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

AN EXPERIMENT ON THE FUNDAMENTAL PERFORMANCE OF
AN EVAPORATIVE COOLING PAVEMENT SYSTEM DURING SUMMERDevelopment of an evaporative cooling pavement system and cooling effect simulation model
for urban thermal environment Part 1

円井基史*, 梅干野 晃**, 浅輪貴史***, 板津佳恵****

*Motofumi MARUI, Akira HOYANO, Takashi ASAWA
and Yoshie ITATSU*

This paper investigates the fundamental performance of an evaporative cooling pavement system, which we propose, during summer. As part of this empirical study, two experimental mock-ups are developed. In one mock-up, water is pooled under paving blocks so that the water can be continuously absorbed and evaporated due to the block's capillarity mechanism. In another mock-up, no water is pooled underneath the paving blocks. The effects of the evaporation rate and water content of the paving blocks on the evaporative cooling performance were examined in these two systems through the long-term outdoors experiment. The results of this experiment showed that the surface temperature of the paving blocks depends on the evaporation rate and water content of the blocks in the no water supply system. In the water supply system, the evaporation rate was high and the block surface temperature remained approximately equal to ambient air temperature. These results indicate that the water supply system maintains a high cooling effect through the Japanese hot and humid summer.

Keywords : *Evaporative cooling, Pavement, Capillarity, Heat island, Heat balance, Water balance*

蒸発冷却、舗装、毛管現象、ヒートアイランド、熱収支、水収支

1. はじめに

2004年3月に「ヒートアイランド対策大綱」¹⁾が政府決定され、関係各府省や地方自治体によるヒートアイランド対策施策への取り組みが本格化し始めている。その中で、地表面被覆の改善策の一つとして、蒸発冷却効果による表面温度低減が期待できる保水性舗装が注目され、国土交通省の「環境舗装東京プロジェクト」²⁾を始めとした多くの開発・研究が進行している^{3~8)}。しかしながら、蒸発冷却の効果と持続性について、蒸発量や保水量等の熱・水収支を踏まえた検討が十分にされているとは言い難く、蒸発冷却を第一の機能とする舗装システムは未だ確立されていない状況と言える。また、どのような場所に舗装システムを適用すれば、冷却効果を有効に活用できるかといった、適用場所の空間設計に関する検討も少ない。

そこで本研究では、都市熱環境の改善を目指し、1) 十分な冷却効果を長期間発揮する蒸発冷却舗装システムの開発、および、2) 舗装システムの性能および適用場所の空間設計を考慮して蒸発冷却効果を予測評価する数値シミュレーション手法の開発、の2つに取り組むことを目的とする。その第一段階として、まず、蒸発冷却効果を期待した舗装システムの基本構成を提案する。そして、その

基本構成をモデル化した試験体により長期屋外実験を行い、蒸発冷却のメカニズムを計量化することで、当舗装システムの基本性能を確認し、具体的設計データを得る。また、蒸発冷却効果を有する舗装体について、都市空間に具体的に適用した際の効果を実用的に予測評価するため、筆者らが開発してきた屋外熱収支シミュレーション手法^{9,10)}へ組み込む熱・水収支モデルの開発に取り組む。第一報である本報では、蒸発冷却効果を詳細に把握するための実験装置を考案・作製し、舗装システムの夏季の基本性能について検討した結果を報告する。

2. 本研究の基本的考え

2-1. 舗装システムについて

降雨を表面流出にて排水する通常の密粒舗装に対して、雨水の浸透あるいは保水を図るため、これまで、透水性・排水性・保水性舗装といった多孔質な舗装体が開発されてきた。保水性舗装は表面温度低減効果が注目されているが、その持続性には未だ課題が残るため、近年、ポンプ等により強制的に給水を行うもの、地下貯水槽から導水シートにより吸水を行うもの等、保水・給水方法の改善を図

* 東京工業大学 大学院生・修士(工学)

** 東京工業大学 教授・工博

*** 東京工業大学 助手・博士(工学)

**** 東京工業大学 大学院生

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assistant Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

る舗装システムがいくつか考案されている^{2,6)}。

本研究では、雨水を利用し、蒸発冷却による表面温度低減を長期間維持することを第一の機能とする舗装システムの開発を目指す。具体的には図 1 に示すように、表層の舗装材下部の路盤に雨水を面的に保水・貯留し、舗装材の毛管現象により連続的に吸水・蒸発を行うシステムが、貯水容量、維持管理、無動力、雨水利用などの観点から有効であると考えられる。本報にてこのシステムの基本構成の有効性を確認した上で、次報以降でシステムの具現化に取り組む。本研究では、本舗装システムを「蒸発冷却舗装システム」と名付け、研究・開発を進める。

2-2. 熱・水収支モデルについて

本研究では、既往の数値シミュレーション手法^{9,10)}へ組み込む実用的な熱・水収支モデルの開発に取り組む。そこで、舗装体の含水状態の変化に対応して変動する熱物性パラメータを導出し、舗装体の含水率や気象条件の関数として定式化することにより、降雨や蒸発に伴う舗装体の含水状態の変化を考慮した熱・水収支モデルを作成する。含水状態により変動する熱物性パラメータとしては、蒸発効率、日射吸収率、容積比熱、熱伝導率の 4 つが挙げられる。実用的なモデルの観点からは、舗装体全体を単純な層としてモデル化することが望まれる。しかし、表面近傍では含水状態の変化が激しく、かつ、蒸発効率と日射吸収率は表面近傍（数 μm ～数 mm 程度）の含水状態に大きく影響されるものと考えられる。よって本研究では、舗装体全体の含水率だけでなく、表面の含水状態や舗装体内部の含水分布を踏まえた実験からモデル化を行う。モデル化に関する詳細な説明は、実験結果を踏まえて、次報以降で行う。

2-3. 実験について

蒸発冷却舗装システムの開発にあたり、その基本性能として、蒸発量や含水状態と蒸発冷却性能との関係を把握する必要がある。また、2-2 で述べた熱・水収支のモデル化を行うためには、様々な気象条件下における熱・水収支の挙動を詳細に把握する必要がある。しかし舗装分野の既往研究^{2～8)}において、そのような実験・実測に取り組んだものは見受けられない。これらに関連し、筆者らはこれまで、屋上芝生植栽について長期屋外実験を行い、蒸発量や含水率を始めとした熱・水収支の特性を屋外気象条件下で把握し^{11,12)}、その予測モデルについて検討を行ってきた^{13,14)}。本研究では当実験手法を踏まえた屋外暴露実験を行い、長期に渡り蒸発量や含水状態、蒸発冷却効果を詳細に把握する。

3. 実験装置の考案・作製

開発を目指す蒸発冷却舗装システムを想定し、舗装材の毛管現象により連続的に吸水・蒸発が行なわれる試験体（以下、吸水型試験体とする）を作製する。ここでは、システム内に十分な保水量が確保された場合における夏季晴天日の蒸発冷却性能を把握するため、舗装材下部の路盤は常に飽和含水状態に保つこととする^{注1)}。また、冷却性能の比較および熱・水収支のモデル化のデータ取得のため、従来の一般的な保水性舗装の断面を想定したものとして、表層の舗装材の下に不透水層があり、表層のみで保水が行われる試験体（以下、従来型試験体とする）を作製する。蒸発量および含水率を精度良く測定するため、試験体を大型重量計に載せ、その重量変化を計測する。試験体を含む実験装置の概要・概観を図 2、3 に示す。主

図1 蒸発冷却舗装システムの基本的考え

表1 本実験で用いたコンクリート系舗装ブロックの概要

項目		備考
ブロック単体の寸法	200×100×60 mm	ブロックの厚さは、歩道等に使用される一般的なインターロッキングブロックと同一
絶乾状態の比重	1.85 g/cm ³	定温乾燥器（105℃、24時間）で乾燥後の重量を測定し算出
気乾状態の体積含水率	2.5%	ブロックを室内（室温約20℃、相対湿度約70%）にて1ヶ月おいた状態と絶乾状態の重量差より算出
飽和含水状態の体積含水率	24%	ブロックを24時間水没させた後周囲の水を拭き取った状態と絶乾状態の重量差より算出
絶乾状態の日射吸収率	0.8	分光放射計（Analytical Spectral Devices, Inc. 製、FieldSpec Pro FR）（入射角45°）にて測定（測定方法の詳細と表面濡れ率による日射吸収率の変化特性については次報以降で説明する）
飽和含水状態の日射吸収率	0.9	
吸水速度	15 mm/min	ブロック単体を薄く水を張った容器に置き、表面が完全に濡れるまでの時間を計測し算出
吸水高さ	240 mm	ブロックを重ね、最下面より吸水させた場合における、吸水高さを測定（接触抵抗緩和のため、ブロックの間には薄い脱脂綿を挟んだ）

要な点を以下に記す。なお、測定精度向上のため考慮・配慮した点を文末の付表1にまとめた。

3-1. 舗装材の選定

本実験では、表層の舗装材には優れた吸水性能が求められる。基本性能としては、舗装材の厚さ以上の吸水高さがあれば良く、保水力は低くても良い。本実験に採用する舗装材を選定するにあたり、既往のアスファルト系、コンクリート系、土系の保水性舗装および透水性舗装の計 8 種について、吸水高さ・速度に関する試験を行った。結果、最も吸水性能の良かったコンクリート系の舗装ブロックを採用することとした。当ブロックの概要データを表1に示す。ブロックの厚さは、歩道等に使用される一般的なインターロッキングブロックと同一の 60mm である。

3-2. 試験体の寸法・断面構成

本研究で開発を目指す熱・水収支モデルは鉛直一次元を想定しており、実験試験体においても測定データの一次元性の確保に配慮する必要がある。また舗装体鉛直方向の熱収支を把握するため、鉛直距離をある程度確保する必要がある。重量計の秤量を考慮した上で、試験体の寸法は水平方向 600mm^{注2)}、鉛直方向 150mm^{注3)}とした（図 2-a・b）。側面はステンレス容器にて断湿し、周囲および底面は断熱を行った^{注4)}。断面構成は上からブロック 60mm、砂層 10mm、路盤材 80mm とした。ここで路盤材は十分な保水力を有すること、舗装材を支える構造体となりうることから、粒調砕石と赤土を体積比 2:1 程度で混合したものとした。ブロックの目地は砂で充填した。砂は珪砂を用いた。

3-3. 熱・水収支同時測定の実施

熱・水収支の測定を同一の試験体にて行った。これは、試験体を複数用意した場合、舗装体の個体差、微気象条件の差などにより、表面の濡れ・乾きの分布が試験体ごとに異なることが予想されるためである。この際、データロガーに接続される熱収支測定用のコー

図2 実験装置の概要

コード類の張力が水収支測定用の重量計に影響を及ぼさないよう、コード類は素線(防水加工・絶縁処理あり)とし弛ませた状態で固定した。弛ませたコード類が重量変化に影響を及ぼさないことは予備実験により確認した。給水用ホースや雨風除けカバーなどについても、重量計に影響を与えないよう、試験体とはすべて非接触状態とした。

3-4. 雨風除けカバーの設置

風圧および雨水付着による重量計への影響を除去するため、試験

体を覆うカバーを設けた(図2-f)注4)。長期間、風雨や日射に曝されることを考慮し、カバーはステンレスにて作製し、外表面は断熱アルミシートを貼った。

3-5. 吸水型試験体

舗装材(ブロック)と路盤材(碎石・赤土)を入れた容器の底に穴(直径10mm、中心間隔20mm)を開け、それを水の入った容器に沈め、路盤が常に飽和含水状態に維持される装置を作製した(図

図3 実験装置の概観

2-a・c)。水位を保つために、1日1回十分な量の給水を自動タイマーにて行い、水位を越えた水は舗装材下面と同じ高さに設定された排水口より排水されるようにした^{注5)}。給水温が舗装材の熱収支に及ぼす影響を最小限にするため、給水は路盤底面から行われるようにした。また、給水用の水は日射遮蔽したタンクに数日間貯留し、路盤底面の温度とタンク内の水温がほぼ等しくなる時刻にタイマーを設定した。

3-6. 従来型試験体

舗装材下の砂層と路盤材の間に不透水層を設けた(図2-b・e)。不透水層には1/50程度の傾斜をつけ、雨水や散水は樋を経由して雨量計へ排水されるようにした。また、不透水層以下の路盤部分については、舗装材含水率の重量測定に影響を及ぼさないよう密閉した。なお、乾燥過程における舗装材の含水率と熱・水収支特性の関係を把握するため、舗装材の乾燥過程がある程度進行した場合は、適時、舗装材上面より十分量の散水を行った。

4. 測定項目・方法

測定項目を表2に示す。主要な測定方法を以下に説明する。

4-1. 蒸発量・体積含水率

試験体を重量計(ロードセル式、秤量300kg、分解能2g)に載せ、その重量変化により蒸発量を求めた^{注6)}。従来型試験体については、不透水層以下の部分で重量変化はないので、重量計の変動値は不透水層以上の舗装体(ブロックおよび砂)の含水状態の変化量となる。そこで、ブロックおよび砂の体積、絶乾重量を別途求めることにより体積含水率を算出した。吸水型試験体については、重量計の変動値はブロック・砂・路盤材・水等、装置全体の含水状態の変化量を示す。表層の舗装材の含水率については、舗装材が蒸発速度と同等の速度で水を吸収すれば、常に飽和含水状態に近いところで一定となることが考えられる。これは別途ブロック単体をサンプリングし、秤量法により含水率を測定することにより確認する。

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	ブロック表面および砂表面にそれぞれ設置	全期間	1分
	放射温度計(感度波長帯: 8~14μm)		試験体中央部上方2.5m高さ(測定範囲: 250mm円内)に設置		
	鉛直断面温度	φ0.3mmT熱電対	深さ10,30,60,100,150mm地点に設置		
	鉛直断面熱流量	熱流計(大きさ: 50×25×1.2mm)	表面と深さ60mm地点(ブロック底面)に設置・表面は日射吸収率がブロックと同じとなるよう塗色		
	表面温度分布	赤外線放射カメラ(8~14μm, 1.5mrad)			
舗装体の水収支	蒸発量・体積含水率	大型重量計(ロードセル式、秤量300kg、分解能2g、秤量皿600×800mm)	風圧、降雨、散水・給水・排水等の影響を考慮して導出	全期間	1分
	排水量	転倒式簡易雨量計(分解能: 0.2mm)			
	表面の濡れ状態	近赤外水分計	定点5点で手動測定		
	鉛直含水分布	小型重量計(分解能: 0.2g)	表面の濡れ/乾きによる色の濃淡を撮影 水平方向に切断したブロックを用いた秤量法により測定		
	デジタルカメラ				
気象条件等	水平面全天日射量	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
	降水量	転倒式雨量計(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1mに設置		
	相対湿度	φ0.1mmT熱電対	通風筒付乾湿球温度計の通風筒内に設置		
	電子式高分子湿度センサ		乾球温度と湿球温度より算定 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		
	雨水温度	φ0.3mmT熱電対	雨量計の排水口下に雨水を貯留し測定		
	給水温	φ0.3mmT熱電対	給水タンク内に設置		
	風速	熱線式風速計	試験体中央部上方30mm高さに設置		

4-2. 表面温度および断面温度

舗装材であるブロックおよび目地の砂の表面温度は、線径0.1mmT熱電対にて測定した。また、舗装面より上方2.5m高さに放射温度計を設置し、直径25cm円内の平均の放射温度を測定した(図2-d)。また短期集中計測時に、赤外線放射カメラにて表面温度分布を把握した。ブロックおよび路盤の鉛直断面温度は、線径0.3mmT熱電対にて測定した。設置深さは、0、10、30、60、100、150mmである。10、30mmはブロック側面より空けた穴に熱電対を挿入し、接着剤にて充填した。なお熱電対の感温部は、劣化防止のためシリコンで防水処理を施した。

4-3. 表面濡れ率

舗装表面の含水状態を考慮した熱・水収支モデルの開発に取り組むため、本実験では、表面の含水状態も合わせて把握する。舗装表面の含水状態を把握する方法としては、土壌水分計や近赤外水分計の利用、水平方向に切断したブロックによる秤量法などが考えられる。本研究では、蒸発冷却に影響する表面近傍数μm~数mm部分の含水状態を精度良く測定するため、近赤外水分計(ケツト科学研究所製、KJT-100)を採用した。この水分計は、近赤外域にある水の吸収波長帯(1.2、1.45、1.94μm)を利用するものであり、原理的にも表面近傍数μmの水分量を把握するのに適している。なお、断面の鉛直含水分布については、土壌水分計などによる計測では、センサー部の接触抵抗等の問題により十分な精度が保証でき

ないとの考えから、水平方向に切断したブロックによる秤量測定を行った。いずれも、手動による計測である。

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 5 点（1 点の測定範囲は直径 25mm の円内）にて行い、その平均値を採用した（図 2-d）。平均した測定値は今回、式 3 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。

$$\omega = (x - L_d) / (L_w - L_d) \quad \dots (式 3)$$

ここで、 ω ：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[-]。

この表面濡れ率については、次報以降で、蒸発効率や日射吸収率との関係性を把握する。

4-4. 気象条件等

水平面全天日射量はサーモパイル式日射計、降水量は転倒升式雨量計にて測定した。乾球温度と湿球温度は、通風筒付乾湿球温度計にて測定した。風向・風速は、プロベラ式風向風速計にて測定した。また、雨量計の排水温度および、吸水型試験体へ給水を行う貯水タンク内水温を線経 0.3mmT 熱電対により測定した。

4-5. 測定データの収録方法

上記のうち、赤外線放射カメラ、近赤外水分計、ブロックの秤量を除いては、測定間隔 1 分で自動計測を行い、データはロガーを介してパソコンに収録した。パソコン、ロガー類は小型物置に収納した。物置は、側面に換気扇を取り付け、日陰に設置した。

4-6. 実験場所・期間

実験場所は、日陰等の周辺地物から受ける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 2004 年 7 月下旬より開始した。

5. 実験結果および考察

5-1. 2 試験体の蒸発冷却性能

吸水型・従来型の 2 試験体において、蒸発量が最も多い時期の蒸発冷却性能を確認するため、晴天日の続いた 8 月 7～14 日を抽出し、分析・考察を行った。気象条件、散水・給水・排水量、体積含水率、表面濡れ率、蒸発量、断面温度の測定結果を図 4 に示す。

1) 気象条件と散水・給水条件

8 月 11 日は午前中雲が多く日射量は比較的少ないが、その他の日は、安定した日射量が観測された（図 4-a）。従来型試験体においては、舗装ブロックの乾燥が進んだ 8 月 7 日、10 日の夜に、舗装下から排水が確認されるまで十分量の散水を行った（図 4-c）。吸水型試験体への給水は、給水温と路盤温度を考慮し、8 月 7～9 日については午前 6 時に行い、8 月 9 日以降は午後 20 時に行った。

2) 蒸発量

吸水型試験体においては、日射量とほぼ同様の日変化プロファイルを示す蒸発量が、期間中安定して確認された（図 4-a・d）。1 時間あたりの積算蒸発量は、日射量の多い正午付近（時間積算日射量が 2.5～3MJ/hr）で約 0.7kg/m²・hr、日積算蒸発量は、日射量の比較的少ない 8 月 11 日（日積算日射量 11.5MJ/day 程度）で約 3kg/m²・day、それ以外の日（日積算日射量 20～23MJ/day 程度）では、5～6kg/m²・day 程度であった。日射量などの気象条件と蒸

発量との関係は、次報以降にて詳細に解析する。

従来型試験体の蒸発量は、散水翌日は、吸水型試験体の蒸発量と同程度であったが、散水後 2 日目の午前中より、吸水型試験体の蒸発量を下回るようになり、散水後 3 日目には、大きく減少した。散水翌日の 8 月 8 日と散水 3 日後の 8 月 10 日を比べると、正午付近の時間積算蒸発量は 0.7～0.8kg/m²・hr から 0.1～0.15kg/m²・hr に減少し、日積算蒸発量はおよそ 6kg/m²・day から 1kg/m²・day へと減少した。

3) 吸水型試験体の体積含水率・表面濡れ率

8 月 8～10 日の日中において、表面濡れ率および、試験体よりサンプリングした単体ブロックの体積含水率を測定した結果、多少ばらつきはあるものの、表面濡れ率は 0.9～1、ブロックの体積含水率は 23～24%（飽和含水状態の体積含水率は約 24%）の範囲内に収まっていた（図 4-e）。また測定期間中、吸水型試験体の舗装表面は、ブロック、目地の砂とも、濡れ・乾きの分布がなく、全面濡れていることを目視により確認した。これらにより、吸水型試験体においては、最も受熱日射量が多い時期においても、毛管吸水速度が蒸発速度を下回らず、舗装ブロックは常に飽和含水状態に近いところに維持されることが確認された。

4) 従来型試験体の体積含水率・表面濡れ率

従来型試験体における不透水層上の舗装体（ブロック・砂部分）の体積含水率の推移を見ると、8 月 7 日および 10 日に十分量の散水を行った直後は、体積含水率はともに 23%程度であり、ほぼ飽和含水状態に達した（図 4-e）。その後、体積含水率は蒸発量に対応して減少を続ける。なお今回、ほぼ気乾状態のブロックから実験を開始したが、8 月頭に初めて散水する直前において、体積含水率は約 2.5%であり、これが実測期間中の最低値であった。

従来型試験体の表面濡れ率は、体積含水率の減少に伴って低下する傾向が読み取れる。特に、体積含水率が 13～14%付近まで減少すると、表面濡れ率が急速に低下し始めることが分かる。体積含水率がおよそ 14%から 7%まで減少する間に、表面濡れ率は 0.7 から 0.1 に低下する。なお、表面濡れ率が 0.7 以上では舗装表面はほぼ全面が濡れており、0.1 以下ではほぼ全面が乾燥しており、およそ 0.1～0.7 の範囲では表面に濡れ・乾きの分布が生じることを、目視記録と写真撮影により確認してある。

散水後 2 日目（8 月 9 日、12 日）の午前中に着目すると、従来型試験体の表面濡れ率が急激に低下する時刻が、従来型試験体の蒸発量が吸水型試験体の蒸発量を下回りだす時刻と重なることが分かる（図 4-d・e）。この表面濡れ率と蒸発量との関係については、長期間の計測結果を用いて、次報以降で詳細な解析を行う。

5) 表面温度および断面温度

吸水型試験体の表面温度は、いずれの日も、日射量の多い正午付近では気温+0～3℃程度であった（図 4-g）。また、夕方から早朝にかけては、気温より 2～3℃低い値を示した。これは、表面が常に濡れた状態に保たれていることにより、十分な蒸発冷却性能を有していることを示している。

従来型試験体の表面温度は、吸水型試験体の表面温度と比べると、散水翌日はほぼ同じ値であるが、散水 2 日後の午前中以降、徐々に高温化していく傾向が読み取れる（図 4-f）。散水翌日の 8 月 8 日（日最高気温約 33℃）では、表面温度、深さ 60mm（ブロック

図4 吸水型・従来型の2試験体における蒸発冷却性能の比較

下面)の温度、深さ 150mm (路盤底面)の温度の日最高値は、それぞれ約 37℃、35℃、34℃であるが、散水 3 日後の 8 月 10 日 (日最高気温約 35℃)には、それぞれ約 54℃、49℃、45℃に達した。

6) 蒸発量・含水状態と蒸発冷却効果の関係

まず、従来型試験体の乾燥過程における蒸発量・含水状態と表面温度の関係を、吸水型試験体と比較しながらまとめると、次のようになる。

(1) 舗装体が十分含水している状態 (体積含水率 14~24%、表面濡れ率 0.7 以上)では、蒸発量、表面温度とも吸水型試験体とほぼ同程度 (正午付近の時間積算蒸発量は $0.6\sim0.8\text{kg/m}^2\cdot\text{hr}$ 、日積算蒸発量は $5\text{kg/m}^2\cdot\text{day}$ 程度、日中の表面温度は気温 $+0\sim4^\circ\text{C}$ 、夕方から明け方にかけての表面温度は気温 $-2\sim3^\circ\text{C}$)である。

(2) 舗装体の体積含水率が 13~14%程度まで低下すると表面濡れ率が急速に低下し始め (約 0.7 から 0.1~0.2 へ)、吸水型試験体と比べて蒸発量は減少し表面温度は上昇を始める。飽和含水状態から体積含水率 13~14%に至るまでの累積蒸発量は約 6kg/m^2 であるが、これは夏季晴天日 1~2 日の蒸発量に相当する。

(3) 体積含水率が 7~8%以下 (飽和含水状態からの累積蒸発量 9kg/m^2 程度以上に相当)になり、表面の全面が乾燥 (表面濡れ率 0.1 以下)すると、蒸発量は大きく減少 (日積算蒸発量 $1\text{kg/m}^2\cdot\text{day}$ 程度またはそれ以下)し、日中の表面温度は高温化 (日最高で 55°C 程度、気温 $+20^\circ\text{C}$ 程度)する。

このように、蒸発量・含水量と蒸発冷却効果の関係が計量化できていることから、熱・水収支のモデル化のためのデータが得られた。

吸水型試験体においては、夏季の晴天日が連続する気象条件下の日照面においても、舗装体は常に飽和含水状態に近い状態が維持された。また、受熱日射量が蒸発による潜熱放散に十分交換され、期間中、表面温度はほぼ気温相当 (日中で気温 $+0\sim3^\circ\text{C}$ 、夕方から明け方にかけては気温 $-2\sim3^\circ\text{C}$)であった。この結果は、本研究で開発を目指す蒸発冷却舗装システムの基本性能を裏付けるものと言える。

5-2. 雨水利用の可能性に関する基礎的検討

今後開発を目指す蒸発冷却舗装システムにおける雨水利用の可能性および必要保水容量を検討するため、吸水型試験体における蒸発量と夏季の降雨特性の関係について、2004 年 7 月末~9 月末の測定データを抽出し、分析・考察を行った。日積算降雨量・蒸発量、累積降雨量・蒸発量および両者の差を図 5 に示す。降雨の特徴としては、台風の接近した 8 月 29 日、9 月 4 日、29 日付近は、日積算降雨量 $30\sim60\text{mm/day}$ 程度の大きな値を記録した (図 5-a)。8 月前半と 9 月中旬には、雨の降らない期間が比較的長く続いた。吸水型試験体の日積算蒸発量は、期間中の晴天日において、およそ $3\sim6\text{mm (kg/m}^2\text{) /day}$ であった (図 5-b)。ただし、安定した晴天日でかつ、風速が比較的高かった 8 月 20 日付近では、 $7\sim8\text{mm/day}$ 程度と大きな値を示した。

抽出期間の約 2 ヶ月間を通して見ると、累積降雨量は約 410mm、吸水型試験体の累積蒸発量は約 210mm と、200mm 程度降雨量が

図5 吸水型試験体における蒸発量と降雨量の比較

上回っている (図 5-c)。なお、横浜地方気象台における同期間の累積降雨量の過去 10 年間の平均値は約 370mm であった。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。すなわち、今後開発を目指す蒸発冷却舗装システムにおいては、およそ 70mm/m^2 以上の保水・貯水容量を確保すれば、今回と同様の期間において、蒸発に必要なとされる水量を降雨量でまかなえる可能性が示されたと言える⁷⁾。

6. まとめ

蒸発冷却効果を期待し提案した舗装システムについて、基本性能を確認するための試験体および実験装置を考案・作製し、長期屋外実験を行った。舗装体の含水状態や蒸発量を始めとする熱・水収支を計測し、夏季において蒸発冷却効果との関係性を分析した結果、以下の知見を得た。

(1) 本研究で開発を目指す蒸発冷却舗装システムを想定した、舗装材の下部に十分量の水を面的に保水・貯留し、舗装材の毛管現象により吸水・蒸発を行う試験体 (吸水型試験体) においては、日中、受熱日射量が蒸発による潜熱放散に十分交換され、表面温度は常に気温相当であった。これは、日本の夏季の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、舗装材が常に湿潤状態に維持されたことによるものであり、蒸発冷却舗装システムの基本性能の有効性が示されたと言える。

(2) 今後開発を進める蒸発冷却舗装システムにおいて、夏季の期間中、蒸発に必要なとされる水量を、同期間の降雨量でまかなえることを確認した。また同時に、システムの具現化に向けた設計条件

のひとつである必要貯水容量に関する定量データを得た。

(3) 従来の保水性舗装断面を想定した、表層の舗装材下に不透水層があり、表層の舗装材のみで保水する試験体（従来型試験体）においては、舗装材の含水率、表面の含水状態、蒸発量を計量化することで、乾燥過程における蒸発冷却効果の変化を定量的に示した。これより、舗装システムの熱・水収支モデル開発のためのデータが得られていることを確認した。

次報以降では、年間にわたる長期実測データを統計処理し、舗装体の含水状態の変化に対応して変動する熱物性パラメータのモデル化に取り組む。具体的には、蒸発効率および日射吸収率について、舗装体の含水率、表面濡れ率、気象条件との関係を解析し定式化する。また、開発する熱・水収支モデルを筆者らが開発してきた屋外熱収支シミュレーション手法に組み込み、冷却効果を有効に活用するための空間設計に関する検討を行う。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金、平成 14、15 年度基盤研究 B (2) (代表：梅干野晃、No.14350313) の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり株式会社建設技術研究所 蛇原雅之氏らの多大なる協力を得た。本実験で用いた舗装ブロックは太平洋セメント株式会社から提供を受けた。ここに記し、深謝の意を表す。

注

- 注 1) 実際の蒸発冷却舗装システムでは雨水利用（あるいは散水）による保水を想定しており、蒸発がある程度進行して路盤内でも乾燥が進むと、ある時点で吸水・蒸発が見込めなくなると考えられる。この部分の詳細は、次報以降で水収支の条件を変えた実験を行い検討する。
- 注 2) 湿面の寸法による物質伝達率の違いを調べた既往研究¹⁵⁾によれば、湿面中央に測定試料がある場合、300mm 四方以上の湿面を確保すれば、エッジ効果（試験体周縁部が外界より受ける影響）はほぼ無視できるとの報告がある。
- 注 3) 既往研究⁹⁾によれば、舗装体の断面温度の日変化が大きくなるのは、表面からの深さがおおよそ 150mm 以内の範囲である。
- 注 4) 試験体のブロック表面の濡れ状態、表面温度の分布に大きな偏りがなく、熱・水収支が面的にほぼ均一であることを確認した。
- 注 5) 吸水型試験体における 1 日の水位の低下は、夏季の蒸発量の多い日でも 10mm 程度である。また、舗装材下の砂層も毛管能力を有しており、砂が常に十分な含水状態に保たれることはあらかじめ確認した。
- 注 6) 重量計の値は、風圧、降雨・散水・給水・排水、実測・維持管理中の人的行為といった様々な要因の影響を受けるため、それらを考慮・除去して蒸発量を導出した。実測・維持管理中の人的行為などの明らかな誤差は、実測内容を記録した日誌やデータの目視判読により除去した。降雨・散水・給水・排水分の重量変化は、実測データおよび図 2-c-式 1、図 2-e-式 2 より分離した。重量計の測定間隔は 1 分であるが、解析には 15 分の移動平均値を用いた。この平均値に風圧の影響が見られないことは確認した。
- 注 7) 適用場所の空間設計を考慮した蒸発量、保水容量の検討、および、年間を通しての雨水利用の検討は、次報以降で行う。

参考文献

- 1) ヒートアイランド対策関係府省連絡会議：ヒートアイランド対策大綱、2004.3
- 2) 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
- 3) 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、pp.773-774、1996.9
- 4) 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
- 5) 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

付表 1 実験装置の作製において考慮・配慮した点

区分	考慮・配慮した点
試験体の寸法・断面構成	<ul style="list-style-type: none"> ・表層の舗装材は吸水性能の優れたものを採用 ・測定データにおける一次元的確保に配慮するため、鉛直方向に比べ水平方向が4倍程度長くなるよう設計し（水平方向 600mm、鉛直方向150mm）、周囲および底面は断熱を行った ・ブロック表面の濡れ状態、表面温度の分布について、大きな偏りが無いことを確認 ・鉛直方向の熱収支を把握するため、150mmの厚さを確保
重量測定	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸発量・含水率を精度良く測定するため、重量計（ロードセル式、秤量300kg、分解能2g、秤量皿600×800mm）にて秤量 ・熱電対などのコード類は裸線とし、弛ませて固定することによりテンションを除去 ・周囲をステンレス製カバーで覆い、風圧と雨水の付着を低減 ・カバー内に侵入した雨水が試験体に付着しないよう、断熱材に傾斜をつけ、ゴムシートを貼った
雨風除けカバー	<ul style="list-style-type: none"> ・試験体と触れず、かつ、すき間がなるべく狭くなるよう設計 ・高温化を防ぐため、外表面は断熱アルミシートを貼った
吸水型試験体への給水	<ul style="list-style-type: none"> ・給水温が舗装材温度に影響を与えないよう、水の出入りは路盤底面のみとした ・透水抵抗を考慮し、路盤材を入れる容器底面には、直径 10mm、中心間隔20mmで穴を開けた ・給水温を調整するため、給水する水は日射遮蔽したタンクに数日間貯留 ・路盤底面（深さ150mm地点）の温度とタンク内の水温がほぼ等しくなる時刻にタイマーにて自動給水 ・水位を越えた水は排水口により雨量計へ流れるよう設計 ・表面張力除去のため、排水口に木綿紐を垂らした ・水位の高さはあらかじめ目視にて確認 ・路盤材の流出防止のため、路盤底面に不織布を敷いた ・給水ホースは試験体と非接触
従来型試験体	<ul style="list-style-type: none"> ・舗装材下に不透水層を設定 ・不透水層は1/50にて傾斜をつけ水を速やかに排水 ・舗装下の排水は樋に集められ雨量計へ流れるよう設計 ・不透水層以下は重量変化がないよう密閉
ブロック加工	<ul style="list-style-type: none"> ・表面を熱流計の形状・深さ分だけ削り、熱流計を設置
ブロック表面の熱流計の加工	<ul style="list-style-type: none"> ・日射吸収率がブロックと同じになるように塗色 ・吸水型試験体においては、熱流計の表面を薄い脱脂綿で覆い、ブロックと同様、常に濡れている状態を保った

No.613/V-42, pp.225-236, 1999.2

- 6) 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、pp.79-85、2000.4
- 7) 徳本行信、吉野勝、松下守雄、井上智仁：保水性舗装の開発 -大阪市における試験施工-、舗装 36-6、pp.8-15、2001
- 8) 成田健一、三坂育正、国島武史、中山康孝、若林伸介：蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価、日本建築学会技術報告集、第 20 号、pp.187-190、2004.12
- 9) 山村真司、梅干野晃、浅輪貴史：建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発、日本建築学会計画系論文集、第 554 号、pp.85-92、2002.4
- 10) 梅干野晃、浅輪貴史、中大程千晶：3D-CAD と屋外熱環境シミュレーションを一体化した環境設計ツール、日本建築学会技術報告集、第 20 号、pp.195-198、2004.12
- 11) 梅干野晃、何江、堀口剛、王革：芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究 屋上芝生植栽の熱環境調整効果 第 1 報、日本建築学会計画系論文集、第 462 号、pp.31-39、1994.8
- 12) 堀口剛、梅干野晃、何江：芝生植栽の水収支特性に関する実験研究 屋上芝生植栽の熱環境調整効果 第 2 報、日本建築学会計画系論文集、第 483 号、pp.73-79、1996.5
- 13) 光藤智雄、梅干野晃、石川嘉崇、堀口剛：エコマテリアルを利用した軽量薄型屋上植栽システムに関する実験研究（その 7）軽量薄型屋上植栽システムの熱・水収支モデルの基礎的検討と熱物性値の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp.685-686、2003.9
- 14) 堀口剛、梅干野晃、石川嘉崇、光藤智雄：エコマテリアルを利用した軽量薄型屋上植栽システムに関する実験研究（その 8）軽量薄型屋上植栽システムの水収支に関する物性値の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp.687-688、2003.9
- 15) 成田健一、野々村善民、小笠原：自然風下における窓面対流物質伝達率の実測 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験研究（その 1）、日本建築学会計画系論文集、第 491 号、pp.49-56、1997.1

(2005年 4 月10日原稿受理、2005年10月14日採用決定)