

32. 廃瓦を用いた透水性舗装の温熱特性について

Heat characteristics of permeable pavement using wasted roof tiles

米田 稔*, 森澤眞輔*, 安河内健**, 新井貴史***

Minoru YONEDA, Shinsuke MORISAWA, Ken YASUKOCHI, Takashi ARAI

ABSTRACT; Heat characteristics of permeable pavement using wasted roof tiles were measured to show its efficiency as measures for heat island phenomenon. Results of laboratory experiments showed that roof tile pavement made of crushed roof tiles was supposed to have enough permeability and water retentivity. Field monitoring of temperature and water content was executed at test area of roof tile pavement being compared to neighboring asphalt pavement. The results showed that daily maximum temperature of the surface of roof tile pavement at high solar insolation in the summer was lower than that of asphalt pavement in spite of its lower heat capacity and heat conductivity compared to those of asphalt pavement. This phenomenon could be explained by the effect of latent heat flux from the water retentive roof tile pavement. It was supposed to be necessary to simulate heat flux and water flux simultaneously in the matrix of roof tile pavement to evaluate its efficiency as measures for heat island phenomenon quantitatively.

KEYWORDS; heat island, permeable pavement, water retention ability, roof tile, recycle

1 はじめに

ヒートアイランドに対して考えられる対策として人工排熱の低減、地表面被覆の改善、都市形態の改善、ライフスタイルの改善等が挙げられる。地表面被覆の改善としては舗装材料・構造の改善が図られてきている。1994年頃から保水性インターロッキングブロック舗装、1998年頃からアスファルト舗装系保水性舗装、2002年頃からは塗布型遮熱性舗装が温度低減型舗装として開発が行われてきた。保水性舗装は水を吸収することで一般的な舗装に比べ10～25℃程度の温度低減効果が確認され、塗布型舗装も10℃程度の表面温度低減が確認されている¹⁾。しかし、どちらも全体的にコストが割高であることが課題としてあげられている。一方、現在産業廃棄物として廃棄されている瓦は、もともと粘土を焼結したものであるため、瓦破碎粒子自体が保水性を持っていると考えられる。よって瓦破碎材を温度低減型舗装として用いることができれば、破碎する以外は特に加工する必要のない廃瓦は従来の温度低減型舗装よりもコストを抑えることが可能であると考えられる。そこで本研究では、瓦破碎材の基本的物理特性を測定するとともに、建設廃棄物として発生する瓦のリサイクル方法の一つとして、瓦破碎材を透水性舗装に利用した場合の温熱特性について報告する。

2 瓦破碎材の基本的物理特性

2. 1 水分特性曲線

砂柱法と遠心法により求めた、瓦破碎材の水分特性曲線の例を図1に示す。ここで用いた瓦破碎材の粒径

*京都大学工学研究科都市環境工学専攻 Urban & Environ. Eng., Kyoto Univ., Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 6068501 Japan, **神鋼環境ソリューション Kobelco Eco-solutions Co., LTD.

*** (株) 國陽 Kokuyo Corp.

は1～2mmであり、後述する瓦舗装に用いた瓦破砕材製の瓦ブロック製作に用いた粒子よりは粒径は小さいが、瓦ブロックは比較的小粒径の粒子も含んでいるため、空隙の大きさについては大きな差は無いと考えている。測定結果より、この粒径においては含水率のヒステリシスはほとんど観測されなかった。図1よりポテンシャルの低下に伴い急激に体積含水率が減少するが、重力水が除去されたときの含水量とされるpF1.8においても14%ほどの体積含水率を維持していることがわかる。このことは透水性が良いためポテンシャルの減少に伴い急激に体積含水率が減少するが、写真1に示すように、瓦粒子自体が数ミクロンオーダーの小さな空隙を多数有して

いるため、ある程度の水分は保持し続けるという、瓦破砕材の特性を表している。pF1.8のときの三相分布は気相：固相：液層=51:15:34、比重は1.1であった。

2. 2 透水性

飽和透水係数を定水位法で測定すると、粒径1mm以下で $2.1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、粒径1～2mmで $3.1 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ であった。不飽和透水係数は圧力制御法と水分分布法を用いて測定した。瓦破砕材（粒径1～2mm）の不飽和透水係数測定結果を図2に示す。図2より、含水率0.4程度でも大きな透水性を維持していることがわかる。これらのことより、この粒径の瓦破砕材は透水性が高く、降雨の浸透なども速やかに行われると推定される。

2. 3 熱伝導特性と熱容量

粒径1mm以下と1～2mmの瓦破砕材について、熱特性センサー（REBS, CPR-TP01）を用いて測定した、熱伝導率及び熱容量と含水率との関係を図3、図4にそれぞれ示す。熱伝導率、熱容量、ともに含水率とともに増加する傾向を示している。ともに粒径の小さい方が値が大きくなっているのは、粒径の小さい方が固相率が高いためと考えられる。一般的なアスファルト舗装の熱伝導率は1.1～1.5²⁾、熱容量は1.4³⁾あるいは2.0⁴⁾程度であるから、例えば重力排水状態での瓦破砕材はアスファルトに比べると熱伝導率が低く、また熱容量も小さい。このため、瓦破砕材を路盤面に使用した場合、潜熱効果を見無視すると、アルベドが同じならば、アスファルトに比べ、夏季の昼間などは急激に路盤面温度が上昇することになる。

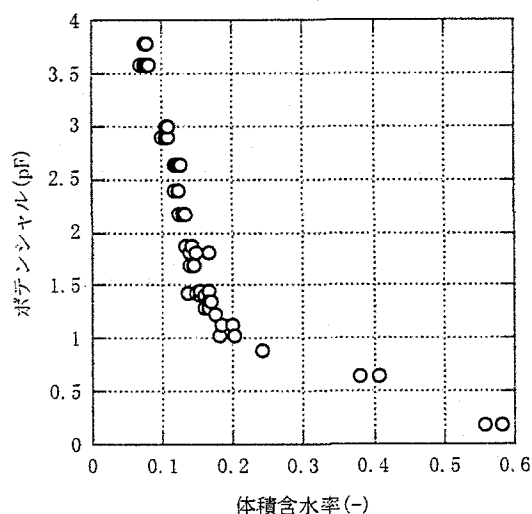


図1 瓦破砕材（粒径1～2mm）での含水率とポテンシャルの関係

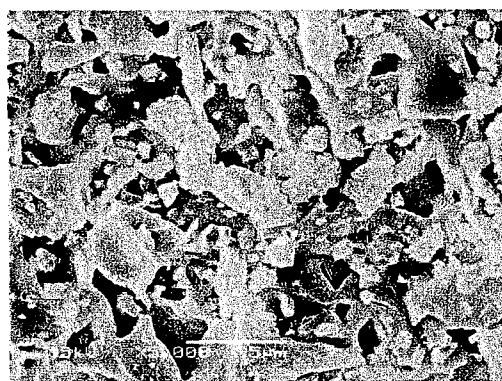


写真1 瓦表面部の走査電子顕微鏡写真

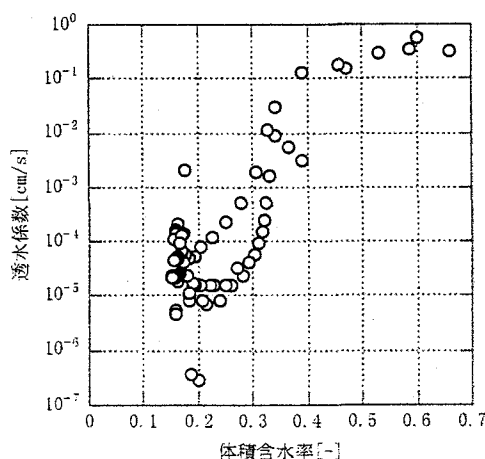


図2 瓦破砕材（粒径1～2mm）での不飽和透水係数

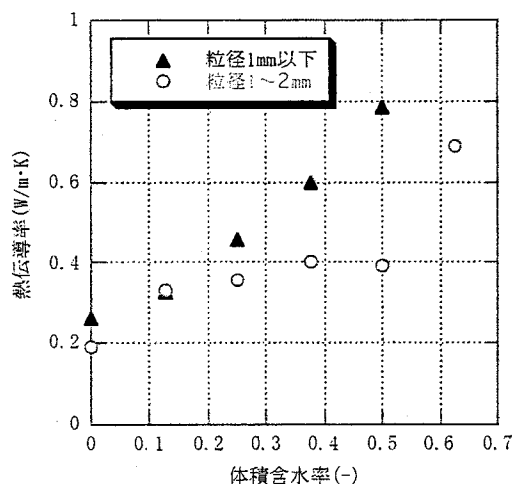


図3 瓦破砕材（粒径1~2mm）の熱伝導率と含水率の関係

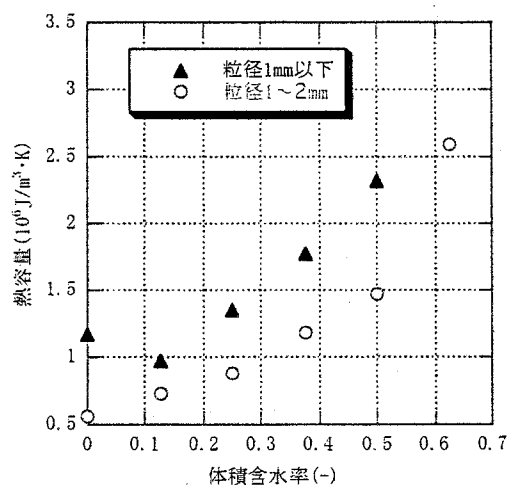


図4 瓦破砕材（粒径1~2mm）の熱容量と含水率の関係

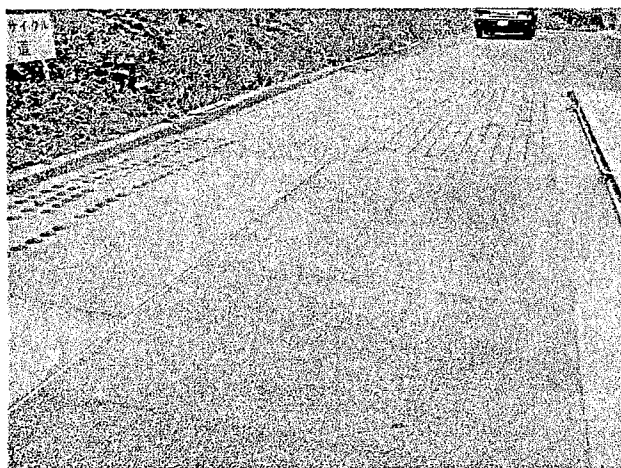


写真2 瓦舗装の試験施工場所の様子

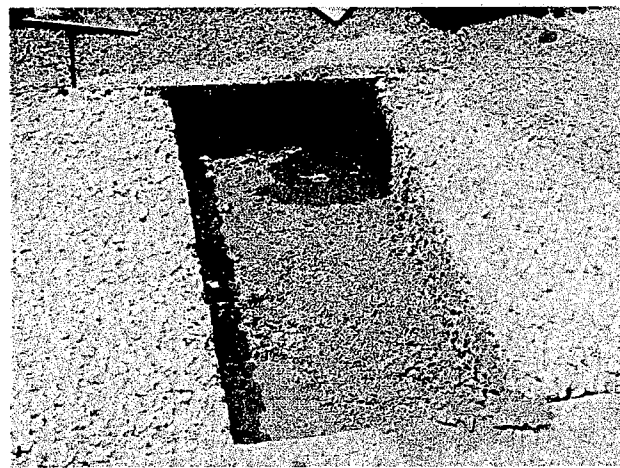


写真3 最上部の瓦ブロックをはずした様子

3 フィールド実験

3.1 試験条件

京都市南部の屋外で、瓦破砕材を用いて試験的に施工されたフィールドにおいて、隣接するアスファルト舗装面との温熱環境の比較を行った。瓦による舗装面は厚さ6cmの瓦破砕材（主に粒径2mm~5mm）をセメント固化して作成したブロックの層の下部に、小粒径（1mm以下）の瓦破砕材からなる17cmの層があり、その下には透水性のあまり良くない土壌地盤層がある。隣接するアスファルト舗装は、同様の土壌地盤層の上に直接厚さ10cmのアスファルト舗装を施工したものである。試験地の様子を写真2、3に示す。瓦舗装とアスファルト舗装それぞれに対し、図5に示すように温度センサー、含水率計を埋設し舗装材内部温度、含水率変化を測定した。合わせて放射収支計、アルベドメーターを用いて正味放射量、および舗装面アルベドの測定を行った。放射収支計、アルベドメーターによる測定は午前10時から午後5時にかけて行った。日照デー

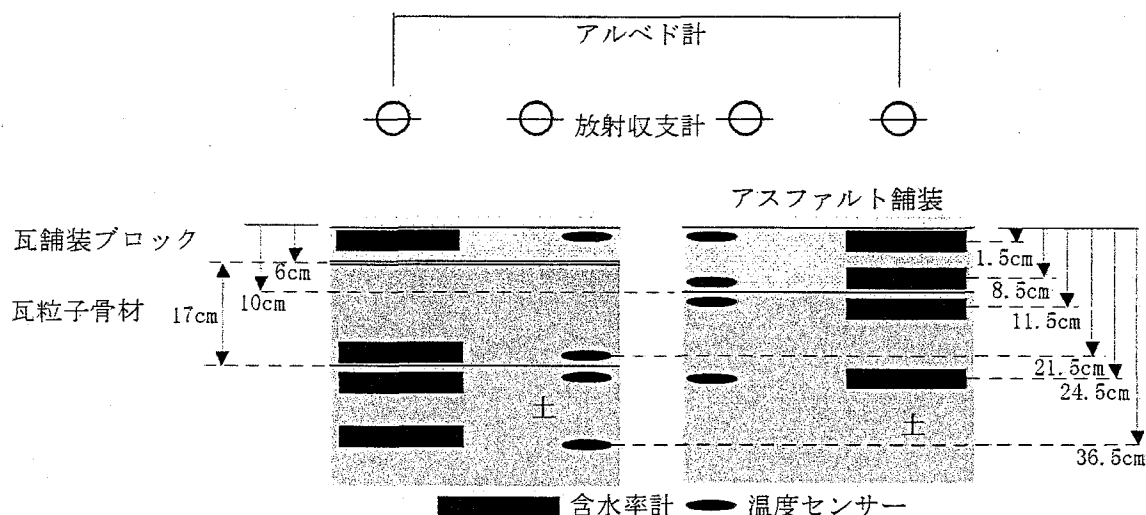


図5 舗装と装置設置状態 (左：瓦舗装、右：アスファルト舗装)

タなどの気象データについては、試験地に隣接する京都大学防災研究所宇治川水理実験所より提供を受けた。測定期間は2004年8月～10月（温度のみ11月まで）である。測定に用いた機器名を表1に示す。

表1 使用測定機器

測定項目	測定装置
地中温度	Decagon Devices Inc. ECHO Temp
気温・湿度	T&D Corp. おんどとりRH TR-725
含水率	Decagon Devices Inc. EC-20
アルベド	英弘精機アルベドメーター MR-22
正味放射量	放射収支計 REBS. CPR-Q7

3. 2 測定結果および考察

瓦舗装表面、及びアスファルト舗装表面についてのアルベド測定結果を図6に示す。アルベド測定は晴天日の乾いた舗装面上で行った。瓦舗装に用いた瓦破砕材が黒色粘土瓦を用いたものであったこと、またアスファルト舗装の表面も少し白っぽく汚れていたこともあり、アルベドの大きさに大きな差はなく、若干瓦舗装の方が大きい程度であった。よって日射エネルギーの吸収率はさほど変わらないものと思われる。

2004年8月10日～13日の瓦舗装及びアスファルト舗装の温度変化を図7に示す。また同時刻の瓦舗装、及びアスファルト舗装の含水率変化を図8に示す。（アスファルト舗装は排水性舗装であるとして含水率0とみなした。）2. 3の瓦破砕材を用いた実験結果では、瓦破砕材の方がアスファルトよりも熱伝導率が小さいという実験結果を得ていた。図7の結果からもアスファルト舗装の方が瓦舗装よりも下部に熱が伝わりやすいことが推定されるが、各層の厚さが同じではないので、単純な比較はできない。瓦舗装とアスファルト舗装とで表面温度を比較すると、測定期間中の最高温度でアスファルト舗装表

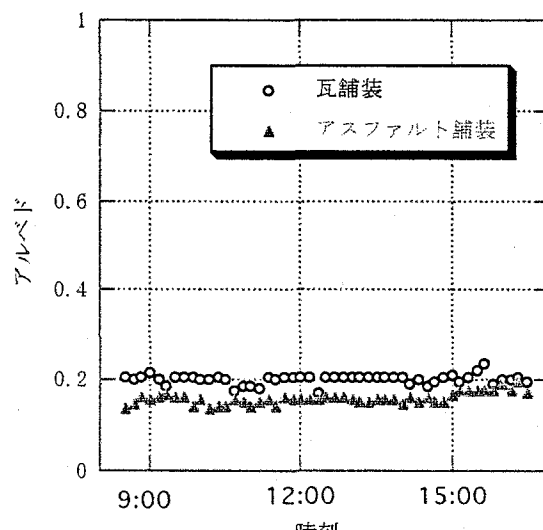


図6 瓦舗装とアスファルト舗装のアルベド

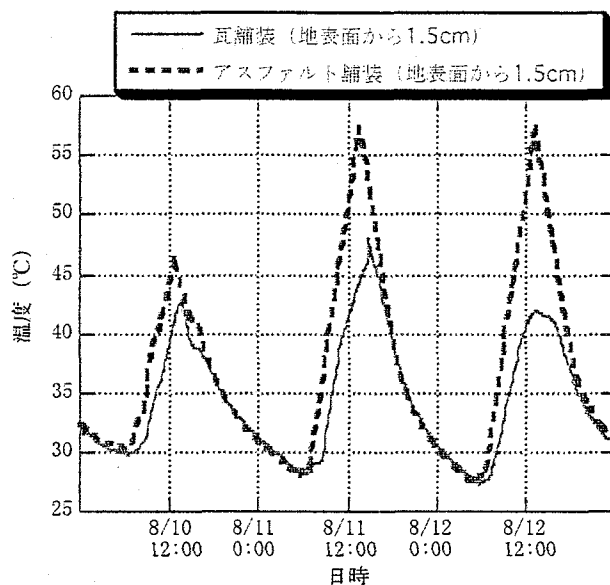


図 7 (a) 瓦舗装とアスファルト舗装
の温度比較 (地表面下 1.5cm)

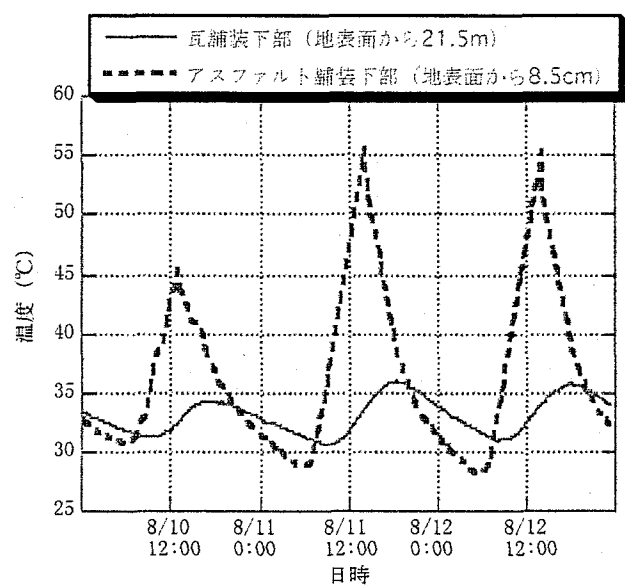


図 7 (b) 瓦舗装とアスファルト舗装
の温度比較 (各舗装下部)

面温度より瓦舗装表面温度の方が最大で15℃程度低かった(図7)。図9は日射量と舗装表面(地表面下1.5cm)の日最高温度の関係を示したものであり、日射量が大きいくほど、この傾向が強いことがわかる。図8に示すように瓦舗装上部の含水率が小さいことから、2・3に示した瓦破砕材での測定結果を考慮すると、瓦舗装の方がアスファルト舗装よりも熱容量と熱伝導率が小さいと推定され、よって、瓦舗装とアスファルト舗装とで日射エネルギーの吸収量に大きな差がないとすると、表面温度は瓦舗装の方が高くなるはずである。図7や図9に示すように今回の測定データにおいて瓦舗装の方が表面温度の上昇が抑えられた理由としては、保水性舗装によく言われる潜熱効果による表面温度上昇の抑制が考えられる。しかし、図8に示すように瓦舗装最上部の含水率の値自体には大きな変化は見られず、瓦舗装下部の含水率が若干の低下傾向を示している。これは表面からの蒸発にともない、より深部から水分が供給され続けている可能性を示してると考えられる。また、瓦舗装の場合、瓦ブロック層と瓦骨材層を合わせると、層厚はアスファルト舗装の2倍となることから、特に瓦舗装下部が水分を多く含むために熱容量が増加し、温度が上昇しにくくなっている可能性も考えられる。温度のみから判断すると、瓦舗装の下部の温度はアスファルト舗装下部のように温度が上昇せず熱を貯めにくく、熱の放射による周囲の温度上昇が少ない。逆にアスファルトは熱を地下に伝えやすい、夜間の放射によってヒートアイランド現象に大きく寄与するのではないかと考えられる。しかし、水分の移動量と蒸発量、含水率の変化に伴う熱容量の変化も考慮せねばならず、瓦舗装のヒートアイランド対策における有効性については、熱・水分同時移動のモデルに基づくシミュレーションにより、きちんとした評価をする必要があると考えられる。

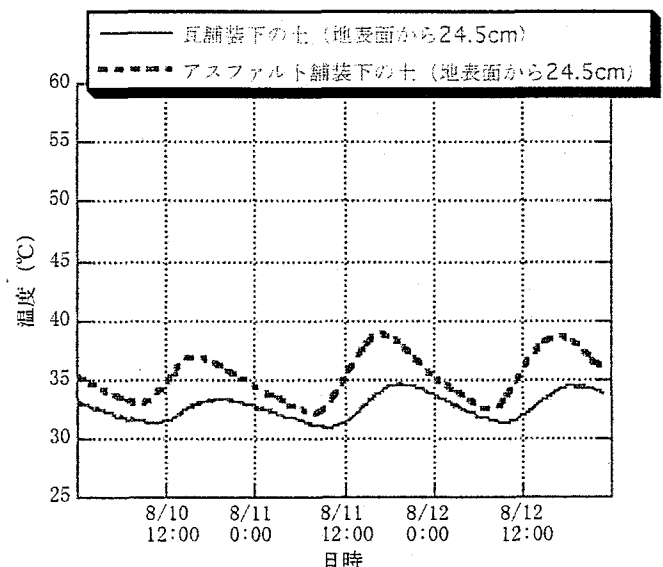


図 7 (c) 瓦舗装とアスファルト舗装
の温度比較 (地表面下 25cm)

なお、図10は2004年11月21日～28日の瓦舗装及びアスファルト舗装の温度変化である。図10では気温が低下してくると、逆に瓦舗装の方がアスファルト舗装よりも最低温度が高くなる傾向を示している。このことは瓦舗装のような保水性舗装は、冬季の表面温度低下抑制にも効果があることを示している。この原因としては、水蒸気の凝固による潜熱の放出が機能している可能性も考えられ、やはり熱・水分移動モデルを用いた、きちんとした評価が必要であると考えられる。

4. 結論

瓦のリサイクルを兼ねて、瓦破砕材を用いて透水性舗装（保水性舗装）を施工した場合の、ヒートアイランド対策への有効性を確認するため、アスファルト舗装と比較しての瓦舗装の温熱特性を測定した。その結果、1～2mmほどの粒径の瓦破砕材を用いた場合、十分な透水性と保水性を期待できること、また、熱伝導率と熱容量は、通常はアスファルト舗装に比べると小さいこと、実際に瓦破砕材を用いた試験舗装現場での測定結果より、夏季、特に日射量の多い時には、瓦舗装の方がアスファルト舗装に比べて最高温度が抑制される可能性のあること、そのメカニズムには潜熱が大きく関与していると考えられることが明らかとなった。

謝辞

本研究で使用した日照データなどの気象データについては、試験地に隣接する京都大学防災研究所宇治川水理実験所より提供を受けた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所(http://www.pwri.go.jp/jpn/news/20041222/07_kankyou-hosou.pdf)
- 2) 国立天文台, 1999: 理化年表, 丸善, p.1058
- 3) 近藤純正, 1994: 水環境の気象学, 朝倉書店, p.348
- 4) 日本機械学会編, 1966: 伝熱工学資料, 日本機械学会, p.258

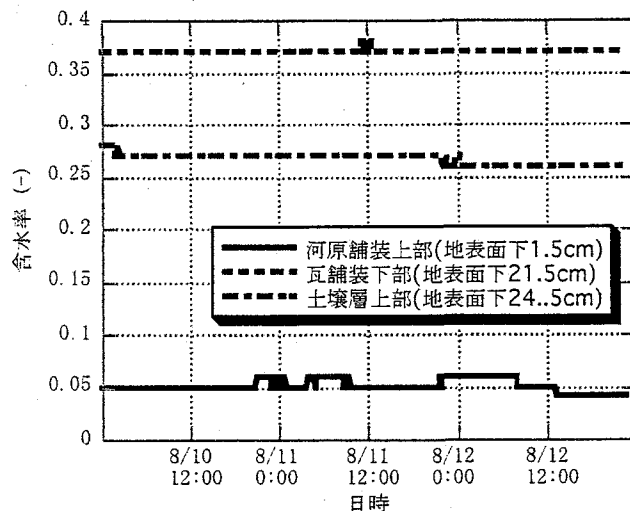


図8 瓦舗装下の含水率変化

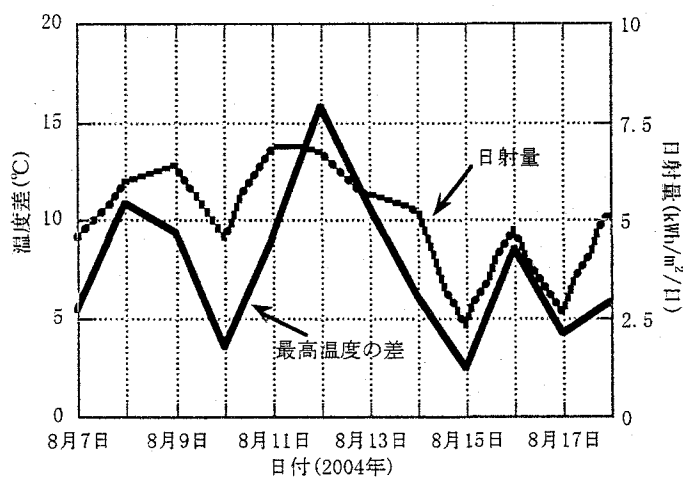


図9 瓦舗装面とアスファルト舗装面の日最高温度の差と日射量の関係

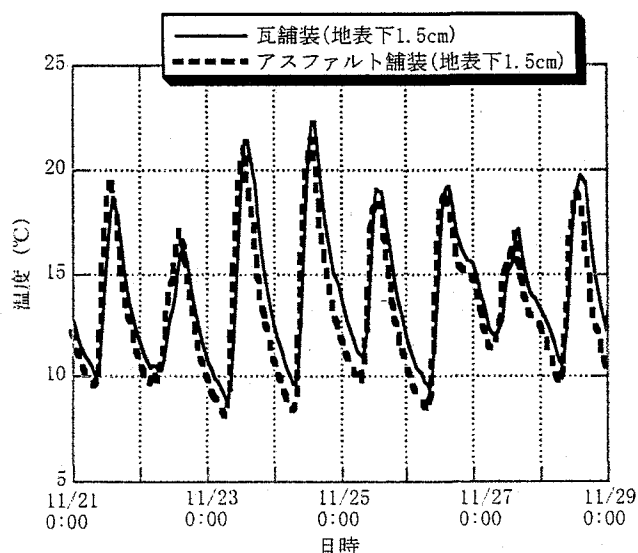


図10 寒冷期における瓦舗装とアスファルト舗装の温度比較(地表面下1.5cm)