

高反射型アスファルト舗装の表面温度低減効果と 路上の熱環境特性

Effects of Surface Temperature Reduction and Thermal Environment on High Albedo Coating Asphalt Pavement

西岡 真稔*¹ 鍋島 美奈子*¹ 若間 賢志*² 上田 淳也*³
Masatoshi Nishioka Minako Nabeshima Satoshi Wakama Junya Ueda

*¹ 大阪市立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka City University

*² 大阪府 Osaka Prefectural Government

*³ パシフィックコンサルタンツ(株) Pacific Consultants Co., LTD.

Corresponding author: Masatoshi Nishioka, nishioka@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

ABSTRACT

In this paper, it surveyed about the high albedo pavement which performed high reflective surface preparation to open grading asphalt paving, and the following result was obtained.

1) By forming a paved surface into high reflection, it validated that a surface temperature was reduced greatly. In the result of a measurement in the fine weather day of a summer, it is set to 6.8 (K) with the reflection factor 0.25, and becomes the temperatures fall of 20 (K) in the reflection factor 0.6.

2) Based on the radiation balance of the solar radiation obtained from survey, and long wave radiation, operative temperature was calculated and the trial calculation of the influence on the effective temperature was made. According to this, by the weather condition in the daytime in the survey day of summer-season fine weather, when a pedestrian stood on the pavement central part, a result in which operative temperature carries out 3.4-6.1 (K) ascent was brought. Since increase of reflected solar radiation exceeded the reduction effectiveness of the long wave radiation injected from a pavement side, the whole radiation absorption increased.

The heat conductivity and volumetric specific heat of the pavement body were presumed based on the actual measurement, numerical computation was carried out using this, and the following results were obtained.

As a result of performing a case study about the relationship between solar reflectance and a surface temperature, in the weather condition of the survey day, the result which the temperatures fall of 2.5 (K) produces was obtained to the Increase of value in the reflection factor 0.1.

キーワード: 道路舗装, 実測, 熱環境, 熱伝導率, 比熱

Key Words : Pavement, Experimental Measurement, Thermal Environment, Thermal Conductivity, Specific Heat

1. はじめに

大都市を持つ自治体では都市のヒートアイランド対策推進計画の策定が終わり、具体的施策が実施される段階へと移行しつつある。対策の中で、地表面被覆の熱特性を改善する対策は重要な項目の一つであり[1]、このような背景にあって道路舗装の改良が活発に進められている。ヒートアイランド対策を目的とする道路舗装開発の主たる目標は、夏季日中の舗装表面温度を低減させることにあり、低減方法によって大別すると、水分蒸発を用い温度低減を図る保水性舗装と日射反射率を向上させる高反射舗装の2種がある。本研究では、このうち高反射アスファルト舗装について、実験用舗装区画を敷設し、舗装各部の温度測定や放射

収支測定を行ったので、その結果を分析して報告する。

高反射アスファルト舗装は図1のような構造であり、通

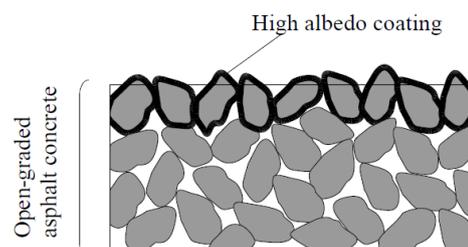


Figure 1 Schematic sectional view of high albedo pavement

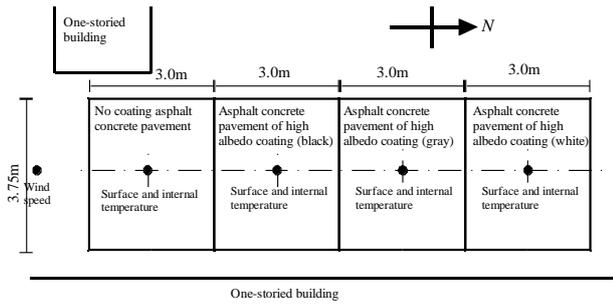


Figure 2 Site plan

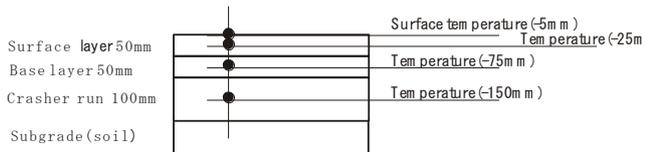


Figure 3 Configuration of pavement

Surface layer : Open graded asphalt concrete(maximum particle size 13mm),Base layer : Dense graded asphalt concrete (maximum particle size 13mm)

常のアスファルト舗装（この例では排水性アスファルト舗装）の表面に、日射反射率の高い表面処理剤を塗布した構造である。通常のアスファルト舗装は、日射反射率が 0.1 程度と小さいので、強い日射のある環境下では表面が高温になるが、表面処理剤を塗布して日射反射率を高めると表面温度低下が期待できる。しかし、一方では舗装表面から出る反射日射が増大することになるので、舗装上に人体のある場合の熱環境を考えると、人体における反射日射の吸収が増加する懸念もある。本研究では、排水性アスファルト舗装表面に高反射性の表面処理を施した高反射舗装の表面温度、舗装面の放射収支の実測を行い、表面温度の低減効果を確認する。また、舗装面からの反射日射の影響を見るために、舗装上に人体を置く条件を設定し作用温度を試算する。在来型の舗装については、舗装上の熱環境に関する田中らの研究[2]、また保水舗装の熱収支に関する福田らの研究[3]がある。しかし、高反射舗装については表面温度の計測は数多く行われているものの(例えば[4])、放射収支などについて実測した研究報告は、まだほとんど行われていない状況にある。

2 舗装面の表面温度と放射収支の実測

2.1 高反射舗装

近年、可視光域の波長帯の反射率と赤外領域の反射率とを独立に調整できる塗料が開発された。従来の塗料では、日射の反射率の高いものは可視光反射率も高く、色味は白色に近いので道路への適用に際して障害があったが、新たな高反射塗料の出現によって、まぶしさを抑えた黒～灰色系の色味の表面を持ちながら、白色系の塗装に迫る日射反射性能を持つ道路舗装が実現可能となった。このような塗料は、遮熱塗料と名付けられて販売されており、本研究で

Table 1 Measurement instruments

Item	Instruments	Height from pavement (mm)
1 Air temperature	Pt with radiation shield Campbell CS500-L6	1500
2 Surface temperature of pavement	Thermocouple (Type T)	-5
3 Internal temperature of pavement	Thermocouple (Type T)	-25, -75, -150
4 Downward long-wave radiation	Net pyrriadiometer EKO MF-40	500
5 Net radiation	Net radiometer Campbell Q7.1-L20	500
6 Incoming and reflective solar	Albedo meter EKO MR-22	650
7 Air temperature above pavement	Thermocouple (Type T) without radiation shield	1500
8 Wind speed and direction	Aerovane EKO MA-120	1500

Table 2 Installation schedule of radiation sensor

Date	No coating	High albedo black	High albedo gray	High albedo white
26, Aug	LD, TA, RN, AM			
30, Aug	LD, TA, RN	RN, AM, TA		
2, Sep	LD, TA, RN		RN, AM, TA	
10, Sep	LD, TA, RN			RN, AM, TA

Symbols : LD(Net pyrriadiometer), TA(Thermocouple), RN(Net radiometer), AM(Albedo meter)

対象とする高反射舗装は遮熱舗装と呼ばれることも多い。

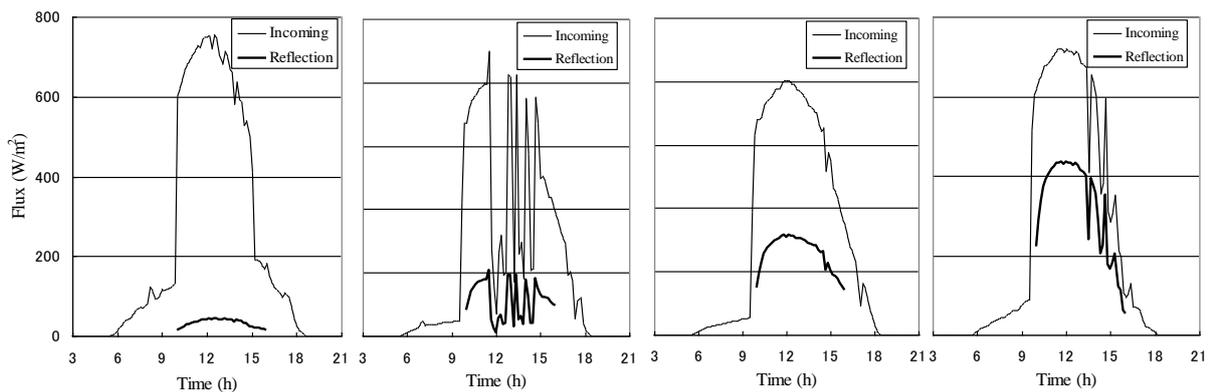
2.2 実験概要

大阪市立大学構内に、高反射舗装の実験場を設けた。図2に実験場の平面図を示す。表面処理を施さない無処理アスファルト（以下「アスファルト」と略す）、高反射表面処理を施した3色の高反射舗装（黒色、灰色、白色）の計4区画を南北方向に配置した。いずれも舗装体の内部構造は共通であり図3の断面構造を持つ。開粒度アスファルト混合物(厚さ 50mm)を表層とし、その下部に密粒度アスファルト混合物(厚さ 50mm)、碎石層(厚さ 100mm)と積層され、さらにその下部は土壌層からなる路床へと続く構造である。

測定項目を表1に示すが、舗装表面温度、舗装体内部温度は舗装区画の中央部に測定点を設け観測を行った。表面温度は、舗装表層の小さな骨材を抜き取り、これに貼付した後埋め戻す方法で設置したので、正確には 5mm 程度の深さの温度である。放射収支計は2台を使用し、1台は「アスファルト」区画に設置し、有効放射計と共に定点観測を行った。放射収支計1台とアルベドメータは表2に示すスケジュールに従って、高反射舗装区画を順次測定した。測定期間は、2002年8月26日から2002年9月10日であり、測定間隔は10分である。

2.3 測定結果

日射反射率 図4に示す4日間の測定値を用いて、舗装表面の日射反射率を求める。日射量の測定値を見ると、いずれの区画・測定日においても9:50頃に日射量が急増しており15:00になると急減しているが、これは実験区画の東西には隣接建物(高さ約3m)があり、実験区画に影を落とすためである。また反射率についても、11:00～14:30を除く時間では、区画の一部に日影があるために影響が現われている。このような事情があるので、実験区画全面に直達日



(a) No coating (26-Aug.) (b) High albedo black (30-Aug.) (c) High albedo gray (2-Sep.) (d) High albedo white (10-Sep.)
Figure 4 Solar radiation and reflective solar radiation

Table 3 Albedo

Type of coating	Albedo
No coating	0.06
High albedo black	0.25
High albedo gray	0.4
High albedo white	0.6

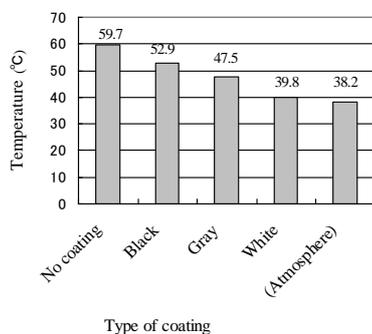


Figure 5 Surface temperature of pavement (26-Aug.)

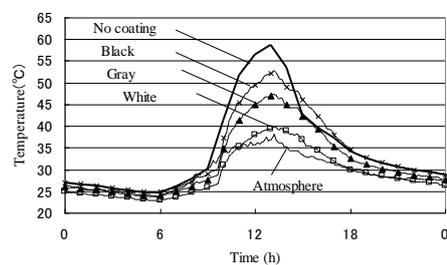


Figure 6 Maximum temperature of pavement surface (13:10, 26-Aug.)

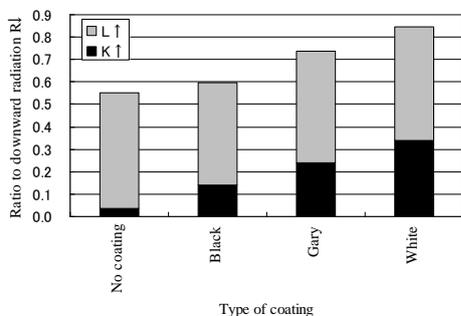


Figure 7 Reflective solar radiation and upward long-wave radiation from pavement
This figure shows the value of 13:00 in the following measurement date. No coating (26-Aug.), black (30-Aug.), Gray(2-Sep.), White (10-Sep)

射が当たる 11:00~14:00 の時間帯の測定値を使って、この時間帯の平均日射反射率を求めると表 3 のようになる。視覚的には類似した黒色表面でも、「アスファルト」では反射率は 0.06 と極めて小さいが、「高反射(黒)」では 0.25 と大きく向上しているのがわかる。

表面温度 8月26日に測定した舗装表面温度を図5に示す。13:00 頃に舗装表面温度が最大となり、このとき日射反射率の大きな舗装の表面温度は確実に低下している様子が確認できる。図6に表面温度が最高となった13:10における値を示す。「アスファルト」では 59.7°Cであるが、「高反射

(黒)」では 52.9°Cと 6.8 K の温度低減効果が見られる。「高反射(白)」に至っては、20 K 近くも温度が低下しており、気温に近い温度に到達している。夜間については温度差が小さいが、8/26 0:00 ではアスファルトと比べ、「高反射(灰)」で 1.0 K、「高反射(白)」で 2.1 K の温度低下が見られる。「高反射(黒)」については「アスファルト」との温度差がほとんど無かった。

放射収支 日射反射率測定と同時にを行った3日間の放射収支実測結果をもとに、舗装表面から上方へ射出される放射(各測定日の13:00)について、日射成分と長波成分に分けて表示したものが図7である。各色の舗装で測定日が異なり日射条件も異なるので、下向き全放射 $R\downarrow$ を1として基準化して表示している。この図は同一気象条件下における比較ではないが、反射率が上がると上向きの全放射量の増加するという傾向が明瞭に現われている。これは、反射率増大に伴う反射日射 $K\uparrow$ の増加が顕著に現われるのに対し、表面温度低下に伴う長波放射 $L\uparrow$ の減少は小さいためである。

なお図7の作成にあたって、次のような方法で日射成分と長波成分の分離を行った。測定値より直接得られる放射成分は、次の4種である。

- ・下向き全放射 $R\downarrow$: 測定項目 4
- ・正味放射 R_n : 測定項目 5
- ・下向き日射 $K\downarrow$: 測定項目 6
- ・上向き日射 $K\uparrow$: 測定項目 6

これらを用いて、長波成分の $L\downarrow$ と $L\uparrow$ は、次のように求める。

- ・ 上向き全放射 $R\uparrow$: $R\downarrow - R_n$
- ・ 下向き長波放射 $L\downarrow$: $R\downarrow - K\downarrow$
- ・ 上向き長波放射 $L\uparrow$: $R\uparrow - K\uparrow$

舗装上部気温 舗装上部気温については、地表面から +1500 mm の高さの気温について、舗装種別によって生じる気温差を求めてみたが、気温差は見られなかった。舗装区画の面積が $3 \times 3.75 \text{ m}$ と小さいためであろう。

2.4 舗装面上部の作用温度

作用温度を用いて、高反射舗装上の熱環境を考察する。高反射舗装によって形成される熱環境を、日射反射率の小さい在来舗装と比べると、その特徴は、以下の点にあると考えられる。

- 1) 舗装面温度が低下し、舗装上部の気温が低下する。
- 2) 舗装面温度が低下し、舗装面からの長波放射が減少する。
- 3) 舗装面からの反射日射が増加する。

補足説明 1 に示した手順で「アスファルト」と高反射各色との作用温度差を算出する。計算条件は、対流熱伝達率 $8 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ 、放射熱伝達率 $5 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ 、人体の日射吸収率 0.7、長波放射率 0.95 であり、放射と気温の測定値を与えて計算する。前述の実測結果から舗装の高反射化による舗装上部気温の低下は見られなかったため、本研究では高反射化に起因する気温低下は無いという条件で検討を進める。したがって、上向きの放射量だけが作用温度に差異を生じさせる。

作用温度の設定点と高反射舗装面の位置関係について、図 8 に示す 2 ケースを設定した。Case-1 は舗装の中心に人が立つ場合、Case-2 は歩車分離の道路において車道を高反射化し、その脇の歩道「アスファルト」に人が立つ場合に相当する。

図 9 に、「アスファルト」を基準として作用温度の増加分を表した。各舗装の反射率計測日の 11:00 における気温と放射の実測値をもとに計算した値である。作用温度定義点を高反射舗装の直上に置いた Case1 では作用温度の増分は大きく「高反射(黒)」では 3.4°C 、さらに「高反射(白)」では 6.1°C の増加となる。しかし、作用温度の定義点を、高反射舗装部から離れた Case-2 の条件では、増分は 1°C 以下に小さくなる。道路舗装の高反射化が近傍の歩行者の熱環境に及ぼす影響について考えると、歩行者が舗装のごく近傍に存在する場合には、表面温度の低減分より反射日射の増大分が上回り暑熱化する場合があると懸念される。

3 表面温度と熱収支に対する反射率向上の効果

実測により、舗装の日射反射率は得られたが、これに加えて舗装体の熱伝導率 λ と容積比熱 cy が得られれば、数値シミュレーションが可能となる。以下では、気象条件(気温、日射量、風速)を与えて、舗装表面温度と舗装体内部温度の測定値を用いて、舗装体(表層～路床)の熱伝導率と

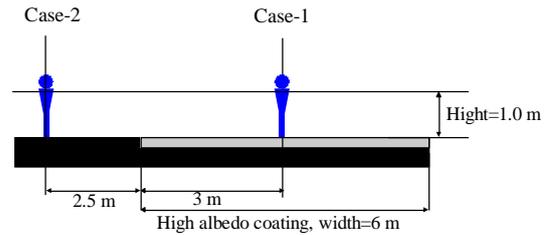


Figure 8 Calculation conditions of operative temperature

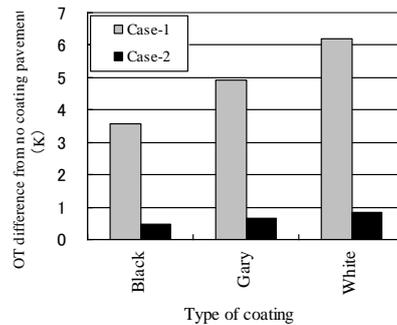


Figure 9 Operative temperature calculated based on the measurement

容積比熱を推定する。次に、この推定値をもとに数値計算を行い、表面の日射反射率と表面温度低下の関係、および表面熱収支の成分構成に与える影響について検討する。

3.1 熱物性値の推定方法

1) 熱拡散率 λ/cy の推定

舗装体の上部境界条件として、舗装表面温度の実測値を与え、舗装体の深さ 25mm の点で、推定値と実測値が一致するような熱拡散率を求める。舗装体下部の境界条件は、深さ 2000mm において断熱とする。計算の詳細は、補足説明 2 A) に示す。単層壁体の両側表面に温度境界条件を与える条件と等しいので、舗装体内部の温度分布は熱拡散率で決まることになる。「高反射(灰)」の舗装体実測値(図 10 参照、8 月 28 日～9 月 1 日を助走期間、9 月 2 日～9 月 4 日を推定期間)を用いて、熱拡散率を推定した結果を図 11 に示す。図 11 は、熱拡散率を変化させて、推定値を実測値のあたりはまりの程度を RMSE(平均二乗誤差平方根)で判定するものであるが、これより熱拡散率は $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と推定された。

2) 熱伝導率 λ の推定

熱拡散率が決定したので、次に熱伝導率または容積比熱のいずれか一方が推定できれば、他方も求まる。ここでは補足説明 2 B) に示す計算方法で熱伝導率を決定する。上部境界条件として実測値(気温、日射)を与え、表面温度の推定値を実測値と適合させる。前述の熱拡散率 $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とする条件で、熱伝導率と容積比熱を変化させる。計算法としては舗装表面に対流熱伝達率を与える点が、熱拡散率推定の場合と異なるが、これはユルゲスの式(粗面)に対して、図 10 に示す風速の実測値を与えることにより算定した。

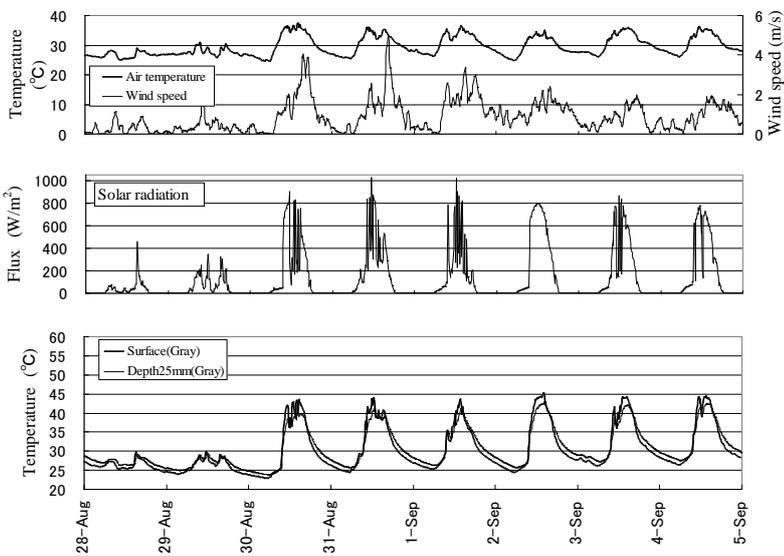


Figure 10 Weather conditions and surface temperature of pavement

熱拡散率と同じ 8 日間の測定値を用い、3 色の高反射舗装に対して、熱伝導率を 0.1 (W/mK) 刻みで変化させて RMSE の関係を求めると図 12 となる。RMSE が最小となる時、熱伝導率 $\lambda = 1.9$ (W/mK)、容積比熱 $c\gamma = 1460$ (kJ/m³K) の値が得られた。

3.2 日射反射率増大の効果

以上で求められた熱伝導率と熱容量を用いて、舗装表面温度と表面の熱収支に対して日射反射率がどのように影響するかについて数値計算により分析する。上述の熱伝導率推定と同じ計算法を用い、日射反射率を 0~0.8 の範囲で変化させた。図 13 に 9 月 2 日の気象条件で求めた表面温度を示す。表面温度最高値(14:30 に生起)は、反射率が 0.1 増大すると 2.5(K) 低下する。また図 14 では、表面温度最高時(14:30)における舗装表面の放散熱量を成分別に示す。日射反射率が増大すると、地中伝導熱 G と対流顕熱 H が減少する。上向き長波放射 $L\uparrow$ も減少するものの、その量は少ない。一方、反射日射 $K\uparrow$ は大きく増加する。

4 まとめ

本論文では、排水性アスファルト舗装に日射反射率の大きな表面処理を施した高反射舗装について、実測の結果について報告した。

- 1) 舗装表面の日射反射率と表面温度を測定結果より、表面の高反射化により舗装表面温度は大きく低減されることを確認した。夏季の最高温度は表面処理の無いアスファルト舗装と比べ、「高反射(黒)」で 6.8(K)、「高反射(白)」では、20(K)の温度低下が観測された。
- 2) 舗装の高反射化に伴って、反射日射が増大し近傍の熱環

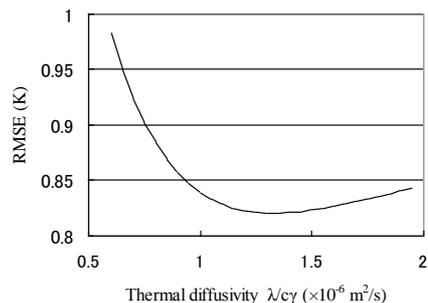


Figure 11 Thermal diffusivity and RMSE
RMSE shows the error between measurement temperatures and estimated temperatures by numerical computation in depth of 25mm in the pavement body.

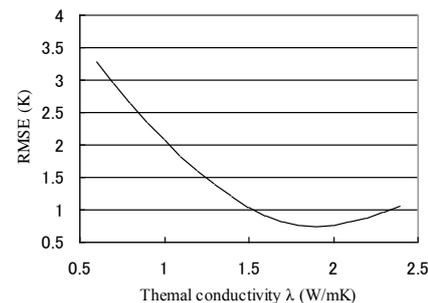


Figure 12 Thermal conductivity and RMSE
RMSE shows the error between measurement temperatures and estimated temperatures by numerical computation on the pavement surface.

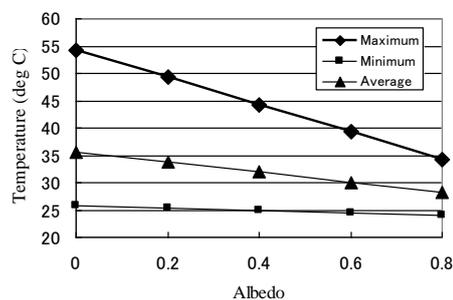


Figure 13 Albedo and temperature of pavement surface

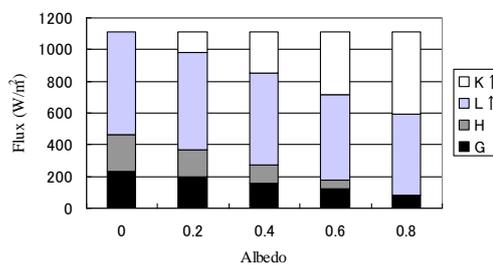


Figure 14 Flux of pavement surface

境に影響する可能性がある。そこで、実測より得られた日射と長波放射の放射収支をもとに、作用温度を計算し体感温度への影響を試算した。これによれば、夏季晴天の実測日における日中の気象条件では、舗装中心部に立つ場合に作用温度が数度上昇する結果となった。反射日射の増大が舗装面から射出する長波放射の低減効果を上回り、放射環

境は悪化したためである。作用温度の定義点を高反射面から離すと、作用温度上昇幅は1 K以下に小さくなる。舗装面を高反射化することに伴う反射日射の増大については、懸念すべき点があるので高反射舗装が実地に敷設される際には事前検討を要する事項であると思われる。ただし、高反射舗装上で被験者に温熱感申告をさせた吉中らの研究[4]では、暑熱感が緩和されるという逆の結果が得られており、温熱感への影響についてはさらに詳細な研究の余地がある。

3) 実測値をもとに舗装体(表層～路床)の熱伝導率と容積比熱を求め、これを用い数値計算を実施した。日射反射率の増加に対する表面温度の低減効果についてケーススタディを行った結果、実測日の気象条件では、反射率0.1の増加に対して、2.5(K)の温度低下が生じる結果を得た。

補足説明1

■作用温度計算の基礎式

作用温度は、式(1)で定義され、放射の環境条件は、平均放射温度 θ_{MRT} によって表記される。

$$\theta_{OT} = \frac{\alpha_c \theta_a + \alpha_r \theta_{MRT}}{\alpha_c + \alpha_r} \quad (1)$$

ここで α_c (対流熱伝達率)、 α_r (放射熱伝達率)、 θ_a (気温)である。 θ_{MRT} は、中村[5]に従って、微小六面体に対する方向別MRTを求め、これに人体の形状を勘案した重み付け平均を求める方法を用いる。

$$\theta_{MRT} = 0.238 \cdot (\theta_{MRT,1} + \theta_{MRT,2} + \theta_{MRT,3} + \theta_{MRT,4}) + 0.024 \cdot (\theta_{MRT,5} + \theta_{MRT,6}) \quad (2)$$

$\theta_{MRT,1} \sim \theta_{MRT,4}$ は微小六面体の側面であり、 $\theta_{MRT,5}$ 、 $\theta_{MRT,6}$ は上面と下面である。

本論文では、基準とする区画Bで求めた作用温度と、これと対照する区画Aで作用温度を求め、この2点の作用温度差に着目している。つまり、作用温度差は、次式で表される。

$$\Delta\theta_{OT} = \frac{\alpha_c (\theta_a - \theta_a) + \alpha_r (\theta_{MRT,A} - \theta_{MRT,B})}{\alpha_c + \alpha_r} \quad (3)$$

ここで、

$${}_A\theta_{MRT} - {}_B\theta_{MRT} = 0.238 \sum_{i=1}^4 ({}_A\theta_{MRT,i} - {}_B\theta_{MRT,i}) + 0.024 \sum_{i=5}^6 ({}_A\theta_{MRT,i} - {}_B\theta_{MRT,i}) \quad (4)$$

である。 ${}_A\theta_a$ 、 ${}_A\theta_{MRT}$ は区画Aにおける気温と放射温度である。区画Bに対しても同様の表記をしている。

次に式(4)を構成する微小六面体の各構成面*i*における平均放射温度 $\theta_{MRT,i}$ について、式(5)から式(9)により計算法を説明する。

人体表面温度を θ_s として、作用温度を用いて人体表面の熱収支式を書くと次のようである。

$$P = (\alpha_c + \alpha_r)(\theta_s - \theta_{OT}) = \alpha_c(\theta_s - \theta_a) + \alpha_r(\theta_s - \theta_{MRT}) \quad (5)$$

右辺の第2項は人体と環境の放射熱伝達であるので、長波放射に加えて日射のある環境でも使えるように、次のように置き換える。

$$\alpha_r(\theta_s - \theta_{MRT}) = -R_n \quad (6)$$

R_n は環境から人体への正味放射量(日射を含む)である。式(6)は、人体全体に関する式であるが、微小六面体の個別の構成面に対しても適用できる。これより、構成面*i*におけるMRTは

$$\theta_{MRT,i} = \frac{R_{n,i}}{\alpha_r} + \theta_s \quad (7)$$

である。

本論文では、鄭ら[6]に準じて人体表面の長波放射率は0.95、日射吸収率は0.7として、人体への正味放射量 R_n を式(8)により算出する。また、対流熱伝達率 $\alpha_c = 8$ (W/m²K)、放射熱伝達率 $\alpha_r = 5$ (W/m²K)を用いる。

$$R_{n,i} = 0.95 \cdot L_{m,i} + 0.7 \cdot K_{m,i} - L_{out} \quad (8)$$

L_{out} は人体表面から射出される長波放射量である。構成面*i*における、区画AとBの放射温度差を求めると、

$${}_A\theta_{MRT,i} - {}_B\theta_{MRT,i} = \frac{{}_A R_{n,i} - {}_B R_{n,i}}{\alpha_r} \quad (9)$$

となる。

L_{out} は、区画によらず一定であるとみなすと、式(9)において相殺されてしまうので、 L_{out} は式(8)に形式的に現われているものの、計算の実際では不用の量である。

■放射実測値を作用温度式へ適用する手順

地上高さ500mmにおいて測定された反射日射量と舗装からの長波放射量を用いて、式(9)の右辺にある正味放射量差 ${}_A R_{n,i} - {}_B R_{n,i}$ を算出する。区画Aと区画Bで、正味放射量差を生じさせているのは、舗装面の反射日射と長波放射射出と考えれば、この2種の放射量から求めることができる。

アルベドメータにより測定点(高さ500mm)で得られる反射日射量 $K \uparrow$ は、

$$K \uparrow = F_{500} K_s + (1 - F_{500}) K_{ENV} \quad (10)$$

である。ここで K_s (舗装面の反射日射量)、 K_{ENV} (隣接建物など舗装面以外から入射する反射日射)である。放射センサーから臨む舗装面の形態係数 F_{500} は93%であるので、 K_{ENV} の成分が含まれているが、区画Aと区画Bの反射日射量の差 ${}_A K_s - {}_B K_s$ を求める場合には、 K_{ENV} の項は相殺される。

$${}_A K \uparrow - {}_B K \uparrow = F_{500} ({}_A K_s - {}_B K_s) \quad (11)$$

であるので、

$${}_A K_s - {}_B K_s = \frac{1}{F_{500}} ({}_A K \uparrow - {}_B K \uparrow) \quad (12)$$

長波放射量についても同様にして ${}_A L_s - {}_B L_s$ を求めることができる。以上まとめると、1000mmの高さにある微小立方体の構成面*i*における正味放射量差は、次式で得られることになる。

$${}_A R_{n,i} - {}_B R_{n,i} = F_{1000,i} \{0.95({}_A L_s - {}_B L_s) + 0.7({}_A K_s - {}_B K_s)\} \quad (13)$$

$F_{1000,i}$ は高さ1000mmにある微小立方体の構成面*i*が臨む舗装面の形態係数である。舗装面からの放射が到達する5方向の面(下面と側面4方向)それぞれについて、式(13)を適用すれば、式(4)によりMRT差が計算され、最終的に式(3)より作用温度差をもとめることができる。

本論文では、以上に示した手順で「アスファルト」と高反射各色との作用温度差を算出している。

補足説明2

A) 熱拡散率の推定法

表層から深さ2000mmまでの舗装体を均質な材料とみなして、熱拡散率 λ/cy を推定する。図15(a)に示すように、上部境界条件として高反射(灰)において実測された表面温度 $T_{s,gray}$ を与え、下部境界条件は完全断熱とする。後退差分法により、深さ25mmの位置の舗装体温度を計算し、同位置の実測値との差をRMSEにより評価する。図11では、 λ/cy を0.05($\times 10^6$ m²/s)刻みで変化させて、RMSEを最小とする λ/cy を決定した。なお、差分計算の時間刻みは10分、空間刻みは、1mm(表面～深さ25mm)、5mm(深さ25mm～80mm)、10mm(深さ80～500mm)、100mm(深さ500～2000mm)である。

B) 熱伝導率の推定法

図15(b)に示すように、上部の境界条件として、正味放射 $R_{n,gray}$ と顕熱流束 H を考慮し、表面温度計算値と同位置の実測値との差をRMSEにより評価する。A)において λ/cy が決定された後、その λ/cy を一定とするように熱伝導率 λ と容積比熱 cy を変化させる。図12では0.1(W/mk)刻みで λ を変化させて、RMSEを最小とする λ を決定した。

正味放射 $R_{n,gray}$ は、日射の実測値 $K \downarrow$ と日射反射率 a_{gray} 、長波放射 $L \downarrow$ 、

舗装表面温度 T_s から求める。 σ はステファン-ボルツマン定数である。

$$R_{n,gray} = a_{gray} K \downarrow + L \downarrow - 0.95 \sigma T_s^4 \quad (14)$$

$$L \downarrow = F_{sky} L_{Brunt} + (1 - F_{sky}) \sigma T_a^4 \quad (15)$$

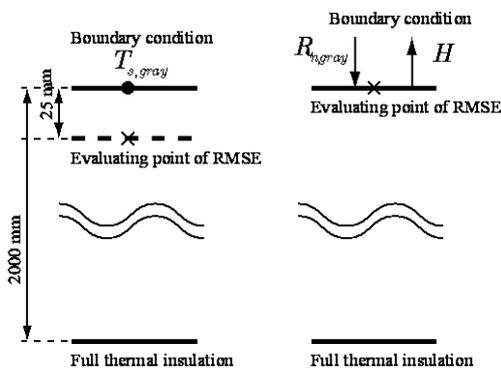
$$L_{Brunt} = (0.526 + 0.076 \sqrt{f}) \sigma T_a^4 \quad (16)$$

気温 T_a 、水蒸気圧 f (mmHg) と天空率 $F_{sky} = 0.78$ は実測値を与える。下向き放射(式(15))の計算にあたり、大気放射 L_{Brunt} は、プラントの式(式(16))より求め、また隣接建物等から射出される長波放射は、その表面が気温 T_a と等しいと仮定している。

対流熱伝達率 α_c は、ユルゲスの式(粗面)に対して風速の実測値(図10参照)を適用して求めることにし、顕熱流束を次式で得る。

$$H = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (17)$$

式(14)と式(17)において現われる表面温度 T_s は、表面の熱平衡を解くことにより決定される。



(a) Thermal diffusivity (b) Thermal conductivity
Figure 15 Calculation conditions used for physical properties estimation of pavement body

参考文献

- [1] 大阪府：”大阪府ヒートアイランド対策推進計画”、平成16年6月
- [2] 田中 孝典, 三浦 哲彦, 清田 勝：歩行環境に影響を及ぼす歩行者系道路舗装材の熱特性について 土木工学論文集, No.587(1998), pp49-58
- [3] 福田 萬大, 越川 喜孝, 辻井 豪, 浅枝 隆, 藤野 毅：夏季に給・散水した保水性舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究 土木工学論文集, No.613(1999), pp225-236
- [4] 吉中 保, 木内 豪, 深江 典之：遮熱性舗装による歩行空間の暑熱緩和に関する検討 土木学会第59回年次学術講演会(2004)
- [5] 中村 泰人：建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について 日本建築学会計画系論文集, No.376(1986), pp29-35
- [6] 鄭 梶元, 堀越 哲美, 梅村 茂樹, 宮本 征一, 水谷 章夫：都市の街路空間および開放空間における熱放射環境が人体に及ぼす影響 日本建築学会計画系論文集, No.493(1997), pp77-84
- [7] 若間 賢志, 西岡 真稔, 鍋島 美奈子：高反射性舗装の形成する街路空間の熱環境(その1) 日本建築学会大会学術講演梗概集(2003), pp689-690,
- [8] 上田 淳也, 西岡 真稔, 鍋島 美奈子, 中尾 正喜：高反射性舗装の反射率と表面温度低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2004), pp803-804

(Received June 10, 2006, Accepted July 12, 2006)