

アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究

ESTIMATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ASPHALT PAVEMENT

姫野 賢治*・渡辺 隆**・勝呂 太***

By Kenji HIMENO, Takashi WATANABE and Futoshi SUGURO

Temperature distributions in asphalt pavement with depth and time were measured every hour for a year continuously. As a result of statistical analysis, it was found that the difference of pavement structure does not affect surface temperature significantly, and that pavement temperature is related not only to changes in air temperature but also to other climate parameters, including changes in solar radiation, wind velocity and precipitation.

Temperature distribution in pavement was also estimated theoretically by a heat flow model proposed in which the heat transfer coefficient at the pavement surface and thermal diffusivity of the pavement materials were taken into account.

1. まえがき

道路、空港等の舗装に用いられるアスファルト混合物は、大きな感温性をもつアスファルトによって骨材を結合したものであり、アスファルト単体と同様に、大きな感温性をもった複合材料である。このため、アスファルト舗装が交通荷重を受けたときにとる挙動は、舗装構成材料の力学的特質や、交通車両の走行特性だけでなく、アスファルト混合物層内の温度分布にも強く依存している。舗装の破壊は多くの要因が複雑に作用して生ずるものと考えられるが、たとえばこのうち、バインダーの粘性が低下し、混合物が流動して生ずるいわゆる「わだち掘れ」は高温地域ほどその発生の程度が大きく、低温収縮ひびわれは寒冷地域に特有の現象である。また、疲労ひびわれやリフレクションクラックなどの他の破壊の発生や程度ももらかの形で間接的にアスファルト混合物層内の温度分布の影響を受けるものと考えられる。しかしながら、

① 舗装への熱量の授受が主に自然条件に支配されているため、伝熱現象が非定常であること、
 ② 舗装表面における熱伝達量や舗装構成材料の伝熱特性が把握されていないこと、
 などの理由により、舗装内部の温度分布の推定は現時点では理論化されているとはいえない。また、理論的な推定を行わずに舗装温度に関する全国的な種々のデータを集計し、これに統計的処理を施して設計法に役立てるためには、多大の時間、労力、資金を費やし広範な地域で長期間にわたる実測データを集めなければならないため、あまり実用的ではないであろう。このため、現行の設計法ではアスファルト舗装の力学的挙動が舗装内部の温度分布に依存することに対する考慮は必ずしも十分とはいえないと思われる。

そこで、本研究は、
 ① 現実の舗装内部の温度の時間的、空間的分布を実測して、その特性を明らかにすること、
 ② 舗装構成材料の伝熱特性や舗装表面における熱伝達量を室内実験により定量化して、基本的な気象データのみから、舗装内部の温度の分布を推定する理論的な手法を構築すること、
 を目的とした。
 なお、ここでいう気象データには、全国的1200か所

* 正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科
 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
 (同上)

*** 学生会員 東京工業大学総合理工学研究科
 (〒227 横浜市長津田町4259)

で毎時間測定され、比較的入手が容易な気象庁AMEDASによる大気温度、日照時間、降水量および風速のデータのうち舗装温度測定場所に最も近い土浦のものを用いた。

2. 内部温度分布の測定方法

内部温度分布を測定するために用いたアスファルト舗装は、建設省土木研究所舗装走行実験場（北緯 $36^{\circ}06'$ 、東経 $140^{\circ}05'$ 、標高約25m）内に施工されたもので、Fig.1に示すように舗装構造を異にするA、B、Cの3つの工区から成っている。各工区は、 $8\text{m}\times 8.5\text{m}=68\text{m}^2$ の面積をもち、熱電対（CC：銅-コンスタンタン）を断線による欠測を避けるために図中に示す位置にそれぞれ2本ずつ埋設した。なお、一般に、表面温度の測定はセンサー部の埋設方法によって結果に違いを生じやすく^{1),2)}、決められた測定方法はないが、本研究では、

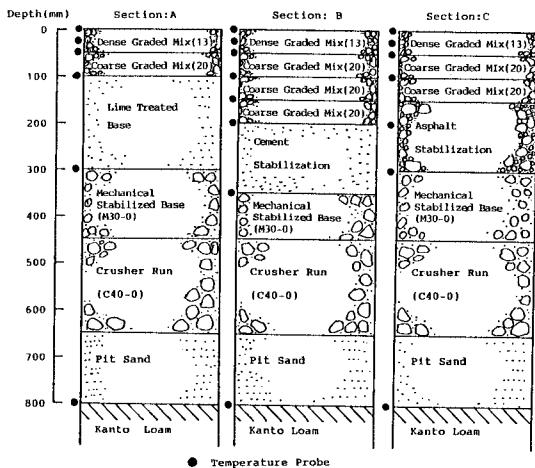


Fig. 1 Pavement Structure and Locations of Temperature Probes.

Table 1 Material Properties of the Pavement.

Layer	Material	Properties
Surface	Dense Graded (13)	Standard Density 2.323 g/cm ³ Core Density 2.304 g/cm ³ Degree of Compaction 99.2 % Asphalt Content 5.91 %
Binder	Coarse Graded (20)	Standard Density 2.354 g/cm ³ Core Density 2.307 g/cm ³ Degree of Compaction 98.0 % Asphalt Content 4.96 %
Base	Lime Treated Base	Water Content in % of Dry Weight 9.0 % Wet Density 2.181 g/cm ³ Dry Density 2.003 g/cm ³ Lime Content 6.0 %
	Mechanical Stabilized Base (M30-0)	Water Content in % of Dry Weight 5.5 % Wet Density 2.415 g/cm ³ Dry Density 2.289 g/cm ³
Sub-base	Crusher Run (C40-0)	Water Content in % of Dry Weight 1.3 % Wet Density 2.144 g/cm ³ Dry Density 2.116 g/cm ³
Subgrade	Kanto Loam	Water Content in % of Dry Weight 97.0 % Wet Density 0.930 g/cm ³ Dry Density 0.472 g/cm ³

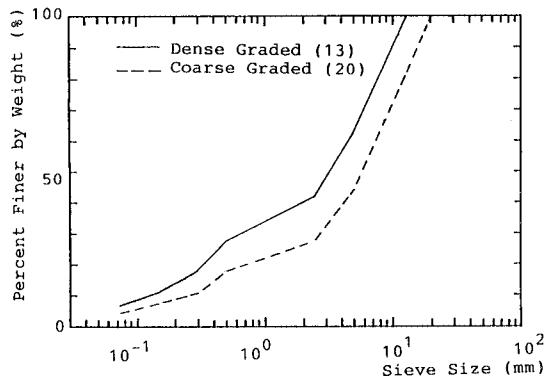


Fig. 2 Aggregate Gradation of Asphalt Mixes.

Straubらの方法¹⁾を採用した。また、熱電対は地上1.2mの百葉箱内にも設置し、大気温度の測定もあわせて行った。

測定結果の出力は、2台の自記式記録計を用いて、1984年8月19日から1985年8月18日までの1年間、1時間ごとに連続して行った。ただし、停電、記録計の故障等によりデータが欠損した場合もある。なお、舗装に使用した材料の諸特性値およびアスファルト混合物の粒度分布を工区Aについて示す（Table 1, Fig. 2）。

3. 温度の測定結果および考察

(1) 舗装構造と表面温度

舗装構造の違いが舗装の内部温度に及ぼす影響を調べるため、Fig.1の上部構造の材料がほぼ同一なA、B両工区の表面温度を比較したところ、Fig.3に示すようにほとんど差が認められなかった。このことから、本研究

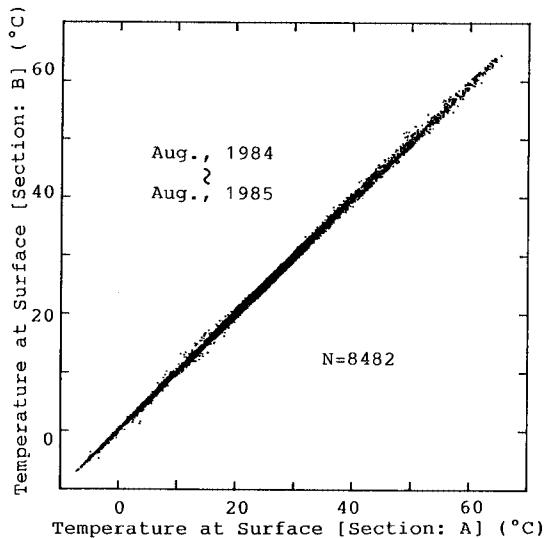


Fig. 3 Comparison of Temperatures at Surface.

の範囲内では、表層、基層などの上部構造の材料が同一ならば下部構造の違いによらず表面温度はほぼ一義的に定まることがわかり、舗装構成材料の伝熱特性が把握されれば表面温度を境界条件とした理論的な内部温度の推定の可能性を示しているものと考えられる。そこで、以下では主に工区Aに限って検討を行った。

(2) 表面温度の時間変動

一般に、舗装の内部温度で最も大きな時間的変動をするのは表面温度であり、深くなるにつれて変動の振幅は減少する。Fig. 4は、1か月間の表面温度の変動を重ねて示したものであるが、同一時刻でも日によって、また、同一日でも時刻によって表面温度はかなり異なっていることがわかる。したがって、現在までに提案されている理論的設計法の多くは、実用上舗装の代表温度を月別に処理しているが、時刻等をも考慮に入れたより細かい処理方法が望ましいのではないかと考えられる。

(3) 大気温度と表面温度の関係

舗装の内部温度分布に影響を及ぼす因子には、外部影響因子として、大気温度、日射量、降水量、風速などの気象作用や地熱、走行車両が、また、内部影響因子として舗装構成材料の伝熱特性などが考えられる(Fig. 5)が、従来より大気温度のみが重要視され、研究対象とされてきた。しかしながら Fig. 6 の大気温度と表面温度の関係図にみられるように大気温度のみから表面温度を推定す

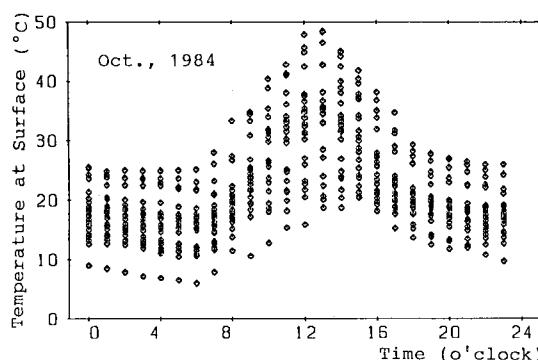


Fig. 4 Variation of Temperatures at Surface in a Month.

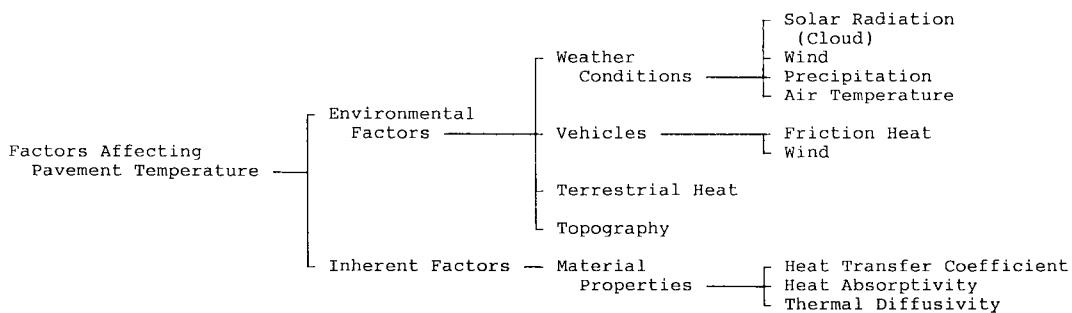


Fig. 5 Factors Affecting Pavement Temperature.

る場合には、このように実測値を代表するほぼ理想的な推定式を用いたときでも最大±15°C程度の誤差を生ずることがある。この原因は、表面温度が大気温度を下回ることはほとんどない事実から、日射量を主とした降水量、風速などの他の気象作用が原因になっているものと考えられ、これらを考慮に入れずに大気温度のみから表面温度を推定するには精度上の限界のあることがわかる。

なお、図中に秋山³⁾が得た晴天または曇天時および雨天時の回帰式：

$$\theta_s = 1.1\theta_a + 1.5 + 0.17 \exp(0.126\theta_a) \quad [\text{晴・曇}] \cdots (1)$$

$$\theta_s = 1.233\theta_a + 0.833 \quad [\text{雨}] \cdots \cdots \cdots (2)$$

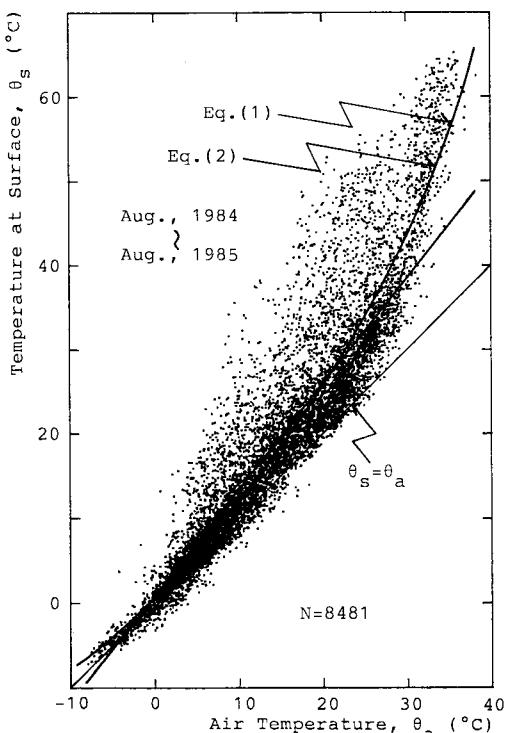


Fig. 6 Relationship between Air Temperature and Temperature at Surface.

ここに、
 θ_s : 舗装表面温度 [°C]
 θ_a : 大気温度 (地上 1.2 m) [°C]
 を示す。

(4) 日最高 (低) 大気温度と日最高 (低) 表面温度の関係

舗装の内部温度は、日最高温度と日最低温度との間をある程度規則的に変動しているので、両者を推定することができれば、内部温度の時間変動を概算することができる。Fig. 7, 8 はそれぞれ、日最高大気温度と日最高表面温度の関係および日最低大気温度と日最低表面温度の関係を示したものである。これらをみると、かつて松野⁴⁾が指摘したように、日最低大気温度と日最低表面温度の間にはかなり強い相関があり (相関係数: 0.99) 日最低大気温度のみから日最低表面温度を推定することは必ずしも不可能ではないと考えられるが、日最高大気温度と日最高表面温度の関係には Fig. 6 と同様に主に日射量の違いが原因とみられるばらつきが認められる (相関係数: 0.93)。

なお、從来から提案されている回帰式のうち代表的なものには、

a) 最高温度について、

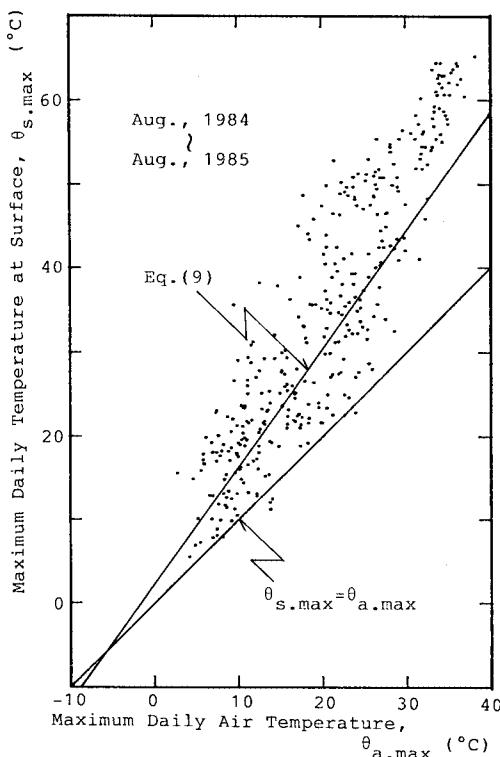


Fig. 7 Relationship between Maximum Daily Air Temperature and Maximum Daily Temperature at Surface.

$$\begin{aligned} \theta_{s,\max} &= 1.78\theta_{a,\max} - 7.35^{\text{a)} } \quad [\text{晴}] \dots (3) \\ \theta_{s,\max} &= 1.36\theta_{a,\max} - 1.59^{\text{b)} } \quad [\text{曇}] \dots (4) \\ \theta_{s,\max} &= 1.44\theta_{a,\max} - 5.12^{\text{b)} } \quad [\text{雨}] \dots (5) \\ \theta_{s,\max} &= 1.40\theta_{a,\max} + 10.0^{\text{b)} } \quad [\text{晴}] \dots (6) \\ \theta_{s,\max} &= 1.35\theta_{a,\max} - 1.60^{\text{b)} } \quad [\text{曇}] \dots (7) \\ \theta_{s,\max} &= 1.40\theta_{a,\max} - 4.0^{\text{b)} } \quad [\text{雨}] \dots (8) \\ \theta_{s,\max} &= 1.39\theta_{a,\max} + 2.58^{\text{b)} } \quad [\text{全天候}] \dots (9) \end{aligned}$$

b) 最低温度について、

$$\begin{aligned} \theta_{s,\min} &= 1.10\theta_{a,\min} + 1.0^{\text{b)} } \quad [\text{全天候}] \dots (10) \\ \theta_{s,\min} &= 1.07\theta_{a,\min} + 3.21^{\text{b)} } \quad [\text{全天候}] \dots (11) \end{aligned}$$

ここに、 $\theta_{s,\max}$: 日最高表面温度 [°C]

$\theta_{a,\max}$: 日最高大気温度 [°C]

$\theta_{s,\min}$: 日最低表面温度 [°C]

$\theta_{a,\min}$: 日最低大気温度 [°C]

などがある。図中には、このうち天候によらず適用できるものをあわせて示した。

(5) 深さ別舗装内部温度の出現頻度分布

アスファルト混合物の温度が高くなるにつれてアスファルトの粘性が低下して流動による舗装のわだち掘れが卓越するようになり、また、温度が極端に低くなると温度応力の増加速度が緩和速度を上回り低温収縮ひびわれが発生する場合がある。Fig. 9 は測定期間中の舗装内部温度の出現頻度分布を深さ別に示したものであり、舗装が測定中の 1 年間を通じてとる温度範囲を表わしている。これにより、明らかに深さとともに分布のはらつきは小さくなっていることがわかる。しかしながら、深さ 10 cm 程度までの頻度分布は、舗装表面の頻度分布と比較して大きな違いは認められず、混合物の流動や低温収

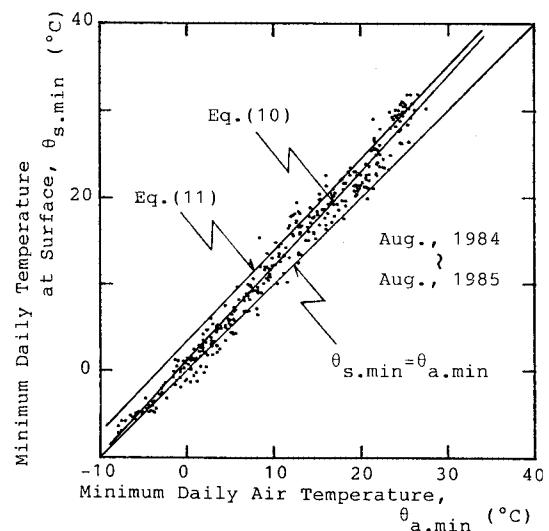


Fig. 8 Relationship between Minimum Daily Air Temperature and Minimum Daily Temperature at Surface.

縫によるひびわれは表層表面近傍だけでなく基層内部でも相当な程度進行することが推察される。

また、この深さ別舗装内部温度の出現頻度分布を、松野⁴⁾、大田ら⁷⁾が示したものと比較したところ、位置およびばらつきともかなり異なっていることが確認されたが、これは、測定場所、測定年の違いに由来する当然の結論であろう。

(6) 日最高表面温度と深さ別日最高舗装温度の関係

日最高舗装温度は各深さとも日最高表面温度と直線関係にあり、その勾配は深くなるにつれて規則的に小さくなるとされている^{2),3)}。本研究における測定結果では、温度が低いほど、また、深さが大きいほど両者の関係は乱れ、必ずしも直線関係にあるとは限らなかった(Fig. 10, 11)。

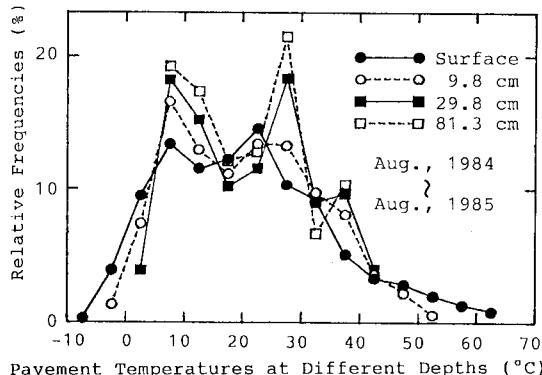


Fig. 9 Temperature Distributions at Different Depths of the Pavement.

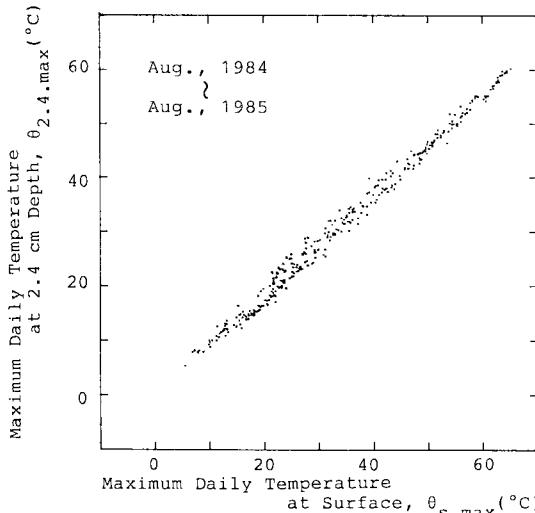


Fig. 10 Relationship between Maximum Daily Temperature at Surface and Maximum Daily Temperature at 2.4 cm Depth.

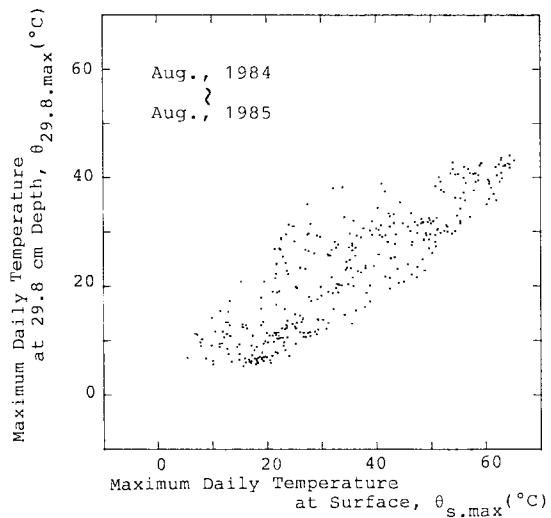


Fig. 11 Relationship between Maximum Daily Temperature at Surface and Maximum Daily Temperature at 29.8 cm Depth.

4. 舗装内温度分布の理論的推定方法

以上、大気温度と舗装表面温度、および、舗装表面温度と舗装内部温度の関係をそれぞれ調べ、最終的に大気温度のみから舗装内部温度を推定することには、精度上の限界があることが明らかになった。そこで、以下では、他の温度影響因子をも考慮に入れた理論的な温度分布の推定を行うため、舗装に熱伝導方程式を適用し、室内実験を通じて実際の現象と理論式との対応づけを行った。

(1) 基礎方程式

舗装内温度分布を支配する基礎方程式は熱伝導方程式であり、舗装内部の熱の流れの一次元性および各層内の伝熱特性の一様性を仮定すると、これは次のように表わされる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}(z, t) = \kappa^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}(z, t) \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 θ : 舗装内温度 [°C]

t : 時間 [s]

z : 舗装表面からの深さ [m]

κ^2 : 舗装材料の熱拡散率 [m^2/s]

である。

(2) 境界条件

アスファルト舗装の系に対する熱の出入りは、伝熱の一次元性を仮定した場合、表層表面および路床等の地中におけるものに限られる。このうち、表層表面におけるものは、大気温度、日射量、降水量などの気象作用および走行車両によるもの、また、地中におけるものは地熱によるものが主であろうと考えられる。しかしながら、

本研究では、深さ約80cmの路床上面における日温変化はきわめて小さかった(Fig.16)ので、この深さにおける热の授受は無視し、路床上面を断熱境界として扱った。他の舗装構造においても、この程度の深さにおいては温度変化はわずかであろうと推定される。また、表層表面のものは気象作用に限って解析を行ったが、比較のため測定が容易な表層表面温度を境界条件とした場合の解析もあわせて行った。これらの場合の境界条件式は以下のように表わされる。すなわち、

表層表面 ($z=0$) においては、

a) 表面温度を境界条件にした場合、

$$\theta(0, t) = \theta_s(t) \dots \dots \dots (13)$$

b) 気象作用を境界条件にした場合、

$$x^2 \frac{\partial \theta}{\partial z}(0, t) + \frac{\alpha}{\rho C} (\theta(0, t) - \theta(t)) + \frac{q}{\rho C} = 0 \dots \dots \dots (14)$$

路床上面 ($z=z_t$) においては、上の a), b) 両場合を通じて、

$$\frac{\partial \theta}{\partial z}(z_t, t) = 0 \dots \dots \dots (15)$$

ここに、 θ_s : 表面温度 [°C]

α : 表層表面における熱伝達率 [W/(m²·K)]

ρ : 表層混合物の密度 [kg/m³]

C : 表層混合物の比熱 [J/(kg·K)]

θ : 大気温度 [°C]

q : 表層表面における入熱量 [W/m²]

である。

本研究では数値解析を行うため、式 (12) を Galerkin 法によって連立一階常微分方程式の初期値問題に変形し、Crank-Nicholson 法を用いて解いた。

(3) 初期条件

本研究では、時刻 0:00 を $t=0$ とし、各節点の初期温度を時刻 0:00 における実測データから内挿して解析を行ったが、通常の場合は初期温度は実測されていない。そこで、初期条件を一般化するため、時刻 0:00 における大気温度と深さ別の舗装温度との関係を調べたところ、深夜で日射量によるばらつきがないために、比較的強い相關が認められた。また、ここで得られた回帰式による温度を初期条件として解析を行ったところ、実測値を初期条件とした場合の結果に徐々に収束し、実用上問題のないことがわかった。なお、得られた時刻 0:00 における回帰式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \theta(z, 0) &= 1.13\theta(0) + 6.21 + (0.07\theta(0) - 6.56) \\ &\cdot \exp(-0.07z) \cdot \cos(-0.07z) \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

(4) 基礎方程式および境界条件式における温度影響因子の評価

上記方程式を現実の舗装に対して適用するため、基礎方程式 (12) や境界条件式 (15) の中に現われ、舗

装の内部温度に影響を与える各因子の定量化を行った。

a) 热拡散率 一般に、アスファルト混合物は骨材の配向状態に起因する力学的な強い異方性をもっており⁸⁾、伝熱的にも同様に異方性をもつことが推察される。したがって、熱拡散率の測定に際しても現実の舗装におけるのと同様に、流熱方向と転圧方向を一致させることが必要であると考えられる。著者らはこの条件を満たしたアスファルト混合物の熱拡散率測定方法を提案⁹⁾し、これによつて熱拡散率が温度、骨材間隙率、飽和度などに依存することを明らかにした。本研究では、試験舗装から直接採取した円筒形のコアに対してこの測定方法を適用し、熱拡散率を定量化した(Fig.12)。なお、粒状材については、コアが採取できること、舗装内部における温度振幅が小さく、感度分析の結果推定値に大きな影響を与えないことがわかったことなどから、文献^{10, 11)}を参考にして、 $3.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

b) 热伝達率 热伝達率は、大気と舗装表面との間の热量の授受が両者の温度差に比例する (Newton の冷却の法則) とした場合の比例係数であり、舗装表面における風速が大きくなるほど大きくなる(強制対流伝達)が、本研究ではこの概念を拡張し、気化熱の影響も含めて、室内実験により舗装表面の乾湿状態別に風速の関数として求めた(Fig.13)。実験の概要および計算方法は、付録に示す。

c) 入熱量 舗装表面における入熱量は、気化熱を無視した場合ほとんどが太陽の日射によるものであり、全天日射量が測定されているればそれを直接に用いることができるが、気象庁 AMEDAS のデータ項目には含まれていないので、あえて理論式を用いることとした。

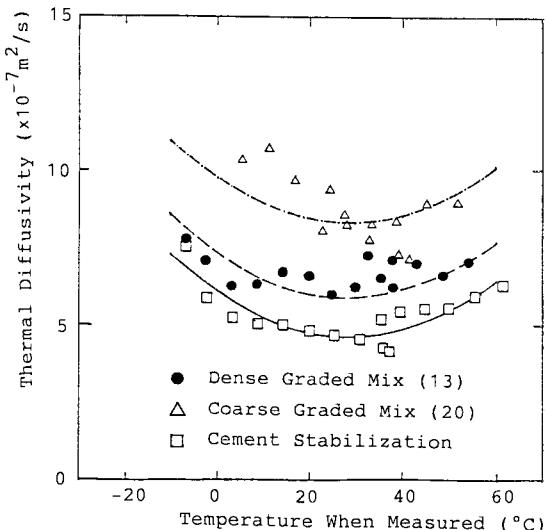


Fig. 12 Relationship between Temperature and Thermal Diffusivity of pavement Materials.

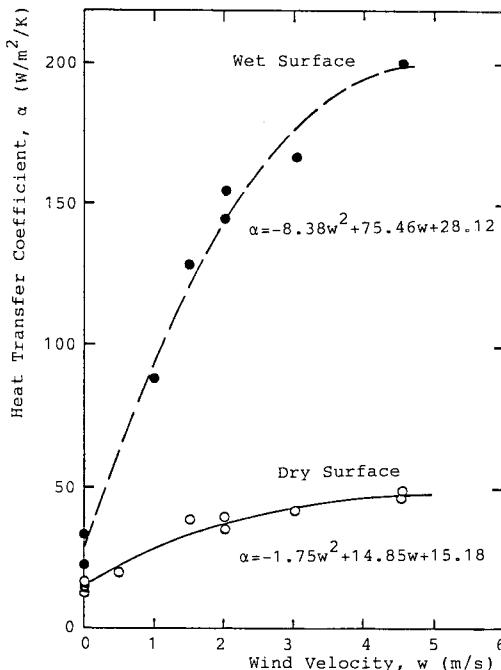


Fig. 13 Relationship between Wind Velocity and Heat Transfer Coefficient at Pavement Surface.

すなわち、単位時間当たりの日射量を日射強度とよぶことになると、全天日射強度 I は、直達日射強度 I_d と散乱日射強度 I_{sh} を用いて、

$$I = (s + (1-s)m)(I_d \sin \varphi + I_{sh}) \dots \dots \dots (17)$$

と表わされる。なお、直達日射強度は、その定義式より、

$$I_d = I_0 P(\sin \varphi) \dots \dots \dots (18)$$

であり、また、散乱日射強度は、Berlarge の式から

$$I_{sh} = \frac{1}{2} I_0 \sin \varphi \frac{1 - P(\sin \varphi)}{1 - 1.4 \ln P} \dots \dots \dots (19)$$

と表わせる。

ここに、 φ : 太陽高度（地表水平面と太陽方向とのなす角度）[rad]

P : 大気透過率

I_0 : 雲がないときに地表面に到達する太陽ふく射強度 [W/m²]

s : 日照時間の割合

m : 雲の透過率

を表わす。このうち、 h は、地球中心からの対象とする地点の位置ベクトルと太陽の方向ベクトルとのなす角度から求めたが、 P 、 I は理科年表¹²⁾による値、また、 m は繁雑さを避けるため、気象研究所における地上観測日原簿の曇天時の平均的な値として、一律に 0.40 を用いた。これは、雨天時には日射による入熱量よりも熱伝達による入熱量が卓越し、結果に大きな影響を及ぼさないためである。

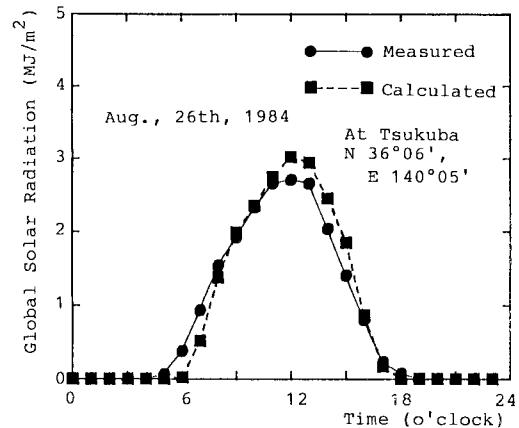


Fig. 14 Comparison of Measured and Calculated Solar Radiation (Weather: Clear).

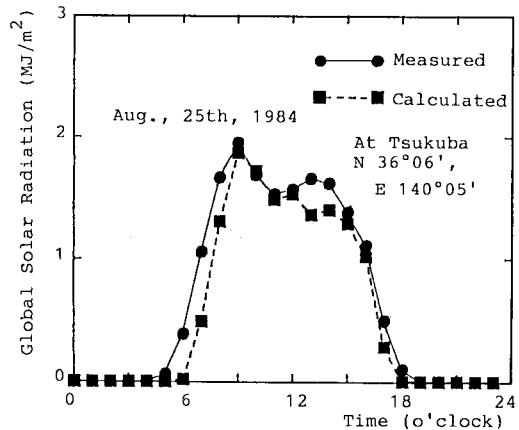


Fig. 15 Comparison of Measured and Calculated Solar Radiation (Weather: Mostly Cloudy with Occasional Sunshine).

検証のため、この理論全天日射強度を積分して求めた 1 時間当たりの全天日射量と気象研究所における実測日射量とを比較したところ、Fig. 14、15 に示すように、日の出、日の入りの時刻に若干のずれが認められるものの、天候によらず両者はほぼ一致しているということができる。この時刻のずれは、地球を完全球体、公転軌道を真円軌道で近似したことによる誤差および太陽高度が小さく直達日射量がほぼ 0 のときの散乱日射量の影響が原因と思われる。

なお、日射量のうち、舗装内部に伝わるもののが表わす熱吸収率は表面の色、粗度などに影響を受けると考えられるが、本研究では骨材に砂岩を用いているので、文献^{13), 14)}により、0.91 とした。

5. 舗装内部温度の推定結果

(1) 表面温度を境界条件にした場合

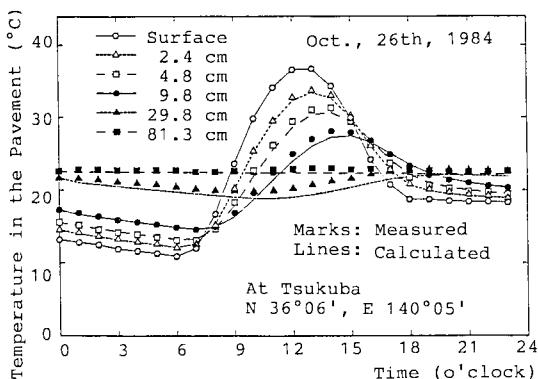


Fig. 16 Comparison of Measured and Calculated Temperatures in the Pavement (Boundary Condition : Eq. (13), Weather : Clear).

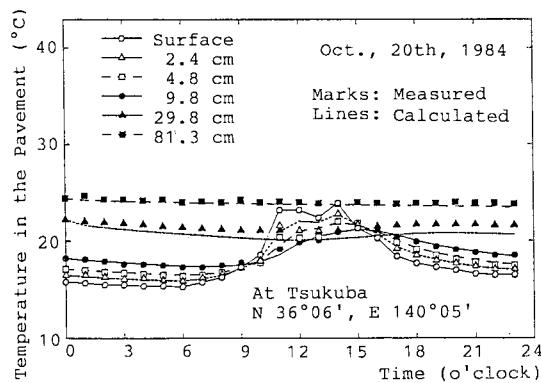


Fig. 17 Comparison of Measured and Calculated Temperatures in the Pavement (Boundary Condition : Eq. (13), Weather : Mostly Cloudy with Occasional Rain).

Fig. 16, 17 は、実測の舗装表面温度を境界条件にした場合の内部温度の推定結果を示したものである。これより、全日を通じておよそ土1~2°Cの誤差で推定が可能であること、および、本研究で採用した表面温度の測定方法、材料の熱拡散率の評価方法が適切であったことを示している。

(2) 気象作用を境界条件にした場合

Fig. 18, 19 は、それぞれ Fig. 16, 17 と同じ日について表面温度を未知とし、気象作用を境界条件にした場合の内部温度推定結果を示したものである。これより、表面温度を境界条件にした場合より若干精度は落ちるもの、天候によらず、ほぼ±2~3°Cの誤差で温度推定が可能なことがわかる。ただし、実測が困難な大気透過率 P や雲の透過率 m はそれぞれ月平均値、定数を用いたこと、また、風速や日射量などのかなり不規則に

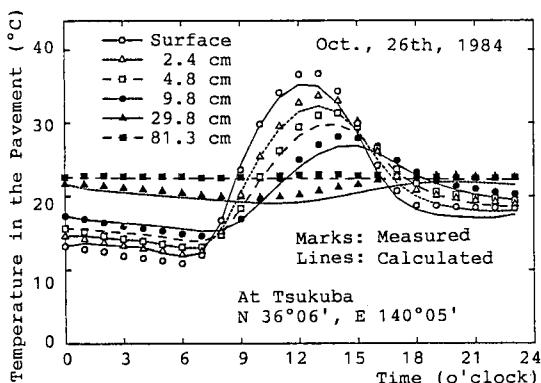


Fig. 18 Comparison of Measured and Calculated Temperatures in the Pavement (Boundary Condition : Eq. (14), Weather : Clear).

Table 2 Meteorological Data Used for the Analysis.

(1) Oct., 26th, 1984

Time (o'clock)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Solar Rad. (0.01MJ/m ²)	0	0	0	0	0	0	9	44	99	149	184	200	196	175	134	79	27	3	0	0	0	0	0	0
Wind Vel. (m/s)	0.5	1.5	1.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0
Rainfall (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sunshine (hr.)	0	0	0	0	0	0	0	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
Air Temp. (°C)	12.2	11.9	11.6	10.6	10.6	9.6	9.5	9.7	12.6	18.5	21.0	22.2	22.3	21.7	20.3	18.7	18.7	17.6	16.1	14.9	15.0	15.3	15.5	15.6

(2) Oct., 20th, 1984

Time (o'clock)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Solar Rad. (0.01MJ/m ²)	0	0	0	0	0	0	1	7	14	29	66	76	68	62	43	31	14	1	0	0	0	0	0	0
Wind Vel. (m/s)	1.0	0.5	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	0.5	0.5	2.5	3.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0
Rainfall (mm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Sunshine (hr.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Air Temp. (°C)	15.6	15.2	15.2	15.0	15.1	15.3	14.8	15.6	15.5	16.1	16.1	16.6	17.3	17.1	18.4	18.4	18.1	17.7	17.3	16.8	16.3	16.1	15.9	15.9

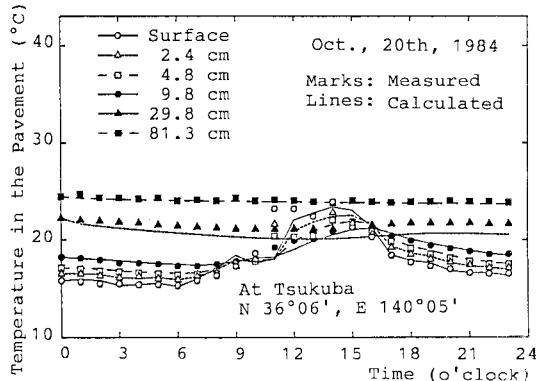


Fig. 19 Comparison of Measured and Calculated Temperatures in the Pavement (Boundary Condition : Eq. (14), Weather : Mostly Cloudy with Occasional Rain).

変化し得る因子を1時間単位の平均値で扱ったことなどから、最大で $\pm 5\sim 7^{\circ}\text{C}$ の誤差を生じた日もあったが、表層表面から路床上面までを含めた全測定点での平均平方誤差は高々 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ であって、実用上十分満足できるものと考えられる。

なお、参考のため温度推定の対象とした日の気象データをTable 2に示す。

6. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると、以下のようになる。

(1) 本研究で用いたような通常の舗装では、下部構造の違いは表面温度にあまり大きな影響を及ぼさない。

(2) 舗装の代表温度を月別に定めることには精度上の問題があると思われる。

(3) 舗装の内部温度を推定する場合は大気温度以外の気象条件をも考慮に入れた推定方法が必要であると考えられる。

(4) 日最低大気温度と日最低表面温度の間には強い相関が認められるが、日最高大気温度と日最高表面温度の間にはかなりのばらつきがある。

(5) 深さ別の舗装内部温度の出現頻度分布は、測定場所により著しく異なる。

(6) 日最高表面温度と深さ別日最高舗装温度との相関は、温度が低く深さが大きいほど小さくなる。

(7) 一般に、80cm程度の深さ（本研究における路床上面）では温度の日変化はきわめて小さく、解析上断熱境界として扱い得る。

(8) 舗装表面における熱伝達率を湿潤状態別に風速の関数として定量化することができた。

(9) 舗装表面温度が測定されている場合、舗装内部

温度は非常に高い精度で推定することができる。

(10) 舗装表面温度が測定されていない場合でも、気象庁AMEDASの基礎的な気象データのみから高々 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ の平均平方誤差で内部温度の推定が可能である。

7. あ と が き

既設のアスファルト舗装の表面温度が測定され、また舗装材料の物性値が推定できる場合には、熱伝導方程式を数値解析することにより舗装内部温度分布が非常に高い精度で推定できることから、たとえば従来表面温度のみによって補正を行っていたたわみ量がより高精度で測定できるようになろう。また、表面温度が未知の場合でも本研究で構築したモデルを適用することにより、多大な時間、労力、資金を費やして温度測定を行うことなく、比較的入手が容易な気象庁AMEDASの気象データのみによって舗装内部温度分布の推定が行えることから、今後気象条件の違いを考慮に入れた設計方法や既設舗装の供用性予測手法の開発に大きく寄与することが期待される。さらに、本手法を適用することにより、現在大きな問題となっている連続鉄筋コンクリート舗装の温度応力ひびわれなどのセメントコンクリート舗装に関連する問題の解析も可能になるものと思われる。

なお、本研究に用いたデータは、著者の一人が建設省土木研究所舗装研究室に在職中に測定したものである。また、測定されたデータのうち前半部は土木研究所資料¹⁵⁾に掲載されている。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、温度測定を快諾し便宜を図って下さった建設省土木研究所舗装研究室の方々、気象データを提供し、閲覧させて下さった気象庁統計課および気象研究所高層気象台観測第一課、三課の皆様方、また、貴重な舗装温度測定結果を整理し直し提供して下さった日本大学理工学部教授の三浦裕二先生、日本鋼管(株)技術研究所の近藤佳宏氏、大量のデータ処理を手伝ってくれた本四公団の勝地弘君(当時学部4年)には並々ならぬお世話になった。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

なお、本研究はヤマハ発動機国際友好基金の交付を受けた。

付 錄

1. 热伝達率の測定方法

実験に用いた供試体は、熱が一次元的に流れるよう $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ のスラブ状のアスファルト混合物の周囲を厚さ16mmの合板で囲んだもので、約10mm間隔に表面を含めて11本の熱電対を埋設した。これをおよそ 0°C または 40°C の一定温度に養生した後

に20°Cの風洞内に側面の1つが下になるように約1時間放置し、表面の乾湿状態、風速を変えながら2分ごとに供試体内部の温度変化を測定した。

供試体内部温度および大気温度をそれぞれ $\theta(z, t)$, $\Theta(t)$ ($0 < z < 10 \text{ mm}$, $0 < t < 60 \text{ min}$) とすると、時刻 t および $t + \Delta t$ の間に単位表面積当たりに増加する熱量は供試体表面において大気との間で伝達された熱量に等しいから、

$$\rho C \int_0^{z_i} (\theta(z, t + \Delta t) - \theta(z, t)) dz / \Delta t \\ = \alpha((\theta(0, t) - \Theta(t)) + (\theta(z_i, t) - \Theta(t))) \dots \dots \quad (\text{A-1})$$

ここに、 θ ：供試体内部温度 [°C]

Θ ：大気温度 [°C]

ρ ：供試体の密度 [kg/m^3]

C ：供試体の比熱 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

α ：供試体表面における熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

z_i ：供試体の厚さ (100 mm)

が成り立つ。

本研究では、 $\Delta t = 2 \text{ min}$ とし、数値積分によって熱伝達率 α を求めた。

2. 気象作用を境界条件とした内部温度の推定方法

本研究では、舗装の系を熱伝導モデルに置き換え、未知節点温度ベクトルを決定するために変数 z について Galerkin 法を適用し、式 (12), (14), (15) を連立一階常微分方程式の初期値問題：

$$[K] \{\Phi\} + [C] \{\partial\Phi/\partial t\} = \{F\}$$

$$\{\Phi(0)\} = \{G\}$$

ここに、 $\{G\}$ ：初期節点温度ベクトル

$\{\Phi\}$ ：系全体の節点温度ベクトル

$[K]$ ：熱伝導マトリックス

$[C]$ ：熱容量マトリックス

$\{F\}$ ：熱流速ベクトル

に変換し、これを Crank-Nicholson 法により解いた。

熱伝導マトリックスの帶要素および熱流速ベクトルの第1要素には時々刻々変化するパラメーターが現れるが、これらのうち Φ は実測の気象データから直接取り込み、 q は年月日および日照時間の割合から式 (17) により求めた。また、 α は風速、降水量のデータと Fig. 13 から、 χ^2 は計算で求まる節点温度を用いて

Fig. 12 の関係から各時間ステップごとに計算した。

参考文献

- 1) Straub, L., Schenck, H. N. Jr. and Przybycien, F. E. : Bituminous Pavement Temperature Related to Climate, HRB Bull. 256, pp. 53~77, 1968.
- 2) 近藤佳宏・三浦裕二：アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究、土木学会論文集、No. 250, pp. 123~132, 1976年6月。
- 3) 秋山政敬：アスファルト舗装体の温度に関する調査研究、土木学会論文集、No. 246, pp. 105~115, 1976年2月。
- 4) 松野三朗：アスファルト舗装の温度について、土木技術資料、No. 5-5, pp. 28~31, 1963年5月。
- 5) 野田和宏：アスファルト舗装体の温度およびたわみ特性について、昭和45年度試験所報告、日本道路公団、pp. 55~62, 1971年11月。
- 6) 高速道路調査会：アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書、1976年2月。
- 7) 大田昌昭・熊谷茂樹・菅原竜藏・大谷正男：北海道におけるアスファルト舗装体の温度について、第23回建設省技術研究会報告、pp. 334~348, 1969。
- 8) 新田 登・笠原 篤：転動荷重下におけるアスファルト混合物の変形特性、土木学会論文集、No. 329, pp. 117~125, 1983年1月。
- 9) 渡辺 隆・姫野賢治・勝呂 太：アスファルト混合物の伝熱特性に関する実験的研究、第39回年次学術講演会概要集、V-222, pp. 443~444, 1984年10月。
- 10) 村井貞規・福田 正・高橋彦人：アスファルト舗装の温度変化の予測、第35回年次学術講演会概要集、V-223, pp. 442~443, 1976年10月。
- 11) 水谷重喜：日射を受けるアスファルト混合物層の温度変化の推定、舗装、Vol. 18, No. 7, pp. 18~21, 1983年。
- 12) 東京天文台 編纂：理科年表、丸善、1985年。
- 13) J. R. ホールマン (平田 賢監訳)：伝熱工学 (上)(下)、ブレイン図書、1982年。
- 14) 吉本 彰・荻野正嗣・川上正史：アスファルト舗装体の温度、舗装、Vol. 10, No. 1, pp. 29~32, 1975年1月。
- 15) 建設省土木研究所：アスファルト舗装内の温度分布に関する調査研究 (資料集)、土木研究所資料第2198号、1985年3月。
- 16) 武政剛弘・深田三夫：砂および碎石による二層の熱伝導について、長崎大学工学部研究報告、No. 6, pp. 89~93, 1975年12月。
- 17) 武政剛弘・深田三夫：舗装道路における熱伝導、長崎大学工学部研究報告、No. 8, pp. 61~66, 1977年1月。

(1985.5.10・受付)