

湿潤舗装システムと遮熱舗装の温熱環境の比較評価

赤川 宏 幸 小宮 英 孝

Comparison between Thermal Environments of Watered Pavement System and Highly Reflective Pavement

Hiroyuki Akagawa Hidetaka Komiya

Abstract

The radiation environments over a watered pavement and a highly reflective pavement, developed for mitigation of the heat island phenomenon, were compared with that over paved asphalt and natural turf under the same meteorological condition. Possible absorptions of long- and shortwave radiation by an assumed globe placed 50 cm above these surfaces were calculated. It was found that the highly reflective pavement had the potential to degrade the thermal environment over it by the increase in reflected solar radiation, while the watered pavement did not have such a side effect. The human thermal environment can be improved more effectively by shading and/or selection of the color of clothes than by changing the type of pavement. The estimated SET* on the watered pavement showed its superiority over that on the highly reflective pavement from the standpoint of the thermal comfort at lower leg level.

概 要

ヒートアイランド対策工法である湿潤舗装システム（以下、湿潤舗装）と遮熱舗装、さらにアスファルトと天然芝について、その放射環境を同気象条件で測定した。仮定された球体に入射する長短波放射量の総計と、球体の日射反射率、長波放射率の関係から、球体の可能総取得放射量を推定した。その結果、湿潤舗装はアスファルトや天然芝と比較しても、舗装上の人間に対する温熱環境を悪化させるポテンシャルはないと判断できた。しかし、遮熱舗装は条件によっては、温熱環境を悪化させるポテンシャルがあることが示唆された。一方で、舗装面上の温熱環境の改善には、舗装面状態の変更よりも日射遮蔽や衣服の調整の方が、効果が高いことが示唆された。また、SET*の算出結果から、湿潤舗装は人間の体の下部を中心に温冷感改善に寄与することが示された。

1. はじめに

近年、ヒートアイランド対策技術の一つとして、保水性舗装などの熱環境改善舗装が、国や自治体を中心に普及が進められている。これらの本来の目的は、日射による表面温度の上昇を抑え、顕熱による大気への熱の放出を低減し、都市全体の気温低下を期待するものである。一方、これらの舗装は主に都市域に施工されることから、人間の温熱環境を改善する効果をも同時に期待されることが多い。むしろ建築外構においては、こちらに主眼が置かれている。

熱環境改善舗装は大きく二つに分類される。水の蒸発によって顕熱を潜熱に変換するタイプと、近赤外域の日射反射率を高めて舗装の熱取得を減らすタイプである。ここでは前者を湿潤舗装、後者を遮熱舗装と呼ぶ。

湿潤舗装について筆者ら¹⁾は、連続的に湿潤可能なブロック系湿潤舗装上と、アスファルト舗装上の比較において、直達日射を遮蔽した条件の下で被験者実験を行い、温冷感、快適感、皮膚温等の有意な差を認めている。梅田ら²⁾は、同じく連続的に湿潤可能なブロック系保水性舗装上と、アスファルト舗装上での比較測定を行い、高

さ0.6m以下ではSET*（標準新有効温度）で2℃以上の差が見られるが、高さ1.1mでは差が顕著ではないことを示している。また、絶対湿度の上昇がSET*に及ぼす影響は小さいことも示している。

遮熱舗装については、若間ら³⁾は、日射反射率0.25（黒）、0.4（灰）、0.6（白）の遮熱舗装上と、アスファルト舗装上の作用温度を比べ、いずれの日射反射率の遮熱舗装上においても放射環境が悪化するとしている。露木ら⁴⁾は、日射反射率0.25～0.3程度（グラフから読み取り）の遮熱舗装上とアスファルト舗装上で被験者実験を行っている。遮熱舗装上では、グローブ温度はアスファルト上より高いものの、日射感、放射感、快適感といった心理量では改善されており、遮熱舗装は必ずしも熱的快適性を悪化させるものではないとしている。

以上のように、舗装の日射反射率や蒸発効率といった条件の違いによって、従来舗装に対する熱環境改善舗装の改善効果の評価が分かれる。Table 1は、過去の文献^{2)～15)}から抽出した、湿潤舗装および遮熱舗装における、蒸発効率と日射反射率の設定について整理したものである。いずれも値に大きな幅が認められ、性能条件としてどれを標準として良いのかが明確でないことがわかる。

本研究では、第一に、これまで主にアスファルト舗装との比較が行われてきた湿潤舗装と遮熱舗装について、同気象条件の下で熱環境改善効果を比較評価することを目的とした。

第二に、両者はヒートアイランド対策工法として導入が進められてきた経緯があることから、大気への顕熱輸送に直接関わる表面温度が、両者間でできるだけ等しくなるような条件を設定して、湿潤、遮熱両舗装それぞれの直上の放射環境の違いを選択的に評価することを目的とした。条件設定については、市場において標準的な明度を持つ遮熱舗装を基準とし、表面温度がそれと同程度となるような湿潤舗装を選択した。

第三に、地表面の違いとともに、歩行者や周辺建物外壁など、放射を受ける側の表面特性による放射環境の違いについても評価を行い、地表面の違いが放射環境に及ぼす影響度について考察した。

測定に際しては、比較のために、非湿潤系の標準舗装として密粒度アスファルト舗装、湿潤系の地表面として天然芝を選択し、4種類の試験区における熱環境要素の同時評価を行った。密粒度アスファルト舗装は最も高温側、天然芝は低温側の地表面と想定され、他の代表的な舗装の表面温度は、概ねこの間の値を示すと考えられる。

2. 測定概要

測定は、東京都清瀬市にある大林組技術研究所構内において、既存の舗装、および試験体を用いて、2006年8月12日から19日の期間に行った。試験区は全部で4箇所設けた。Table 2は、各試験区の概要を示す。また各試験区の位置をFig. 1に示す。試験区1は天然芝であり、測定中心から概ね半径10mの範囲は同じ天然芝に覆われている。試験区2は密粒度アスファルト舗装であり、試験区1と同様に、概ね半径10mの範囲は同じアスファルト舗装である。試験区1、2は湿潤舗装、遮熱舗装に対する

対照区である。

試験区3は湿潤舗装であり、表層の開粒度アスファルト混合物の空隙に砂を充填したタイプの保水性舗装に、下面から連続給水できる設備を付加した試験体を用いた。表層材料をブロック系舗装材料とした、同様の給水設備を持つ舗装体に関する熱環境の評価については筆者ら⁸⁾の研究がある。湿潤舗装全体の試験体の大きさは3.5m×28mであるが、対象とする試験区は、第1章で述べた理由(遮熱舗装と表面温度が同等となる)に基づいて、3.5m×6mの赤色の区画とした。





給水設備は、Fig. 2に示すように、試験体の勾配の上流部、および中央部の舗装内に埋設した給水パイプと、このパイプから連続して敷設した高導水性のポリエステル製シート(導水シートと呼ぶ)とからなる。給水は、実物件の運用では間欠運転とし、1日の蒸発量に相当する5リットル/㎡・日程度の水を供給するが、本実験時は常時給水とし、給水量は約4.4リットル/㎡・時であった。しかし、大部分は余剰水として系外に排水されており、さらに下面給水であるため、過剰な水分が表面に吸い上がることはなく、実物件と同じく、比較的均一な湿潤状態が保持されていた。

試験区4は遮熱舗装であり、既設の密粒度アスファルト舗装の9.5m×5.5mの区画に、表面処理として舗装用遮熱塗料を塗布した。色は自治体で標準的に使われている

Table 1 過去の研究例^{2)~15)}における日射反射率と蒸発効率の設定値
Solar Reflectances and Evaporation Efficiencies in Previous Studies

| | 湿潤舗装 | | 遮熱舗装 |
|----------------|---------|-----------|--------------|
| 日射反射率 (湿潤時) | アスファルト系 | 0.1~0.4 | 0.11~0.6 |
| | コンクリート系 | 0.19~0.22 | 0.1~0.7 (計算) |
| | ブロック系 | 0.08~0.31 | |
| 蒸発効率 | 常時給水型 | 0.2~0.77 | - |
| | 散水時 | ~2.0 | |

Table 2 試験区および測定地点の概要
Summary of Measurement Points

| 試験区 | ① | ② | ③ | ④ |
|---------------|---|---|--|---|
| 表面材料 | 天然芝 | 密粒度アスファルト | 湿潤舗装 | 遮熱舗装 |
| 写真 |  |  |  |  |
| 大きさ | 概ね半径10mの範囲は一樣 | 概ね半径10mの範囲は一樣 | 3.5m×6m | 9.5m×5.5m |
| 形態係数 20cm※ | 天然芝 0.98以上 =1とみなす | アスファルト 0.98以上 =1とみなす | 湿潤舗装 0.922 アスファルト 0.070 遮熱舗装 0.008 | 遮熱舗装 0.947 アスファルト 0.049 湿潤舗装 0.004 |
| 形態係数 50cm※ | 天然芝 0.95以上 =1とみなす | アスファルト 0.95以上 =1とみなす | 湿潤舗装 0.809 アスファルト 0.171 遮熱舗装 0.020 | 遮熱舗装 0.868 アスファルト 0.122 湿潤舗装 0.010 |

※高さ20cm, 50cmから地表面を見たときの形態係数

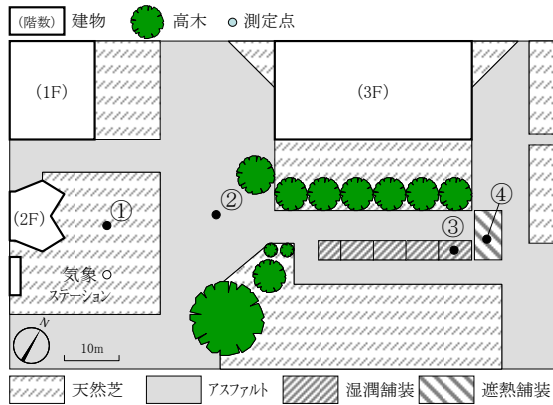


Fig. 1 測定ポイントおよび周辺図
Test Site and Observation Points

N60である（明度6.0，灰色）。

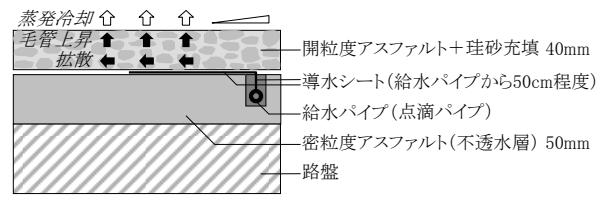
表中の形態係数は、長方形平面から小球に入射する場合の理論式を用いて算出した。天然芝とアスファルトの形態係数は0.95以上であることから、反射日射量（高さ20cm），黒球温度（高さ50cm）は測定値をそのまま解析に使用した。互いに隣接する湿潤舗装と遮熱舗装では、形態係数が0.95以下となることから、測定値を、形態係数を1とした時の値に補正する必要がある。そこで、周囲がほぼアスファルトであると仮定して、反射日射量，黒球温度について形態係数の方程式を立て、連立させて解くことにより補正を行った。

Table 3は、測定機器の一覧である。温湿度計はラディエーションシールド内に設置し、放射の影響を取り除いた。黒球は今回新規に購入したもので、汚れや劣化はないと考えられる。白球温度については、黒球温度と白球温度から受熱放射量を推定する目的として測定を行ったが、本稿では扱わないこととする。

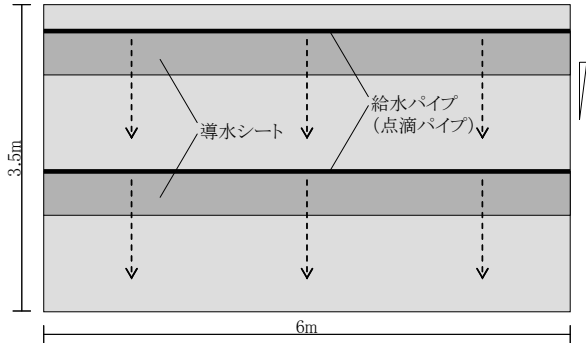
表面温度の測定には非接触型の赤外線熱電対を用いた。接触型の熱電対では、接触する位置によって計測される温度が変化するので、平面的に代表性のある平均値を得ることが難しい。例えば、天然芝の場合は、様々な方向を持つ葉の代表点を決定することは難しい。アスファルト舗装の場合は、骨材とバインダー（アスファルト部）の違い、また骨材も個々の色、性質が異なり、接触位置によって表面温度が2~3℃変化することがわかった。湿潤舗装、遮熱舗装も表層はアスファルト舗装をベースとしているため、接触型の温度計は不相当であると判断した。したがって、測定角度等による誤差の要素はあるものの、温度の平均像を得るといふ点で優れると考えられる赤外線熱電対を用いた。

風速は互いの距離の近い試験区1と2は代表して試験区2で、試験区3と4は代表して試験区3で測定した。風速計は熱線式であるため、日射と降雨避けのための日傘の下に設置した。日傘は微風速計の水平成分を乱さない程度上方へ離して設置した。

測定期間は8月12日から8月19日までの8日間であるが、概ね晴天日であった13, 14, 18, 19日の計4日のデータを



a 断面図



b 平面図（表層の下の導水シート敷設位置を示す）

Fig. 2 湿潤舗装の概要
Structures of Watered Pavement
(a) in the Vertical and (b) in the Horizontal

Table 3 測定器概要
Summary of Measurement Apparatuses

| 測定要素 | 試験区 | 測定高さ | 測定器 | サンプリング間隔 | 平均化時間 |
|-----------------|-----|---------|--------------------------------------|----------|-------|
| 温湿度 | ①② | 150mm | 温度湿度計 (TR-72U,T&D) | 1min | 10min |
| | ③④ | 500mm | | | |
| 表面温度 | ①② | 1000mm | 赤外線熱電対(ε=0.92) (Irt/c.3X,Exergen) | | |
| | ③④ | | | | |
| 黒球温度 白球温度* | ①② | 500mm | φ150mm 黒球,白球 温度計(TR-71U,T&D) | | |
| | ③④ | | | | |
| 日射量 反射日射量 | ①② | 200mm | アルベドメータ (PCR01,フリート) | | |
| | ③④ | 200mm | 長短波放射計 (CNRI,Kipp&Zonen) | | |
| 天空放射量 地表面放射量 | ③④ | 200mm | | | |
| 風速 | ②④ | 500mm | 微風速計 (6542,Kanomax) | | |
| 温湿度 | - | 1,200mm | 自動気象ステーション (MAWS201,VAISALA) | 10s | 10min |
| 風向風速 | | 2,000mm | | 1s | |
| 日射量 | | 1,000mm | | 10s | |

評価に用いた。測定期間終了後には、測定器を全て天然芝上に集め、一昼夜データを取得し、この時のデータを器差補正に用いた。

3. 測定結果

3.1 気象概況

Fig. 3は、気象ステーションで測定された気象状況を示す。日射量の推移から8月18日は一日を通しほぼ快晴、13, 14日は午後に雲が多く、19日は午前には雲が多かったことがわかる。また、14日は16時頃から一時的になわか雨が降った。いずれの日も日中の風向は概ね南（180°）が卓越し、1~2m/sの弱風が吹いていた。

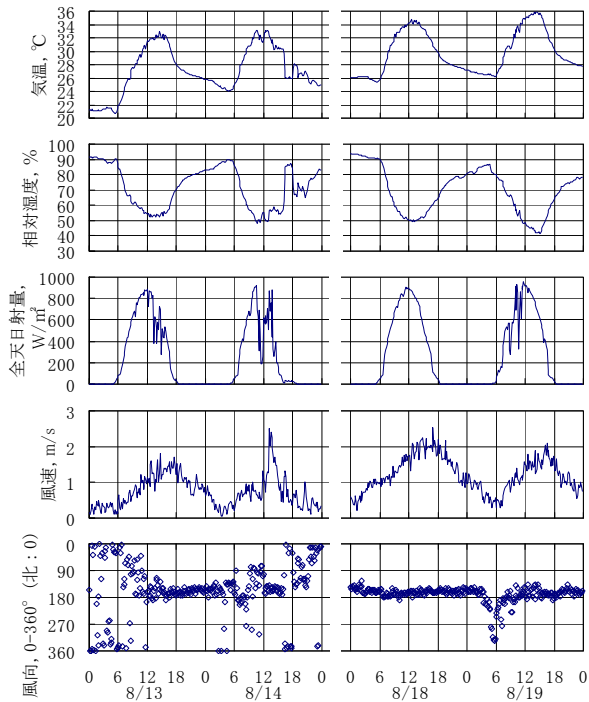


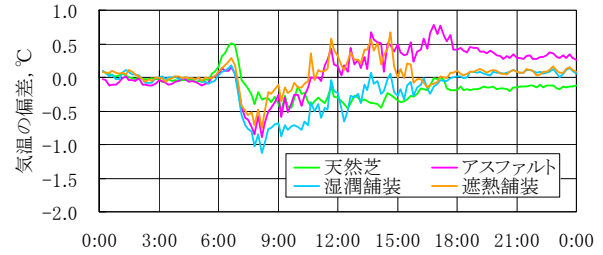
Fig. 3 測定期間中の気象状況
Meteorological Variables in the Observation Period

Fig. 4に、各試験区上50cmの位置で測定した(a)気温、および(b)絶対湿度の、気象ステーション(基準値:天然芝上1.2m)からの偏差(試験区-気象S)を示す。ここでは快晴日で風向の安定していた8月18日のデータを示す。変化の傾向は他のいずれの晴天日も同様であったが、風向が安定しない時間帯には変動のばらつきが大きく、空気の移流の影響が見られた。気温の偏差は、各試験区とも日の出とともに基準値よりも低くなっている。これは、通常、晴天日中では地表面に近いほど気温が高くなることから、気象ステーションのラディエーションシールドが試験区側のものと比べて不十分であり、日射の影響を受けていたためであると推測される。

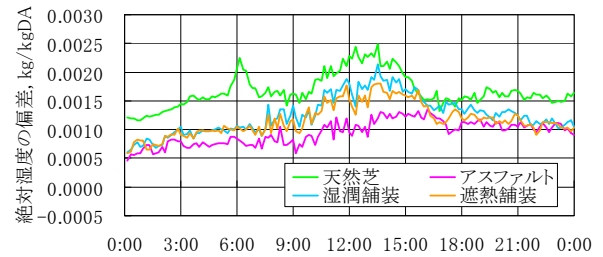
気温偏差の比較では、気温が高くなる正午から午後にかけては、アスファルトと遮熱舗装が高く、天然芝と湿潤舗装では低い。ただし15時以降はアスファルトのみ高温で、ほか3種類の試験区では基準値に近い変化を示した。

絶対湿度偏差の比較では、試験区の面積が大きい天然芝とアスファルトの間では、約0.001kg/kgDAの有意な差が日中に認められる。しかし、水蒸気の供給がないはずの遮熱舗装では、値がアスファルトよりも高くなっている。これは、南側の風上側にある植栽(Fig. 1参照)の蒸散の影響を受けているためと考えられる。

このように、試験区の面積が小さい湿潤舗装と遮熱舗装の気温と湿度については、フェッチが十分ではなく、必ず、試験区周囲の地表面の影響を受けてしまう。したがって、試験区の代表気温、湿度を規定することは困難である。ただし、後述の4.2節でのSET*の評価の際には、湿度について移流の影響を少なくする補正を行っている。



(a) 気温の偏差



(b) 絶対湿度の偏差

Fig. 4 気温偏差と絶対湿度偏差の経時変化
(8/18, 高さ50cm, 気象ステーション[高さ1.2m]基準)
Time Variations of Temperature and Absolute Humidity
Deviations from the Meteorological Station

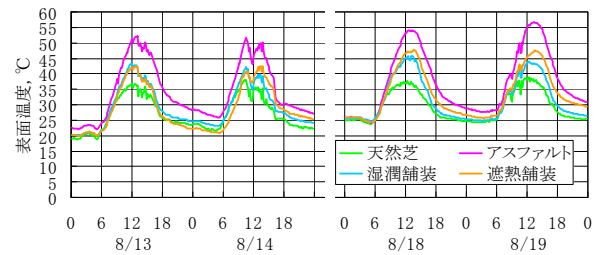


Fig. 5 表面温度の経時変化
Time Variations of Surface Temperatures

3.2 各試験区の測定結果

3.2.1 表面温度 Fig. 5は、非接触型の赤外線熱電対で測定した各試験区の表面温度の経時変化を示す。4日間共通して日中は、アスファルトが最も高温となり、天然芝が最も低温である。しかし、湿潤舗装と遮熱舗装に関しては、日によって異なる変化傾向を示した。湿潤舗装と遮熱舗装の表面温度差が気象条件の違いによって逆転していると考えられ、特に風速(Fig. 3参照)との関連が見られる。つまり、風速が相対的に大きい8月18日、19日は蒸発冷却が促進され、湿潤舗装の表面温度が低く、逆に、風速が小さい13日、および14日午前中には遮熱舗装の方が低い。風速が一時的に大きくなった14日、14時前後にはその傾向が顕著に見られた。また、表面温度のピークの出現時刻は、遮熱舗装とアスファルトは14時頃、湿潤舗装と天然芝は正午から13時頃となっていた。

上記のように、厳密に言うと、湿潤舗装と遮熱舗装の表面温度の関係は気象条件によって逆転することがあり、本研究で前提としているように常に同等とは言えないが、ヒートアイランド対策としての効果が同レベルであると

いう条件に対しては、おおよそ満たしているといえる。

3.2.2 日射反射率 Fig. 6は、8月19日の日射反射率の経時変化を示す。最も日射量が安定していた8月18日は、午前中に一部欠測期間があったので19日のデータを示したが、4日とも日射反射率に関してはほぼ同じ値を示した。なお、湿潤舗装と遮熱舗装の測定値は第2章に述べた方法で補正を行っている。天然芝を除いて、日中はほぼ一定の値を推移し、太陽高度の変化による日射入射角への依存性は小さかった。一方、天然芝は太陽高度が最高となる正午頃に最小値を示し、太陽高度が低いと大きくなる傾向がある。天然芝の場合、入射角の違いによって葉層内での多重散乱の状態が異なることや、近赤外域の反射率が高いこと等が影響しているものと考えられる。

Table 4は、各試験区の正午頃の日射反射率（11:30～12:30の4日間の平均値）を示す。アスファルトは施工後数年経過しており、色は若干色褪せた黒ではあるが、日射反射率は0.067と小さい値であった。湿潤舗装は、先述のように赤色であり0.106であった。一方、遮熱舗装は本実験用に施工したもので、近赤外域を含めた日射反射率では0.340であり、湿潤舗装の約3倍であった。

3.2.3 黒球温度 Fig. 7は、8月18日の高さ50cmで測定した黒球温度を示す。変化のしかたは4日間とも同様であった。日射反射率と同様に、湿潤舗装と遮熱舗装の値は補正してある。黒球温度の違いは、地表面からの反射日射量、上向き長波放射量の違いのほか、対流やふく射によって奪われる熱量の違いに影響される。朝方は天然芝上の値が比較的高く、10時過ぎから午後にかけて遮熱舗装上の値が最も高い。夕方以降はアスファルト上の値が最も高くなる。湿潤舗装と遮熱舗装では、常に湿潤舗装が1～5℃程度低いといえるが、時間帯によって4つの試験区の順位が入れ替わり、地表面の状態が黒球温度を絶対的に支配するとはいえない。

4. 各試験区の温熱環境

4.1 放射環境

Fig. 8は、8月18日の各試験区上の球体表面に入射する単位面積あたりの反射日射量と上向き長波放射量との合計を示す。ただし、各成分は球体の半球への入射を考慮して1/2としてある。18日は湿潤舗装の反射日射量が8:30まで欠測であったものの、4日間の中で1日を通して日射の変動が少なかった。反射日射量は地表面の日射反射率の違い、上向き長波放射量は地表面温度の違いを反映している。地表面の長波放射率は0.95と仮定した。球体への下向き放射成分は全ての試験区で同じなので、上向き2成分が各地表面上の放射環境の違いを表している。正午頃には、遮熱舗装では他の3者よりも100W/m²程度大きく、午後遅くから夕方以降を除いて球体に入射する放射量が最も大きかった。天然芝では午前中にピークが、アスファルトと湿潤舗装では午後にはピークが見られた。また、4日間を通して、日中は遮熱舗装が湿潤舗装を下回る

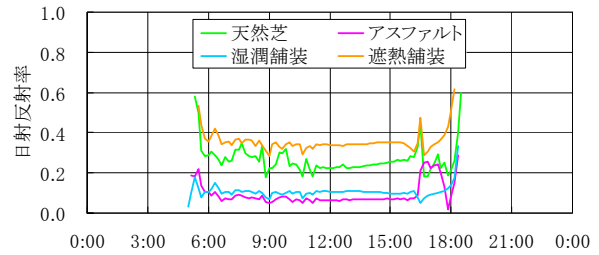


Fig. 6 日射反射率（補正後）の経時変化（8/19）
Time Variation of Reflectances of Solar Radiation

Table 4 正午頃の日射反射率（補正後）（4日間の平均）
Solar Reflectance around Noon

| 試験区 | 天然芝 | アスファルト | 湿潤舗装 | 遮熱舗装 |
|------------|-------|--------|-------|-------|
| 日射反射率（正午頃） | 0.229 | 0.067 | 0.106 | 0.340 |

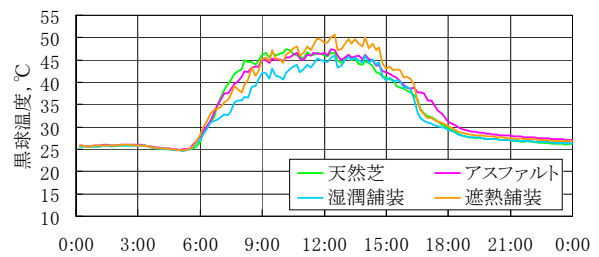


Fig. 7 黒球温度（補正後）の経時変化（8/18）
Time Variations of Globe Temperatures

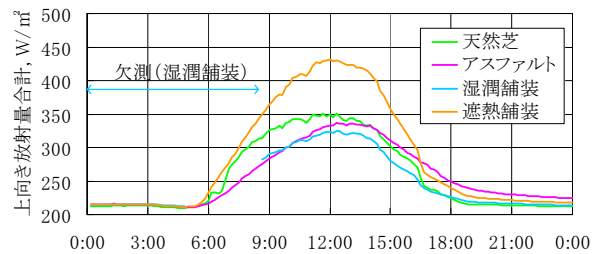


Fig. 8 球体の単位面積あたりへ入射する上向き放射量（反射日射量と長波放射量）の経時変化（8/18）
Time Variations of Sum of Upward Radiation from Ground Incident on Unit Area of Globe Surface

ことはなかった。

ここで、Fig. 7の黒球温度とFig. 8の上向き放射量とを比べると変化傾向が異なっていることがわかる。黒球温度を決定する要因としては、黒球に入射する放射量だけではなく、黒球から出て行く熱量、つまり、風速変動によって黒球から奪われる顕熱と、放射される長波放射量の違いに影響されている。したがって、黒球温度と上向き放射量との間のピーク時刻のずれや値の大小の違いは、午後には強まる傾向のある風速の影響が大きいものと考えられる。

Fig. 9は、Fig.8の9, 12, 15, 18時の上向き2成分に加えて、下向き放射量3成分（直達日射、散乱日射、天空放射）を重ねて示したものである。散乱日射量はErbs

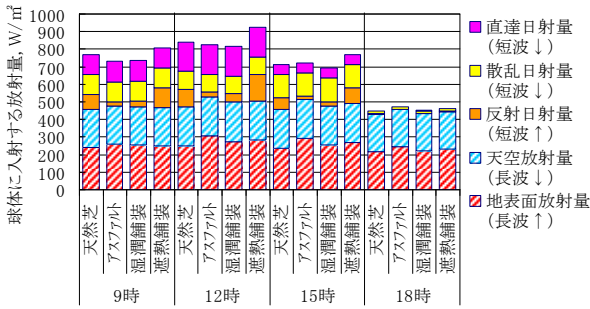


Fig. 9 球体の単位面積あたりへ入射する放射量 (8/18)
Incident Radiation on Unit area of Globe Surface

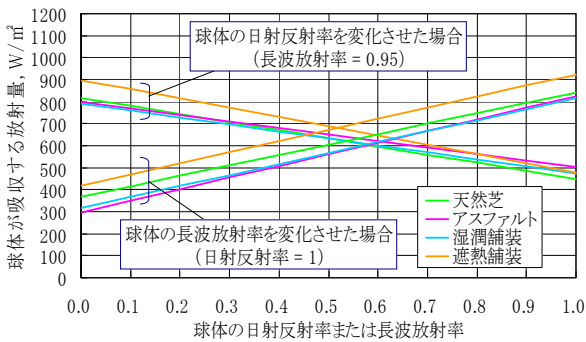


Fig. 10 高さ50cmにおける球体の日射反射率または長波放射率の違いによる吸収放射量の違い (8/18, 12:00)
Incident Radiation on Globe at 50cm Height by Difference of its Solar Reflectance or Emissivity

モデル¹⁶⁾を用いて算出した。下向き成分のうち、直達日射は球体の断面への入射を考慮して実際の1/4, その他の成分は上向き成分と同様に1/2とした。高さ50cmの位置にある球体に入射する単位表面積あたりの放射量は、正午に湿潤舗装が最小で815W/m², 遮熱舗装が最大で923W/m²であった。午前9時には、僅かではあるがアスファルトが最も小さい。午後には天然芝とアスファルトが逆転するものの、依然として湿潤舗装が最も小さく、遮熱舗装が最も高かった。18時には日射の影響がほぼ無くなり、長波放射の影響に支配され、蓄熱の大きなアスファルトが最も大きくなった。

図中で、短波放射を上段3成分、長波放射を下段2成分に示しているが、仮に、受け側となる球体の日射反射率、長波放射率が変化すると、それぞれ短波長成分、長波長成分が増減することとなり、その変化の幅は地表面の違いによる放射量の差と比べて大きくなると見られる。

Fig. 10は、8月18日12時における、球体の日射反射率、および長波放射率に対する、球体が吸収する放射量との関係を示す。日射反射率の変化に対しては、長波放射率を0.95と仮定、長波放射率の変化に対しては、日射反射率を1と仮定した。

球体の日射反射率の0~1.0の変化に対し、球体が吸収する放射量は最大で350~400W/m²変化するが、地表面の種類による差は最大で100W/m²程度である。一方、長波放射率の変化に対しても同様で、球体が吸収する放射量は

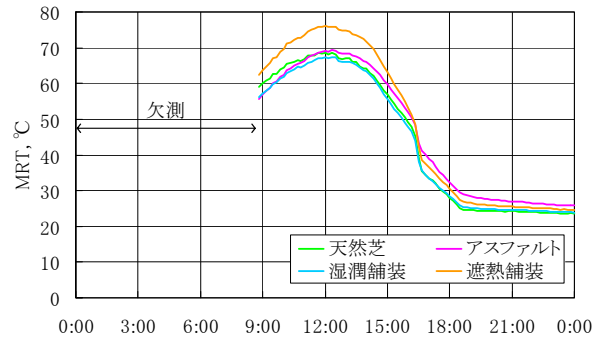


Fig. 11 長短波放射量から算出したMRTの経時変化 (8/18)

Time Variations of MRT Derived from Long- and Shortwave Radiation

最大で500W/m²程度変化するが、地表面の種類による差は、最大で120W/m²程度である。仮に、球体を人体で置き換えると、日射反射率は衣服の色に、長波放射率は衣服の材質に例えることができる。しかし、放射率の値が小さい衣服は一般的には考えにくく、現実には衣服の色、つまり日射反射率の違いが、地表面の違いよりも受け取る放射量にに対して影響が大きいといえる。勿論、この結果は地上高さ50cmの球体についてのものであり、人体の形状や、衣服と皮膚の日射反射率の違い等は考慮されていない。また、建物壁面等の地物に対する影響を考える場合には、受け側の長波放射率も重要な要素となる。

4.2 MRT, SET*の算出

SET* (標準新有効温度)¹⁷⁾を算出するためにまずMRT (平均放射温度)を算出した。Fig. 11は、8月18日の地表面から高さ50cmに設置した球体を対象とした、MRTの経時変化を示す。計算式と記号の意味は以下の通りである。

$$\varepsilon\sigma MRT^4 = (1-a) \left\{ \frac{I_d}{4} + \frac{I_s + a_p I_d}{2} \right\} + \frac{L_{sky} + \varepsilon\sigma T_p^4}{2} \quad (1)$$

a : 球体の日射反射率 a_p : 舗装面の日射反射率

I_d : 直達日射量(W/m²) I_s : 散乱日射量(W/m²)

L_{sky} : 天空放射量(W/m²) MRT : 平均放射温度(K)

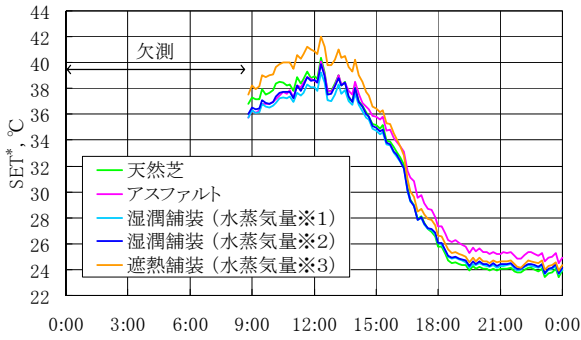
T_p : 舗装面の表面温度(K)

ε : 長波放射率(=0.95) σ : Stefan-Boltzmann定数

ここで、球体の日射反射率は、人体の日射反射率を模擬して0.29とした。地表面の日射反射率、直達日射量、天空放射量は測定値から、散乱日射量はErbsモデルを用いて算出した。日射を含む屋外のMRTについては熱取得の不均一性の問題が残るが、ここでは受け側を小球とみなして算出されたMRTをそのまま示す。

正午のMRTは67~76℃と日射の影響を受けて非常に高温であった。日変化のしかたは、各試験区の上向き放射量の違い (Fig. 8) とほぼ同様である。

Fig. 12は、式(1)から算出したMRTを用いて、2 node-modelによって計算したSET*である。着衣量は0.5clo、代



- ※1 水蒸気の影響は試験区3 (湿潤舗装) の面積のみの場合
- ※2 水蒸気の影響は試験区1 (天然芝) と同等の場合
- ※3 水蒸気の影響は試験区2 (アスファルト) と同等の場合

Fig. 12 SET*の経時変化 (8/18)
Time Variations of SET*

謝量は1.2metとした。屋外、または半屋外の日射下におけるSET*は、人間の温冷感と相関が高いことが複数の既往研究^{18) 19)}で示されており、温熱環境指標の中では最も適切であると考えられる。SET*の算出には各試験区上の湿度を必要とするが、3.1項で示したように、湿潤舗装と遮熱舗装では移流の影響を受けている。そこで、便宜的にアスファルト-遮熱舗装の絶対湿度差を周囲の影響と仮定し、湿潤舗装、遮熱舗装からそれぞれ差し引くことにより補正した。しかし、この仮定の場合、湿潤舗装の水蒸気の影響が、今回の実測に用いた大きさの試験区に由来するものに限られてしまう。したがって、水蒸気の影響を、湿潤舗装よりも加湿量が大きいと考えられる天然芝上で値に仮定した場合の結果も併せて示す。

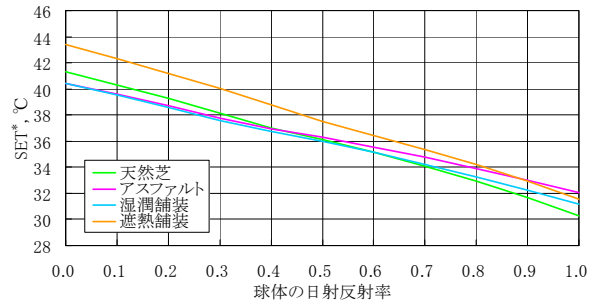
湿潤舗装の水蒸気の影響が試験区のみ (※1) と、天然芝同等 (※2) とした場合の差は最大で0.6°C程度であり、遮熱舗装と湿潤舗装とのSET*の差 (日中2.5~3°C程度) と比べて小さいことがわかる。そのため水蒸気量に対する周辺影響は小さいといえる。また、SET*で2.5~3°Cの差があることから、少なくとも高さ50cmの脚部の温冷感として、感ずることができる差異があるといえる。

Fig. 13は、8月18日、12時において、球体の日射反射率を変化させた時の各試験区上の高さ50cmにおけるSET*を示す。球体の日射反射率が変化しても、遮熱舗装上のSET*が湿潤舗装よりも1~3°C高い値を示すことがわかる。しかし、球体が吸収する放射量 (Fig. 10) と同様に、地表面の違いよりも球体の日射反射率の違いの方が支配的である。つまり、温熱快適性についても、衣服の色の方が、地表面の違いよりも影響が大きいことが示唆された。

5. まとめ

ヒートアイランド対策舗装工法である湿潤舗装と遮熱舗装に関して、同気象条件の下で、主に放射環境に着目して比較評価を行った。以下、結論を列挙する。

- 1) 日中の表面温度がほぼ同等となる湿潤舗装と遮熱舗装の放射環境を測定した結果、地上高さ50cmの球体



※ SET*の算出にあたり、相対湿度は各試験区の測定値を使用

Fig. 13 高さ50cmにおける球体の日射反射率の違いによるSET*の違い (8/18, 12:00)
SET* at 50cm Height by Difference of Solar Reflectance of Globe

に入射する上向き放射量は、日中、常に遮熱舗装が湿潤舗装よりも大きかった。また、ピークでの差異は100W/m²程度であった。

- 2) 湿潤舗装、遮熱舗装、天然芝、アスファルトの4種類の地表面材料の違いによって球体が受け取る放射量の差は最大で100W/m²程度であるが、球体の日射反射率の変化による放射量の差は350~400W/m²となり、受け側の条件の方が地表面の違いよりも支配的となることがわかった。
- 3) 人間の温冷感と相関が高いと言われるSET*を算出した結果、日中、遮熱舗装が湿潤舗装よりも最大で2.5~3°C高かった。ただし、地上高さ50cmでの評価であることから、少なくとも脚部の温冷感での両者の差異があるといえる。
- 4) 湿潤舗装は、アスファルトや天然芝と比較しても舗装上の人間の温熱環境を悪化させる可能性はないと判断できた。しかし、遮熱舗装は、歩行空間に限ってみると放射場の強化をもたらし、歩行者の温熱環境を悪化させる可能性を持っている。
- 5) 湿潤舗装は、特に放射環境の面から温熱環境を改善する効果を持つが、一方で、衣服の色の調整の方が温熱環境改善には効果があることが示唆された。

参考文献

- 1) 赤川宏幸, 小宮英孝: 蒸発冷却を利用した舗装システムの開発 その3 被験者実験による温熱環境評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 387~388, 2000
- 2) 梅田和彦, 深尾仁, 並木裕, 内池智広, 長瀬公一: 太陽光発電による給水方法を用いた保水性舗装に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集 No. 605, pp. 71~78, 2006.7
- 3) 若間賢志, 西岡真稔, 鍋島美奈子: 高反射性舗装の形成する街路空間の熱環境 (その1) 表面温度・放射の実測と作用温度の計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 689~690, 2003

- 4) 露木拓哉, 村田泰孝, 村瀬俊和, 三木勝夫, 酒井孝司, 松尾陽: 太陽熱高反射塗料の日射熱防除効果(その4) 遮熱舗装の温熱環境への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 147~148, 2006
- 5) 森川泰成, 村上周三, 大黒雅之, 持田灯, 足永靖信, 大岡龍三, 吉田伸治: 住宅団地を対象とした各種屋外温熱環境改善効果の効果に関するCFD解析(その2) 舗装面の高反射塗料および壁面緑化の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 623~624, 2003
- 6) 阿部有希子, 大木泰祐, 天明望, 近藤靖史: 放射連CFD解析による高反射率舗装上の人体温熱感の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 673~674, 2006
- 7) 上田淳也, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 君島健之: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 45~48, 2005
- 8) 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 No. 530, pp. 79~85, 2000. 4
- 9) 峰岸順一, 小林一雄, 竹田敏憲: 保水性舗装の路面温度低減機能の持続性と路面性状, 東京都土木技術研究所年報, pp. 75~86, 2004
- 10) 小林一雄, 峰岸順一, 竹田敏憲: 遮熱性舗装の路面温度低減効果と供用性能 民間との共同実験による検討, 東京都土木技術研究所年報, pp. 87~98, 2004
- 11) 白井一義, 下山善秀, 梶尾聡, 孔永健: ポーラスコンクリート舗装のヒートアイランド緩和効果に関する基礎的検討, 第53回セメント技術大会講演要旨, pp. 348~349, 1999
- 12) 山下要裕, 鍋島美奈子, 西岡真稔, 津郷俊二: 保水性舗装材の熱的性能に関する実験 その3 潜熱輸送量の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 693~694, 2003
- 13) 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 No. 20, pp. 187~190, 2004. 12
- 14) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史, 板津佳恵: 蒸発冷却効果を有する舗装体の濡れ状態に着目した熱・水収支特性の把握 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その1, 日本建築学会環境系論文集 No. 600, pp. 51~58, 2006. 2
- 15) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史, 板津佳恵: 蒸発冷却効果を有する舗装体の濡れ状態に着目した熱・水収支特性の把握 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その2, 日本建築学会環境系論文集 No. 610, pp. 75~82, 2006. 12
- 16) 拡張アメダス気象データ 日本気象学会, pp. 340~346, 2000
- 17) Gagge, A. P., Fobelets, A. P., and Berglund, L. G.: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol. 92(2B), pp. 709-731, 1986
- 18) 石井昭夫, 片山忠久, 塩月義隆, 吉水久雅, 安部嘉孝: 屋外気候環境における快適感に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集 No. 386, pp. 28~37, 1988. 4
- 19) 中野淳太, 後藤邦彦, 野口真史, 下田利崇, 藤井浩史, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その5: 温冷感と物理環境の相関, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 391~392, 2002