

透水性舗装の都市の熱環境改善効果 に関する実験的研究

北山迪也¹・大西有三²・西山 哲³・矢野隆夫⁴・山本 剛⁵

¹学生員 京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail : kitayama@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 工博, Ph.D 京都大学大学院 教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 博士(工学) 京都大学大学院 助教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 博士(工学) 京都大学大学院 技術専門員 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁵正会員 国土交通省近畿地方整備局 近畿技術事務所 所長 (〒573-0166 枚方市山田池北町11-1)

近年ヒートアイランド現象の軽減を目的に、車道に透水性舗装を導入し熱環境を改善しようという試みがなされている。そこで著者らは、車道透水性舗装による都市の熱環境改善効果について検討するため、必要不可欠なパラメータである蒸発量を定量的に計測する手法の確立を試みると同時に、一般国道163号の断面構造を模擬した実物大モデルにおいて夏季に蒸発量、表面温度および舗装内の温度、体積含水率等を計測し、透水性舗装の熱環境改善効果に関して検証を行ってきた。その結果、提案した蒸発量計測手法が有用であること、また蒸発が透水性舗装の舗装面温度の低減に寄与していることなどが明らかになった。

Key Words : *heat island phenomenon, permeable pavement, evaporation, measurement instrument*

1. はじめに

ヒートアイランド現象は都市中心部の気温が郊外に比べて島状に高くなる現象であり、原因としては人工地表面の拡大のみならず、建物の増加・高層化、人工排熱の増大等、様々な要因が複合して生じていると考えられている¹⁾。このようなヒートアイランド現象による弊害としては、高温化により暮らしにくくなることにとどまらず、熱中症の死亡者数の増大を招くこと、局地的集中豪雨を助長させているなどの報告がなされており市民生活の安全を揺るがす危険性を有している。

現在、道路舗装は都市面積の15%超を占めており、その大部分が不透水性の密粒舗装であり雨水の浸透による舗装からの蒸発が期待できない。舗装から蒸発による潜熱が存在しないことにより、舗装表面温度は高温となり舗装面からの多量の赤外放射がヒートアイランド現象を助長させていることが指摘されている²⁾。そこで、ヒートアイランド現象の対策としては、屋上緑化や緑地の拡大等のほか、道路面における熱環境対策が求められている。

このような舗装に対する熱環境改善の要求に伴い、舗装の熱特性に関して様々な研究がなされている^{3,4)}。特に近年、透水性舗装の耐久性に関する研究^{5,6)}が進め

られ、これまで街路樹の育成・地下水の保全等の目的で歩道に適用されていた透水性舗装を車道に用いる試み^{7,8)}が各地で行われている。車道透水性舗装は本来、浸透貯留施設として都市における洪水を抑止することを主な目的として研究がなされてきたが、熱環境の改善に関する効果についても期待がなされている。このような車道透水性舗装の研究は緒に着いたばかりで、現在のところ、車道透水性舗装そのものにおいて、温度低減効果を論じる上で必要不可欠なパラメータである蒸発量を測定し温度低減効果を論じた研究はほとんど見られない。このことから、車道に透水性舗装が施工された際にどの程度ヒートアイランド現象の抑制効果を持つか検討するためには、蒸発量の測定手法を確立し、舗装の表面温度や舗装内の温度の計測データの採取・検討が不可欠といえる。

著者らはヒートアイランド現象の抑制のため、透水性舗装からの蒸発量を計測する手法の導入⁹⁾を試みるとともに、透水性舗装の効果を調査してきた^{10, 11)}。本論文はこれまで著者らが行ってきたこれらの研究の成果に新たな知見を加え、報告するものである。まず舗装面における蒸発量の計測の重要性に触れ、蒸発量の計測手法に言及した後、蒸発がいかに透水性舗装の路面温度を低減させるかを中心に議論を行う。

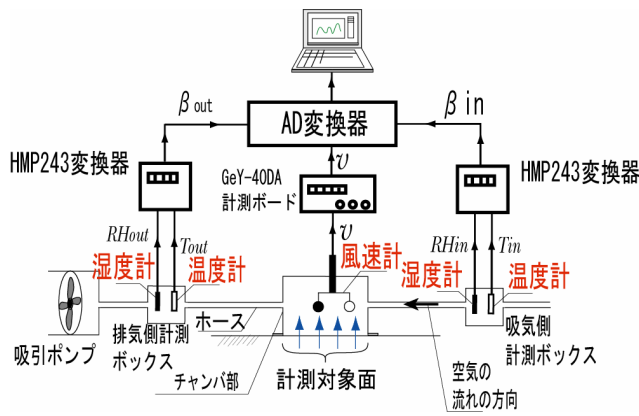


図-1 ベンチレーション法の概要

2. 蒸発量計測手法

本研究では、透水性舗装の蒸発による温度低減効果のメカニズムを検証し、ヒートアイランド現象の抑制に透水性舗装が有効であるのかを調べることを主な目的としている。このように透水性舗装の効果を検証するためには、舗装からの蒸発量を計測することが必要となる。その理由を以下で述べる。

透水性舗装面での熱収支式は次式(1)のようになる。

$$R_n = H_p + G_p + IE_p \quad (1)$$

ここに、 R_n ：正味放射量[W/m²]、 H_p ：透水性舗装における顕熱輸送量[W/m²]、 G_p ：透水性舗装における地中伝導熱[W/m²]、 IE_p ：透水性舗装における潜熱輸送量[W/m²]である。

一方、密粒舗装面では蒸発がないと考えられるため、熱収支式は以下のようになる。

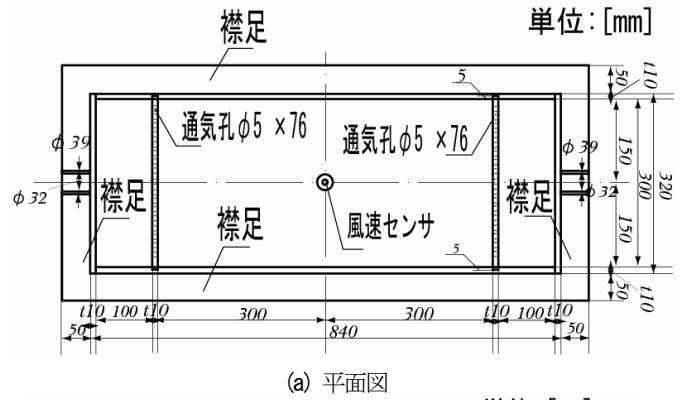
$$R_n = H_D + G_D \quad (2)$$

ここに、 H_D ：密粒舗装における顕熱輸送量[W/m²]、 G_D ：密粒舗装における地中伝導熱[W/m²]である。以上の(1)、(2)式から潜熱輸送量 IE は次式のように導かれる。

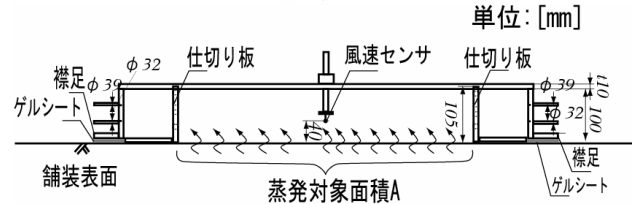
$$IE_p = (H_D + G_D) - (H_p + G_p) \quad (3)$$

式(3)は透水性舗装では密粒舗装と比較して潜熱輸送量 IE だけヒートアイランドの一因である顕熱輸送量と地中伝導熱の和を減少させるという概念を表している。従って、透水性舗装の効果を評価するには蒸発量を定量的に計測する手法の確立が必要である。

このような蒸発量計測の必要性の高まりにも関わらず、車道透水性舗装そのものにおける蒸発量計測例は皆無であるといつてよい。一般的な蒸発量の計測手法をみると、農学分野や気象分野では裸地や森林での蒸発量計測手法の研究が進められてきた。具体的な手法としては、ボーエン比法、渦関連法、シンチレーシ



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2 蒸発量計の寸法

ン法などが提案されている。しかしこれらの手法を適用するには広大な面積を要するため、比較的面積の小さい舗装面で計測を行うには不向きである。そこで著者らは、トンネル亀裂からの湧水量の測定等に用いられているFickの分子拡散による計測手法¹²⁾を用いて透水性舗装における蒸発量の測定を試みてきた⁹⁾。しかし、この手法は有風条件下では適用が困難となることが判明したため、著者らは農学分野等で用いられてきたベンチレーション法^{13), 14)}を用いた計測手法を導入し、ヒートアイランド抑制効果を検証するため蒸発量の計測を試みている。

(1) 計測の原理

図-1にベンチレーションチャンバ法による蒸発量計測システムの概要、図-2にチャンバ部の平面図および断面図を示す。ベンチレーション法による蒸発量の計測の原理は連続式による。計測の原理を次式(4)に示す。

$$\beta_{in} Q \Delta t + A E \Delta t = \beta_{out} Q \Delta t \quad (4)$$

ここに、 β_{in} は吸気側絶対湿度[g/m³]、 Q は流量[m³/min]、 A は蒸発面積[m²]、 E は蒸発量[g/m²/min]、 β_{out} は排気側絶対湿度計測値[g/m³]である。

式(4)より蒸発量 E は次式(5)のように導かれる。

$$E = \frac{Q(\beta_{out} - \beta_{in})}{A} \quad (5)$$

以上のように、ベンチレーション法による蒸発量計測システムは連続式に則っているため、チャンバ部は蒸気を外部に漏出させない構造とする必要がある。し

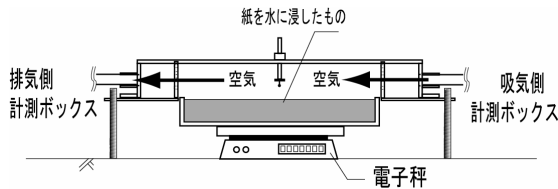


図-3 キャリブレーションの概要

表-1 実験条件

	実験環境	最低気温[°C]	最高気温[°C]
case1	室内	28	28.5
case2	室内	27.8	28.4
case3	室内	27.6	28.3
case4	室内	27.5	28.1
case5	野外	25.8	38.4
case6	室内	16.7	17.2
case7	室内	15.1	16
case8	室内	16	16.4
case9	室内	16.2	16.5
case10	室内	15.4	16.3
case11	室内	14.8	15.6

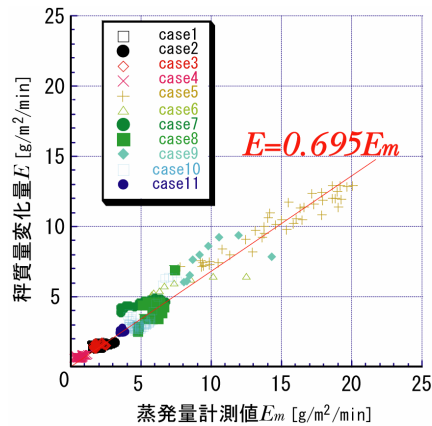


図-4 キャリブレーションの結果

かしながら、透水性舗装の表層や基層は開粒度アスファルトからなるため、単に箱型のチャンバでは蒸気がアスファルトの空隙を通じてチャンバ内部から外部へと漏れる恐れがある。そこで、図-2に示すようにチャンバ部の端に襟足をつける構造としている。さらに、弾力性を持つゲルシートをチャンバの襟足部と舗装表面の間に、気密性を高める工夫をした。

また、本手法は蒸発面をチャンバで覆うため日射や風速の条件が異なると考えられる。日射に関しては、チャンバを透明の亚克力で作成し蒸発面に注ぐ日射量をなるべくチャンバ外と変えないようにした。またチャンバ内の風速は図-1に示す吸引ポンプで一定とし、チャンバに設置した風速計で流量を計測している。ただ、風速はボックス内で不均一と考えられるため、補正が必要となる。そこで、風速計の計測値 v [m/sec] に横断面積 B [m²] を乗じて流量 Q [m³/sec] を算出する際に、以下のように補正值 α を導入する。

$$Q = \alpha v B \quad (6)$$

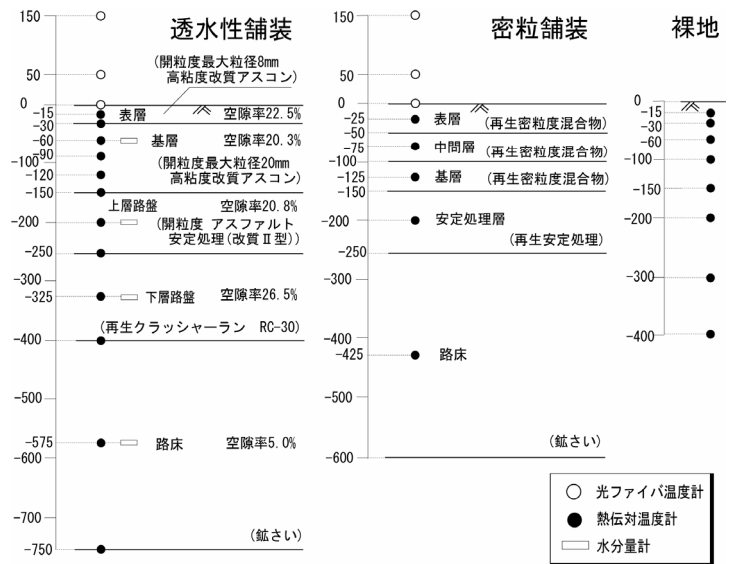


図-5 センサの設置位置

補正值 α の決定方法に関しては次節にて述べる。

(2) 定量性の検討

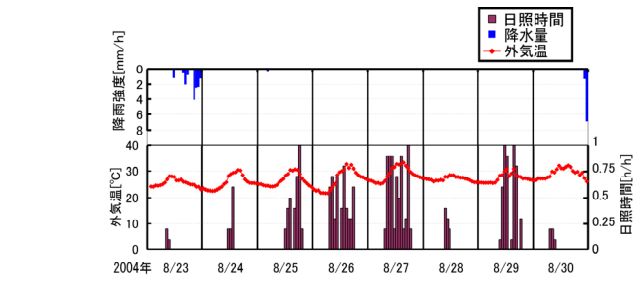
蒸発量計の計測精度を検証するため、図-3のように秤を用いてキャリブレーションを行い定量性を検証した。

本実験においては、秤から求めた蒸発量を E [g/m²/min] とし、補正值 α は蒸発量 E と蒸発量計から求めた蒸発量 E_m の比とし、式(7)により補正值を決定した。

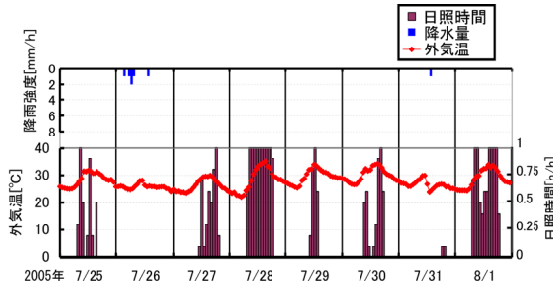
$$\alpha = \frac{E}{E_m} \quad (7)$$

現場で蒸発量計を用いる際には、気象条件により蒸発量が大きく変化すると考えられるため、表-1に示すようにcase1から11まで様々な気温の条件で実験を行った。図-4に各ケースの蒸発量計の計測値 E_m と秤の計測による蒸発量 E の関係を示す。このグラフから $\alpha = 0.695$ であることが分かる。 $\alpha < 1$ となるのは、チャンバ内の中央点における流速に対して壁面近傍や蒸発面近傍の流速が壁面摩擦により低減されるためであると推察される。すなわち、チャンバ部の壁面近傍における流速を中央の流速で過大に評価し流量を算出しているためと考えられる。本研究では、この実験の結果に基づき、次式(8)により蒸発量を算出することとする。

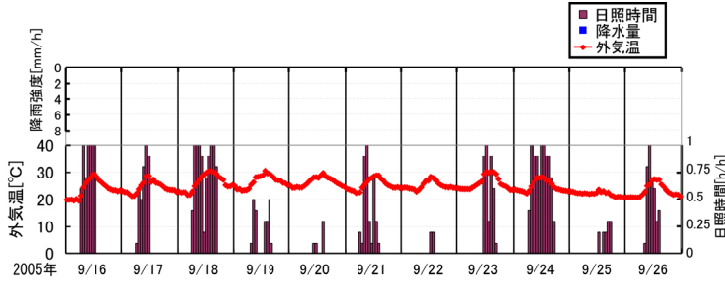
$$E = \frac{Q(\beta_{out} - \beta_{in})}{A} = \frac{\alpha v B(\beta_{out} - \beta_{in})}{A} \quad (8)$$



(a) 2004年8月23日～8月30日



(b) 2005年7月25日～8月1日



(c) 2005年9月16日～9月26日

図-6 実験期間中の気象

ここで、本研究で用いたベンチレーションボックスでは、 $A = 0.18 [\text{m}^2]$ 、 $B = 0.03 [\text{m}^2]$ としている。

3. 実験施設および計測方法

(1) 実験施設

本研究では2004年および2005年の夏季に国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所構内に施工された透水性舗装モデル実験施設（以下、モデル舗装と呼ぶ）および同構内の裸地において計測を行い、透水性舗装のヒートアイランド現象の緩和効果について検討を行った。本節では、計測を行ったモデル舗装に関して述べる。なお、2004年度の実験は計測機器の都合からFickの分子拡散の手法により蒸発量を計測した⁹⁾。

モデル舗装の層構造は一般国道163号門真地区で供用中の透水性舗装試験工区の層構造と一致させてある。このような一般に供用されていないモデル舗装で実験を行った理由は、供用中の道路において計測機器を設置し、蒸発量や舗装表面温度を計測するには交通規制を行い、一般車両の通行を一時的に禁止する必要があるからである。本研究では実験が長期に及ぶことを

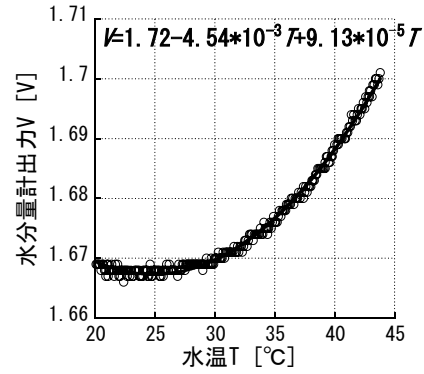


図-7 キャリブレーションの結果

鑑みて、このような交通規制の処置を行うよりも、モデル舗装を別途施工して実験を行った方が良いとの判断で、モデル舗装で実験を行うに至った。

舗装内および裸地には図-5のように光ファイバ温度計、熱電対温度計、水分量計を設置している。舗装構造および寸法、散水装置等に関しては参考文献8)に譲る。

また、実験期間中の気象データを図-6に示す。この気象データは気象庁の枚方観測所で計測されたものである。

(2) 水分量計の温度補正

本研究では、水分量計として誘電性土壌水分センサを用いたが、温度依存性があることが懸念されるため、あらかじめ室内においてキャリブレーション（以下、補正実験とする）を行った。実験は、センサのプロブ部を水に完全に浸した状態で水を湯沸器にて徐々に温め、20℃から50℃までの出力を得た。図-7に実験結果を示す。このグラフから、温度の上昇に伴い出力が上昇するという温度依存性が確認される。そこで本研究では、次式(9)を用いて任意の温度における水分量計の出力を20℃における出力に換算するよう補正を行う。

$$\begin{aligned} V &= V_m - \Delta V = V_m - (V_T - V_{T=20}) \\ &= V_m - \{a \times (T - 20) - b \times (T^2 - 20^2)\} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 V は補正後の出力値[V]であり、 V_m は補正前の出力 [V]、 ΔV は補正值[V]、 V_T は補正実験の結果で T における出力[V]、 $V_{T=20}$ は補正実験の結果で20℃における出力[V]、 a 、 b は補正実験から得られた定数でそれぞれ 4.54×10^{-3} 、 9.13×10^{-5} である。

補正された出力から式(10)を用いて飽和度を算出する。

$$\theta = c_1 V + c_2 \quad (10)$$

ただし、 c_1 、 c_2 はセンサ固有の値で定数である。

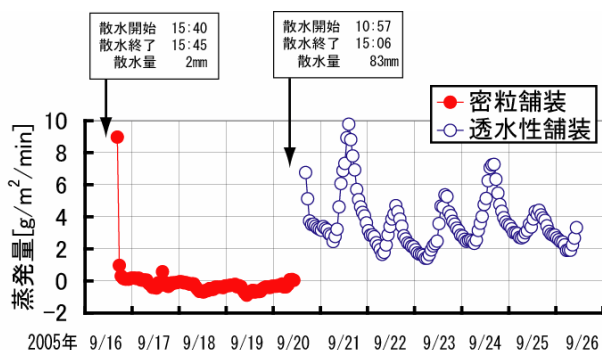


図-8 蒸発量の推移

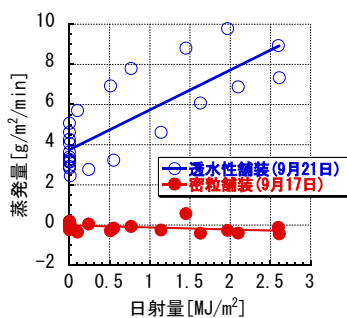


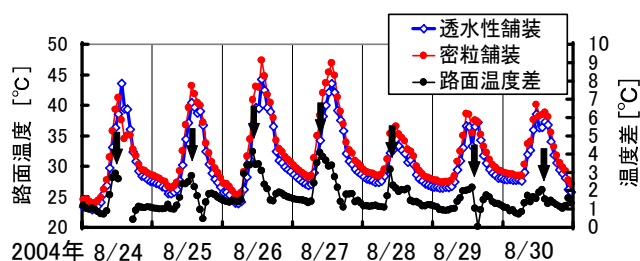
図-9 日射量と蒸発量

4. 実験結果

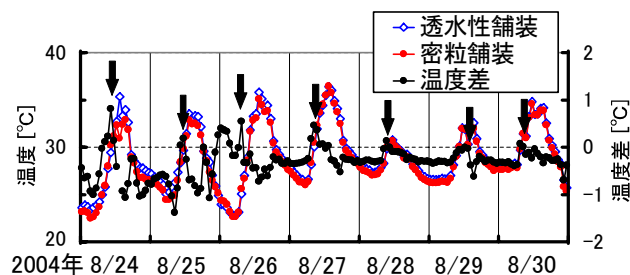
(1) 蒸発量

蒸発量測定的重要性については2章で述べた。本節では、透水性舗装および密粒舗装における蒸発量の計測結果について検討を行い、透水性舗装のヒートアイランド現象を抑制する効果について考察を行う。

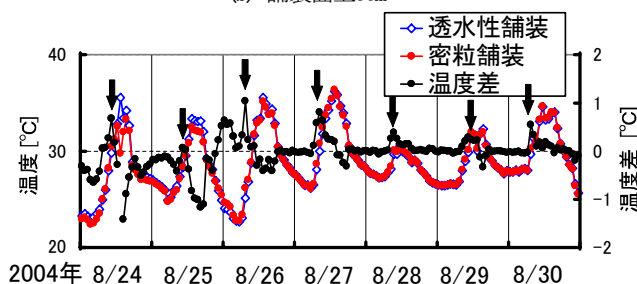
図-8に透水性舗装からの蒸発量と密粒舗装からの蒸発量の経時変化を示す。なお、蒸発を計測するにあたり、自然降雨があった後の状態を模擬するため、蒸発量の計測開始前に舗装面上に散水を行った。散水は舗装内への降雨浸透が定常状態に落ち着くまで行った。その結果、透水性舗装からの蒸発量を計測する際には総降雨量83 mmとなり、散水終了時には舗装内に57mmの雨が貯留されていた。一方、密粒舗装に関しては散水直後に溢流が始まり舗装内への雨水の浸透がほぼ見られなかったため、総降雨量2mmで散水を打ち切った。図-8から、透水性舗装においては日中に蒸発量が増加し、夜間に減少する傾向が読み取ることができる。一方、密粒舗装は散水直後には蒸発量が観測されているが、その後蒸発は見られない。これは密粒舗装がほぼ水を浸透させない不透水性の密粒度アスファルトからなるため、舗装内に水が貯留されないことに起因すると考えられる。また、図-9の日射量と蒸発量の関係より、透水性舗装に関しては日射量が増加すると蒸発量が増加する傾向が見られる。一方、密粒舗装は日射量が増加しても蒸発量はほぼゼロである。つまり、密粒舗装と比較すると透水性舗装は蒸発による潜熱が日射



(a) 路面温度



(b) 舗装面上5cm



(c) 舗装面上15cm

図-10 透水性舗装と密粒舗装の温度

エネルギーの一部を分担し、式(3)よりヒートアイランド現象の原因となる顕熱輸送量および地中伝導熱を減少させることができると推察される。

(2) 舗装温度

ヒートアイランド現象抑制のためには地表面温度を低減させることが有効である。本節では、透水性舗装の路面温度について密粒舗装と比較検討を行う。さらに、舗装表面温度の低減に関して、前節で述べた蒸発がどのように関与するのか検討を行う。

a) 表面温度

図-10(a)に透水性舗装と密粒舗装の光ファイバ温度計で測定した地表面温度の経時変化を示す。なお、図中の温度差は密粒舗装の温度から透水性舗装の温度を差し引いた値であり、プラスになると密粒舗装に比べ透水性舗装の温度が低くなっていることを表す。図-10(a)より、透水性舗装の方が密粒舗装に比べ日中に4度近く温度が低減されていることが分かる。

b) 舗装面上の気温

次に舗装面上の気温の計測結果を検討する。図-10(b)に舗装面上5cmの温度の経時変化を、図-10(c)に舗

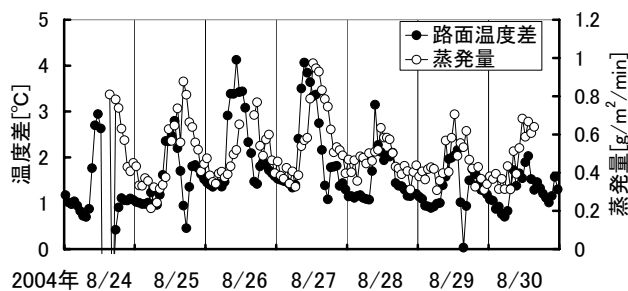


図-11 蒸発量と温度差の経時変化

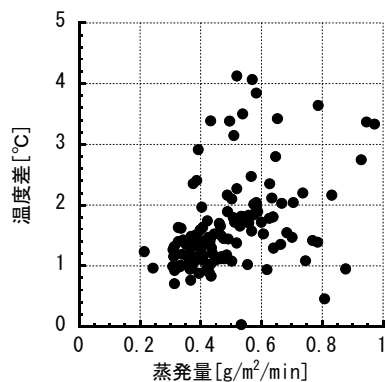


図-12 蒸発量と温度差

装面上15cmの温度の経時変化を示す。今、図-10(a)の路面温度差が最大となる時間に注目すると、いずれの日においても舗装表面温度の差が最大となる時間に舗装面上5cmや15cmにおける温度差が最大となっており、路面温度と舗装面上の温度に関連性が見られる。このことから、路面温度における温度の低減が舗装面上5cm、15cmの温度に影響していると考えられる。すなわち、舗装面上の温度を低減させることにより空気の温度を低減させることができると推察される。

c) 温度低減のメカニズム

図-11 に示した路面温度の差と蒸発量の経時変化より、日中に蒸発量が増加するに伴って路面温度差が拡大している。また、図-12 の路面温度差と蒸発量の関係より、路面温度差と蒸発量に相関が見られる。以上の結果から、透水性舗装の温度低減効果は、透水性舗装からの蒸発が一因として生じていると推察される。すなわち、透水性舗装内に存在する水が蒸気へと相変化し、潜熱として熱が舗装から奪われるためであると推察される。

次に透水性舗装からの蒸発量と気象条件の関係を考察する。図-8より、9月24日の蒸発量は22日、23日、25日より多く、日中に7.27g/m²/minに達している。また、図-6(c)の日射量を見ると、9月24日は22日や23日、25日より多く、蒸発量との相関性がある。このことから、晴天でより多くの日射エネルギーが舗装面上に与えられると蒸発量が増加する傾向があることが推察される。このことは、曇りの日より晴天の日において透水性舗装が蒸発による温度低減効果を発揮することを意味し、ヒートアイランド現象の改善に有効であることを

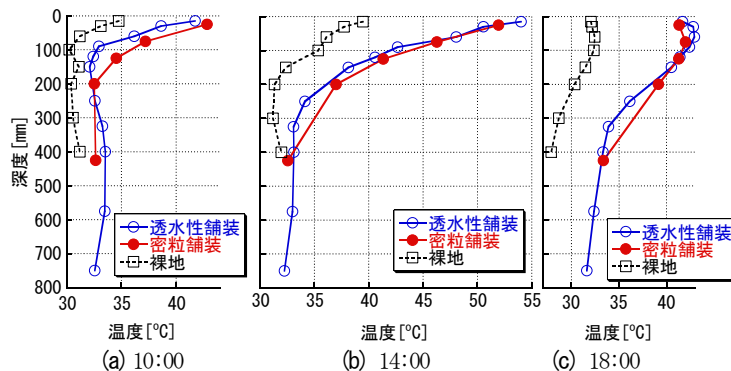


図-13 舗装内温度 (2005年8月1日)

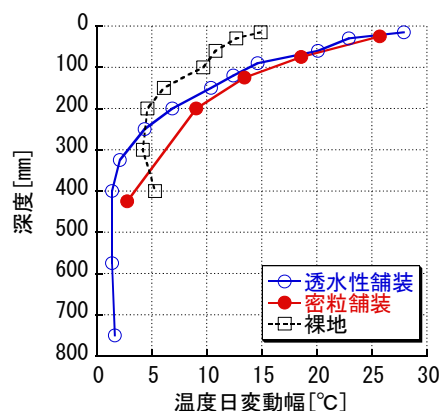


図-14 温度の日変動幅 (2005年8月1日)

示唆している。

d) 舗装内温度

前項では、蒸発があることによって密粒舗装に比べて透水性舗装の温度が低下することを明らかにした。しかし、図-11を見ると、路面温度差がピークとなる時間が蒸発量の最大となる時間より2時間程度早いことが分かる。原因としては、透水性舗装の熱特性が密粒舗装と異なることが考えられる。そこで、透水性舗装、密粒舗装、裸地における深さ方向の温度分布について考察を行い、透水性舗装の熱特性について検討を行う。

図-13に2005年8月1日の透水性舗装と密粒舗装、裸地の深さ方向の温度分布を、図-14に温度の日変動幅の深さ方向分布を示す。ただし、日変動幅とは一日の最高温度から最低温度を差し引いた値とする。なお、図-6(b)に示すように8月1日は晴天であり、降雨は記録されていない。

まず始めに、透水性舗装と密粒舗装の加熱時や冷却時の挙動の違いについて考察を行う。図-13(a)の10時における温度分布を見ると、地表面付近の温度は透水性舗装の方が密粒舗装に比較すると低くなっている。また図-13(c)に示す18時の温度分布を見ると、10時の時点とは逆に地表面付近の温度は透水性舗装の方が高い。

以上の結果から、密粒舗装に比べると透水性舗装の方が同量の熱量に対する温度変化が少ない、つまり熱容量が大きいと推察される。このように透水性舗装が

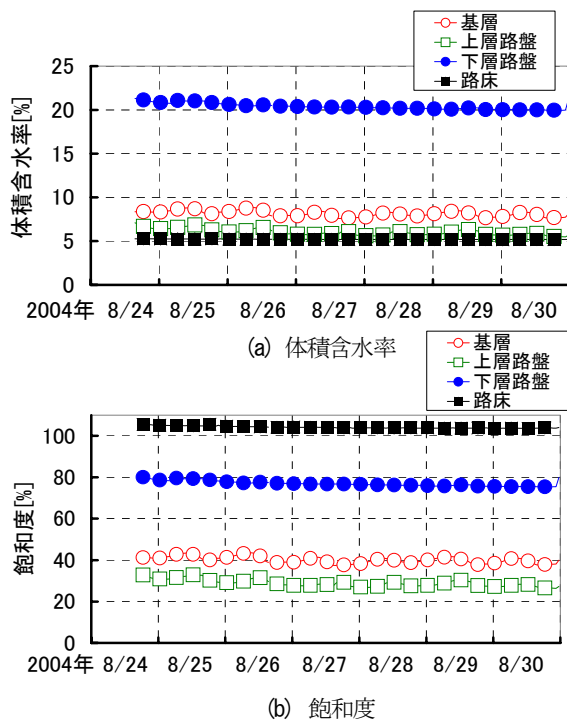


図-15 舗装内の水

密粒舗装に比べて熱容量が大きいと考えられる理由としては、透水性舗装が熱容量の大きい水を舗装内に貯留していることが挙げられる。熱容量が大きいため、透水性舗装は密粒舗装に比べ温度上昇や温度低下が遅く、図-13(a), (c)のような現象が見られると考えられる。

次に舗装体と裸地の温度分布を比較し透水性舗装のヒートアイランド抑制効果について議論する。図-13より、いずれの時間帯においても裸地温度は透水性舗装や密粒舗装より低下している。また密粒舗装と透水性舗装を比較すると、18時には表面付近の温度に関して透水性舗装の温度が密粒舗装よりも高くなっているものの、いずれの時間においても全体的に透水性舗装の方が密粒舗装よりも温度が下がっている。

図-14の温度の日変動幅を見ると、0mmから200mmの深さにおいては密粒舗装と透水性舗装にほとんど差が見られないものの、密粒舗装に比べると透水性舗装の温度は全体的に低減され裸地の分布に近づいている。すなわち、裸地と密粒舗装の差および裸地と透水性舗装の差を比べると、密粒舗装と裸地の差より透水性舗装と裸地の差の方が小さいことが分かる。このことから、密粒舗装を透水性舗装に変えた場合、舗装面を自然地表面の状態に近づけることができると考えられる。

温度が日変動する温度の深さに注目すると、透水性舗装は舗装表面から400mm程度までであり、400mm以深はほぼ温度の日変動が見られない。一方、密粒舗装は400mm程度においても変動が見られる。このことより、密粒舗装の方が温度変動が生じる領域が

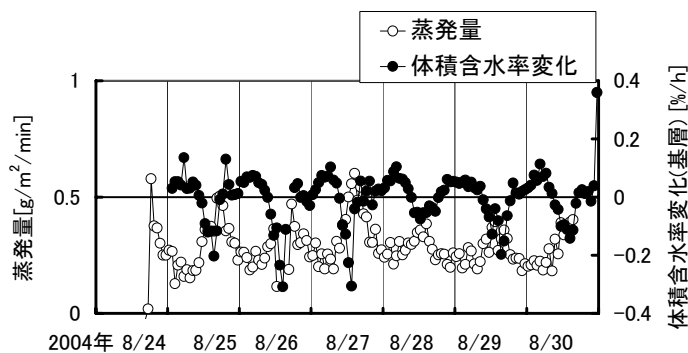


図-16 蒸発量と基層の体積含水率

大きいと推察される。つまり、透水性舗装の方が密粒舗装に比べ熱を溜め込む領域が小さいと考えられる。

以上の結果から、透水性舗装と密粒舗装を比較すると、密粒舗装を透水性舗装に変えることにより僅かではあるが地下の温度分布を裸地のような自然地表面の分布に近づけることができ、熱環境を改善することができると推察される。

(3) 舗装内の水分挙動

本研究の目的は透水性舗装の蒸発による温度低減メカニズムを調べ、透水性舗装の熱環境改善効果を検討することである。本節では、舗装内の水の挙動を把握することにより、透水性舗装の温度低減効果のメカニズムを検討する。なお、本論文で取り上げる水分量計の出力値は3(2)で述べたように全てキャリブレーションを行い温度依存性を除外している。

a) 舗装内の水

図-15(a)に舗装中の体積含水率の経時変化を示す。体積含水率は舗装中の水の絶対的な量を表す指標であるから、下層路盤に多くの水が保持されていることが分かる。これは、下層路盤に用いられている再生クラッシャーラン(RC-30)の水分保持特性に起因すると推察される。また、図-15(b)に示した舗装内の飽和度の推移から、路床はほぼ飽和であり、表層に近づくにつれて飽和度が低下する傾向があることが分かる。路床の飽和度が高いにも関わらず体積含水率が最も低い理由は、路床の空隙率が約5%と小さいためである。さらに、図-15から上層路盤と基層に関して飽和度と体積含水率の値が類似している。これは上層路盤と基層に用いられている材料が開粒度アスファルトと共通していることによると考えられる。このように舗装内の水の存在形態は用いられている舗装材料により大きく異なるということが推察される。

b) 蒸発と基層の体積含水率

次に蒸発量と舗装表面近くの基層の体積含水率の関係について述べる。図-16に1時間あたりの蒸発量と基層における体積含水率の変化量の変化を示す。このグラフから日中に蒸発が多くなると同時に基層の体積含

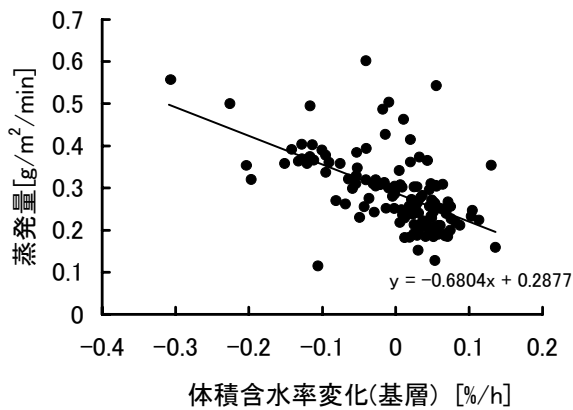


図-17 体積含水率の1時間変化量と蒸発量

水率が減少する傾向が見られる。さらに、図-17に示した基層における1時間の体積含水率の変化量と蒸発量の関係より、基層の体積含水率が減少すると蒸発量が増加するという関係が確認される。従って、蒸発に基層の舗装表面の水が消費されていることが推察される。以上の結果に加え、図-12から蒸発があることにより透水性舗装の路面温度が密粒舗装に比べ低下すると思われることから、透水性舗装の表面近くの水の存在が温度低減効果をもたらす蒸発に関与していると推察される。

c) 舗装内の水の挙動

図-18に示す舗装内の体積含水率の挙動から、基層や上層路盤までの深さでは体積含水率が1日のスパンで大きく変化していることが見て取れる。今、一日で体積含水率が最も減少する時間に着目すると、基層に対し、上層路盤は1, 2時間程度遅れ、下層路盤は4時間程度遅れている。例えば8月25日では、基層が15時20分、上層路盤は16時、下層路盤は17時40分に最も体積含水率が減少している。このように時間遅れを伴いながら、舗装表面近くの体積含水率の減少が下層路盤などの舗装深部までに伝達していくということは、舗装体の表面のみの水だけではなく、舗装全体の水が蒸発に関与していることを示していると考えられる。

次に、夜間における水の挙動に注目すると、昼間とは逆に基層や上層路盤の体積含水率の変化量がプラス、つまり体積含水率が回復している。図-15(b)の下層路盤の飽和度を見ると、単調に減少していることから、下層路盤から水が一定に供給され、蒸発が減少する夜間に基層や上層路盤の含水率が回復すると考えられる。

以上のように地中で水が動き体積含水率が増減を示す挙動は、一般土壌においても観測されている¹⁵⁾。透水性舗装が舗装という機能を提供する人工地表面でありながら、ヒートアイランド現象の抑制に有効な自然地表面が持つ機能を有することを示唆する結果であると考えられる。

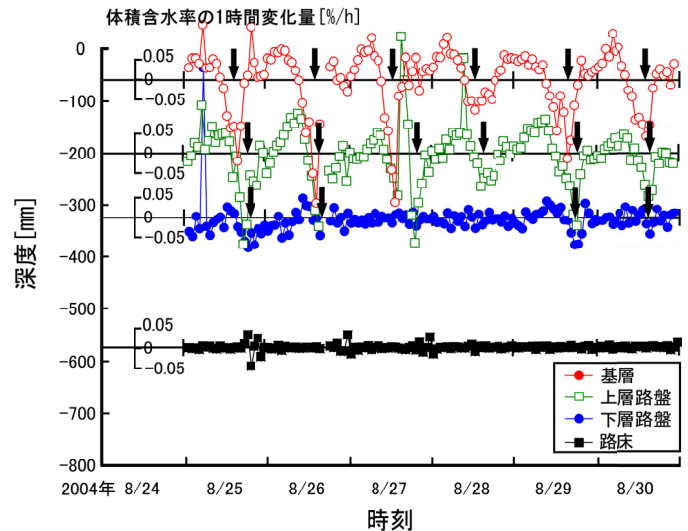


図-18 体積含水率の挙動

5. まとめ

本研究では、透水性舗装によるヒートアイランド現象の抑制効果を調べるため、蒸発量を計測する手法の確立を試みた。さらに、この蒸発量計測手法を用いて供用中の透水性舗装断面を模擬したモデル舗装において夏季に実験を行い、その効果を検証した。

以下に本研究で得られた主な知見をまとめる。

- (1) ベンチレーション法による蒸発量計測手法を導入し、透水性舗装の効果を検証する上で必要不可欠な蒸発量を定量的に測定する手法を提案できた。
- (2) 提案した蒸発量計測手法を用いて舗装面からの蒸発を計測し、透水性舗装において蒸発量の増加に伴い舗装温度が低減するという相関性を明らかにした。すなわち、透水性舗装の表面温度が低下する要因の一つが蒸発であることが分かった。
- (3) 透水性舗装の表面温度が密粒舗装に比べ日中で最大4°C程度低減されることや、舗装上5cmや15cmの空気温度が路面温度の影響を受け、温度が低下することが分かった。よって、透水性舗装が都市面積の15%超を占める車道に施工されると、ヒートアイランド現象の改善に効果的であると考えられる。
- (4) 舗装内温度の日変動の深さ方向の分布を比較すると、密粒舗装よりも透水性舗装が裸地に近い分布を示していることが分かった。よって、密粒舗装を透水性舗装に変えた場合、舗装面を自然地表面の状態に近づけることができると考えられる。
- (5) 透水性舗装の温度低減効果をもたらす蒸発量と舗装表面近くの基層の体積含水率に相関性があり、基層の含水率の低下が下層路盤まで伝達することが明らかになった。従って、透水性舗装の熱環境

改善効果を向上させていく上で、基層等の表面のみならず舗装全体の水分分布を材料によってどのように変えるか検討することが重要である。

参考文献

- 1) 文字信貴, 平野高司, 高見晋一, 堀江武, 桜谷哲夫 : 農学・生態学のための気象環境学, 丸善, pp.140-141, 1997.
- 2) 浅枝隆, 北原正代, 藤野毅, 和氣亜紀夫 : 加熱された舗装面上空の大気加熱過程の解析, 土木学会論文集 No.467/ II-23, pp.39-47, 1993.
- 3) 福田萬大, 越川喜考, 辻井豪, 朝枝隆, 藤野毅 : 夏季に給・散水した保水性舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.613/ V42, pp.225-236, 1999.
- 4) 福田萬大, 深沢邦彦, 荒木美民, 藤野毅, 浅枝隆 : 夏季自然状態での各種舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.571/ V-36, pp.149-158, 1997.
- 5) 鎌田修, 清水忠昭, 伊藤正秀 : 車道透水性舗装の耐久性に関する研究, 土木学会舗装工学論文 Vol.10, pp.91-98, 2005.
- 6) 吉中保, 根本信行, 幸田正裕 : 透水性アスファルトの車道への適用に関する検討, 土木学会舗装工学論文集 Vol.5, pp.47-52, 2000.
- 7) 荒井進, 大川秀雄, 田口仁, 大竹和彦 : 新潟市における車道透水性舗装の試み, 舗装 Vol.33 No.3, pp.8-15, 1998.
- 8) 木下考樹, 和田実, 西山哲, 矢野隆夫 : 車道透水性舗装の機能評価 -産・学・官の取り組み-, 舗装 Vol.41 No.5, pp.5-9, 2006.
- 9) 丹原康滋, 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫 : 透水性舗装における蒸発散と熱移動に関する研究, 第 39 回地盤工学研究発表会公演概要集, pp.2363-2364, 2004.
- 10) 北山迪也, 大西有三, 西山哲, 上原真一, 矢野隆夫, 青木一男 : 透水性舗装における熱と水の移動に関する実験的研究, 2005 年土木学会関西支部年次学術講演会, V-36, 2005.
- 11) 北山迪也, 大西有三, 西山哲, 上原真一, 矢野隆夫, 和田実 : 都市環境保全のための水循環の保全に関する研究, 第 54 期日本材料学会学術講演会論文集, pp.129-130, 2005.
- 12) 高橋学, 張銘, 李小春 : 地下空洞内の水分移動量を把握する方法について, 地質ニュース 515 号, pp.14-23, 1997.
- 13) Mohamed AA, K.Watanabe and U.Kurkawa : Simple method for determining the bare soil resistance to evaporation. Jomal of Groundwater Hydrology, 39(2), pp.97-113.
- 14) Ali Albed-Rahman M, Kunio W and Tai S : Ventilated Chamber System for Continuous Recording of Both the Evaporation Rate and the Heat Balance at the Bare Soil Surface, Journal of Groundwater Hydrology, Vol.40-2, pp.185-202, 1998.
- 15) R.D.Jackson, B.A.Kimball, R.J.Reginato, F.S.Nakayama : Diurnal Soil-Water Evaporation : Time-Depth-Flux Patterns, Soil.Sci. Soc. Amer. Proc., Vol.37, 1973.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF PERMEABLE PAVEMENTS ON THE IMPROVEMENT OF HEAT ENVIRONMENT IN URBAN AREA

Michiya KITAYAMA, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO,
and Tsuyoshi YAMAMOTO

In these days, some attempts have been made at the improvement of heat environment in urban area by constructing permeable pavements in carriageway area. We have tried to establish the measuring method of evaporation from permeable pavements. And also, we have conducted experiments and have measured evaporation, temperature and volumetric water content on the permeable pavement model, which structure is the same as that of Route 163, in order to examine the effectiveness of permeable pavements. The results show that the proposed method can be useful and evaporation contributes to lower surface temperature of permeable pavements.