

# 雨水貯留と毛管吸水に着目した蒸発冷却舗装システムにおける 夏季屋外実験による舗装体の形状と断面構成の検討

A Study of Pavement Body Configurations of the Evaporative Cooling Pavement System with a Focus on Rainwater Retention and Capillary Absorption through a Summer Outdoor Experiment

梅干野 晁\*<sup>1</sup>      円井 基史\*<sup>2</sup>      松本 明広\*<sup>3</sup>      浅輪 貴史\*<sup>1</sup>  
Akira Hoyano      Motofumi Marui      Akiriho Matsumoto      Takashi Asawa

\*<sup>1</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

\*<sup>2</sup> 金沢工業大学環境・建築学部 College of Environmental Engineering and Architecture, Kanazawa Institute of Technology

\*<sup>3</sup> ㈱日建設 Nikken Sekkei Ltd.

Corresponding author: Motofumi Marui, mmarui@neptune.kanazawa-it.ac.jp

## ABSTRACT

This paper discusses a pavement body configuration of the evaporative cooling pavement system. The evaporative cooling duration of pavement systems, which were designed with a focus on rainwater retention and capillary absorption, was investigated through a summer outdoor experiment. The results from this experiment showed the following: (1) Surface temperature of a system which has pavement blocks with arched void kept low for 14 days or longer. The difference between the surface temperature and air temperature were below 5 degrees C in the daytime. It is because the water retention capacity is enough and the distance of pavement surface and waterproof layer is shorter than the pavement capillary absorption height. (2) Evaporative cooling duration of pavement systems with a thick roadbed was about 5 days. It shows that there is stay water (not used for evaporative cooling) in the system after capillary absorption channel from the pavement downside to the surface are disrupted.

キーワード: 蒸発冷却, 舗装システム, 毛管吸水, 屋外実験, 雨水貯留

**Key Words** : Evaporative cooling, Pavement system, Capillary absorption, Outdoor experiment, Rainwater retention

## 1. はじめに

ヒートアイランド対策の一つとして、雨水を保水し、蒸発冷却効果により夏季の暑熱環境を緩和する保水性舗装が注目され、研究・開発が進行している<sup>(1)~(7)</sup>。しかしながら、ほとんどの保水性舗装においては保水容量が十分でなく、蒸発冷却の持続期間が短いことが課題として挙げられる。ポンプ等により強制的に給水を行うもの、貯水槽から導水シート等により吸水を行うものなど、保水・給水方法の改善を図る舗装システム<sup>(4), (5), (7)</sup>もいくつか考案されているが、普及には至っていない。

これまで筆者らは、歩道や広場等において雨水を面的に貯留し、舗装体の毛管現象により吸水・蒸発を長期間持続させる「蒸発冷却舗装システム」(以下、本システムとする)の基本構成を提案し、その熱・水収支特性を屋外実験により把握してきた<sup>(8)~(10)</sup>。本システムの基本構成と考慮すべき項目を図1に示す。雨水を面的に保水・貯留し、舗装体

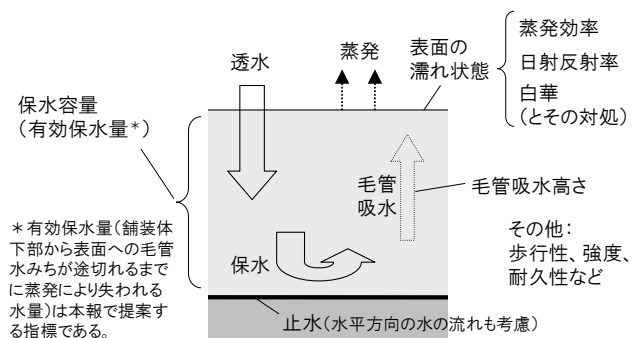


図1 蒸発冷却舗装システムの基本構成と設計する上で考慮すべき項目

の毛管現象により連続的に吸水・蒸発を行うことは、既往の舗装システムに比べて貯水容量、維持管理、無動力、雨水利用の観点で有効であると考えている。しかし、その舗装体(舗装ブロックおよび路盤)部分の具体的設計、および、舗装表面における白華(炭酸カルシウムの析出)の対策に

については、本システムの実用化に向けた課題としてきた。

そこで本報では、舗装体の具体的設計に向けて、舗装体の形状と断面構成について屋外実験により検討を行う。具体的な内容は以下の通りである。1) 本システムを東京都市圏で適用する場合を対象として、夏季の降雨特性を踏まえた上で、本システムの保水容量に関する設計目標を提示する。2) 舗装体の形状と断面構成についての設計・提案を行い、実験試験体を作製する。3) その試験体を用いて夏季屋外実験を行い、舗装表面の濡れ状態や保水量、表面温度と気温との差に着目して蒸発冷却の持続性を明らかにする。これにより、上記の設計目標に達しているかを確認する。

## 2. 蒸発冷却舗装システムの設計目標

### 2.1 降雨特性と保水容量に関する検討

(1) 東京における夏季の降雨特性 本システムでは夏季に散水を行わずとも、できるだけ自然降雨のみで長期間に渡って蒸発が持続できることを目標としている。そこで保水容量に関する設計目標を検討するため、本システムを東京都市圏で適用することを想定し、東京管区気象台（千代田区大手町）の2000～2009年（10年間）における7～9月（夏季）の降雨特性を調査した。

この3ヶ月間の積算降雨量は、最も多い年で約710mm、最も少ない年で約300mmであり、平均では520mm程度であった（年間降雨量の平均は約1590mm）。この520mmを7～9月の92日間で除すると、1日あたり約5.7mmとなる。既報<sup>(8)</sup>、<sup>(9)</sup>の屋外実験において、夏季晴天日で舗装体の表面がほぼ完全濡れ面（以下、湿潤状態とする）の場合、日向日積算蒸発量は3～6mm（kg/m<sup>2</sup>）であることを確認している（後述の図3(b)）。期間中、曇天や雨天も含まれることを考慮すれば、夏季における平均的な積算降雨量は、本システムの積算蒸発量をまかなえる水量であると言える。

図2に、この10年間の7～9月における連続無降雨期間（1日あたり0.5mm以上の降雨がない連続日数）の日数別の出現頻度を示す。ここでは、3日間以上連続した無降雨期間を抽出した。また先述したように、晴天日で舗装体が湿潤状態の場合、日向日積算蒸発量が3～6mm程度であることより、1日あたり6mm以上の降雨がない連続日数のデータも合わせて示した。調査結果として、10年間における夏季の最長の無降雨期間は、最も長い年で20日間、10年間の平均では14.4日であった。また、14日間以上連続で1日あたり6mm以上の降雨がない期間について、出現頻度は10年間で12回、累積日数では約250日であった。対象とした10年間の夏季3ヶ月間においてこの日数は27%に相当し、残りの7割強の期間では14日以内に一度は6mm以上の降雨日が認められた。

(2) 実験試験体における蒸発量と降雨量 蒸発量と降雨量との関係を具体的に確認するため、既報<sup>(8)</sup>にて行った屋外実験（神奈川県横浜市）より、常に湿潤状態に保った舗装試験体（吸水型試験体）（周囲に遮蔽物のない日向日に設置）

の蒸発量と降雨量について、2004年8～9月のデータを図3に示す。この2ヶ月の月間降雨量は平年並みであった。図3(a)より、断続的に日積算で30～60mm程度のまとまった降雨があることが分かる。2ヶ月を通して見ると、累積降雨量は約410mm、吸水型試験体の累積蒸発量は約210mmであり、累積降雨量が200mm程度上回っている（図3(c)）。

日積算蒸発量が日積算降雨量を上回る日が連続している8月前半（16日間）と9月中旬（14日間）の期間に着目すると、その期間内における「累積蒸発量-累積降雨量」の最大値はそれぞれ68mm、48mmであった。これにより、舗装システム内におよそ70mm（kg/m<sup>2</sup>）程度の保水容量を確保すれば、同様の期間において、蒸発に必要とされる水量を自然降雨のみでまかなえる可能性が示唆された。

(3) 保水容量に関する設計目標 先述の2.1(1)で検討

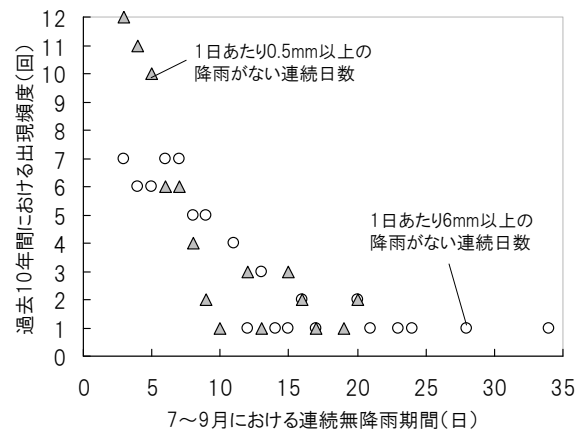


図2 夏季（7～9月）における連続無降雨期間の出現頻度（2000～2009年の東京の気象台データにて3日以上無降雨期間を抽出）

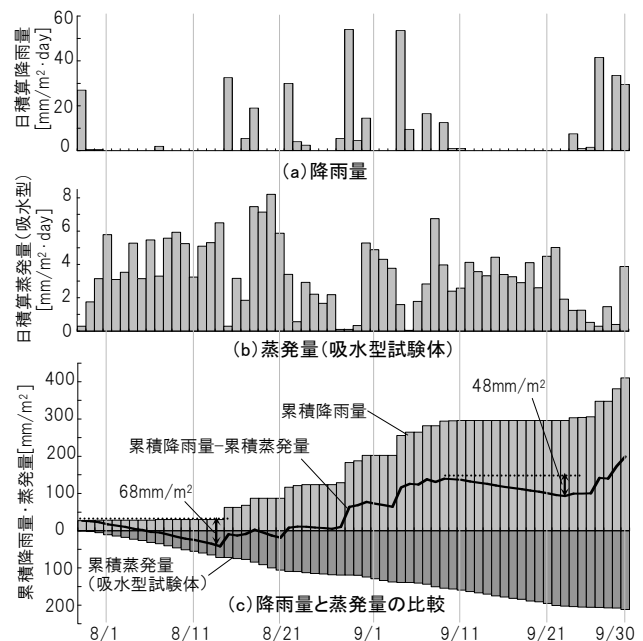


図3 常に湿潤状態に保った舗装試験体（吸水型試験体）の蒸発量と降雨量の比較（2004年・横浜）<sup>(8)</sup>

した東京の10年間の降雨特性からも、夏季の間、蒸発量をまかなえる(積算)降雨量があること、そして7割以上の期間で2週間(14日間)に一度は6mm以上の降雨があることを確認した。上記2.1(1)、(2)より、東京都市圏の夏季において、2週間の累積蒸発量に相当する水量(日向で適用する場合、1日の蒸発量を、図3(b)の晴天日実測値平均約 $5\text{kg}/\text{m}^2$ として、14日間で $70\text{kg}/\text{m}^2$ 程度)を本システムで確保できれば、先述した7割以上の期間<sup>注1)</sup>で、降雨のみで蒸発が持続すると推測できる。以上より、本研究では蒸発冷却舗装システムの保水容量について、日向で用いる場合<sup>注2)</sup>、設計目標を $70\text{kg}/\text{m}^2$ と設定する。

## 2.2 設計目標の整理

以上の検討を踏まえ、本システムの蒸発冷却効果の持続性に関する設計目標を以下に示す。

- (1) 夏季における降雨を舗装システム内に透水し、集水する。[透水性能]
- (2) 夏季の連続無降雨期間(約2週間)の蒸発量に相当する水量(日向に適用する場合 $70\text{kg}/\text{m}^2$ 程度)以上を保水・貯留する。[保水・止水性能]

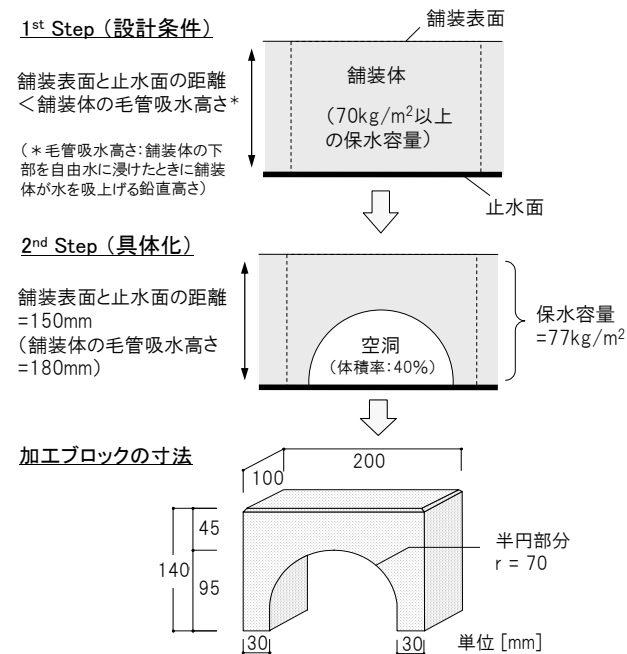


図4 舗装システム具体化の考え方(ブロック加工・アーチ型)

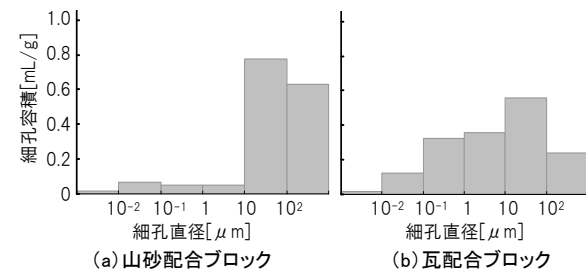


図5 実験に使用した舗装ブロックの細孔径分布

(3) 乾燥過程において、保水した雨水を無駄なく舗装表面まで吸上げる。[毛管吸水性能]

本報では、主に(2)と(3)について検討するための屋外実験を行う。(2)の止水性能について、ある程度広い面積で施工を行う場合、水平方向の水の流れを考慮する必要があるが、実験上は鉛直一次元として扱った。なお、既報<sup>(8),(9)</sup>の屋外実験において、(1)の透水性能に関して問題は見られなかったが、降雨強度と表面流出量の関係などについては今後の検討課題とする。

## 3. 舗装体の形状と断面構成の考案

前章で検討した設計目標を踏まえ、夏季の間、雨水利用のみで蒸発冷却効果を持続させる舗装システムの具体化を行う。 $70\text{kg}/\text{m}^2$ 以上の保水容量を確保すること、そして、保水した水を有効的に表面に吸上げるよう舗装表面と止水

表1 試験体の概要

試験体の名称	従来・路盤改良型	従来・ブロック厚型	ブロック加工・隅切り型	ブロック加工・アーチ型
設計の考え方	従来の舗装断面を基本とし、路盤(砕石)に古紙を混ぜて毛管吸水性能を向上	従来の舗装断面を基本とし、ブロック厚さを大きくして毛管吸水性能を向上	舗装表面と止水面との距離を毛管吸水高さ以下とし、ブロックに空洞を設けて保水	舗装表面と止水面との距離を毛管吸水高さ以下とし、ブロック空洞を大きくして保水容量を確保
システムの概要	断面模式図	断面模式図	断面模式図	断面模式図
保水容量(予備実験により導出)	$91\text{kg}/\text{m}^2$	$68\text{kg}/\text{m}^2$	$47\text{kg}/\text{m}^2$	$77\text{kg}/\text{m}^2$
保水容量の内訳(材料空隙率により導出)	・ブロック:11 ・モルタル:6 ・砕石:74 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	・ブロック:22 ・モルタル:6 ・砕石:40 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	・ブロック:19 ・空洞:24 ・砕石:4 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	・ブロック:17 ・空洞:56 ・砕石:4 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
舗装表面と止水面との距離	290mm	250mm	130mm	150mm
舗装ブロック	形状	形状	形状	形状
寸法(長辺×短辺×厚さ)	$200 \times 100 \times 60\text{mm}$	$200 \times 100 \times 120\text{mm}$	$200 \times 100 \times 120\text{mm}$	$200 \times 100 \times 140\text{mm}$
配合(空隙率)	瓦配合(18%)		山砂配合(20%)	
強度(用途)	曲げ強度 $3.0\text{MPa}$ 以上 (交通荷重の小さい広場や歩道等での使用を想定)			
日射吸収率	表面が湿潤状態のときで0.9、乾燥状態では0.8		表面が湿潤状態のときで0.9、乾燥状態では0.8(詳細は参考文献(10)を参照)	
毛管吸水高さ	180mm程度 (自由水に浸けたときに水を吸上げる鉛直高さ)			
クッション材	モルタル(厚さ:30mm、空隙率:20%、毛管吸水高さ:30mm以上)		なし	
路盤	材料	7号砕石(空隙率:40%、毛管吸水高さ:100mm以下)		
厚さ	200mm	100mm	10mm	10mm
止水層	防水シート			

(毛管吸水高さは、各部材単体での測定による。表中の止水層および断面図は止水試験体のものである。各試験体において、路盤底面から排水を行う排水試験体も別途作製した)

面との距離が舗装体の毛管吸水高さより小さくなることに留意した。そのためには、舗装ブロック内に大きな空隙(空洞)を設け、自由水としてより多くの水量を貯留するのが有効だと考えた。さらに強度やブロック成型過程も考慮した上で、図4に示すように、舗装ブロック下部にアーチ状の空洞を設けて雨水を貯留する形状を考案した。

ここでの舗装材は、毛管吸水性能に優れた、既報<sup>(8)</sup>、<sup>(9)</sup>で用いたセメント系多孔質ブロックと同等のもの(図5)を用いる。本研究では、舗装ブロックを自由水に浸けたときに水を吸上げる鉛直高さを「毛管吸水高さ」とし、毛管吸水性能を示す指標として用いている。上記ブロックの毛管吸水高さは、日射の当たる環境下で180mm程度である。舗装表面と止水面の距離を150mmとし、空洞部分の体積率を40%とすることで、保水容量77kg/m<sup>2</sup>を確保できる試算となった。この舗装材を用いてアーチ状のブロックを製作し、実験試験体「ブロック加工・アーチ型」(以降、アーチ型とする)を作製した(表1, 図6)。

上記で提案した舗装システムに加え、本研究では表1に示す3種の試験体を考案・作製した。「ブロック加工・隅切り型」試験体(以降、隅切り型)は、アーチ型試験体と同様、ブロック形状を加工して空洞内に水を貯留するものである。ブロックの成型がより容易になるよう考慮した形状であるが、システム内の保水容量は47kg/m<sup>2</sup>と小さい。「従来・路盤改良型」試験体と「従来・ブロック厚型」試験体は、ブロック下に厚めの路盤(碎石)を持つ従来の保水性舗装断面を基本として考えたものである。前者(路盤改良型)は、路盤での保水・毛管吸水能力を高めるため、厚さ200mmの路盤碎石に吸水性の高い古紙を混ぜた。後者(ブロック厚型)は、路盤の厚さを100mmに減らし、ブロックの厚さを120mmと大きくしたものである。

#### 4. 夏季屋外実験の方法

##### 4.1 試験体の概要

実験試験体の概要を表1に、断面図と平面図の一例(アーチ型(止水))を図6に示す。ブロック加工型2種(アーチ型, 隅切り型)の試験体においては、既報で用いたブロックと同様の配合である山砂配合ブロックを、従来型2種(路盤改良型, ブロック厚型)の試験体では、廃材の瓦を用いた瓦配合ブロックを用いた(図5)。予備実験において、両者に毛管吸水性能の差は見られず、また湿潤状態における屋外環境下での蒸発量の違いも認められなかった。

設計目標で述べたように本システムは止水することを前提としているが、比較および乾燥過程における表面濡れ状態(後述)把握のため、止水をしない試験体(排水試験体: 路盤下で排水)も合わせて作製した。また、山砂・瓦配合ブロックの湿潤状態における蒸発量を把握するため、既報<sup>(8)</sup>で作製した吸水型試験体(常に水位を高く保って連続的に吸水・蒸発を行う試験体)での測定も並行して行った。

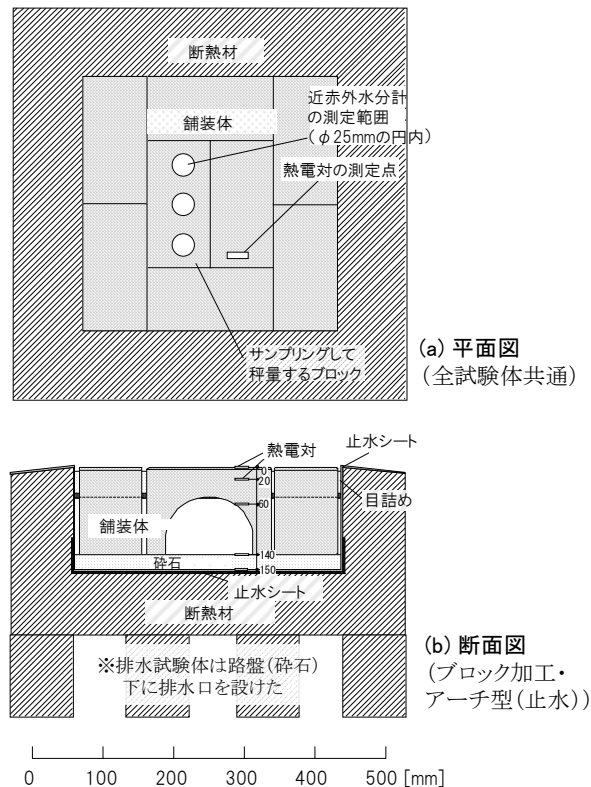


図6 試験体の平面・断面図  
(ブロック加工・アーチ型(止水))

表2 測定項目

区分	測定項目	測定装置	備考	測定期間	測定間隔
舗装体の熱収支	表面温度	φ0.1mmT熱電対	ブロック表面に設置	全期間	1分
	鉛直断面温度	φ0.3mmT熱電対	深さ20,60,120(アーチ型のみ150)mm地点、および路盤底面に設置		
	表面温度分布	赤外線放射カメラ(8~14μm, 1.5mrad)		短期集中的に計測	
舗装体の水収支	蒸発量	大型重量計(ロードセル式、秤量300kg、分解能2g、秤量皿600×800mm)	吸水型試験体 <sup>(1)</sup> のみ測定	全期間	1分
	ブロックの体積含水率	小型重量計(分解能:0.2g)	ブロック1体をサンプリングして秤量		
	表面の濡れ状態	近赤外水分計 デジタルカメラ	定点3点で手動測定 表面の濡れ/乾きによる色の濃淡を撮影	短期集中的に計測	
気象条件等	水平面全日射量	サーモパイル式日射計(測定波長:0.3~2.8μm)	周囲に遮蔽物のない場所に設置	全期間	1分
	降雨量	転倒升式雨量計(分解能:0.5mm)	周囲に遮蔽物のない場所に設置		
	気温	通風筒付乾湿球温度計	試験体近傍に設置		
		φ0.1mmT熱電対	通風筒付乾湿球温度計の通風筒内に設置		
	相対湿度	通風筒付乾湿球温度計	乾球温度と湿球温度より算定		
		電子式高分子湿度センサ	通風筒付乾湿球温度計の通風筒内に設置		
風向・風速	プロベラ式風向風速計(起動風速:0.3m/s)	周囲に遮蔽物のない場所に設置			

## 4.2 測定項目・方法

測定項目を表2に示す。主な測定方法を以下に説明する。

(1) **表面温度および断面温度** ブロック表面温度は、線径0.1mmT型熱電対にて測定した。また短期集中的に赤外線放射カメラにて表面温度分布を把握した。鉛直断面温度は、基本的に深さ20, 60, 120(アーチ型のみ140)mm, 路盤底において、線径0.3mmT型熱電対にて測定した。熱電対感温部は劣化防止のためシリコンで防水処理を施した。

(2) **表面の濡れ状態(表面濡れ率)** 舗装表面の濡れ状態は、蒸発効率あるいは日射吸収率に影響を及ぼす重要なパラメータの一つである。この表面濡れ状態は、表面近傍の含水率にて定量化することが最も適切な方法だと考えられるが、蒸発に寄与する表面近傍の微小厚さの含水率を直接特定(測定)することは困難である。そこで表面近傍の含水状態を測定するにあたって、近赤外域の水の吸収波長帯(1.2, 1.45, 1.94 $\mu$ m)を利用した近赤外水分計(ケツト科学研究所製, KJT-100)により、相対的な表面濡れ状態を測定し、指標化する<sup>(8)</sup>。

近赤外水分計の測定は、舗装表面の濡れ状態の分布を考慮して定点3点(1点の測定範囲は直径25mmの円内)(図6(a))にて行い、その平均値を採用した。平均した測定値は、式1に示すように、飽和含水状態における値を1、絶乾状態における値を0となるよう線形内挿で換算し、その値を「表面濡れ率」とした。

$$\omega = (x - L_d) / (L_w - L_d) \quad \dots (式1)$$

ここで、 $\omega$ : 表面濡れ率[-],  $x$ : 任意の含水状態における近赤外水分計の指示値[-],  $L_w$ : 飽和含水状態における近赤外水分計の指示値[-],  $L_d$ : 絶乾状態における近赤外水分計の指示値[-]。

なお、本実験で用いた山砂配合ブロックとほぼ同配合のブロックについて、既報<sup>(10)</sup>において表面濡れ率と蒸発効率、および日射吸収率との関係を求めている。また本報では、表面濡れ率に関して、日中(およそ午前9時~午後17時)の測定データについて扱う。夜間は吸湿(毛管凝縮)等によって表面が濡れ戻る現象が見られたが、この部分の詳細は既報<sup>(10)</sup>を参照されたい。

(3) **舗装ブロックの体積含水率** 各試験体において、舗装ブロックの体積含水率と表面濡れ率との関係を把握するため、日中2~3時間おきにブロック1体をサンプリングし、秤量法で体積含水率を求めた。サンプリング時に表面濡れ率や蒸発量へ影響がないよう配慮した。

上記のうち、赤外線放射カメラ(表面温度分布)、近赤外水分計(表面濡れ率)、ブロックの秤量(体積含水率)を除いては、測定間隔1分間で自動計測を行い、データはロガーを介してパソコンに収録した。

実験場所は、周辺地物から受ける日影等の影響が少ないことを考慮し、東京工業大学構内(神奈川県横浜市緑区)の2階建て建物の屋上とした。測定は2005年7月下旬から2ヶ月間行った。

## 5. 実験結果と考察

### 5.1 蒸発冷却性能

考案した舗装システム(4試験体(止水))について、蒸発量が最も多い時期の蒸発冷却性能を確認するため、晴天日が比較的続いた8月1日から22日を抽出し、分析・考察を行う。気温、相対湿度、日射量、雨量および、表面温度と気温との差、さらに表面濡れ率の推移を図7に示す。

(1) **散水・気象条件等** 7月31日の夜に、各試験体に最大の保水量となるように十分な散水を行った。降雨としては、8月13日に7.5mm, 16日に5mmの降雨量があった。また8月2日, 8日, 12日にそれぞれ0.5mm, 14日に1.5mmのわずかな降雨が認められた。8月23日以降は、数日間まとまった降雨が連続した。

8月3~7日は気温の高い日が連続した(最高気温の平均は36.9 $^{\circ}$ C)。8月17~21日は日射量が比較的多い。風速は期間中、弱風(時間平均風速は2m/s程度以下)であった。

なお8月8日夜~11日朝の間は、事情により試験体をビニールシートで覆ったため、この期間は欠測扱いとする<sup>(注3)</sup>。

(2) **表面の濡れ状態** 各試験体における日中の表面濡れ状態の変化を、表面濡れ率により確認する(図7(d)~(g))。路盤改良型は、8月1~4日で表面濡れ率が約0.9から0.5程度までに低下し、それ以降8日まで0.5程度で推移している。8月17~21日は0.4から0.2へと低下している。ブロック厚型および隅切り型について、表面濡れ率変化の傾向は、路盤改良型と概ね似ているが、低下の度合いはより緩やかであった。8月1~8日に着目すると、ブロック厚型は、約0.9から0.5程度に直線的に低下し、隅切り型は約0.9から0.7程度に低下している。

アーチ型は、期間中を通して表面濡れ率は0.9程度を維持しており、表面が常に濡れた状態であった。これはシステム内の保水容量が十分で、かつ毛管吸水速度が蒸発速度を上回っていたことを示している。また実際に期間中、ブロック空洞内に自由水が存在していたことを目視で確認した。対して隅切り型では、8月18日の時点で、ブロック空洞内の自由水は確認できなかった。

(3) **舗装表面温度と気温との差** 蒸発冷却効果を確認するため、舗装表面温度と気温との差(以下 $\Delta T$ )に着目して考察する。路盤改良型では、8月1~5日において、 $\Delta T$ の最大値は各日とも午後13時頃で5~7 $^{\circ}$ C程度であったが、8月6~8日の間に約7 $^{\circ}$ Cから10 $^{\circ}$ C程度にまで増加している。8月17~21日では、表面濡れ率は0.3から0.2程度に低下し、 $\Delta T$ の最大値は約10 $^{\circ}$ Cから15 $^{\circ}$ C程度(舗装表面温度は40~45 $^{\circ}$ C程度)に増加した。

ブロック厚型と隅切り型における $\Delta T$ (表面温度と気温との差)は、路盤改良型とほぼ同様の傾向を示した。8月1~5日にかけて隅切り型の $\Delta T$ は3~4 $^{\circ}$ C程度と、従来型の2試験体(路盤改良型, ブロック厚型)と比べて低い。これはこの期間、隅切り型の表面濡れ率が比較的高く、より強い蒸発冷却効果が得られたためだと言える。また隅切り

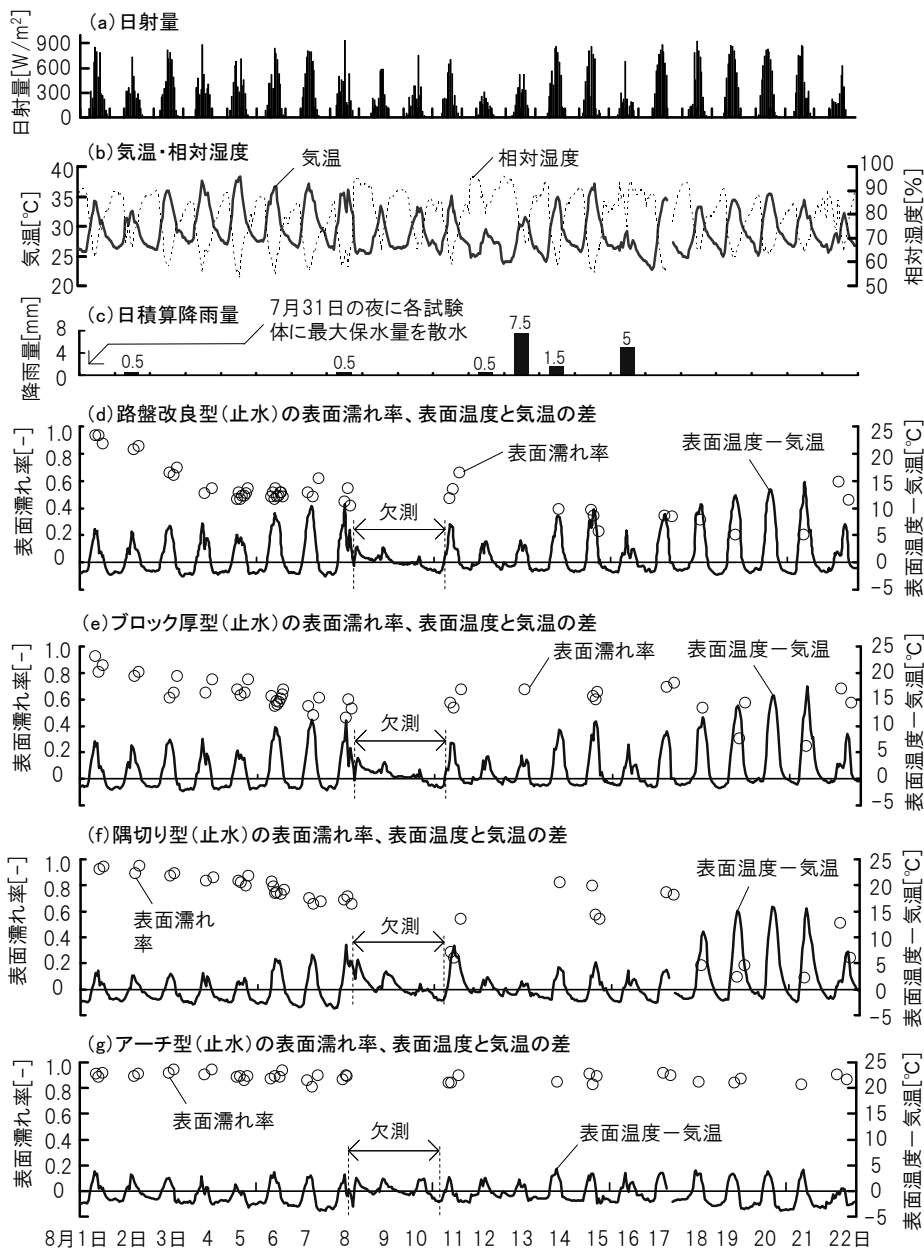


図7 測定結果 (2005年8月1日~22日)

型の表面濡れ率は、8月19~21日において、従来型の2試験体と比べて低い(表面濡れ率は0.1~0.2程度であり、表面のほぼ全面が乾燥)。これはブロックの細孔構造の違いのほか、舗装体の断面構成および舗装システム内に残存した水量の違いによる影響があると考えられる。

表面濡れ率が比較的高く(ここでは0.5程度以上)、 $\Delta T$ の最大値が7°C以下の期間は、従来型2試験体で約5日間であった。隅切り型については、欠測期間を除いて考えると8~9日間であった。

アーチ型における $\Delta T$ は、全期間の日中で5°C以内に収まっている。これはシステム内の保水容量が十分であり、かつ夏季晴天日が連続する気象条件下においても毛管吸水速度が蒸発速度を下回らず、表面が常に湿潤状態に保たれ

たことによる。本実験によりアーチ型では、欠測期間および降雨日とその降雨による増加保水量を除いても、夏季で14日間以上、十分な蒸発冷却効果が持続されることを確認した。つまりアーチ型試験体は、2.2で示した設計目標に達している。

## 5.2 有効保水量についての検討

上記のようにアーチ型については、蒸発冷却(表面温度低減)効果の十分な持続性を確認した。隅切り型の表面温度低減の持続期間は、アーチ型に比べると短い、これはブロック成型に配慮して保水容量を比較的小さく(47kg/m<sup>2</sup>)設計したことによるものである。対して、従来型の2試験体(路盤改良型、ブロック厚型)は、保水容量

がそれぞれ  $91\text{kg/m}^2$ ,  $68\text{kg/m}^2$  と設計目標と同等かそれ以上であったのに関わらず、表面温度低減の持続期間はともに約 5 日間と短く、十分な持続性を得られなかった。これは、「舗装体の毛管吸水性能（毛管吸水高さ）」と「舗装表面と止水面との距離」との関係によるものと言える。そこで、乾燥過程における舗装システム内の保水量とブロックの表面濡れ率について考察する。

(1)有効保水量の考え方 排水試験体(路盤下より排水)にて求めた、日中における舗装ブロックの体積含水率(サンプリングによる秤量)と表面濡れ率との関係を図 8 に示す。乾燥過程において、舗装ブロックの体積含水率が 15% 程度から 10% 程度まで減少する間に、表面濡れ率が 0.9 程度から 0.1 程度に大きく低下する傾向が見てとれる。これは筆者らがこれまでに行ってきた実験結果<sup>(9)</sup>と同様の傾向である。この排水試験体の位置付けは、止水試験体において貯留された雨水が減少し、ブロック空洞内の自由水がなくなった、あるいは、舗装表面から舗装内部に至る「毛管水みち」(毛細管により水が行き来する経路)が途切れた以降の状態と言える。アーチ型の排水試験体における舗装システム内保水量と表面濡れ率のデータを用いて、有効保水量の考え方を図 9 に示す。

乾燥過程において表面濡れ率は、保水量が十分大きいときは高い値で維持されるが、ある段階を過ぎると急激に低下する。これは上述したように、舗装体下部から表面への毛管水みちが途切れ始めたことによると言える(図 9(b))。この毛管水みちによる段階的な乾燥過程は、土壌の分野において近藤ら<sup>(11)</sup>によっても説明されている。毛管水みちが途切れた以降は、舗装システム内の下部に水が残っていても、表面まで毛管吸水されることなく、蒸発量が減少し、蒸発冷却効果は低減する。

本研究では、「舗装体(ブロックや路盤含む)の下部から表面への毛管水みちが途切れるまでに蒸発により失われる水量」を、舗装システム全体における蒸発冷却に寄与する保水量とし、「有効保水量」として定義する。このとき、毛管水みちが途切れることの判断基準として、表面濡れ率が 0.5 以下になる点を用いた。この 0.5 という値は、屋外実験において表面濡れ率が 0.5 以上であれば、夏季日中でも表面温度が気温 +  $10^\circ\text{C}$  以下に維持されることにより決定した。

有効保水量が大きい舗装システムほど蒸発冷却は長期間持続することになる。また、舗装体の毛管吸水高さに対して舗装表面と止水面との距離を大きく取ると、表面まで吸水されずに残存する水量が多くなるため、保水容量を大きく設計しても、有効保水量は必ずしも大きくならない<sup>(注4)</sup>。

(2)有効保水量による蒸発冷却持続期間の推定 本報で作製した 4 試験体について、舗装システム断面と実測データにより有効保水量と蒸発冷却持続期間を推定したものを表 3 に示す。隅切り型とアーチ型の有効保水量は、図 9(a)の考え方に倣い、表面濡れ率が 0.5 以下になるときの保水量(図 8 より導出)を保水容量(表 1)から引くことで求めた。路盤改良型とブロック厚型の有効保水量は、表面濡

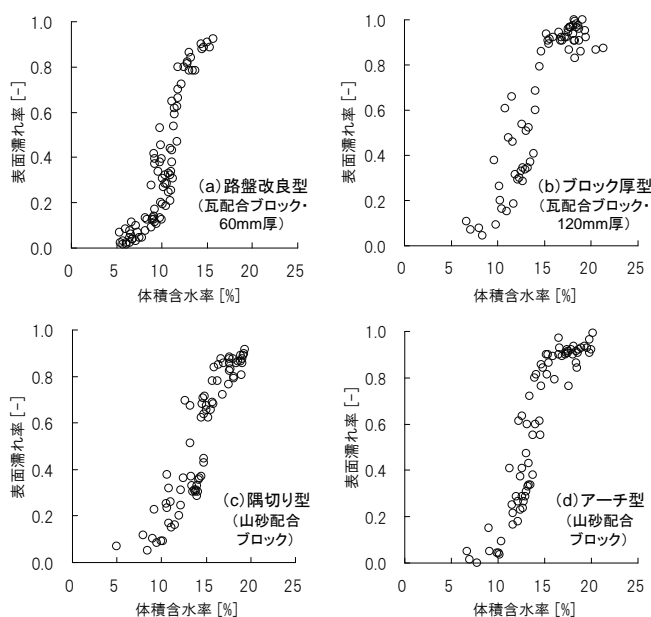


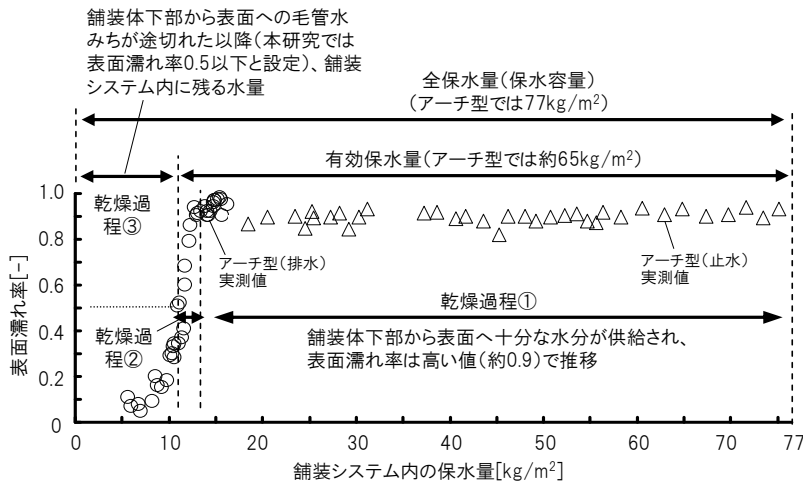
図 8 舗装ブロックの体積含水率と表面濡れ率の関係 (排水型試験体・日中)

れ率が 0.5 以下になるまでの積算蒸発量を吸水型試験体の蒸発量および日射量の実測データより推定することで求めた。蒸発冷却持続期間は、夏季晴天日の日積算蒸発量を  $5\text{kg/m}^2$  として、有効保水量をそれで除することで求めた。

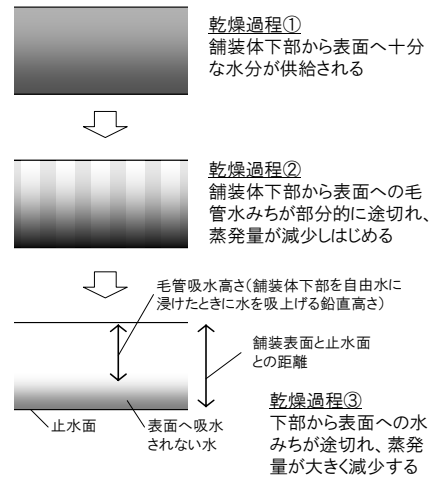
舗装表面と止水面との距離が毛管吸水高さより大きい従来型 2 試験体は、保水容量は大きいものの、舗装システム内に蒸発に使われない水が残り、有効保水量が小さくなる ( $25\text{kg/m}^2$  程度) ことが分かる。アーチ型は有効保水量が  $65\text{kg/m}^2$  と大きく、有効保水量の考え方から、蒸発冷却の持続期間は 13 日程度と推測できる。なお、前節の屋外実験では 14 日以上持続という結果となったが、これは実験期間中、曇天日が数日あったためである。

(3)有効保水量を用いた舗装システムの設計方法 前述のように本研究では、舗装材下部を自由水に浸けたときに舗装材が水を吸上げる鉛直高さを「毛管吸水高さ」とし、毛管吸水性能を測る指標として用いている<sup>(注4)</sup>。舗装システムの設計段階において舗装体の毛管吸水高さを求め、舗装表面と止水面との距離をそれ以下に設定すれば、蒸発冷却に寄与する保水量(有効保水量)を効率的に確保できる。また図 8 に示すような、乾燥過程における舗装体の含水率(保水量)と表面濡れ率との関係を把握すれば、設計段階において有効保水量を求めることができるため、舗装システムを設計する際の実用的な指標として有効である。

以上より、長期間の表面温度低減を目指す蒸発冷却舗装システムにおいて、図 1, 8 に示すような「有効保水量」を考慮してシステムを設計することの重要性を示した。本報で考案したアーチ型試験体は、舗装体の形状と断面構成により大きな有効保水量を有し、その蒸発冷却性能は設計目標に達していることを屋外実験により確認した。



(a) 舗装システムの乾燥過程における保水量と表面濡れ率の関係、および有効保水量の概念(アーチ型の実測結果より)



(b) 乾燥過程における「舗装表面と止水面との距離」と「毛管吸水高さ」に関する模式図

図9 舗装システムの乾燥過程における有効保水量の考え方

## 6. まとめ

既報より提案してきた蒸発冷却舗装システムについて、夏季の間、降雨のみで表面温度低減効果が長期間持続するように、保水容量に関する設計目標を検討した上で、舗装体の形状と断面構成を具体化した。さらに試験体を試作し、屋外実験によりその蒸発冷却性能を確認した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 東京において本舗装システムを適用し、降雨のみで表面温度低減効果を持続させるには、夏季7~9月の降雨特性より、約2週間の晴天日における累積蒸発量(日向では約70 kg/m<sup>2</sup>)分の水量をシステム内に確保することが望まれる。ただし、以下で記す「有効保水量」の考え方を踏まえて、舗装体の形状・断面構成を設計することが重要である。

(2) 従来の保水性舗装断面を想定した、舗装ブロックと止水面の間に厚めの路盤を設けた試験体では、保水容量が十分でも、表面温度低減効果の持続期間は約5日間と短かった。これは、舗装表面と止水面との距離が毛管吸水高さ(舗装材下部を自由水に浸けた場合に水を吸上げる鉛直高さ)を上回っており、舗装下部から表面への毛管水みちが途切れた以降、蒸発に使われずにシステム内に残る水量が存在したためだと考えられる。この毛管水みちが途切れるまでに蒸発により失われる水量を本研究では「有効保水量」としたが、これは、蒸発冷却舗装システムを設計する上で考慮すべき項目の一つとして位置付けられる。

(3) 舗装ブロック下部にアーチ状の空洞を設けて雨水を貯留するよう考案したアーチ型試験体は、大きな有効保水量を有し、夏季実験期間中、降雨の影響を除いた上で2週間程度、日中の表面温度と気温との差が5℃以下に維持されることを確認した。これにより、本システムの実用化に向けた課題であった蒸発冷却効果を長期間持続する舗装体の

表3 各試験体の保水容量と蒸発冷却持続期間の推定

	従来・路盤改良型	従来・ブロック厚型	ブロック加工・隅切り型	ブロック加工・アーチ型
保水容量	91 kg/m <sup>2</sup>	68 kg/m <sup>2</sup>	47 kg/m <sup>2</sup>	77 kg/m <sup>2</sup>
舗装表面と止水面との距離	290 mm	250 mm	130 mm	150 mm
「舗装体の毛管吸水高さ」と「舗装表面と止水面との距離」の関係	毛管吸水高さ < 表面と止水面の距離	毛管吸水高さ < 表面と止水面の距離	毛管吸水高さ > 表面と止水面の距離	毛管吸水高さ > 表面と止水面の距離
有効保水量(舗装システム構成と実測データより推定)	25 kg/m <sup>2</sup>	25 kg/m <sup>2</sup>	35 kg/m <sup>2</sup>	65 kg/m <sup>2</sup>
夏季晴天日が連続した中での蒸発冷却効果の持続期間(1日の蒸発量を5kg/m <sup>2</sup> として推定)	5日	5日	7日	13日

具現化は達成された。

なお本舗装システムのように、連続的に吸水・蒸発を行う舗装では、表面で白華が進行し、数ヵ月後には蒸発冷却効果の低減が認められる。この部分の詳細は次報で報告する。施工性を考慮した止水方法、および、本システムに要求される透水性能についても、次報以降で検討を行う。

## 謝辞

本研究は、太平洋プレコン工業株式会社との共同研究による成果である。ここに記し、深謝の意を表す。

## 注

注1) 2.1 (2) で示したように、2000~2009年(10年間)の東京の夏季7~9月において、1日あたり6mm以上の降雨がない連続日数の累積は約250日(割合では27%)である。ここで、降雨後の連続した晴天日において2週間蒸発を持続できる舗装システムを適用することを想定した場合、この期間において蒸発が持続できない日数(つまり、14日を超えて連続で降雨のない日数)は10年間で延べ80日となる。対象とした10年間の夏季3ヶ月間の全日数においてこの80日は8.7%に相当す



る。つまり、この舗装システムを適用した場合、夏季の9割以上の期間で蒸発を持続できるという試算となる。

注2) 本研究では、蒸発冷却舗装システムを日陰で適用して冷涼な空間を創出することを第一の目標としている。その上で本報では、より厳しい条件として、日向に適用する場合について議論を進めている。なお、日陰や半日陰で適用する場合は、熱環境シミュレータ等により適用場所の受熱日射量を求めることで保水容量を設定する。

注3) 欠測直後の8月11日において、路盤改良型とブロック厚型の表面濡れ率が、欠測直前に比べて高くなっている(図7)。これは欠測中、ブルーシートで覆ったため、毛管現象により舗装体内部の鉛直方向の含水率分布が均一化し、表面が濡れ戻ったこと(既報<sup>9)</sup>参照)によると考えられる。

注4) 舗装材の下部が自由水に接触しているか否かは毛管吸水高さに影響する。モルタルや砕石等の細孔内に取り込まれた水分には保持力(水分ポテンシャル)が働き、上部への毛管吸水には相対的に不利となる。本実験におけるアーチ型と隅切り型の2試験体は、保水量が大きいときはブロック空洞内に自由水を有することから、毛管吸水は有利に働く。本研究では、実験で求められる実用的な指標として「毛管吸水高さ」および「有効保水量」を提案し、これを用いている。

## 参考文献

- (1) 足永靖信・大澤元毅・坊垣和明・田中稔・吉村孝信, 保水性建材を用いた市街地熱環境計画手法の開発 その1 研究概要, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(1996-9), pp.773-774.
- (2) 尾崎哲二・鈴木義則, 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, 第42巻(1998-2), pp.61-66.
- (3) 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 No.613/V-42(1999-2), pp.225-236.
- (4) 赤川宏幸・小宮英孝, 表面を連続的に湿潤できる舗装体に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第530号(2000-4), pp.79-85.
- (5) 国土交通省関東地方整備局, 報道記者発表資料「環境舗装東京プロジェクト」(2004-5).
- (6) 陳偉嬌・水谷章夫・大澤徹夫, 吸水機能を有する透水性アスファルト舗装材の蒸発冷却効果に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第22号(2005-12), pp.281-284.
- (7) 福田淳・宇多寛人・岩松俊哉・宿谷昌則・遠藤修, 雨水貯留型の人工地盤による屋外熱環境緩和に関する研究(その1. 実験概要と計測結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2(2008-7), pp.567-568.
- (8) 円井基史・梅干野晁・浅輪貴史・板津佳恵, 蒸発冷却舗装システムの基本性能に関する夏季屋外実験 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その1, 日本建築学会環境系論文集, 第600号(2006-2), pp.51-58.
- (9) 円井基史・梅干野晁・浅輪貴史・板津佳恵, 蒸発冷却効果を有する舗装体の表面濡れ状態に着目した熱・水収支特性の把握 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その2, 日本建築学会環境系論文集, 第610号(2006-12), pp.75-82.
- (10) 円井基史・梅干野晁・浅輪貴史, 毛管吸水性能を有する保水性舗装の含水状態と表面濡れ状態を考慮した熱・水収支モデルの開発 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その3, 日本建築学会環境系論文集, 第653号(2010-7), pp.577-584.
- (11) 近藤純正・柳原あずさ・三枝信子, 土壌の蒸発パラメータに関する実験的研究, 天気, 40(12)(1993-12), pp.11-17.

(Received May 11, 2011, Accepted October 20, 2011)