

## ヒートアイランド対策材料の定量評価法に関する研究

細谷夏樹\* 三國 彰\*

Quantitative measurement of water-retentive materials for easing heat island phenomenon

Natsuki Hosoya, Akira Mikuni

Heat island phenomenon which raises the temperature of urban area is one of the recent environmental issues. One of the effective measures against this phenomenon is using water-retentive materials, which lowers the surface temperature by evaporative cooling. In most cases, however, it is difficult to estimate the quantitative availability of these materials in outside due to the changeable weather. In this study, we measured the surface temperature and the amount of evaporation for two water-retentive materials in temperature-controlled reservoir. Such quantitative measurement enabled us to verify that the surface temperature under constant-rate drying period does not depend on materials but on external factors (temperature, humidity, wind). Additionally, the length of constant-rate drying period varied with the surface reflectance and pore size of water-retentive materials.

## 1. 緒言

近年、ヒートアイランド現象による都市部の気温上昇が問題となっており、その主な要因はアスファルト舗装やコンクリート建造物からの放射熱、エアコンの室外機や自動車等からの排熱であると指摘されている。<sup>1)</sup> 国や自治体では、屋上緑化を始めとして、保水性材料や反射塗料などのヒートアイランド対策材料による路面や建物からの放射熱を低減する対策が実施されている。<sup>2),3)</sup> 多くの場合、屋外での温度計測や熱画像測定によってヒートアイランド対策材料の効果を実証しているが、日射量・風速・気温・湿度などの変動を受ける屋外試験では、定常状態での材料試験のような物性評価ができないという問題点がある。

そのような中、東京都環境局は 2005 年にヒートアイランド対策ガイドラインを策定し、様々な保水性建材のヒートアイランド現象緩和効果について体系的な評価を行っている。<sup>4)</sup> そして、含水率が 20 vol% 以上かつ蒸発速度を一定に維持できる保水性材料には表面温度を抑制する性能があることを明らかにした。しかしながら、含水率が大きいにも関わらず、温度上昇の抑制効果が小さい傾向を示す材料も存在し、含水率と表面温度の抑制効果に明確な関連性がないことも付記している。すなわち、保水性材料では含水率以外の要因も表面温度の抑制効果に影響することを示唆しており、これらの要因を解明することでヒートアイランド対策に最適な保水性材料の開発指針が立てられる。

本研究では、含水率の等しい保水性材料について表面温度や水分蒸発速度の定量評価を行い、含水率以外の要因が保水性材料の蒸散特性に与える影響を検討した。

## 2. 実験方法

## 2・1 定量評価法

ヒートアイランド現象の主要因がアスファルト舗装やコンクリート建造物からの放射熱であるため、日射を受ける材料の表面温度を測定することが、材料からの放射熱を評価することに相当する。

すなわち、材料の表面温度が低いほど放射熱は小さくなり、継続的な表面温度の低減効果がヒートアイランド現象の抑制につながる。

保水性材料の場合、日射によって材料表面から水分が蒸発し、蒸発潜熱で表面温度を低く保つことを目的としている。したがって、定常状態下における保水性材料の表面温度の経時変化からヒートアイランド現象の抑制効果を評価することができる。その際、含水率の違いによる影響を排除するため、含水率の等しい保水性材料を用いて実験を行うことにした。

## 2・2 保水性材料

表 1 に本研究で用いた 2 種類の保水性材料（縦 100 × 横 40 × 厚さ 20 mm）の基本的な物性を示す。FA および WO は、配合原料の違いによって色や平均気孔径が異なるが、かさ比重・気孔率・含水率がほぼ等しいため、類似した多孔質構造を有する試料であると推定できる。

表 1 保水性材料の基本的な物性

試料	色	かさ比重	気孔率 (wt%)	含水率 (wt%)	平均気孔径 (μm)
FA	茶	0.86	63.1	73.6	1.5
WO	白	0.87	64.6	74.2	3.9

以下では、一定の温度・湿度・水分量、かつ無風の条件下において、試料の表面温度と水分蒸発過程を測定した。

## 2・3 実験装置

図 1 に実験装置の概要を示す。同一の試料を 2 つ用意し、断熱材（縦 160 × 横 160 × 厚さ 40 mm）に設置した。ここで、試料の表面は断熱材の上面と高さを揃え、2 つの試料は断熱材の中心線に対して左右対称に位置している。

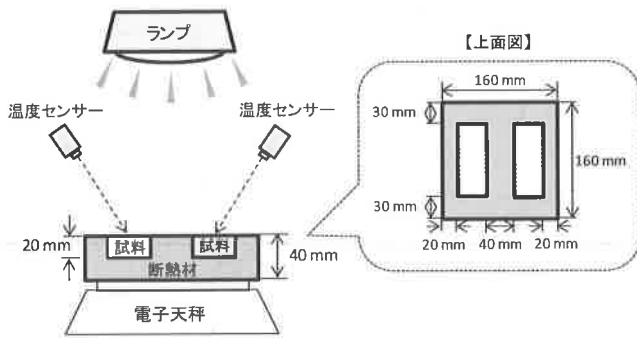


図1 表面温度および蒸発性の測定法

これを電子天秤の上に載せて、試料の表面から 280mm の高さで散光型のビームランプ（東芝ライテック社製 BRF110V120W）を照射し、所定時間経過後における試料の表面温度および重量を測定できるようにした。なお、表面温度の測定には非接触型温度センサー（オムロン社製 ES1-LP10）を用い、各試料の中心部を測定した。さらに、表面温度の測定径を  $\phi 10$  mm として測定範囲に分布を持たせることでランプ照射による局所的な温度差を平均化し、試料間の測定誤差を  $\pm 1^\circ\text{C}$  に調整した。

また、試料の底面に熱電対を取り付けて試料の底面温度も測定できるようにし、表面と底面の温度を調べることで試料全体の温度が均一になっていることを確認できるようにした。なお、これらの実験は全て温度  $25^\circ\text{C}$ 、湿度 50%RH の恒温槽内にて行い、ほぼ無風の状態とした。さらに、ビームランプの強さは可変であり、ランプ直下の照度計（T&D 社製 TR-74Ui）で照度を計測しながらビームランプの強さを調節した。

#### 2・4 蒸散特性の評価

試料にビームランプを照射して温度が一定となった後、片方の試料に 10 ml の水を保水させて表面・底面温度および重量変化を測定した。この手法により、乾燥試料と保水試料の表面温度を同時に観測することが可能となった。なお、ビームランプの照射による乾燥試料の重量変化率は 0.5 wt% 未満であり、電子天秤で観測する重量変化は保水試料からの水分蒸発に相当する。また、滴下した水分量は FA および WO の飽和含水量の約 30% であり、10 ml の水は完全に試料に吸水されていた。

また、ビームランプを照射せずに  $40^\circ\text{C}$  の恒温槽内で乾燥させた場合（熱風乾燥）の FA および WO の重量変化を測定した。これにより、熱源（ランプ・熱風）の違いによる水分蒸発過程の比較を行い、試料の蒸散特性について考察した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3・1 装置の校正

図2に定常状態におけるビームランプの照度と乾燥試料の表面温度について関係を示す。試料 FA および WO とともにランプ照度の増加に伴って表面温度が上昇し、その増加率

は FA と WO で異なっている。光の吸収・反射・透過を考えた場合、本試料が透光性の低い材料であることから透過の寄与は無視できる。したがって、FA と WO の温度差は主に反射率の違いを反映していると考えられる。実際、可視光領域（400-700 nm）における試料の平均反射率を測定すると、FA で 17%、WO で 63% となり、WO の反射率が大きい結果となった。

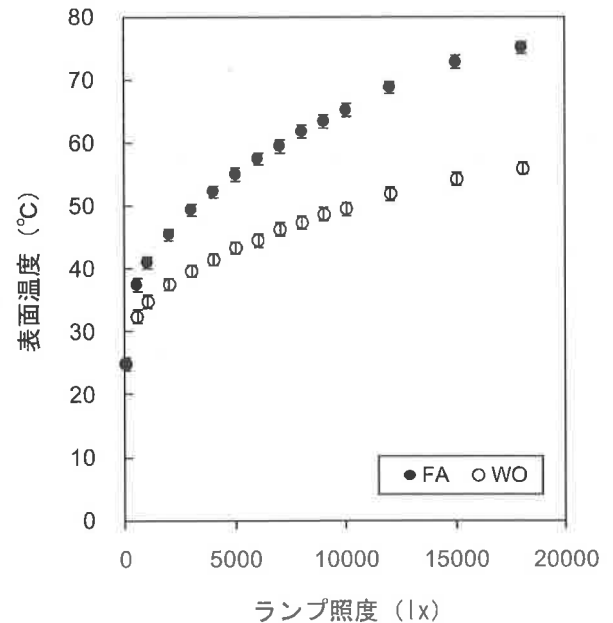


図2 定常状態における乾燥試料の表面温度

乾燥試料の表面温度を日中（2011年6月）の屋外で測定したところ、FA が  $55\sim 60^\circ\text{C}$ 、WO が  $43\sim 48^\circ\text{C}$  であった。そこで、FA の表面温度が  $58(\pm 1)^\circ\text{C}$ 、WO の表面温度が  $45(\pm 1)^\circ\text{C}$  となるようにビームランプの照度を設定（6000 lx）し、これが夏季の日射量に相当すると仮定して実験条件を決定した。

図3は照度 6000 lx の際に定常状態となった試料の表面および底面温度を示す。乾燥時には FA と WO の表面温度は約  $15^\circ\text{C}$  の差があるが、保水時には FA と WO の表面温度は  $35^\circ\text{C}$  で等しい。さらに、保水時には底面も表面と同様に  $35^\circ\text{C}$  になっていることから、試料全体が均一に冷却されていることがわかる。

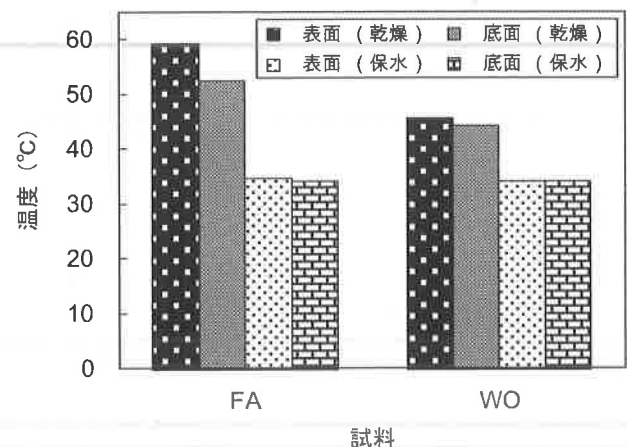


図3 定常状態における試料の表面および底面温度

### 3・2 表面温度の経時変化

図4にFAとWOの表面温度の経時変化を示す。FA、WOともにランプ照射から90分で試料の表面温度は一定となり、150分後に10mlの水を試料に滴下(図中の矢印)すると、表面温度はどちらも35℃まで低下した。そして、表面温度を35℃に保ち続けた後、表面温度は上昇して乾燥時の温度に近づいた。

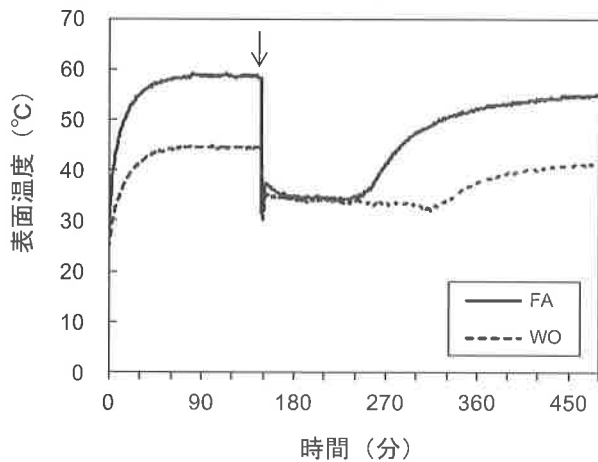


図4 表面温度の経時変化

ここで、材料の乾燥過程から表面温度が35℃で一定の期間を定率乾燥期間、表面温度が上昇する期間を減率乾燥期間と定義することができる。<sup>5)</sup> FAとWOの定率乾燥期間を比較すると、FAで90分、WOで150分となっており、同一の水分量においてWOはFAより定率乾燥期間が60分ほど長い。また、FAとWOは表面反射率が異なるにも関わらず、定率乾燥期間の表面温度は35℃で等しい。すなわち、表面反射率の違いは定率乾燥期間の表面温度には影響せず、定率乾燥期間の長さに影響を与えていると考えられる。そこで、各試料の水分蒸発速度から定率乾燥の持続性について調べることにした。

### 3・3 水分蒸発速度と水分移動速度

図5にビームランプを照射した保水試料の水分量変化を示す。なお、図中では試料に10mlの水を滴下した時刻を基準としている。定率乾燥では水分蒸発速度が一定となるため、水分量は時間の経過と共に直線的に減少する。<sup>5)</sup> したがって、図5における直線の傾きが水分蒸発速度に相当し、直線の傾きから水分蒸発速度を求めることができる。その結果、定率乾燥期間における単位面積あたりの水分蒸発速度は、FAが0.21 g/s・m<sup>2</sup>、WOが0.17 g/s・m<sup>2</sup>と算出された。ここで、FAとWOの水分蒸発速度が異なる理由について検証するため、熱風乾燥による水分蒸発速度の比較実験を行った。

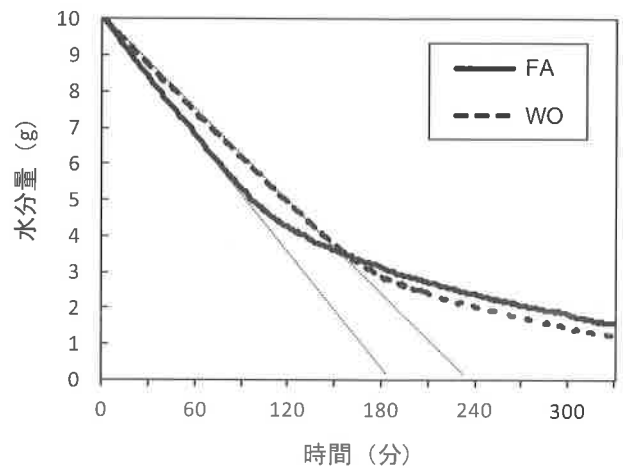


図5 ランプ照射による水分量の変化(照度:6000 lx)

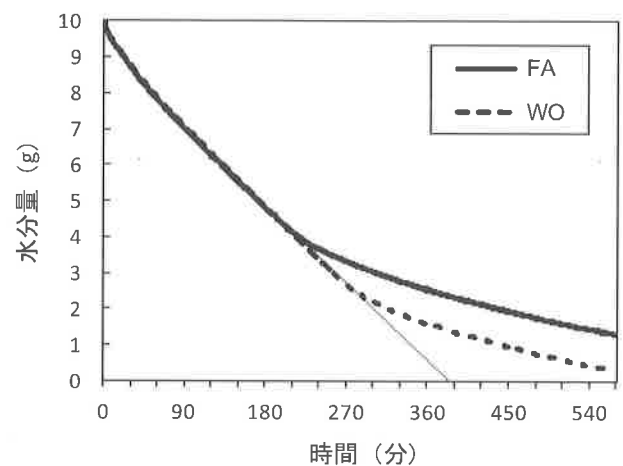


図6 熱風乾燥による水分量の変化(温度:40℃)

図6は熱風乾燥した保水試料の水分量変化を示す。熱風乾燥の場合、FAとWOの定率乾燥期間における水分蒸発速度は0.10 g/s・m<sup>2</sup>で等しく、材料の種類に依存しない。これは、熱風乾燥による水分蒸発速度が外的要因(温度・湿度・風速)によって決まるためである。<sup>5)</sup> 一方、ランプ照射による乾燥過程では試料の表面反射率が高いほど供給熱量が小さくなるため、水分蒸発速度は小さくなる。したがって、ランプ照射によるFAとWOの水分蒸発速度の差は表面反射率の違いに由来すると考えられる。

また、図6からWOはFAより定率乾燥期間が長いことがわかる。定率乾燥では試料の表面付近が常に湿潤状態にあり、熱風による供給熱量と蒸発潜熱による消費熱量が釣り合うことで表面温度が一定となる。<sup>5)</sup> そのため、表面付近の水が蒸発すると試料内部から表面に水が移動して表面付近を常に湿潤状態とする必要があり、内部の水分移動速度が表面の水分蒸発速度より遅くなると、水分蒸発量が低下して減率乾燥に移行する。したがって、WOの場合は内部から表面への水分移動速度がFAより速いことが示唆され、このために定率乾燥期間が長くなったと考えられる。一般に、水分移動速度は材料自身の様々な性質(内的要因)に由来することが知られている。そこで、保水性材料の内的要因

を解明するため各試料の定率乾燥から減率乾燥へ変化する時の含水率（限界含水率）について定量評価することにした。

### 3・4 限界含水率

FA および W0 の限界含水率を式(1)にて算出した。

$$\omega_c = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $\omega_c$ ：限界含水率[wt%]，W：変化点における試料重量[g]， $W_0$ ：試料の乾燥重量[g]である。

減率乾燥では水分蒸発速度が急激に遅くなるため、含水率が同じ材料で比較した場合には限界含水率の小さい材料ほど定率乾燥期間に消費する水分量が多い。したがって、限界含水率が小さいほど水分蒸発の効率性が高く、ヒートアイランド対策材料に適していることになる。

表2はビームランプ（6000 lx）および熱風（40℃）を熱源とした場合の試料の限界含水率を示す。一般に、限界含水率は外的要因と内的要因によって左右され、定率乾燥速度が速いほど限界含水率は大きくなる傾向にある。実際、ビームランプと熱風では試料の乾燥速度が違うために限界含水率の値も異なっている。しかし、いずれの条件においてもW0の限界含水率はFAより約2 wt% 小さい。

表2 限界含水率の比較

熱源	FA	W0
	$\omega_c$ [wt %]	$\omega_c$ [wt %]
ビームランプ (6000 lx)	6.5	4.4
熱風 (40℃)	5.1	2.9

保水性材料の限界含水率について、横田らは平均気孔径が4 $\mu\text{m}$ 以下において気孔径が小さいほど限界含水率が高くなるという結果を報告している。<sup>6)</sup> 表1より、FAの平均気孔径は1.5 $\mu\text{m}$ でW0より小さく、FAの限界含水率がW0よ

り大きくなる結果は横田らの報告と一致する。このことから、FAとW0の平均気孔径の差が水分移動速度に影響し、保水性材料の内的要因になっていることが考えられる。

## 4. 結 言

本研究では、保水性材料の表面温度と水分蒸発速度の経時変化から、含水率以外の要因が保水性材料の蒸散特性に与える影響を定量評価した。この定量評価法では、測定時の外的要因（温度・湿度・風速）による影響を排除し、水分量を一定にすることで含水率以外の内的要因を抽出した。そして、定率乾燥期間における保水性材料の表面温度は外的要因によって決まることを実証し、含水率以外の内的要因として表面反射率や平均気孔径が定率乾燥の持続性に影響することを明らかにした。

これらの結果より、保水性材料によるヒートアイランド現象の緩和効果を定量評価する場合は、保水した材料の表面温度ではなく、定率乾燥の持続性で比較することが望ましいと言える。

## 参考文献

- 1) ヒートアイランド対策大綱:ヒートアイランド対策関係府省連絡会議, (2004).
- 2) 日本ヒートアイランド学会:第6回全国大会予稿集, (2011).
- 3) 日本ヒートアイランド学会:第7回全国大会予稿集, (2012).
- 4) 東京都環境局:ヒートアイランド対策ガイドライン, (2005).
- 5) 中村正秋, 立元雄治:初歩から学ぶ乾燥技術, 丸善出版, (2011).
- 6) 横田耕三, 山地豪, 平野晋一:日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.5, p40-46, (2010).