

地中水分の分散を利用した夏季の舗装表面の温度緩和と一保水性舗装の利用一

Utilization of Moisture Transfer inside Porous Pavement for
the Mitigation of Thermal Effects of Paved Surface in Summer

ヴタンカ*、浅枝 隆†、ユスフ ムハマド アブ‡

By Vu Thanh Ca, Takashi Asaeda and Eusuf M.A.

Abstract

Characteristics of heat and moisture transfer in porous pavement is investigated based on field observation and a numerical model. It has been found that the pore size in the pavement material poses a paramount importance for the transfer of water vapor. Ceramic porous pavements with small pore size inside can absorb a large amount of water from underlying soil, results in larger evaporation at the ground surface and lower surface temperature compared with other pavement. Usually the porous pavement surface is rather dry and the assumption of local equilibrium between liquid phase and vapor phase commonly used in numerical model for the computation of evaporation at the ground surface is not correct here. Thus, resistance to evaporation must be included in the numerical model to get good computation of evaporation. Due to evaporation, surface temperature and under surface heat storage of porous pavement is much smaller than impervious pavement.

Key words: Porous pavement, Vapor transfer, Evaporation resistance, Hysteresis, Numerical computation.

1 まえがき

多孔質性の舗装は雨水を地中にしみ込ませ、都市域の地盤の乾燥を防止するのに大きな威力を発揮するが、近年、それと同時に、夏季の日中の舗装の加熱緩和に対する期待が高まっている。即ち、多孔質性の舗装を利用して地中の水分を拡散させ地表面近傍で蒸発させることによって温度を下げようとするものである。これは舗装が夏季の都市域で最も高温になる構成材料であり、しかも、大量の熱を蓄熱し夜間の熱帯夜の発生に大きく関与していることから、熱環境の緩和対策として有効な手段といえよう。ところが、その実現には未だいくつかの解決すべき問題を抱えている。

まず、どのような舗装が実際に加熱緩和効果があるかという問題である。従来からレンガ等の舗装はあまり温度が上がらず、透水性アスファルトの表面が加熱されているのはよく見かける現象である。ところが、加熱緩和効果に必要な条件は必ずしも十分把握されているわけではない。

次に、この現象は、一般的に、多孔質内の液状水と水蒸気、熱の拡散現象として捉えられる。ところが、従来、液状水の化学ポテンシャルの釣り合いの元に水分および水蒸気拡散し、地表面の比湿が定まり、蒸発量が決定するというプロセスで解析が行なわれてきている。ところが、乾燥地表面でこの仮定が適用できるかどうかには疑問が残る。

本研究ではこうした背景の元に、実際に屋外に様々な舗装を作成し、舗装内部、表面の温度変化を観測すると共に、地面に多孔質な舗装が存在する場合の水分および熱の輸送モデルを作成し舗装の加熱緩和効果の機構を解明し、これに必要な条件を求めた。

*正会員 Ph.D. 埼玉大学工学部
〒338 浦和市下大久保255

†正会員 工博 埼玉大学大学院理工学研究科
〒338 浦和市下大久保255

‡学生員 工修 埼玉大学大学院理工学研究科
〒338 浦和市下大久保255

2 観測方法とその結果

日本住宅都市整備公団の久喜パークタウン敷地内(36°07'N, 139°70'E)にある、風通しがよく、日射を遮るものがない場所に、高さ1.0mの盛土を行い。その上に、2m四方の広さを持つ10種類の舗装サンプルを付設した。それぞれの舗装サンプルには温度観測用センサーを埋め込み、その結果を自動計測した。図1に舗装サンプルの種類と温度測定深さを示す。図2に観測機器の設置概要図を示す。10種類の舗装サンプルは図1のように配置した。尚、各サンプル間の距離は1mである。ここで、芝地以外の全ての舗装サンプルのまわりを10cm厚の断熱材で囲み、周囲の熱や水分の影響を受けないように配慮した。

観測は、平成6年8月9日から平成7年6月までの連続11ヶ月間について行われた。また、舗装内部の温度の測定と同時に、気温、湿度、風速、赤外放射量をそれぞれ、温湿度計、3杯式風速計で測定した。図3に平成6年8月8日から平成6年8月10日までの風速、気温、湿度を示す。

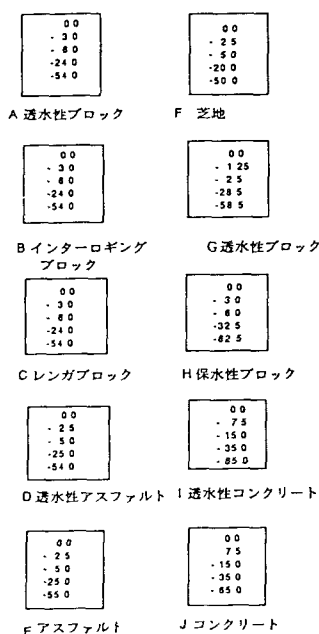


図1：舗装サンプル種類と温度測定深さ (cm)

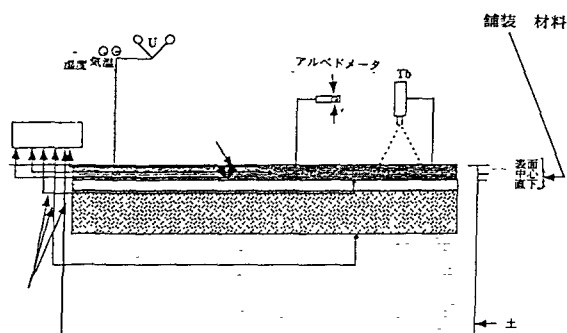


図2：観測機器の設地概要

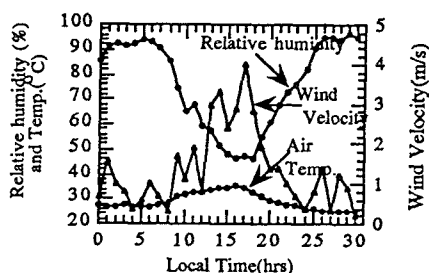


図3：風速、気温、湿度の日変化

さらに、平成6年8月9日から10日にかけては晴天日で気象条件がよく、アルベド、舗装面からの赤外放射量も含めた集中観測を行った。なお、アルベドの測定にはアルベド計、舗装面からの赤外放射量はサーモフロー（英弘精機）によって求めた。

なお、この日は、日中の気温が最高で35°Cを越える非常に暑い一日となり、また深夜の気温も25°Cを下回ることがなく、ほぼ熱帯夜とよべる日だった。また、風は日中に強く、夜間は弱かった。

実験の前に一度保水性ブロックの重量を測定した。実験条件における保水性ブロックの重量と乾燥状態におけるそれとの比較から含水率は9%であることがわかった。他の舗装については測定していないが、乾燥状態であったことから含水率はほとんど0%であると考えられる。

次に、図4(a-f)にそれぞれのサンプルA,D,E,F,H,Iの表面と地中の温度を示す。

8月9日の観測では、それぞれの地表面温度は正午近くの時間帯で最高値が記録された。1例を示すと、11時55分に、Eアスファルト舗装面の表面温度は49.2°Cに達した。この時刻でその他の供試体の表面温度は高い順に、D透水性アスファルト舗装(49.1°C)、A透水性ブロック舗装(48.0°C)、I透水性コンクリート舗装(45.0°C)、H保水性ブロック舗装(40.6°C)、F芝地舗装(40.2°C)の順となった。ここで、最も地表面温度が高いアスファルト舗装と低いF芝地やH保水性をと比べると、約10°C近くの違いが生じていることがわかる。次に、夕方18時の表面温度は、それぞれEアスファルト舗装面とA透

水性ブロック舗装で最も高く 39.2°C であり、以下、D 透水性アスファルト舗装 38.1°C、I 透水性コンクリート舗装 37.0°C、H 保水性ブロック舗装 35.8°C、F 芝地舗装 31.0°C の順となった。最後に、翌日 10 日午前 6 時におけるそれぞれの表面温度は、依然 E アスファルト舗装面で 31.0°C と最も高く、次いで D 透水性アスファルト舗装 30.4°C、A 透水性ブロック舗装 30.1°C、I 透水性コンクリート舗装 28.8°C、J コンクリート舗装 28.4°C、H 保水性ブロック舗装 28.2°C、F 芝地舗装 26.7°C の順となっており、前日の結果と同様であった。総括すると、E アスファルト舗装と D 透水性アスファルト舗装の表面温度が常に他と比べて高く、その原因としては、表面の色が黒であるためアルベドが小さく、日射をより多量に吸収したこと、サンプル内に水分がなく吸収した日射がそのまま温度上昇に利用されたことが挙げられる。

また、両者の間には透水性と非透水性の差がほとんど確認されず、透水性舗装内での水分蒸発の効果がほとんど現れなかったことを裏付けている。これと同様な結果は J コンクリート舗装と I 透水性コンクリート舗装との間の関係にも現れている。このように、透水性のアスファルトやコンクリートは水分の貯留がほとんどないために蒸発量が増えず、表面温度の軽減にほとんど効果がないことがわかる。

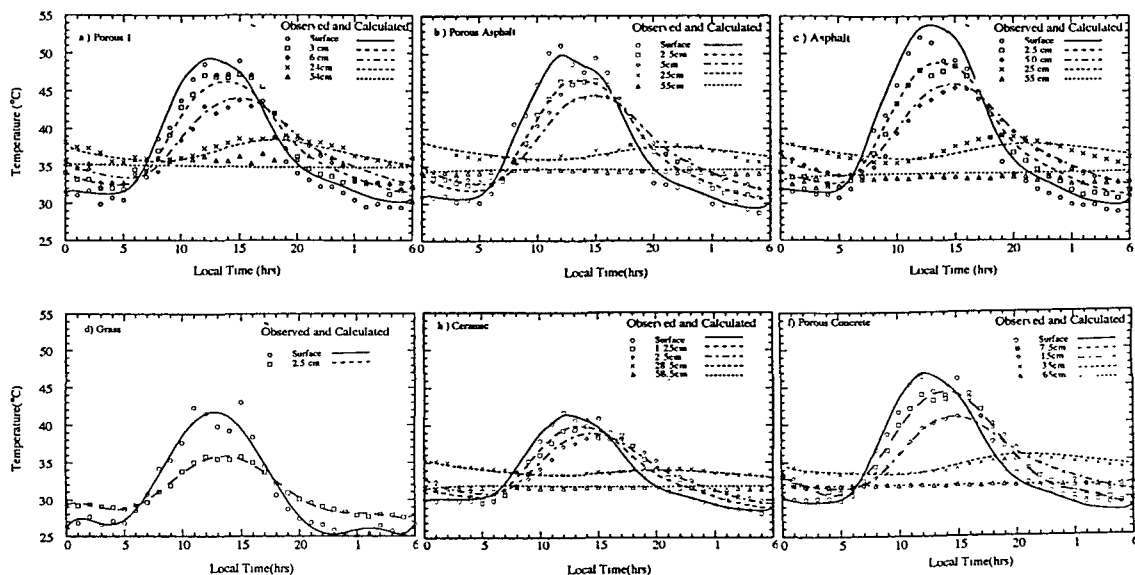


図 4：諸舗装サンプルの表面と地中の温度：(a) 透水性ブロック、(b) 透水性アスファルト、(c) アスファルト、(d) 芝地、(e) 保水性ブロック、(f) 透水性コンクリート

アスファルトに続いては、A 透水性ブロック、G 透水性ブロック舗装、I 透水性コンクリート舗装、J コンクリート舗装の順で表面温度が低くなっている。これらの舗装にはほとんど水分は含まれておらず、主に、表面のアルベドの値の差によって吸収された日射量に差が生じ、それによって温度が異なると考えられる。特に、J コンクリートはアルベドが大きく、また熱伝導率が高いために熱が路盤に伝播するために表面温度は低く保たれる。逆に、透水性ブロックの場合には熱伝導率が小さいために熱が表面に貯えられ、表面温度が高くなっている。

一方、保水性ブロックは日中の芝地の温度分布特性に最も近い値を示している。これは間隙が他の透水性舗装よりも小さく熱容量が大きく保たれること、舗装内に水分が多く貯留されており、舗装内の水分蒸発によって気化熱を奪った効果も大きいことがあげられる。このような熱的特性は芝地に近いものであり、街路の熱環境改善にはふさわしい材料といえる。図 5(a,b) に同期間の舗装サンプル E、H の上 30cm に設置したグローブ温度の値を示す。このグローブ温度は、気温の影響と地面からの放射影響を同時に含むものであり、人体が感ずる温度に最も近いものを示すといわれているものである。気温はどの舗装面についても同様であるために、グローブ温度も舗装表面温度の順に並ぶ。D の非透水性アス

ファルト舗装ではこの温度は50℃に達しており、人体にも50℃程度の高い温度として感じられていることがわかる。これに対して、H 保水性舗装の場合にはこの値は47℃になっており、表面温度の差ほどには人体に感じられる温度の差は大きくないことがわかる。この差が縮まる理由は、グローブ温度の場合には直達日射や気温の影響も含まれるためである。

3 解析に用いた理論についての解説

3.1 地中における水蒸気と熱の輸送

地中において土粒子の中における熱と物質輸送については、Milly(1982)、Asaeda and Vu(1993) らによって、水分含有量のかわりにマトリックス水頭を用いた形式で定式化されている。即ち、土粒子内の物質輸送量式は次のように求められている。

$$\left[\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \psi} + \frac{\theta_a}{\rho_l} \frac{\partial \rho_v}{\partial \psi} \right] \frac{\partial \psi}{\partial t} + \left[\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \frac{\partial \theta}{\partial T} + \frac{\theta_a}{\rho_l} \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(K + D_{\psi v}) \nabla \psi + (D_{Tv} + D_{Ta}) \nabla T] + \frac{\partial K}{\partial z}, \quad (1)$$

ここで、 θ は体積含水率、 θ_a は体積によって表された空気含有量、 ρ_v は水蒸気の密度、 t は時間である、 ρ_l は水の密度、 K は透水係数、 $D_{\psi v}$ はマトリックス水頭に換算した場合の ψ と T の関係上での水蒸気の拡散係数、 D_{Ta} は温度勾配によって誘起される水の輸送量に対する拡散係数、 T は地中の温度、 ψ はマトリックス水頭、 k は重力と逆向きにとった鉛直方向単位ベクトルを示す。

これに対応する熱輸送についての式は

$$\left[C + L\theta_a \frac{\partial \rho_v}{\partial T} - (\rho_l W + \rho_v L) \frac{\partial \theta}{\partial T} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \left[L\theta_a \frac{\partial \rho_v}{\partial \psi} - (\rho_l W + \rho_v L) \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right] \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda \nabla T + \rho_l (LD_{\psi v} + gTD_{Ta}) \nabla \psi] - C_l q_m \nabla T. \quad (2)$$

で表され、ここで、 λ はフーリエの法則に従う熱伝導量と熱によって生ずる水蒸気の輸送に伴う熱輸送量に対する拡散係数、 L は水蒸気の潜熱量、 C_l は水の比熱、 g は重力加速度、 T_0 は代表温度を表す。

セラミック舗装における θ と ψ の関係が室内の実験を行なって決めた。その結果は図6に示す。他の係数はAsaeda and Vu (1993) に用いられた形を用いることにする。

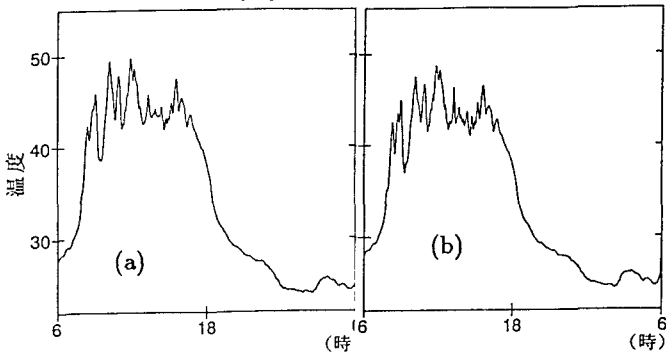


図5：グローブ温度の日変化 (a) 非透水性アスファルト (b) 保水性ブロック

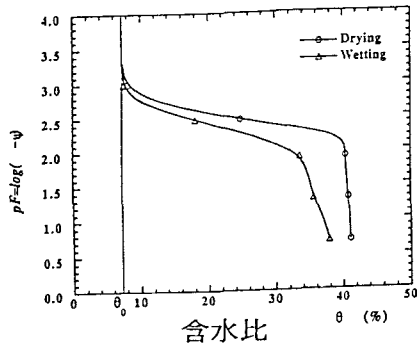


図6：保水性セラミック舗装における $\psi - \theta$ の関係

3.2 初期条件および地表面の境界条件

地表面の境界条件は水蒸気については地表面の潜熱輸送量、熱については地表面での熱保存則で与えられる。すなわち、水蒸気輸送については、

$$q_m = e \quad (3)$$

ここで、 e は地表面における蒸発量である。熱輸送については、次のような地表面での熱収支式で与えられる。

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} = S(1 - \alpha) + R_{Ln} + H - Le - C_l(T - T_0)e \quad (4)$$

ここで、左辺は地中への熱伝導の量を、 S は日射量、 α はアルベド、 R_{Ln} は純長波量、 H は顕熱輸送量、 Le は潜熱輸送量を表す。右辺第 5 項は、蒸発状態で輸送される水蒸気が土から大気中へ輸送する熱量である (Asaeda and Vu, 1993)。

地表面の蒸発量は Louis(1979) も提案した式に従う。すなわち、

$$F_t = u_* T_{p*} = \frac{a^2}{N} U_a (T_p - T_{ps}) F_h \left(\frac{z}{z_0}, Ri_B \right) \quad (5)$$

である。ここで、 F_t は熱フラックスを、 u_* は地表付近の代表風速を、 T_{p*} は地表付近の代表温度を、 a^2 は中立大気での抗力係数を、 N は 0.74 程度の一定値、 U_a は高さ z での風速、 T_p は高さ Z でのポテンシャル温度、 T_{ps} は粗度高さ z_0 での温度で地表面温度と同じとしている。また、 z_0 は粗度高さを、 Ri_B は層平均リチャードソン数を表す。

大気中での水蒸気の輸送のメカニズムは熱の輸送メカニズムに類似していると考えられる。従って、水蒸気の輸送量についても式 (6) と同様に、

$$e = \frac{\theta_s}{\theta_{sat}} \rho_a \frac{a^2}{N} U_a (\rho_{vs} - \rho_{va}) F_v \left(\frac{z}{z_0}, Ri_B \right) \quad (6)$$

と表される。ただし、 θ_s は地表面における体積含水率、 θ_{sat} は地表面における飽和含水率、 ρ_a は空気密度、 ρ_{vs} は土壌表面 ($z=0$) での水蒸気密度、 ρ_{va} は空気の比湿を表す。 F_h と F_v に関しては Louis(1979)、Asaeda and Vu(1993) によって与えられる。

F_t が決定されると、乱流熱輸送量 H は $H = \rho_a C_p F_t$ の式で求められる。

ここで、式 (6) でわかるように、蒸発量については地中の液状水と水蒸気の化学ポテンシャルの釣り合いで定まる量がそのまま蒸発するわけではない。すなわち、地中の比湿が高くなっていても、地表面の近傍で比湿が徐々に低くなるため、地表面近傍の比湿の勾配は必ずしも大きくならない。従って、地表面から大気へ輸送される水蒸気量が地中の液状水と水蒸気のマトリックスポテンシャルから定まる水蒸気輸送量よりも小さくなる。そのために、地中がある程度湿った乾燥地においても大量の水分が一気に蒸発してしまって地中が乾燥してしまうことはない。

解析の手順は Asaeda and Vu (1993) を用いることとする。

3.3 計算結果と考察

数値計算によるシミュレーションは 8 月 9 日から 8 月 10 日までの期間の観測に対して、それぞれ温度分布、マトリックス水頭、および土壌水分分布について行った。図 4(a-f) にそれぞれのサンプル A, D, E, F, H, I の観測で求められたと計算された表面と地中の温度を示す。この結果によって、いずれもそれぞれの舗装サンプルの熱特性をよく再現することができていることがわかった。特に、地表面温度だけでなく、地中内部温度分布及びそれぞれの日変化についても観測値を精度よく再現することが可能である。

計算より求められたそれらサンプル D とサンプル H の表面における熱収支の日変化を図 6(a-b) に示す。これらのグラフより、アスファルト舗装では日中気温と表面温度の差が非常に大きくなるため、顕熱量は最高 390 W/m^2 にも及び、夜間においても表面温度は気温より高く、0 時頃でも 60 W/m^2 出している。しかしながら、セラミック舗装では蒸発量が大きいため、日中気温と表面温度差が小さくなる。これより、顕熱量は最高 150 W/m^2 になる。また、セラミック舗装で夜間になると、表面温度と気温差が

極めて小さくなる、顕熱量は 10W/m^2 に達する。

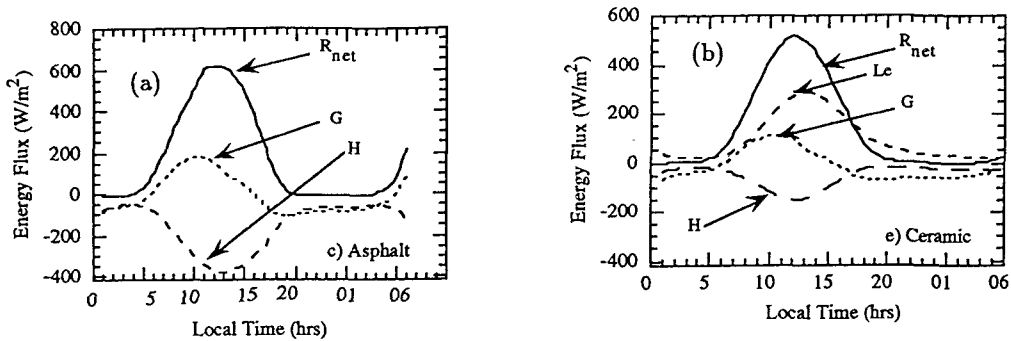


図 7：舗装表面における熱収支の日変化

本解析プログラムを使用することにより、それぞれの舗装表面の温度を精度よく予測することができ、住宅地の熱環境予測の地表面温度の境界条件を与えることができる。

4 まとめ

- 1) アスファルトはアルベドが小さく水分の含有がないために日中極めて高い温度となる。しかし、コンクリートについてはアルベドが大きく、アスファルトと比較すると極めて表面温度は低く、また、熱伝導率が高いために、熱が下層に伝播され、表面温度は通常の多くの舗装材料と同じ程度もしくは低い温度となる。
- 2) 透水性のアスファルトやコンクリートからの水分の蒸発はほとんどなく表面温度低下に対する寄与はほとんどない。
- 3) また、通常の透水性舗装についても水分の蒸発はほとんど期待できず、表面温度の低下はあまり期待できない。
- 4) 保水性の舗装材については、水分の蒸発が多く、表面温度は芝地に近い値で保たれる。
- 5) 実際に人体に感じられる温度であるグローブ温度は、日射や気温の影響も含まれるために、表面温度の差ほどには舗装面の差の影響を受けない。

参考文献

- Asaeda T. and V.T. Ca (1993) The subsurface transport of heat and moisture and its effects on the environment: a numerical model. *Boundary-Layer Meteorol.* **65**, 159-179.
- Brutsaert W. (1984) *Evaporation into the Atmosphere. Theory, History and Applications*, D. Reidel Pub. Co., 299 pp.
- Louis J-F. (1979) A Parametric Model of Vertical Eddy Fluxes in The Atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol.* **17**, 182-202.
- Milly P.C.D. (1982) Moisture and Heat Transport in Hysteretic, Inhomogeneous Porous Media: a Matrix Head-based Formulation and a Numerical Model. *Water Resour. Res.* **18**, 489-498.