

コンクリート舗装のヒートアイランド緩和効果

君島健之^{*1} 大石英夫^{*1} 西岡真稔^{*2} 森山正和^{*3}

*1 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 (〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 7-1-55)

*2 大阪市立大学 大学院工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138)

*3 神戸大学 工学部建設学科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台 1-1)

要旨: 夏季においてヒートアイランド現象による日中の暑熱化や熱帯夜日数の増加が問題となっている。原因として都市部における自然被覆物の減少による潜熱流の低下、都市構造物および舗装からの大気を温める顕熱流の増大、建築物の過密化による顕熱流により温められた大気の滞留などが挙げられる。本研究では、構内試験舗装を施工し熱収支測定および解析による評価を行った。その結果、白色系舗装であるコンクリート舗装は、黒色系舗装であるアスファルト系舗装に対し昼間の路面表面温度が低く、大気を温める顕熱流が小さかった。このことから、コンクリート舗装はヒートアイランド緩和にも効果的であることが推測される。

キーワード: ヒートアイランド、顕熱流、路面表面温度、コンクリート舗装、ポーラスコンクリート舗装、アスファルト舗装

1. はじめに

近年、大都市部においてヒートアイランド現象が顕著である。ヒートアイランド現象とは都市部の気温が郊外の気温に対し島状に高くなる現象であり、これは夏季における日中の暑熱化や熱帯夜日数の増加といった影響をもたらす。原因として、①都市部の自然被覆物（池等の水面や緑地）からの水の蒸発や、葉面の蒸散による潜熱流の減少②自動車や空調からの排熱、都市構造物や道路舗装面の増加に伴う大気を直接加熱する顕熱流の増大③高層建築物の過密化に伴う顕熱流によって温められた大気の滞留（風向や気流の変化）などが挙げられる。ヒートアイランド緩和に対しては様々な取り組みが行われているが、都市面積の約 20% を占める道路舗装もその対象の一つである。

その場合、ヒートアイランド緩和効果に対する検討手法は舗装の路面表面温度の比較で評価することが多いが、その中で福田¹⁾らは舗装表面の熱収支全般につい

て実測・検討を行っている。舗装の熱性能を論じるには、このような熱収支の視点にたった研究成果を蓄積する必要がある。

そこで、本研究ではヒートアイランドの緩和効果は建物の屋上や道路舗装面等の熱収支において大気への顕熱流が小さいものほど効果が大きいとの立場から、道路舗装面における反射特性および熱収支に着目し、アスファルト系舗装およびコンクリート系舗装の中から一般的に施工されている舗装で構内試験施工を実施し、昼間かつ自然状態（降雨がない、すなわち乾燥状態）における舗装の熱特性を考察した。夏季における舗装体表面の放射収支および熱収支を測定・解析し、舗装種別によるヒートアイランド緩和効果について検討したので、その結果について報告する。

Table 1 Outline of pavements

Pavement classification	Outline of pavement
Normal concrete	<ul style="list-style-type: none"> •Name 36 - 8 - 20 N (JIS standardized goods) •Compressive strength 46.1N/mm² (28d)
Porous concrete	<ul style="list-style-type: none"> •Flexural strength 4.69 N/mm² (28d) •Field volume of water permeability 1428cc/15sec
Dense graded asphalt concrete	<ul style="list-style-type: none"> •Maximum aggregate size : 13mm •Straight asphalt
Open graded asphalt concrete	<ul style="list-style-type: none"> •Maximum aggregate size : 13mm •Field volume of water permeability 1232cc/15sec

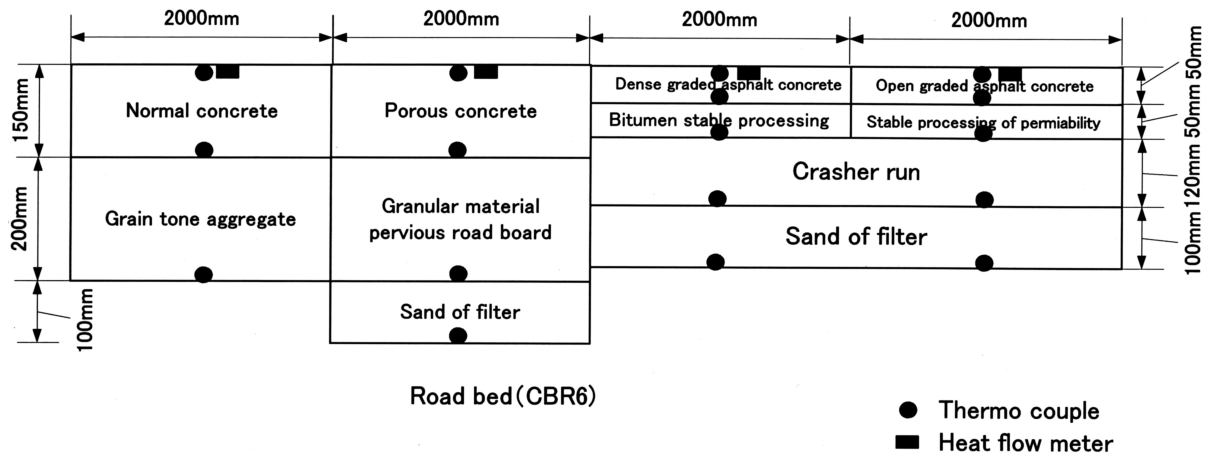


Fig. 1 Sectional view of pavement

2. 実験の概要

2.1 構内試験施工の概要

試験施工は大阪市大正区内において実施した。各舗装の概要を Table 1 に、舗装断面図を Fig.1 に示す。舗装種類として、普通コンクリート舗装（以下、普通コンと称す）、ポーラスコンクリート舗装（以下、ポラコンと称す）、密粒度アスファルト舗装（以下、密粒度アスコンと称す）、排水性アスファルト舗装（以下、排水性アスコンと称す）の 4 種類を施工した。なお、施工面積は 2.0m × 2.0m/ 工区とし、舗装断面構成は軽交通対応とした。

2.2 熱収支測定の概要

測定は 2004 年 8 月および 2005 年 7 月から 9 月に実施した。本測定の主な測定項目および測定方法を Table 2 に示す。舗装体の路面表面温度測定には、T 型熱電対および赤外線温度センサーを用いた。T 型熱電対は、舗装体表面の中央部に熱電対の先端部を樹脂で貼り付けた。なお、熱電対先端部の固定方法については、2005 年の測定で変更を加え、直接日射があたるのを防ぐためアルミテープで固定する方法とした。また、赤外線温度センサーは温度センサー部を舗装体表面から高さ 15cm、水平角度 30°に設置した。赤外線温度センサーは、物体の放射エネルギーを電圧出力に変換しロガーによって温度として読みとる測定機器であり、舗装体の放射率を 1 として測定した。

一方、舗装体内部の温度を測定するため、Fig.1 に示す舗装構成断面の各層および表面より 1cm 下に T 型熱電対を埋設した。また、地中からの伝導熱流を測定するため、舗装体表面中央部から 1cm 下に熱流計を埋設した。

3. 試験結果

3.1 舗装体路面表面温度の測定結果

2004 年および 2005 年の自然状態（乾燥状態）かつ晴天における各舗装体の T 型熱電対による路面表面最高温度測定結果の平均値を Fig.2 に、その時の標準偏差を Fig.3 に示す。普通コンは 2 種類のアスコンに対して約 10 °C、ポラコンも同様に約 4 °C 低い路面表面温度を示した。一方、密粒度アスコンと排水性アスコンの路面表面最高温度を比較した場合、路面表面温度はほぼ同程度であった。

次に、2004 年の路面表面最高温度は、2005 年の路面表面最高温度に対し普通コンで約 3 °C、ポラコン、密粒度アスコンおよび排水性アスコンで約 4 °C 高くなった。また、2005 年の路面表面最高温度および最高気温の平均値を算出した際の標準偏差は、普通コンを除き 2004 年の標準偏差に対し小さくなった。この理由として、

- ① 年毎の測定日、路面表面最高温度および最高気温に達する測定時刻の日射量の違いが大きく影響しており、特に 2004 年に測定した路面表面温度は、日射

Table 2 Measurement items and measurement instrument

Measurement items		Measuring instrument
①	Surface temperature	Thermo couple Infrared temperature sensor
	Subterranean temperature	Thermo couple
②	Net radiation and albedo	Net radiation meter
③	Conduction heat flux	Heat flow meter

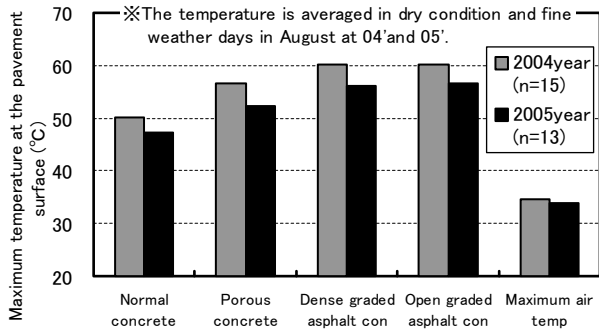


Fig. 2 Maximum temperature at the pavement surface

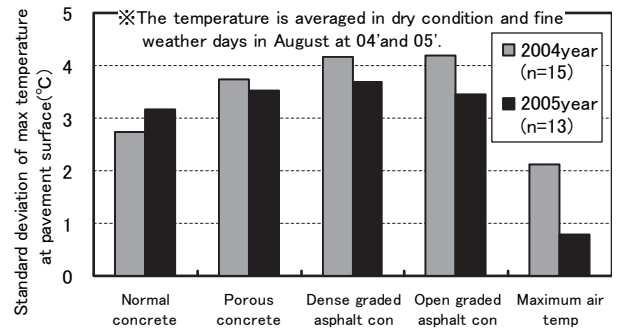


Fig. 3 Standard deviation of maximum temperature at the pavement surface

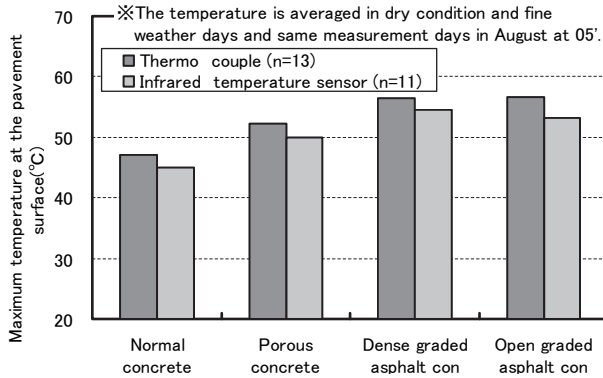


Fig. 4 Difference in the measuring method of maximum temperature at the pavement surface

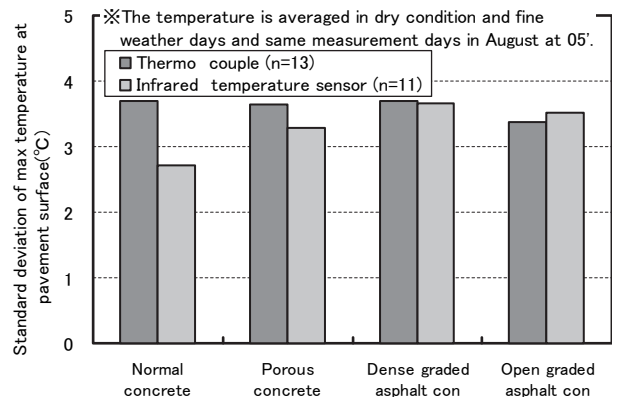


Fig. 5 Standard deviation of maximum temperature by difference in the measuring method at the pavement surface

により貼り付けた T 型熱電対自体の温度上昇分が測定値に影響していた。

- ② 2005 年測定時は、日射による T 型熱電対先端部自体の温度上昇によるバラツキが生じる可能性があると考えられたため、T 型熱電対の先端部をアルミテープで覆った。

その結果、普通コンを除いた路面表面温度測定値のバラツキが小さくなったものと考えられる。

次に、2005 年の自然状態（乾燥状態）かつ晴天日であり、同じ測定日における各舗装体の赤外線温度センサーおよび T 型熱電対による路面表面最高温度測定結果の平均値を Fig. 4 に、その時の標準偏差を Fig. 5 に示す。

その結果、T 型熱電対測定温度は赤外線温度センサー測定温度に対し、舗装種別に関係なく約 2 ~ 3 °C 高い値となった。また、路面表面温度の標準偏差は、ほぼ同程度か T 型熱電対が大きかった。この理由として、T 型熱電対は舗装体表面の接触部の一点のみで温度を計測しているのに対し、赤外線温度センサーは路面表面の凹凸を含む長軸半径 23.5cm、短軸半径 8.7cm のだ円内部の平均温度を捕らえているために、両者に違いが生じたと考えられる。しかしながら、2 種類のアスコンに対する路面表面温度差は T 型熱電対で測定した場合とほぼ同様の傾向が認められ、普通コンで約 10 °C、ポラコンで約 4 ~ 5 °C 低い温度を示した。

次に、2005 年 8 月に測定した各舗装体の赤外線温度センサーによる路面表面温度の推移を Fig. 6 に示す。0:

00 ~ 7:00 頃まで、2 種類のアスコンは普通コンとほぼ同様の温度推移を示すが、8:00 ~ 10:00 頃にかけて 2 種類のアスコンは、日射量の増加に伴い路面表面温度が急激に上昇した。一方、普通コンは 8:00 頃から路面表面温度が上昇し始めるが、緩やかな上昇傾向を示した。また、翌日 0:00 ~ 5:00 頃といった夜間では、各舗装体の路面表面温度は気温とほぼ同程度まで低下した。

3.2 舗装体のアルベド（日射反射率）

自然状態（乾燥状態）での各舗装体におけるアルベド測定結果を Fig. 7 に示す。「アルベド」とは長短波放射計により天空からの日射量（下向き短波）および舗装面による反射日射量（上向き短波）を測定し、反射日射量

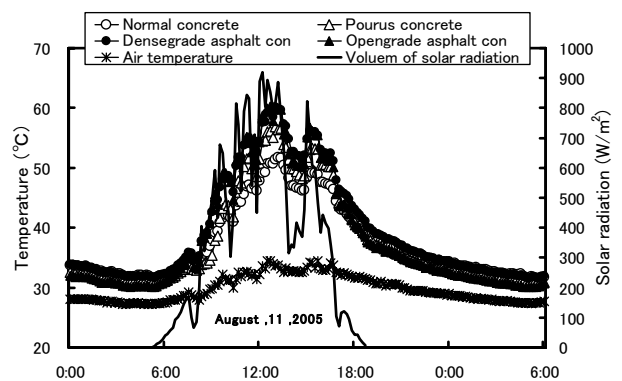


Fig. 6 Temperature at the pavement surface (2005 year)

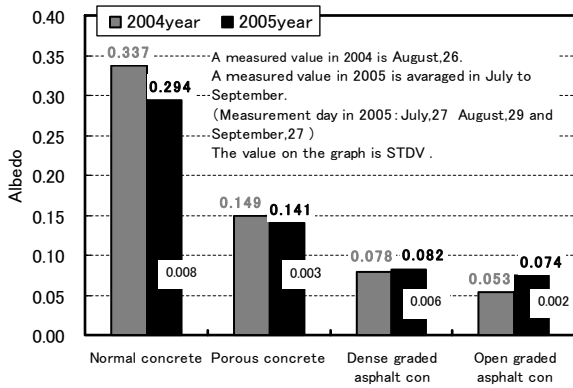


Fig. 7 Albedo at the pavement surface

を日射量で除した値である。白色系であるコンクリート系舗装のうち、普通コンのアルベドは黒色系である2種類のアスコンのアルベドに対して約4~7倍、ポラコンは約2~3倍の値を示した。

また、アルベドの経年変化は普通コンが0.05程度小さくなり、排水性アスコンでは0.03程度大きくなった。この理由として、普通コンは路面表面に付着した汚れによるもの、排水性アスコンは路面表面のアスファルトが紫外線劣化により路面表面が白っぽくなったためと考えられる。

次に、2004年と2005年における各舗装体の自然状態(乾燥状態)のアルベドと、T型熱電対による路面表面最高温度(平均値)との関係についてFig.8に示す。アルベドが大きくなるに従い、路面最高温度は低くなる傾向が認められた。本測定で得られた両者の関係式について2004年を式[1]に、2005年を式[2]に示す。

$$T_{smax} = -36.3 \times a + 62.1 \quad [1]$$

$$T_{smax} = -41.4 \times a + 59.2 \quad [2]$$

ここに T_{smax} : 路面表面最高温度(°C)
 a : アルベド(-)

3.3 舗装体表層部の熱特性

(1) 表層部分の材料の熱伝導率

舗装体表面あるいは地表面における地中伝導熱流量Gは、式[3]のように示される。

$$G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \lambda \frac{T_s - T_z}{\Delta z} \quad [3]$$

ここに λ : 熱伝導率(W/m·K)
 T_z : 深さ ΔZ (m)の地中温度(K)
 T_s : 路面表面温度(K)

本研究では、式[3]による左辺(熱流計の測定値)を縦軸に、右辺を路面表面温度 T_s と舗装体表層の下部温度 T_z の温度差を舗装体表層深さ ΔZ (普通コンおよび

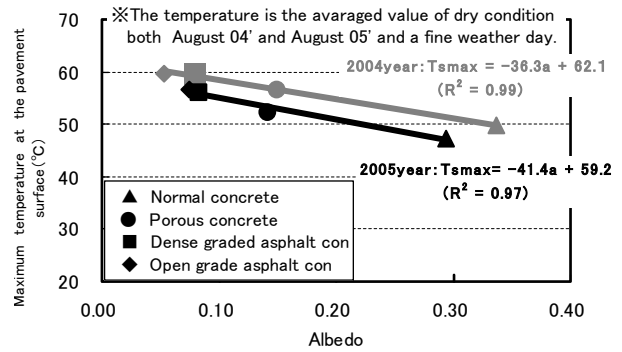


Fig. 8 Relation between the albedo and maximum temperature at the pavement surface

ポラコン:15cm、密粒度アスコンおよび排水性アスコン:5cm)で除したものを横軸にとり、その回帰線の傾きを求め、これを舗装体表層の熱伝導率とした。

(2) 表層部分の材料の熱容量

一次元非定常熱伝導方程式(式[4])は差分化すると式[5]のようになる。

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad [4]$$

$$\lambda \frac{1}{\frac{\Delta z_1}{2} + \frac{\Delta z_2}{2}} \left(\frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta z_1} - \frac{T_m - T_{m+1}}{\Delta z_2} \right) = C \frac{(T_m - T_m^*)}{\Delta t} \quad [5]$$

ここに C : 熱容量(J/m³·K)
 T_m^* : T_m より Δt (=600(S))前の温度
 $\Delta z_1, \Delta z_2$: それぞれ T_{m-1} と T_m 、 T_m と T_{m+1} の距離

本研究では式[5]の左辺において路面表面温度を T_0 、表面より深さ1cm下の温度を T_1 、舗装体表層下部 Δz (普通コンおよびポラコン:15cm、密粒度アスコンおよび排水性アスコン:5cm)の温度を T_2 とし、時間間隔 Δt (=600(S))毎の各温度を式[5]に代入し算出したものに3.3(1)で求めた λ を乗じたものを縦軸とした。また、同様に時間間隔 Δt (=600(S))経過時より以前の温度 T_m^* と現在の温度 T_m との差を時間間隔 Δt (=600(S))で除したもの(C以外の項)を横軸にとり、その回帰線の傾きとして求め、これを舗装体表層の熱容量とした。普通コンの熱伝導率の推定図をFig.9に、熱容量の推定図をFig.10に示す。求められた普通コンの熱伝導率は2.4(W/m·K)、熱容量は5.8(MJ/m³·K)であった。

Table 3 Thermal conductivity and heat capacity of pavements (presumed value)

Pavements	Normal concrete	Porous concrete	Dense graded asphalt con	Open graded asphalt con
Measurement items				
Thermal conductivity (W/m·K)	2.4	1.3	1.2	1.1
Heat capacity (MJ/m ³ ·K)	5.8	0.8	6.6	0.5

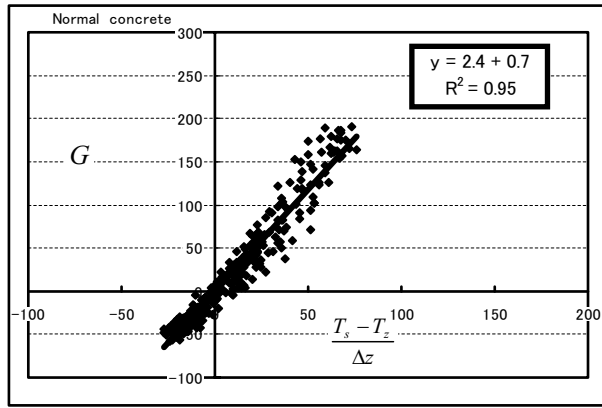


Fig. 9 Presumption of thermal conductivity (Normal concrete)

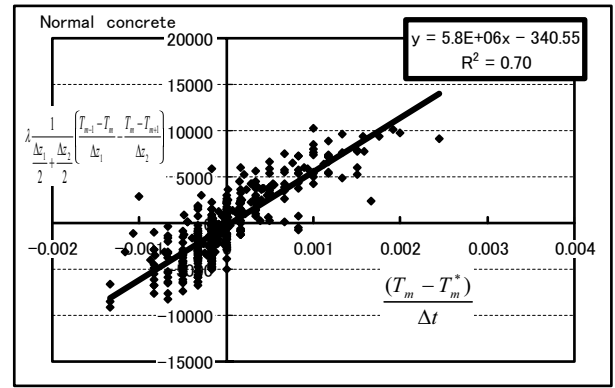


Fig. 10 Presumption of heat capacity (Normal concrete)

その他の舗装体の同じ計算方法で求めた熱特性を Table 3 に示す。

4. 舗装体表面の熱収支解析

4.1 舗装体表面の放射収支・熱収支

舗装体表面あるいは地表面における放射収支は式[6]のように示される。^{2,3)}

$$Rn = (1 - a)S\downarrow + L\downarrow - \varepsilon\sigma T_s^4 \quad [6]$$

- ここに Rn : 正味放射量 (W/m^2)
- $S\downarrow$: 日射量 (W/m^2)
- $L\downarrow$: 下向き赤外放射量 (W/m^2)
- ε : 放射率 (-)
- σ : ステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)
- T_s : 舗装体の路面表面温度 (K)

舗装体表面の熱収支について Fig. 11 に示す。このように、舗装体表面あるいは地表面における熱収支は式[7]のように示される。

$$Rn = H + IE + G \quad [7]$$

- ここに H : 顕熱流量 (W/m^2)
- IE : 潜熱流量 (W/m^2)
- G : 地中伝導熱流量 (W/m^2)

また、顕熱流量 H は式[8]のように示される。

$$H = \alpha_c(T_s - T_a) \quad [8]$$

- ここに α_c : 対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- T_a : 気温 (K)

4.2 熱収支解析の概要

熱収支解析の方法として、佐野ら⁴⁾は顕熱流を残差

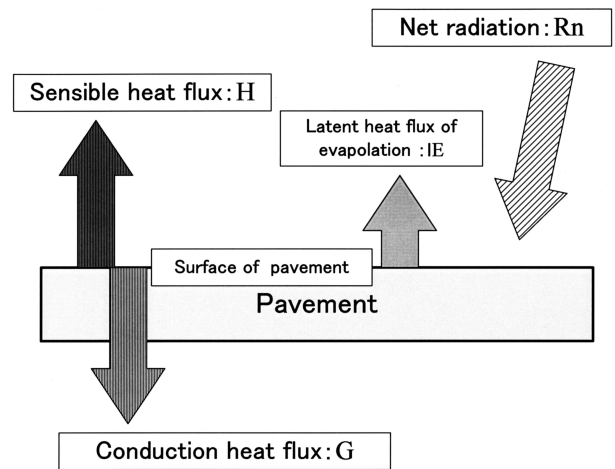


Fig. 11 Heat balance at the pavement surface

で求める方法、対流熱伝達率を未知とする方法、路面表面温度を未知とする方法を提案している。本解析では、路面表面温度 T_s を未知とした方法で行った。

なお、測定は舗装体表面の熱収支を自然状態(乾燥状態)において比較しているため、水の蒸発潜熱はないもの ($IE = 0$) とし解析を行った。

① 路面表面温度 T_s を求めるため式[9]を用いた。

このとき Rn および T_a は実測値、 λ および C は Table 3 に示した値、 α_c は風速の実測値よりユルゲスの式(式[10]および式[11])より求めたものを用いた。

$$T_s = \frac{Rn - IE + \alpha_c \cdot T_a + \frac{\lambda}{\Delta z} \cdot T_z}{\alpha_c + \frac{\lambda}{\Delta z}} \quad [9]$$

- ここに Δz : 舗装体表面からの距離 (m)
- T_z : 表面から Zm の地中温度 (K)

$$\alpha_c = 6.1 + 4.2U \quad (U \leq 5) \quad [10]$$

$$\alpha_c = 7.5U^{0.78} \quad (U \geq 5) \quad [11]$$

- ここに U : 風速 (m/s)

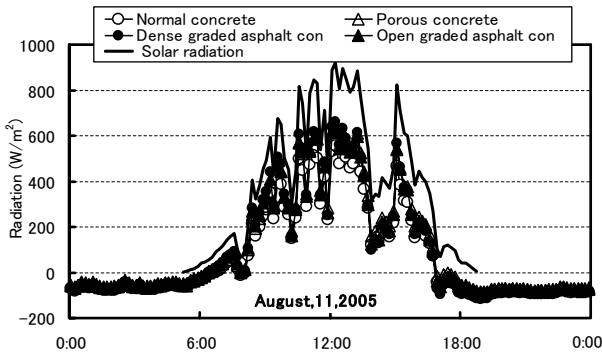


Fig. 12 Net radiation at the pavement surface

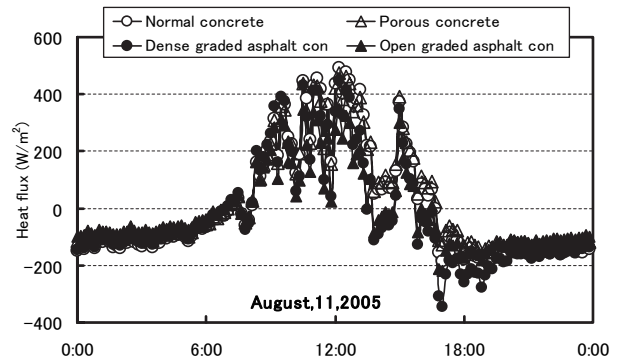


Fig. 13 Conduction heat flux from the pavement surface to ground

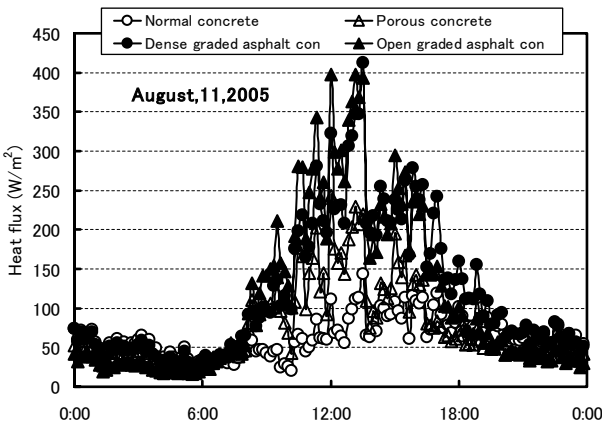


Fig. 14 Sensible heat flux at the pavement surface

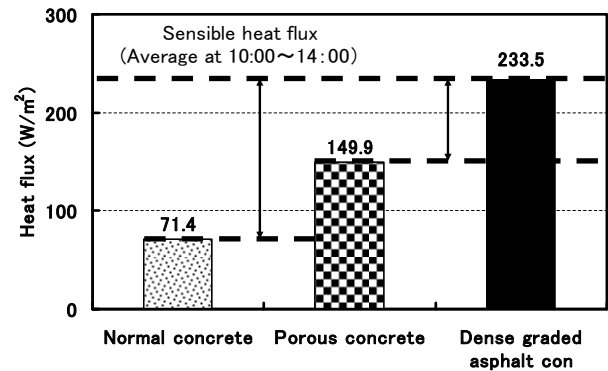


Fig. 15 Average of sensible heat flux at the pavement surface

② 式[5]と式[9]を連立させて T_s を求めた。

式[5]の下層境界条件には、普通コンおよびポラコンには地中 15cm、密粒度アスコンおよび排水性アスコンには 5cm の測定結果を与えた。

③ 式[3]、式[6]、式[8]に T_s を代入し、正味放射量 R_n 、伝導熱流量 G 、顕熱流量 H を求めた。

4.3 熱収支解析結果

(1) 正味放射量

舗装体表面における正味放射量の推移を Fig. 12 に示す。舗装種別に関わらず、正味放射量は日射量に追従して変動していた。

(2) 地中伝導熱流量

舗装体表面における地中伝導熱流量の推移を Fig. 13 に示す。舗装種類に関係なく、ほぼ同様の推移を示した。

(3) 顕熱流量

舗装体表面における顕熱流量の推移を Fig. 14 に、10:00 ~ 14:00 における密粒度アスコンに対する普通コン、ポラコンの平均値の比較を Fig. 15 に示す。4.2 で述べたが、本実験は自然状態で行っているため、蒸発潜熱はないもの ($IE = 0$) とした。

2 種類のアスコンの推移に対し、普通コンの推移はほぼ日中を通じて下回っていた。また、密粒度アスコンと普通コンおよびポラコンの平均値の差は、普通コンで 160W/m^2 程度、ポラコンで 80W/m^2 程度小さくなった。この理由として、白色系舗装であるコンクリート系舗装のアルベドが、アスファルト系舗装のそれに比較して大

きいためであると考えられる。

5. まとめ

以上の測定結果および熱収支計算結果から、次のような知見が得られた。

- (1) 自然状態（乾燥状態）における各舗装の路面表面最高温度を比較すると、2 種類のアスコンよりポラコンの最高温度は約 4°C 、普通コンの最高温度は約 10°C 低くなった。
- (2) 舗装体のアルベドが大きくなるに従い、路面表面最高温度は低くなる傾向を示した。また、1 年経過後のアルベドにおいて、コンクリート系舗装は低下傾向、アスファルト系舗装は増加傾向にあった。
- (3) 顕熱流量の推移において、2 種類のアスコンに対し、普通コンはほぼ日中を通じて下回っていた。また、各舗装体の顕熱流量の 10:00 ~ 14:00 における密粒度アスコンに対する普通コン、ポラコンの平均値の比較において、密粒度アスコンの平均値に対し、普通コンで 160W/m^2 程度、ポラコンで 80W/m^2 程度小さくなった。この理由として、コンクリート系舗装はアスファルト系舗装に対し、アルベドが大きかったことによるものと考えられる。

よって、コンクリート系舗装はヒートアイランドの緩和に対して効果的であると推測される。

謝辞：

本研究に際し、神戸大学竹林英樹助手、当時同大学佐野公俊院生、大阪市立大学大学院鍋島美奈子講師に御指導ならびに御協力頂きましたことに対し、ここに謝意を表します。

参考文献：

- 1) 福田萬大ほか：夏季自然状態での各種舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 571/V-36, pp.149-158 (1997)
- 2) 森山正和ほか：ヒートアイランドの対策と技術、学芸出版社、pp.88-111 (2004)
- 3) 佐野公俊ほか：環境配慮型道路舗装面の熱収支に関する研究（その2）熱収支の考察、2005年度建築学会大会（近畿）学術講演梗概集 D-1、pp.643-644 (2005)
- 4) 佐野公俊ほか：環境配慮型舗装の熱収支解析とそれによるヒートアイランド緩和効果に関する研究、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集、pp.199-202 (2006)

THE HEAT ISLAND RELIEF EFFECT OF CONCRETE PAVEMENT

Takeyuki KIMIJIMA^{*1}, Hideo OOISHI^{*1}, Masatoshi NISHIOKA^{*2} and Masakazu MORIYAMA^{*3}

*1 SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd. Cement/Concrete Research Laboratory
(7-1-55, Minamiokajima, Taisyō-ku, Osaka-shi, Osaka 551-0021, Japan)

*2 OSAKA CITY UNIVERCITY, Graduate School of Engineering, Department of environmental urban engineering (3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka 558-8585, Japan)

*3 KOBE UNIVERCITY, Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering (1-1, Rokkoudai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyōgo 657-8501, Japan)

ABSTRACT : The increase of air temperature rise in the daytime and the tropical night number of days by the heat island phenomenon are a problem in summer season. The causes that a heat island phenomenon is caused are a decline of a latent heat flux by the decrease of a natural covering thing in an urban region, a sensible heat flux increase that warms the atmosphere from a city structure and a pavement surface in the urban region, and stopping of the atmosphere that was warmed by the sensible heat flux by the concentration of the structures and the buildings in the urban region. We executed the testing pavement of various kinds in a yard and we carried out estimating by heat balance of the measurement and the analysis at the testing pavements, in this research. As the result, the temperature at the pavement surface of the concrete that is white color in the daytime was low to the temperature at the pavement surface of the asphalt system pavement that is black color, and the sensible heat flux of the concrete pavement was small. From these results, it is conjectured that the concrete pavement is effective in mitigating of the heat island phenomenon.

KEY WORDS : Heat island, Sensible heat flux, Road surface temperature, Pavement of concrete, Pavement of Porous concrete, Pavement of asphalt