

保水性舗装の保水・蒸発性能に関する実験的研究

地域環境計画分野 山下 要裕

1. はじめに

大都市圏では、都市部の気温が周辺部よりも高くなるというヒートアイランド現象によって夏の暑さが増幅し、生活環境が損なわれている。その緩和対策のひとつとして、蒸発性能を有する保水性舗装が考えられている。そこで本研究では、保水性舗装の蒸発効率や持続性などを評価するためおこなった、屋外実験と屋内実験の結果について報告する。

2. 屋外実験

2.1 実験概要

大学構内において、図1、図2に示すような4つの実験区画内に保水性平板(縦300×横300×厚60[mm])を敷き詰めた。実験は3日間連続で計3回(2002/9/13~15、9/19~21、9/24~26)おこない、すべて第1日目の10~11時にG-WとA-Wに10mm相当の散水をおこなう。舗装材内部水分量の変化を把握するため、1日目は10時~17時の間で1時間おきに、2、3日目は10時と17時の2回重量を計測する。本報では、重量変化量を蒸発量とみなす。表1に平板の種類と状態、表2に各区画舗装材の密度を示す。測定項目と測器を表3に示す。

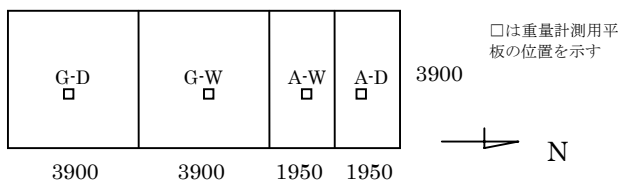


図1 平面図(単位mm)



図2 断面図(単位mm)

表1 舗装材の状態

舗装材	施工時期	主な材料
G	2002.9 施工	セメント・長尾溶融スラグ・水砕砂・珪藻土 <sup>注1</sup> (セメント重量の10%)
A	2001.8 施工	セメント・長尾溶融スラグ・水砕砂

注1: 多孔質な特性を活かした吸放湿性に優れた素材

表2 各区画舗装材の密度(絶乾状態)

各区画舗装材	密度(kg/m <sup>3</sup> )
G-D	2194
G-W	2115
A-W	2052
A-D	2118

-D: 散水なし、-W: 散水あり

表3 測定項目と測器(計測間隔は10分)

測定項目	測器
温度(舗装表面, 舗装下, サンドクッション下, クラッシュラン下)	熱電対(T-CC)
気温・湿度	自然通風式温湿度計
熱流量(舗装下, サンドクッション下, クラッシュラン下)	熱流計
全天日射量・反射日射量	アルベドメーター
正味放射量	放射収支計
風向・風速	プロペラ風向風速計
大気放射量(工学部屋上)	精密赤外放射計
舗装平板重量	電子天秤

2.2 実験結果(3日間連続して晴れた9/19~9/21を示す。)

表4に各舗装材の反射率について示す。舗装材G、Aとも乾燥時より湿潤時の方が小さい。G、Aを比較すると湿潤時はほぼ同じだが、乾燥時はGの方が5%程度大きい値を得た。

舗装表面温度は図3より、1日目はG、Aとも「散水あり」が「散水なし」に比べて12時付近では5°C程度低く、2、3日目においてG-WはG-Dに比べ1、2°C低いときがみられたが、A-WはA-Dとほとんど差がないことがわかる。また、AとGを比較すると、G-D、G-Wの方が、A-D、A-Wより若干低くなっている。これは反射率の違いによるものと考えられる。

図5より散水日の蒸発量は、散水するG-W、A-Wの散水直後が最も大きく、その後急激に減少していることがわかる。また、散水しないG-D、A-Dにおいてもわずかに蒸発していることがわかった。

図6より日中・夜間の平均蒸発量をみると、どの舗装材も夜間に水を吸収、昼に蒸発を繰り返しているのがわかる。

図7より散水日における体積含水率は散水するG-W、A-Wは10時~11時に1~2%増加し、その後緩やかに減少し夕方には散水前とほぼ同じ状態に戻っていることがわかった。2、3日目も大きな変化はなく、ほぼ一定の値をとっていることがわかる。屋外に敷設された平板は表面的に乾いているように見えても絶乾状態になっているわけではなく、平板内部に水を保持した状態が継続していることがわかった。

表4 反射率[%]

舗装材	乾燥時	湿潤時
G(2002.9測定)	36.1	19.4
A(2002.10測定)	30.8	18.6

2.3 蒸発効率と潜熱輸送量

実験結果から蒸発効率を算出し、考察する。

顕熱輸送量と潜熱輸送量のバルク式は以下で表される。

$$H = C_p \rho C_H u (T_s - T_a) \quad \dots(1)$$

$$\iota E = \iota \rho C_H u \beta (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad \dots(2)$$

$C_p \rho$  : 空気の体積熱容量 ( $1.21 \times 10^3 \text{ J/K/m}^3$ )、 $E$  : 蒸発量 ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )、 $\rho$  : 空気密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_H$  : バルク輸送係数、 $u$  : 風速 ( $\text{m/s}$ )、 $T_s$  : 地表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_a$  : 空気温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $\iota$  : 水の蒸発潜熱 ( $\text{J/g}$ )、 $\beta$  : 地表面の蒸発効率 ( $0 < \beta < 1$ )、 $q_{sat}(T_s)$  : 地表面温度  $T_s$  に対する飽和比湿 ( $\text{kg/kg}$ )、 $q_a$  : 大気比湿 ( $\text{kg/kg}$ )

また、顕熱輸送量はユルゲスの式を用いると以下で表される。

$$H = \alpha_c (T_s - T_a) \quad \dots(3)$$

対流熱伝達率  $\alpha_c = 4.3u + 6.2$  (ユルゲス粗面の式) ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )、

よって(1)式と(3)式より、以下の関係が成立する。

$$C_p \rho C_H u = \alpha_c \quad \dots(4)$$

(4)式より  $C_H u$  を算出し、この  $C_H u$  を用いて (2)より蒸発効率  $\beta$  を求める。図8に潜熱輸送量と対流熱伝達率  $\alpha_c$  をしめす。潜熱は11時台に  $260 (\text{W/m}^2)$  で最高となり、その後大きく減少している。日中の  $\alpha_c$  は  $10 (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$  前後で安定している。図9に蒸発効率  $\beta$  を示す。散水直後11時台は  $0.6$ 、12時台は  $0.2$  と大きく減少している。13~17時は  $0.1$  から  $0.03$  と緩やかに減少し、潜熱と同様の変化をすることがわかった。

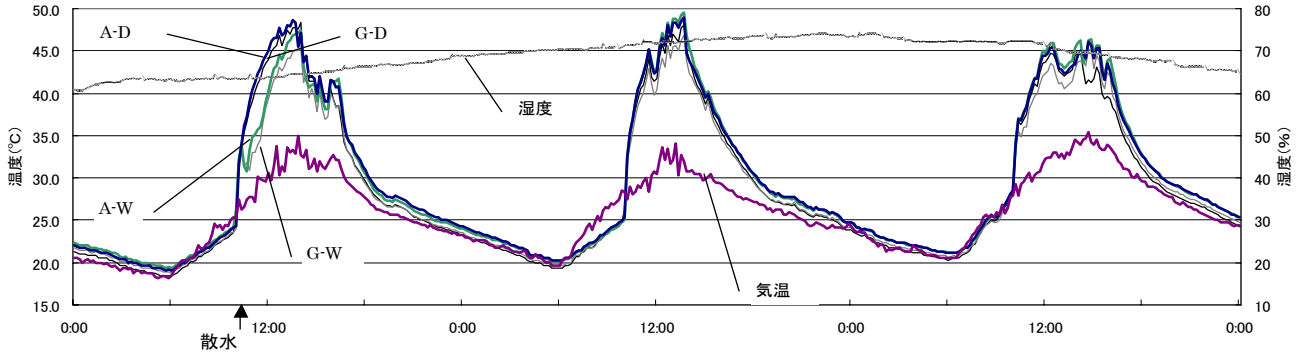


図3 表面温度と外気温湿度 (9/19~9/21)

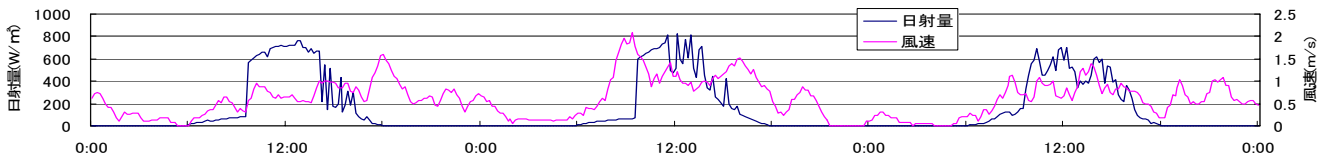


図4 日射量と風速 (9/19~9/21)

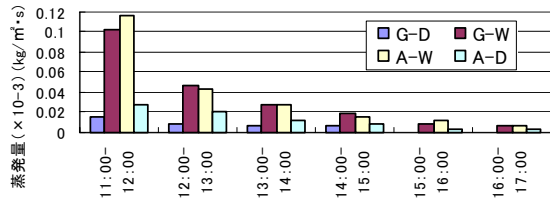


図5 蒸発量変化 (9/19)

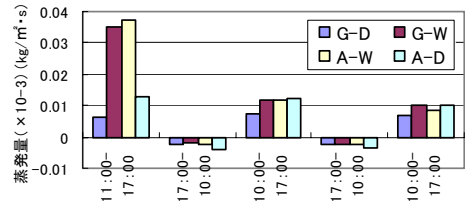


図6 日中・夜間の平均蒸発量変化 (9/19~9/21)

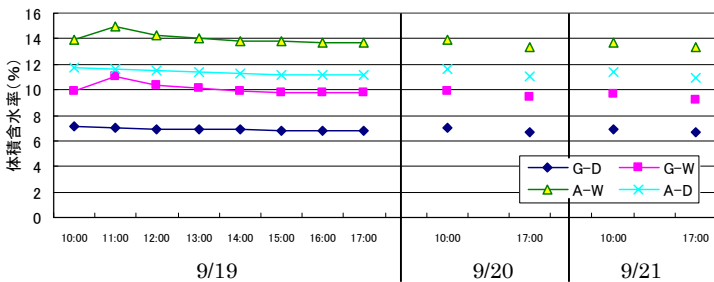


図7 体積含水率変化(9/19~9/21)

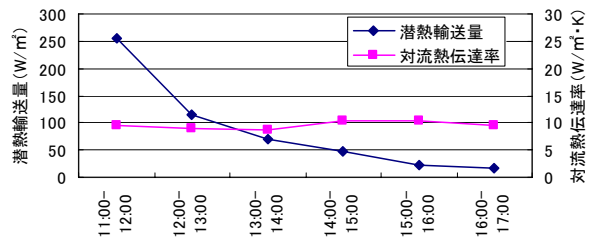


図8 潜熱輸送量と対流熱伝達率(9/19)

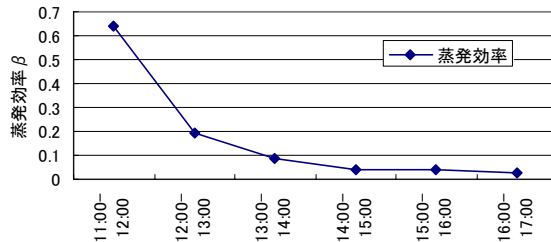


図9 蒸発効率  $\beta$  (9/19)

### 3. 屋内実験

2002年の屋外実験時において、散水後表面が乾いてから、内部に水分があるにもかかわらず蒸発量の急激な低下が実測され、含水量変化により蒸発量・蒸発効率がどのように変化するのか、課題として残った。

そこで、定常状態の恒温恒湿槽内に一定の体積含水率を保つ試験体を設置し、蒸発量、蒸発効率を観察するための屋内実験をおこなう。実験には2002年の屋外実験で用いた舗装材に加え、透水性コンクリート舗装、さらに保水性アスファルト舗装、開粒度アスファルト舗装の蒸発性能について、比較検討をおこなう。

#### 3.1 実験概要

試験体(縦150×横150×厚60[mm])と水を容器に入れ、温度40℃、湿度50%の恒温恒湿槽内に設置する。図10に恒温恒湿槽内、給水装置立面図を示す。試験体上面以外から蒸発しないよう、容器と試験体の隙間をテープでふさいでいる。給水ポンプで容器内水位を一定に保ち、各水位時の蒸発量を計測する。ポンプに接続している給水タンクの減少量を蒸発量とする。表5に舗装材の種類を示す。測定項目と測器を表6に示す。実験条件を表7に示す。

試験体上面温度を観察し、温度変化のない状態を定常とみなし、その期間の蒸発量を考察する。

表5 舗装材の種類

試験体	密度(kg/m <sup>3</sup> )	備考
①透水性コンクリート舗装材	2085	
②保水性コンクリート舗装材 (配合:A <sup>注1</sup> +珪藻土10%)	2264	2002年屋外実験でGとして用いた舗装材
③保水性コンクリート舗装材 (配合:A <sup>注1</sup> +珪藻土20%)	2234	
④ポーラスコンクリート舗装材	1837	空隙が大きい
⑤保水性アスファルト舗装材T	2073	
⑥保水性アスファルト舗装材K	2095	
⑦開粒度アスファルト舗装材	1991	空隙が大きい

注1 配合A:セメント・長尾熔融スラグ・水砕砂

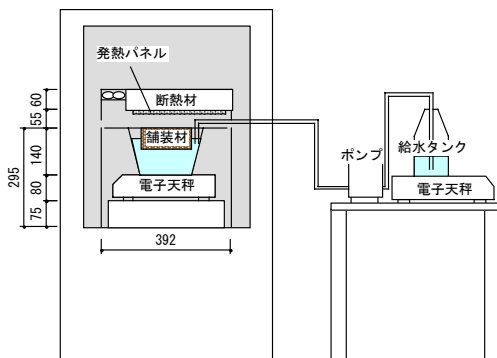


図10 恒温恒湿槽内、給水装置立面図

表6 測定項目と測器 (計測間隔は1分)

測定項目	測器
槽内実験体重量、槽外給水タンク重量	電子天秤
試験体表面温度、容器内水温、加熱面温度、流入・流出空気温度、研究室内温度	熱電対 (T-CC)

表7 実験条件

実験条件	case
容器内水位 (試験体上面からの距離)	1,10,20(アスファルト系を除く) ,30,50mm

#### 3.2 実験結果 (試験体②を一例として全体をみていく。)

表8に試験体②の各水位時の蒸発量を示す。水位が1mmから10mm、20mmにかけて蒸発量が急激に低下し、それ以下はほぼ同じ値を示した。

図11に全試験体の各水位時の蒸発量を示す。どの試験体も水位の低下に伴って蒸発量が減少しているが、その程度は異なる。1mm時は試験体④が $0.12 \times 10^{-3}$  (kg/m<sup>2</sup>・s)と少し小さい値を示したが、他の試験体は約 $0.15 \times 10^{-3}$  (kg/m<sup>2</sup>・s)と大差なかった。水位30mm、50mmにおいて、蒸発量が比較的大きかったのが、試験体①の透水性コンクリート、⑤、⑥の保水性アスファルトである。表5より、低水位時に蒸発量が大きい試験体①、⑤、⑥の密度が似ていることがわかる。試験体④も試験体①、⑤、⑥と同様の傾向を示したが、最下位50mmで急激に小さくなった。一方、試験体③、⑦は試験体②と同様に水位10,20mmと急激に小さくなり、その後はほぼ同じ値を示した。

表8 各水位時における蒸発量 (試験体②)

水位	蒸発量 (×10 <sup>-3</sup> ) (kg/m <sup>2</sup> ・s)
1mm	0.1457
10mm	0.0743
20mm	0.0418
30mm	0.0399
50mm	0.0406

#### 3.3 蒸発効率と体積含水率

実験結果から蒸発効率 $\beta$ と体積含水率を算出し、考察する。

蒸発量のバルク式は前式の(2)式で表される。バルク輸送係数 $C_H$ は、各試験体それぞれにおいて、水位1mm時を $\beta=1$ (飽和状態)と仮定し、1mm時の $E$ ,  $q_{sat}(T_s)$ と、すべての条件に共通の $\rho$ ,  $u$ ,  $q_a$ を(2)式に代入し求める。1mm時以外の水位時の蒸発効率 $\beta$ は、先に求めたバルク輸送係数 $C_H$ と $\rho$ ,  $u$ ,  $q_a$ 、各水位時の $E$ ,  $q_{sat}(T_s)$ を用いて(2)式から求める。

表9に試験体②の各水位時における蒸発効率、体積含水率について示す。図12~図15にすべての舗装材の各水位時における蒸発効率、体積含水率を示す。

表9より、試験体②の蒸発効率は水位1mmから10mm、20mmにかけて急激に低下し、それ以下はほぼ同じ値を示した。体積含水率については1mmの11.4%から水位が下位になるに従って、50mmの7.7%まで徐々に減少している。

図12、図13より、蒸発効率はコンクリート舗装では試験体①、②、③が、アスファルト舗装では試験体⑦が1mmから10mm、20mmにかけて1から0.1へと急激

に減少しており、両舗装において、空隙の多いほど（密度が小さいほど）低下率は小さいことがわかった。

図 14、図 15 より、体積含水率はコンクリート系の試験体④がどの水位においても最大の値を示し、低下率も大きい。一方、試験体①～③の体積含水率は、水位が 1～50mm と変化しても、3～4%しか変化していない。

表 9 各水位時における蒸発効率、体積含水率（試験体②）

水位	蒸発効率 $\beta$	体積含水率 (%)
1mm	1	11.4
10mm	0.2097	11.0
20mm	0.0914	10.1
30mm	0.0902	8.9
50mm	0.0894	7.7

### 3.4 屋外実験と屋内実験との比較

2002 年屋外実験における舗装材 G は、珪藻土を 10% 含む保水性コンクリート平板であり、屋内実験で用いた試験体②にあたる。そこで屋外実験の結果と屋内実験の結果を比較してみる。

表 10 に、屋外実験時の蒸発効率  $\beta$  と、それに対応する屋内実験時の実験条件（水位）を示す。散水直後の 11 時台は  $\beta=0.6$  である。表 9 より、屋内実験では水位が上面から 1mm で  $\beta=1$ 、10mm で  $\beta=0.2$  なので、およそ水位 6mm に相当することがわかる。

同様に、12 時台では  $\beta=0.2$  なのでおよそ 10mm の結果に等しい。13 時台には 0.1 弱となり、水位 20～50mm の間にあたる。その後は 0.05 よりも小さくなり、水位 50mm より下位となり、その後は 17:00 まで緩やかに減少することがわかった。

表 10 屋外実験時の蒸発効率  $\beta$  と屋内実験条件の比較

屋外実験		屋内実験
時間	蒸発効率 $\beta$	水位
11:00-12:00	0.638	6mm
12:00-13:00	0.191	10mm
13:00-14:00	0.087	20～50mm
14:00-15:00	0.043	50mm 以下
15:00-16:00	0.039	
16:00-17:00	0.027	

### 4. まとめ

2002 年の校内でおこなった屋外実験において、散水による温度低減効果は、2 日目以降目立って継続しないことがわかった。散水によって、体積含水率が 1～2% 増加することがわかった。散水をしなくても、常に水を保持している状態が続いていることがわかった。蒸発効率は散水後約 2 時間の間に急激に低下し、その後は徐々に低下することがわかった。

2003 年から 2004 年にかけておこなった屋内実験において、定常時における舗装材の蒸発量、蒸発効率、体積含水率の関係を明らかにした。その結果、本研究で扱った保水性舗装材については、水位が 1～10mm にかけて蒸発効率が著しく低下した。体積含水率は水位が 1～50mm と変化しても 3～6% 程度の変化であった。

#### [参考文献]

- 鍋島美奈子、西岡真稔、三木信博、津郷俊二「保水性舗装材料の熱的性能に関する実験 その 1～2」日本建築学会大会学術講演梗概集、2002

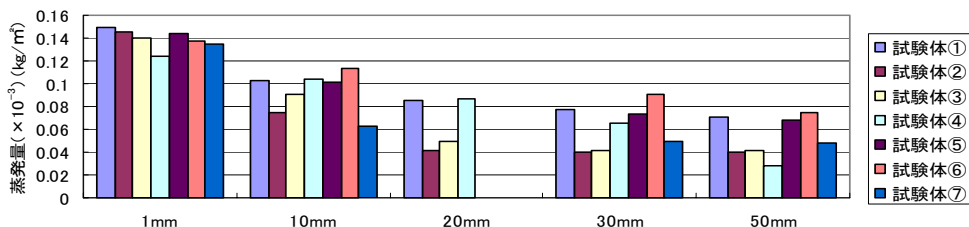


図 11 舗装材の各水位時における蒸発量

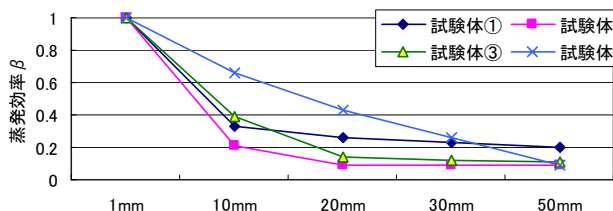


図 12 舗装材の各水位時における蒸発効率（試験体①～④）

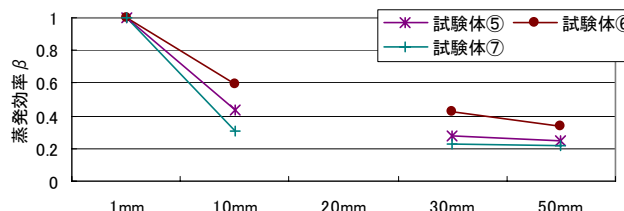


図 13 舗装材の各水位時における蒸発効率（試験体⑤～⑦）

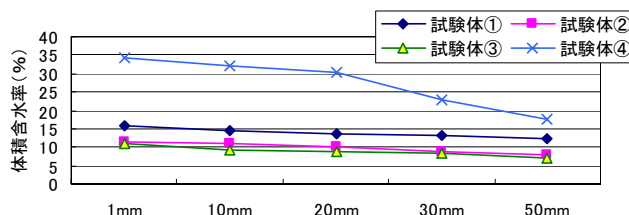


図 14 舗装材の各水位時における体積含水率（試験体①～④）

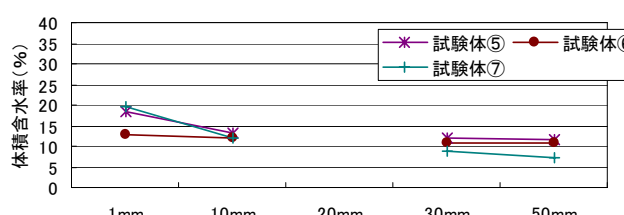


図 15 舗装材の各水位時における体積含水率（試験体⑤～⑦）