

蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価

EVALUATION OF WATER RETENTIVE PAVEMENT USING EVAPORATION EFFICIENCY

成田健一——*1 三坂育正——*2 国島武史——*3
中山康孝——*4 若林伸介——*5

Ken-ichi NARITA Ikusei MISAKA Takeshi KUNISHIMA
Yasutaka NAKAYAMA Shinsuke WAKABAYASHI

キーワード：
ヒートアイランド、熱収支、保水舗装、蒸発効率

Keywords:
Heat island, Heat Budget, Water retentive pavement,
Evaporation Efficiency

The performance of newly developed water retentive pavement was tested in field experiments. For the evaluation of water holding ability, on site estimation methods of evaporation efficiency was developed in this study. At first, convective mass transfer coefficient at experimental site was measured by evaporation rate from a filter paper test piece on the ground near pavement sample. Next, using analogy between mass transfer and heat transfer, sensitive heat flux at pavement surface was calculated using convective heat transfer coefficient. Finally, evaporation rate at pavement surface was estimated as a residual of surface heat budget.

1. 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。特殊舗装工法には、地下水の涵養や都市型洪水の防止を目的とした透水性舗装や、舗装表面に水膜が張ることを防ぐための排水性舗装がある。しかし、これらの舗装は表層に水分を保持する機能が無いため、持続的な蒸発冷却は望めない。一方、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、長時間の蒸発冷却を意図したものである。既往の研究例として、セラミック系保水材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。本報告の特徴は、蒸発効果を直接表す「蒸発効率」を指標に、効果の持続性を施工現場で確認できる評価手法を提案している点にある。

2. 実験概要

2-1. 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。実験室における24時間水浸試験によれば、保水材の最大吸水率は約45%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2.7			
g	1111.0	2570	26	999.9	4707	1.41	123
cm ³	370.3	2570	26	370.3	3337		

2-2. 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。

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。放射に関しては、3種類の舗装でそれぞれ長・短波放射の収支を測定した。熱流計と表面温度計測用の熱電対は、接着剤で貼り付けた後、保水性舗装に関しては充填している保水材料で被覆し、放射特性をできるだけ周囲と同化させた。

2-3. 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。

*1 日本工業大学工学部 教授 工博
(〒345-8501 南埼玉郡宮代町学園台4-1)
*2 竹中工務店技術研究所 主任研究員 博士(工学)
*3 竹中道路技術部 技術課長
*4 斎久工業 修士(工学)
*5 竹中道路技術部

*1 Professor, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.
*2 Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.
*3 Manager, Engineering Development, Takenaka Road Corporation Co.,LTD
*4 Saikyu Kogyo Co. LTD, M. Eng.
*5 Engineering Development, Takenaka Road Corporation Co.,LTD

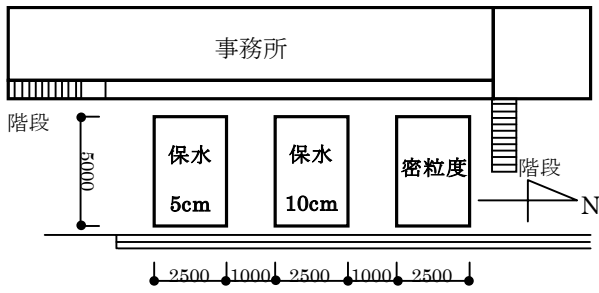


Fig.1 計測場所の平面図

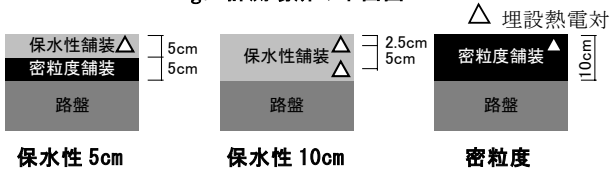


Fig.2 各試験体の断面図

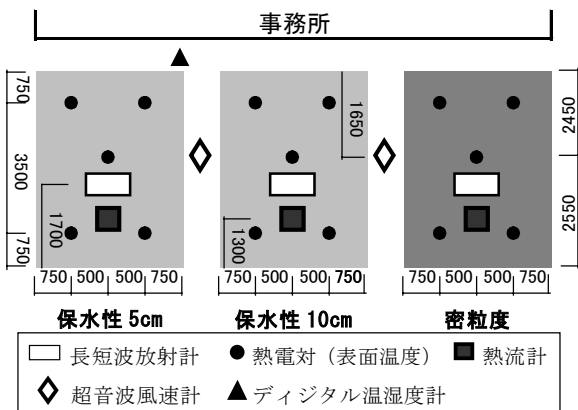


Fig.3 試験体に設置した測定機器の配置図

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

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				

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い、それ以外の日においては、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。

保水性舗装の試験方法に関しては、現状では定まったものがなく、暫定的な指針¹⁾があるのみである。それによると、散水方法に関しては、「毎分 6ℓ で 1 時間」とされているが、詳細に関しては記述がない。本試験では、とりあえずその内容に準拠する形で、毎分 6ℓ のペースで 8 時～9 時からスタートし 1 時間の散水を実施した。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。

3. 舗装材の温度特性と放射収支

3-1. 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 8 月 23 日、散水を実施した日の一例として 8 月 25 日の結果を示す (Fig.4)。

施工した試験体付近は建物が隣接しているため、12 時半以降は建物側から日影となり、表面温度に影響を及ぼしている。散水を実施した日は散水直後から温度が低下し、12～13 時頃に最高温度に達する。密粒度舗装の最高温度は 59℃ であるのに対し、保水性舗装 10cm は 47℃、保水性舗装 5cm は 44℃ となり、密粒度舗装と保水性舗装では 12℃～15℃ 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℃ であるのに対し、保水性舗装 10cm は 50℃、保水性舗装 5cm は 47℃ となり、密粒度舗装と保水性舗装とでは 9℃～12℃ 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。

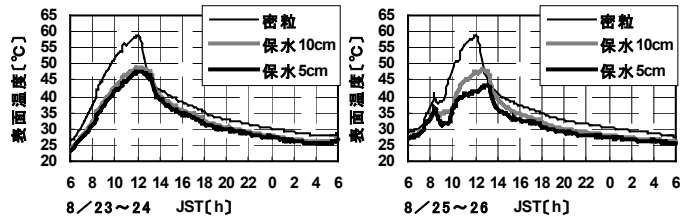


Fig.4 各試験体の表面温度 (左: 散水なし、右: 散水あり)

3-2. 放射収支の実測結果

Fig.5 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。今回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。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

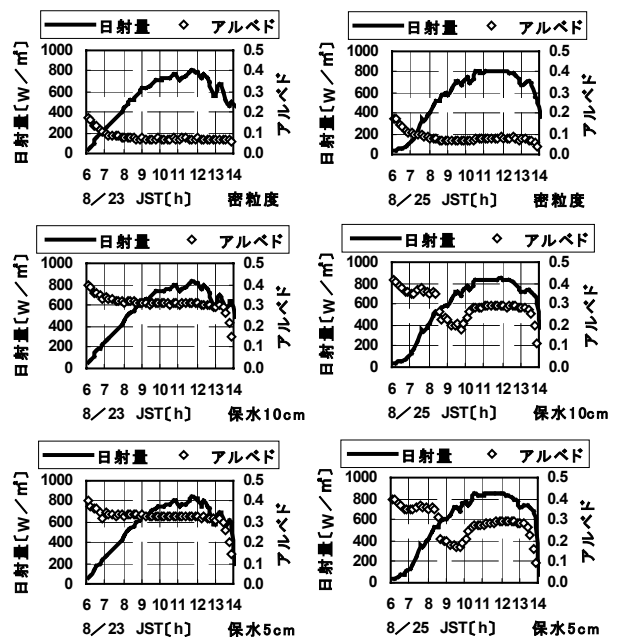


Fig.5 日射量とアルベドの関係 (左列: 散水なし、右列: 散水あり)

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。

4. 舗装材の保水性性能評価

4-1. 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²⁾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 [kg/(m²・s・(kg/kg'))]
 E : 蒸発速度 [kg/m²・s]
 Δx : 表面と大気の絶対湿度の差 [kg/kg']

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

α : 対流熱伝達率 [W/m²・K]
 C : 湿り空気の比熱 [J/kg・K]

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

H : 顕熱輸送量 [W/m²]
 θ_s : 表面温度 [°C]
 θ_a : 外気温度 [°C]

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

L : 気化の潜熱 [J/kg]

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

Rn : 正味放射量 [W/m²]
 G : 地中熱流量 [W/m²]
 LE : 潜熱輸送量 [W/m²]

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

β : 蒸発効率
 x_s : 表面の絶対湿度 [kg/kg']
 x_a : 外気の絶対湿度 [kg/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貼り付けた 60cm×60cm の試料を用いた(Fig.6)。濾紙に滴り落ちない程度の水を含ませ、施工した試験体付近で 15~30 分間暴露し(Fig.7)、その重量変化(0.1g 単位で計測)から物質伝達率を算出した(式 1)。重量変化量は平均で 37.4 g であった。蒸発面の絶対湿度の算定に必要な表面温度は、濾紙の表面直下に直径 1mm のテフロン皮膜のサーミスタ温度計を側面から挿入して測定している。なお、熱画像の測定を随時行い、測定中に濾紙資料面内に表面温度のむらがないことを確認している。延べ 4 日間で、計 29 ケースのデータを取得し、物質伝達率と近傍高さ 85cm の風速との対応関係を求めた(Fig.8)。次に、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)。Fig.9 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、粉塵等、測定環境が悪かったにもかかわらず、風速と伝達率との間で明確な対応関係が得られた。通常の熱収支残差として求める顕熱フラックスから対流熱伝達率を求める方法に比べ、ばらつきの少ない良好な関係が得られて

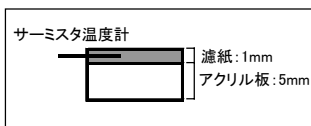


Fig.6 濾紙試料の断面

Fig.7 濾紙を用いた物質伝達率の測定

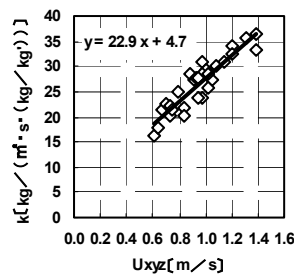


Fig.8 物質伝達率と合成風速の関係

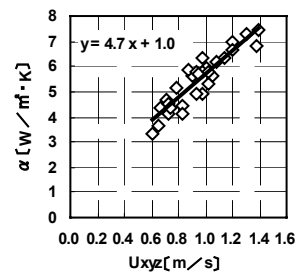


Fig.9 熱伝達率と合成風速の関係

おり、対流成分を直接測定する濾紙法の優位性が示されたといえる。

Fig.9 の関係により、風速のデータから実験期間中の全ての期間について熱伝達率が得られることになる。そこで、この熱伝達率および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(式 5)の残差により潜熱輸送量(LE)を求めた。

Fig.10 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、実験精度を確認するため、散水を実施していない 8 月 23 日と 8 月 30 日の密粒度舗装における結果を示す。なお、30 日は天候が悪かったため熱流量の絶対値が小さくなっている。この間は、乾燥状態で潜熱フラックスはないと仮定できるため、 $Rn-G$ は顕熱フラックス H と一致するはずである。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、ほぼ同程度で推移している。このことは、全く独立した手法で推定したフラックスがほぼ一致したことを意味しており、濾紙法を用いた伝達率測定と熱収支の精度が確認できた。

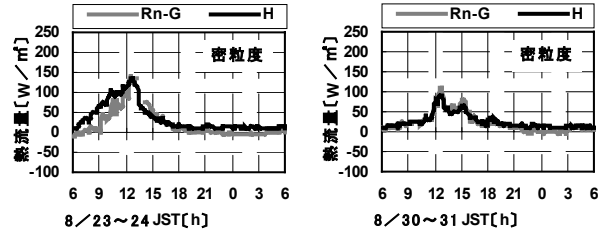


Fig.10 $Rn-G$ と H の関係 (散水を実施していない日)

4-2. 蒸発効率を用いた保水性性能評価

(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.11 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。

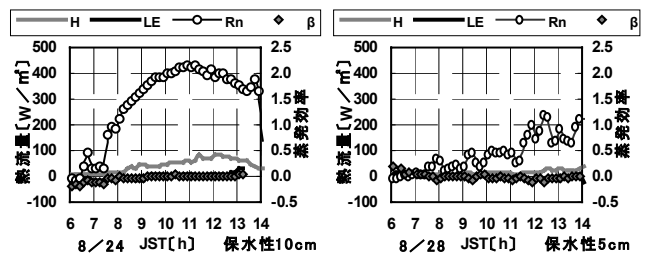


Fig.11 散水を実施していない日における蒸発効率の検証

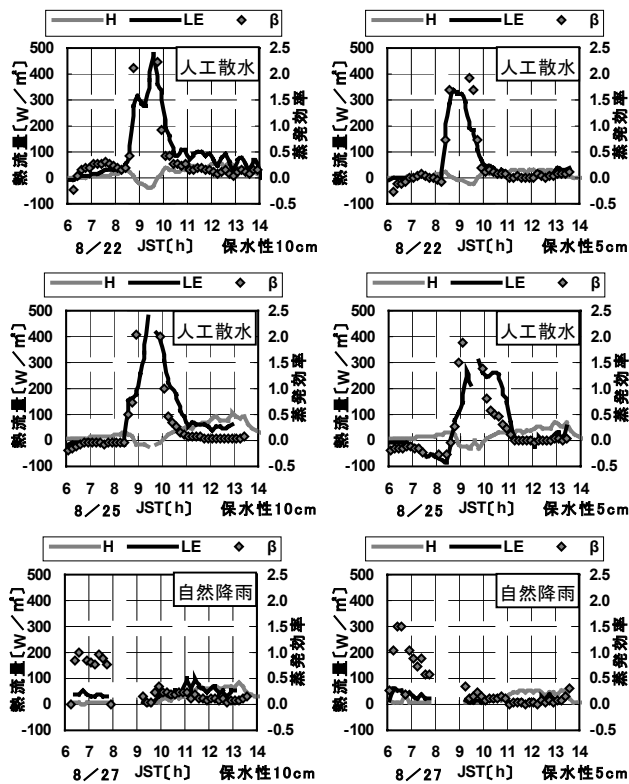


Fig.12 蒸発効率の変化(左列：保水性 10cm、右列：保水性 5cm)

Fig.12 は、散水を実施した日（8月22日と25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。また参考として、自然降水があった 8月27日の結果も合わせて示した。27日の雨は、明け方の 3時から 7時までで、降水量は 20mm であった。8月22日の保水性 10cm は、散水の効果により潜熱輸送量が $450\text{W}/\text{m}^2$ に達し、蒸発効率は最高で 2.0 を超えている。保水性 5cm は潜熱輸送量が $350\text{W}/\text{m}^2$ に達し、蒸発効率は、最高で 2.0 程度である。25日は保水性舗装 10cm の潜熱輸送量が $450\text{W}/\text{m}^2$ を越え、蒸発効率は最高で 2.0 程度、保水性 5cm は、潜熱輸送量が $300\text{W}/\text{m}^2$ 程度となり、蒸発効率は最高で 1.9 程度となった。一方、自然降水の 27日の結果では、保水性 5cm は蒸発効率が最高で約 1.5、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。また、保水性舗装 10cm では、蒸発効率の最大は 1.0 程度に抑えられている。

原理的には、蒸発効率が 1 を超えることはありえないが、今回の結果では、人工散水開始後 10~20 分で 1 を超える結果となった。今回の散水方法では、散水した水が昇温して試験表面外へ流出するため、この流出水が持ち去る熱量が本報の方法では蒸発潜熱にカウントされてしまう。このことは、蒸発効率 β の過大評価につながる。

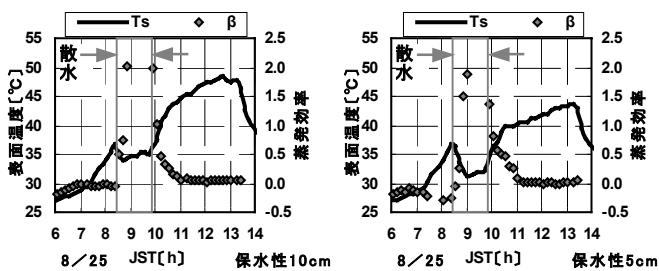


Fig.13 保水の持続性(左列：保水性 10cm、右列：保水性 5cm)

人工散水された水量を試験体の面積で割ると、水柱換算で 14.4mm となる。一方、実測から推定される散水後の蒸発量は、Fig.12 より潜熱輸送量として $2.2\text{MJ}/\text{m}^2$ ($\approx 300\text{W}/\text{m}^2 \times 2$ 時間) 程度、水柱換算すると約 0.9mm で、全量蒸発したと仮定しても、散水した水の 1/15 程度に過ぎない。大半の水は系外に流出している。

もう一つの要因として、今回は穴を開けたホースを用い、地盤の傾斜にしたがって流下させたため、舗装面上にいくつかの「水みち」が形成され、試験表面を一様に濡らすことができなかった。その結果、熱電対で測定された表面温度や熱流計による G が、必ずしも試験表面を代表していなかった可能性がある。

以上の考察は、多量の流出が見られず、濡れ方が一様に近い自然降雨後の蒸発効率が、極端に大きくなっていないという結果からも裏付けられるといえる。従って、ピーク値よりもそれ以降の乾燥過程における蒸発効率の変化が非常に明確に追跡できている点に注目すべきで、持続性の検証という意味では非常に有効であるといえる。

最後に、Fig.13 は 25 日における保水性 10cm と 5cm の表面温度と蒸発効率 β を表わしたものである。両者の変化はよく対応していることが確認できる。図中には散水を施した時間帯を併示したが、散水開始直後（吸水が盛んに起こっていると思われる）には β が 1 を越えることはなく、また散水終了後も直ちに β がほぼ 1 前後に急減している。このことは、流出水によって系外へ持ち去られる熱量が β の過大評価の要因であったとした先の考察を裏付けている。

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約 2 時間となっている。保水材の最大吸収率から算定される保持可能水量は、舗装厚 5cm で水柱 4.5mm 相当となる。十分な吸水が行われれば、まる 1 日は蒸発が持続する量である。施工状態での吸水性能が、蒸発冷却効果の持続性を大きく左右するといえる。

5. 結論

本報では、現場で濾紙面蒸発量から物質伝達率を求め、熱伝達と物質伝達のアナロジーを利用して蒸発効率の時間変化を追跡する手法を提案した。測定の結果、熱収支式の残差 ($R_n - G$) と顕熱輸送量 (H) の値はほぼ同程度であったことから本測定法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、今回の試験体では、保水持続性はおおむね 2 時間程度であるという結果となった。しかしながら、この時間は散水方法に大きく左右されることが指摘され、保水性能の客観的評価には的確な散水方法の検討が不可欠である。本報の提案した評価手法は決して実験室的なものではなく、実際に幹線道路などへ施工した場合等でも、現場への適用が可能である。実際の施工状態での性能評価が可能である点が、大きな利点といえる。今後は、蒸発効率の減衰過程のデータをさらに蓄積し、蒸発効率の特性曲線³⁾を求めるなど、保水性能の定量化とモデル化も併せて検討していきたい。

参考文献

- 1) 保水性舗装技術研究会「保水舗装 技術資料」, 2002.12
- 2) 成田健一・野々村善民・小笠 顕: 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その1) 日本建築学会計画系論文集, 491, 49-56, 1997.1
- 3) 萩島理・谷本潤・片山忠久・月松孝司: 降水後の人工被覆面からの蒸発量予測簡易モデルの構築, 日本建築学会計画系論文集, 539, 83-88, 2001.1