

環境配慮型舗装による表面温度低減と都市キャニオンの熱環境に対する効果

地域環境計画分野 上田 淳也

1. 目的

ヒートアイランド緩和対策として環境配慮型舗装の開発が進んでおり、熱的に効果のあるものとして高反射性舗装や保水性舗装がある。高反射性舗装は反射日射を増大させ(参考文献[1])、都市キャニオンの熱環境を悪化させることが懸念されるが、ヒートアイランドの原因となる顕熱流束を都市キャニオン全体で減少させることができると考えられる。一方、保水性舗装は反射日射が増大するというのではなく、顕熱流束を潜熱流束にそのまま置き換えることができる。

そこで本研究では、ヒートアイランドと都市キャニオンの熱環境から見て、環境配慮型舗装を敷設することによる影響を数値シミュレーションにより検討することを目的とする。

2. 環境配慮型舗装の熱物性値

共同研究者(1)と共に2004年8月1日~2004年8月10日まで大阪市大正区においてコンクリート系、アスファルト系、土系舗装の放射収支と舗装表面・舗装内温度を測定した。測定項目と使用測器を表1に示す。また2004年8月7日~2004年8月9日まで試験施工

表1: 測定項目と使用測器

測定項目	使用測器	機種	販売・製造元	設置高さ
気温	温湿度計	RS-11	ESPEC	1.5m
湿度	温湿度計	RS-11	ESPEC	1.5m
風向・風速	風向・風速計	MA-11	英弘精機	2.0m
放射収支	放射収支計	CNR-1	KIPP&ZONEN	0.3m
舗装表面温度	熱電対	-	東京測器研究所	表面

表2: 熱電対の埋設深さ

舗装種類	熱電対の埋設深さ(cm)							
	1	5	10	15	20	25	35	45
密粒アスファルト					22			
保水性アスファルト					22			
普通コンクリート				15			35	
保水性ポーラスコンクリート				15			35	45
マサ土			10	20				75

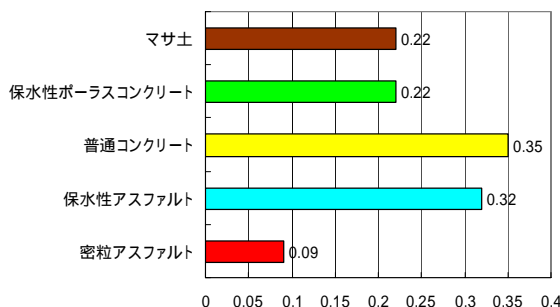


図1: アルベドの測定値

した舗装の一部を切り出して試験体とし、これを使用して水分蒸発量測定を行った。

2.1 アルベド(日射反射率)

図1にアルベドの測定値を示す。測定時の舗装は風乾状態であった。

2.2 熱伝導率 と容積比熱 c

本研究において、数値シミュレーションに使用する熱物性値は中嶋らのデータ(参考文献[2])を元に決定した。中嶋らは大阪市大正区で行った測定結果を使用して、後退差分法を用い非定常熱伝導計算で、環境配慮型舗装の熱伝導率と容積比熱を推定している。舗装の表層から路床までを上層と下層の2層に分けるモデルを使用している。数値シミュレーションに使用する舗装の熱物性値一覧を表3に示す。

2.3 蒸発効率

水分蒸発量測定の結果を用い、蒸発量 E と気象条件から蒸発効率 β を以下の式で算出した。

$$\beta = \frac{E}{\rho C_H u (q_{sat}(T_s) - q_a)} \quad \dots \text{式(1)}$$

ρ: 空気密度[kg/m³] C_H: 顕熱輸送に対するバルク輸送係数[-]

u: 風速[m/s] q_{sat}(T_s): 地表面温度に対する飽和比湿[kg/kg]

q_a: 大気比湿[kg/kg] T_s: 地表面温度[]

$$\rho = (100 \times P) / \{287.1 \times (T_a + 273.15) \times (1 + 0.61 \times q_a)\}$$

P: 大気圧 (= 1013.15 [hPa]) T_a: 気温 []

$$q = \frac{x}{x+1} \quad q: \text{比湿[kg/kg]} \quad x: \text{絶対湿度[kg/kg]}$$

求めた蒸発効率を図2に示す。図2からも分かるように蒸発効率は時間と共に刻々と変化する。ここで蒸発量の積算値 E_c を用いて日平均の蒸発効率 β_c を次式で定義した。t は時刻を意味する。

$$\beta_c = \frac{\sum_t E_t}{C_H \sum_t \{\rho_t u_t (q_{sat}(T_{s,t}) - q_{a,t})\}} \quad \dots \text{式(2)}$$

式(1)で求めた蒸発効率を「時別値」、式(2)で求めた蒸発効率を「日平均値」と表現する。求めた蒸発効率の日平均値を図2の枠線内に示す。

表3：数値シミュレーションに使用する熱物性値

舗装種類	上層		下層	
	1	C ₁	2	C ₂
密粒アスファルト	1.8	2115	1.4	3400
高反射性舗装	1.5	1600	1.4	3400
保水性アスファルト	15.2	1400	4.6	957
普通コンクリート	6.3	2900	6.0	733
保水性ポーラスコンクリート	2.5	2200	7.0	629
マサ土	7.7	2800	9.7	454

λ_1 [W/mK], $c\gamma_1$ [kJ/m³K] は 1 層目の熱物性値

λ_2 [W/mK], $c\gamma_2$ [kJ/m³K] は 2 層目の熱物性値

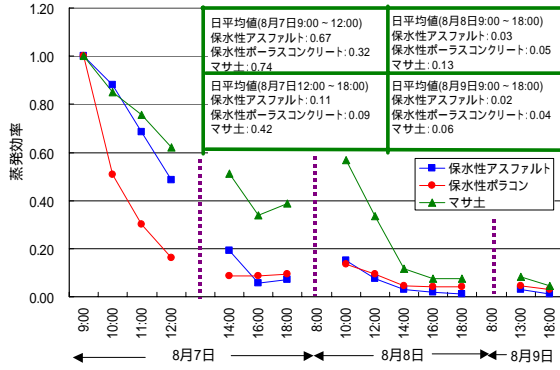


図2：蒸発効率(特別値と日平均値)

3. 数値シミュレーション

3.1 日射計算

日射計算にはモンテカルロ法を採用した。反射は全て完全拡散反射として取り扱う。本研究で用いるプログラムは参考文献[1]で用いたものと同じである。

3.2 熱収支計算

境界条件として、モンテカルロ法により求めた短波放射量と大気放射・気温を上部に、地中下部(深さ 500mm の地点)に日平均気温を与え、後退差分法を用い非定常熱伝導計算で、都市キャニオンの表面温度を計算する。そして舗装面の顕熱流束・都市キャニオンの顕熱流束を算出する。計算条件を表 4 に示す。対流熱伝達率は、キャニオン内で部位によらず一定とし、壁面近傍の風速が 3m/s に対応する数値である。

3.3 平均放射温度 MRT と作用温度 OT

計算ポイントにおいて微小面立方体(図 3)を考え、微小面立方体の各面に入射する周囲からの反射日射量と長波放射量の積算値を求める。各微小面に到達する大気放射量と太陽からの日射量を加え正味放射量を求める。微小面 i の正味放射量 Rn_i は次式となる。

$$Rn_i = \left\{ \sum_{j=0}^N (F_{j,i} S_j \uparrow) + F_{s,i} S \downarrow \right\} \times a + \left\{ \sum_{j=0}^N (F_{j,i} L_j \uparrow) + F_{s,i} L \downarrow \right\} \times \varepsilon \quad \dots \text{式(3)}$$

$F_{j,i}$: パッチ j から見た微小面の形態係数[-] $F_{s,i}$: 微小面 i の天空率[-]

$S_j \uparrow$: パッチ j からの反射日射量[W/m²] $L_j \uparrow$: パッチ j からの長波放射量[W/m²]

$S \downarrow$: 太陽からの日射量[W/m²] $L \downarrow$: 大気放射量[W/m²]

a : 人体の日射吸収率[-] ε : 人体の長波吸収率[-] N : パッチ総数個

ただし、 $a = 0.71, \varepsilon = 0.95$ と設定した。正味放射量から微小面 i の平均放射温度 MRT_i を次式で求める。

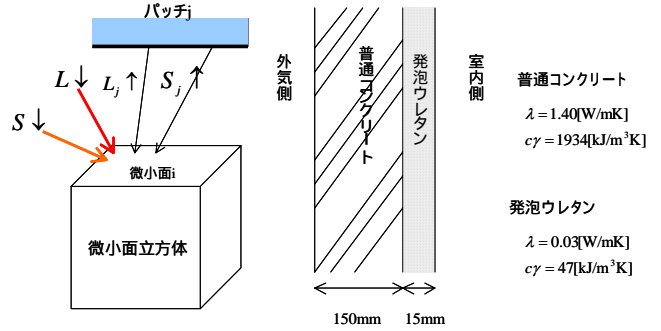


図3：微小面 i の正味放射量

図4：壁面の材料構成

表4：計算条件

計算日時	8月21日
天空状態	晴天空、大気透過率0.7
日射量計算式	法線面直達日射量: Bouguerの式 水平面天空日射量: 渡辺の式
人体の日射吸収率	0.71
人体の長波吸収率	0.95
対流熱伝達率	キャニオン側: 18.0(W/m ²) 室内側: 6.0(W/m ²)
キャニオン内気温	$T = 3.9 + B_1 \cos(\omega t - \pi/4) + B_2 \cos(2\omega t - \pi/4)$ $B_1 = -0.478(33.0 - 25.0), B_2 = -0.2B$
室内気温	26.0()
樹木の吸収係数	0.45(1/m)
パッチサイズ	1m × 1m

$$MRT_i = \sqrt[4]{\frac{Rn_i}{\sigma}} - 273.15 \quad [] \quad \dots \text{式(4)}$$

MRT_i に重み係数 K_i を掛け合わせることで人体を想定した MRT を次式により算出する。

$$MRT = \sum_{i=0}^5 (K_i \times MRT_i) \quad [] \quad \dots \text{式(5)}$$

$i = 0, 1$ (上面, 下面)のとき $K_i = 0.024$ (参考文献[4])

$i = 2, 3, 4, 5$ (側面)のとき $K_i = 0.328$

求めた MRT から作用温度 OT を次式で求めた。

$$OT = \frac{\alpha_c t_a + \alpha_r MRT}{\alpha_c + \alpha_r} \quad [] \quad \dots \text{式(6)}$$

α_c : 対流熱伝達率 = 18.0[W/m²]

α_r : 放射熱伝達率 = 5.0[W/m²], t_a : 気温[]

3.4 都市キャニオンの形状

図 5 の太線部に示すような計算領域を設定し、無限に広がる都市キャニオンを表現するように都市キャニオンの境界面の条件を与える。図 5 の形状 A と図 6 の形状 B を計算に使用する。キャニオン表面はパッチに分割する(サイズは表 4)。街路樹の列植幅は 6m である。

3.5 樹木の日射透過モデル

樹木を層に分割し、各々の上面において透過するか否かを判定する。葉群層の日射透過率 τ は次式で求める。

$$\tau = \exp(-kl) \quad \dots \text{式(8)} \quad (\text{参考文献[5]})$$

k : 樹木の吸収係数

l : 葉群層を日射が通過する距離[m]

反射率は $(1 - \tau)r$ で表され、反射するか否かを判定し、反射しない場合は吸収となる。 r は個々の葉のアルベドである。

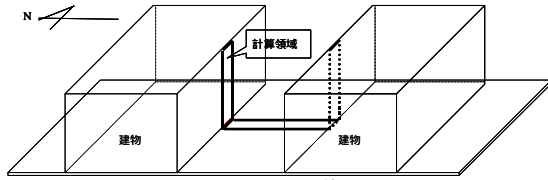


図 5：形状 A

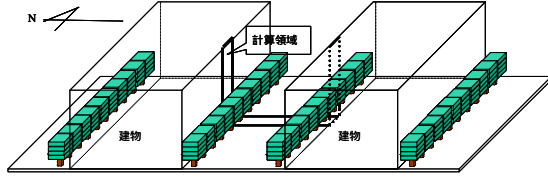


図 6：形状 B

4. 高反射性舗装がキャニオンの熱環境に与える影響

4.1 高反射性舗装の表面温度低減

形状 A を用い高反射性舗装の表面温度の最高値を求めた。熱物性値は表 3 に示した数値を用いた。図 8 より、アルベドを 0.1 から 0.6 にすると表面温度最高値は 61.9 から 45.0 に低減する。参考文献[3]でアルベドを上げると表面温度は線形的に低下することを示しており、今回の計算結果ではアルベドが 0.5 上がることで 16.9 表面温度が低下していることから、アルベドを 0.1 上げると、約 3.4 表面温度が低減することになる。

4.2 高反射性舗装による建物壁面の温度上昇

アルベドが大きくなると舗装の表面温度は低下するが反射日射は増大し、その多くは建物壁面に吸収される(参考文献[1])。そこで高反射性舗装を敷設した場合に、密粒アスファルトと比較してどのくらい建物壁面の表面温度(最高値)が上昇するかを考察する。ここでは入射日射量の大きな南向き壁面に着目する。

図 9 より、舗装全体を高反射性舗装とした場合、高さ 1m の建物壁面の表面温度上昇が最も大きく約 7.9 である。全体的に舗装面に近いほどその増分は大きい。

そこで建物壁面の表面温度上昇を抑制するために高反射性舗装の敷設方法を検討する。反射日射は舗装面に近い壁面に多く吸収されるため、建物壁面から 4m 以内の舗装面は高反射性舗装とせず、建物壁面から離れた舗装中央のみを高反射性舗装とする。アルベドは図 10 に示すように設定する。

舗装全体を高反射性舗装とした場合は、建物壁面の表面温度が最高で約 7.9 上昇したのに対し、舗装中央のみ高反射性舗装とした場合は、高さ 4m の壁面で最高約 4.0 の温度上昇となった(図 9)。舗装面に近い壁面ほど表面温度が上昇するという傾向が見られない。建物壁面の表面温度の上昇は、反射日射を多く吸収することによるもので、これは高反射性舗装とする舗装面と反射日射を多く吸収する建物壁面との形態係数により説明できると考えられる。そこで建物壁面に吸収される反射日射の高さ方向分布を調べた。

図 11 より、舗装全体を高反射性舗装とした場合、舗装面に近い建物壁面に吸収される反射日射が多くなっ

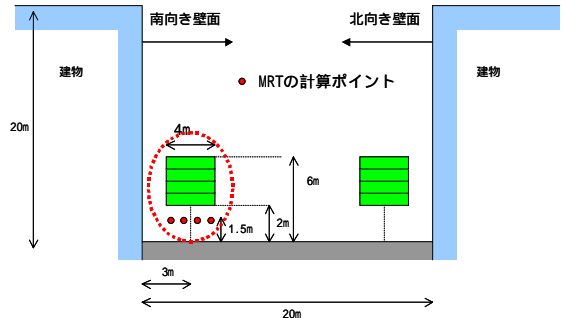


図 7：キャニオンの断面図

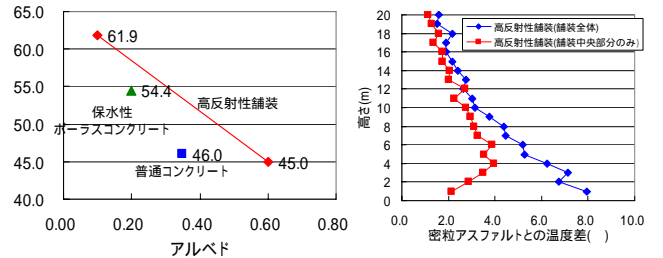


図 8：高反射性舗装の表面温度最高値の低減

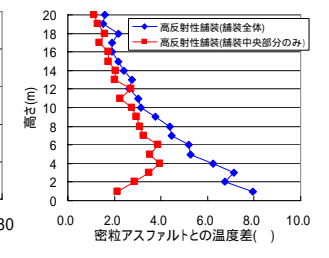


図 9：建物壁面の表面温度(最高値)の上昇

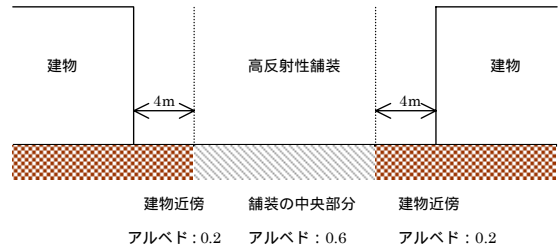


図 10：高反射性舗装の敷設方法とアルベドの設定

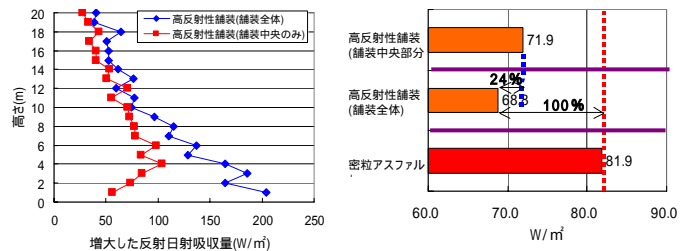


図 11：建物壁面の反射日射増大量 (密粒アスファルトとの差)

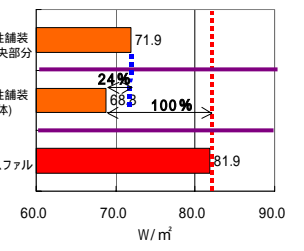


図 12：都市キャニオン全体の顕熱流束(24 時間平均値)

ている。舗装中央のみ高反射性舗装とした場合、建物壁面に吸収される反射日射は高さ方向に分散している。

よって建物壁面の表面温度上昇は、建物壁面と高反射性舗装面との形態係数により決まると言える。

4.3 高反射性舗装と都市キャニオン全体の顕熱流束

高反射性舗装は表面温度を低減する一方で、建物壁面温度を上昇させる。しかし都市キャニオン全体で顕熱流束を減少させることができると考えられる。よって高反射性舗装を敷設した場合に、密粒アスファルトと比較して都市キャニオン全体の顕熱流束がどのくらい減少するのかを考察する。

図 12 より、舗装全体を高反射性舗装とした場合、密粒アスファルトと比べて顕熱流束が 13.1W/m^2 減少し、舗装中央のみ高反射性舗装とした場合(舗装面積の 60%が高反射性舗装)は、密粒アスファルトと比較して

10.0W/m²減少する。高反射性舗装とする面積は 40%減っているが、顕熱流束減少量は約 24%だけ低下する。よって高反射性舗装とする面積が減っても顕熱流束が同じ割合だけ減るといわけではないと言える。

以上のことをまとめると、高反射性舗装は反射日射を増大させ、建物壁面の表面温度を上昇させる。建物壁面の表面温度上昇を抑制するためには、建物壁面と舗装面の形態係数が小さくなる場所に高反射性舗装を敷設すべきである。しかし建物壁面の表面温度上昇を抑制しようとすると、高反射性舗装の面積が減る。そのような条件でヒートアイランド緩和効果を大きくするためには、高反射性舗装を天空率の大きな場所(本研究では舗装中央)に敷設すべきである。よって本研究では、高反射性舗装を効果的に敷設するための方向性を示した。

4.4 高反射性舗装と街路樹の下における MRT・OT

高反射性舗装が都市キャニオンの熱環境に与える影響を考察したが、ここでは人体に対しての影響を考察する。計算には形状 B を用い、MRT・OT の評価ポイントは南向き壁面のそばに位置する街路樹の下に設定する(図 7)。この理由は、高反射性舗装を敷設した場合、反射日射の影響で街路樹の下における日影の暑熱感が悪化する場合があることから、それを考察するためである。

計算結果を図 13 に示す。舗装全体を高反射性舗装とした場合も、車道のみ高反射性舗装とした場合も、密粒アスファルトと比較して MRT・OT の最低値は上昇したが、車道のみ高反射性舗装とした場合の方がわずかであるが MRT・OT の上昇を抑制している。

5. 保水性舗装がキャニオンの熱環境に与える影響

5.1 保水性舗装の表面温度低減

形状 A を用い保水性ポーラスコンクリートの表面温度の最高値を求めた。熱物性値は表 3 に示した数値を用いた。図 14 より、蒸発効率が 0.0 の場合、表面温度最高値は 54.4 であるのに対して、蒸発効率を 0.2 にすると 43.1 に低減する。しかし蒸発効率を大きくしても表面温度は線形的に低下していない。

5.2 保水性舗装と都市キャニオン全体の顕熱流束

第 4 章では高反射性舗装の敷設方法の検討を行った。これは反射日射の影響により建物壁面の表面温度が上昇するからである。しかし保水性舗装では反射日射が増大するというのではなく、建物壁面の表面温度を上昇させることはない。本節では 4.3 と同様に保水性舗装を敷設した場合、都市キャニオン全体の顕熱流束が密粒アスファルトと比較してどのくらい減少するかを考察する。

密粒アスファルトの場合と比較して、舗装種類が保水性ポーラスコンクリートの場合は蒸発効率が大きくなるにつれ顕熱流束は減少する。よって保水性舗装は建物壁面の表面温度を上昇させることなくヒートアイランド緩和に効果を発揮すると言える。

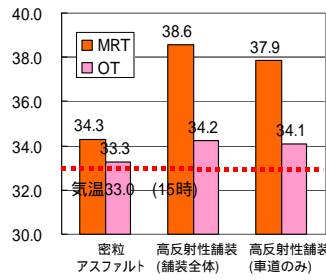


図 13: 街路樹の下における MRT・OT

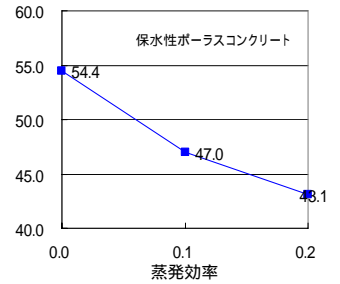


図 14: 保水性舗装の表面温度低減

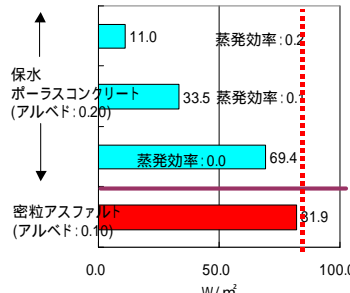


図 15: 都市キャニオン全体の顕熱流束(24 時間平均値)

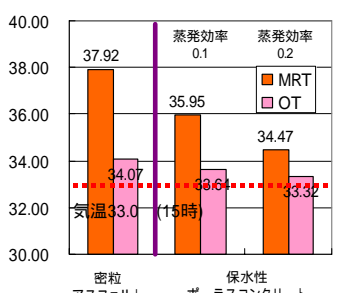


図 16: 街路樹の下における MRT・OT

5.3 保水性舗装と街路樹下の MRT・OT

4.4 と同様に、保水性舗装を敷設した場合に、街路樹の下における MRT・OT の最低値を計算した。高反射性舗装では MRT・OT の最低値が上昇したのに対して、保水性ポーラスコンクリートでは蒸発効率が大きくなるほど MRT・OT の最低値は小さくなる(図 16)。以上のことより保水性舗装は、暑熱感を増大させることなくヒートアイランドに効果を発揮すると言える。

6. まとめ

ヒートアイランドと都市キャニオンの熱環境から見て環境配慮型舗装の効果を検討した。高反射性舗装も保水性舗装も、密粒アスファルトと比較して都市キャニオン全体の顕熱流束を減少させる。よってヒートアイランド緩和に効果を発揮する。しかし高反射性舗装は、建物壁面の表面温度を上昇させることや街路樹の下における暑熱感を増大させるなど、都市キャニオンの熱環境を悪化させる場合もある。しかし敷設方法を検討すれば、これらの副作用を抑えつつヒートアイランド緩和に効果を発揮することも可能であり、この論文ではその一例を示した。

1 共同研究者: 住友大阪セメント、神戸大学

参考文献

- [1] 上田、西岡、鍋島: 高反射性舗装の形成する街路空間の熱環境(その 2)、日本建築学会学術講演梗概集 D1 pp691-692 2003.9 [2]中嶋: 環境配慮舗装の表面温度算定のための熱物性値推定 2004 年度大阪市立大学環境都市工学科卒業論文 [3] 上田、西岡、鍋島、中尾: 高反射性舗装の反射率と表面温度低減効果、日本建築学会学術講演梗概集 D1 pp803-804 2004.8 [4] 中村泰人: 建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現について、日本建築学会計画系論文報告集第 376 号 pp29-35 1987.6 [5] 近藤純正: 水環境の気象学、株式会社朝倉書店 1994.4