

## 保水性セラミック舗装の水蒸気特性に関する実験的研究

Experimental study on the properties of water-retentive ceramic pavement on the water vapor

熊谷倫太郎・藤野毅・浅枝隆\*・杉浦淳・斎木正道\*\*・佐治明・森田悦宏\*\*\*・坪松学\*\*\*

\*

Rintaro Kumagai, Takeshi Fujino, Takashi Asaeda, Jun Sugiura, Masamiti Saiki  
Akira Saji Etsuhiro Morita and Manabu Tsubomatsu

**ABSTRACT;** Field observations were conducted to estimate the effect of permeable pavement on the thermal environment. The effects of different kinds of foundation under the pavement, such as clay, sand, and mortar were compared. As a result, The low temperature was maintained only 1 or 2 days after a rain fall for mortar foundation, on the other hand, 3 or 4 days for clay. Next, the availability of water vapor flux was estimated by wind tunnel experiment. Laminar flow was formed near the surface and linear profiles of temperature and humidity were obtained. About 300 W/m<sup>2</sup> of water vapor flux was estimated under stable condition if water was supply at the bottom of the pavement.

**Key words :** permeable pavement, water vapor flux, heat balance, field experiment

### 1. はじめに

従来のアスファルトやコンクリート舗装面は、晴天時においては表面での水分蒸発が生じないため、日中、表面が高温になるだけでなく、地中に多量の熱量を輸送するために夜間も高温が維持される（例えば、浅枝・藤野，1992）。都市域では、これらがヒートアイランド化の最も大きな要因となっているが、その対策として、近年、雨水が浸透することを考慮して開発された保水性舗装（セラミックブロック）の利用が注目されている。これは、定性的にはブロック内の水分蒸発によって表面温度緩和効果があることは知られているものの、その効果についてブロックそのものの構造特性、長期間における評価、および実用面において施工上の制限から地盤の材質の評価など、十分な情報は得られていないのが現状である。

本研究は、まず、野外において実用面に即したケースを基に熱・水分移動特性について長期に評価することを試み、次いで、ブロック内からの水分蒸発特性についてその素過程について検証する実験を行い、これらについて考察をしたものである。

---

\*埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 浦和市下大久保 225

Saitama University, 255 Shimo Okubo, Urawa, Saitama, 338-8570

\*\* (株) テトラブロック事業部 〒160 東京都新宿区西新宿 6-3-1

6-3-1 Nishishinjuku, Shinjuku, Tokyo, 160

\*\*\*中部電力 (株) 電気利用技術研 〒459 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

20-1 Kitasekiyama, Odakayou, Midoriku, Nagoya, Aichi

\*\*\*\*日本大学生産工学部 〒275 習志野市泉町 1-2-1

Nihon University, 1-2-1, Izumiyou, Narashino, Tiba, 275

## 2. 舗装サンプルの物性

正味放射や温度フラックスを見積もるために、セラミックブロックの物性値を調べた。熱的物性値や空隙は、作成されるブロックによって大きく異なることが考えられ、しかも熱収支などを評価する上で極めて重要なパラパラメーターとなる。これらは、室内実験によりそれぞれ測定した。表—1に、得られた物性値について示す。セラミックの熱伝導率はコンクリートの約半分程度であり、これは、アスファルトの熱伝導率（浅枝・藤野,1992）と同程度である。アルベドは芝地とほぼ同じ値を示した。さらに、含水比や間隙ひについては、既存の例として、尾崎・鈴木(1998)が行った結果と比較すると、それぞれ半分程度の保水能力を持つものであることがわかった。

## 3. 自然環境下での野外実験

野外実験は、1997年8月から11月まで埼玉大学構内で行った。使用したセラミックブロックの大きさは15×30cmで、厚さは5cmである。これを9㎡の広さに配置した。ブロック下の地盤は、通常の施工法に基づいて裸地面上に15cm厚の砂利層、さらにその上に5cm程度の砂層を敷く。ここで、地盤の構造の影響について調べるために、砂層をモルタルにした場合と、裸地（粘土）上に直接ブロックを置いた場合を試みた。さらに、比較のためにコンクリートブロックを用いた場合と芝地についても検討した。

計測項目は、ブロック内部（表面から1cmと3cm）とブロック下5cm、および地盤内部15、25cmの深さに熱電対センサーを埋設し、さらに25cmの深さには熱流板を設置してそれぞれ地温と鉛直方向の温度フラックスを計測した。地上では気象観測を行った。ここで、8月中は1週間毎にセラミックの体積含水率の測定を炉乾燥法によって行った。

## 4. 観測結果および考察

### 4-1 セラミックの体積含水率

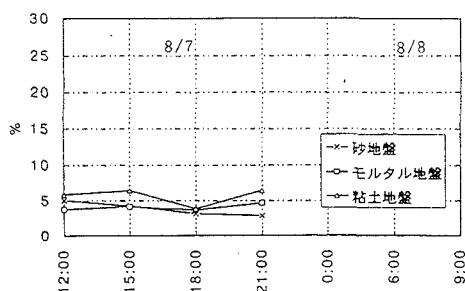
前々日降雨のあった場合（8月1日）、および晴天日が一週間続いた後の場合（8月7日）における、それぞれブロックの体積含水率の日変化を図—1(a),(b)に示す。全体の傾向として、降雨後の場合、含水率は20%前後であるのに対し、晴天が続いた後では、それが5%以下まで下がっている。次に、それぞれの舗装間の違いを見ると、降雨後では砂地盤とモルタル地盤では日中時間と共に減少し明け方再び増加するが、粘土地盤では20%前後を保ったままであった。含水率は粘土地盤、砂地盤、モルタル地盤の順で高く、地盤の保水性の高さの順に対応しており、これは、セラミックの保水した雨の蒸発効果であることがわかる。ここで、不透水性のモルタル地盤において変化が生じたのはブロックとモルタル地盤の間に閉じこめられた雨水が残っていたためと考えられる。晴天が続いたあとでは、ブロックの地盤の違いによる差はなくなり、セラミックの効果は2日から3日程度までとなった。

### 4-2 ブロックの表面・地中温度の日変化

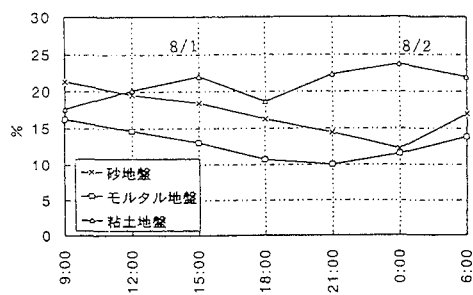
図—2に、降雨後翌日の7月31日から8月6日までの舗装表面温度の日変化を示す。ここで、モルタル、砂、粘土地盤上のセラミックの表面温度を比較すると、モルタル地盤上の温度が最も高く、次に砂地盤、粘土地盤という傾向が現れた。これは、含水率の高さに対応している。それぞれの時間的変動を見ると、31日では3種類の表面温度とも最高値は37℃であり、それぞれの差は2℃以内に収まっていたがそれから数日間でモルタル地盤のブロック表面温度は15℃以上も高くなっている。逆に、粘土ブロックでは、降雨後3～4日間はほとんど温度のピークが変わらなかった。一方、砂地盤のブロックは、降雨後の3日間は表面温度の最高値はわずかに上昇し続け、4日目から急激に上昇した。このように、地表面の温度特性は、同程度の含水率の状態から時間が経つとともに、地盤の状態によってそれらにわずかな差が生じ、これが表面温度を大きく変化させている。図—3に、同じ期間におけるそれぞれのブロック下5cmの地中温度の日変化を示す。この深さでも表面温度の結果と同様であり、ブロック自身の水分蒸発の効果は5cmの深さにも及

表一 使用したセラミックブロックとコンクリートブロックの物性値

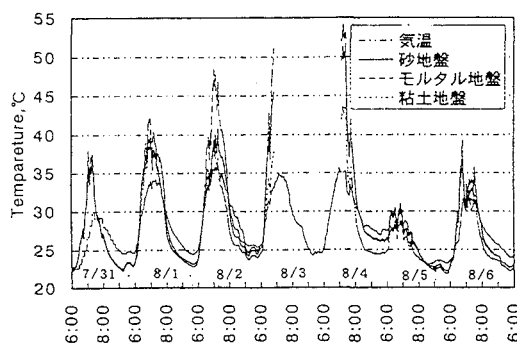
| アルベド   | 比熱    | 密度                  | 熱伝導率    | 湿潤密度                | 乾燥密度                | 含水比  | 間隙比   | 間隙率  |      |
|--------|-------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|------|-------|------|------|
|        | (J/K) | (g/m <sup>3</sup> ) | (W/m/K) | (g/m <sup>3</sup> ) | (g/m <sup>3</sup> ) | (%)  | (g/g) | (%)  |      |
| セラミック  | 0.12  | 1.40                | 2.43    | 0.75                | 2.04                | 1.77 | 15.6  | 0.38 | 27.4 |
| コンクリート | 0.28  | 1.21                | 2.16    | 1.37                | —                   | —    | —     | —    | —    |



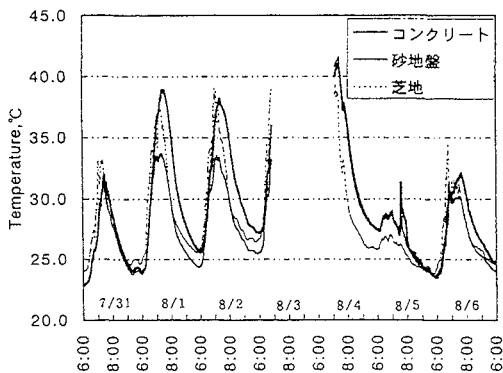
図一1(a) 含水率の日変化 (8/1~2)



図一1(b) 8/7

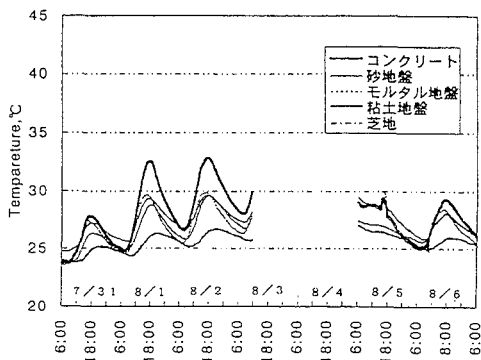


図一2 舗装表面温度の日変化



図一3 各種地中温度 (5 cm)

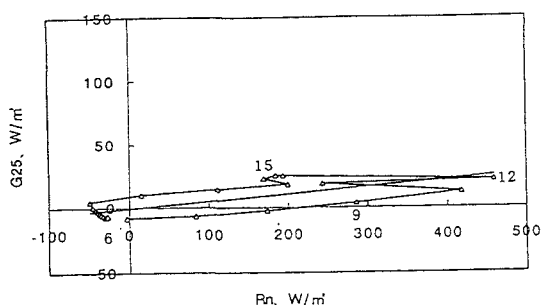
んでいる。図一4に、25cm 深さの地中温度の日変化を示す。これより、表面や深さ5cmの場合と異なり、日中は砂地盤の方がモルタル地盤よりも高くなっている。また、両者の間には温度変化の位相差が生じておりこれは、モルタル地盤の方が温度日較差は小さいことから地中の熱容量が大きいためだと推測される。ここで、コンクリートブロックや芝地と比較すると、降雨後では日中、コンクリートブロックが最も高いが、晴天が続いた後ではコンクリートブロックと砂地盤はほとんど差がなく、これは表面近くの地中水分の状態はほとんど同じになり、その結果この深さまで影響したと考えられる。



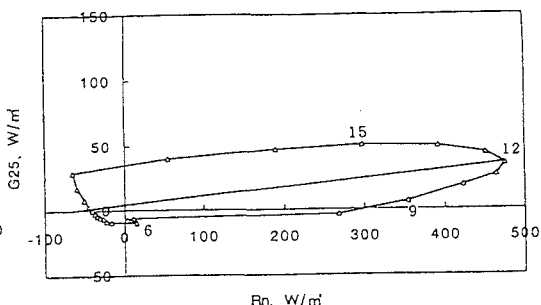
図一4 各種地中温度 (25 cm)

#### 4-3 正味放射と温度フラックスの関係

図一5(a),(b)に、それぞれ8月2日と10日における地中25cm下(砂地盤)の正味放射量と温度フラックスの関係を示す。図中の数字は時刻、線は回帰直線を示す。これらより、降雨後では温度フラックスの最大値は数十 W/m<sup>2</sup>程度であるのに対し、晴天が続いた後では50 W/m<sup>2</sup>程度である。回帰直線の勾配は両者間



図—5(a) 正味放射と温度フラックス (8/1~2)



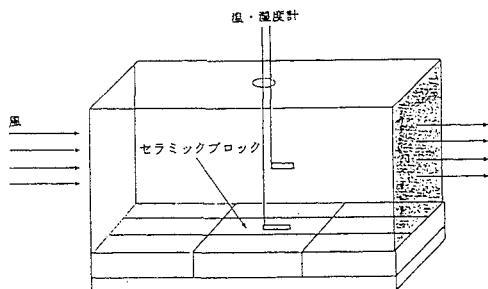
図—5(b) 8/7

に大きな差は見られないが、時間変化の描くループの膨らみが大きく異なる。晴天が続いた後では、潜熱輸送の効果がないために蓄熱が大きくなり、両者の関係に時間差が生じることがわかる。

## 5. セラミックブロックの水分蒸発特性

### 5-1 実験概要

以上、野外観測より地盤の効果について評価したが、セラミックブロック自身内の水分移動特性については十分把握できていない。そこで、次に、セラミックブロックの水分蒸発量をさらに詳しく知るための実験を行った。



図—6 実験の概要図

ここで、通常、フラックスを計測するためには、地表面状況が一樣でかつそれが広域に存在し、そこで大気境界層理論が用いられる場合にバルク式等で見積もることが可能であるが、このような狭域ではほとんど正確な値を見積もることができない。従って、野外において風洞装置を用い、ある程度環境を制御した下でブロック表面近傍に生ずる層流境界層内の比湿プロファイルからセラミックの水蒸気フラックスを見積もった。実験の概要図を図—6に示す。実験は、セラミックブロックを風洞中に敷き詰め、一定の風(\*m/s)を送り、温湿度計(東京計測製)を用いてブロック表面からポイントゲージを利用して0.2mm毎に2mmの高さまで、それ以降は1mm毎に高さ5mmまでのプロファイルを測定した。さらに、高さ20cmにおいて、放射収支計(英弘精機製)により放射収支、外部環境として温湿度、サーモフロー(英弘精機製)により表面からの赤外放射量を計測した。ここで、計測の対象となっているブロックは、あらかじめ乾燥炉に入れて内部の水分を蒸発させたものを用いた。その下には水槽を設置し、実験開始直後にブロックを置いた状態では、底部に水が付着、浸透するように水槽内の水位を調節している。このようにして、ブロックそのものは絶乾状態であるが、ブロック下から水分を吸い上げられる状態の下で、表面からの水蒸気フラックスを計測することを試みた。算定式に従う。すなわち、

$$LE = -\rho \cdot KVa \cdot L \cdot \partial q / \partial z. \quad (1)$$

ここで、 $LE$  : 水蒸気フラックス( $W/m^2$ ) ;  $\rho$  : 湿潤空気密度( $kg/m^3$ ) ;  $L$  : 蒸発の潜熱( $J/kg$ ) ;  $KVa$  : 水蒸気の分子拡散係数( $m^2/s$ ) ;  $q$  : 比湿( $kg/kg$ ) ;  $z$  : 高さ(m)である。湿潤空気密度および分子拡散係数は近藤(1994)に従った。すなわち、

$$\rho = 1.293 \times 273.15 / (273.15 + T)$$

$$\times P/1013.25 \times (1 - 0.378e/P),$$

$$K V a = D o (1013.25/P) \times (273.15 + T/273.15)^{1.81}.$$

ここで、T：温度(℃)；P：大気圧(hPa)；e：水蒸気圧(hPa)；Do=2.23×10<sup>-5</sup>(m<sup>2</sup>/s)である。

## 5-2 実験結果

図-7(a)-(c)に、実験開始後 180 分経過時における温度、相対湿度、および比湿のプロファイルを示す。ここで、比湿は大気圧を 1000hPa として見積もった値である。これらより、表面から 2mm までの高さにおいて、勾配が大きく、直線に近い分布が得られ、それより上の高さでは勾配が小さく、プロファイルが急変する傾向が見て取れる。すなわち、2mm の高さまではこのブロックの上の層流境界層域内であり、水蒸気フラックスはこの部分の比湿プロファイルから求められる。この時の水蒸気フラックスは約 270W/m<sup>2</sup>と見積もられた。

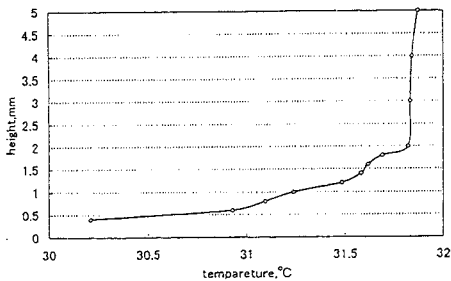


図-7(a) 温度

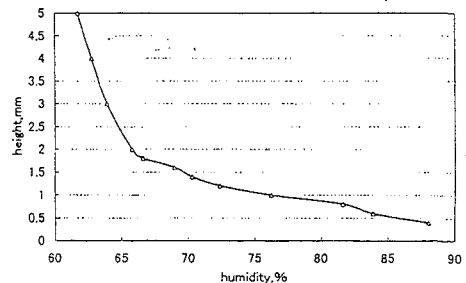


図-7(b) 相対湿度

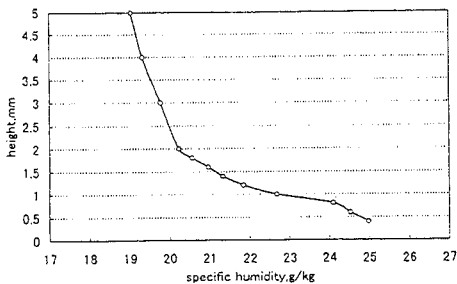


図-7(c) 比湿

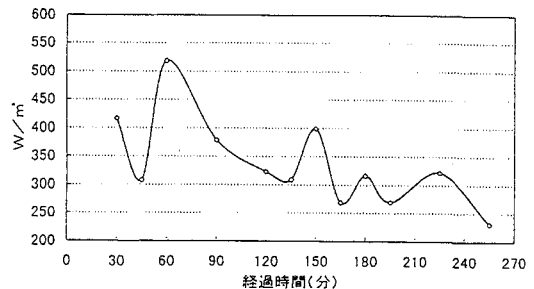


図-8(a) 水蒸気フラックス

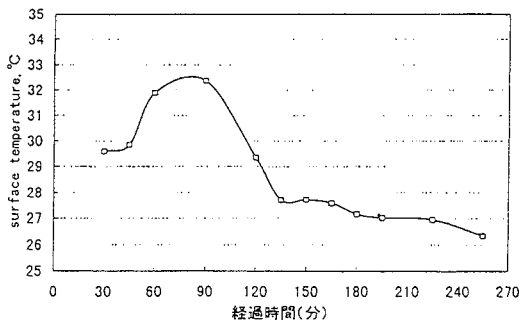


図-8(b) 表面温度

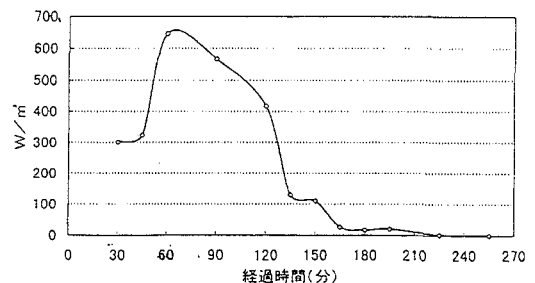


図-8(c) 正味放射量

このようにして得られた水蒸気フラックス、正味放射量、および赤外放射量から換算した表面温度のそれぞれ時間変化を図一8(a)-(c)に示す。ここで、観測日の天候は雲が多く、実験開始後 60 分から 120 分までが比較的日射量が多く、その結果正味放射量は大きな値となっている。地表面温度は、正味放射量の変化にほぼ対応している。地表面温度と気温との差はほとんどないか、2~3℃低い状態であった。これは、実験開始直後の水温を測っていなかったのも、蒸発による効果かどうかは不明である。次に、水蒸気フラックスは、同じ傾向が見て取れるが、150 分以降、ほぼ平衡な状態でも 2 時間余り 300W/m<sup>2</sup>前後の水蒸気フラックスが計測された。

## 6. おわりに

実用面に即した条件下での自然状態での野外観測、および風洞実験により、保水性舗装の温度・水蒸気移動特性について調べた。このような建材はアスファルトやコンクリートと比較して降雨後、水分の蒸発を遅らせ、それが長期に行われることから気候緩和の役割を果たす。今後は、ブロックの保水力や吸水力は間隙比等その構造に依存するため、異なる種類の舗装材についても検討し、さらに、温度勾配下での影響や、ブロック下部の含水比の違いの影響についても検討する予定である。

## 参考文献

- (1) Doll,D., Chings,J.K.S., and Kaneshiro,J. (1985) : concrete usingnet radiation data, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.17, 351~372.
- (2) Oke,T.R. and Cleugh,H.A. (1987) : Urban heat storage derived as energy balance residuals, *Boundary Layer Meteorology*, Vol.39,233~245.
- (3) 浅枝隆・藤野毅 (1992) : 舗装面の熱収支と蓄熱特性について, 水文・水資源学会誌, Vol.5,3~7.Asaeda,T. and V.T.Ca (1993) : the subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment : a numerical model, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.65,159~179.
- (4) 近藤純正 (1994) : 水環境の気象学, 朝倉書店, 350 pp.
- (5) 藤野毅・柴原千浩・浅枝隆・村瀬範芳・和氣重紀夫 (1994) : 浸透性舗装の水分・熱移動特性と冷却効果, 水工学論文集, Vol.38,235~240.
- (6) ヴタンカ・浅枝隆・ユスフムハマドアブ (1994) : 地中水分の分散を利用した夏季の舗装表面の温度緩和 - 保水性舗装の利用-, 水工学論文集, Vol.38,449~454.
- (7) Asaeda,T., V.T.Ca and WAKE. (1996): Heat Storage of Pavement and its Effect on theLowerAtmosphere, *Atmospheric Environment*, 30(3), 413~427.
- (8) 福田萬大・深沢邦彦・荒木美民・藤野毅・浅枝毅・浅枝隆 (1997) : 夏季自然状態での各種舗装面の熱環境緩和特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 571(36),149~158.
- (9) 尾崎哲二・鈴木義則 (1998) : 保水性セラミックタイルの熱環境改善に関する研究, 水工学論文集, Vol.42,61~66.