

# 水分蒸発を利用した夏季の熱環境改善と 電力節減に関する研究

羽田野袈裟義<sup>1</sup>・尾崎哲二<sup>2</sup>・鈴木義則<sup>3</sup>・吉越恆<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 国際航業(株) 地盤環境エンジニアリング事業部 (〒102-0083 東京都千代田区六番町2番地)

<sup>3</sup>農博 九州大学名誉教授 農学部農業工学科 (〒812-0053 福岡市東区箱崎5-11-5-302)

<sup>4</sup>博士(農学) 福岡大学 資源循環・環境制御システム研究所 (〒808-0002 北九州市若松区向洋町10)

夏季の熱環境改善とエネルギー節減を目的として、水の気化潜熱を応用した建材の遮熱機能を検討している。まず、夏季の電力使用量は気温が高いほど多いことを確認した。次に、水分蒸発特性に関する室内実験の結果、照射熱フラックスで無次元化した気化潜熱フラックスは、建材の体積含水率が13%以下では体積含水率と共に増加し13%以上では0.7程度の一定値となることを見出すと共に、水分量の変化を表す式を求めた。また、実施面で問題となるコスト、水使用量、設置形態を検討し、既往の関連技術に比べて明らかに優れていることを示した。

**Key Words** : *environmental heat accumulation, water evaporation, latent heat flux, prefabricated building, energy peak cut*

## 1. はじめに

現代の都市域は、表面がコンクリートやアスファルトなどで覆われていること等のため、夏季において厳しい熱環境にさらされている。このため快適さを確保する目的でクーラーが使用されるが、クーラー使用による電力需要は年々増大しており、特に晴天時の昼頃から午後3時頃までの比較的短時間に電力需要がピークに達する。発電は電力需要のピークに対応することが求められる。エネルギーと環境に関わる主要な課題として、新規の発電所建設が容易でないこと、化石燃料の供給が現状のままで推移することへの疑問、二酸化炭素排出量削減が求められていることが挙げられる<sup>1)</sup>。このため、電力需要のピークをカットする有効な手立てが切望されている。

このような現状において、著者らは多孔質の保水性建材の気化冷却を利用する方法を検討してきた<sup>2), 3), 4)</sup>。これは、昔から行われてきた打ち水や植物の蒸散作用による冷却を利用する方法と原理的には同じであるが、設置場所の制限が少ない、設置した後の通常の用途に支障がない、維持管理が容易であるなど、都心部での使用に適した性質を持っている。

水の気化潜熱を利用して都心部の地表面を覆う材料の高温化を抑制することは著者らの研究の他にもこれまで多くの研究が行われている。例えば吉野<sup>5)</sup>は地表被覆における雨水保留の研究の重要性を指摘している。藤野ら<sup>6)</sup>は夏季における各種舗装材の表面温度測定により、透水性舗装と保水性材料の双方で表面温度抑制効果があり、その効果は保水性材料の方がかなり大きいことを示している。Kinouchiら<sup>7)</sup>は舗装面への散水の効果に関する現地観測を行い、表面温度と散水域の気温の低下を報告している。木内・小林<sup>8)</sup>は舗装の表面温度に及ぼすアルベド、熱容量、熱伝導率の効果を数値計算により検討するとともに、透水性舗装の熱収支と温度変化を実験的に求め、保水の効果を確認している。しかしながら、直射日光を受けた保水性材料の温度抑制効果に直接結びつく照射熱量と蒸発量の間の関係を具体的に表現することの試みはみられないようである。

以上を総合すると、温度抑制効果が大きく設置に制限が少ない保水性建材の水分蒸発の特性を的確に評価することの重要性が示唆される。本研究は、夏の電力使用の現状について概観し、ついで多孔質の保水性建材の水分蒸発に関する実験結果を詳細に検討し、その定式化を試

みる。また、この結果を受けて多孔質の保水性建材を利用した夏季の熱環境改善の実施に関わる問題に言及する。

## 2. 夏季の熱環境と電力使用<sup>9)</sup>

日本の最近の発電の最大値は1984年に1億kWを突破して以後ほぼ単調に増加を続け、1995年には約1億7千kWに達している<sup>10)</sup>。前述のように、これは継続時間が比較的短いピーク需要で夏季の日中のクーラー使用によるものである。クーラーの使用電力は、室内設定温度と外気温の差にほぼ比例するが、クーラーで室温を下げるとその代償で外気温は上昇する。このため、ビルなどが立て込んだ地域ではクーラーの能力を上げなければならない。これが更なる外気温の上昇とそれともなう電力使用量の増大をもたらす。このような悪循環が都市のヒートアイランド現象を助長しているといつてよい。

気象条件と電力使用量の関係は実際にはどのようなものであるかをみる必要がある。そこで、1991年から1998年までの7月と8月の毎正時における中国電力の電力使用量と中国地方の気温や日射強度との関係を調べた。気象データは気象庁の日原簿データを用いた。上記の気象データは、クーラー使用と関係が深いものとして着目した。なお、気温はこの地区でクーラー使用による大きな電力需要を喚起する可能性の高い、比較的人口の多い下関、広島、福山、岡山および倉敷の5都市について人口の重み付き平均を求め、これを用いた。日射強度は広島市と下関市のみで観測されていたのでこれを用いた。

図-1は、以上のようにして得られた気温と電気使用量の関係である。図中の実線は1991年から1996年の6年間の全データについて一次式回帰を試みた結果で、(a)～(c)で共通である。(b)と(c)はそれぞれ1991年～1993年と1994年～1996年の結果を示し、点線は各々の期間の一次式回帰の結果である。図より、電力使用量は気温とかなり強い相関関係を持つことがわかる。また、1991年から1993年までと1994年から1996年までの比較では、大体25℃を越えると同じ気温では後半の3年間の方が前半の3年間に比べて、電力使用量が大きいことが認められる。これを定量的に示すため、電気使用量をY(1000kW)、気温をT(℃)、として次の回帰式：

$$Y = A \times T + B$$

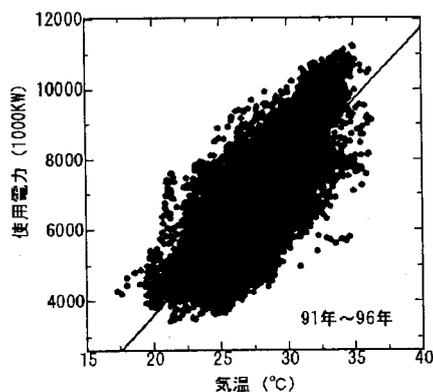
を用いたときの係数A、Bおよび相関係数rを求めた。結果は次のようであった。

$$A = 405.79, B = -4466, r = 0.7756 \text{ (1991年～1996年)}$$

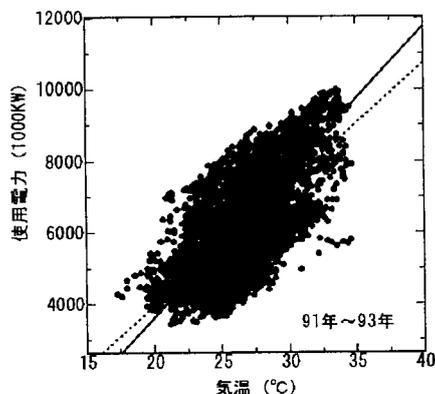
$$A = 339.19, B = -2829, r = 0.7079 \text{ (1991年～1993年)}$$

$$A = 440.85, B = -5335, r = 0.7912 \text{ (1994年～1996年)}$$

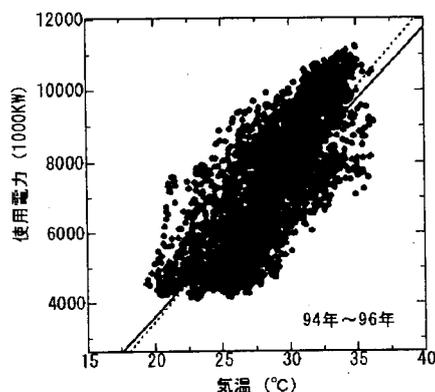
このように、相関係数についても後半の3年間で大きな値を示すことがわかる。



(a) 91年～96年



(b) 91年～93年



(c) 94年～96年

図-1 電力使用量と気温の関係

同様の図を日射強度について検討した結果、相関はほとんど認められなかった。これは、日射強度が広島市と下関市だけで観測されたことにもよるが、日射強度は比較的变化が激しいためその毎正時の測定値がクーラー使用の要求と直接結びつきにくい事情があると考えられる。また、たとえ日射強度に変動がなくてもクーラー使用の要求は日射強度のほかにも日射強度の時間積分とも関係すると考えられる。ただし、日射強度を上記2都市のみで測定している事情もありこれ以上の検討はしていない。図-2は7月と8月の毎正時の電力使用量を年毎に平均した平均使用電力を求め、この推移を示したものである。図より、1993年以前と1994年以降では明らかに異なり、後者は前者より10%以上の増大を示している。一方、同

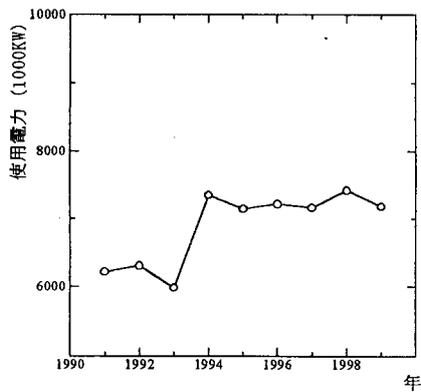


図-2 年毎の平均電力使用量

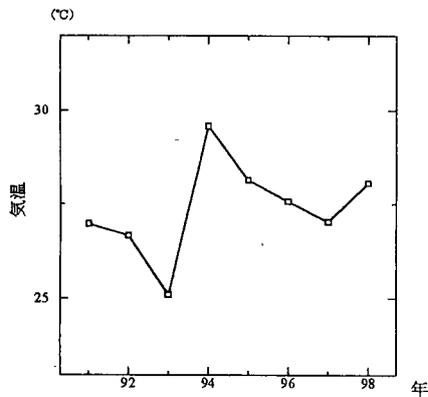


図-3 年毎の平均気温

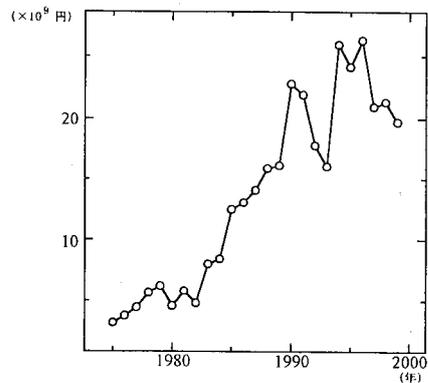


図-4 中四国地域におけるクーラーの各年の売上高

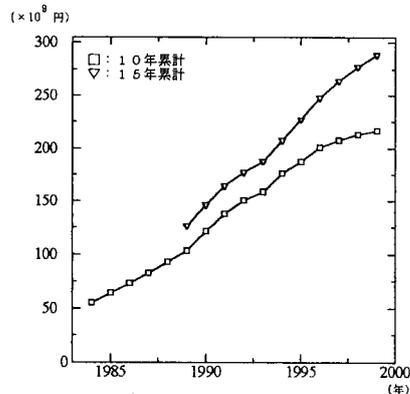


図-5 中四国地域における過去10年及び15年のクーラーの各年の売上高累計

様にして求めた年毎の平均気温の推移を図-3に示す。図によると、1994年は顕著に高い温度を示しているが、1995年以降はあまり高い値を示していない。このことは、図-1の(b)と(c)の違いと同様の意味の内容、すなわち25°Cを越えると同一の気温では1993年以前より1994年以降の方が使用電力が大きいことを示している。この原因として、年々クーラーの保有台数が増え、その使用機会が増えたことが考えられる。そこで対象地域のクーラーの販売の状況を調べた。クーラーの販売台数の資料は入手できなかったため、中四国地域のクーラーの売上高の推移をもとに検討する。図-4と図-5は中四国地域のクーラーの各年の売上高とその10年および15年の累計値を示す。10年、15年という累計年は、クーラーの耐用年数の目安として選んだ。1台あたりの価格は不明であるが、図-5よりクーラー保有台数の増大が示唆される。したがって、図-2と3の比較で25°C以上において年とともに電力使用量が増大することの主な原因としてクーラーの使用機会の増加を考えて問題ないであろう。

### 3. 多孔質の保水性建材の気化冷却の検討

#### (1) 保水性建材の概要

本研究で検討した保水性建材の性状は文献<sup>2), 4)</sup>に詳述

されている。その特徴を要約すると、この建材は庭石に用いる大谷石の廃材を主原料とするセラミックタイルである。その内部には10 $\mu$ m程度の空隙を多数有しており、透水性と毛細管的特性を兼備している。このため、いったん水を含むと長時間にわたって保水し続け、保水状態で加熱されると水分を蒸発し、気化潜熱により建材の温度上昇を抑えると共に周囲の空気から熱を奪い、冷気を発生させる。これは古来行われてきた打ち水と同じ効果であり、これが本研究で注目している保水性建材の機能である。また、この建材では水分蒸発によって水分が抜けた表面近くの部分には毛管現象により建材内部の水が再配分される。この建材は厚さが5cm以下と比較的薄く成形されている。なお、厚さを薄くすると日光に照射されたとき温度上昇を容易にして水分蒸発を促進する反面、保水量があまり確保できないため、頻繁に水撒きをせねばならない。

#### (2) 人工光照射による蒸発量試験

この建材の気化冷却効果とそのメカニズムの把握を目的として、まず無風状態における人工光照射による蒸発の実験を行ない、ついで簡易風洞を用いて熱エネルギー照射のない状態で風による蒸発の実験を行なった。まず無風状態における人工光照射による蒸発の試験について示す。気温30°C、湿度40%に制御した部屋で所定の強度

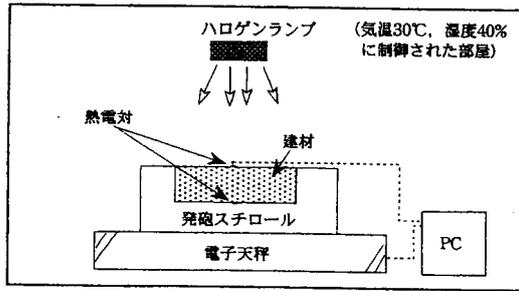


図-6 実験の構成図

の人工光を保水性建材に照射し、表面温度と重量を1時間毎に測定する方法で蒸発量の試験を行なった。拡散係数などは測定していないが、実験はクラス1000のクリーン度で設計されたクリーンルームでおこなわれており、実験室内は無風で温度成層のない状態であった。建材から蒸発した水蒸気は周囲の空気より比重が小さいため上方に移動するが、この水蒸気は上方から室外に排出した。このようにして蒸発で生じた水蒸気が部屋の中にももって以後の水分蒸発に影響を及ぼすことを回避した。蒸発量実験の構成を図-6に示す。試験では空隙率 $n=0.318$ 、乾燥比重1.44、寸法14.7cm×14.7cm×4.0cmの保水性建材を水で飽和し、供試体として用いた。その方法は、まずプラスチック容器に温度30℃の水を張って建材を沈め、この全体をバキュームチャンバーに入れて建材から気泡が出なくなるまで真空脱気した。次に周辺を発泡スチロールで断熱したプラスチック製の箱に飽和した建材を入れる。このとき、建材の表面(上面)だけから蒸発が生じるようにする。さらに、建材の上下両面に熱電対を取り付け、全体を重量計にのせた。こうして温度と重量を自動計測した。人工光はハロゲンランプを使用し、その照射強度は建材上面において450W/m<sup>2</sup>、800W/m<sup>2</sup>、および1000W/m<sup>2</sup>となるように3段階に設定した。照射量の設定は、日本の夏季における日射量の値を考慮している。

### (3) 実験結果

以上のようにして測定した保水性建材の表面温度と体積含水率の時間的な変化を図-7と図-8に示す。図-7によると、表面温度は照射熱量が大きいほど高い値を示し、①実験開始後しばらくは室内温度よりある程度高い状態で推移し、②その後上昇したのち一定値に近づく傾向を示した。①を恒率蒸発期とよび、この時間帯では後述のように蒸発量が高いレートを維持している。恒率蒸発期において建材の上面と下面の温度差はたかだか1℃程度であり、両者の平均値は人工光の照射強度450W/m<sup>2</sup>、800W/m<sup>2</sup>、そして1000W/m<sup>2</sup>の場合でそれぞれ約34.5℃、36.0℃、そして44.5℃であった。実験を開始してから

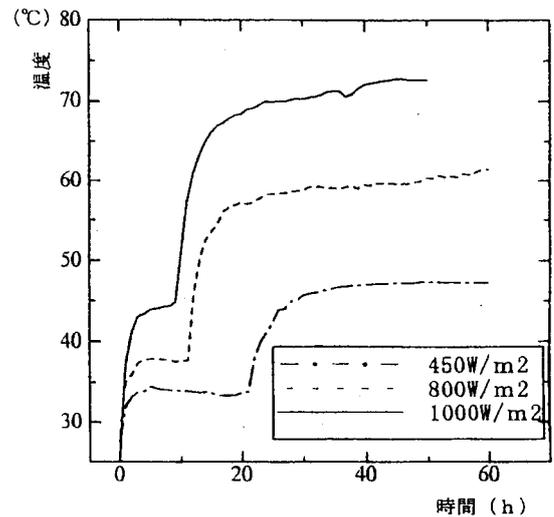


図-7 表面温度の時間変化

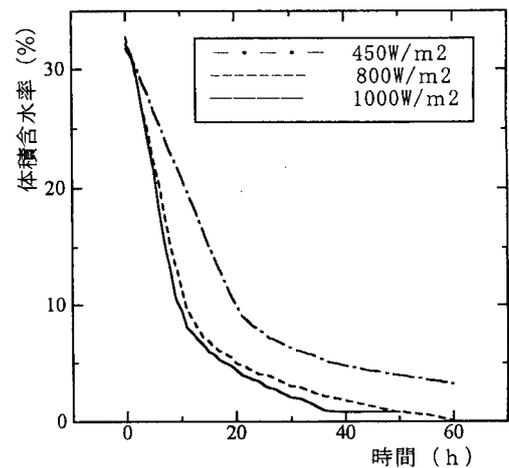


図-8 体積含水率の時間変化

恒率蒸発期が終了するまでの時間は、照射強度が大きいほど短く、450W/m<sup>2</sup>、800W/m<sup>2</sup>、そして1000W/m<sup>2</sup>の場合でそれぞれ約21時間、10.6時間、そして9時間であった。

体積含水率は、実験開始後ほぼ一定の割合で減少しつつあったのち、その減少が次第に鈍化していく。体積含水率減少の鈍化が明瞭になる時刻が恒率蒸発期の終了時刻とほぼ対応する。この恒率蒸発期における蒸発量のレートは当然のことながら照射強度が大きいほど大きく、450W/m<sup>2</sup>、800W/m<sup>2</sup>、そして1000W/m<sup>2</sup>の場合でそれぞれ0.45mm/hr、0.88mm/hr、そして1.06mm/hrであった。

### (4) 気化潜熱の検討<sup>9)</sup>

蒸発量から気化潜熱を評価する。以下の計算では、飽和度を $S$ 、水深換算の水分量を $h$ (mm)、水分蒸発の体積フラックスを $e$ (mm/hr)、同じく質量フラックスを $q_e$ (g/m<sup>2</sup>/s)、気化潜熱フラックスを $L$ (W/m<sup>2</sup>)、水の気化熱を $l$ (cal/g)、水温を $T$ (°C)とする。 $e$ (mm/hr)と $q_e$ (g/m<sup>2</sup>/hr)

の間には次の関係がある。

$$q_e = \frac{e}{3.6} \quad (1)$$

また、水の気化熱  $l$  (cal/g) は温度により変化する。ここでは簡単のため、これを蒸気表<sup>11)</sup>から読み取って次式で近似した。

$$l = -0.56T + 600 \quad (2)$$

上式による水の気化熱の変化を図-9に示す。前述の恒率蒸発期に対応する温度における気化熱は、575~580 (cal/g) となっている。気化潜熱フラックス  $L$  (W/m<sup>2</sup>) は次式で与えられる。

$$L = 4.2q_e \cdot l \quad (3)$$

図-10は、図-7と8のデータから気化潜熱フラックス  $L$  を求め、体積含水率  $w$  に対してプロットしたものである。図より、気化潜熱フラックスは、いずれの照射熱のケースも体積含水率 13% までは体積含水率とともに増加し、体積含水率がそれ以上になると照射強度毎に一定値のまわりで変動することがわかる。

次に、気化潜熱フラックス  $L$  を人工光の照射強度  $R$  で無次元化し、無次元気化潜熱フラックス  $L_n$  を次式で定義する。

$$L_n = L/R \quad (4)$$

図-11は、無次元気化潜熱フラックス  $L_n$  を体積含水率に対してプロットしたものである。図より、無次元気化潜熱フラックスは体積含水率とほぼ一義的な関係にあり、体積含水率が 13% 以下では体積含水率と共に増加し、体積含水率 13% 以上では、7割程度のほぼ一定の値になっている。なお、図-11において、体積含水率が 30% を超える部分で無次元気化潜熱が 0.7 より低い値を示している。これは、人工光の照射開始後 1~2 時間の間の挙動であり、図-7 と照合すると人工光照射開始後しばらくはその熱エネルギーが建材の昇温に費やされ、恒率蒸発状態に至る過程にあることを示している。このように、図-11の体積含水率が 30% 以上の領域の挙動は体積含水率が高いことの影響ではなく建材の温度の影響であり、温度が恒率蒸発状態の値にあれば上記の体積含水率でも無次元気化潜熱が 0.7 程度で推移するはずである。このため、後述の定式化においては体積含水率 30% 以上における上述の低蒸発量の性質を無視し、無次元気化潜熱 0.7 と考える。数値は多少異なるが同様な効果はこの建材の野外実験<sup>3), 4)</sup>の結果でも認められている。また、神田ら<sup>13)</sup>が神宮の森の熱収支を評価した結果の結論と対応しており、体積含水率 13% 以上ではこの建材が森林と同程度の遮熱効果を持つことになる。実験で設定した人工光の照射強

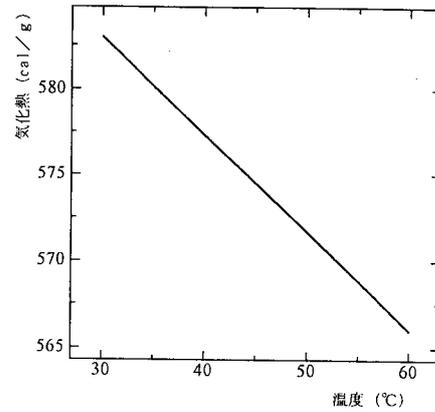


図-9 水の気化熱

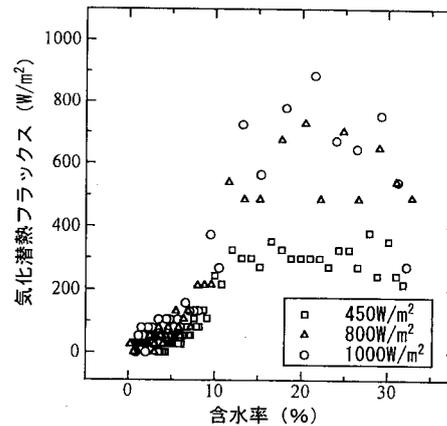


図-10 気化潜熱フラックスと飽和度の関係

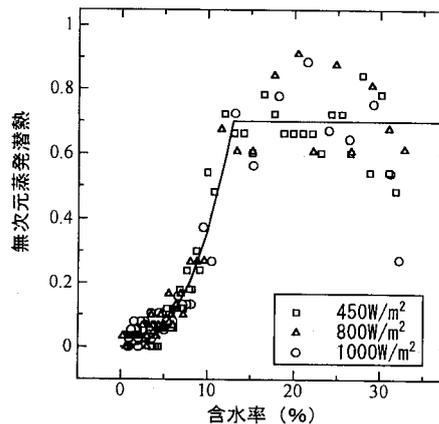


図-11 無次元気化潜熱フラックスと飽和度の関係

度が現実に重要となる値の範囲であるから、この関係は今後この建材を使用する際に適用可能と考えられる。この関係は次のように定式化される。

$$L_n = f(w) = 115w^{2.5} \quad : \quad 0 \leq w \leq 0.13 \quad (5a)$$

$$0.7 \quad : \quad 0.13 \leq w \leq n \quad (5b)$$

ここで、 $f(w)$  は  $w$  の関数であることを示す。図-11の実線は式(5)の関係を示す。

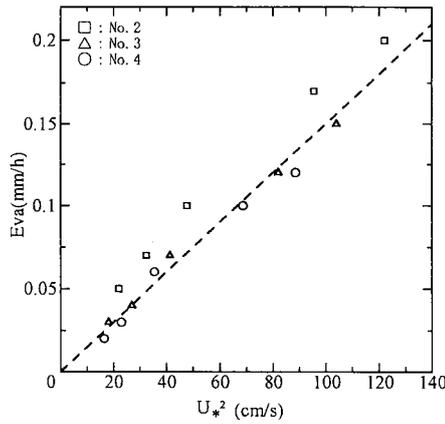


図-12 セラミック風速実験の結果

### (5) 水分蒸発に及ぼす風の効果

風が保水性建材の水分蒸発に及ぼす効果を検討するため、簡易風洞を用いて風速を種々変化させ、蒸発量を調べた。簡易風洞は、長さ 2.4m、幅 0.9m、高さ 1m で、その底面には 0.3m×0.3m×0.025m の保水性建材を 3 列×8 行に敷き詰めた。実験では、中央の列の風洞入口から 2 番目、3 番目、4 番目の建材すなわち風洞入口から 0.45m、0.75m、1.05m の位置に中心を持つ 3 つの保水性建材を検査対象とし、それらの中心点の上方 5mm の位置で熱線流速計により風速を測定した。実験に先だち、保水性建材を水で飽和させ、保水性建材の上方表面以外からの蒸発を避けるため、底面と側面にビニールテープを貼り付けた。実験は、保水性建材が放射熱を受けることのないようにして行なった。通風開始後 1 時間毎に建材の重量を測定し、その変化から各 1 時間毎の蒸発量を求めた。風速は 1 時間ある速度で継続して吹かせ、次の 1 時間は別の風速で継続して吹かすことを繰り返した。計測時の気温は 26.6℃～27.1℃、相対湿度は 75.9%～77.6% の範囲にあった。図-12 はその結果を示す。図の縦軸は、各 1 時間毎の蒸発量から飽差 (saturation deficit) による蒸発量を差し引いたものを示し、横軸の  $U_*^2$  は建材表面から風速測点まで風速が直線的に速度変化すると求めた摩擦速度である。また、No. 2, No. 3, No. 4 はそれぞれ風洞入口から 2 番目、3 番目、4 番目の建材の結果であることを示す。図より、No. 3 と No. 4 の建材のデータは No. 2 の建材のデータに比べてまとまりがよい。これは、No. 2 の建材の上ではそれ以外のものに比べて表面上の境界層の非一様性が著しいことの影響を示唆している。このため、ここでは風速の効果として、No. 3 と No. 4 の建材のデータを用いて定式化を試みた。その結果は、 $Eva(mm/h)$  と  $u_*(m/s)$  を用いて次のようである。

$$E_{va}(mm/h) = 15 \times u_*^2 \quad (6)$$

実験時の相対湿度を用いてデータを補正し、相対湿度  $m$

の条件下で実際に使用する場合の式形として、近似的に次式で置く

$$E_{va}(mm/h) = 64(1-m)u_*^2 \quad (7)$$

これが風による蒸発量増加の表現である。

### (6) 建材中の水分量の表現

ここで、式(5)と(7)の関係を利用して、保水性建材の水分量  $h$  の変化を表現する式を求める。まず、熱エネルギー照射による変化の表現を求める。建材の厚さを  $D$ 、空隙率を  $n$ 、体積含水率を  $w$  とすると、水分量  $h$  は次のように表される。

$$h = D \cdot w \quad (8)$$

したがって、

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= -e = -3.6q_e \doteq -\frac{3.6L}{575 \times 4.2} \\ &= -0.0015R \cdot f(w) \end{aligned} \quad (9)$$

実際に適用する場合には、湿度を考慮することが必要である。湿度を考慮すると式(7)は、相対湿度を  $m$  として次のように修正される。

$$\frac{dh}{dt} = -0.0025(1-m)Rf(w) \quad (10a)$$

ここで、係数 0.0025 は人工光照射実験時の相対湿度 40% を考慮して 0.0015 を 0.6 で除したものであり、 $w$  は式(8)により  $h$  で表現されることを付記する。

以上は無風状態の結果であり、これに風による蒸発量を加味すると、摩擦速度  $u_*$  (m/s) を用いて

$$\frac{dh}{dt} = -0.0025(1-m)Rf(w) - 64(1-m)u_*^2 \quad (10b)$$

摩擦速度  $u_*$  は、保水性建材敷設面の上方の鉛直高度  $z_1$  と  $z_2$  における風速  $u_1$  と  $u_2$  を用いて次式により得られる。

$$u_* = \frac{\kappa(u_2 - u_1)}{\ln(z_2/z_1)} \quad (11)$$

ここで、 $\kappa$  はカルマン定数で  $\kappa \doteq 0.4$  である。

式(10b)より、水分量の初期値に加え日射強度、相対湿度、および摩擦速度の時系列データが与えられると、以後の水分量が計算されることになる。したがって、これらのデータをもとにしてコンピュータ制御によりスプリンクラーを動作して散水することができる。

## 4. 実施面での検討事項

この建材と水を用いて夏季の節電をする場合の散水制

御のための簡便なデータ利用法を検討し、水使用量とコストを簡単に評価し、最後に設置形態に言及する。まず、散水制御について述べる。現実に行うには、現場のエネルギー収支をおさえておく必要がある。建材表面の熱収支は、日射量を  $S$ 、アルベドを  $\alpha$ 、大気放射を  $La$ 、表面温度を  $T_s$ 、ステファンボルツマン定数を  $\sigma$ 、大気への顕熱輸送量を  $H$ 、潜熱輸送量を  $E$ 、下方への伝導熱を  $G$  として次のように与えられる<sup>6)</sup>。

$$S(1-\alpha) + La - \sigma T_s^4 = H + E + G \quad (12)$$

この関係を式 (10) に用いてスプリンクラーを制御することが目的である。

風による蒸発の取り扱いには判断に迷うが、上述の目的を考慮すれば簡単のため式 (10) の  $R$  に式 (12) の  $E$  を用いることに不都合はないであろう。  $E$  の評価に際して、式 (12) の左辺の各放射量は実測値を用いて表現できる。右辺の  $G$  は、保水性建材の温度変化として建材に蓄積される部分と建材下面での下部土層との熱交換の部分から構成されるが、簡単のため後者を無視して評価できよう。この場合、  $G$  は保水性建材の比熱が知れているので建材の温度変化の測定から概略値を求めることができる。顕熱輸送量  $H$  は、バルク式を用いると次式でえられる<sup>14)</sup>。

$$H / Ca \rho_a = CHU(T_s - T) \quad (13)$$

ここで、  $Ca$  は空気の定圧比熱、  $\rho_a$  は空気の密度、  $CH$  は顕熱に対するバルク係数、  $T$  と  $U$  はある高度での気温と風速である。

次に、水使用量<sup>3)</sup> を述べる。単純計算として最大の日射強度にはほぼ匹敵する  $1\text{kW}/\text{m}^2$  の照射熱量の 7 割を水の気化潜熱で完全にカットする場合を考える。このとき、  $e = 1.04\text{mm}/\text{hr}$ 、  $q_e = 0.292\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$  であり、敷設面積を 1 ヘクタールとすると最大で  $7000\text{kW}$  をカットすることになる。このときの使用水量は、気化熱を  $575\text{cal}/\text{g}$  として、 $2.92$  リットル/秒である。この水量を水力発電の使用水量と比較する。理論水力の計算によると、有効落差  $100\text{m}$  で  $7000\text{kW}$  発電する場合の水量は  $7.49\text{m}^3/\text{s}$  となる。両者の使用水量の比は約  $1 : 2500$  となり、水の気化潜熱を利用する方が節水面で圧倒的に有利であることがわかる。また、水は雨水貯留まかなえる<sup>15)</sup>。大早魃で観測史上最も少雨（平年値の約 60%）となった 1994 年の福岡の例でも、10 月から 6 月までに屋上に降った雨水を蓄えるだけで、盛夏の 3 ヶ月間屋上と同面積の表面温度を低下させうる計算になる。新たにダムを作る必要はなく、個別に貯水槽を用意すればよい。さらに夏の夕立（スコール）はそのまま保水され水資源となる。水の気化潜熱を利用することの効果は夏季の冷却に限定されること、上記の数値はあくまで目安にすぎないとしても、水の気化潜熱を利用することの有効性は間違いないであろう。

次にコストを見積もる。現在このような建材は設計価格  $1\text{m}^2$  あたり 1 万 5 千円程度で市販されている。真夏の電力需要のピークに  $1\text{kW}/\text{m}^2$  の日射強度があるとする。無風時に保水性建材を体積含水率 13% 以上で用いてこの熱をカットする場合、約  $700\text{W}/\text{m}^2$  のカットとなる。1 ヘクタールでは  $7000\text{kW}$  のカットとなり、これを 1 億 5 千万円で達成する。これは夏季の省エネルギーに関する限り、1 億 5 千万円で  $7000\text{kW}$  の発電所を建設したことと同じ効果があることを示す。この省エネコストを表現すれば、 $2.17$  万円/ $\text{kW}$  となる。この数値は、個人住宅の屋根などに設置されている太陽光発電の値の 40 分の 1 程度である。今後より安価なものが出回るようになるとさらにコスト低減となる。なお、ソーラー発電での日射エネルギーのカットは最大で約  $150\text{W}/\text{m}^2$  程度であり、それ以上に強い日射があるときには残りの熱が空气中に蓄積されることになる。また、エネルギーコストの指標として円/ $\text{kW}$  時がよく用いられるが、ことピークカットに関しては、上で用いた円/ $\text{kW}$  の方が有用であるといえる。

水の気化潜熱を利用して夏季の省エネルギーを達成するには、水分蒸発により生じた冷気を低所に閉じ込め、これを有効に利用することが肝要である。壁や塀に囲まれた敷地がある場合には、発生した冷気を効果的に敷地内に閉じ込めることができよう。また、林立するビル群の屋上、あるいは南に面した壁やベランダに設置すると、発生した冷気はビルの谷間の空間にたどよい、これをクーラーの室外機が吸入し、節電につながることを期待される。なお、日射と風がともに強い日には水分蒸発が活発で発生した冷気は広範囲をカバーする。また、これまでは屋外での使用のみを検討しているが、通気と除湿を工夫すれば室内で使用することも十分考えられる。除湿は木炭や竹炭を室内に配置することが有効であろう。この利用形態では材料の少量使用でクーラーの使用を回避でき、将来的にはもっとも効果的な利用法となる。

## 5. 結語

以上、夏季の電力使用量と気温の関係の実態を簡単に報告すると共に、水の気化潜熱を応用した保水性建材の水分蒸発特性に関する実験結果について検討した。その結果、夏季の使用電力と気温との間にはかなり強い相関があり気温が高くなるにつれて使用電力が増大する傾向があることを確認した。また、検討した保水性建材は、現実で重要となる照射熱の範囲で、森林と同程度の遮熱効果があること、無風状態では無次元気化潜熱フラックスと体積含水率とは一義的な関係にあること、風の作用下では水分蒸発が摩擦速度の 2 乗に比例して増大することを明らかにした。そして、これらの関係の定式化を行

い、初期の水分量に加え日射強度と相対湿度、地表近くの風速分布の時系列データが与えられた場合に以後の水分量の変化を求めることを可能にした。また、実施上の問題について検討した。その結果、遮熱効果、コスト、水使用量の面の既往の関連技術に比べ、明らかに優れていることを明らかにした。

本論文で明らかにしたように、この方式の効果は冷却による夏季の省エネルギーに限定されるものの、現在切望されている都市の熱環境改善と電力使用のピークカットを低コスト、少量の水使用で達成する事が可能で、現代のエネルギー問題と環境問題を同時に解決する要素を多分に持っている。今後、雇用創出の意味も含めて都市の公共事業として期待したい。

**謝辞:**本研究にあたり、「保水性建材研究会」、「野外空間の熱環境設計研究委員会」の多大なご支援を賜った。

(株)香蘭社には実験試料を、中国電力(株)と日本電気大型店協会そして(財)日本気象協会関西本部には貴重なデータをご提供頂いた。また、熱力学について山口大学工学部加藤泰生助教授に貴重なご教示を賜り、データ解析で山口大学卒研究生松本将典氏の熱心な協力を得た。そして論文査読者には貴重なご議論を賜った。記して関係各位に深甚の謝意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) たとえば毎日新聞：ニュースの焦点，2000.3.11.
- 2) 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 pp.61-66，1998.
- 3) 尾崎哲二，鈴木義則，羽田野袈裟義，吉越 恆，吉村孝信，迫口輝美，野口 隆，田中稔：保水性セラミック建材の熱環境改善に関する一実験，水工学論文集，第43巻，pp.239-244，1999.
- 4) 尾崎哲二：土を基礎とした派生材料の水分特性とその環境問題への適用に関する研究，埼玉大学学位論文，1999.
- 5) 吉野文雄：都市の熱環境改善に向けて一都市の熱汚染の現状と雨水貯留浸透の役割一，雨水技術資料，Vol.10，pp.33-43，1993.
- 6) 藤野毅，柴原千浩，浅枝隆，村瀬範芳，和氣亜紀夫：浸透性舗装の水分・熱移動特性と冷却効果，水工学論文集，第38巻，pp.235-240，1994.
- 7) Kinouchi, T., Kanda, M., Kuriki, M. and Kobayashi, H.: An observation of the climatic effect of watering on paved roads, J. of Hydrosoci. and Hydr. Eng. Vol.15, No.1, pp.53-62, 1997.
- 8) 木内豪，小林裕明：快適な都市熱環境創造のための舗装の高温化抑制策に関する検討，土木学会論文集，No.622/VII-11，pp.23-33，1999.
- 9) 松本将典：夏季の電力需要とその軽減について，山口大学卒業論文，2000.
- 10) 日本エネルギー経済研究所編著：エネルギー・経済統計要覧 '97，省エネルギーセンター，1997.
- 11) 伊藤猛宏，山下宏幸：工業熱力学(1)，コロナ社，pp.209，1988.
- 12) 神田 学，森脇 亮，高柳百合子，横山 仁，浜田 崇：明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(1)1996年集中観測，天気，Val.44，No.10，pp.713-722，1997.
- 13) 竹内清秀，近藤純正：大気科学講座1，地表に近い大気，東京大学出版会，1981.
- 14) 鈴木義則：水の相変化と気候緩和，水文・水資源学会誌第11巻6号，pp.553-554，1998.

(2000.6.19 受付)

## REDUCTION OF ENVIRONMENTAL HEAT ACCUMULATION AND SAVING ENERGY IN SUMMER TIME UTILIZING THE WATER EVAPORATION

Kesayoshi HADANO, Tetsuji OZAKI, Yoshinori SUZUKI and Hisashi YOSHIKOSHI

The function to cut the heat flux of solar radiation that a building material made of porous media has is investigated through laboratory experiments. It has been shown that the ratio of latent heat flux due to water evaporation to the radiated energy flux is a unique function of the degree of water saturation of the material. Also the functional form has been given to obtain the equation describing the change in water content in the material. This enables us to water the material using the data of time series of varying radiation and relative humidity.