環境配慮型舗装の熱収支解析に基づくヒートアイランド緩和効果 に関する研究

STUDY ON URBAN HEAT ISLAND MITIGATION EFFECT BASED ON SURFACE HEAT BUDGET ON ENVIRONMENTAL CONSIDERATION TYPE PAVEMENTS

竹林英樹^{*1}, 森山正和^{*2}, 西岡真稔^{*3}, 君島健之^{*4}
鍋島美奈子^{*5}, 加形 護^{*6}, 本田 隆^{*7}

Hideki TAKEBAYASHI, Masakazu MORIYAMA, Masatoshi NISHIOKA, Takeyuki KIMISHIMA,
Minako NABESHIMA, Mamoru KAGATA and Takashi HONDA

Various pavement surfaces to mitigate the urban heat island are suggested. In this study, thermal characteristics of pavements for urban heat island measures are examined from the observation and analysis of surface heat budget. Net radiation, surface temperature, temperature under the surface, conduction heat flux, the weight of cores in each experimental surface and weather condition are observed. Evaporative flux is estimated from the observation results of the weight of cores. The surface heat budget under the same weather condition is examined, and sensible heat fluxes from each object surface are calculated. The parameters having the influence on surface heat budget, for example, solar reflectance (albedo), evaporative efficiency, heat conductivity, heat capacity, are examined.

Keywords: Urban Heat Island, Pavements, Surface Heat Budget

都市ヒートアイランド, 舗装, 表面熱収支

1. はじめに

ヒートアイランド現象の対策の一つとして、コンクリートやアスファルトで覆われた都市の表面被覆の改善が挙げられる。その具体策として、公園緑地、街路樹の整備などと共に、舗装面（道路）に対する対策技術にも注目が集まっている。本研究ではヒートアイランド緩和効果を目的とした種々の舗装面（環境配慮型舗装と呼ぶ）に関して試験的に舗装面を施工し、実測とその結果に基づく熱収支の解析より、各舗装面における顕熱流の低減効果の観点からヒートアイランドの緩和効果について考察することを目的とする。

ヒートアイランド現象の対策として、アメリカでは建築外皮および道路における対策が注目されている。たとえば、ローレンスパークレー国立研究所ヒートアイランドグループのAkbariら¹⁾は、クールルーフ、クールペイブメントと呼んで、屋根、道路に対して主に高反射塗料を使用し、ヒートアイランドを軽減する試みを検討している。彼らの試算によると、クールルーフを採用した場合の年間の冷房費用の節約と暖房費用の増加の収支より、ロサンゼルスでは3500万ドル、ニューヨークでは1600万ドル、シカゴでも1000万ドルの削減の可能性があるとのことである。ただし、道路に関する検討は屋根面の検討ほどは十分に行われていないようである。日本国内では特に保水性建材の開発に関して各々の舗装の性能

評価という観点より研究されている事例^{2)~6)}が多く、他の舗装との比較という観点では公共団体等における試験などの実施事例が散見されるのみである⁷⁾。ただし、この事例は最高表面温度の高低を主な評価対象としており、表面の熱収支までは十分に議論されていない。

そこで本研究では、ヒートアイランド緩和効果は屋上や道路路面等の表面熱収支において大気への顕熱流の割合が小さいものほど評価が高いとの立場より、舗装面の表面熱収支に基づきヒートアイランド緩和効果について考察する。

2. 測定の概要

測定は大阪市大正区において試験的に施工した舗装面において実施した。図1に実験施設の平面図、図2に写真、図3に断面図、表1に各舗装面の概要を示す。図中のAはアスファルト、Bはブロック、Cはコンクリートを示している（以降同様）。各舗装面の寸法はすべて2m×2mである。舗装面の南側は完全に開けており、北、東、西側はそれぞれ約20m程度離れて工場施設が位置する。

本研究で対象とする舗装面は、現在様々に提案されているヒートアイランド対策を目的とした舗装面の全てを代表しているわけではないが、材料としてアスファルト系、コンクリート系、ブロック系、その他、舗装の

^{*1} 神戸大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

^{*2} 神戸大学大学院工学研究科 教授・工博

^{*3} 大阪市立大学大学院工学研究科 講師・博士(工学)

^{*4} 住友大阪セメント(株) 取締役常務執行役員

^{*5} 大阪市立大学大学院工学研究科 講師・博士(学術)

^{*6} 鹿島道路(株)執行役員技術研究所長 博士(工学)

^{*7} マチダコーポレーション(株)開発本部R&Dセンター
研究開発部長

Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

Lecturer, Graduate School of Engineering, Osaka City University, Dr. Eng.

Director, Managing Executive Officer, Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd.

Lecturer, Graduate School of Engineering, Osaka City University, Ph. D.

Executive Officer, Managing Director, General Technical Research Institute, Kajima Road Co., Ltd., Dr. Eng.

Manager, R&D Center, Machida Co., Ltd.

図1 実験施設の平面図

種類として、普通、透水性、保水性を組み合わせることで、様々な提案されている舗装面を概ね含んだ実験になると想定したものである。

測定項目は気温、相対湿度、水平面全天日射量、赤外放射量、風向、風速、雨量の気象条件、及び各舗装の表面および内部の温度、熱流である。集中測定として、各舗装面の日射反射率の測定、各舗装面より抜き出した供試体の重量変化の測定を行った。図4に各舗装の表面及び舗装体内の温度・熱流の測定点のイメージを示す。熱流板は各舗装内の表面から1cm下に、熱電対は舗装を構成している各層の境界に、それぞれ施工時に設置した。

3. 測定結果

測定は2004年と2005年の夏季を中心に継続的に実施したが、ここでは供試体の重量変化の測定を実施した2005年8月3日～5日の測定結果を示す。測定期間の気象状況を図5に示す。期間を通して晴天であったが、8月5日の15時頃に7mm/hの降水量が確認された。

3.1 表面温度の測定結果

表面温度は赤外線熱電対（Exergen製、IRt/c.1X）とT型熱電対（テープで表面に固定）により測定した。赤外線熱電対は測定器自体の影の影響を避けるために北側より水平角度30°高さ15cmで図6のように設置した。対象面は長軸半径約24cm、短軸半径約9cmの楕円内に相当する。夜間の日射の影響を受けない時間帯の赤外線熱電対とT型熱電対（設置が困難な芝生面とマサ土面を除く）の測定結果を用いて各舗装面の放射率を算出したところ0.97～1.0の間に算定されたが、4乗根をとればほぼ1に近づくので補正は行っていない。

日中の赤外線熱電対とT型熱電対による表面温度の測定結果を比較すると、いずれの舗装表面においても赤外線熱電対の測定結果がT型熱電対の測定結果より低くなる傾向が確認された。この原因としては、T型熱電対が日射の影響を受けて高温になっている可能性もあるが、赤外線熱電対は北側より斜め方向に測定面を見ており、実際には骨材の大きさに応じて表面に凹凸のある舗装表面の影の部分を含んだ測定結果となっていることも要因ではないかと考えられる。

以上より、表面温度の測定法に関しては、日中の表面温度はT型熱電対の測定結果が高温側に、赤外線熱電対の測定結果が低温側に観測される可能性があり、今後更なる検討が必要であるが、ここでは、ある程度の空間平均値が得られ、芝生やマサ土でも測定結果が得られている赤外線熱電対による測定結果を用いて考察を行う。各舗装面における表面温度の測定結果を図7に示す。普通Aが最も高い温度を示し

図2 実験施設の写真（奥が北、位置関係は図1と同様）

図3 実験施設の断面図

表1 舗装面の概要

・アスファルト系
普通A：密粒度アスファルト舗装
透水A：透水性アスファルト舗装（空隙率13.6%）
保水A：保水性アスファルト舗装A型 （空隙率13.6%，セメント系ミルクA型を注入）
保水A'：保水性アスファルト舗装A'型 （空隙率13.6%，セメント系ミルクA'型を注入）
・コンクリート系
普通C：普通コンクリート舗装
透水C：ポーラスコンクリート舗装（空隙率20.0%）
保水C：保水性ポーラスコンクリート舗装C型 （空隙率20.0%，液状保水剤C型を散布）
保水C'：保水性ポーラスコンクリート舗装C'型 （空隙率20.0%，液状保水剤C'型を散布）
・ブロック系
透水B：透水性インターロッキングブロック
保水B：保水性インターロッキングブロック（液状保水剤を含浸）
・その他
マサ土：自然土（マサ土）舗装
芝生：芝生緑化面

* 保水性と呼ばれる舗装面は、透水性の舗装面にそれぞれ保水のための薬剤等を注入したものである。

図5 測定期間の気象状況 (2005年8月3～5日, 施設横で測定)

表2 各舗装面の日射反射率 (乾燥状態)

測定面	普通A	透水A	保水A	保水A'	普通C	透水C	保水C	保水C'	透水B	保水B	マサ土	芝生
反射率	0.082	0.074	0.172	0.267	0.294	0.141	0.202	0.150	0.397	0.394	0.225	0.210

芝生は最大で20℃程度温度上昇が抑えられていた。詳細に見ると、蒸発量の変化に伴い対象期間の3日間で温度低減効果の変化する様子が確認された。舗装面間での表面温度の差は、昼間に最大約25℃に対し、夜間は約4℃となった。

3.2 日射反射率の測定結果

放射収支計を各舗装面上に設置して上下方向の日射量を測定し日射反射率を算出した。表2に各舗装面の日射反射率を示す。放射収支計の設置高さは30cmとし、対象面(2m×2m)の形態係数は95%以上であったため、周囲の影響はほとんどないものとして補正は行っていない。太陽高度の高い10時～14時に、サンプリング間隔10秒で10分ずつ測定を行い、入力となる日射の安定した時間のデータを用いて日射反射率を算出した。なお、測定は2005年7月27日に実施した。舗装面が濡れることにより日射反射率が低下する状況については別途測定を実施し、データを取得しているがここでは乾燥状態の反射率を示している。

普通Cの反射率が0.29と比較的大きいのに対し、透水C、保水Cの反射率が低下するのは、空隙が大きくなり、表面に相当する部分に暗色の骨材及び影の比率が大きくなるためであると考えられる。普通A、

図4 舗装の表面及び舗装体内の温度・熱流の測定点

図6 赤外線熱電対の設置状況 (○の箇所にセンサーを設置)

図8 舗装面の重量測定用供試体 (直径15cm)

図9 マサ土, 芝生の重量測定用供試体

図7 表面温度の測定結果 (2005年8月3日～5日)

透水Aの反射率が小さいのに対し、保水Aの反射率が若干大きいのは、注入されたセメント系ミルクが白色であったためであると考えられる。ブロック系は明色を用いているため反射率は大い。

3.3 蒸発量の測定結果

測定前日の17～18時に降雨10mm相当の散水を行い、翌日の8時から供試体の重量を測定した。散水方法に関しては定まった基準がなく、成田らは保水性舗装技術研究会の指針に従い毎分6リットルで1時間の散水を行ったが、多量のため大部分の水が表面を流出したと報告している⁶⁾。国土交通省関東地方整備局による実験では4mm/hの人工散水が5時間自動で行われている⁷⁾。本研究では、表面流出が生じず、空間的なばらつきを出来る限り小さくすることに配慮し、手動により水の浸透状況を確認しながら1時間をかけて10mm相当の散水を行った。重量測定には電子天秤を用いた。舗装面の重量測定用供試体の写真を図8に示す。直径は15cmで深さは表層部分に相当し、アスファルト系は5cm、コンクリート系は15cmである(図3参照)。マサ土、芝生の重量測定用供試体を図9に示す。ブロック系はブロック(20cm×10cm×8cm)を抜き出して測定した。供試体は各舗装に3個ずつ設置し、重

表3 熱伝導率と体積熱容量の推定結果

測定面	普通A	透水A	保水A	保水A'	普通C	透水C	保水C	保水C'	透水B	保水B	マサ土	芝生
熱伝導率 (W/m・K)	1.03	0.90	1.03	1.43	2.21	1.21	1.19	0.90	1.47	1.16	0.74	0.72
熱容量 (MJ/K・m³)	5.1	0.9	6.3	0.9	7.2	1.0	1.5	1.2	2.9	1.6	10.0	8.1

図10 重量測定結果より算定した蒸発量 (2005年8月3日～5日)

量測定の結果には3個の平均値を用いる。普通Aと普通Cは空隙率が小さくほとんど透水しないため測定の対象外とした。

測定間隔は、散水後1日目は8時～12時まで1時間毎、14時～18時まで2時間毎、2日目は8時～18時まで2時間毎であり、3日目は8時と13時に測定を行った。重量測定結果より算定した蒸発量を図10に示す。8月5日の15時頃に7mmの降雨が確認されたため測定を終了した。散水の1日後は各面とも蒸発量に差が見られるが、2日目には芝生、マサ土以外では同程度でごく少量となった。蒸発量の測定は、2004年と2005年の夏季にこのケースを含めて計3回実施しており、ほぼ同様の結果が得られた。

4. 熱収支の解析

4.1 表面の熱収支式

表面の熱収支は以下のように表される。蒸発は表面でのみ行われると仮定した。

$$Rn = A + V + IE \quad (1)$$

$$A = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (2)$$

$$V = \alpha(T_s - T_a) \quad (3)$$

$$IE = l \cdot \beta \cdot \alpha_w (X_s - X_a) = l \cdot \beta \cdot \alpha / C_p \cdot (X_s - X_a) \quad (4)$$

ここで、Rn:正味放射量 (W/m²), A:伝導熱流 (W/m²), V:顕熱流 (W/m²), IE:潜熱流 (W/m²), λ:熱伝導率 (W/mK), α:対流熱伝達率 (W/m²K), Ts:表面温度 (°C), Ta:気温 (°C), l:水の蒸発潜熱 (J/kg), β:蒸発比 (-), α_w:湿気伝達率 (kg/(m²h(kg/kg'))), Cp:湿り空気の定圧比熱 (J/kgK), Xs:表面絶対湿度 (kg/kg'), Xa:外気絶対湿度 (kg/kg') である。

4.2 熱伝導率、体積熱容量の推定

舗装体内 (芝生、マサ土は土壌内) の熱伝導は以下の一次元熱伝導方程式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

ここで、c:体積熱容量 (J/m³K) である。

本研究では、各舗装内で測定した熱流と温度のデータに基づき、熱伝導率λ及び体積熱容量cの推定を試みた。(2)式及び(5)式を差分すると以下のように表される。

図11 熱伝導率推定に用いた図 (普通Aの場合)

図12 体積熱容量推定に用いた図 (普通Aの場合)

$$A = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta z} = \frac{\lambda}{\Delta z} (T_s - T_l) \quad (6)$$

$$\lambda \frac{1}{\frac{\Delta z_1}{2} + \frac{\Delta z_2}{2}} \left(\frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta z_1} - \frac{T_m - T_{m+1}}{\Delta z_2} \right) = c \frac{(T_m - T_m')}{\Delta t} \quad (7)$$

ここで、Δz: TとT'の距離 (m), Δz: TとT'の距離 (m), Δz: TとT'の距離 (m) である。(6)式の温度と熱流に実測値を代入すると、図11のようにプロットすることが出来る。図11の縦軸は伝導熱流、横軸は熱流板の上部と下部の温度差をその間の距離で除したもので、この近似直線の傾きを熱伝導率λとみなす。また、(7)式に図11より得た熱伝導率λを代入すると、図12のようにプロットすることが出来る。熱伝導率λと同様にこの近似直線の傾きを体積熱容量cとみなす。表3に各舗装面の熱伝導率λ及び体積熱容量cの推定結果を示す。なお、ここで用いた舗装体内の熱流と温度は、各舗装体の表層 (図4参照) のデータであり、舗装体表面の熱収支に直接関係する表層のみを対象としている (各舗装体における下側の境界条件には表層下の測定結果を与えている)。

4.3 蒸発比の推定

(4)式より蒸発量を求めるには蒸発比βが必要である。そこで蒸発比βに適当な値を代入し、3章で示した蒸発量の推定結果と比較することにより各舗装面における蒸発比βを求める。実際には蒸発比βは時刻とともに変化するが、ある範囲の含水状態が対象であれば蒸発比βを一定としても蒸発量の推定精度にはあまり影響しないと考え、本研究では一日の蒸発比βは一定であると仮定した。この仮定を検証するため、重量測定より算定した蒸発量から(4)式を用いて算出した蒸発比βを図13に示す。対流熱伝達率はユルゲスの式により与えた。蒸発量の大きいマサ土、芝生で変動が大きく、舗装面に関しても蒸発量の大きい散水後1日目午前中の蒸発比の変化が大きい。従って以降で算出する日平均値の蒸発比は、特に1日目の値に関して午前中過小評価していることになる。

(1), (3), (4)式を変形して整理すると、

$$Rn - A = \alpha \left\{ (T_s - T_a) + l \cdot \beta \cdot \frac{1}{C_p} (X_s - X_a) \right\} \quad (8)$$

と表される。RnとAを既知とすると未知数はαとβのみとなる。ここで、以下の2つの場合を検討する。

1) 対流熱伝達率αにユルゲスの式を用いる場合

対流熱伝達率αを風速の測定結果を用いてユルゲスの式により推定し、得られた蒸発量の日積算値と、重量測定により得られた蒸発量の日

表4 蒸発比の推定結果（対流熱伝達率にユルゲスの式を用いた場合）

測定面	透水 A	保水 A	保水 A'	透水 C	保水 C	保水 C'	透水 B	保水 B	マサ土	芝生
蒸発比 1日目 (8/3)	0.01	0.11	0.03	0.04	0.04	0.04	0.07	0.08	0.31	0.93
2日目 (8/4)	0.01	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.16	0.79
3日目 (8/5)	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05	0.05	0.03	0.69

表5 蒸発比の推定結果（対流熱伝達率を未知とした場合）

測定面	透水 A	保水 A	保水 A'	透水 C	保水 C	保水 C'	透水 B	保水 B	マサ土	芝生
蒸発比 1日目 (8/3)	0.01	0.09	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	1.00	1.00
2日目 (8/4)	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.20	1.00
3日目 (8/5)	0.00	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.09	1.00

表6 蒸発比の推定結果（表面温度を未知とした場合）

測定面	透水 A	保水 A	保水 A'	透水 C	保水 C	保水 C'	透水 B	保水 B	マサ土	芝生
蒸発比 1日目 (8/3)	0.009	0.115	0.030	0.044	0.044	0.051	0.079	0.095	0.456	0.508
2日目 (8/4)	0.005	0.040	0.018	0.026	0.027	0.023	0.046	0.040	0.204	0.513
3日目 (8/5)	0.005	0.031	0.029	0.027	0.030	0.024	0.068	0.058	0.122	0.502

図13 重量測定結果より算定した蒸発量から算出した蒸発比β
(2005年8月3日～5日、対流熱伝達率はユルゲス式より与えた)

図14 対流熱伝達率の算定結果（2005年8月4日）

積算値を比較して蒸発比βを推定した。その結果を表4に示す。

2) 対流熱伝達率αを未知とする場合

(8)式において、βに適当な値を代入するとαが得られ、蒸発量を求めることができる。ここで得られた蒸発量の日積算値と、重量測定により得られた蒸発量の日積算値を比較し、最も両者の差が小さくなるときのβを該当する日の蒸発比βとして決定する。その結果を表5に示す。

上記の2つの方法において算定された対流熱伝達率を図14に示す。対流熱伝達率を未知とする方法では、舗装面毎に対流熱伝達率が算定されるが、代表として普通A、普通C、芝生における算出結果を示す。他の舗装面においてもほぼ同様の日変動を示した。

ユルゲスの式により算定された対流熱伝達率は、風速が最大となる午後に大きな値になるのに対し、対流熱伝達率を未知とする方法により算定された対流熱伝達率は午前中にピークを持っている。当初、蒸発比βを終日一定値とする仮定による影響が疑われたが、蒸発比が0の普通A、普通Cにおいても、芝生と同様の傾向が確認されたので、これが原因ではないと判断された。さらに、関係するデータを仔細に確認したところ、各舗装面で午前中に表面温度が低いため、伝導熱流Aが小さく評価され、(8)式の左辺が大きくなる。これに対し、(8)式の右辺においては表面温度が低いため気温との温度差が小さくなり、対流熱伝達率を大きく設定しないと釣り合わないことになる。表面温度の測定法に関する課題については3章で議論したとおりであるが、この点からも改善の必要性が指摘される。

5. 表面温度を未知とした熱収支の計算

5. 1 計算方法

前章では、特に午前中に表面温度の測定結果が小さいことが原因となり、熱収支の整合がとれない点について考察を行った。ここでは、表面温度を未知として熱収支の計算を行い、この点について考察を進める。

(1), (3), (6)式を変形して整理すると、

$$T_s = \frac{Rn - IE + \alpha \cdot T_a + \frac{\lambda}{\Delta z} \cdot T_i}{\alpha + \frac{\lambda}{\Delta z}} \quad (9)$$

(9)式のRn、IE中にも(Rn中では表面からの長波長放射量、IE中では表面絶対湿度に関係して)Tsが含まれるため収束計算によりTsを計算する。熱伝導率λ及び体積熱容量cには前章と同様に測定結果に基づき推定した値を用い、対流熱伝達率αはユルゲスの式により与え、蒸発比βを重量測定の結果と整合するように推定した。その結果を表6に示す。

5. 2 表面熱収支の計算結果

図15に各舗装面での表面熱収支の計算結果を示す。表面温度の計算結果と測定結果を図16に、その差を図17に、差の最大値、平均値、最小値を表8に示す。降水のあった5日15時以降のデータは除外している。測定結果と比較して計算結果が午前中大きく午後小さくなる傾向は、図14の考察で述べたことが要因であると考えられる。蒸発比0とした普通Aや普通Cにおいても計算結果が平均的に1℃程度低くなっており、計算結果は測定結果より全体的に1℃程度低温な側でバランスしていると考えられる。この差の舗装面間での差（最大値－最小

図 15 各舗装面での表面熱収支の計算結果 (2005 年 8 月 3 日～5 日)

— Rn —× IE —◇ A —● V

値)の時刻変化を見ると、夜間は 2°C 程度、昼間は 5°C 程度舗装面間での差が生じており、時刻によっては更に大きな差となっている。この差を単純に顕熱流に変換すると、それぞれ $10 \sim 20\text{W}/\text{m}^2$ 、 $50 \sim 100\text{W}/\text{m}^2$ 程度となる。

熱収支の計算結果より、ヒートアイランド現象の直接的要因であると考えられる顕熱流の各日の最大値、平均値、最小値、21時の値の3日間での平均値を表7に示す。一般的に日射を蓄熱し夜間まで高温を保つことが、舗装面のヒートアイランド現象に対する主な寄与であると認識されているため、その様子を確認するために21時の値を示している。

マサ土、芝生は蒸発の影響が大きく、顕熱流の低減効果も終日を通して大きい。芝生では日中 $350\text{W}/\text{m}^2$ 程度、夜間 $60 \sim 70\text{W}/\text{m}^2$ 程度、マサ土では日中 $270\text{W}/\text{m}^2$ 程度、夜間 $30 \sim 50\text{W}/\text{m}^2$ 程度、普通Aより低減されている。

透水B及び保水Bはアルベド及び蒸発の影響により、顕熱流の低減効果も終日を通して比較的大きい。日中 $280\text{W}/\text{m}^2$ 程度、夜間 $20\text{W}/\text{m}^2$ 程度、普通Aより低減されている。

普通Cはアルベドの影響により、日中には顕熱流が $180\text{W}/\text{m}^2$ 程度普

通Aより低減されているが、夜間は普通Aとほぼ等しく、熱容量が大きいことが影響していると考えられる。

透水C、保水C、保水C'は普通Cよりアルベドが小さいため、若干の蒸発はあるが顕熱流の低減量は普通Aと比較して日中 $100\text{W}/\text{m}^2$ 程度と若干小さい。熱容量は普通Cほど大きくないため、夜間は $20 \sim 30\text{W}/\text{m}^2$ 程度普通Aより顕熱流が低減されている。

透水Aは蒸発がほとんど生じないため日中は普通Aとほとんど差がなく、熱容量が小さいため夜間は $10 \sim 20\text{W}/\text{m}^2$ 程度普通Aより顕熱流が低減されている。

保水Aは蒸発の影響、保水A'はアルベドの影響により、日中 $140 \sim 150\text{W}/\text{m}^2$ 程度普通Aより顕熱流が低減されている。夜間も $10 \sim 20\text{W}/\text{m}^2$ 程度普通Aより顕熱流が低減されている。

6. まとめ

本研究ではヒートアイランド緩和効果を目的とした種々の舗装面に関して試験的に舗装面を施工し、実測とその結果に基づく熱収支の解析より、各舗装面における顕熱流の低減効果の観点からヒートアイランドの緩和効果について考察を行った。

表7 顕熱流の計算結果 (2005年8月3日～5日の最大値, 平均値, 最小値, 21時の値の3日間での平均値)

測定面	普通A	透水A	保水A	保水A'	普通C	透水C	保水C	保水C'	透水B	保水B	マサ土	芝生
最大値 (W/m ²)	426.3	431.3	292.4	278.2	251.0	321.0	303.0	328.7	144.8	150.6	156.4	78.6
平均値 (W/m ²)	119.4	111.0	74.7	68.9	75.5	80.5	75.5	82.9	37.9	39.8	27.8	1.6
最小値 (W/m ²)	12.9	-1.1	-1.9	-4.4	4.6	-5.2	-5.4	-4.3	-9.2	-9.1	-18.8	-48.1
21時の値 (W/m ²)	45.5	21.5	23.8	16.4	48.3	17.2	15.4	18.8	23.8	25.0	-10.3	-27.2

表8 表面温度の測定結果と計算結果の差 (2005年8月3日～5日の最大値, 平均値, 最小値, ただし5日は降水(15時)前までの値)

測定面	普通A	透水A	保水A	保水A'	普通C	透水C	保水C	保水C'	透水B	保水B	マサ土	芝生
差の最大値 (°C)	3.83	2.82	2.81	3.52	2.90	3.53	3.04	4.80	3.40	3.59	5.79	5.19
差の平均値 (°C)	1.16	0.45	0.32	1.21	0.84	1.27	0.82	1.99	0.99	1.19	1.39	1.41
差の最小値 (°C)	-1.02	-3.95	-1.88	-2.09	-0.81	-6.25	-3.19	-1.88	-0.37	-0.34	-1.35	-2.87

図16 表面温度の計算結果と測定結果 (2005年8月3日～5日)
— 計算結果 ・ 測定結果

熱収支の解析では、実測データより熱伝導率、体積熱容量、蒸発比を算定する方法について考察した。表面温度の測定結果を用いて熱収支の解析を進めたが、表面温度の測定法に関する問題より、収支が若干整合しない結果となった。そのため、表面温度を未知とした解析法についても検討を行った。各舗装面における表面熱収支の計算結果より以下の点が考察された。

・マサ土、芝生は蒸発により顕熱流が大きく低減される。芝生では日中350W/m²程度、夜間60～70W/m²程度、マサ土では日中270W/m²程度、夜間30～50W/m²程度、普通Aより顕熱流が低減されている。

・透水B及び保水Bはアルベド及び蒸発の影響により顕熱流の低減量が比較的大きい。日中280W/m²程度、夜間20W/m²程度、普通Aより低減されている。

・普通Cはアルベドの影響により日中の顕熱流が180W/m²程度普通Aより低減されているが、夜間は普通Aとほぼ等しく、熱容量が大きいことが影響していると考えられる。

・透水C、保水C、保水C'は普通Cよりアルベドが小さいため、顕熱流の低減量は普通Aと比較して日中100W/m²程度と若干小さい。夜間は20～30W/m²程度普通Aより顕熱流が低減されている。

図17 表面温度の測定結果と計算結果の差 (2005年8月3日～5日)

・透水Aは蒸発がほとんど生じないため日中は普通Aとほとんど差がなく、熱容量が小さいため夜間は10～20W/m²程度普通Aより顕熱流が低減されている。

・保水Aは蒸発の影響、保水A'はアルベドの影響により、日中140～150W/m²程度普通Aより顕熱流が低減されている。夜間も10～20W/m²程度普通Aより顕熱流が低減されている。

本研究で対象とした舗装面は、現在様々に提案されているヒートアイランド対策を目的とした舗装面の全てを代表しているわけではないが、上述のまとめはこれらの舗装面の概ねの特徴（物性値と顕熱流との関係）を表していると考えられ、今後の開発における保水性能の改善、反射性能の改善に関して、ある程度の目安を示すことが出来たと考えている。
謝辞 本研究の一部を修士論文として取組まれた佐野公俊氏（鹿島建設）に謝意を表します。本研究の遂行にあたり、住友大阪セメント株式会社の安藤豊氏、安久憲一氏、大石英夫氏に様々なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) ローレンスバークレー国立研究所: <http://eetd.lbl.gov/heatIsland>
- 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効果に関する研究, 水工学論文集, 第42巻, pp.61-66, 1998
- 3) 尾崎哲二, 鈴木義則, 羽田野袈裟善, 保水性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, 1998
- 4) 鍋島美奈子, 西岡真穂, 三木信博, 津郷俊二: 保水性舗装の材料の熱的性能に関する実験(その1～3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.563-566, 2002
- 5) 赤川宏幸, 小宮英孝: 表面を連続的に湿潤できる舗装体に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第530号, pp.79-85, 2000
- 6) 成田健一, 三坂育正, 国島武史, 中山康孝, 若林伸介: 蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第20号, pp.187-190, 2004
- 7) 国土交通省関東地方整備局: 環境舗装東京プロジェクトの取組結果, http://www.ktr.mlit.go.jp/kangi/report/inf_28.pdf

(2007年3月1日原稿受理, 2007年9月20日採用決定)