

蒸発冷却を利用した湿潤型舗装システムの性能評価実験

綿貫 良太\*

Efficiency evaluation test of water-retentive pavement system for evaporative cooling

Ryouta WATANUKI

1. 研究背景・目的

都市の環境問題の一つとして挙げられているヒートアイランド現象は年々深刻化しており、その対策として、植物の蒸発冷却効果を利用した屋上の緑化が注目されている。屋上緑化は2001年に東京都が自然保護条例の改正により、屋上の緑化を義務付けたことをきっかけに大きな広がりを見せている。

屋上緑化のヒートアイランド抑制効果に関しては、多くの研究事例から、表面温度低下や顕熱低減といった効果が示されているが、現行のものは灌水の必要性などの維持管理の困難性、雨水対策の軽視などの問題点が存在することが知られている。本研究ではそのような問題の対策として開発された「湿潤型舗装システム」の評価を目的とする。

2. 実験概要

実験は、東京都江東区にある東京都環境科学研究所の自動車棟屋上に湿潤型舗装区(以下舗装区)のほか、比較のため5種類の緑化試験体と無処理区を含めた計7種類を施工して行った(Fig.1)。なお、実験期間は2004年8月14日から2005年12月28日である。

舗装区は、吸排水性のゲルを含有したウレタンマットに吸収された水を上部セラミックタイルブロックが毛細管現象を利用して吸い上げ蒸発することによってヒートアイランドの緩和をねらう試験区である。試験体は300mm×300mmのブロックの下部に厚さ50mmの感温性ハイドロゲルを充填したマットを設置したもので、面積は3000mm×3000mm(ブロック100個敷き詰める)である(Fig.2)。感温性ハイドロゲルとは、低温で水を吸収・保持し、特定の温度(感温点)を超えると吸収保持していた水を外部に排出する感温性の吸排水性ゲルである。なお、今回の実験で用いた吸排水性ハイドロゲルは、20、25、30、35℃に感温点が設定され、そのゲルがマット全体に1:3:5:4の比率でブレンドされている。マットには10あたり10gのゲルが含まれている。なお、メーカーカタログ値によれば、マットの吸水量は約500/m<sup>2</sup>である。

今回設置した舗装区はブロックの隙間から雨水が

しみ込むようになっている。

緑化試験区は、塩ビ製のパレット式植栽基盤(500mm×500mm)を製作し、その中に人工軽量土壌を80mm充填し、その上に植物を植栽したものを設置した。各試験区の面積は、4000mm×3000mmとし、重量測定用には500mm×500mmの緑化試験体を設けた。

測定は、気温・湿度、風向・風速、雨量などの外界条件と、試験体の放射特性や熱収支特性を評価する項目について行った。測定項目、測定機器等についてはTable.1に示す通りである。

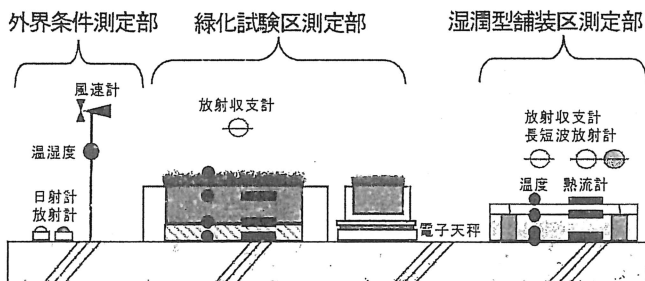
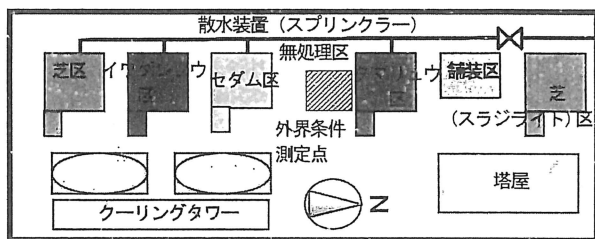


Fig. 1 試験区設置状況(上)、測定項目および測定点断面図(下)

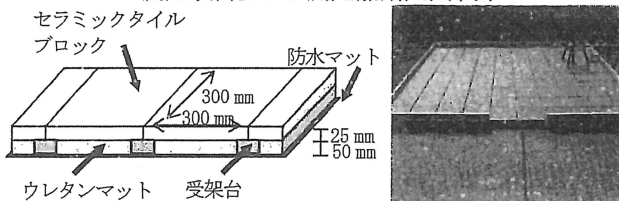


Fig. 2 湿潤型舗装区断面構成

Table. 1 測定項目と使用機器

測定種類	測定項目	測定機器	点数	備考
外界条件	気温・湿度	温湿度計	CVS-HMP-450	1
	風向・風速	風車型自動風向風速計	CVG-5103	1
	日射量(全日射量)	全日射計	MS-402	1
	大気放射(長波放射)	精密赤外放射計	MS-202	1
	雨量(吸水量)	転倒ます式雨量計	COT-34T	1
	放射特性 温熱環境	アルベド(上下短波放射)	長短波放射計	MR-40
放射収支		放射収支計	CPR-07	17試験体
表面温度		赤外線熱電対	IR-t/c.SV-T-80F	17試験体
地中温度		T型熱電対	T-TCC	97試験体
伝導熱流		熱流計	CPR-PHF-01	97試験体
データ 収録	データロガー	マイクロロガー	C-CR10X	1分間隔でサンプリング
		データロガー	サーモダックEF	

\*建築学専攻

### 3. 試験区の温度及び放射収支特性

#### 3-1. 温度特性

比較的良好なデータが取れた2004年9月8日の各試験区の表面温度の日変化をFig. 3に、舗装区の内部温度分布をFig. 4に示す。なお、各試験区の表面温度のグラフは緑化試験区の中で表面温度が平均的なタマリユウ区を緑代表として選択し、示してある。

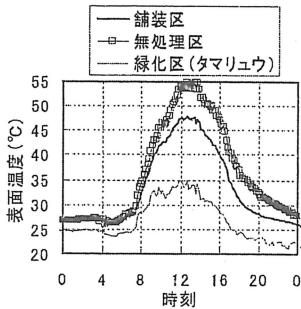


Fig. 3 試験区別表面温度比較(9/8)

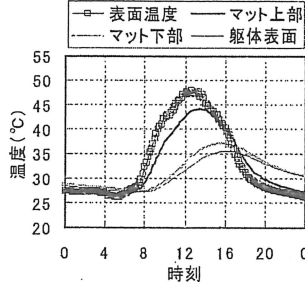


Fig. 4 舗装区の部位別温度(9/8)

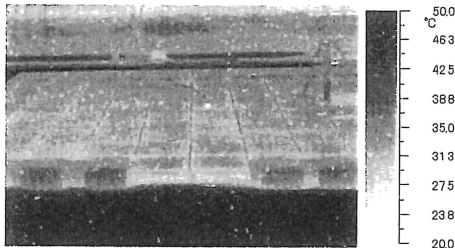


Fig. 5 舗装区熱画像(8/16)

舗装区の内部温度分布をみると、日中は試験体表面が高く最も温度が低い躯体表面よりも10°C以上高い。また、舗装区表面温度は無処理区と比べ約5°Cほど低い結果となり、表面温度の上昇が抑えられているのがわかる。これは、同じような気象条件の日に撮影した熱画像を見ても確認できる (Fig. 5)。しかし、緑代表と比べると日中は舗装区の方が表面温度は高く、緑化試験区が優れていることが確認できた。

#### 3-2. 各試験区の放射特性

各試験区におけるアルベド (日射反射率) と放射率の測定結果をTable. 2に示す。アルベドは、緑化試験体が0.14から0.16なのに対し、無処理区は0.11と低く、逆に舗装区は0.23と高い値になっている。これは、無処理区の表面は黒っぽく、舗装区の表面は白っぽいことが関係していると考えられ、舗装区は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考えられる。

Table. 2 各試験区のアルベド、放射率

	芝区	イワダレソウ区	セダム区	無処理区	タマリユウ区	舗装区	芝(スラジイト)区
アルベド	0.14	0.16	0.15	0.11	0.16	0.23	0.19
放射率	0.98	0.99	0.97	0.97	0.99	0.97	0.97

放射率は、イワダレソウ区、タマリユウ区の値が0.99と他に比べて高くなったが、他の区は0.97程度

で、試験区による差はほとんど見られなかった。

### 4. 湿潤型舗装の性能評価

#### 4-1. 熱伝達率の現場測定とその検証

本研究では、舗装区の性能評価として、水面蒸発量に対する舗装面蒸発量の比で表される蒸発効率を用いる。この蒸発効率は普通、試験体を秤量して水分蒸発量を求め算出するのだが、今回使用した舗装区は緑化試験区のようなパレット式ではないため、重量変化を直接計ることができない。そこで、ろ紙面蒸発量を利用し、現場で直接対流成分を計ることで物質伝達率を測定し、熱伝達とのアナロジーを仮定することで熱伝達率を算出し熱収支を求めるという方法を試みた。

$$k = E / \Delta x \dots\dots\dots (式1)$$

k : 物質伝達率 [kg / (m<sup>2</sup> · s · (kg/kg<sup>'</sup>))] ,

E : 蒸発速度 [kg / m<sup>2</sup> · s]

Δx : 表面と大気の絶対湿度の差 [kg/kg<sup>'</sup>]

$$\alpha / C = 0.83k \dots\dots\dots (式2)$$

α : 対流熱伝達率 [W / m<sup>2</sup> · K]

C : 湿り空気比熱 [J / kg · K]

$$H = \alpha (\theta_s - \theta_a) \dots\dots\dots (式3)$$

H : 顕熱輸送量 [W / m<sup>2</sup>]

θ<sub>s</sub> : 表面温度 [°C]

θ<sub>a</sub> : 外気温度 [°C]

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_s \dots\dots\dots (式4)$$

L : 気化の潜熱 [J / kg]

$$Rn = H + G + LE \dots\dots\dots (式5)$$

Rn : 正味放射量 [W / m<sup>2</sup>]

G : 伝導熱量 [W / m<sup>2</sup>]

LE : 潜熱輸送量 [W / m<sup>2</sup>]

$$E = \beta k (x_s - x_a) \dots\dots\dots (式6)$$

β : 蒸発効率

x<sub>s</sub> : 表面の絶対湿度 [kg/kg<sup>'</sup>]

x<sub>a</sub> : 外気の絶対湿度 [kg/kg<sup>'</sup>]

物質伝達率の測定に際しては、65 cm × 55 cm × 5 mm のアクリル板にろ紙を貼り付けた試料を用いた (Fig. 7)。ろ紙に滴り落ちない程度の水を含ませ、舗装区上部で30から40分間暴露し、その重量変化から物質伝達率を算出した (式1)。ろ紙蒸発面の絶対湿度の算定に必要な表面温度は、ろ紙内にサーミスタ温度計を挿入して測定している (Fig. 6)。また、近傍風速は超音波風速計を用いて測定し、物質伝達率と近傍風速との関係を求めた (Fig. 8)。なお、近傍風速は風ベクトルを合成した風速つまり合成風速に変換した。

次に、物質伝達と熱伝達のアナロジーを仮定し、熱伝達率を算出した (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が、風速と熱伝達率との間で明確な対応関係を得ることができた。

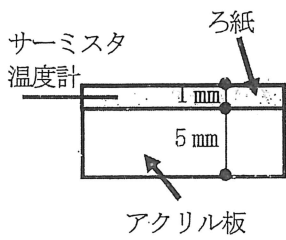


Fig. 6 試料断面構成



Fig. 7 ろ紙による物質伝達率の測定

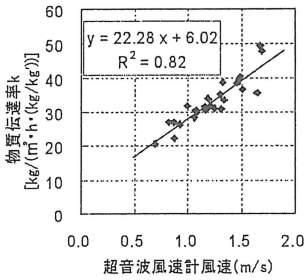


Fig. 8 物質伝達率と合成風速との関係

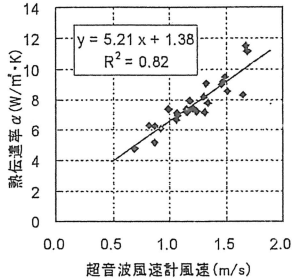


Fig. 9 熱伝達率と合成風速との関係

Fig. 8、Fig. 9 の関係から超音波風速計の風速さえわかれば全ての実験期間中についての物質及び熱伝達率が求まることになるが、超音波風速計はろ紙実験中のみ使用していたものであるため、超音波風速計と実験期間中常時計測していた風車型風速計との対応関係を求め、風車型風速計のデータで物質および熱伝達率を算出できるようにした (Fig. 10)。

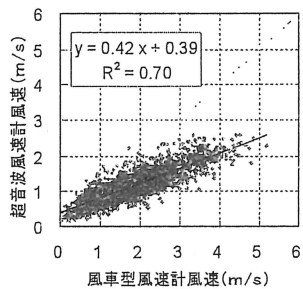


Fig. 10 風車型風速計と超音波風速計との関係

#### 4-2. 熱収支特性

Fig. 9 の関係から算出した熱伝達率および舗装材の表面温度、気温より顕熱輸送量を算出し (式 3)、熱収支式 (式 5) の残差により潜熱輸送量を求めた。潜熱輸送量を水の蒸発潜熱で割ることで蒸発速度を算出した。蒸発速度と (式 1) により算出した物質伝達

率と表面と外気の絶対湿度から蒸発効率を求めた。

Fig. 12 に舗装区の日積算日射量及び蒸発効率の変化を示す。これを見ると、前日に降雨があった9月8日は10日以上降雨がない9月21日に比べ、蒸発量が多い。また、両者の熱収支のグラフを比較すると、9月8日に比べ9月21日は潜熱輸送量が少なく、蒸発冷却効果が少なくなっていることが確認できた (Fig. 11)。

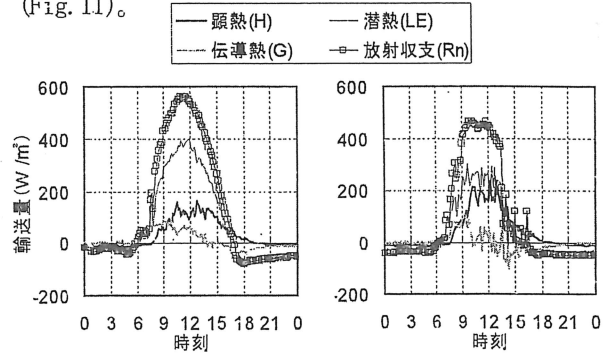


Fig. 11 熱収支の日変化(右:9/8、左:9/21)

#### 5. ブロックとマットの機能評価

舗装区の熱収支特性や蒸発特性等について評価を行った結果、湿潤型舗装の蒸発冷却効果の持続性が確認できた。しかし、夏季実験期間において、マット内部温度が終日 20℃以上で、感温点以下のケースを確認できなかった。そこで、感温点を 30℃に上げたマットを使用した試験区、ブロックのみの試験区、既存のマットを使用した試験区を新たに施工し効果の違いを検討する実験を次に行った (Fig. 13)。なお、試験区面積、測定項目及び測定機器は以前と同じで、測定期間は2005年8月11日から2005年12月28日である。

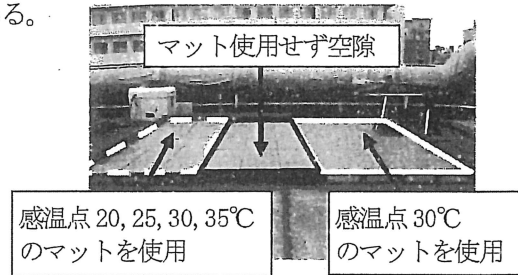


Fig. 13 3種類に分かれた舗装区

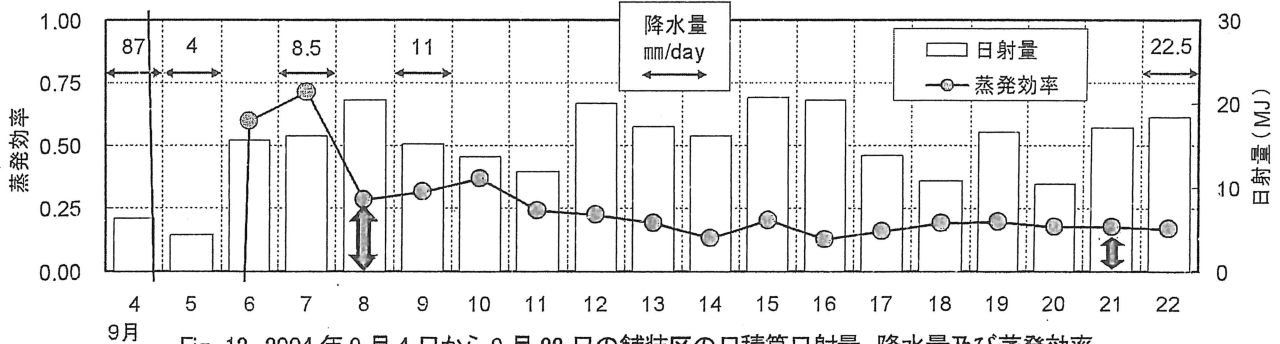


Fig. 12 2004年9月4日から9月22日の舗装区の日積算日射量、降水量及び蒸発効率

5-1. 温度特性

比較的良好なデータが取れた2005年8月19日の3舗装区の試験体表面温度をFig. 14に示す。これを見ると、日中感温点30℃区が一番表面温度が高く、空隙区が一番低かった。空隙区の表面温度がマットを有する試験区より低くなったのは、空隙区が中空層を有することでブロックの表面からに加え裏面からも熱を放出しているためだと思われる。また、今回選定したブロックはある程度の保水性を有するものだったため、このブロック自体に保持された水分が蒸発することで蒸発冷却効果が生まれたことも考えられる。実際、ブロックのメーカーカタログには降水後6日程度は保水効果が持続するとあった。

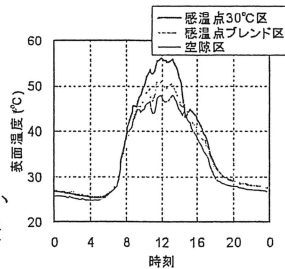


Fig. 14 2005年8月19日の試験体表面温度

5-2. 熱収支特性

2005年8月19日の3舗装区の熱収支の日変化をFig. 15に示す。日中、潜熱輸送量は感温点ブレンド区が一番多く、感温点30℃区、空隙区は感温点ブレンド区より80W/m<sup>2</sup>程度少なかった。空隙区の潜熱輸送量が少ないことはマットからの水分供給がまったくないためであるが、輸送量は0ではなく日中約150W/m<sup>2</sup>で推移している。これは、先に示したとおり今回実験に使用したブロックがある程度の保水性を有するものであったことが関係していると考えられる。実験期間中降雨が比較的継続的であった気象状況も重なったことでブロックのみでも常に水分が保持された状態になり、それが蒸発していたと思われる。

空隙区の日中の伝導熱流量を見るとマイナスになることがなく、常に下向きに熱が流れている。これは、空隙区のブロックが裏面からも熱を放出し、温度上昇を防いでいるとした前述の考察を裏付けている。

Fig. 16に2005年8月17日から9月18日までの3舗装区の日積算蒸発量、日積算日射量及び日積算降雨量を示す。空隙区の蒸発量を見ると夏季期間中0になることはなく、ブロック自体の保水性が効いていると

思われる。つまり、湿潤型舗装区の蒸発冷却効果はブロックの保水性に強く影響を受けているということがわかった。しかし、感温点ブレンド区の方が蒸発量は多く、この差がマットを有することの効果であるといえる。また、蒸発量は感温点ブレンド区が一番多く、感温点30℃区と比べると約0.7kg/m<sup>2</sup>・dayほどの大幅な差が見られた。感温点による効果の差にしては大きい。これは、感温点30℃区のブロックとマットの密着が不十分だったことが原因と考えられる。

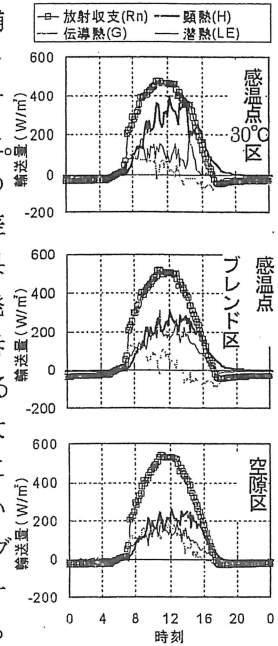


Fig. 15 2005年8月19日の3舗装区の熱収支

6. 結論

湿潤型舗装区の蒸発特性に関する評価を行った結果、湿潤型舗装はある程度の蒸発持続性があるということが判明した。

舗装区を3分割しての実験については、空隙区が降雨後数日たっても蒸発量が0になることはなく、湿潤型舗装区の蒸発冷却効果にブロックの保水性が強い影響を及ぼしていることがわかった。しかし、感温点ブレンド区と比べ蒸発量は少ないことから、マットの有効性を確認できた。また、感温点ブレンド区と感温点30℃区の蒸発量を比べると両者の間には大きな差があり、感温点30℃区のブロックとマットが密着していなかった可能性が示された。今回の施工方法ではこのような接触不良が起きてしまう可能性があり、湿潤型舗装実用化には今後さらなる構造的工夫が必要になると考えられる。

参考文献

- 成田健一・三坂育成・国島武史・中山康孝・若林信介：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，2004

※本実験は東京都環境科学研究所と竹中技術研究所との共同研究である

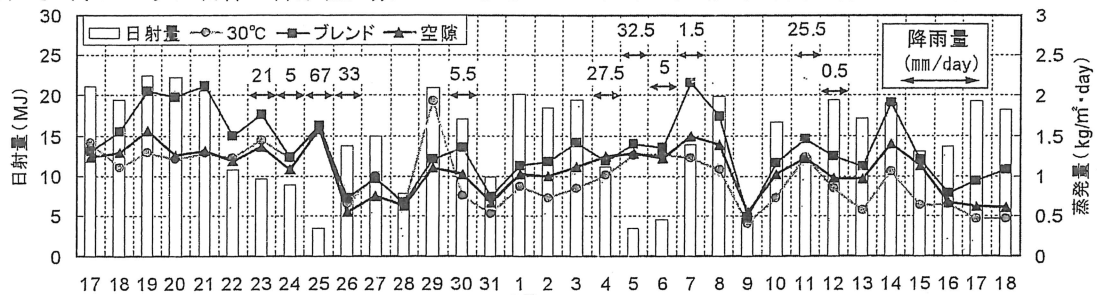


Fig. 16 2005年8月17日から9月18日の3舗装区の日積算日射量、降水量及び蒸発量

審査委員 (主査) 教授 成田 健一  
 審査委員 (副査) 教授 伊藤 庸一  
 審査委員 (副査) 教授 川村 清志