

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

木内 豪¹・小林裕明²

¹正会員 工修 建設省土木研究所河川部都市河川研究室主任研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

²正会員 建設省土木研究所河川部都市河川研究室研究員 (同 上)

本論文は、都市の温熱環境改善を目的とした舗装表面の高温化抑制策について検討を加えたものである。まず、舗装の表面温度がアルベド、熱容量、熱伝導率の値によりどの程度変化するかを数値計算により確認した。次に、透水性舗装の熱収支と温度変化を実験的に求め、今回の土壌・気象条件では舗装下に接する土壌からの潜熱輸送はほとんどなく表面温度の抑制には効果がないことや、透水性舗装の間に継続的に保水されている場合には地表面温度が15℃程度抑制され、注水後1日ほどの間は潜熱輸送量が正味放射量の大部分を占めること等を明らかにした。さらに、人体の熱平衡方程式に基づいて仮に地表面温度が60℃から40℃に低下した場合の人間の温熱感覚の緩和効果を示した。

Key Words: urban climate, energy balance, permeable pavement, water retention, lysimeter measurement

1. 序論

コンクリートやアスファルトなどの人工地覆の増加とそれに反比例する緑地や裸地の減少に伴い、洪水流出時間の短縮やピーク流量の増大などの水害問題、河川基底流量の減少による水質への影響、都市気候や生態環境の問題が顕在化し、利便性の向上と引換えに様々な弊害を引き起こしている。水害や水質問題は河川改修を始めとする総合治水対策、水資源開発、下水道の普及等により改善されているのに対し、都市気候は顕著な悪化を見せられている¹⁾。

都市気候の形成要因については既に多くの論文^{例え(2)~)}にまとめられており、人工地覆・人工構造物が壁面で入射波の乱反射を引き起こしたり、大気の流れを変えてしまい、熱の溜まりやすい都市構造となっていることや、アルベドや熱容量に代表される熱特性の変化、裸地・草地に比べて潜熱輸送が全くないことが要因であると指摘されている^{2),3)}。これらの要因は人工地覆・人工構造物表面の高温化をもたらすため、人間に対して微気象的・生理的な影響を与えることも見逃せない。

人工地覆の中でも舗装は、表面の高温化が著しく、都市気候や人間への影響も大きいと考えられる。例えば、夏期の熱中症患者の発生場所の調査結果³⁾によると、高齢者は道路においてその発生率が高くなっている。都市部

の多くがアスファルト等で舗装されている実態からすれば、都市気候の緩和や微気象改善を図る上でも、また、歩行者に優しい道づくりを進めるためにも、舗装面の熱特性の改善が必要であると考えられる。

舗装の高温化抑制策としては1) 色彩を変えてアルベドを高める、2) 舗装や骨材に熱伝導性や比熱の高いものを用いる、3) 舗装に透水性や保水性を持たせて潜熱輸送を利用する、4) 街路樹等の日陰により入射量を減らすなどの方法が考えられる。舗装工学の分野においては、舗装の構造解析上の基礎的事項である舗装温度を把握する研究⁴⁾はあるが、高温化抑制の検討はほとんど行われていない。一方、吉野⁷⁾は、熱環境の視点から地表被覆における雨水保留に関する研究の重要性を指摘し、新田ら⁸⁾は表層土舗装へ給水する仕組みにより快適な地表面温度を保つ運動場を提案している。藤野ら⁹⁾は夏期における各種舗装材の表面温度等を計測し、透水性舗装で2~3℃、保水性舗装では8℃程度の地表面温度抑制効果があることを示している。また、福田らは9種類の試験ブロックの温度特性等を計測し、土系舗装の有効性を示している¹⁰⁾。

筆者等¹¹⁾は3)に近い方法として舗装面への散水の効果について現地観測を試み、散水により表面温度が最大25℃低下し、散水域とその周辺で気温が最大1.5℃低下することを明らかにしている。一方1), 2)の効果についての一般的かつ定量的解釈については近藤の著書¹²⁾におい

て基礎的事項として若干の記述がある。

今後さらに深刻になる恐れのある都市の熱環境を緩和し、快適な都市空間づくりや省エネルギーを進めるには、舗装等の人工地覆の熱収支や温度形成などの熱特性を把握するのみならず、舗装等の高温化抑制策の検討が必要である。特に、都市河川の氾濫防止や流出抑制のために施工され、着実に実績を伸ばしてきている透水性舗装や保水性舗装は熱環境に配慮した都市基盤施設としての機能も発揮することができると考えられるため、その効果を十分把握することが必要である。

そこで、本論文では前述の方策1)、2)の効果について検討を加えるとともに、透水性舗装・保水性舗装の晴天時における熱収支、温度分布を屋外実験により明らかにする。さらに、人体への生理的・心理的影響を把握するため、表面温度の抑制により人間の温熱感覚がどの程度変化するかについて試算する。なお、本論文で扱う「保水性舗装」とは、一定の透水性を備え、かつ保水性も有するものを意味しており、一般に用いられる孔隙が非常に小さく、保水性の高い材料（例えばセラミック）を用いたものとは異なることを断っておく。

2. 舗装の熱移動の基礎式

ここでは、3章以降で述べる舗装の表面温度と熱収支の解析で用いる基礎式を整理する。

水分を透過しない通常の舗装内の温度分布は式(1)の熱伝導方程式で表される。

$$c_p \rho_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z}) \quad (1)$$

ここに、 T : 温度、 z : 地表面からの深さ、 λ : 熱伝導率、 t : 時間、 c 、 ρ : それぞれ比熱と密度を表す。添え字 p は舗装を意味する。通常の舗装では土壤中の水分が舗装を通じて大気へ蒸発することはないが、透水性舗装では土壤中で気化した水分が舗装の間隙を拡散したり、舗装間隙の大きさや土壌との接触状態に応じて毛管力による土壌水の吸引と舗装内での水分移動も発生すると考えられる。これらについては、後述する土壌内の熱・水分の移動と同様の扱いが可能であると考えられる。

舗装上面の境界条件は、空隙のある場合には、潜熱輸送項を加えた舗装上面の熱収支式(2)で表される。

$$R_n = H + L_0 E + G \quad (2)$$

ここに、 R_n : 正味放射量、 H : 大気への顕熱輸送量、 E : 透水性舗装内あるいは舗装下面土壌の水分が舗装表面を通過する量、 L_0 : 水の気化の潜熱、 G : 舗装表面から地中へ向かう熱伝導量である。正味放射量は舗装表面にお

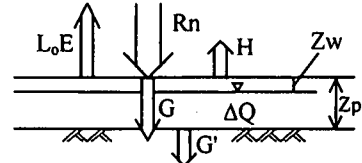


図-1 間隙保水時の熱収支の模式図

ける放射量の収支として式(3)のように表される。

$$R_n = S \downarrow + L \downarrow - S \uparrow - \epsilon \sigma T_o^4 \quad (3)$$

$$S \uparrow = \alpha S \downarrow \quad (4)$$

ここに、 $S \downarrow$: 短波放射量、 $S \uparrow$: 反射日射量、 $L \downarrow$: 大気からの長波放射量、 ϵ : 地表面の放射率、 σ : ステファーン・ボルツマン定数、 T_o : 舗装表面温度、 α : 舗装表面のアルベドである。

顕熱輸送量と潜熱輸送量は、バルク式を用いると次のように表される¹³⁾。

$$E/\rho_a = C_E U (q_s - q) \quad (5)$$

$$H/c_a \rho_a = C_H U (T_o - T) \quad (6)$$

ここに、 ρ_a : 空気の密度(=1.2 kg/m³)、 C_E 、 C_H : 蒸発と顕熱に対するバルク輸送係数、 U 、 q 、 T : ある高度での風速(m/s)、比湿(kg/kg)、気温(°C)、 q_s : 表面温度 T_o に対する飽和比湿、 c_a : 空気の定圧比熱(J/kg/K)、 $c_a \rho_a$: 単位体積の空気の熱容量(=1.21 × 10³ J/m³/K)である。

熱伝導量 G は、舗装上面温度の鉛直勾配に比例するとし、次式により表される。

$$G = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \quad (7)$$

熱伝導量 G を、舗装下面から土壌への熱伝導量 G' と、舗装による貯熱 ΔQ に分離すると、式(8)、(9)のように表される。なお、式(9)右辺第二項は舗装間隙内に水分が自由水面を形成して保留されている場合の貯熱量を表す。

$$G = G' + \Delta Q \quad (8)$$

$$\Delta Q = (1 - n_p) \int_0^{Z_p} c_p \rho_p \frac{dT_p(z)}{dt} dz + n_p \int_{Z_w}^{Z_p} c_w \rho_w \frac{dT_w(z)}{dt} dz \quad (9)$$

ここに、 n_p は舗装の間隙率、 Z_p は舗装の厚さ、 Z_w は舗装上面から間隙内の水面までの長さを表す。添え字 w は水体を意味する。間隙に保水が生じている場合の熱収支の関係を図-1に模式的に示す。

舗装下の土壌の水分状態は舗装の透水性の有無にはあまり影響されず、常に湿潤な状態にあると考えられる¹⁴⁾。この場合、舗装の高温化に伴い土壌内の空隙では水分の蒸発と凝縮が連続的に発生して土壌の有効熱伝導率が高くなる¹⁵⁾ことから、これが舗装の温度分布に影響を与え

ることも考えられる。また、裸地面などから盛んに蒸発が発生している場合は、熱と水分の同時移動現象の扱いが地中温度の計算精度に影響を与えていると言われている⁽⁶⁾。そこで、土壌の間隙における蒸発の影響を組み入れたDe Vries⁽⁷⁾や福原ら⁽⁸⁾のモデルに基づいて、土壌内の熱と水分移動を式(10)、(11)で表す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_T \frac{\partial T_s}{\partial z} - K) \quad (10)$$

$$C \frac{\partial T_s}{\partial t} + \left[\frac{LD_{\theta,vap}}{\alpha_0 v D_{am}} - L\rho_0 h \right] \frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T_s}{\partial z}) + L \frac{\partial}{\partial z} (D_{\theta,vap} \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_{T,vap} \frac{\partial T_s}{\partial z}) + c_w \rho_w (D_{\theta,liq} \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_{T,liq} \frac{\partial T_s}{\partial z} - K) \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (11)$$

ここに、 θ : 体積水分率、 θ_l : 液状水の体積水分率、 D_{θ} 、 D_T : 水分と熱の拡散係数(m^2/s)、 $D_{\theta,vap}$ 、 $D_{\theta,liq}$: 水分拡散係数の水蒸気及び液状水による寄与分、 $D_{T,vap}$ 、 $D_{T,liq}$: 熱拡散係数の水蒸気及び液状水による寄与分、 K : 透水係数(m/s)、添え字 l は土壌を意味する。その他の各係数の表現式およびその値については、付録に記載する。

実際には舗装と土壌の間に砕石等が充填されるが、簡単のため舗装下面是直接土壌に接すると仮定し、舗装と土壌の接触面 z_p における境界条件には、熱フラックスの連続性を表す式(12)を用いる。

$$G' = \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \Big|_{z_p} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z_p} \quad (12)$$

3. 舗装のアルベド・熱伝導率・熱容量が地表面温度に及ぼす影響に関する数値モデルによる検討

本章では、舗装の色や材質等を工夫してアルベド等の熱特性値を変えることによって地表面の高温化をどの程度抑制できるかについて数値シミュレーションに基づき確認する。

シミュレーションで用いた基礎方程式は舗装並びに土壌内の熱伝導と水分移動の方程式(1)、(10)、(11)と舗装表面の熱収支及び舗装と土壌の境界条件に関連する式(2)~(4)、(6)、(7)、(12)で、式(2)の右辺第二項は省略した。

本モデルを用いて、後述する94年6月3日の気温、風速、湿度、日射、放射の計測値(図-7)を与条件とし、舗装の熱特性をあらわすパラメータ(アルベド α 、熱容量 $C_p = c_p \rho_p$ 、熱伝導率 λ_p)の値を様々に変えて48時間分の計算を行った。熱特性値は表-1に整理した既往の報告結果から、 $\alpha = 0.1 \sim 0.5$ 、 $C_p = 0.5 \sim 2.5$ ($J/cm^3/K$)、 $\lambda_p = 0.5 \sim 2.5$ ($W/m/K$)を与えた。また、土壌の物性値は付録に示す。顕熱のバルク係数は図-10より $C_H = 0.0094$ 、土壌深部の境界条件としては深さ50cmにおいて実測に基づき一定温度

表-1 アスファルトとコンクリートの熱特性値

		α	λ_p (W/m/K)	C_p (J/cm ³ /K)
アスファルト	浅枝・藤野 ⁽⁹⁾	0.10	0.74	1.42
	成田 ⁽²⁰⁾	—	0.73-1.26	0.84-2.51
	Oke, T. ⁽²¹⁾	0.05-0.20	—	—
	Kinouchi ⁽¹¹⁾	0.08-0.10	—	—
	Brown, R.D. ⁽²²⁾	0.05-0.15	—	—
	本論文(表-3)	0.10-0.20	0.91	1.22
コンクリート	浅枝・藤野 ⁽⁹⁾	0.45	1.69	2.07
	成田 ⁽²⁰⁾	—	0.84-4.61	1.87-2.30
	Oke, T. ⁽²¹⁾	0.10-0.35	—	—
	Brown, R.D. ⁽²²⁾	0.10-0.50	—	—
	本論文(表-3)	0.20-0.25	0.60-0.70	1.23-1.36

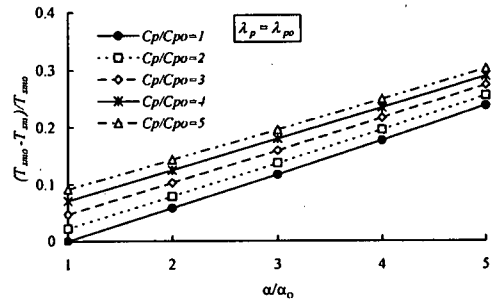


図-2 舗装のアルベド・熱容量と地表面温度の関係

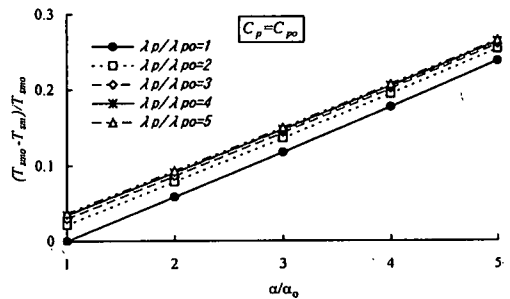


図-3 舗装のアルベド・熱伝導率と地表面温度の関係

$T_{z=50cm} = 30(^{\circ}C)$ を与えた。

図-2, 3は、 $\alpha_0 = 0.1$ 、 $C_{p0} = 0.5$ ($J/cm^3/K$)、 $\lambda_{p0} = 0.5$ ($W/m/K$)を基準状態として計算された最後24時間における最大地表面温度 T_{sm} に対する熱特性を変化させた時の地表面温度の最大値 T_{sm} の相対的な違いを示している。今回のパラメータの設定範囲では、最大地表面温度に最も影響するのはアルベドで、次いで熱容量、熱伝導率の順であり、それぞれが基準状態の5倍の値となったとき、 $(T_{sm} - T_{sm0}) / T_{sm0}$ の値はそれぞれ22%、9%、4%となることがわかる。表-1に示した浅枝・藤野による熱特性値をあてはめると、現実に見られるコンクリートとアスファルトの地表面温度の違いは、熱伝導率や熱容量よりもアルベドに大きく依存した特徴であると言える。また、熱容量に比べると、熱伝導率の値がある程度以上に大きくな

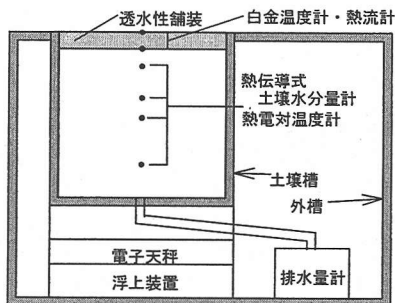


図-4 計測装置の概要

表-2 計測項目と使用機器

計測項目	計測機器	製品名	精度
純放射量 大気放射量	放射収支計	EKO MF-11	±5%
地中伝導熱	熱流計	EKO MF-81	
短波放射量 反射日射量	アルベドメータ	EKO MR-22	±3%
風速	三杯式風速計	EKO MA-100AP	3m/s以下で -0.3m/s以内 3m/s以上で±3%以内
気温	白金温度計	HMP133Y	±0.2°C
湿度	静電容量式		±2%RH
舗装温度	白金温度計	TS101	±(0.3+0.005t)°C
土壌水分量	ヒトプローブ式	T-10C	1%
土壌重量	電子天秤	KCC-300S	再現性±2g

ると最大値の低減効果が小さくなるのがわかる。

4. 透水性舗装を敷設した場合の地表面温度と熱収支に関する実験的検討

(1) 概要

透水性舗装を用いた表面温度抑制効果を明らかにするため、図-4に示すライシメータを用いた計測を行なった(以下、実験①と呼ぶ)。ライシメータ内の土壌槽の大きさは0.5m四方、深さは0.52mである。土壌槽内には赤土(粒状粘性土)を充填し、その上に厚さ5cmの透水性舗装を被せた。土壌槽と外槽の壁面は厚さ3cmのポリウレタン断熱材で覆った。計測機器の設置状況は図-4の通りで、舗装面より高さ約25cmの位置に放射収支計、アルベドメータを設置し、それより高い場所に温湿度計、風速計を設置した。また、土壌内には水分量計(熱伝導率を計測して水分量に換算するタイプのもの)、温度計を埋設した。土壌と供試体の接触面には熱流計と温度計を設置した。蒸発量は、電子天秤により測定される土壌槽の重量変化を換算して求めた。電子天秤の最小読取量は2gである。測定項目と測定に使用した機器の仕様を表-2に示す。

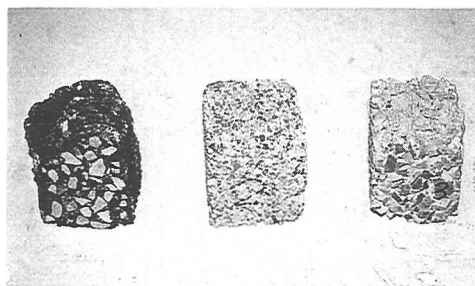


写真-1 熱容量測定用に抜き出した透水性舗装試験片

写真-1 熱容量測定用に抜き出した透水性舗装試験片

表-3 透水性舗装材の物性

	寸法 mm	密度 kg/m ³	空隙率 %	熱容量 J/cm ³ /K	熱伝導率 W/m/K
アスファルト	490×490×55.0	1817	19	1.217	0.91
細粒コンクリート	492×490×51.4	1800	25	1.358	0.70
粗粒コンクリート	490×487×51.2	1833	25	1.228	0.60

(2) 供試体の物性

実験①で使用した供試体は黒色の透水性アスファルトで、後述する空隙保水を伴う実験で用いた供試体は灰色の透水性コンクリート2種類である(写真-1)。

実験に使用した供試体の諸元を表-3に示す。熱伝導率と比熱は室内試験により測定した。熱伝導率の測定は平板熱流計法(JIS A 1412)に従い、供試体の上下面に熱流計を付設する方式によった。また、比熱は断熱型熱流量計法に基づき、断熱容器内に供試体の角隅部より切り出した5cm四方の試験片を置いて一定熱量負荷を加えたときの試験片の温度変化から算出した。密度は寸法と重量から算出し、アスファルトの空隙率は絶乾状態の供試体を水槽に水没させたときの容積変化から、コンクリートの空隙率は空隙無しの際の理論密度に対する実際の密度の割合により求めた値である。アルベドメータにより算出した舗装材のアルベドは、日中はアスファルトで0.11~0.15、コンクリートで0.2~0.25であった。透水性コンクリートの透水係数は1.7cm/s(細粒)、1.8cm/s(粗粒)であった。

(3) 実験結果

実験①の計測により得られたアスファルト舗装上下面温度並びに地中温度、放射量、気温、風速の経時変化を図-5、6に示す。舗装表面温度は放射量測定値を用いて式(3)により算出した値、舗装下面と土中の温度は温度計による計測値である。なお、計測値は5分のサンプリング間隔で得られたデータの30分間移動平均値で示してある。

94年5月22~23日は比較的土壌水分量が少なかったが、その後降雨があったため94年6月1日以降は土壌が比較的湿潤な状態での計測値が得られている。舗装下面5cmの位

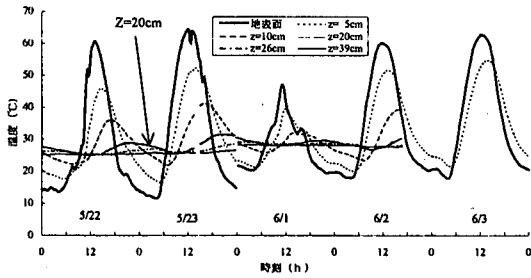


図-5 舗装表面温度と地中温度の時間変化

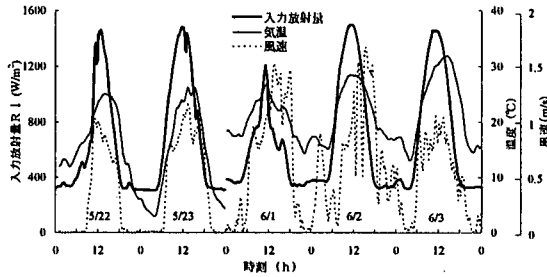


図-6 放射量・気温・風速の時間変化

置での土壌の体積含水率は5月22～23日で0.34～0.37、6月1～2日で0.36～0.38で、いずれも日中に高く、日の出頃に低い値となる日変化を示した。最高気温と入力放射量の条件がほぼ等しい5月23日と6月3日のデータを比較すると、6月3日の方が表面温度の最高値が4.3℃低くなっているが、これは後に示す熱収支(図-7)より明らかなように風速の差に起因する顕熱輸送量の違いによるものと考えられ、土壌の湿潤状態の影響はそれほど大きくないことが伺える。また、アスファルトが熱を吸収しやすい材質であるため、いずれの日も正午前後に表面温度が60℃以上に達しており、潜熱輸送の効果がほとんどあらわれないことが推察される。

計測データを用いて整理した5月23日と6月3日の熱収支を図-7に示す。アスファルトの吸熱量は、舗装上下面温度の時間変化と表-3の熱容量の値を用いて式(9)の右辺第一項により算定した。地中伝導熱は舗装下面の熱流計の計測値である。顕熱は式(2)を用いて算出した。

図-7より、正午には純放射の約半分を顕熱が占め、地中伝導熱 G' は純放射の30%程度あることがわかる。アスファルト舗装による吸熱量は午前8時～10時の間に最大となり、大気側への放熱は午後4時～6時の間で最大となるという時間変動を示す。土中から透水性アスファルト舗装を通過して大気へ輸送される蒸発量は、時間当たり最大でも0.05mm程度と非常に少なく地表面温度抑制にほとんど効果がないが、これは舗装の間隙が比較的大きくて土壌水分が舗装表面へ移動するための毛管力が作用せずに、舗装材が水蒸気輸送の抵抗となることによると考えら

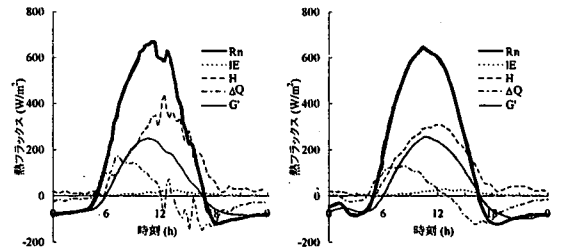


図-7 熱収支の時間変化(左:94年5月23日,右:94年6月3日)

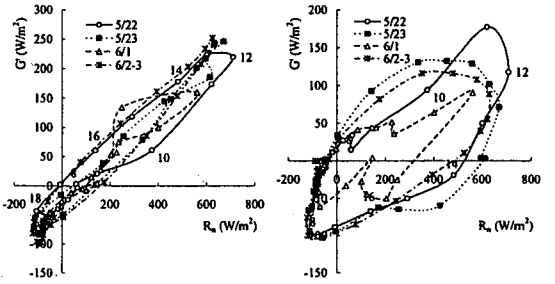


図-8 R_n と G' の関係

図-9 R_n と ΔQ の関係

る。より大孔隙の透水性舗装を用いれば水蒸気輸送の抵抗も小さくなると考えられる。また、より小孔隙の舗装では毛管力の効果は大きくなるが、透水性は劣ると考えられるので雨天時の流出抑制や地下水涵養を期待する場合には効果的でない。

アスファルト舗装における純放射量と舗装表面を通過する伝導熱量との間にはヒステリシス関係があり、Camuffo & Bernardi²⁰⁾はこれを R_n 及び R_n の時間微分を用いた回帰式により表現できることを報告している。Asaeda²¹⁾やGrimmondら²²⁾も同様の定式化を行っている式(13)。

$$G = a_1 R_n + a_2 \partial R_n / \partial t + a_3 \quad (13)$$

ここで、 $a_1 \sim a_3$ は比例定数である。一方、図-8, 9は今回の実験における純放射量 R_n と舗装下面を通る地中伝導熱量 G' 及びアスファルト吸熱量 ΔQ の関係を時間的な連続線で示したものである。この図より、地中伝導熱量 G' は純放射量とほぼ比例関係(式(14))にあり、アスファルトの吸熱量 ΔQ が R_n に対してループを描くことがわかる。このことから、式(13)の a_1 が図-8の傾きに対応し、また、式(13)右辺第2項により図-9のループ関係が表されていると解釈できる。ただし、Camuffo & Bernardi²⁰⁾も指摘するように、放射が不安定な場合(6月1日)には必ずしも式(13)に従わないことがわかる。

アスファルトに対する a_1 の値として0.36が示されている²⁰⁾が、今回の実験値0.39と近い結果となっている。一般的には、式(14)の比例係数の値は舗装厚さや材質に依存するものと考えられる。

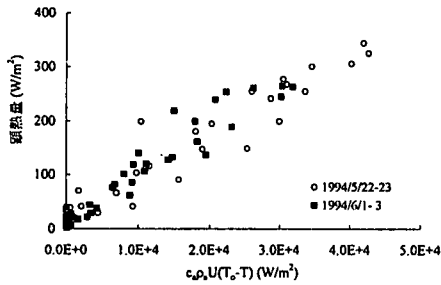


図-10 顕熱量と $c_p \rho_a U (T_o - T)$ の関係

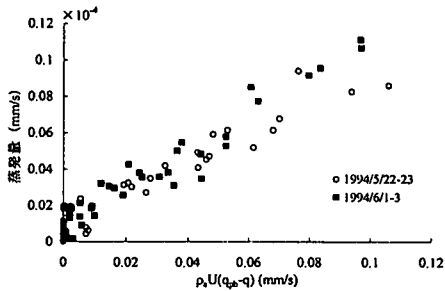


図-11 蒸発量と $\rho_a U (q_{ps} - q)$ の関係

$$G' = 0.39R_n - 37.5 \quad (14)$$

式(2)から推定した顕熱量と $c_p \rho_a U (T_o - T)$ の関係を図-10に、また、1時間当りの蒸発量と $\rho_a U (q_{ps} - q)$ の関係を図-11に示す。ここで、 U 、 q 、 T ：地上65cmでの風速、比湿、気温、 q_{ps} ：舗装下面温度に対応した飽和比湿である。図-10より今回の実験では舗装面からの顕熱輸送のバルク係数 $C_H = 0.0094$ が読みとれる。また、蒸発量には天秤の精度から $0.008 \text{ mm/hr} (=5 \text{ W/m}^2)$ 程度の誤差が含まれているものの、図-11よりバルク式の係数は $C_E = 1.21 \times 10^{-4}$ となり、 C_H の約1/80の値を示した。式(5)において表面温度に対する飽和比湿をパラメータとしたが、透水性舗装の場合の蒸発面は舗装下面になることから、舗装下面温度に対する飽和比湿を用いたところ、図-11に示すように高い相関が得られた。一般に、加熱面からの顕熱輸送量には自然対流の影響が大きいことから、大気不安定度の影響を定式化したLouisの式²⁶⁾を用いて顕熱を試算した。

Louisの式により得られる値は空気力学的粗度の変化に鋭敏に反応するが、空気力学的粗度として平坦地の値 ($3 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ m}$) を仮定すれば、試算値と実験値がよく一致することがわかった。

5. 透水性舗装の間に保水が生じる場合の地表面温度と熱収支に関する実験的検討

(1) 概要

4. で明らかにしたように、今回用いた透水性舗装では、舗装間隙が土壌からの水蒸気輸送の抵抗となること

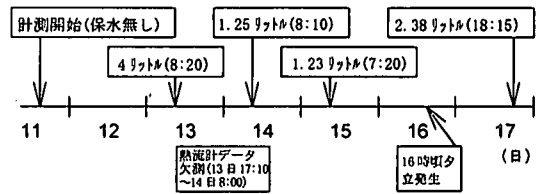


図-12 透水性コンクリートへの注水量と注水時刻 (実験②)

と、舗装内に水分が保留されていないため水分による潜熱輸送が行われないことから、アルベド等舗装の熱特性に改善を加えるのに比べると、地表面温度の抑制にはほとんど効果がない。土壌面から大気への水蒸気輸送を盛んにする方法として、孔隙が小さく保水機能を有する保水性舗装の効果について検討が行われており⁹⁾、有効な手段の一つであると考えられるが、蒸発の進行に伴う効果の低減は避けられないと考えられる。

温度の抑制効果を長時間維持するには、常に舗装間隙に水を供給することが必要となる。これについては様々な方法、構造が考えられるが、その基本的検討として舗装の間隙保水によりどの程度の表面温度抑制効果がどの程度の期間にわたって得られるのか等を把握するための実験(実験②)を行った。本章では、この実験から明らかとなった間隙保水時の熱収支特性、地表面温度特性について説明し、透水性舗装を活用した間隙保水による地表面温度の抑制効果を検証する。これにより、透水性舗装や保水性舗装により得られる地表面温度抑制の最大効果の目安が得られると考えられる。

(2) 実験内容

実験②を開始するにあたって、まず、土壌上面に不透水性の透明ビニールを被せ、その上に細粒の透水性コンクリート供試体を付設した。なお、間隙保水の期間中は電子天秤が故障したため、重量変化は計測できなかったが、ほぼ一日おきに舗装内の水位の低下量を確認した。

図-12に注水の経過を示す。95年8月11日から8月17日までの一連の計測では、保水の無い乾燥状態から計測を開始し、開始2日後の8月13日にはじめて4リットルを注水した。注水温度は約27°Cであった。このときの水位は供試体の上面から8mm下にあったが、舗装表面を観察したところ、毛管力の作用により舗装表面も湿潤状態であった。その後、ある期間ごとに水位が元の状態になるように注水を繰り返し、計測終了時にも注水を行った。したがって、ある時刻における注水量は1回前の注水から当該時刻での注水までの積算蒸発量に等しくなる。なお、8月16日の夕方に小雨が降ったため舗装上面にビニールシートを被せたので、この間のデータは不良とした。

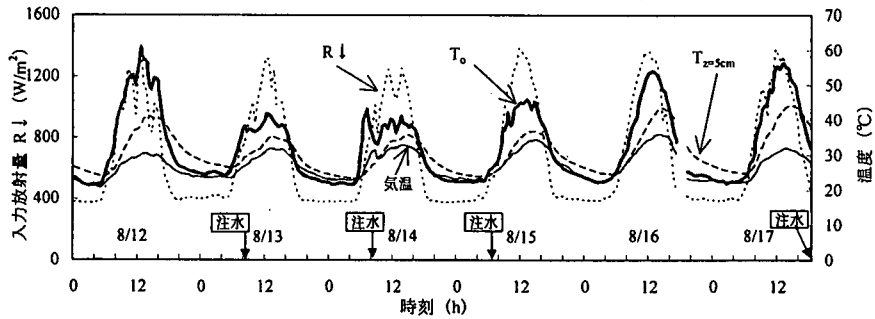


図-13 透水性コンクリートの間隙保水による表面温度の抑制効果

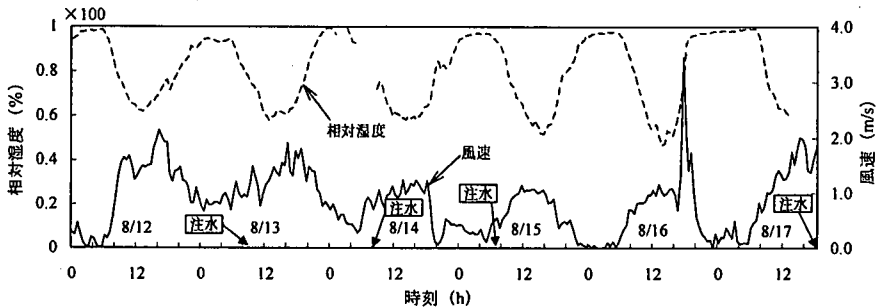


図-14 観測期間の気象状況（風速，湿度）

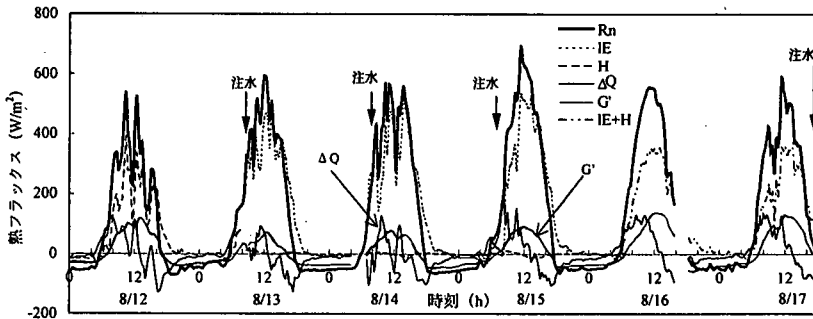


図-15 透水性コンクリートの熱収支（H7.8.12～8.17，間隙保水あり）

(3) 実験結果

実験②により得られた結果を図-13～17に示す。

図-13, 14には入力放射量 $R \downarrow$ ，地表面温度 T_0 ，舗装下面温度 T_{25} ，気温，風速，湿度の時間変化を示す^{注1)}。図-5に示したアスファルト舗装の表面温度は 60°C 以上に上昇したが，実験②でも間隙保水の無い8月12日には約 60°C まで達しており，アルベドと熱伝導率の影響が相殺して両者であまり違いがあらわれていない。しかし，8月13，14，15日の地表面温度の最大値はそれぞれ約 42°C ， 42°C ， 46°C となり，保水の無い時に比べて $14\sim 18^\circ\text{C}$ 程度，地表面温度が低下している^{注2)}。一方，8月15日の注水後，1日以上水の補給がないと地表面温度が 55°C 程度まで上昇している。8月15～17日では全天放射量の最大値がほぼ等しく，気温，風速も大差ない（むしろ，17日の方が風速が大き

い）ことから，これは供試体間隙内の水分の減少が影響したものと考えられる。

次に，図-13に示した地表面温度の変化を熱収支の面から整理する。図-15は，図-13と同じ期間における式(2)の各項の時間変化を示している。正味放射量と地中伝導熱量は基本的には直接測定した値である^{注3)}。間隙保水時の有効放射量 $Q_n = R_n - G$ の潜熱輸送量と顕熱輸送量への配分はPriestley and Taylor²⁷⁾による式(14)を用いて求め，貯熱量は供試体上面温度（式(3)による計算値）と下面温度（実測値）の温度変化及び式(15)から求められる供試体内の保水量変化の計算値から式(9)に基づき算出した。潜熱輸送の算定式は飽和面を仮定したものである一方，後述するように最後2日間は表層が若干乾燥していたことから，16日と17日の熱収支については，顕熱と潜熱の和を熱収

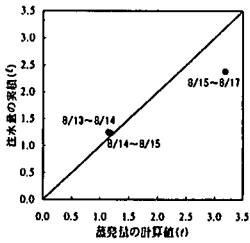


図-16 積算蒸発量の検証

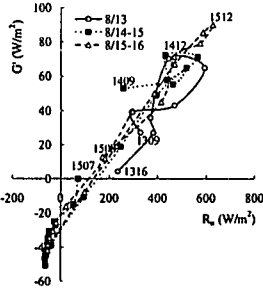


図-17 R_n と G' の関係
(透水型コンクリート, 間隙保水あり)

支式(2)の残差から求めて図に示した。

$$L_o E = \alpha_e \frac{\Delta Q_n}{\Delta + \gamma} \quad (14)$$

$$ndz_w/dt = E \quad (15)$$

$$\gamma = c_p p / 0.622 L_o = 0.67 \quad (16)$$

ここに、 $\Delta = de/dT$ は気温 T における飽和水蒸気圧 e の傾き、 Q_n は有効放射量、 γ はサイクロメトリック定数で、 $p = 1013.25$ hPaを用いる。式(14)の比例係数 α_e の値には時間帯によらず1.26を用いた²⁰⁾。

図-16は注水量から求めた積算蒸発量と式(14)から推定した積算蒸発量を比較したものである(図中横軸の注水量3.5ℓを水深に換算すると14mmとなる)。注水間隔が約1日の場合(8月13~14日及び8月14~15日)は注水量と式(14)による蒸発量の計算値がほぼ等しく、1日あたり約5mmの蒸発が発生しているが、8月15~17日の蒸発量は計算値の約75%となっている。また、舗装表面の観察によると、注水間隔が1日程度であれば表面は毛管作用により湿潤状態が保たれていたが、2日以上経過すると、表層が若干乾いてきた。以上から、注水間隔が1日程度であれば式(14)により推定される蒸発量と、蒸発量の実験値とがほぼ等しくなると推察される。

給水時の負の熱付加量も熱収支上、瞬間値としては無視できない。27℃程度の水を舗装表面温度が40℃以下の時に給水した場合、給水時間にも依存するが、例えば10分間では436W/m²の負の熱量が加わったことになる。そのため、給水後30分間の蓄熱分 ΔQ と伝導熱 G' は図-15の熱収支からは除外してある。図-15が示すように、給水後ある程度の時間が経過すれば、潜熱輸送が最も支配的になる。

図-15に示した間隙保水のある時の熱収支の結果をみると、いずれの日も午前9時頃に間隙保水による貯熱がピークとなるが、その大きさは100W/m²程度とそれ程大きくない。一方、蒸発による潜熱輸送量は9時前より急激に増加して正午頃に最大となり、8月15日の正午には正味放射量の82%を占めている。顕熱輸送量はほとんどなく、

表-4 地表面温度が人体の温熱感覚に及ぼす影響

	間隙保水なし	間隙保水あり
地表面温度(℃)	60	40
人体条件	代謝量(立位時)1.1 met, 着衣量0.6clo, 人体アルベド0.3	
気象条件	気温32℃, 風速1.5m/s, 湿度50% $L \downarrow = 500$ (W/m ²), $S \downarrow = 800$ (W/m ²)	
アルベド	0.2	0.14
SET*(℃)	35.8	34.1
VTL(W/m ²)	41.1	35.6

8月12日の間隙保水の無い場合とは顕著な違いを見せている。地中伝導熱は図-17に示すように、アスファルト舗装の場合(図-8)と同様に正味放射量とほぼ比例関係(式(17))にあることが認められたが、間隙保水の無い場合に比べると同一の正味放射量に対する地中伝導熱の値が約半分に減少している。

$$G' = 0.19R_n - 26.6 \quad (17)$$

これらの結果により、地表面温度の抑制には保水の蓄熱効果に比べて潜熱輸送が大きな効果をもたらしていることが明らかとなった。したがって、効果を長時間持続するには、舗装表面へ如何に水分を供給するかということが重要であり、限られた厚さの範囲であっても効果が得られると考えられる。現実には定期的な散水等による水分の供給とその間隙内貯留が有効であると考えられる。

6. 舗装の表面温度抑制による温熱感覚緩和効果の試算

アスファルト等の舗装面の高温化は、都市空間の快適性を損なうばかりでなく、体温調節機能の低下している高齢者や、暑さへの適応能力が大人より劣り、しかも路面に接近して歩行する小児に対して非常に厳しい熱環境をもたらす⁹⁾。間隙保水等により地表面温度が60℃から40℃に抑制されれば、舗装上を歩行する人体への正味の入力放射(主に長波放射)が削減されるので、人間の温熱感覚も緩和されると考えられる。そこで、地表面温度の抑制による人間の温熱感覚の緩和効果について、人体の熱収支解析に基づく温熱感覚指標を用いて推定した。

屋外の放射環境と人体表面からの顕熱・潜熱の輸送、人間の作業状態や着衣状態を考慮した温熱感覚指標としては仮想熱負荷量VTL²⁰⁾やSET*²⁰⁾がある。SET*は発汗作用のモデル化に問題があることが指摘されているが³¹⁾、標準的な手法として広く用いられている。また、筆者らの検討²⁰⁾においてはVTLを用いて屋外における人体の温熱感覚をよりよく推定できることが示されている。そこで、ここではVTLとSET*を用いた温熱感覚の試算を行っ

た。VTLの計算では、人体の深部温度と皮膚温度を一定値として、発汗に伴う潜熱輸送量を人体への熱負荷量の関数としている。地表面温度の抑制による局地的な気温の低下と風の変化はないものと仮定した。

夏期の晴天日を想定して、表-4に示す条件下での人体への正味の入力放射量を神田ら²⁰⁾に基づき算定し、熱収支解析を行ったところ、20°Cの地表面温度の抑制によりSET*が1.7°C、VTLが5.5W/m²減少する結果となった。夏期の屋外の熱環境下における温冷感とVTLの関係を求めた結果^{20), 23)}によると、これだけの減少は温冷感のレベルが1ランク²⁴⁾変化した(一段階、暑さが和らいだ)ことに対応している。このように、舗装面からの放射量の低減による人間の温熱感覚の変化は大きく、都市気候への効果ばかりでなく、夏期の歩行空間の快適性向上にも大きく寄与する。

7. 結論

本論文では、都市の温熱環境改善を目的とした舗装表面の高温化抑制策と、その人間の温熱感覚に及ぼす影響について検討を行った結果、次に示す結論が得られた。

- 1) 数値計算に基づく検討の結果、舗装の熱特性を代表するアルベド、熱容量、熱伝導率のうち、今回対象とした熱特性の範囲で地表面温度に最も影響するのはアルベドで、熱伝導率と熱容量については影響度合いが小さいことがわかった。このことはコンクリートとアスファルトの地表面温度の違いがアルベドに依存した特徴であることを示唆している。
- 2) ライシメータ実験により、今回の計測時の気象・土壌条件の下では、透水性アスファルト舗装下面の土中から大気へ輸送される水分量は、時間当たり最大0.05mm程度と非常に少ないことがわかった。これは舗装の間隙が大きく、毛管力が作用せずに、舗装材が水蒸気輸送の抵抗となることによる。
- 3) 今回の計測時の気象・土壌条件の下では、毛管力の作用のある透水性舗装の間隙保水により、地表面温度が15°C程度低減することが実験により確認された。熱収支でみると、間隙保水による潜熱輸送が他の熱収支成分よりも純放射量に占める割合が高く、地表面温度の抑制に大きく寄与していた。
- 4) 舗装体の熱収支のヒステリシスについて舗装表面を通過して地中へ向かう熱量を舗装による蓄熱分と舗装下面土壌への伝導熱に分離した整理を行い、今回の計測条件の下では、純放射量 R_p と地中伝導熱 G' が比例に近い対応関係にあることを明らかにした。
- 5) 人体の熱平衡方程式に基づき、舗装の地表面温度が60°Cから40°Cに低下することによる人間の温熱感覚

の変化を推定し、温冷感のレベルが1ランク変化することを明らかにした。

謝辞：実験実施にあたって協力を得た前都市河川研究室長栗城稔氏(現アジア開発銀行)、種々ご意見頂いた都市河川研究室長末次忠司氏、実験に使用した透水性舗装供試体を提供して頂いた舗装研究室並びに佐藤道路(株)技術研究所には、ここに記して感謝の意を表す。また、本論文作成にあたって多くの重要な指摘を下された査読者に感謝する。

付録 土壌内の熱・水分移動計算モデルの概要

ここでは、3章のシミュレーションで用いた計算モデル(基礎式(10), (11))に含まれる諸係数等を説明する。

$$D_{\theta} = D_{\theta, liq} + D_{\theta, vap} \quad (18)$$

$$D_T = D_{T, liq} + D_{T, vap} \quad (19)$$

$$D_{\theta, liq} = K(\partial\psi/\partial\theta) = K|\psi|/T \quad (20)$$

$$D_{\theta, vap} = D_{aim} \nu \alpha_0 a \rho_0 g h (\partial\psi/\partial\theta) / RT \quad (21)$$

$$D_{T, liq} = K(\partial\psi/\partial T) \quad (22)$$

$$D_{T, vap} = D_{aim} \nu \alpha_0 a h (d\rho_0/dT) \quad (23)$$

$$L = L_0 - (c_w - c_v)(T - T_0) \quad (24)$$

$$C = C_S + Lahd\rho_0/dT \quad (25)$$

$$C_S = \rho_s c_s (1-n) + \rho_l c_l \theta_l + \rho_l c_v \theta_v \quad (26)$$

$$D_{aim} \equiv D_0 (T/273.16)^{1.75} \quad (27)$$

$$\rho_0(T) \equiv 10^3 \exp(6.0035 - 4975.9/T) \quad (28)$$

$$d\rho_0/dT = (4975.9/T^2) \rho_0 \quad (29)$$

$$h = \exp(\psi g / RT) \quad (30)$$

ここに、 ψ : 土壌水の吸引圧 (m), D_{aim} : 水蒸気分子拡散係数, h : 相対湿度, R : 気体定数, ρ_0 : 飽和水蒸気密度 (kg/m³), $a = n - \theta$: 含空率, n : 空隙率, $\theta = \theta - q$: 水蒸気の体積含水率, α_0 : マスロー-ファンクター (=1.02), ν : 屈曲度 (=0.67) である。また、熱伝導率はDe Vries³⁰⁾, Philip and De Vries³⁵⁾, Camillo³⁶⁾に基づき、温度勾配下の土壌間隙内の潜熱輸送の効果を含んだ式(31)~(33)により算出した。ここで、 f_w , f_s , f_a はそれぞれ液状水、土粒子、空気体積百分率、 $g_s = 0.144$ とし、 k_a は式(32)と同様の式を用いて求められる。 g_a はKimball³⁷⁾に基づき与えた。

$$\lambda = \frac{f_w \lambda_w + k_s f_s \lambda_s + k_a f_a (\lambda_a + \lambda_{vap})}{f_w + k_s f_s + k_a f_a} \quad (31)$$

$$k_s = \frac{2}{3[1 + (\lambda_s/\lambda_w - 1)g_s]} + \frac{1}{3[1 + (\lambda_s/\lambda_w - 1)(1 - 2g_s)]} \quad (32)$$

$$\lambda_{vap} = hLD_{aim} \alpha_0 d\rho_0/dT \quad (33)$$

土壌特性値等については、水分量と透水係数及び吸引圧との関係をClapp and Homberger式³⁸⁾を用いて表した。

$$K(\theta) = K_s(\theta/\theta_s)^{2b+3} \quad (34)$$

$$\psi(\theta) = \psi_s(\theta/\theta_s)^{-b} \quad (35)$$

ここに、 θ_s 、 K_s 、 ψ_s は、それぞれ飽和状態における水分量、透水係数、吸引圧である。本論文における計算ではローム質砂を想定し、 $\theta_s = 0.41$ 、 $K_s = 1.56 \times 10^{-4}$ m/s、 $\psi_s = -9.0$ cm、 $b = 4.38$ を用いた³⁰⁾。その他の定数等は下記のとおり与えた。

$D_0 = 0.229$ cm²/s

R : 気体定数 (=461.5 J/kg/K)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10⁻⁸ W/m²/K⁴)

g : 重力加速度 (=9.8 m/s²)

L_0 : 水の気化の潜熱 (=2.453×10⁶ J/kg at 20°C)

c_w : 液状水の比熱 (=4.19×10³ J/kg/K)

c_v : 水蒸気の比熱 (=2.02×10³ J/kg/K)

ρ : 空気密度 (=1.2 kg/m³)

ρ_w : 液状水の密度 (=1.0×10³ kg/m³)

ρ_{ca} : 空気の熱容量 (=1.21×10³ J/m³/K)

ρ_{cl} : 液状水の熱容量 (=4.19×10⁶ J/m³/K)

ρ_{cs} : 土粒子の熱容量 (=1.3×10⁶ J/m³/K)

λ_s : 土粒子の熱伝導率 (=0.30 W/m/K)

λ_w : 液状水の熱伝導率 (=0.57 W/m/K)

λ_a : 空気の熱伝導率 (=0.025 W/m/K)

計算においては、舗装の熱特性には表-3のアスファルトの値を適用し、気象条件等は94年6月3日の値を利用した。計算は陰形式の差分法により行い、非線形項の差分方式はCamilloら³⁰⁾を参考にした。

注1) 地表面温度の算出には式(2)を用いたが、反射日射 $S \uparrow$ が欠測していたため、別途放射温度計で測定した地表面温度との比較により妥当であると確認されたアルベド値0.2を与えた。

注2) 予備的に間隙保水の無い粗粒コンクリートの表面温度と間隙保水のある細粒コンクリートの表面温度の同時計測を行い、同一気象条件における比較でも間隙保水の有無により、表面温度の最大値に15℃程度の違いが生じていた。

注3) 図-12に示したように13日から14日にかけて欠測だったため、式(17)により推定した値を用いた。

注4) 筆者らは温冷感のレベルを「極端に暑い」から「非常に涼しい」の8ランクに分けて、温熱指標と温冷感の対応関係の検討を行っている。「1ランク変化」とはその際に用いたランクが1段階変わったことを意味する。

参考文献

- 1) 環境庁編：環境白書平成9年版(総説)、P.447-449、1997。
- 2) 斎藤直輔、新田尚 訳：オーク・境界層の気候、朝倉書店。
- 3) Munn,R.E.: *Descriptive Micrometeorology*, Academic Press, 1966。
- 4) 河村武：都市気候の成因とモデリング、気象研究ノート、vol.119, pp.226-238, 1977。
- 5) 西岡秀三、原沢英夫編：地球温暖化と日本、第6章・健康への影響、p.219, 古今書院, 1997。

- 6) 姫野賢治、猪股和義：アスファルト舗装の内部温度分布に関する調査研究、土木技術資料28-6, 44-49, 1986。
- 7) 吉野文雄：都市の熱環境の改善に向けて—都市の熱汚染の現状と雨水貯留浸透の役割—、雨水技術資料, Vol.10, pp.33-43, 1993。
- 8) 新田伸三、東集成、石井昭夫：環境緑化における微気象の設計、鹿島出版会, pp.206, 1981。
- 9) 藤野毅、柴原千浩、浅枝隆、村瀬範芳、和氣重紀夫：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, 1994.2。
- 10) 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, 149-158, 1997.8。
- 11) 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, 53-62, 1997。
- 12) 近藤純正編：水環境の気象学, p.152-159, 朝倉書店, 1994。
- 13) 竹内清秀、近藤純正著：大気科学講座1、地表に近い大気、東京大学出版会, 1981。
- 14) (社)日本道路建設業協会編：透水性舗装ハンドブック、山海堂, p.87-102, 1979。
- 15) 山川紀夫、佐々木保正、岡田富男、大谷茂盛：湿った粒子層の有効熱伝導度、化学工学, 第36巻第12号, pp.1342-1345, 1972。
- 16) Asaeda,T. and Vu,T.C.: The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model, *Boundary-layer Meteorology*, Vol.65, 159-179, 1993。
- 17) De Vries,D.A.: Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, *Trans. American Geophysical Union*, Vol.39, No.5, 909-916, 1958。
- 18) 福原輝幸,G. F. Pinder,佐藤邦明:表面乾燥過程における飽和—不飽和多孔媒体中の熱・水分完全連成移行解析へのアプローチ,土木学会論文集No.423/II-14,111-120,1990。
- 19) 浅枝隆、藤野毅:舗装面の熱収支と蓄熱特性について、水文・水資源学会誌, Vol.5, No.4, 1992。
- 20) 成田健一：市街地における地表面蒸発量の評価に関する基礎的研究, 1987。
- 21) 文献2), p.217
- 22) Brown,R.D., and Gillespie,T.J.: *Microclimatic Landscape Design*, John Wiley & Sons, 1995。
- 23) Camuffo,D. and Bernardi,A.: An observational study of heat fluxes and the relationship with net radiation, *Boundary-layer Meteorology*, Vol.23, 359-368, 1982。
- 24) Asaeda,T., Vu,T. C. and Wake, A.: Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere, *Atmospheric Environment*, Vol.30, 413-427, 1996。
- 25) Grimmond,C.S.B., Cleugh,H.A. and Oke,T.R.: An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes, *Atmospheric Environment*, Vol.25B, No.3, 311-326, 1991。
- 26) Louis, J-F.: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-layer Meteorology*, Vol.17, 182-202, 1979。
- 27) Priestley,C.H.B., and Taylor,R.J.: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Monthly Weather Review*, 100, pp.81-92, 1972。
- 28) Brutsaert, W.: *Evaporation into the Atmosphere*, Kluwer Academic Publishers, pp.219 - 220, 1982。
- 29) 神田学、土屋信夫：微気象観測に基づいた屋外における人体の熱環境解析、土木学会論文集, No.509/II-30, 35-44, 1995。
- 30) 西安信：人体と環境との熱交換, pp.33-72, 温熱生理学(中山昭雄編), 理工学社, 1981。

- 31) 持田 徹：新有効温度 ET^* の成果・特徴と問題点，日生気誌 29, pp.135-139, 1992.
- 32) 木内豪，栗城稔，小林裕明：屋外空間における夏期の温熱 感覚評価指標の検討，土木技術資料，第38巻，第12号，32- 37, 1996.
- 33) 神田学，木内豪，小林裕明：新しい屋外用温熱感指標によ る熱環境評価—多摩川河川敷における観測を例に—，水工 学論文集第40巻，pp.237-242, 1996.
- 34) De Vries,D.A.:Thermal properties of soils. pp.210-235. In W.R.Van Wijk, (ed.) *Physics of the plant environment*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1963.
- 35) Philip,J.R. and De Vries,D.A.: Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union* 38, 222-232, 1957.
- 36) Carnillo,P.J., Gurney,R.J. and Schmutge,T.J. : A soil and atmo- sphere boundary layer model for evapotranspiration and soil moisture studies, *Wat. Res. Res.*, Vol.19, No.2, 371-380, 1983.
- 37) Kimball,B.A., Jackson,R.D., Reginato,R.J., Nakayama,F.S. and Idso,S.B.: Comparison of field-measured and calculated soil-heat fluxes, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, Vol.40, 18-25, 1976.
- 38) Clapp,R.B. and Hornberger,G.M.: Empirical equations for some soil hydraulic properties, *Wat. Res. Res.*, 14, 601-604, 1978.

(1998. 3. 9 受付)

MEASURES FOR LOWERING SURFACE TEMPERATURE OF PAVEMENTS FOR COMFORTABLE THERMAL ENVIRONMENT

Tsuyoshi KINOCHI and Hiroaki KOBAYASHI

This paper investigates measures for lowering surface temperature of pavements for the better urban climate. First, we quantified the effect of albedo, thermal conductivity and heat capacity of pavement on surface temperature mitigation. Then, we showed experimental results of energy balance for permeable pavement with and without water retention, which indicate that the surface temperature of the pavement with water retention is lower 18° C at maximum than without retention, and latent heat is dominant to the net radiation. Finally, the bio-climatic effect of lowering 20° C of surface temperature is estimated by the numerical analysis of human energy balance.