

## 透水性舗装による都市の熱環境改善効果の研究

### Study on the Effect of Permeable Pavement on Improvement of Heat Environment in Urban Area

西山 哲\*<sup>1</sup>  
Nishiyama Satoshi

大西 有三\*<sup>2</sup>  
Ohnishi Yuzo

矢野 隆夫\*<sup>3</sup>  
Yano Takao

\*<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 Kyoto University, School of Urban and Environment Engineering

\*<sup>2</sup> 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 Kyoto University, School of Urban and Environment Engineering

\*<sup>3</sup> 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 Kyoto University, School of Urban and Environment Engineering

Corresponding author: Nishiyama Satoshi, nishiyama@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

#### ABSTRACT

We have been studying the importance of rainwater cycle for heat and hydrological environment in urban area. A permeable pavement consists of some layers that have high porosity materials and has the advantages of fulfilling a function of regenerating rainwater cycle in urban area. In this paper, we conducted some experiments on the effect of a permeable pavement on the thermal environment using the full-scale model constructed as actual carriageway. The results show that a rainwater storage facility of a permeable pavement produces evaporation from a pavement all day long which decreases the temperature of the pavement surface in comparison with a conventional asphalt pavement. We are planning to spread permeable pavements to prevent heat island with control of flood and underground water by making use of rainwater infiltration and cycle.

キーワード:透水性舗装,蒸発,熱環境

**Key Words** : Permeable pavement, Evaporation, Heat Environment

#### 1. はじめに

道路は我々の日常生活の利便性を支えると同時に、流通を促進することによって経済の発展を支える重要な社会資本であり、安全で快適な交通を確保するために、これまでコンクリートやアスファルトによって舗装された道路が施工されてきた。道路の構造の基本的な考え方は、その耐久性を保証するために、雨水を道路の下の地盤である路床に浸透させないようにするものであり、その結果、降雨は地盤に浸透することなく、すぐに下水道および河川に排出される。道路だけでなく家屋やビルを含めて現代の都市の地表面は、地盤への雨水浸透を防ぐコンクリートやアスファルトで覆われたが、それは雨天時に地盤が泥濘化しないことや乾燥時に砂塵が発生しないことなどの効果を発揮してきた。しかしながら、その一方で地下水の枯渇による地盤沈下の促進や地中生態系の変化といった悪影響も発生している。特に地表面が比熱の高い材料で覆われることによって顕熱が増加すると同時に、地盤からの蒸発散が生じなくなったことは、ヒートアイランド現象を促進する原因と考えられ、近年道路の構造の改善が検討されている<sup>(1)</sup>。その

一つに保水性舗装があり、舗装体内に保水材料を含ませることで雨水を貯留する機能を道路に与え、その貯留された雨水が日射によって蒸発することで、気化熱による冷却作用をもたらそうとするものである<sup>(2)</sup>。道路は都市の面積の約15%~20%超を占めており、このような保水材を道路に利用することは、ヒートアイランド現象の緩和に一時的には効果があると考えられる。しかしながら、都市の熱環境を悪化させたのは、都市の水循環を断ち切ったためであり、その解決を図らなければ根本的な解決にはならない。すなわち図1に示すように、雨水は地表面に降った後に地盤に貯留され、その貯留された雨水は蒸発および地下に浸透し、さらに浸透した雨水は地下水を形成し、それが河川などに流れ、海へ流れ雲を形成し雨水となる。この水文学的な水循環を断ち切ったことによって、ヒートアイランド現象だけでなく、都市部における集中豪雨や霧日数の増加など局地的な気象の変化をも引き起こしている。保水材や遮熱材を応用した道路の普及は、ヒートアイランド現象の緩和には効果的であるが、その他の現象、例えば下水道や河川の負担増による洪水の増加や地下水の涵養に対しては配慮されておらず、その効果は限定的なものになってしまう。我々

は、これまで都市の水循環を回復させることにより熱的な環境も改善されると考え、この機能を有する透水性舗装の研究を行ってきた<sup>(3)</sup>。

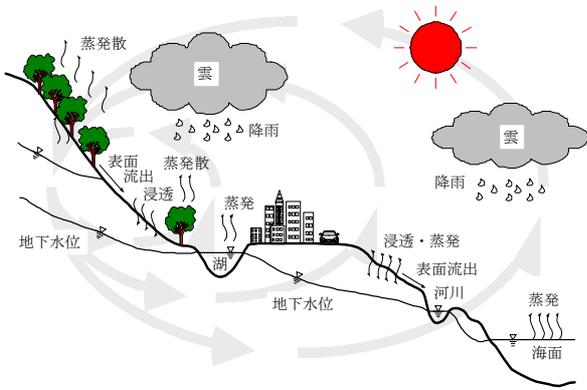


図1 都市における水循環の概念

この舗装は従来普及してきた密粒構造で雨水を浸透させない舗装とは異なり、粗骨材を主体とした配合で空隙率の高い構造であるという特徴があり、図2に示すように雨水が舗装を通じて貯留され、その一部が路床すなわち地盤へ浸透する。特に雨水浸透貯留機能によって期待されている都市型洪水の抑制は、雨水の表面流出量を計測することにより、その効果が定量的に評価されている<sup>(4)</sup>。一方、雨水を貯留する機能をもっていることは、同時に蒸発による熱環境の改善効果をもつ可能性があると考えられる。しかしながら、その効果はほとんど定量的な評価がなされておらず、透水性舗装の普及は都市のヒートアイランド現象の緩和に効果があるのか把握されていない。本研究はこのような背景を鑑み、模型の透水性舗装を用いた実験により、熱環境を改善する効果を定量的に評価することを試みる。都市の水循環の改善を図る透水性舗装が、ヒートアイランド現象の緩和効果にどの程度効果があるのかを検証することによって、“クールペイジメント”としての役割も期待できるかどうかを考察していく。

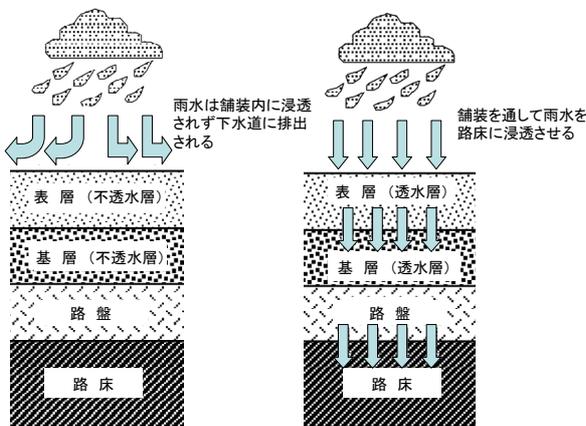


図2 従来の密粒舗装 (左) と透水性舗装の概念

## 2. 模型舗装の概要

実験用の模型装は、実際に透水性舗装が施工された国道163号線門真地区のもの(舗装打換工C, 設計交通量: D交通(=3900台/日), 設計CBR=20.0%, 等値換算厚 $T_d=25.2\text{cm}$ )を再現する形で構築した。都市環境の改善を考えた場合、都市での占有面積の大きな車道へ普及させる必要があり、本研究では車道へ適用される透水性舗装の熱環境改善効果を検証することを目的とした<sup>(5)</sup>。図3に模型舗装の概要を示す<sup>(6)</sup>。特性を比較検証するために従来の密粒構造の舗装(以下、密粒舗装と称する)も同様に施工した。模型舗装はアスファルトフィニッシャーによりアスファルト混合物の敷きならしを行った後に、マカダムローラおよびタイヤローラを用いて転圧を行うことで、前述の国道163号線地区の舗装と同じ方法で施工した。この模型舗装における透水性舗装の層厚および物性値は表1に示すとおりである。事前調査により、国道163号線門真地区の路床の透水係数は $9.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ であることが分かっており、セメント系混合物を加えることで現地における路床と同程度の透水係数になるように鈹滓層を調整した。

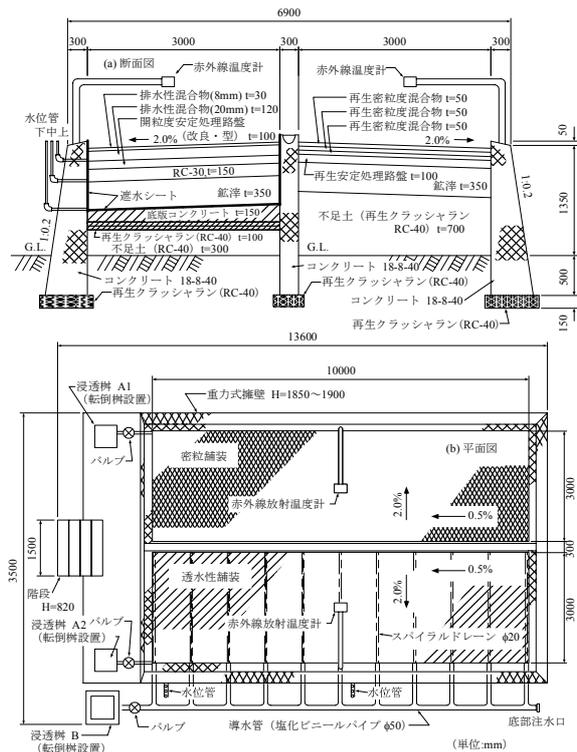


図3 模型舗装の断面図(上)および平面図(下)

表面の雨水の溢流量に関しては、図3における浸透枘A2に集水し、浸透枘内に設置した転倒枘により計測を行う。また路床底部から原地盤へ浸透する雨量に相当する底部浸透量に関しては、防水シート上に配置したスパイラルドレーンにより集水して浸透枘Bまで導き、そこに設置した転倒枘により計測する。さらに図4に示すように、舗装内

に誘電性土壌水分センサおよび熱電対式温度計を埋設し、各層の水分量と温度が計測できるようにした。また模型舗装表層には光ファイバ温度計を埋め込み、表面温度を0.5m間隔で計測できるようにした。図5に光ファイバの設置状況を示す。

表1 模型舗装の層厚と物性値

	材料	層厚 H (mm)	透水係数 (cm/sec)	空隙率 n (%)
表層	開粒度(最大粒径8.0mm) 高粘度改質アスコン	30.0	$5.01 \times 10^{-2}$	22.5
基層	開粒度(最大粒径20.0mm) 高粘度改質アスコン	120.0	$6.42 \times 10^{-2}$	20.3
上層路盤 (As安定層)	開粒度アスファルト安定処理(改質II型)	100.0	$6.86 \times 10^{-2}$	20.8
下層路盤 (RC-30層)	再生クラッシャーラン(RC-30)	150.0	$1.30 \times 10^{-3}$	26.5
路床	鈹滓(固結層)	350.0	$9.00 \times 10^{-5}$	5.0

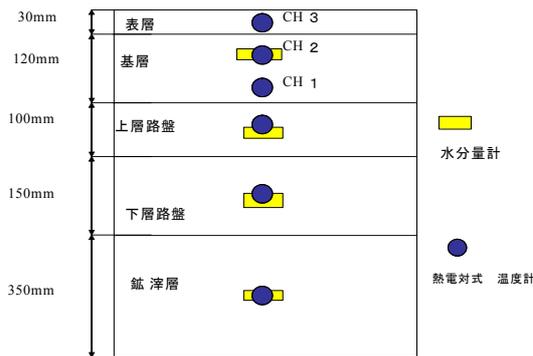


図4 各種計測機器の配置図

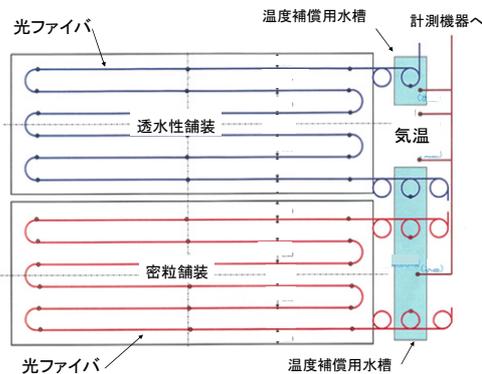


図5 舗装表層での光ファイバ設置図

## 2. 蒸発量の計測法の開発

透水性舗装における熱収支式は式(1)のようになる。

$$R_n = H_p + G_p + E_p \quad (1)$$

ここで  $R_n$  ( $W/m^2$ ): 正味放射量,  $H_p$  ( $W/m^2$ ): 透水性舗装における顕熱輸送量,  $G_p$  ( $W/m^2$ ): 透水性舗装における地中伝導熱,  $E_p$  ( $W/m^2$ ): 透水性舗装における潜熱輸送量である。透水性舗装は空隙の多い構造より雨水を貯留する機能が期待され、さらに貯留された雨水は昼間蒸発する作用が期待される。式(1)における顕熱輸送量がヒートアイランド現象を誘発する原因であり、潜熱輸送量が大きくなれば熱収支から考えて、その分ヒートアイランド現象の緩和効果が期待される。この潜熱輸送量は蒸発によって生じるので、透水性舗装のヒートアイランド現象の緩和効果は舗装からの蒸発量を計測することによって定量的に評価することが可能である。このような背景により、ここでは舗装からの蒸発量を計測する方法について考察する<sup>(7)</sup>。

本研究で用いた蒸発量の計測手法は、容器内に舗装表面からの蒸気を集めて直接その量を測るものであり、舗装表面に容器を設置し、当容器に空気を送り込み、送り込んだ空気と容器から出てきた空気の絶対湿度の差より蒸発量を計測するものである。このときの空気中に含まれる水分量は式(2)によって表される。

$$Q\beta_{in}\Delta t + AE\Delta t = Q\beta_{out}\Delta t \quad (2)$$

ただし  $E$  ( $g/m^2/min$ ): 蒸発量,  $\beta_{in}$  ( $g/m^3$ ): 吸気する空気の絶対湿度,  $\beta_{out}$  ( $g/m^3$ ): 排気する空気の絶対湿度,  $A$  ( $m^2$ ): 蒸発面の面積,  $Q$  ( $m^3/min$ ): 吸排気する空気の体積である。 $Q$ は容器内に風速計を設置し、その計測値  $v$  ( $m/s$ )に容器の横断面積 ( $B$  ( $m^2$ )) を乗じて算出する。ただし、流速計は容器の中央に設置しており、壁面摩擦の影響などにより容器内の空気の流速分布は均一ではないと考えられ、それを補正するための値  $\alpha$  用いて式(3)のように表される。

$$Q = \alpha v B \quad (3)$$

これより式(2)を  $E$  について変形すると式(4)を得る。

$$E = \frac{\alpha v B (\beta_{out} - \beta_{in})}{A} \quad (4)$$

この(4)式にしたがって、 $\beta_{in}$  と  $\beta_{out}$  を計測することによって蒸発量を定量的に評価する。

まず本研究による蒸発量計測の定量性を検証する。図6に示すように、厚手の紙に水を含ませた試料からの蒸発量を本手法にて計測すると同時に、試料と計測器を電子天秤の上に設置し、電子天秤の減少量から評価される蒸発量と比較することによって計測手法の精度を検討した。図7は計測の様子を示す写真である。

図8に計測結果を示す。横軸に蒸発量計で計測した値を、縦軸に電子天秤の減少量を表す。本計測装置においては、通風速度を約0.4m/sとし、相対湿度を±2%RHの精度で計測すると同時に±0.1°Cの精度で温度を計測することによ

り絶対湿度を測定した。計測中は吸引ポンプを用いて排気させることによって通風速度を前述の値に保持し、温度を約15℃から約25℃まで約1℃ずつ変えて各温度で10回蒸発量を計測した。図に示す結果より、本手法による蒸発量の計測値と電子天秤による計測値は、良好な相関関係が認められ、本計測法によって正確に蒸発量を評価できると考えられる。ただし、実験結果から式(5)の関係がみられる。

$$E = E' \times 0.70 \quad (5)$$

ここで  $E(\text{g/m}^2/\text{min})$  : 秤量変化から得られた蒸発量,  $E'(\text{g/m}^2/\text{min})$  : 本手法による蒸発量である。本手法の値に対して電子天秤での計測値が小さい傾向があるが、前述の通り容器の中央で計測した空気の流速で式(3)の値を算出したことの影響が現れたものと考えられ、また計測機器固有の特性などの影響も含めて式(4)の補正値  $\alpha$  を考慮することとし、実験結果より定量化された0.70の値を用いて計測値を補正したものを蒸発量とする。

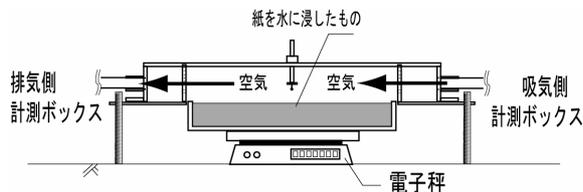


図6 各種計測機器の配置図



図7 計測時の様子

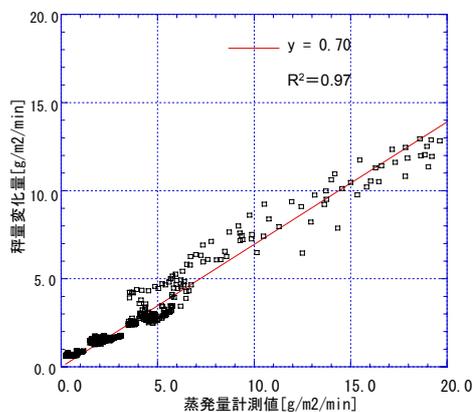


図8 蒸発量検証実験の結果

### 3. 透水性舗装における雨水貯留効果

ここでは模型舗装にいくつかの降雨強度を模擬して散水し、溢流、浸透および貯留量を計測することで、透水性舗装の雨水貯留効果を検証する。透水性舗装へ浸透した雨水が原地盤へ浸透していくことを模擬するため、計測時には図3に示すバルブを開放した状態で散水を行った。なお総降雨量は、舗装内への雨水浸透が定常に落ち着く量である83.3mmとした。

図9に降雨強度に対する溢流、浸透および貯留量の割合を示す。降雨強度によって溢流量は増加し、浸透量が減少する傾向があるが、貯留量に関しては降雨強度の強さに関係なく約60%のほぼ一定値を取ることが確認できる。溢流および浸透量は舗装体の透水係数に支配されるため、降雨強度が透水係数より大きい場合は、雨水は舗装表面に浸透せずに溢流していく傾向になると考えられるが、貯留量は舗装体内の空隙量に支配されるため、降雨強度にかかわらず一定の値になると考えられる。模型舗装は車道としての施工を考慮した耐久性をもたせた構造であるが、透水性舗装は地盤に雨水を還元させる能力を有していること、降雨量の約60%分に相当する量を下水道および河川に一時的に流れないようにする能力を有することは、都市の洪水対策としても効果的であることを実証するものである<sup>(8)</sup>。

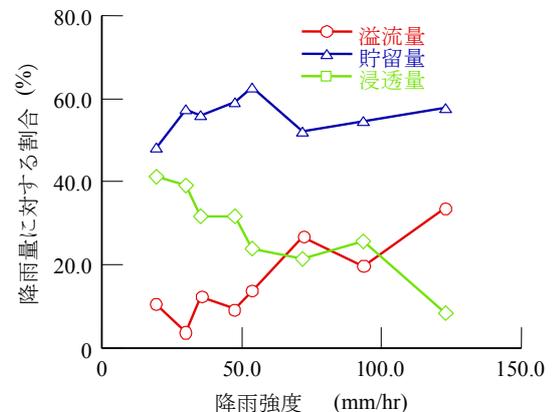


図9 降雨強度に対する溢流、貯留および浸透量の関係

### 4. 透水性舗装における熱環境改善効果

図10に8月24日から30日における透水性舗装からの蒸発量の経時変化を、図11にその間の自然降雨の状況を示す。蒸発量の計測は8月24日の午後より実施した。蒸発量計は密粒舗装と透水性舗装の両方に設置したが、密粒舗装からの蒸発は計測されなかったため、ここでは透水性舗装における計測値のみを示す。また計測においては装置の容器と舗装表面の間に高分子材料を敷設するなどの工夫を行うことで気密性を高めて行った。8月23日の降雨から次の8月30日の降雨まで、透水性舗装の表面からは蒸発が継続して生じている。また、図12は透水性舗装と密粒舗装の路面温

度の変化を図5に示す光ファイバで計測した結果を示すもので、密粒舗装の方が昼間および夜間共に路面温度は高くなっており、降雨後数日を経過してもこの傾向は変わっていない。図10における1日の蒸発量の変化を見ると、昼間は大きく夜間に減少する傾向を示す。従って図12において、8月23日の降雨後があった後、密粒舗装の表面温度が高い8月27日の日中に蒸発量が最大値となっているのは、日射が蒸発を促進させることを示すと考えられる。これらより透水性舗装が貯留した雨水は昼間の日射によって蒸発し、さらにその蒸発は降雨後数日間は継続すると言える。

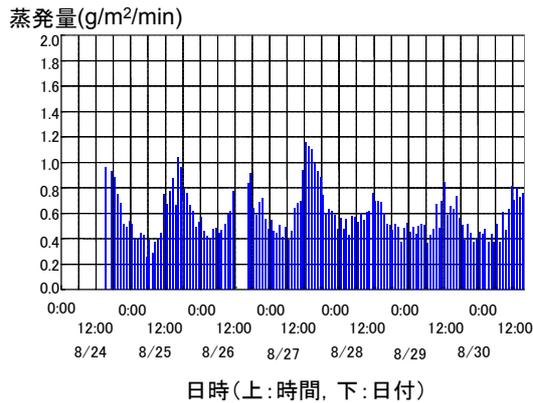


図10 透水性舗装における蒸発量の挙動

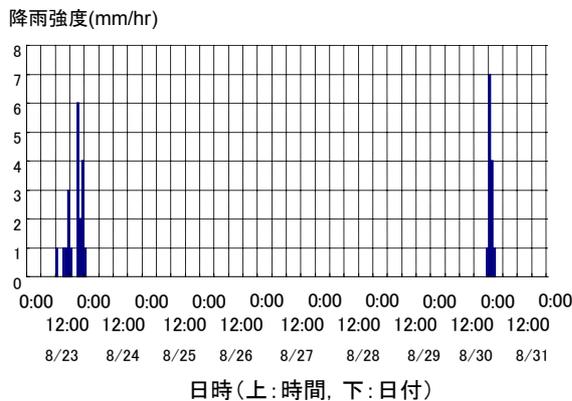


図11 蒸発量計測中の降雨状況

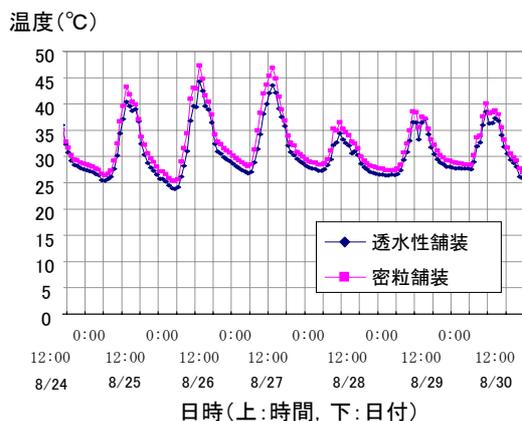


図12 密粒舗装と透水性舗装の表面温度の経時変化

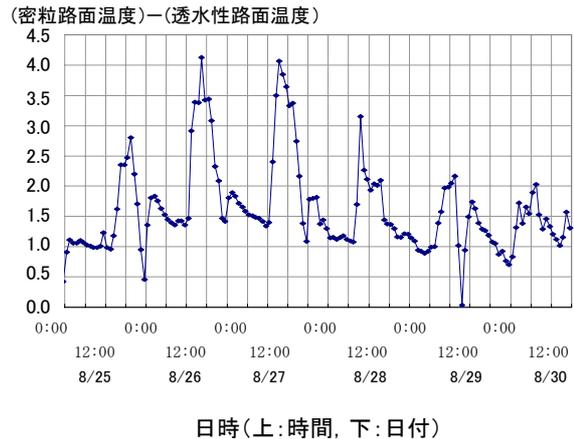


図13 密粒舗装と透水性舗装の表面温度差の経時変化

図13は密粒舗装と透水性舗装との路面温度の差を示す。縦軸は密粒舗装の表面温度から透水性舗装の表面温度を引いた値であり、透水性舗装の方が日中においては最高で4.1°C低くなっており、さらに夜間においては平均で約1°C程度低い温度になっている。温度差は降雨から時間が経過するにつれて小さくなり、これは図10に示す蒸発量の経時変化の傾向と一致しており、また1日の変化を見ても透水性舗装からの蒸発が多い昼間で温度差は大きくなっている。このように、透水性舗装体内に貯留した雨水の蒸発量に応じて路面の温度が低減する効果が発揮されることが分かる。

これら蒸発による温度低減効果をさらに確認するために、乾燥時の透水性舗装の半分に散水し、その表面温度を計測した結果を図14に示す。図は、大阪府の過去30年間の8月の平均降雨量99mmを平均降雨日数7.2日で除したものに相当する量を、図における舗装の右半分の箇所に散水し、上段は散水3日経過した日の午前10時の表面温度を、下段は同じく散水後3日経過した日の午後14時の表面温度を光ファイバで計測したものである。

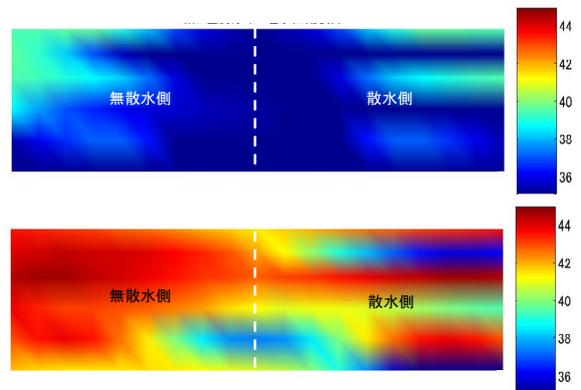


図14 透水性舗装の表面温度の計測結果  
上段：午前10時の温度 下段：午後14時の温度

この結果より、日照量の少ない午前の時間帯は散水した

部分と散水していない部分の温度に差はみられないが、日射量が多くなる午後では散水した側の表面の温度が低くなっている。なお、散水していない側の表面の温度は密粒舗装と同じ温度であった。一部散水していない側の表面の温度が低下したのは、図の左側の下部より排水させている影響が出現したものとする。このように、透水性舗装において表面温度が低下する現象は、舗装体内に貯留される水分の有無が影響しており、これまでの結果と併せて貯留された水分の蒸発によるものとあらためて確認できる。

さらにこの路面温度の低減効果を舗装体内の水分量の挙動から考察する。図15は8月27日の舗装体内の各層の飽和度の値を示すものである。下層路盤と鈇滓層における飽和度は降雨後約3日経過しても70%以上の値を示しており、舗装体下部には雨水が貯留された状態が続くことが分かる。一方、上層路盤層、表層および基層は舗装体下部よりも低い飽和度になっており、主に下層路盤層から上層の部分の水分が蒸発に寄与し、下層路盤層に深層の水分はあまり移動しないと考える。また上層路盤層は飽和度が最も小さい値であり、また蒸発が生じていても、表層や基層の飽和度の1日の平均値はある値より減少しないといえる。図16は、各層の乾燥状態での1日の温度変化の例を示したものであり、上層路盤層以深の各層の温度は一定であり、表層および基層の温度だけが上下していることが分かる。すなわち透水性舗装において、温度は舗装体内では深さと共に減少するが、下層路盤層より深い箇所では温度は一定であるので、そこでは水分の移動を生じさせる駆動力が少ないと考えられる。また図17は基層の飽和度と埋設した熱電対によって計測された温度の経時変化を示す。基層の温度が上昇する日中には、表面からの蒸発が生じるために水分量は低下し飽和度は減少するが、温度が低下する夜間においては飽和度が上昇する傾向にある。すなわち計測期間中に降雨は生じていないにもかかわらず、舗装表面温度の下がる時間帯には飽和度は増加していることが分かる。特に明け方に飽和度が大きく上昇することから、基層への水分は結露によって供給されると考えられ、日中の蒸発と夜間での舗装内への水分供給が繰り返されることにより、降雨後数日間経過したときでも舗装表面から水分の蒸発が発生すると考えられる。もちろん蒸発による舗装の路面温度の低減効果は、図13のように降雨直後に大きく現れるが、降雨が無い場合でも透水性舗装の表面温度が密粒構造の舗装に比べて、低い温度に保持できる可能性があることを示唆しているものとする。

## 5. 結 言

道路舗装は都市のヒートアイランド化の一因と考えられ、その対策として“クールペイメント”の研究が続けられている<sup>(9)</sup>。我々は、都市の水循環を回復させる機能を有する透水性舗装の雨水貯留能力に着目し、透水性舗装においてもヒートアイランド化を抑制する効果が発揮されるか

どうかを検証した。その結果、貯留した雨水の蒸発によって、従来の舗装と比較して路面温度が低減されることを実証した。これまでは歩道での透水性舗装の普及は図られてきたが、この効果を発揮させるためには、都市の中での占有面積の大きな車道にも普及させる必要がある。それを考慮して本研究は実際の車道に適用した構造を模擬して実験したものであり、今後は車道としての耐久性を含めた研究成果と合わせて、都市の熱環境改善に対する普及効果を検討していく予定である<sup>(10)</sup>。

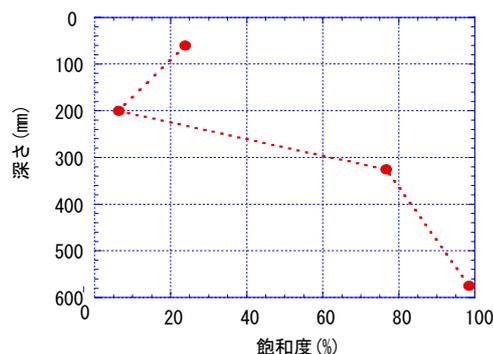


図15 透水性舗装の舗装体内の飽和度分布

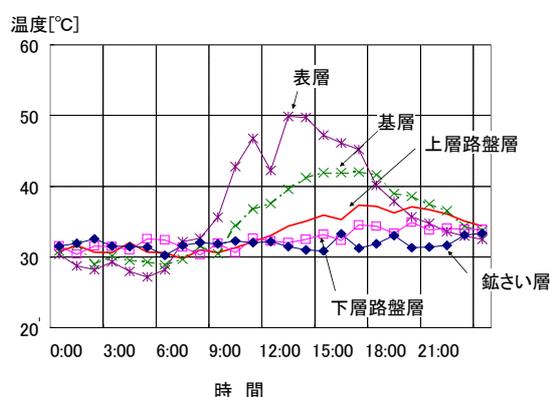


図16 透水性舗装内の温度分布

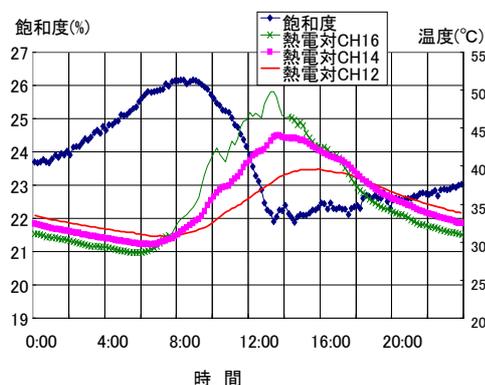


図17 透水性舗装の基層での温度および飽和度変化

## 6. 参考文献

- (1) 森山正和編, ヒートアイランドの対策と技術(2004), 学芸出版社.
- (2) 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, 土木学会論文集, 613-42(1992), pp. 225-2362.
- (3) 北山迪也・大西有三・西山哲・矢野隆夫・青木一男, 透水性舗装の洪水抑制効果に関する実験的研究(2005), 2005年土木学会全国大会年次学術講演会, pp245-246.
- (4) 田中裕・大西有三・西山哲・矢野隆夫・青木一男, 透水性舗装による都市型洪水抑制のための雨水浸透に関する研究(2006), 2006年土木学会全国大会年次学術講演会, pp. 317-1318.
- (5) 建部英博・大根義男・大谷大三, 車道を対象とした透水性舗装の可能性, 舗装(1996), 31-9, pp27-31.
- (6) 木下孝樹・和田実・西山哲, 車道透水性モデルの機能性評価～産・学・官の取り組み～(2005), 第26回日本道路会議, 12060.
- (7) 丹原康滋, 透水性舗装における蒸発散と熱移動に関する研究(2004), 京都大学工学部地球工学科卒業論文.
- (8) 土木研究所: 土木研究所資料 道路路面雨水処理マニュアル(案)(2005), 土木研究所資料, 第3791号.
- (9) 吉中保・根本信行・幸田正裕, 透水性アスファルトの車道への適用に関する検討, 土木学会舗装工学論文集 5(2000), pp. 47-52.
- (10) 鎌田修・清水忠昭, 伊藤正秀: 車道透水性舗装の耐久性に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 10(2005), pp. 91-98.

(Received June 9, 2007, Accepted December 12, 2007)