

ヒートアイランド対策としての保水性舗装の性能評価試験

中山 康孝*

Field test about performance of water retentive pavement as a heat island control measures

Yasutaka NAKAYAMA

はじめに

ヒートアイランド現象の主な形成要因の一つとして、都市化に伴う地表面の不透水化がある。この対策として植物の蒸発散効果を利用した屋上緑化や都市緑化が注目されているが、都市部における限られた緑化スペースを踏まえると、普及は容易ではない。

近年、蒸発効果により路面温度の上昇を抑制する保水性舗装が注目されている。主な特殊舗装工法には、排水性舗装、透水性舗装などがある。排水性舗装は、走行環境の向上や交通騒音の抑制を目的とする。雨水で舗装表面に水膜が張ることを防ぐために空隙率の高い舗装材を用いて浸透させ、処理施設に排水する工法であり、多くの幹線道路で用いられている。透水性舗装は、地下水の涵養や都市型洪水の防止を目的とする。雨水を地中に浸透させるために空隙率の高い舗装材を用いる工法であり、強度不足や空隙の目詰まりの問題から、幹線道路では用いられずに歩道や駐車場に限った使用にとどまっている。

保水性舗装は、降雨などで供給された水分を舗装内の保水材で保持し、蒸発効果をもたらすものである。既往の研究例としてセラミック系保水性舗装の有効性が報告されているが、強度不足やコストの問題から本格的な幹線道路への適用には至っていない。

そこで、本研究では従来の舗装材より多くの空隙を持たせた舗装材に粘土とセメントで構成された保水材を充填した、幹線道路に施工可能な保水性舗装を対象に、その保水性能評価を屋外にて実施した。

1. 実験概要

1-1. 保水性舗装試験体の組成

本実験用に施工された保水性舗装はT社により開発され、空隙率20%と従来の舗装より多くの空隙を持たせた舗装材に増量材（粘土）とセメントを主な構成物としたセメントミルク（保水材）を充填した組成を持つ。保水性舗装試験体に配合された材料の詳細に関してはTable1に示した通りである。

Table1 保水性舗装の材料配合表

| 単位 | セメント | | 混練水 | | 界面活性剤 | | 増量材 | | 合計 | 比重 | W/C (%) |
|-----------------|--------|------|-----|-----|-------|-------|------|-----|----|----|---------|
| | 比重3 | 比重1 | 比重1 | 比重1 | 比重2.7 | 比重2.7 | | | | | |
| g | 1111.0 | 2570 | 26 | 26 | 999.9 | 4707 | 1.41 | 123 | | | |
| cm ³ | 370.3 | 2570 | 26 | 26 | 370.3 | 3337 | | | | | |

1-2. 実験方法と測定項目

本実験は、八王子市にあるT社東京工場の駐車場に施工した試験体を用いて行った。計測現場の平面図をFig.1に示す。施工した試験体は、厚さ10cmの密粒度舗装（アスファルト舗装）、厚さ5cmの保水性舗装、保水性と密粒度を厚さ5cmずつとした舗装の3種であり、寸法はいずれも5m×2.5mである。なお、地中温度を計測する熱電対は、各試験体の表面から深さ2.5cmの位置と、保水性舗装10cmに関しては深さ7.5cmの位置にも施工の段階であらかじめ埋設してある。試験体の断面図をFig.2、試験体に設置した測定機器の配置図をFig.3に示す。

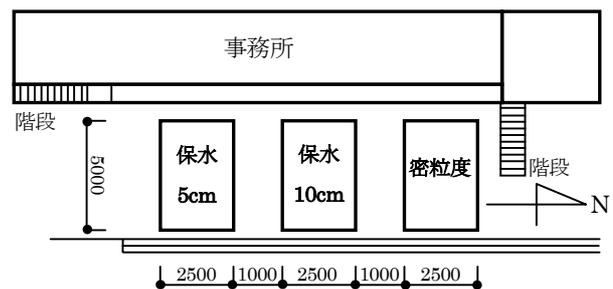


Fig.1 計測場所の平面図

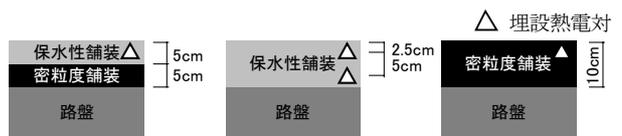


Fig.2 各試験体の断面図

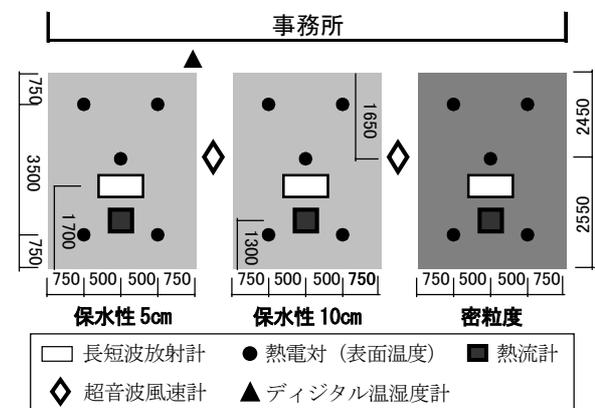


Fig.3 試験体に設置した測定機器の配置図

各試験体の測定項目、データのサンプリング間隔、使用機器に関してはTable2に示す通りである。

Table2 測定項目と使用機器

| 測定項目・サンプリング間隔 | 使用機器 |
|-------------------------|--------------------|
| 気温・相対湿度 (1分) | 精密型デジタル温湿度計 |
| 表面温度 (1分) 熱画像(30分) | 熱電対、赤外線放射カメラ |
| 地中温度 (1分) | 熱電対 |
| 地中熱流量 (1分) | 熱流計(50mm角、厚さ0.7mm) |
| 風速、風向(測定高さ:85cm) (0.1秒) | 3次元超音波風速温度計 |
| 長短波放射量(上向き、下向き) (1分) | 精密長短波放射計 |

1-3. 実験スケジュール

実験期間は2003年8月20日から9月5日までの16日間である。保水性能を評価するに際して、5日間は試験体に人工散水を行った。近年、保水性舗装の散水方法が指針化される動向にある。それによると、毎分60で1時間と定められており、これは散水の量と具体的な効果を把握する段階であることから多めの指針となっている。本試験もその内容に準拠する形で、毎分60のペースで8時から1時間の散水を実施した(Fig.4)。施工した試験体は建物側からわずかな傾斜がついており、散水は、複数の穴を開けたホースを試験体表面に這わせ、蛇口で流量を調整し、ホースからの水を傾斜に沿って自然流下させる方法とした。散水を実施した日以外においては、降雨を対象とした自然状態での評価を行った。散水のスケジュールは Table3 に示す通りである。



Fig.4 散水の様子 (8月22日)

Table3 散水スケジュール

| 自然 | 散水 | 自然 | 散水 | 自然 | 散水 | 自然 | | | | | | | | | | |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|---|---|---|---|
| 8/20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 9/1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

2. 舗装材の温度特性と放射収支

2-1. 表面温度の実測結果

表面温度は各試験体の5箇所に接着させた熱電対でそれぞれ計測した。解析は、散水を実施した日と散水を実施していない日に分けて行った。散水を実施していない日の一例としては8月23日、散水を実施した日の一例としては8月25日の結果を示す。Fig.5は散水の有無による試験体表面温度を表わしたものである。施工した試験体付近は建物が隣接しているため、12時半以降は建物側

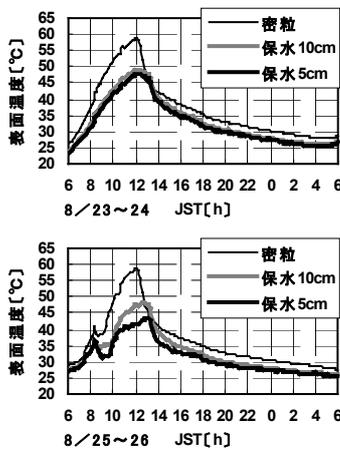


Fig.5 各試験体の表面温度 (上: 散水なし、下: 散水あり)

から日影となり表面温度に影響を及ぼすことがわかった。散水を実施した日は8時頃から温度低下が見られ、12時から13時頃に最高温度に達する。密粒度舗装の最高温度は59°Cであるのに対し、保水性舗装10cmは47°C、保水性舗装5cmは44°Cとなり、密粒度舗装と保水性舗装では12°C~15°Cの差異が確認できた。一方で、散水を実施していない日は、密粒度舗装の最高温度が59°Cであるのに対し、保水性舗装10cmは50°C、保水性舗装5cmは47°Cとなり、密粒度舗装と保水性舗装とは9°C~12°Cの差異が確認できた。散水の有無に関わらず表面温度は密粒度舗装より保水性舗装の方が低い結果となった。

Fig.6は散水を実施した日と散水を実施していない日における積算日射量と表面温度の関係を表わしたものである。積算日射量は、横軸に示した時間の1時間前からの日射を積算した値である。表面温度は1時間の平均値を用いている。日射量は散水を実施した日の方が高い値となったが、表面温度は低くなったことから、保水性舗装への散水の効果が表面温度に影響を及ぼすということが明らかになった。

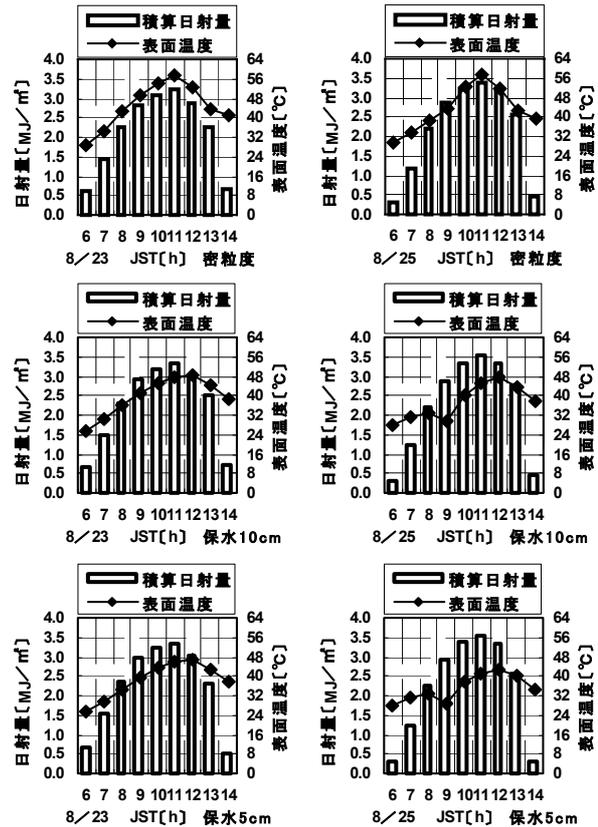


Fig.6 積算日射量と表面温度の関係 (左列: 散水なし、右列: 散水あり)

2-2. 放射収支の実測結果

Fig.7に散水を実施した日と実施していない日における日射量とアルベド(日射反射率)の関係を示す。散水を実施していない日においては密粒度舗装のアルベドが0.1程度であるのに対し、保水性舗装

は 0.3 程度と高い結果となった。散水を実施した日の保水性舗装は、散水により 0.2 以下まで低下している。このことから、散水を実施した場合は、放射に限って言えば表面温度の抑制にマイナスの効果がある。一方で、散水を行わない場合に密粒度舗装より保水性舗装の表面温度の方が低くなる要因は、アルベドにあると考えられる。今回の測定で用いた試験体に充填した保水材は、白色に近く日射を高反射し表面温度の上昇を抑制する効果があるといえる。

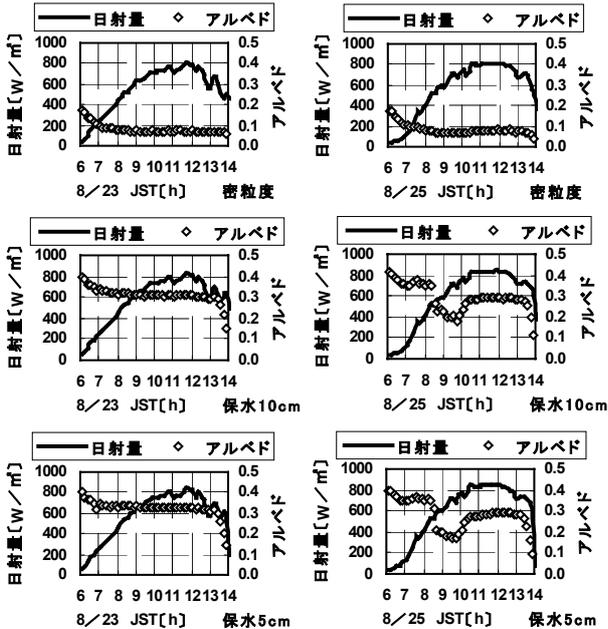


Fig.7 日射量とアルベドの関係
(左列：散水なし、右列：散水あり)

3. 舗装材の保水性能評価

3-1. 熱伝達率の現場測定とその検証

本研究では、保水性舗装の保水性能評価指標として、水面蒸発量に対する舗装材蒸発量の比で表わされる蒸発効率(式 6)を用いる。ここでは、濾紙面蒸発量を利用した物質伝達率の測定から熱伝達率を求め、密粒度舗装の熱収支を算出し検証を試みた。

$$k = E / \Delta x \quad \text{--- (式 1)}$$

k : 物質伝達率 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg}/\text{kg}))]$
 E : 蒸発速度 $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$
 Δx : 表面と大気の大気絶対湿度の差 $[\text{kg}/\text{kg}]$

$$\alpha / C = 0.83k \quad \text{--- (式 2)}$$

α : 対流熱伝達率 $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$
 C : 湿り空気の大気比熱 $[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$

$$H = \alpha(\theta_s - \theta_a) \quad \text{--- (式 3)}$$

H : 顕熱輸送量 $[\text{W}/\text{m}^2]$
 θ_s : 表面温度 $[\text{C}]$
 θ_a : 外気温度 $[\text{C}]$

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_s \quad \text{--- (式 4)}$$

L : 気化の潜熱 $[\text{J}/\text{kg}]$

$$Rn = H + G + LE \quad \text{--- (式 5)}$$

Rn : 正味放射量 $[\text{W}/\text{m}^2]$
 G : 地中熱流量 $[\text{W}/\text{m}^2]$
 LE : 潜熱輸送量 $[\text{W}/\text{m}^2]$

$$E = \beta k(x_s - x_a) \quad \text{--- (式 6)}$$

β : 蒸発効率
 x_s : 表面の絶対湿度 $[\text{kg}/\text{kg}]$
 x_a : 外気の大気絶対湿度 $[\text{kg}/\text{kg}]$

物質伝達率(k)の測定に際しては、厚さ 5mm のアクリル板に濾紙を接着させた、寸法が 60cm×60cm の試料を用いた(Fig.8)。濾紙に滴り落ちない程度の水を含ませた試料を施工した試験体付近で約 25 分間暴露し(Fig.9)、その重量変化(蒸発量)をもとに物質伝達率を算出した(式 1)。そして、風速との対応関係を求めた。濾紙面の絶対湿度を算出する際の表面温度は、濾紙内にサーミスタ温度計を挿入し、2 秒間隔でデータの収録を行った。物質伝達率を算出した後に、物質伝達と熱伝達のアナロジーを仮定し、熱伝達率(α)を算出した(式 2)。熱伝達率と舗装材の表面温度と気温から顕熱輸送量(H)を算出し(式 3)、熱収支(式 5)の残差により潜熱輸送量(LE)を求めた。

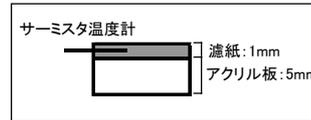


Fig.8 濾紙試料の断面



Fig.9 濾紙を用いた物質伝達率の測定

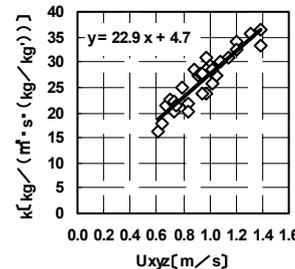


Fig.10 物質伝達率と合成風速の関係

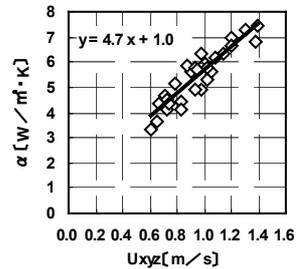


Fig.11 熱伝達率と合成風速の関係

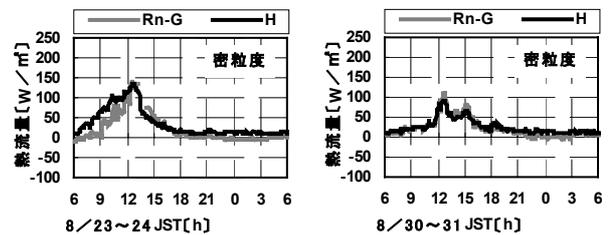


Fig.12 Rn-G と H の関係(散水を実施していない日)

Fig.10 は物質伝達率と合成風速との関係、Fig.11 は熱伝達率と合成風速との関係を示したものである。計測現場は建物が隣接しており、試験期間を通して風速が弱かったが、風速と物質伝達率との間に対応関係が確認できた。Fig.12 は熱収支の残差($Rn-G$)と濾紙の試験をもとに(式 3)から算出した顕熱輸送量(H)の関係を示したものである。ここでは、一例として散水を実施していない日の 8 月 23 日と 8 月 30 日の結果を示す。なお、30 日は天候が悪いため熱流

量の値が小さくなったが、参考までに示す。8月23日の午前には $Rn-G$ と H の値に若干の差異が見られたが、8月30日も含め両者の値は、ほぼ同程度であったため、伝達率測定と熱収支の精度が確認できた。

3-2. 蒸発効率を用いた保水性能評価

(式4)において気化の潜熱(L)を求め、熱収支式(式5)の残差により蒸発速度(E)を算出した。蒸発速度(E)と(式1)により算出した物質伝達率(k)と表面と外気の絶対湿度から蒸発効率(β)を求めた。

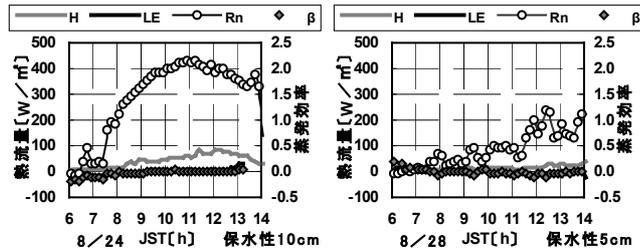


Fig.13 散水を実施していない日における蒸発効率の検証

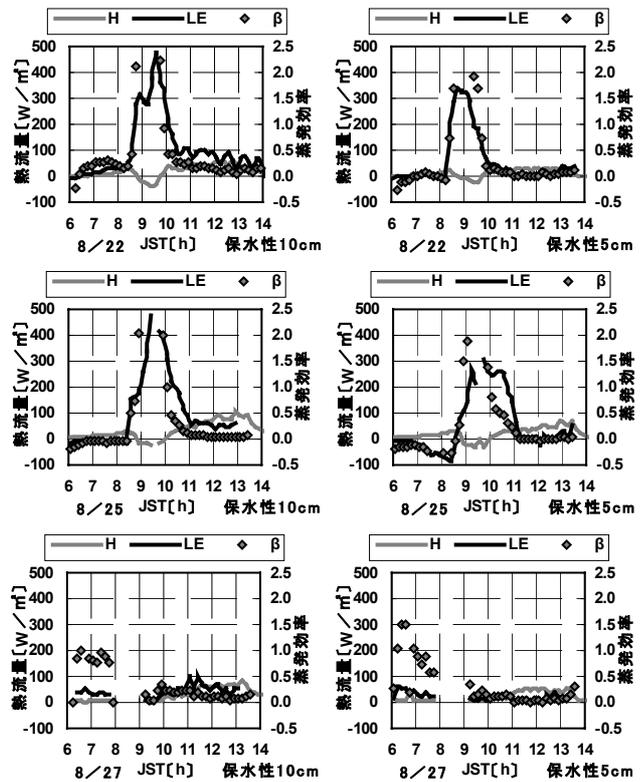


Fig.14 蒸発効率の変化 (左列：保水性 10cm、右列：保水性 5cm)

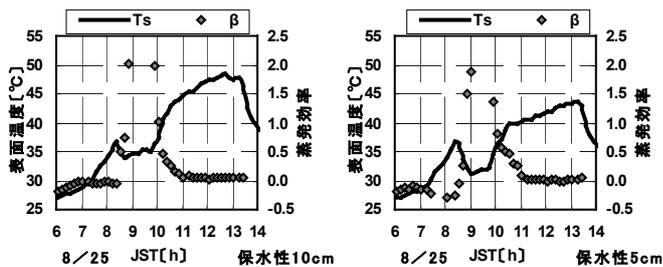


Fig.15 保水の持続性 (左列：保水性 10cm、右列：保水性 5cm)

Fig.13 は散水を実施していない日における保水性 10cm と保水性 5cm の蒸発効率を表わしたものであ

る。8月24日と28日では、正味放射量に大きな差異が見られたが、散水を行わない場合の蒸発効率は0となることが確認できた。Fig.14 は散水を実施した日における保水性 10cm と保水性 5cm の蒸発効率を表わしたものである。8月27日は、明け方の3時から降雨が観測されている。降水量は、3時から7時までで20mmであった。この日に関しては、降雨を対象とした自然状態での評価を行う。8月22日の保水性 10cm は散水の効果により潜熱輸送量が $450W/m^2$ に達し、蒸発効率は最高で2.0を超える結果となった。保水性 5cm は潜熱輸送量が $350W/m^2$ に達し、蒸発効率は、最高で2.0程度となった。25日は保水性舗装 10cm の潜熱輸送量が $450W/m^2$ を越え、蒸発効率も最高で2.0程度となった。保水性 5cm は、潜熱輸送量が $300W/m^2$ 程度となり、蒸発効率は最高で1.9程度となった。27日における保水性 5cm は、降雨時の蒸発効率が最高で1.5に達し、降雨が止んで1時間後には約0.5に、2時間後には0.5以下に減衰した。Fig.15 は25日における保水性 10cm と 5cm の表面温度と蒸発効率を表わしたものである。保水性 10cm の蒸発効率は、散水が終わる9時の段階で2.0となり、約1時間後には0.5に低下し、2時間後には0となる。保水性 5cm の蒸発効率は9時の段階で1.9となり、約1時間後には0.5程度に低下し、2時間後には0となる。保水性 10cm と保水性 5cm では蒸発効率の減衰に若干の差異が見られたが、散水終了時から0となるまでの保水持続性はおおむね2時間であることがわかった。

5. 結論

保水性舗装の性能評価試験を行った結果、散水の有無に関わらず、密粒度舗装と保水性舗装では日中の表面温度に顕著な差異が見られた。散水を行っていない場合においては、アルベドの違いが大きな要因であることがわかった。蒸発効率の推定を視野に入れ、現場で濾紙面蒸発量から物質伝達率、熱伝達率を求め、熱収支を検証した結果、熱収支式の残差 ($Rn-G$) と顕熱輸送量 (H) の値はほぼ同程度であったことから伝達率測定の精度が確認できた。保水性舗装に毎分60で1時間の散水を行った場合、保水持続性は、おおむね2時間程度であることがわかった。この性能を踏まえると、夏季日中の表面温度上昇を長時間抑制するには、散水の量を更に増加させなければ、これ以上の効果は期待できないことがわかり、実用化には検討の余地が残った。しかし、今回の一連の測定により保水性舗装の保水性能評価を行えることが明らかとなったことも一つの成果と言えよう。

審査委員(主査) 教授 成田 健一
 審査委員(副査) 教授 市橋 重勝
 審査委員(副査) 助教授 川村 清志