日最高舗装体内温度

表一 日最高大気温度および日最高舗装表面温度と日最高舗装体内温度との相関分析結果 (A舗装断面)

関係		$T_{Amax}$ と $TP_{Zmax}$				$T_{S3max}$ と $TP_{Zmax}$				
回帰式		$y = a \cdot x + b$				$y = a' \cdot x + b'$				
深さ (cm)	項目	$T_{Amax}$				項目	$T_{S3max}$			
		傾き $a$	切辺 $b$	相関係数 $r$	標準誤差 $S_e$ (°C)		傾き $a'$	切辺 $b'$	相関係数 $r$	標準誤差 $S_e$ (°C)
5	$TP_{A5max}$	1.41216	1.34975	0.94852	4.07845	$TP_{A5max}$	0.97875	-0.12048	0.99124	1.70038
10	$TP_{A10max}$	1.35312	0.54602	0.95816	3.49638	$TP_{A10max}$	0.90844	0.06778	0.96994	2.97233
15	$TP_{A15max}$	1.29671	-0.34242	0.96175	3.19448	$TP_{A15max}$	0.85841	-0.41550	0.95998	3.26689
20	$TP_{A20max}$	1.26697	-0.64427	0.96270	3.07987	$TP_{A20max}$	0.82343	-0.23140	0.94340	3.77529
25	$TP_{A25max}$	1.24246	-0.71667	0.95869	3.18857	$TP_{A25max}$	0.79682	0.02652	0.92704	4.20325
30	$TP_{A30max}$	1.21433	-0.69214	0.95515	3.25647	$TP_{A30max}$	0.77114	0.27592	0.91457	4.44754
35	$TP_{A35max}$	1.19684	-0.52365	0.95512	3.21059	$TP_{A35max}$	0.75351	0.63702	0.90669	4.57180
40	$TP_{A40max}$	1.16178	-0.41440	0.94455	3.49362	$TP_{A40max}$	0.73140	0.71352	0.89660	4.71138



図一六 日最高温度に関する回帰式の傾きと深さの関係

断面について示したのが表一である。ここで回帰直線の傾き ( $a$ ) および ( $a'$ ) と深さ ( $z$ ) の関係は図一六に示すように半対数紙上で直線関係にあり、それぞれ回帰分析の結果次式を得た。

$$\log_{10} a = m \cdot Z + n \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\log_{10} a' = m' \cdot Z + n' \quad \dots\dots\dots (4)$$

表二 日最高舗装体内温度推定のための定数値

断面	入力条件		定数	$T_{S3max}$
	定数	$T_{Amax}$		
A断面	$m$	-0.0023	$m'$	-0.0034
	$n$	0.1534	$n'$	-0.0066
	$c$	-0.1797	$c'$	0.1074
C断面	$m$	-0.0025	$m'$	-0.0036
	$n$	0.1576	$n'$	-0.0039
	$c$	-0.0717	$c'$	0.5681

ここに定数  $m, n$  および  $m', n'$  はそれぞれ日最高大気温度 ( $T_{Amax}$ ) を入力条件とした場合および日最高舗装表面温度 ( $T_{S3max}$ ) を入力条件とした場合について、それぞれ表二

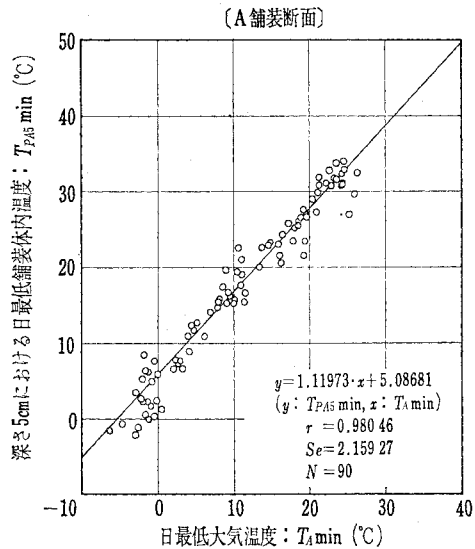
に示す値をとる。

切辺 ( $b$ ) および ( $b'$ ) については、A・C 両断面とも深さに対して著しい差異はなく、推定式の簡単化のため算術平均を行い、それぞれの値を  $c, c'$  として表二に示した。以上の結果から任意深さにおける日最高舗装体内温度 ( $TP_{(Z)max}$ ) は次の一般式で推定することができる。

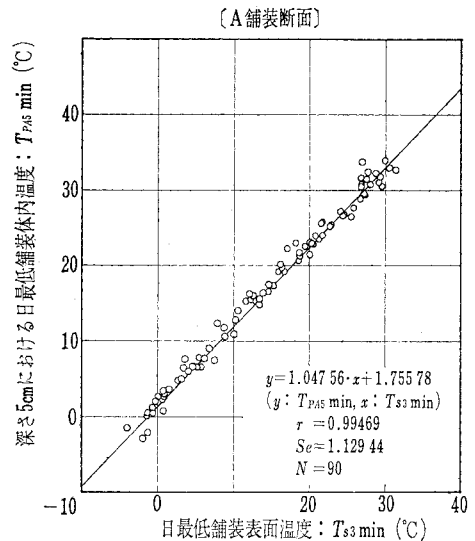
$$TP_{(Z)max} = 10^{(m \cdot Z + n)} \cdot (T_{Amax}) + c \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$TP_{(Z)max} = 10^{(m' \cdot Z + n')} \cdot (T_{S3max}) + c' \quad \dots\dots\dots (6)$$

日最低舗装体内温度 ( $TP_{Zmin}$ ) と日最高大気温および



図一七 日最低大気温度と日最低舗装体内温度



図一八 日最低舗装表面温度と日最低舗装体内温度

表-3 日最低大気温度および日最低舗装表面温度と日最低舗装体内温度との相関分析結果 (A舗装断面)

関 係		$T_{Amin}$ と $T_{PZmin}$				$T_{Smin}$ と $T_{PZmin}$					
回 帰 式		$y=a \cdot x+b$				$y=a' \cdot x+b'$					
深 さ (cm)	項 目	$T_{Amin}$				深 さ (cm)	項 目	$T_{Smin}$			
		傾 斜 $a$	切 辺 $b$	相 関 係 数 $r$	標 準 誤 差 $T_e$ ( $^{\circ}C$ )			傾 斜 $a'$	切 辺 $b'$	相 関 係 数 $r'$	標 準 誤 差 $S_e$ ( $^{\circ}C$ )
5	$TP_{A5min}$	1.11973	5.08681	0.98046	2.15927	5	$TP_{A5min}$	1.04756	1.75578	0.99469	1.12944
10	$TP_{A10min}$	1.10514	6.50591	0.97820	2.25470	10	$TP_{A10min}$	1.03555	3.19359	0.99397	1.19016
15	$TP_{A15min}$	1.09037	7.41876	0.97621	2.32728	15	$TP_{A15min}$	1.02195	4.14696	0.99220	1.33837
20	$TP_{A20min}$	1.07897	8.28817	0.91268	2.47515	20	$TP_{A20min}$	1.01158	5.04576	0.98891	1.58313
25	$TP_{A25min}$	1.08401	8.97088	0.97410	2.41848	25	$TP_{A25min}$	1.01571	5.72231	0.98978	1.52529
30	$TP_{A30min}$	1.07255	9.29469	0.97365	2.41413	30	$TP_{A30min}$	1.00377	6.09866	0.98814	1.62564
35	$TP_{A35min}$	1.06599	9.68268	0.97415	2.37581	35	$TP_{A35min}$	0.99659	6.52191	0.98761	1.65047
40	$TP_{A40min}$	1.05614	9.75493	0.97369	2.37560	40	$TP_{A40min}$	0.98644	6.63764	0.98620	1.72610

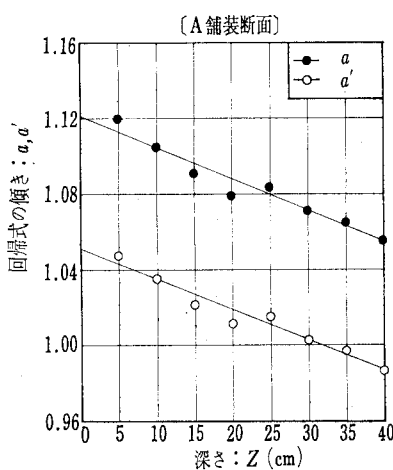


図-9(a) 日最低温度に関する回帰式の傾きと深さの関係

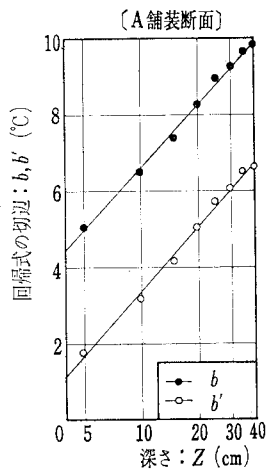


図-9(b) 日最低温度に関する回帰式の切辺と深さの関係

表-4 日最低舗装体内温度推定のための定数値

断面	入力条件定数	$T_{Amin}$		$T_{Smin}$	
		定数	定数	定数	定数
A断面	$p$	-0.0016	$p'$	-0.0016	
	$q$	1.1210	$q'$	1.0510	
	$r$	5.4530	$r'$	5.6745	
	$s$	1.1747	$s'$	-2.3428	
C断面	$p$	-0.0022	$p'$	-0.0022	
	$q$	1.1241	$q'$	1.0542	
	$r$	5.9835	$r'$	6.3658	
	$s$	0.5504	$s'$	-3.1032	

$$T_{P(Z)min} = (p' \cdot Z + q') \cdot (T_{Smin}) + r' \cdot \log_{10} Z + s' \dots (10)$$

このように日最高大気温度もしくは日最高舗装表面温度を知れば任意の深さにおける最高あるいは最低舗装体内温度を推定することができるが、それぞれの推定式

び舗装表面温度 ( $T_{Amin}$  および  $T_{Smin}$ ) との間にも図-7, 8 に示すように直線関係が認められた。A断面について深さごとの相関分析結果を示したのが表-3である。最高温度の場合と同様に直線の勾配および切辺について深さとの関係を示したのが図-9(a), (b)であり、それぞれ回帰分析の結果次の一般式を得た。

$$\left. \begin{aligned} a &= p \cdot Z + q \\ b &= r \cdot \log_{10} Z + s \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} a' &= p' \cdot Z + q' \\ b' &= r' \cdot \log_{10} Z + s' \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

ここに定数  $p, q, r, s$  および  $p', q', r', s'$  は、それぞれ日最高大気温度 ( $T_{Amax}$ ) を入力条件とした場合および日最低舗装表面温度 ( $T_{Smin}$ ) を入力条件とした場合について表-4 に示す値をとる。

以上の結果から、任意の深さにおける舗装体内の最低温度 ( $T_{P(Z)min}$ ) の推定式は次の一般式で示される。

$$T_{P(Z)min} = (p \cdot Z + q) \cdot (T_{Amin}) + r \cdot \log_{10} Z + s \dots (9)$$

を用いて推定値の標準誤差を求めてみると  $2 \sim 4^{\circ}C$  の範囲内にあった。また、深さが深くなるに従って標準誤差も増加する傾向にあるが、これは深くなるにつれて舗装体内温度が舗装周辺の地下条件に影響されることが大となり、大気温度や舗装表面温度の影響が相対的に小さくなるためと考えられる。

なお推定式は断面別に示してみたものの、定数項には大きな差がないと思われたので、A, C 両断面の推定式を相互交換して標準誤差を求めた結果ほとんど差は見い出せなかった。したがって推定式の標準誤差が  $2 \sim 4^{\circ}C$  程度である今回の解析結果からは、断面による舗装体内温度の差はほとんど無いといえよう。

また、( $T_{Amax}$ ) と ( $T_{Smax}$ ) および ( $T_{Amin}$ ) と ( $T_{Smin}$ ) の関係を単純相関分析すると、それぞれ次式で示すことができる。

$$T_{Smax} = 1.3911 \cdot (T_{Amax}) + 2.5833$$

$$(r = 0.9226 \quad s_e = 5.0308) \dots (11)$$

$$T_{Smin} = 1.0663 \cdot (T_{Amin}) + 3.2089$$

$$(r=0.9833 \quad s_e=1.8978) \dots\dots(12)$$

(2) 時間と深さを考慮した舗装体内温度の推定

舗装体内温度の分布とその時間的変動を定量化することも合理的な舗装構造の設計のためにはまことに重要なことである。ここでは、容易に入手しうる大気温度および舗装表面温度を媒介として、任意時間および任意深さの舗装体内温度を推定する実験式の誘導を試みた。

a) 舗装表面温度を媒介とした推定

舗装表面温度 ( $T_{S3}$ ) および深さ別舗装体内温度 ( $T_{PZ}$ ) の月別 24 時間変動の回帰曲線の一般式は、周期分析の結果次式で示される。

$$F(t) = A + B_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t + \theta_1\right) + B_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot t + \theta_2\right) \dots\dots(13)$$

ここに

- $F(t)$ :  $T_{S3}$  および  $T_{PZ}$
- $A$ : 平均温度 (°C)
- $B_1, B_2$ : 温度振幅 (°C)
- $\theta_1, \theta_2$ : 位相角 (rad)
- $t$ : 時間 (0~23 h)

式 (13) はある深さにおける温度を示すものであるから、各調和項と深さ ( $Z$ ) の関係に注目すると、それぞれ 図-10 に通りとなり直線で回帰が可能であることが知られ、分析の結果その一般式は次式で表わすことができる。

$$\log_{10} A = a_A \cdot Z + b_A \dots\dots(14)$$

$$\log_{10} B_1, B_2 = a_{B1, B2} \cdot Z + b_{B1, B2} \dots\dots(15)$$

$$\theta_1, \theta_2 = a_{\theta1, \theta2} \cdot Z + b_{\theta1, \theta2} \dots\dots(16)$$

上記 3 式を式 (13) に代入すると、月別の舗装体内温度を表わす一般式が次式のように得られる。

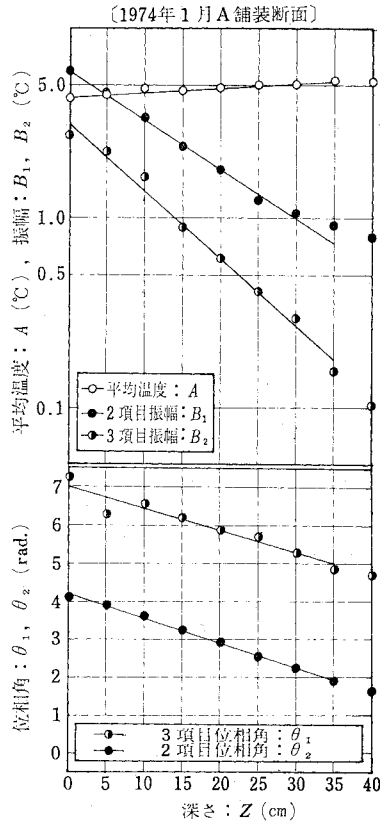


図-10 舗装体内温度の回帰式における各調和項と深さの関係

$$T_{P(Z,t)} = 10^{a_A \cdot Z + b_A} + 10^{a_{B1} \cdot Z + b_{B1}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t + a_{\theta1} \cdot Z + b_{\theta1}\right) + 10^{a_{B2} \cdot Z + b_{B2}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot t + a_{\theta2} \cdot Z + b_{\theta2}\right) \dots\dots(17)$$

表-5 舗装体内温度推定のための定数値 (月別) (1)

断面 関係	A 舗 装 断 面									
	平均温度と深さ $A(^{\circ}C)$ $Z(cm)$		2項目振幅と深さ $B_1(^{\circ}C)$ $Z(cm)$		2項目位相角と深さ $\theta_1(\text{ラジアン})$ $Z(cm)$		3項目振幅と深さ $B_2(^{\circ}C)$ $Z(cm)$		3項目位相角と深さ $\theta_2(\text{ラジアン})$ $Z(cm)$	
回帰式	$\log_{10} A = a_A \cdot Z + b_A$		$\log_{10} B_1 = a_{B1} \cdot Z + b_{B1}$		$\theta_1 = a_{\theta1} \cdot Z + b_{\theta1}$		$\log_{10} B_2 = a_{B2} \cdot Z + b_{B2}$		$\theta_2 = a_{\theta2} \cdot Z + b_{\theta2}$	
項 月	傾 $a_A$	切 辺 $b_A$	傾 $a_{B1}$	切 辺 $b_{B1}$	傾 $a_{\theta1}$	切 辺 $b_{\theta1}$	傾 $a_{B2}$	切 辺 $b_{B2}$	傾 $a_{\theta2}$	切 辺 $b_{\theta2}$
1974年										
1	0.0025	0.6349	-0.0245	0.7620	-0.0663	4.2181	-0.0362	0.0583	-0.0594	7.0387
2	0.0022	0.7662	-0.0242	0.6719	-0.0910	4.1625	-0.0259	0.3649	-0.0364	6.7704
3	-0.0024	1.1558	-0.0223	0.9441	-0.0558	4.0821	-0.0334	0.5708	-0.0903	7.3879
4	-0.0010	1.3441	-0.0235	0.8448	-0.0602	4.2314	-0.0368	0.5022	-0.0793	7.4652
5	-0.0004	1.4460	-0.0252	0.8566	-0.0742	4.3099	-0.0332	0.4045	-0.0381	7.0306
6	-0.0005	1.4663	-0.0238	0.8277	-0.0572	4.2281	-0.0347	0.2187	-0.1023	7.5745
1973年										
7	-0.0010	1.5700	-0.0247	0.9821	-0.0624	4.1931	-0.0458	0.5958	-0.0870	7.1639
8	-0.0008	1.5849	-0.0249	0.9496	-0.0642	4.3038	-0.0387	0.5372	-0.0900	7.4280
9	0.0005	1.4943	-0.0249	0.7900	-0.0685	4.2783	-0.0341	0.4901	-0.0519	7.2639
10	0.0019	1.3028	-0.0234	0.6120	-0.0636	4.2070	-0.0333	0.3156	-0.0676	7.4820
11	0.0021	1.1038	-0.0248	0.8278	-0.0573	4.2538	-0.0358	0.4509	-0.0849	7.5794
12	0.0038	0.8076	-0.0244	0.7494	-0.0626	4.1206	-0.0073	0.6251	-0.0937	7.4145

表-6 舗装体内温度推定のための定数値(年間)(2)

定数	断面 A 舗装面	断面 C 舗装面
$a_A$	-0.0010	-0.0012
3月~8月	0.0021	0.0017
9月~2月	1.2231	1.1904
$b_{A1}$	-0.0242	-0.0252
$b_{B1}$	0.8182	0.8382
$a_{\theta 1}$	-0.0653	-0.0642
$b_{\theta 1}$	4.2157	4.2161
$a_{B2}$	-0.0329	-0.0353
$b_{B2}$	0.4653	0.4612
$a_{\theta 2}$	-0.0734	-0.0777
$b_{\theta 2}$	7.2999	7.3863

それぞれの定数項について断面別、月別に検討してみると定数  $a_A$  を除いた他の定数は月別にさほど大きな変動を示さず年間を通してほぼ一定値を取るようである。表-5 はA断面について各定数項を示したものである。表からもわかるように、定数  $a_A$  についても3月から8月までの春夏期

と、9月から2月までの秋冬期に2分してみると、それぞれ一定値を持つと考えてよいであろう。そこで各定数値は  $a_A$  を2期に分けた以外、年間を通して算術平均により求めた。A, C 両断面の各定数値を一括整理したのが表-6 である。

次にこれらの定数値を用い、舗装表面温度を境界条件 ( $Z=0$ ) として式 (17) を変形すると、舗装表面温度を媒介とし、任意深さおよび任意時間の舗装体内温度指定式が得られる。一般式で示すと次式の通りである。

$$T_{P(Z,t)} = A_S \cdot 10^{a_A \cdot Z} + B_{S1} \cdot 10^{a_{B1} \cdot Z} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t + a_{\theta 1} \cdot Z + \theta_{S1}\right) + B_{S2} \cdot 10^{a_{B2} \cdot Z} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot t + a_{\theta 2} \cdot Z + \theta_{S2}\right) \dots (18)$$

ここに、

$A_S$ : 月平均舗装表面温度 (°C)

$B_{S1}, B_{S2}$ : 舗装表面温度の振幅 (°C)

$\theta_{S1}, \theta_{S2}$ : 舗装表面温度の位相角 (rad)

$t$ : 時間 (0~23 h)

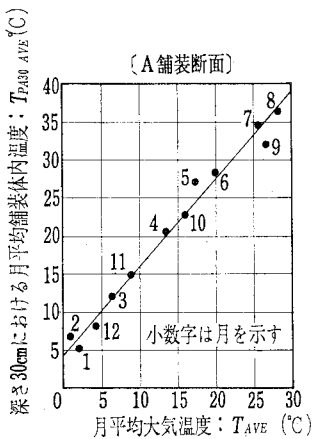


図-11 月平均大気温度と月平均舗装体内温度

表-7 月平均大気温度と月平均舗装体内温度との相関分析結果 (A舗装断面)

関 係		$T_{AVE}$ と $T_{PZAVE}$			
回 帰 式		$y = a \cdot x + b$			
深さ (cm)	項目	$T_{AVE}$			
		傾 斜 $a$	切 込 $b$	相関係数 $r$	標準誤差 $S_e$
0	$T_{S3AVE}$	1.1649	3.2126	0.97306	2.89179
5	$T_{PA5AVE}$	1.2330	3.6619	0.98198	2.36871
10	$T_{PA10AVE}$	1.1941	4.1324	0.98615	2.02837
15	$T_{PA15AVE}$	1.1676	4.1573	0.98639	1.99643
20	$T_{PA20AVE}$	1.1695	4.2131	0.98960	1.73738
25	$T_{PA25AVE}$	1.1692	4.2380	0.99141	1.61666
30	$T_{PA30AVE}$	1.1448	4.4298	0.99103	1.55979
35	$T_{PA35AVE}$	1.1341	4.5690	0.99224	1.46695
40	$T_{PA40AVE}$	1.1261	4.4333	0.99247	1.41286

( $T_{AVE}$ ) と深さ別の月平均舗装体内温度 ( $T_{PZAVE}$ ) の関係は、図-11 に示すように直線関係にあり、

$$T_{PZAVE} = a \cdot T_{AVE} + b \dots (19)$$

で示すことができる。表-7 はA断面について定数  $a$  および  $b$  を深さ別に求めた結果である。さらに深さ ( $Z$ ) の変化に伴う定数  $a$  および  $b$  の変動に注目すると、

$$\left. \begin{aligned} a &= c \cdot Z + d \\ b &= e \cdot Z + f \end{aligned} \right\} \dots (20)$$

の形で直線回帰が可能である。これらの定数を断面別に求めたのが表-8 である。

したがって、月平均舗装体内温度は月平均大気温度から深さ別に次式で示されることになる。

A断面

$$T_{P(Z)AVE} = (-0.0018 \cdot Z + 1.2036) \cdot T_{AVE} + 0.0276 \cdot Z + 3.5644 \dots (21)$$

C断面

$$T_{P(Z)AVE} = (-0.0023 \cdot Z + 1.2048) \cdot T_{AVE} + 0.0297 \cdot Z + 3.4908 \dots (22)$$

ここで、式 (17) の第1項が平均温度を表わすことに注目して、式 (21), (22) で置き換えれば、大気温度を媒介として任意時間および任意深さにおける舗装体内温度の推定が可能となる。いま、推定式を一般式で示せば次式の通りであり、

$$T_{P(Z,t)} = (c \cdot Z + d) \cdot T_{AVE} + e \cdot Z + f + 10^{a_{B1} \cdot Z + b_{B1}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t + a_{\theta 1} \cdot Z + b_{\theta 1}\right) + 10^{a_{B2} \cdot Z + b_{B2}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot t + a_{\theta 2} \cdot Z + b_{\theta 2}\right) \dots (23)$$

各定数は表-6 および表-8 に示した通りである。数値解析の結果、舗装表面温度および大気温度を入力

表-8 舗装体内温度推定のための定数値(3)

断面定数	A 舗装面	C 舗装面
$c$	-0.0018	-0.0023
$d$	1.2036	1.2048
$e$	0.0276	0.0297
$f$	3.5644	3.4908

因子として舗装体内温度を推定するための方程式を求めたが、式(18)および式(23)とも推定の標準誤差は2°C以下であった。さらに精度を高めるためには、各定数の決定にあたって曲線回帰分析を適用させるか、春夏秋冬の四季別に、さらには月別に推定式を求めることが必要となる。しかしながら、推定式が複雑になることと、工学的利用価値を考えた場合、標準誤差で2°Cであれば十分であると考えられるのでこれ以上の詳細な検討は行わなかった。

大気温度を媒介として舗装体内温度を推定する方法は気象資料の利用が可能なので便利であるが、表面付近での精度がやや落ちる欠点を持つ。これは舗装表面が風などの影響を受け易いためと思われ、舗装表面付近の推定にはやはり舗装表面温度を媒介とすべきであろう。

解析の対象としたA, C両断面について、それぞれ解析を行い推定式を導いたが、両推定式を相互交換して標準誤差を求め比較しても特に差は見られなかった。

(3) 舗装体内温度の楕円解析

舗装表面温度( $T_{S_0}$ )と深さ別舗装体内温度( $T_{PZ}$ )の関係時間を追って図示すると楕円的な軌道を示す。これから舗装体内温度を異なった2つの方法で楕円方程式として示し、より直感的に舗装体内温度の分布を求めることを試みた。2つの方法とは、舗装表面温度および舗装体内温度の回帰曲線(式(13))を互いに合成する方法と、実測データを用い最小二乗法を応用して楕円の形を推定する方法である。この2つの方法を用いて深さ別の舗装体内温度と舗装表面温度の楕円式の長軸、短軸、舗装表面温度軸からの回転角および原点からの平行移動量の算出をした。その結果、2つの方法で解析された楕円式とも、1) 回転角は深くなるにつれ小さくなる、2) 長軸は深くなるにつれて短くなる、3) 短軸は深さ15 cmから20 cmで最も長くなる、などの概略の傾向は等しい。しかし、実測データの最小二乗法適用による楕円式の方が、回帰曲線の合成による楕円式より、回転角、長軸、短軸とも大きくなる傾向があった。また楕円式の長軸、短軸、回転角の深さに対する回帰を試みたが、2つの方法による楕円のどちらも、2次曲線でも回帰することはできなかったため公式が複雑化し、かつ年間を通しての解析において一本化された公式を算出することができなかったため、ここでは結果として示すことを省略した。

6. 理論式との比較

舗装体内温度分布の推定方法として、差分法や有限要素法などの数値解析手順もあるが、これらの解はすべて

次に示す非定常熱伝導方程式から求められている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa^2 \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} \dots\dots\dots (24)$$

ここに

$u$  : 温度界 (°C)

$t$  : 時間 (sec)

$Z$  : 表面下の深さ (cm)

$\kappa^2 = k/\rho \cdot c_p$  : 熱拡散率 (cm<sup>2</sup>/sec)

$k$  : 熱伝導率 (cal/cm<sup>2</sup>·sec·°C/cm)

$\rho$  : 材料の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$c_p$  : 材料の比熱 (cal/g°C)

いま、舗装表面温度( $u$ ) $_{Z=0}$ を式(13)の形で表わし、それを境界条件( $Z=0$ )として解くと次式に示す解が得られる<sup>11)~13)</sup>。

$$u = A_{S_1} + B_{S_1} \cdot e^{-\frac{Z}{\kappa} \sqrt{\frac{\pi}{24 \times 3600}}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t - \frac{Z}{\kappa} \sqrt{\frac{\pi}{24 \times 3600}} + \theta_{S_1}\right) + B_{S_2} \cdot e^{-\frac{Z}{\kappa} \sqrt{\frac{\pi}{12 \times 3600}}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - \frac{Z}{\kappa} \sqrt{\frac{\pi}{12 \times 3600}} + \theta_{S_2}\right) \dots\dots\dots (25)$$

ここで記号は式(18)に準ずるものとする。

式(25)は、舗装表面温度を媒介とした舗装体内温度の推定式である式(18)と同様の形式である。

ここで問題となるのが異なる温度特性を持つ多層構造で複雑な境界条件下に置かれた舗装の熱拡散率をどのように決定するかにある。そこで実測データから逆算して誤差を最小にするような熱拡散率を求めてみた。結果は表-9に示す通り0.0087から0.0167 (cm<sup>2</sup>/sec)まで月ごとに変動しており年間平均で0.0116 (cm<sup>2</sup>/sec)となった。この値は岩間の示した範囲内にある<sup>5)</sup>。このよ

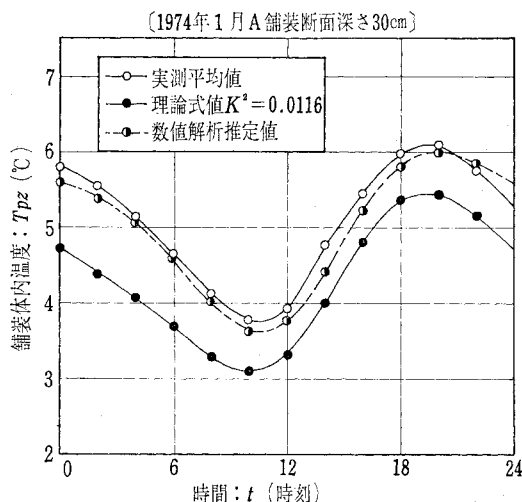


図-12 舗装体内温度の推定値の比較



表-9 誤差を最小にする熱拡散率(月別)

断面 項目 月	A 舗装断面		C 舗装断面	
	最小誤差	熱拡散率	最小誤差	熱拡散率
1	0.7400	0.0116	0.9929	0.0122
2	1.5446	0.0105	1.5276	0.0087
3	1.4581	0.0167	1.9835	0.0157
4	0.8957	0.0121	1.3924	0.0128
5	1.1496	0.0100	0.8510	0.0095
6	0.5331	0.0116	0.6008	0.0104
7	1.1687	0.0110	1.5843	0.0123
8	1.1072	0.0107	0.9331	0.0102
9	2.3377	0.0094	2.1833	0.0100
10	3.1630	0.0100	3.5582	0.0099
11	2.2342	0.0128	2.3997	0.0130
12	2.3875	0.0128	2.6951	0.0127
平均		0.0116		0.0115

うにして求めた熱拡散率を用いて理論式の解を求め、すでに述べた数値解析による推定式より得た解の比較を行った。結果の一例を図-12に示す。図からもわかるように、推定式による解の方が理論式によるそれよりも精度がよいことが認められた。

7. 結論

本研究の結論を要約すれば以下の通りである。

(1) 大気温または舗装表面温度から舗装体内温度の変化および分布を標準誤差 ±2°C 程度で推定することは、温度観測データの適切な処理と統計手法を利用することで可能であり、今後異なる地域での資料の集積が必要である。

(2) 舗装断面の種類による舗装体内温度特性には著しい差異はみられなかった。今後異なった舗装構造での温度に関する資料の集積が必要である。

(3) 舗装の深部、特に路床との境界面の温度を正確に推定することは非常に困難である。今後温度推定の精度を向上させるためには、地下条件特に路床条件に対する配慮が必要である。

(4) 深さ別に見た舗装体内温度の平均値は、3月から8月の春夏期に深さに応じ低下するが、9月から2月の秋冬期には深さに応じて高くなる。これは大気温度と同様地中温度の影響を大きく受けることを示すものである。

(5) 熱伝導方程式の解からは、熱拡散率を選択利用しても解析的に得られた結果より精度の向上がなかった。また標準誤差を最小にするような熱拡散率を実測データから逆算し求めた結果、月ごとに変動しており熱拡散率を求めるにあたっての境界条件の決め方が重要であることが知られた。

(6) 舗装体内温度の推定式を A, C 両断面をまとめ

て一般化すると以下のようなになる。

$$T_{P(Z)}_{max} = 10^{(-0.0024 \cdot Z + 0.1562)} \cdot T_{Amax} - 0.1197$$

$$= 10^{(-0.0035 \cdot Z + 0.0410)} \cdot T_{Smax} - 0.3130$$

.....(26)

$$T_{P(Z)}_{min} = (-0.0021 \cdot Z + 1.1255) \cdot T_{Amin}$$

$$+ 5.7777 \log_{10} Z + 0.7988$$

$$= (-0.0021 \cdot Z + 1.0558) \cdot T_{Smin}$$

$$+ 6.1096 \log_{10} Z - 2.8188$$

.....(27)

$$T_{P(Z,t)} = A_S \cdot 10^{a_A \cdot Z} + B_{S1} \cdot 10^{-0.0250 \cdot Z}$$

$$\cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t - 0.0648 \cdot Z + \theta_{S1}\right) + B_{2S}$$

$$\cdot 10^{-0.0353 \cdot Z} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 0.0694 \cdot Z + \theta_{S2}\right)$$

.....(28)

( $a_A$  は春夏期 -0.0012, 秋冬期 0.0017 である)

$$T_{P(Z,t)} = (-0.0024 \cdot Z + 1.2142) \cdot T_{AVE}$$

$$+ 0.0268 \cdot Z + 3.5890 + 10^{(-0.0250 \cdot Z + 0.8302)}$$

$$\cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t - 0.0648 \cdot Z + 4.2420\right)$$

$$+ 10^{(-0.0353 \cdot Z + 0.4605)}$$

$$\cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 0.0694 \cdot Z + 7.2171\right)$$

.....(29)

8. あとがき

舗装体内温度が主として気象条件に支配されることは、気象条件の中の1つの因子である大気温度のみを取り上げて、ある程度の精度で舗装体内温度の推定が可能なることから明らかである。大気温度以外の気象条件、たとえば風速、湿度などについても検討を試みたが、特徴的な傾向は得られず、わずかに温度が大気温度および舗装表面温度との間に高い相関性を示しただけであった。今後はこれらの気象条件をいかに解析システムに組み込むかという問題を残している。

また実際の道路においては、通行する自動車のタイヤと舗装表面との摩擦で熱が発生する。しかし本研究においては舗装体内温度の発生を自然環境条件のみによって支配されるものとしてとらえ、温度測定断面上には自動車の通行がなかったため交通による温度変化を測定し、解析することはできなかった。自動車通行による温度変化を考慮することも今後の課題であろう。

測定データに関しては、北海道地域における研究<sup>3)</sup>において2月の舗装表面温度が約 -10°C から +10°C まで約 20°C 変化するが、本研究の2月には約 -2°C から +14°C まで約 16°C の変化であるというような地域的差異が見られる。また大気温度に関しても、1) 年変化は一般的に低緯度で小さく緯度が増すほど大きくな

る，2) 日変化は一般的に緯度が低いほど大きくなる，  
3) 年変化および日変化は海洋付近では小さく内陸では大きくなるなどの傾向が見られる<sup>14)</sup>。しかし，今回の解析に用いた資料が一地点のみから得られたものであり地域的特性を考慮しておらず，また舗装の構造についても汎用性に欠ける点は否めない。今後は資料を広域から求めて検証を重ねていく予定である。

終りにあたって本研究のために長期にわたり資料の集積と解析を担当いただいた庄司氏（日建工業），吉原氏（東亜道路），田中氏（五洋建設），新井氏（鹿島道路），柏木氏（小田原市役所），伊藤氏（飛鳥道路），小池氏（日本大学大学院），杉沢氏（日本大学大学院）に感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 秋山政敏・細田昌夫：たわみ性舗装体の温度特性について，第23回土木学会年次学術講演概要集，IV-79
- 2) 吉本 彰ほか：アスファルト舗装体の温度，舗装 Vol.

10, No. 1, 1975.

- 3) 萩原英三ほか：舗装構造の温度特性に関する研究，土木学会北海道支部研究発表論文集，昭和48年。
- 4) Williamson, R.H.: Environmental Effects in Road Pavements and Their Engineering Significance, 1972,
- 5) 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.
- 6) 三浦裕二ほか：道路舗装の設計，山海堂。
- 7) Finn, F.N. ほか：Application of Theory in the Design of Asphalt Pavements, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, 1972.
- 8) 高橋浩一郎：動気候学，岩波書店。
- 9) 山本義一：気象学概論，朝倉書店。
- 10) 岸根卓郎：理論，応用統計学，養賢堂。
- 11) 和田八三久：応用物理，朝倉書店。
- 12) 橋 藤雄・甲藤好郎：熱伝達論，熱伝導論，共立出版。
- 13) 小平吉男：物理数学，第二巻，文献社。
- 14) 正野重方：気象学総論，地人書館。

(1975.10.16・受付)