

保水性セラミックタイルの 熱環境改善に関する研究

Study on the contribution of water-retentive ceramic tile
to the reduction of environment heat accumulation

尾崎哲二¹・鈴木義則²

Tetsuji Ozaki, Yoshinori Suzuki

¹正会員 工修 株式会社青木建設 研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

²農博 九州大学 農学部 (〒812-8581 福岡県福岡市箱崎6丁目10-1)

A new type of water-retentive ceramic tile using industrial wastes as raw material has been developed. The tile has pores with an average size of about 10 micrometers, and, in a saturated condition, has a volumetric water content of more than 40%. Its moisture retention curve is quite unique, different from any kind of traditional types of tile. The performance of the tile was tested by exposing water-saturated tile to the sun in summer. In the test, the surface of the tile was more than 10 °C cooler than the concrete roof. In another test, a tile pavement at a housing complex was sprinkled with water and the surface temperature of the pavement was measured. The test showed that the surface temperature of the pavement were also low and the temperatures of air directly above the pavement were lower than the ambient temperature by 1 to 2 °C. The reason for these phenomena was found out to be that heat was consumed as evaporative cooling latent heat so that the surface was cooled.

Key Words : water-retentive ceramic tile, environmental heat accumulation, water, evaporation, moisture retention curve, industrial wastes, pavement

1. はじめに

現代のインフラや都市空間は、主にコンクリートやアスファルトなどの材料によって建設されている。そのため夏期における都市部では、ヒートアイランド現象など深刻な熱環境の悪化がみられ、この軽減は緊急の課題となっている。

今回、上記の問題の一解決方法として、産業廃棄物を原料とする保水性セラミックタイル（以後、保水性タイル）を開発した。これはその性能が通常のセラミックタイルの基準を満たすとともに、内部にミクロな空隙をもたせ、この空隙に含まれた水を少しずつ蒸発させてその気化熱を利用し、この保水性タイル自体の温度および周辺の空気の温度の上昇を抑えようとするものである。

本タイルをビルの屋上や都市の歩道、また河川、

海岸におけるアプローチや公園など直射日光を受ける比較的水平的な部分に敷設し、タイルや下地の砂に保水される雨水、貯留した水、さらには下水道処理水などの未利用の水資源を活用すれば、夏期における熱環境の改善を図ることができるものと思われる。

本研究では、今回開発した保水性タイルの物性値試験の結果、ならびにその温度抑制効果についての野外試験の結果を報告する。

2. 保水性セラミックタイルの製造¹⁾

一般にセラミックタイルは、粘土を主原料とすることによりその塑性を利用して成型され、焼成時にはガラス質の成分が溶けてバインダーとなり焼結する。通常その水分特性は不透水性を示す。

今回開発した製造法は、各種産業廃棄物を粒状あ

るいは粉末状に処理して、これらを適当な割合に調合したあと型枠に入れ、プレスにて成型し、1100～1200℃の温度で焼成するものである。産業廃棄物の性質を知り、それらをうまく配合することがポイントになる。

収縮の少ないことが製造法の大きな特徴であるが、これは内部にミクロな空隙を生じることと関係しており、これまで不透水性や稠密性をその属性としてきたセラミックスの製造法とは異なるものである。産業廃棄物としては、フライアッシュ、下水道汚泥スラグ、ヘドロなどに実績があるが、ここでは大谷石の石材を切り出したあとに残る端材の粉碎物を主原料とする保水性セラミックタイル（以後保水性タイル）を対象とする。

3. 保水性タイルの物性値¹⁾

(1) 空隙の分布

保水性タイルに存在する空隙径の分布を水銀圧入法により調べた。空隙径のヒストグラムを図-1に示す。

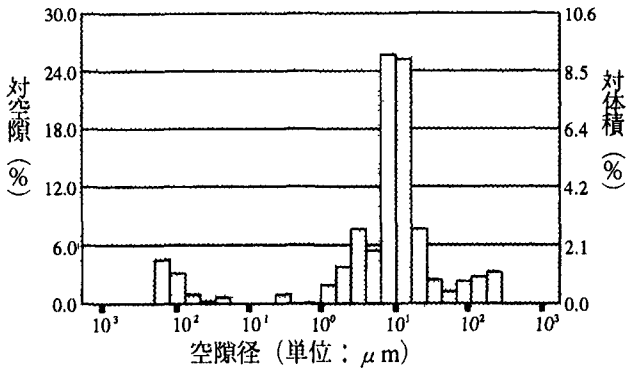


図-1 保水性タイルにおける空隙径のヒストグラム

径10マイクロメートルの空隙を中心とした分布を示し、10²マイクロメートル近くの径を除けば、ほとんどの径は1～100マイクロメートルの範囲にある。

(2) 力学的特性

保水性タイルの力学的特性等を表-1に示す。

表-1 保水性タイルの力学的特性等			
測定項目	測定値	基準値	測定方法
曲げ強度 (Kgf/cm,t=15mm)	37.6	12.24以上	JISA5209準拠
耐磨耗性 (g)	0.06	0.1以下	〃
吸水率 (%)	18	-	〃
耐ひび割れ性	異常なし	異常なし	〃
耐凍害性	異常なし	異常なし	〃

耐薬品特性

水酸化	ナトリウム 外観変化なし外観変化なし〃
塩酸	外観変化なし外観変化なし〃

各項目ともタイルの基準値を満たす。吸水率は高いが、ひび割れ性、耐凍害性について問題は生じない。

使用法は、歩道への適用を原則としている。

(3) 水分特性

保水タイルの物性値を表-2に、不飽和透水係数および水分特性曲線をそれぞれ図-2、3に示す。

含水比や間隙比から、このタイルがセラミック建材としては極めて大きな空隙をもつことがわかる。

表-2 保水性タイルの物性値			
測定項目		測定値	測定方法
密度	$\rho_s(g/cm^3)$	2.575	JISA1202
含水比	w (%)	28.4*	JISA1203
湿潤密度	$\rho(g/cm^3)$	1.851*	JSFT191
乾燥密度	$\rho_d(g/cm^3)$	1.442	-〃
間ゲキ比	e	0.786	-〃
飽和度	Sr(%)	93.1*	-〃
飽和透水係数	$k_{15}(cm/sec)$	1.25×10^{-4}	JISA1218

* は毛管飽和時の値を示す

飽和透水係数は $1.25 \times 10^{-4} cm/sec$ であり、比較的透水性のよい砂質地盤に相当する。不飽和透水係数は、

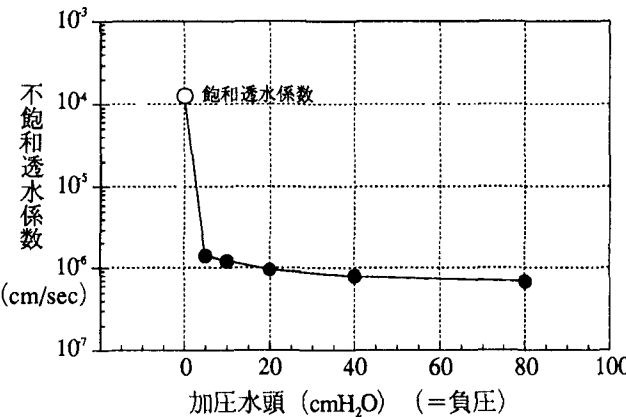


図-2 不飽和透水係数（リチャーズ法による）

加圧水頭5cmにおいて $1.25 \times 10^{-6} cm/sec$ と約100倍以上低下するものの、それ以上の加圧水頭に対しては数倍の低下を示すのみである。このような透水性を示すpF値の領域は、水分特性曲線からpF2.2程度までで、これより大きなpF値の状態では、不透水材として挙動するものと考えられる。

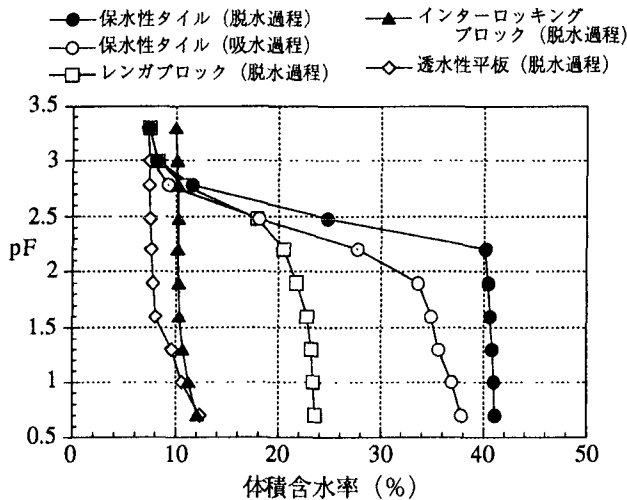


図-3 水分特性曲線 (JSFT151による)

水分特性曲線はpF値が次第に大きくなると、水は放出され、体積含水率が小さくなることを示している。保水性タイルの曲線が他の舗装材に比べ際だって保水性が高いことを示す形となっている。脱水過程に注目すれば、pF値が2.2に至るまで体積含水率は40%を越す。pF値が0.0から2.2近くまではその勾配 ($\Delta pF / \Delta \theta$) が大きく、pF値の変化が大きいわりには体積含水率の低下が小さい。この範囲の水分状態では、わずかの水分の変化がpF値を大きく変化させることを示す。例えば蒸発により表面から水分がわずかに減少しても圧力の低下が大きく下部とのポテンシャルの差が大きくなることを意味する。

pF値が2.2を越すと勾配は小さくなって体積含水率は急激に減少し、水分のほとんどが放出される。これは空隙に閉じこめられたほとんどの水分のpF値が2.2程度であることを示す。空隙に存在する水の圧力はその空隙の大きさに依存するから²⁾、この保水性タイルでは、保水される水のpF値が2.2程度となるような空隙が支配的であることが推察される。これは空隙の分布において10マイクロメートルを中心とする径が支配的であったことと対比すれば、この10マイクロメートル前後の空隙に保水される水のpF値が2.2程度であることを示す。

4. 温度上昇抑制効果の実験³⁾

(1) 保水性タイル単体の実験

a) 実験

場所；九州大学農学部2号館屋上

日時；1994年7月21日

実験；保水性タイル (300×300×25mm) と屋上に敷設されているコンクリート板 (375×375×25mm, 4スミに足付 (高さ：50mm)) を含む8種類の供試体を準備し、これらを屋上に敷き並べ、それらの表面

温度を測定した。供試体を図-4に示す。

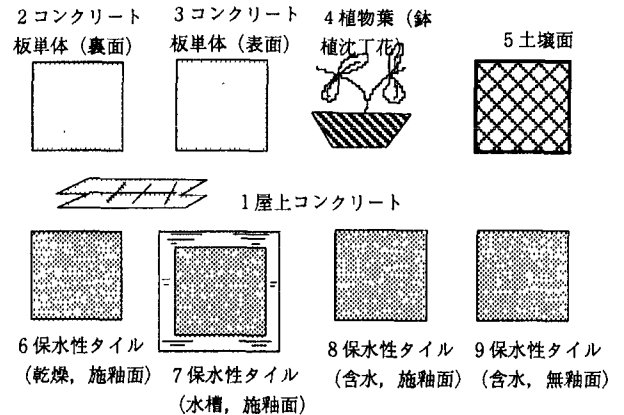


図-4 実験に使用した供試体

供試体の処理は以下のとおりである。No.1, 2, 3のコンクリート板は含水させず、側面はビニールテープを巻き蒸発を抑制した。No.4 (鉢植沈丁花の葉)、5の土壌の水分状態は、いずれも圃場含水量となるように随時撒水した。保水性タイルのうちNo.6~8は釉薬を施した面 (施釉面) を上に向け、No.9は、釉薬が施されていない素焼き状態である裏面 (無釉面) を上に向けた。No.6は含水しない状態、No.8, 9は含水状態であった。またNo.7は表面を水面上に出し、保水性タイル全体を水中へ浸けた。No.6, 8, 9の保水性タイルの側面は、コンクリート板と同様ビニールテープを巻き蒸発を抑制した。

表面温度はサーモトレーサー (6T62型) により20分間隔で測定した。含水したNo.8, 9の保水性タイルは電子天秤にて水分減少状態を原則として20分間隔で測定した。日射量はカデックデータロガーにより、純 (正味) 放射量はCN-11型とペンレコーダによりそれぞれ測定した。温湿度は熱電対温度計により乾・湿球温度を測定して求めた。純放射量の測定は、一定の時間間隔で直接対象の供試体について行った。

b) 結果

1994年の夏は異常高温の日が多く、当日の供試体の表面最高温度の出現時間帯の気温は36.7℃、湿球温度は27.4℃であった。実験中における各供試体の表面最高温度を表-3に示し、各供試体の表面温度の経時変化を図-5に、各供試体の表面温度と気温との温度差の経時変化を図-6に示す。

保水性タイルのうち含水させ無釉面を上に向けたNo.9の保水性タイルが33℃と最も低温を実現し、植物葉および土壌面よりも低温であった。気温との差においても屋上コンクリート板は約20℃もの過高温

表-3 供試体と表面最高温度

	供試体	表面最高温度 (°C)
No. 1	屋上コンクリート	56
2	コンクリート板単体 (裏面)	51
3	コンクリート板単体 (表面)	50
4	植物葉 (鉢植沈丁花)	36
5	土壌面	35
6	保水性タイル (乾燥: 施釉面)	48
7	保水性タイル (水槽中: 施釉面)	47
8	保水性タイル (含水: 施釉面)	46
9	保水性タイル (含水: 無釉面)	33

を示したが, No. 9 の保水性タイルは日中最大で9°C, 平均的には5°C低い値を示した。

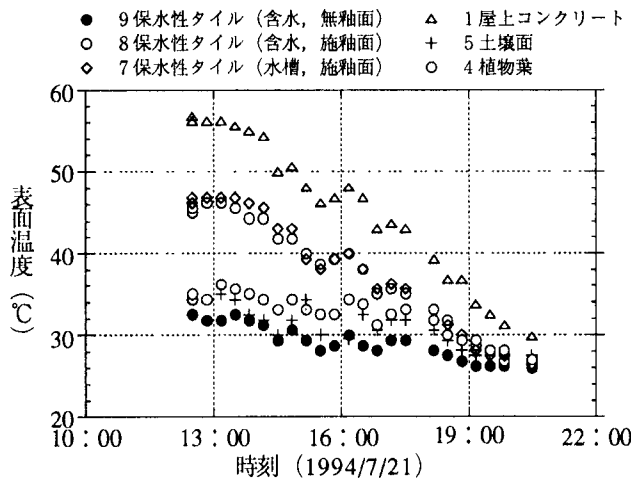


図-5 各種供試体表面温度の経時変化

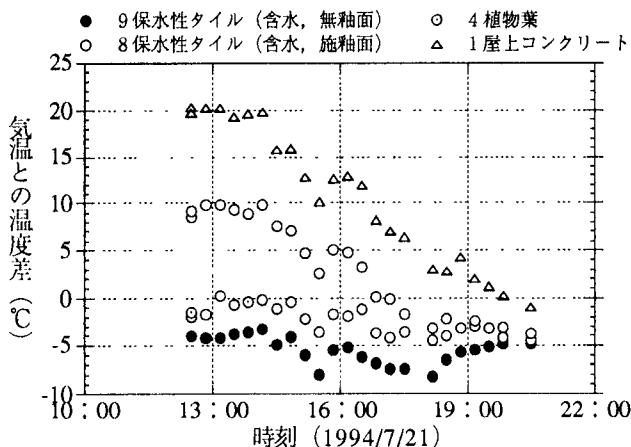


図-6 各種供試体の温度差 (表面温度-気温) の経時変化

No. 8 と No. 9 の保水性タイル水分蒸発量の変化図を図-7 に示す。

蒸発量については, 無釉面を上に向けた No. 9 の保水性タイルの場合, 最高気温前後の1時間において

は0.94mm/hrの蒸発量を示し, 釉薬面を上に向けた No. 8 の保水性タイルでは, 0.3mm/hrの蒸発量を示した。

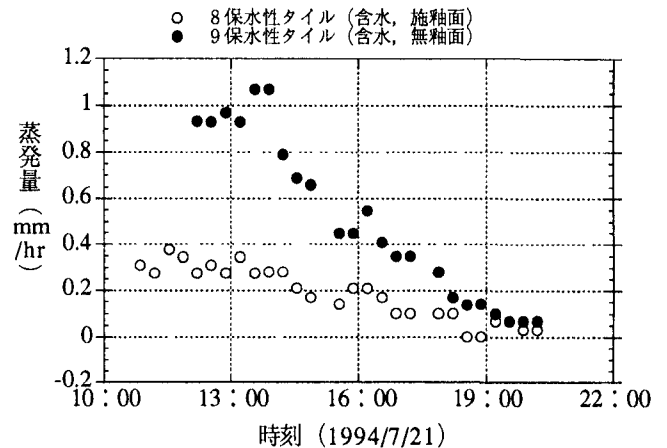


図-7 保水性タイルからの蒸発量の経時変化

この時の純放射量は, No. 9 では37cal/cm²/hrであり, No. 8 では33cal/cm²/hrであった。温度の差の割には純放射量の差が小さかったのは, 表面の短波反射の状態に差があったことが原因と考えられる。

以上の結果より, No. 9 の保水性タイルでは純放射量に対して155%相当量を気化潜熱に転換していることがわかる。ここで100%を越しているのは実験規模が小さいことによるオアシス効果によるものである。ただしその時の表面温度は湿球温度 (27.5°C) より高温であるため, 水の蒸発は抵抗を受けつつなされていたことになる。一方, No. 8 の保水性タイルでは, 純放射量33cal/cm²/hrに対して58%相当量を気化潜熱に転換している。No. 9 の保水性タイルの表面温度が低いのは, 正味放射量のうち気化潜熱への転換量が多いためであることがわかる。

実験結果より, 保水性タイルに水を含ませれば水の気化潜熱により昼間の表面温度上昇が大巾に抑制されることを確認できた。

(2) 団地における実験⁴⁾

a) 実験

場所; 住宅・都市整備公団貝塚団地 8 号棟前庭
(福岡市東区貝塚)

日時; 1996年8月5日 15:00~18:00

実験; 敷設された保水性タイル (300×150×50mm, 無釉) を含む舗装面の表面温度と直上の気温, 湿度, 日射量等を測定した。保水性タイルの施工断面図を図-8 に示し, 実験場の平面図を図-9 に示す。施工仕様は歩道仕様である。

実験区は建物の前庭の保水性タイルのうち, ルー

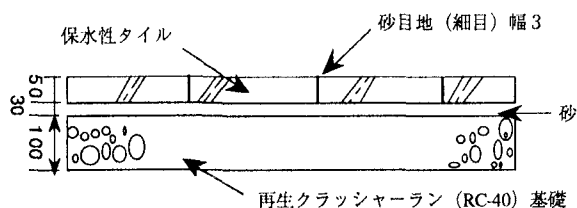


図-8 施工断面図 (単位: mm)

フバルコニーがかからない部分を分割し、西側 (301 m²) を非散水区 (乾燥), 東側 (210m²) を散水区 (湿潤) とした。さらに散水区の東側の磁器タイル部とインターロッキング歩道 (いずれも非散水区) も実験対象区とした。

実験は、散水区の保水性タイルに水を15時20分と16時過ぎの2回撒いて湿潤とした。その量は雨量換算で約10mm, 全体で約2.1m³であった。使用した水の温度は約25℃であった。

測定は、各実験区の表面温度をサーモトレーサー (6T62型) で、高さ1.2mの乾湿球温度をサーモレコーダー (TR71) によりそれぞれの中央部で、また散水区においては、高さ1.2mの風速を熱風風速計で、日射量、反射日射量をアルベドメータにてそれぞれ測定した。測定は15時より開始した。

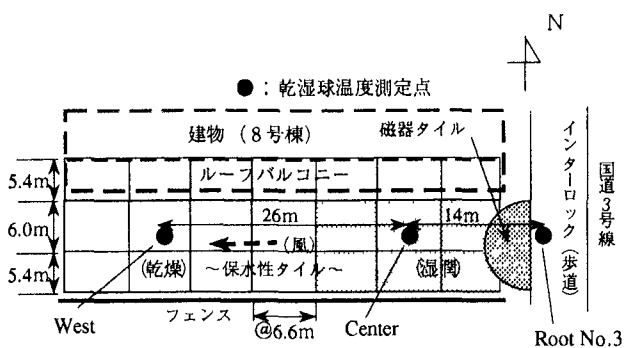


図-9 実験場平面図

b) 結果

表面温度の測定結果を図-10に、気温と湿度 (絶対湿度) の測定結果を図-11、図-12にそれぞれ示す。

実験開始直前の気象状況は、気温36℃, 相対湿度50% (絶対湿度23.4g/m³), 風速は東風で約3mであった。日射は実験中はほぼ安定していたが、散水後から1時間ほどは雲の往来があり不安定であった。

表面温度については、第1回目の水撒きにより、湿潤した保水性タイルの表面温度は、当初 (15時) 48℃であったが、16時にはそれよりも12℃低い36℃を記録した。さらに2回目の水撒きによりその温度

はさらに低下し、その後17時過ぎまで気温より1~5℃低い34~30℃の温度で推移した。他の2つの材料は気温と連動した変化を示し、インターロッキングブロックの場合、気温より15℃から10℃高い52~43℃の状態が続き、乾燥した保水性タイルでは10℃から5℃高い47~40℃であった。

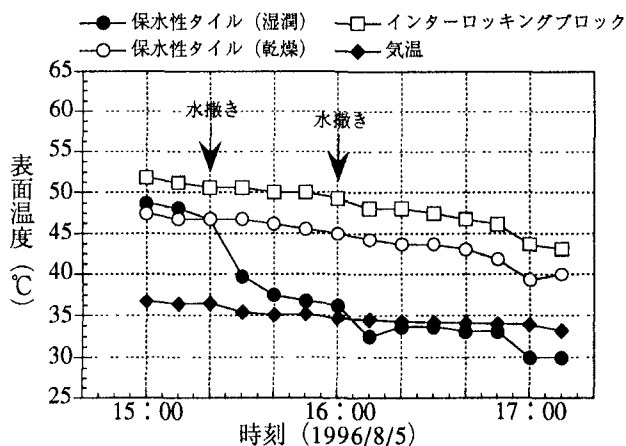


図-10 各種供試体の表面温度の経時変化

気温については、測定開始時 (15時) の3地点の気温は37~38℃とほぼ同じであったが、水を撒いた15時過ぎからCenter (散水区), West (非散水区) の両地点の気温がRoot No.3 (非散水区) に対し相対的に低下した。16時にはCenter, Westの気温はRoot No.3 に対しそれぞれ1℃, 2℃程度低い値を示した。

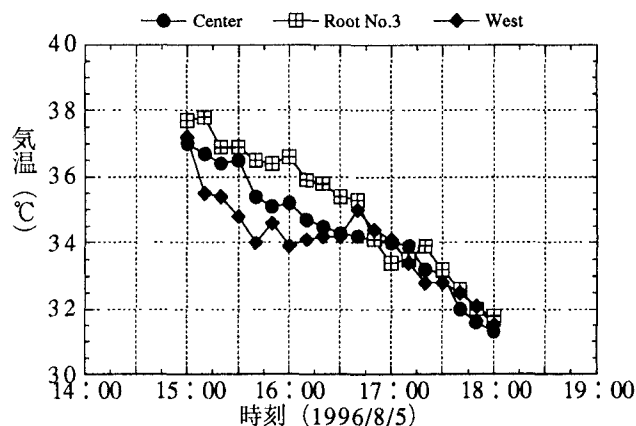


図-11 散水前後の気温の経時変化

一方湿度については、1回目の水撒きの後Centerにおいてやや上昇を示した。2回目の水撒きでは、3点とも大きく上昇しCenterでは16時40分までに0.7g/m³, Root No.3では0.8g/m³, Westでは1.1g/m³の上昇があった。

また日射量の測定から、表面温度の低下と湿度の上昇する時間帯が日射の出現帯に限られていることを確認した。

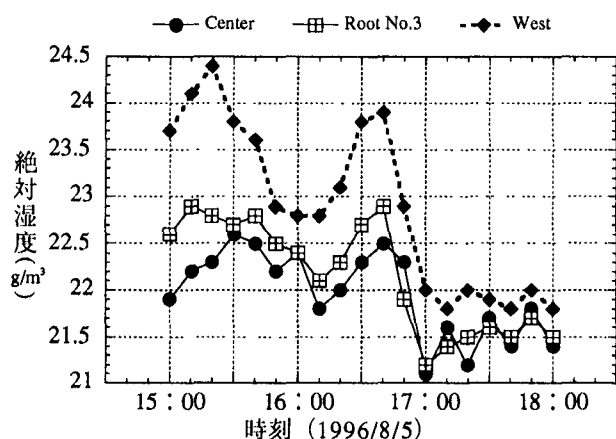


図-1 2 散水前後の絶対湿度の経時変化

以上の結果より、Center（散水区）における保水性タイルの表面温度の低下に関しては、1回目の水撒き直後では撒いた水による冷却が、その後の低下は気化冷却が主な原因と判断される。2回目の水撒きでは、3点とも湿度の大きな上昇が見られた。近傍には水分の供給源はなく、この湿度上昇は散水区からの蒸発により空気中の水分が増加したためと判断される。したがってこの後のCenterでの表面の低温度での推移は、蒸発にともなう気化冷却による効果が大きかったものと考えられる。

気温の低下に関しては、Root No.3の気温の推移から実験中冷たい風が実験場へ吹き込んだようではなく、低温度化した保水性タイルの表面によって直上の空気が冷やされた結果と判断される。散水区直上の空気が冷やされ、それが当日吹いていた東風によって風下に流れ、Westの地点で観測された。Centerでの測定値は、空気は冷却されるものの風上の国道3号線側からの温風に影響されたことを示したものである。

保水性タイルによる温度上昇抑制効果が、施工された現場においても実証され、さらには直上の空気も冷却することがわかった。

5. メカニズムの定性的検討

保水性タイルの温度上昇抑制効果を以下の2つの機能により、定性的に説明することができる。

一つは、その大きい空隙量である。体積含水率が40%を越えており、タイルの厚さが50mmであれば20mmの降雨量に相当する量を貯留することができる。これにより長時間の蒸発に必要な水が確保される。

もう一つは、蒸発にともなうタイル表面への水分供給能力である。保水性タイル単体の実験では、No.9の保水性タイルが、最大0.94mm/hrの蒸発量を記録

し、No.8の保水性タイルは0.3mm/hrにとどまった。そしてこの差が表面温度差の原因であった。No.9とNo.8とは全く同じタイルであり、環境条件も同じであったもので、この蒸発量の差は釉薬の有無による水分供給能力の差によって生じたものである。

保水性タイルのこの水分供給能力は、不飽和状態においても比較的大きな透水係数をもつことや、水分が多量に存在する状態においても大きなpF値を示す水分特性により発揮されたものと思われる。

6. おわりに

以上、保水性タイルの温度上昇抑制の効果を調べた。その結果、水を含む保水性タイルの表面温度が、他の舗装材に比べ盛夏の昼間において10℃以上も低下し、直上の空気も冷却されることがわかった。これは保水性タイルが多量に水を含むことができ、しかも適度な毛管力を有することによるもので、保水性タイルは、土壌と同様の水分特性を付加した新しい人工地盤の材料と言える。

このようにかつて土や植物に覆われた地表がもっていた温度調整機能が、産業廃棄物の再生物と比較的潤沢で再生可能な水の自然現象とによってもたらされる。産業廃棄物の処理・処分においては、更なる再利用やリサイクルが求められている。本保水性タイルは、この問題解決策としても、きわめて有効と考える。

謝辞：団地での実験データは、「保水性建材を用いた市街地熱環境計画手法の開発委員会」と「住宅・都市整備公団」との共同研究により得られたものである。関係各位ならびに実験を補助してもらった九州大学農業気象学専攻生に謝意を表す。

また保水性タイルの提供をしていただいた株式会社香蘭社、論文提出の際お世話になった山口大学羽田野袈婆義助教授にお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 尾崎ほか：産業廃棄物を利用した保水性セラミックタイルの製造とその特性，1997年度第32回地盤工学研究発表会，pp2623～2624
- 2) 八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会
- 3) 鈴木ほか：気化潜熱利用による都市域屋上面の昇温軽減に関する研究，農気・生環・農施1995年度全国大会講演要旨，pp172～173
- 4) 鈴木ほか：保水性セラミックによる夏季暑熱環境の改善，農気・生環1997年度全国大会講演要旨，pp150～151 (1997.9.30受付)