

夏季に給・散水した保水性舗装の 熱環境緩和特性に関する実験的研究

福田萬大¹・越川喜孝²・辻井豪³・浅枝隆⁴・藤野毅⁵

¹正会員 大成ロテック(株)技術研究所 (〒365-0027 埼玉県鴻巣市大字上谷1456)

²正会員 大成ロテック(株)技術研究所 (〒365-0027 埼玉県鴻巣市大字上谷1456)

³正会員 大成ロテック(株)技術研究所 (〒365-0027 埼玉県鴻巣市大字上谷1456)

⁴正会員 工博 埼玉大学助教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

⁵正会員 学博 埼玉大学助手 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

舗装の機能面から都市のヒートアイランド現象や道路周辺の熱環境を緩和するためには、土のように保水性を有する舗装が望ましい。保水性舗装材料として歩道用ブロックは既に実用化されているが、舗装面積の多くは車道が占めていることから、車道を対象とした保水性舗装を考案した。この舗装は、空隙率25%程度の開粒度アスファルト混合物に、保水性を有するセメント系グラウトを注入したものである。保水性舗装および歩道用保水性セラミックブロック舗装の夏季における舗装温度測定結果から、水が浸透した保水性舗装は土系舗装と同様の低い表面温度が得られ、この現象は保水性舗装から水の気化潜熱が奪われるためであることを熱収支計算により明らかにした。

Key Words : urban environment, heatisland, permeable pavement, thermal environment, mitigation for thermal environment

1. まえがき

都市域での熱環境は、必ずしも良好な状態にあるとはいえない。この原因の一つに地表面を覆う舗装があげられ、その意味で熱環境にやさしい舗装材料の開発は急務といえる¹⁾。

過去にアスファルト舗装体の内部温度分布などに関する研究は行われているが^{2), 3), 4)}、熱環境を考慮した舗装材料の開発について有用な情報を与える実験としては、Dollら⁵⁾、成田と関根⁶⁾、浅枝と藤野⁷⁾、AsaedaとCa⁸⁾の研究などがあり、水密な舗装材料についてはほぼ解明されてきたといえよう。

地表面の舗装が問題となる理由はいくつかあげられる。

まず、舗装表面温度の上昇がある。夏の昼間にアスファルト舗装の表面温度が60℃程度まで上昇することはよく知られた事実であるが、熱せられた路面から大量の熱が大気に顕熱として輸送され、浅枝と藤野の測定⁹⁾では最高350W/m²程度にも達している。

次に、高い舗装表面温度のために、路面から射出される赤外放射量も膨大なものになる。赤外放射の場合には、大気からと路面からの赤外放射量の差で考えなければならないが、それでも最高230W/m²程度路面からの赤外放射量が多くなる。この赤外放射は通行する人に直接吸収される^{10), 11)}だけでなく、大気の接地境界層内で水分や二酸化炭素に吸収され、これが無視できない値になっていることもAsaedaらによって示されており^{12), 13)}、大気の加熱にも大きな割合を占めているといえる。

最近、都市内散水や保水性を有する舗装材料の有効性が提示され^{14), 15)}、今後、都市内に自然な地面に近い状況を作り出すための一つの方向を示している。

これは、舗装やその下の路床内に蓄えられた水分の蒸発と大きい熱容量を利用して、舗装体の温度上昇を防ごうというものである。雨水を速やかに路盤以下に排水しようとする透水性の舗装は、舗装表面温度がすぐ上昇してしまうが、土のような間隙を持つ舗装材料であれば、吸水した水分を長く保持でき

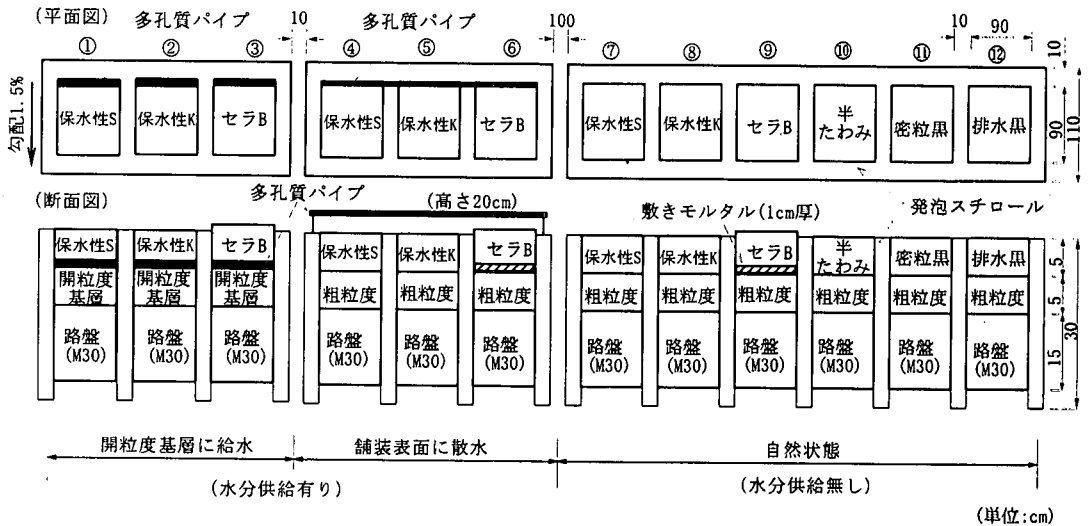


図-1 各舗装サンプルの配置

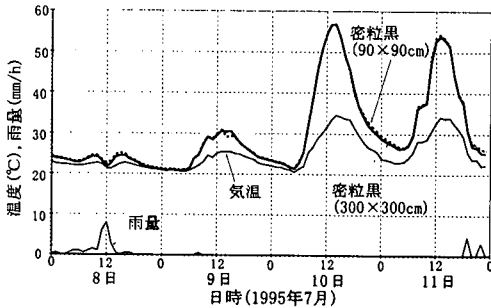


図-2 舗装サンプル大小の路面温度比較

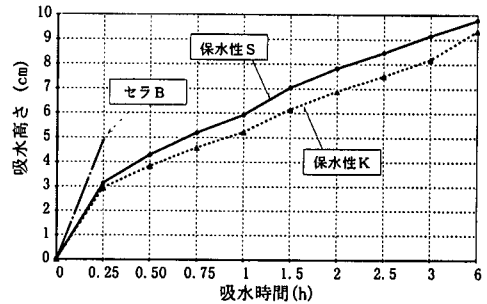


図-3 保水性舗装材の吸水時間と吸水高さの関係

という特性をいかしたものである^{16), 17), 18), 19)}。

本論文では、このような背景のもと、舗装面積の大部分を占める車道の舗装表層材として考案した保水性舗装に、給水もしくは散水を行って、その熱的効果を実験的に調べた結果を示し考察を加えた。

2. 舗装サンプルの概要および実験方法

(1) 試験舗装の構築

a) 舗装サンプルの配置

図-1に示す12種類の舗装を選定し、1997年7月に屋外実験場(埼玉県鴻巣市)で、平面寸法90×90cm(舗装表面勾配=1.5%)の各舗装サンプルを構築した。また、比較用として過去の実験¹⁹⁾で使用した土系舗装(関東ローム、厚さ15cm)も使用した。

人工的に給水または散水する区間の舗装サンプルには、半たわみ性舗装用開粒度アスファルト混合物の空隙に砂岩系シルト材を注入した保水性半たわみ

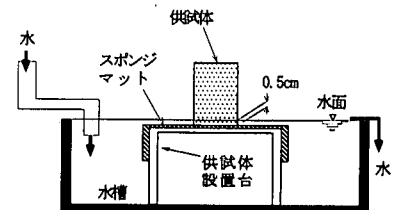


図-4 吸水性試験装置の概要

系舗装(暗灰色、以下、保水性Sと記す)、珪石系シルト材を注入した保水性半たわみ系舗装(白色、以下、保水性Kと記す)および歩道用の保水性セラミックブロック舗装(淡茶色、以下、セラBと記す)の6種類の舗装サンプルを設けた。

また、自然状態に保つ区間には保水性S、保水性K、セラBのほか、半たわみ性舗装²⁰⁾(灰色、以下、半たわみと記す)、密粒度アスファルト舗装(黒色、以下、密粒黒と記す)、排水性アスファルト舗装(黒色、以下、排水黒と記す)の6種類の舗装サンプルを設けた。

表-1 アスファルト系舗装材料の主な性状

| 項目 | 種類 | 密粒黒 | 排水黒 | 粗粒度 | 開粒度 |
|----------------------|----------------------------|------------------|--------|-------|-------------|
| | | アスコン | アスコン | アスコン | アスコン |
| 最大粒径 (mm) | | 13 | 13 | 20 | 13 |
| バイ ンダ | 種類 | ストレートアスファルト60~80 | | | |
| | バインダ量 (%) | 5.4 | 4.2 | 5.0 | 4.2 |
| | アラトミックス改質剤添加率 | - | 高粘度 7% | - | 改質II型 4% |
| マー シャル 試験 | 供試体密度 (g/cm ³) | 2.423 | 2.006 | 2.363 | 1.944 |
| | 空隙率 (%) | 3.4 | 21.8 | 6.7 | 24.6 |
| | 安定度 (KN) | 8.4 | 6.3 | 9.7 | 3.9 |
| 使用層と 舗装サンプ ル番号 | 表層 | ⑪ | ⑫ | - | ①②④⑤⑦ ⑧⑩ |
| | 基層 | - | - | ④~⑫ | ①②③ |

表-2 半たわみ性舗装用注入材料の配合

| 注入対象 の舗装 サンプル | 水セ メント 比 W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | Pロ- ト 70-値 (秒) | 圧縮強 度σ _c (N/ mm ²) |
|---------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|--|
| | | 水 W | 普通 セメント C | SBR系 アックス C | | |
| 半たわみ ⑩ | 55 | 552 | 1103 | 99 | 9.8 | 16 |

(注) 圧縮強度試験用の供試体寸法は4×4×4cm

表-3 セラミックブロックおよび土系の性状

| セラB (③, ⑥, ⑨) | | | | |
|---------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|----------------------------------|
| ブロック の寸法 (cm) | 見かけ 密度 (g/cm ³) | 空隙 率 (%) | 最大 吸水率 (%) | 曲げ 強度 (N/mm ²) |
| 30×15×5 | 1.65 | 35 | 19 | 16 |
| 土系 | 自然含水比 約80%(関東ローム) | | | |

表-4 保水性注入材の配合および保水性半たわみ系舗装材の性状

| 注入対象の 舗装サンプル | 種類 | 水結合 材比 W C+H (%) | 微粉末 セメント比 S C+H | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | Pロ- ト 70-値 (秒) | 空気 量 (%) | 硬化後 | |
|-----------------|-----|---|--------------------------|--------------------------|-----------------|--------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------|-------------------------|----------------|----------------------|--|
| | | | | 水 W | 普通 セメント C | 急硬 材 H | 砂岩 系シリ ト材 S | 珪石 系シリ ト材 K | 凝結 遅延 剤 | 高性 能減 水剤 | | | 最大 吸水 率 (%) | 圧縮 強度 σ _c (N/mm ²) |
| 保水性S ①, ④, ⑦ | 注入材 | 296 | 4.0 | 625 | 188 | 23 | 845 | - | 1.90 | 6.34 | 10.8 | 0.7 | 44.2 | 1.2 |
| | 舗装材 | マ-シャル安定度 7.3(kN), 動的安定度 6500(回/mm)以上 最大吸水率 10.8% | | | | | | | | | | | | |
| 保水性K ②, ⑤, ⑧ | 注入材 | 285 | 4.0 | 605 | 189 | 23 | - | 850 | 1.91 | - | 10.9 | 0.1 | 46.3 | 1.1 |
| | 舗装材 | マ-シャル安定度 7.5(kN), 動的安定度 6500(回/mm)以上 最大吸水率 10.4% | | | | | | | | | | | | |

(注) 舗装材とは保水性注入材を開粒度アスコンに注入したもの、圧縮強度試験用の供試体寸法は4×4×4cm

表層厚はいずれも5cmであるが、セラBのみは敷きモルタル(1cm厚)を基層上に設けてブロックを固定した。

隣接する舗装サンプルおよび周辺地盤からの伝熱の影響を避けるため、各舗装サンプルの周囲には発泡スチロール(厚さ10cm)を表面から深さ30cmまで設置して断熱した。また、水分供給区間と自然状態区間との間の境界層の影響を緩和するため、両者は1m以上離して配置した。この区間で舗装表面から大気に与えられる顕熱輸送量は、地面である場合に比べて最大で約30W/m²多くなる。これは実験区間全体でも約0.5℃の気温上昇にしか相当せず、風下方向に境界層が変化する影響はほぼ無視できると考えられる。

なお、著者らは厚さ10cmの発泡スチロールを用いて深さ30cmまで断熱した場合、平面寸法300×300cmの舗装サンプルについては、舗装サンプル周囲の熱や水分の影響が無視できることを確かめている¹⁹⁾。

しかし平面寸法を90×90cmと小さくした場合の影響は明らかでないため、密粒黒および排水黒のアスファルト混合物(以下、アスコンと記す)を対象に、90×90cmと300×300cmの路面温度時刻変化を降雨日および晴天日を含む4日間(1995年7月8~11日)について比較した。

図-2に密粒黒の比較結果を示すが、同時刻における両者の表面温度差は最大1℃程度と極めて小さく、降雨の影響を受けやすい排水黒においても全く同様の結果が得られていることから、平面寸法を90×90cmとしても舗装サンプル周囲の熱や水分の影響は無視できると判断した。

b) 使用材料の主な性状

各舗装構成層使用材料の主な性状を表-1~4に示す。開粒度アスコンには、水に対するアスファルトのはく離対策として改質アスファルトII型を使用し、路盤材は粒調碎石(M30)を用いた。半たわみおよび保水性半たわみ系の舗装用注入材は、Pロ-トによる目標フロー値を10~11秒程度とした^{10), 21), 22)}。

使用した舗装材(保水性S、保水性KおよびセラB)の吸水高さの経時変化を図-3に示す。吸水高さの測定は、図-4に示す吸水性試験装置を使用し、供試体高さ×(各吸水時間の吸水重量/最大吸水重量)として求めた。図から、舗装サンプルの表層全厚(5cm)に水が吸水する時間は、保水性Sが45分、保水性Kが60分、セラBが15分程度と予想される。

保水性舗装材の性状は、表-4に示すように車道の表層用アスファルト混合物として要求されるマ-シャル安定度(4.9kN)および動的安定度(1500回/mm)²⁰⁾を満足しており、車道舗装材としての性状も

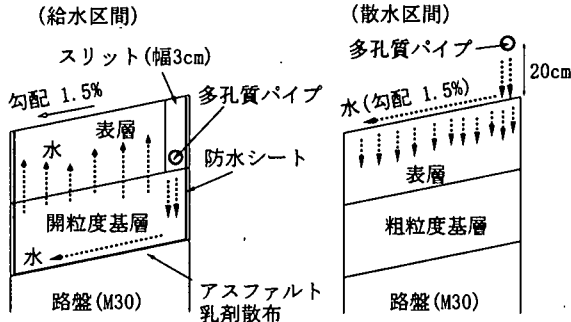


図-5 水分供給状態の概念図

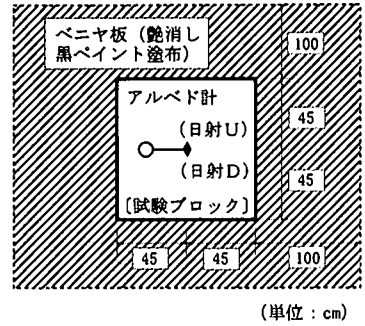


図-6 アルベドの測定方法

1年以上実際に供用して確認している。

c) 水の供給方法

舗装サンプルの水分供給には、プログラム式自動灌水装置を取り付けた水道ホースを、水分供給区間に設置したゴム系の多孔質パイプ²³⁾につないで行った。

水分の供給は図-5に示すように舗装表面勾配の高い側から行い、舗装サンプル端部に設けた溝(幅3cm)から開粒度アスコン基層(水分貯留層)に給水する方法および舗装表面(高さ20cm)から散水する方法の二つの方式をとった。

水分貯留層を設けた舗装サンプルには、路盤面にアスファルト乳剤(PK-3)を $3\ell/m^2$ 散布し、基層および表層の側面は瀝青系防水シートで止水した。

1回の水分供給量は各舗装サンプルとも10分間に約 5ℓ とし、給・散水時間は3時間ごと(7, 10, 13, 16時の4回/日)として舗装温度の測定を行った。約 5ℓ の水分供給量は保水性舗装の表層5cmを水でほぼ飽和させることのできる水量である。

なお、給・散水を行った水の温度は約 30°C である。これは保水性舗装の温度を基準とした場合、負の熱量を供給したことに相当する。しかし、この負の熱量を給・散水した時間に均等に配分すると $10\text{W}/\text{m}^2$ 程度となり、これは他の熱輸送の成分と比較して無視できる量である。

(2) 温度等の測定方法

a) 舗装の温度測定および気象観測方法

舗装の温度は熱電対温度計(タイプT)を用い、セラBが舗装表面から10と40mm(表層)、85mm(基層中央)、185mm(路盤中央)の深さに、他は全て10と40mm(表層)、75mm(基層中央)、175mm(路盤中央)の深さに温度計を埋設し、30分間隔で測定した。

なお、空隙率の大きい排水黒および開粒度アスコン基層については、熱電対の受感部を粗骨材中に埋

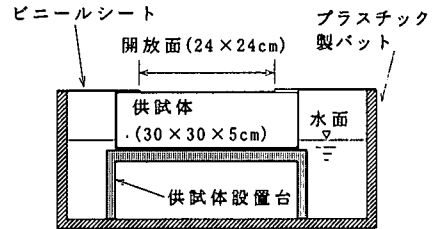


図-7 蒸発量の測定方法

め込み、セメントペーストで固定した。また、同時に土系舗装の表面から1cmの深さにおける温度も測定した。

気象観測は、百葉箱中で熱電対温度計(タイプT)およびサーミスタ湿度計(ヴァイサラ社製, HM W20UB)により地上約1.5mの高さにおける気温、湿度を、また、転倒ます型雨量計および三杯式風速計(高さ1.5m)により30分間の降雨量および平均風速を測定した。

これらの測定値は、1997年7月末から30分間隔でデータロガー(江藤電気社製, サーマダックE)に取り込んだ。

b) 全天日射量・赤外放射量・アルベドの測定方法

舗装温度の測定と同じ時刻に、上空からの全天日射量および赤外放射量を、アルベド計(英弘精機社製, MR-22)および赤外放射計(英弘精機社製, MS-200)により30分間隔で測定した。

また、雲量の比較的小さい晴天日(1997年10月22日11時30分~12時30分)において、上空からの全天日射量(日射U)および舗装表面からの日射反射量(日射D)を、図-6に示す各舗装サンプル中央部、高さ20cmの位置で測定した。この際、断熱用発泡スチロールや隣接する舗装からの反射を防ぐため、艶消し黒ペイントを塗布したベニヤ板で、測定する舗装サンプルの周囲1mを覆った。

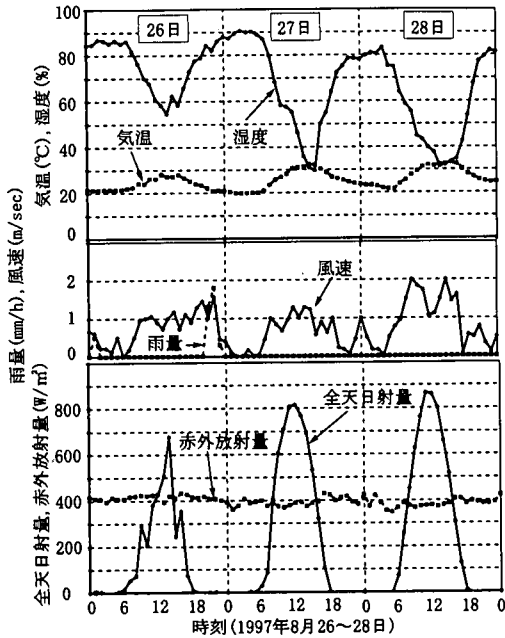


図-8 気象データおよび全天日射量，赤外放射量

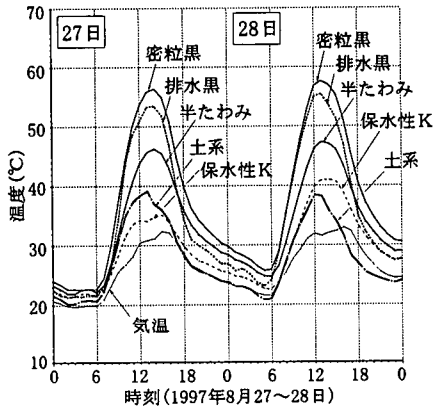


図-9 舗装表面温度の時刻変化 (自然状態)

舗装表面のアルベドは、同時刻における舗装表面の日射反射量 (日射D) を全天日射量 (日射U) で除して求めた。

c) 蒸発量の測定方法

保水性S、保水性KおよびセラBについて30×30×5cmの供試体を作製し、図-7に示すように供試体底面から吸水した水が24×24cmの開放面から蒸発するよう、供試体周囲の水面をビニールシートで覆ったプラスチック製バットおよび水のみを入れたバットを屋外に静置した。

供試体および水の蒸発量は、9時および17時にバットの重量を測定し、その重量差から蒸発量 (mm

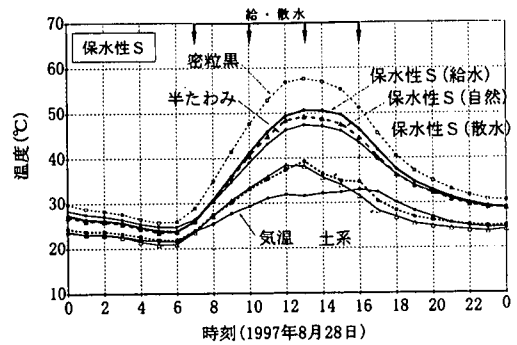


図-10 舗装表面温度の時刻変化 (保水性S)

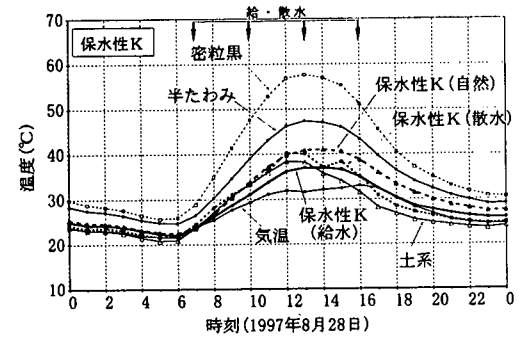


図-11 舗装表面温度の時刻変化 (保水性K)

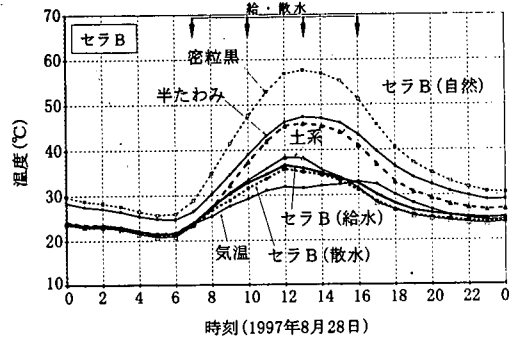


図-12 舗装表面温度の時刻変化 (セラB)

/h) を求めた。また、比較のために大型蒸発計²⁴⁾ (φ120cm) による蒸発量も測定した。

3. 保水性舗装の温度等測定結果

観測した夏季のデータから、1997年8月26~28日の気象、全天日射量、赤外放射量の時刻変化を図-8に示す。8月26日は夜間に弱い降雨 (約2mm) があり、27~28日は晴天で全天日射量は最大800W/m²以上の強い日射量が観測された。

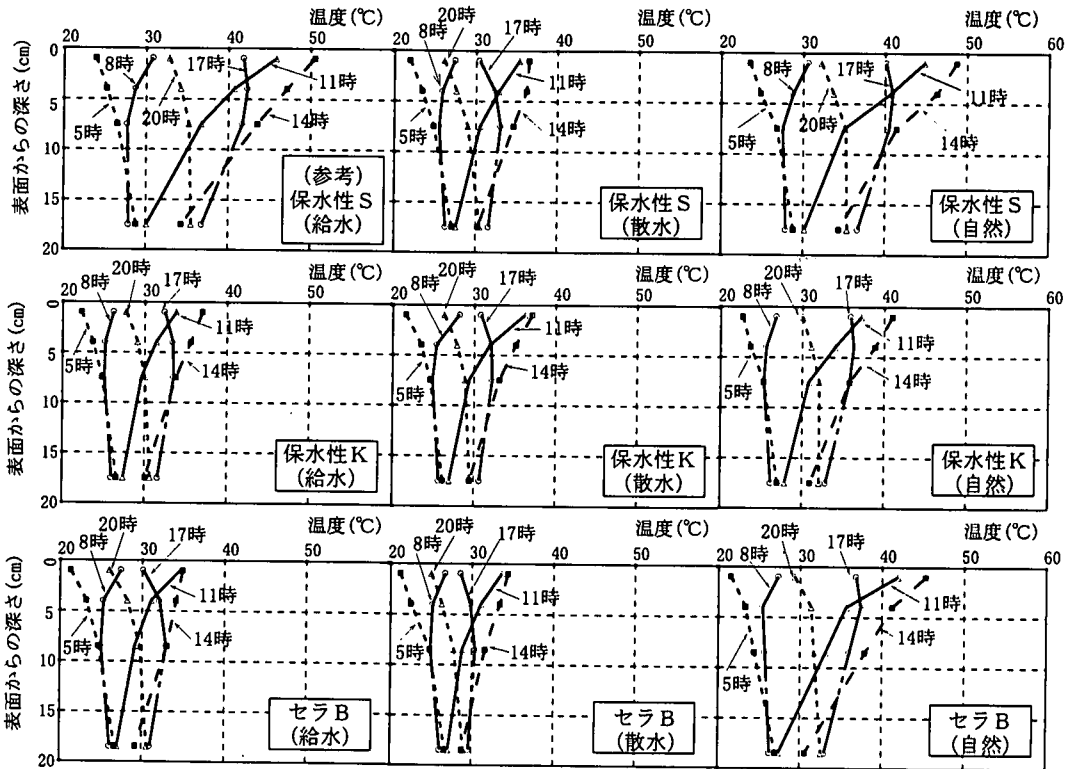


図-13 保水性舗装の深さ方向温度変化
(1997年8月28日)

(1) 舗装温度の測定結果

a) 舗装表面温度の時刻変化

8月27～28日の自然状態における密粒黒、排水黒、半たわみ、土系、保水性Kの舗装表面温度を気温とともに図-9に示す。

舗装表面の2日間における日最高温度は、密粒黒が56～58℃、排水黒が53～55℃と高く、半たわみが46～47℃でこれに次いでいる。保水性Kは36～42℃であり、土系は38～39℃でほとんど変化がない。

27日から28日にかけての最高温度を比べた場合、土系はほとんど変わらないのに対し、同じ保水性を有する保水性Kは約6℃高い。これは、保水性Kの保水量が土系よりも少ないことによると考えられる。

次に、給水および散水状態（以下、給・散水と記す、給・散水の時刻：7、10、13、16時）と自然状態（以下、自然と記す）における保水性舗装の8月28日の表面温度時刻変化を図-10～12に示す。図には参考として、自然における密粒黒、半たわみ、土系の表面温度および気温も同時に示した。

保水性S（図-10）の最高温度を見ると、散水は自然（約50℃）より約10℃低い温度を示しているが、給水は自然とほぼ同じである。

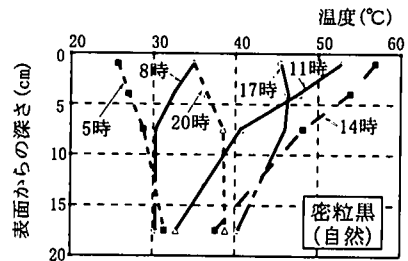


図-14 密粒黒の深さ方向温度変化(1997年8月28日)

保水性Sの給水が自然とほぼ同様の高い温度であった理由は、路盤面および水分貯留層の機能を期待した開粒度アスコン基層側面の止水が十分ではなかったため、水の吸水がほとんど行われなかったことによると考えられるので、保水性S（給水）は本節の考察対象から外す。

保水性K（図-11）については、自然の最高温度が低い（41℃）だけでなく、給・散水は土系とほぼ同じで格段に低い（37～39℃）。また、セラB（図-12）については、自然の最高温度が最も高く（約46℃）、給・散水はそれより約10℃低い。

このように、給・散水にかかわらず保水性舗装に保水させれば、表面温度は自然の土系とほぼ同程度に下げることができることが分かる。また、表面温

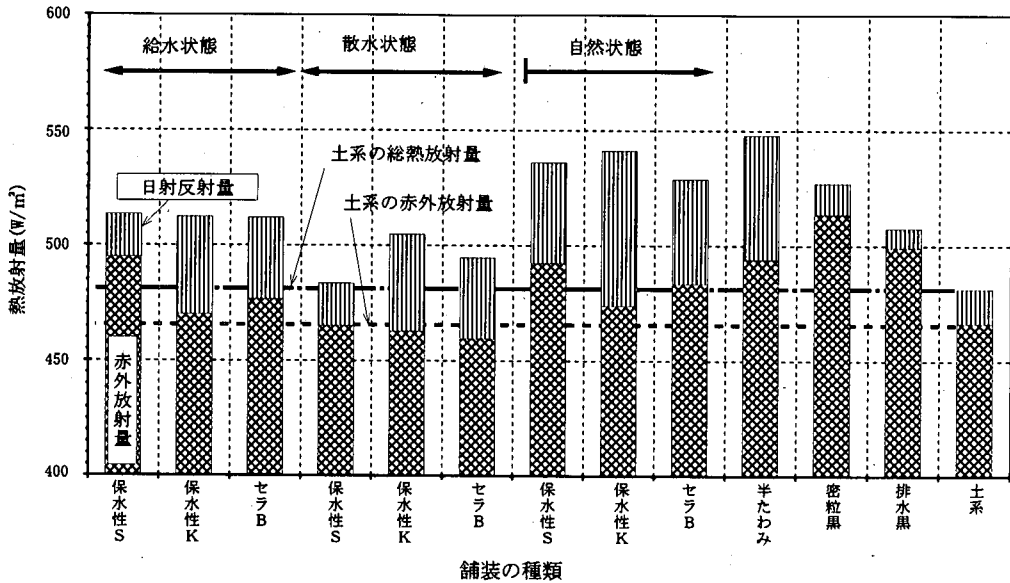


図-15 夏季日中(7~19時)における舗装表面からの総熱放射量(1997年8月の平均値)

度の時刻変化も土系とほぼ同様の曲線となることが示され、舗装周辺の熱環境緩和に一つの示唆を与えている。

ただし、夕方には給・散水した保水性舗装より土系の方が温度の低下がやや早い。これは、土系の含水量が最も多く、続いてセラB・保水性Kとなっていたために地中の温度がその順で低く、気温が低下していく夕方の時間帯になって、地中温度の差が現れたのではないかと推測される。しかし、これから生ずる赤外放射量の差は約 10W/m^2 で、無視できる程度と考えられる。

b) 舗装の深さ方向温度変化

5~20時における3時間ごとの保水性舗装および密粒度の深さ方向温度変化を、図-13~14に示す(給・散水時刻:7, 10, 13, 16時)。

表面温度が最も高い14時における深さ方向の温度変化を見ると、土系と同程度のアルベドを示す保水性S(散水)の温度勾配は、自然と比較し格段に小さく、しかも、図-10から分かるように表面温度は土系とほぼ同程度である。保水性KおよびセラBも、自然が最も大きい温度勾配であるのに対し、給・散水の温度勾配は小さく表面温度も低い。

また、夕方17時の温度変化を見ると、保水性S(散水)、保水性KおよびセラB(給・散水)は、表面温度が路盤(約18cm下)の温度と同じか低く、熱流は下向きから上向きに変わったことを示している。これに対し、同時刻の自然は表面温度の方が路

盤の温度より高く、まだ熱流は下向きである。

このことから、給・散水した保水性舗装は一見熱を大気中に放熱しているようだが、まだ気温の方が表面温度より高く、顕熱輸送は大気から舗装面に向けて行われ、舗装面が大気を加熱することはない。これは、14時での比較でも分かる通り、日中の蓄熱量が自然より少なく、表面温度が低いためにこのような現象が生じている。

次に、自然状態について、保水性舗装(図-13)と密粒黒(図-14)の深さ方向の温度変化を比較すると、日の出直後の朝5時における温度勾配は、いずれの舗装も約 $1^\circ\text{C}/3\text{cm}$ と変わらない。しかし、3時間後の8時には密粒黒が基層(約8cm下)から表面にかけての温度勾配が大きくなり、表面温度も 35°C と高くなるのに、保水性S・保水性KおよびセラBともに温度勾配はまだ小さく、表面温度もほぼ 30°C 以下である。

これは、水分があまり含まれない自然状態の場合でも、空隙率の大きい舗装は、舗装より低温の大気との間で空気の交換があり、舗装体内の表面近傍での温度を低下させている効果と考えられる。図-9に示すように、アルベドや材質がほぼ等しい排水黒が密粒黒よりやや低い舗装表面温度を示すのも、同様な効果によると思われる。

このように空隙率が大きいということだけでも、舗装温度を低下させるという効果が期待できる。

表-5 各表層面のアルベド

| 表層材名 | | アルベド測定値 | |
|---------------|-----|-----------------|------------------------------|
| | | 1997年 10月22日 | 1993年 9月6日 ¹⁹⁾ |
| 保水性S (暗灰色) | 乾燥面 | 0.26 | — |
| | 湿潤面 | 0.11 | — |
| 保水性K (白色) | 乾燥面 | 0.40 | — |
| | 湿潤面 | 0.25 | — |
| セラB (淡茶色) | 乾燥面 | 0.27 | — |
| | 湿潤面 | 0.21 | — |
| 半たわみ | | 0.32 | — |
| 密粒黒 | | 0.08 | 0.07 |
| 排水黒 | | 0.05 | 0.05 |
| コンクリート | | — | 0.44 |
| 土 | | — | 0.09 |

(2) 舗装表面からのアルベド・熱放射量測定結果

各舗装サンプルのアルベドを測定した結果を表-5に示す。表には、参考として1993年に舗装サンプル寸法300×300cmについて測定した福田らによる測定結果¹⁹⁾もあわせて示した。

表-5から明らかなように、密粒黒および排水黒のアルベドが2回の測定結果ともほぼ同じであることから、今回のように舗装サンプルの周囲をマスキングする測定方法によれば、舗装サンプルの平面寸法を90×90cmと小さくした影響を無視できるといえる。

保水性舗装の乾燥面のアルベドは、保水性Kが0.40と最も大きく、保水性SおよびセラBがほぼ同じ0.26~0.27でこれに次いでいる。ところが、湿潤面では表面の色が濃くなるため、アルベドは保水性Kが0.25、保水性Sは0.11、セラBが0.21といずれも小さくなっている。

1997年8月の日中(7~19時)における、舗装表面からの総熱放射量(日射反射量+赤外放射量、8月平均値)を図-15に示す。ここで、日射反射量は全天日射量に表-5のアルベド(給・散水の保水性舗装は湿潤面の値)を乗じて計算した。

各舗装の自然状態における総熱放射量は、アルベドが大きいことから日射反射量の大きい半たわみ・保水性Kが、黒色の密粒黒・排水黒より大きい値を示しており、土系は最も小さい。また、散水状態の総熱放射量は、保水性Sが土系とほぼ同様の小さい値を示している。

夏季の舗装周辺への熱放射環境を緩和するためには、舗装表面温度を低くするとともに、アルベドの小さい舗装材料を選択することも考慮に加える必要がある。

(3) 蒸発量の測定結果

屋外供試体による水の蒸発量測定結果を表-6に示す。同じ日の日中(9~17時)における屋外蒸発量

表-6 屋外供試体の蒸発量(1997年9月)

| 測定項目 | | 蒸発量測定値(9~17時) | | |
|-------------------------|------|---------------|------|------|
| | | 2日 | 3日 | 4日 |
| 蒸発量 (mm/8h) | 保水性S | 5.8 | 5.2 | 3.5 |
| | 保水性K | 3.5 | 2.7 | 2.1 |
| | セラB | 4.0 | 3.0 | 2.1 |
| | 水面 | 4.9 | 4.6 | 3.2 |
| 平均気温(°C) | | 31.9 | 32.1 | 28.3 |
| 平均湿度(%) | | 49.1 | 50.4 | 58.7 |
| 平均風速(m/s) | | 1.5 | 1.4 | 1.8 |
| 総日射量(W/m ²) | | 8146 | 8242 | 6021 |

を比べると、保水性S、セラB、保水性Kの順に蒸発量が多くなる傾向があり、特に、保水性Sは水面の蒸発量より1.1~1.2倍大きい蒸発量を示している。

屋外において保水性Sと保水性Kに大きな蒸発量の違いが見られたのは、主にアルベドの差によると考えられる。

すなわち、アルベドの小さい保水性Sの方が、アルベドの大きい保水性Kよりも日射吸収量が大きいため、水を蒸発させるための熱エネルギーが大きくなるためと思われる。

なお、参考として測定した大型蒸発計による蒸発量は、表-6の水面の蒸発量とほぼ同じであり、本実験の精度は十分なものであると考えられる。

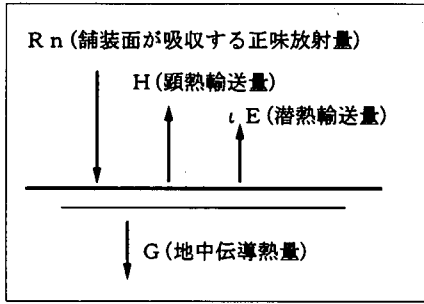
本実験における給水量であれば舗装表面は十分飽和に近い状態にあり、保水性舗装の蒸発量と水面からの蒸発量はほぼ近いことから、保水性舗装の必要給水量は大型蒸発計による気象台の蒸発量観測値を参考として、ある程度推測できると考えられる。このことは、今後各地で保水性を有する舗装を実用化する場合、必要給水量を気象台のデータを参考に決定できることを意味している。

4. 舗装表面における熱収支の検討

舗装内の熱移動は、原理的には水分および熱の移動を考慮した拡散方程式で再現が可能である¹⁹⁾。しかしながら、現象をより簡単にし理解を容易にするため、ここでは熱容量のみをもとにした解析方法で熱収支を見積りしてみる。

1997年8月28日の日中8時間(9~17時)に得られた1時間ごとのデータを用い、舗装サンプルの舗装面における単位時間(1時間)、単位面積(1m²)の熱収支を、水の蒸発量に注目して以下のように考える。

図-16に示すように、舗装面が吸収する正味放射量(R_n)を(1)式で表す^{20), 21)}。なお、正確には給・散水した水(約30°C)の熱量を熱収支計算に含めるべきであるが、本実験における試算では最大でも10



(注) $R_n = H + lE + G$

図-16 舗装表面での熱収支

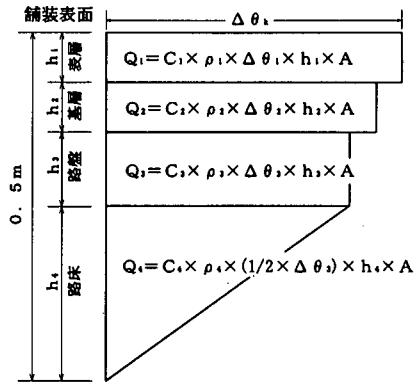


図-17 舗装貯熱量の計算モデル

表-7 計算に用いた比熱・密度

| 舗装材料の種類 (D:乾燥, W:湿潤) | 比熱 (kJ/kg/K) | 密度 (kg/m ³) |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|
| 密粒黒, 半たわみ, 粗粒度 | 0.9 | 2350 |
| 排水黒 | D 0.9 | 2000 |
| 開粒度基層 | W 1.1 | 2100 |
| 保水性S, 保水性K | D 0.9 | 1850 |
| " " | W 1.1 | 1950 |
| セラB | D 0.8 | 1650 |
| " " | W 1.2 | 1850 |
| 粒状材 (路盤, 路床) | 1.2 | 2200 |

W/m²程度 (地中伝導熱量の10%以下) であるので無視している。

$$(R_n =) S(1 - \alpha) + R_a - R_u = H + lE + G \quad (1)$$

式(1)を変形して整理すると, 水の蒸発に消費される潜熱輸送量 (lE) は式(2)となる。

$$lE = [S(1 - \alpha) + R_a] - (R_u + H + G) \quad (2)$$

ここで, l : 水の気化潜熱 (2453×10³J/kg), E : 蒸発量 (kg/m²/s = mm/s), S : 日射量 (W/m²), α : 舗装面のアルベド, R_a : 舗装表面が吸収する赤外放射量 (W/m²), R_u : 舗装表面が放出する赤外放射量 (W/m²), H : 顕熱輸送量 (W/m²), G : 地中伝導熱量 (W/m²).

式(2)の右辺のうち, S , α , R_a は実測値を用い, R_u はステファン・ボルツマン式 ($R_u = \epsilon \sigma T_s^4$, ϵ : 長波放射に対する射出率で1を使用, σ : 5.67×10⁻⁸ W/m²/K⁴, T_s : 舗装表面温度 K) で, 顕熱輸送量 H は式(3) (バルク式) で計算する。

$$H = C_a \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (3)$$

ここで, $C_a \rho$: 空気の体積熱容量 (1.21×10³J/K/m³), C_H : バルク輸送係数 (1.6×10⁻³を使用), U , T_a : 地上1.5mにおける風速 (m/s), 気温 (°C), T_s : 舗装表面温度 (°C) の実測値。

ただし, C_H は密粒黒および排水黒の蒸発量が0であることを満足する値をそれぞれ逆算して求め, その平均値を使用した。また, 表-7に示す各層の比熱

表-8 蒸発量の計算値と供試体測定値の比較

| 舗装の種類 | 蒸発量 (mm/8h) | | |
|-------|-------------|--------|-----|
| | 計算値 | 供試体測定値 | |
| 給水状態 | (保水性S) | (0.3) | 3.5 |
| | 保水性K | 1.9 | 2.1 |
| | セラB | 2.6 | 2.1 |
| 散水状態 | 保水性S | 3.2 | 3.5 |
| | 保水性K | 2.1 | 2.1 |
| | セラB | 3.3 | 2.1 |
| 自然状態 | 保水性S | -0.4 | (0) |
| | 保水性K | 0.0 | (0) |
| | セラB | 0.6 | (0) |
| | 半たわみ | -0.3 | (0) |
| | 密粒黒 | -0.5 | (0) |
| 排水黒 | 0.5 | (0) | |

(注) () は参考値であることを示す。

は, 乾燥(D)については実測値を使用し, 湿潤(W)および粒状材は含水量分を考慮し計算により推定した値を用いた。路床部は路盤と同様の材料を使用しているため路盤材と同じ値を使用した。地中伝導熱量 G は図-17を参考にして式(4)から求めた。

$$G = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (4)$$

ここで, Q_{k-1} はそれぞれ表層・基層・路盤・路床の地中伝導熱量である。対象とする第 k 層 ($k=1 \sim 4$) について, C_k : 比熱 (kJ/kg/K), ρ_k : 密度 (kg/m³), $\Delta \theta_s$: 単位時間における温度差 (°C), h_k : 層厚 (m), A : 単位面積 (m²) とすると, 第 k 層の地中伝導熱量 Q_k は式(5)から求まる。

$$Q_k = C_k \rho_k \Delta \theta_s h_k A \quad (5)$$

なお, 舗装の深さ方向温度の日変化を考えると, 熱伝導がほぼ0となる深さは0.5m程度であることから¹⁾, 路床部の地中伝導熱量 Q_4 の計算には路床上

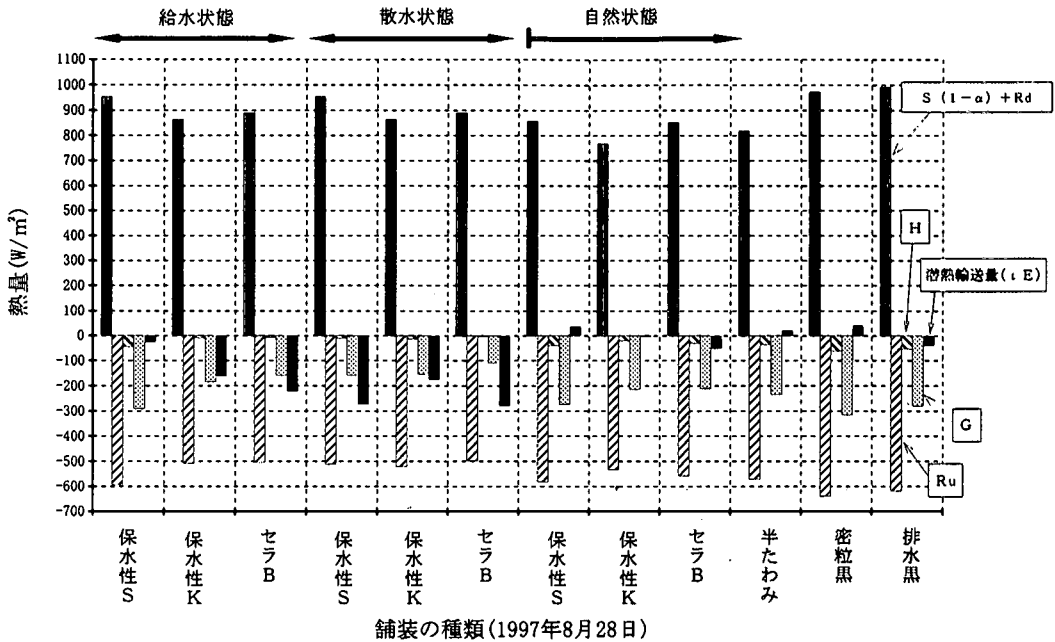


図-18 各舗装サンプルの夏季日中8時間（9～17時）における単位面積（1m²）あたりの熱収支

部の単位時間における温度差として路盤の温度差（ $\Delta \theta_a$ ）を使用し、舗装表面から50cm下の温度差は0として計算した（図-17参照）。

各舗装サンプルについて、以上の方法により1時間ごとに算出した潜熱輸送量（ LE ）を日中8時間（9～17時）分について累計した結果を図-18に示す。図-18の潜熱輸送量（ LE ）が舗装内に保水された水の蒸発に消費された熱量といえる。

計算された潜熱輸送量から水の蒸発量を計算し、屋外供試体の蒸発量測定値（表-6の9月4日の蒸発量）と比較した結果を表-8に示す。

なお、9月4日の気象データを用い、蒸発に関するバルク式により8月28日の蒸発量を推定すると2.9～3.6(mm/8h)が得られたため、これに近い蒸発量である9月4日の蒸発量を参考として示している。また、給水状態の保水性Sの計算値は、舗装サンプルの吸水が不良であったと考えられることから（）で示した。

8月27～28日は晴天なので、8月28日の自然状態の密粒黒および排水黒の蒸発量はほぼ0と考えてよく、いくつかの仮定を含むものの、これらの蒸発量がほぼ0となるように設定したバルク輸送係数（ C_H ）から顕熱量を見積もり熱収支計算を行う今回の方法は、ほぼ妥当と考えられる。

以上のように、複雑な熱および水分拡散の方程式を解くことなく、こうした解析方法で実用上十分な値を得ることが可能である。

5. 舗装を選択するにあたっての考察

舗装を日中の熱放射環境から見た場合、重要なのは舗装表面における熱放射特性である。すなわち、舗装面は日射（波長0.15～3 μ m）と赤外放射（波長3～100 μ m）を受け、日射を舗装表面のアルベドに応じて反射するとともに、舗装表面温度の4乗に比例する赤外放射を上空に向けて射出している。

現在、舗装の大部分を占めるアスファルト舗装は黒色のため、太陽に照らされると夏季には60℃を上回ることもある。これに対処するためには、アスファルトに白色顔料を添加したり、舗装に透水（路床まで水を浸透させる）機能あるいは排水（表層～基層部分にのみ水を浸透させる）機能をもたせるのが良いのではないかと考えられている。

しかし、図-15の自然状態（日中7～19時、8月平均）について密粒黒と比較すると、白色系の半たわみ、保水性S、保水性Kは赤外放射量（舗装表面温度）が小さいものの、日射の反射量が大きいため、舗装からの総熱放射量はいかえって大きくなってしまふ。これにくらべ、同じ黒色でもポーラスな排水黒は、やや小さい総熱放射量を示す。透水性舗装はポーラスではあるが、その舗装が厚く地中への熱伝導が悪いため、密粒黒と同程度の総熱放射量であることが過去の測定結果¹⁹⁾で得られている。

このように、通常用いられる舗装材料で熱放射環境を大きく改善するには限界がある。そのためには、

土のように保水性を有する舗装材料が有効である。この場合、舗装表面で長時間にわたり水の蒸発が生じるものでなくては、舗装表面温度は低下しない。また、舗装の大部分は車両が走行する車道であるため、車両荷重に耐えうる材料・構造でなくてはならない。

ここで考えたような保水性半たわみ系舗装材は、以上の諸点を満足する舗装材の1つと考えられる。

この舗装に表面散水した場合は、土系舗装とほぼ同様の赤外放射量（舗装表面温度）を示し、特に湿潤時のアルベドが0.11と小さい保水性Sの場合は、総熱放射量も $480\text{W}/\text{m}^2$ で土系と同様の大きさとなる結果が得られた（図-15）。

すなわち、開粒度アスコンに保水性注入材を注入した材料は、このような諸問題が顕在化した場所では極めて有効な材料と考えられる。

6. 結論

都市の熱環境を舗装の機能面から緩和することを目的とし、半たわみ系舗装用開粒度アスファルト混合物の空隙に保水性注入材を充填した保水性半たわみ系舗装を考案した。

この保水性半たわみ系舗装（2種類）および歩道用保水性セラミックブロック（1種類）の夏季における舗装温度、アルベドおよび蒸発量を、半たわみ・密粒黒・排水黒の各舗装と比較しながら測定した。その結果をまとめると以下のようである。

(1) 保水性舗装に水を給水または散水して保水させれば、舗装の表面温度を自然状態の土系舗装とほぼ同程度に下げることができる。

(2) 夏季の舗装周辺への総熱放射量を低減させ、熱放射環境を緩和するためには、保水性だけでなくアルベドの小さい舗装材料を選択することが望ましい。

(3) 夏季（1997年8月28日）の日中8時間（9～17時）における舗装表面の熱収支を、舗装各層の熱容量をもとに計算した結果、ほぼ屋外供試体の実測蒸発量（1997年9月4日）に見合う蒸発潜熱量（ $160\sim 280\text{W}/\text{m}^2$ ）が計算された。この熱量は舗装面に入射する熱量（ R_n ）の約20～30%という大きな値であり、舗装に保水性を持たせる効果が大きいことを示している。

(4) 舗装に水分があまり含まれない場合でも、保水性舗装や排水性舗装のように空隙率の大きい舗装は、舗装より低温の大気との間で空気の交換があり、舗装体内の表面近傍での温度を低下させる効果があ

る。

(5) 保水性舗装の必要給水量は、気象観測で通常使用される大型蒸発計による気象台の蒸発量観測値を参考にし、給水ロス分などを考慮することで推測できる。

(6) 保水性半たわみ系舗装に給水または散水することで、熱放射環境を改善できるとともに、車両が走行できる舗装とすることが可能である。

なお、今後の研究課題として、保水性舗装の熱環境緩和効果の検討、適当な給水方法（給水量、給水時間、雨水の有効利用方法）の検討などがあげられる。

参考文献

- 1) 毎日新聞、保水舗装で打ち水効果、1998. 3. 17.
- 2) 秋山政敬：アスファルト舗装体の温度に関する調査研究、土木学会論文集、No. 246, pp. 105～115, 1976. 2.
- 3) 近藤佳宏、三浦裕二：アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究、土木学会論文集、No. 246, pp. 123～132, 1976. 6.
- 4) 姫野賢治、渡辺隆、勝呂太：アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究、土木学会論文集、No. 366, pp. 123～132, 1986. 2.
- 5) Doll, D., Ching, J. K. S. and Kaneshiro, J. : Parameterization of Subsurface Heating for Soil and Concrete Using Net Radiation Data, *Boundary-Layer Meteorology* 32, pp. 351～372, 1985.
- 6) 成田健一、関根毅：アスファルト舗装面の表面温度と熱収支の解析、地理学評論, pp. 125～137, 1991.
- 7) 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, 第5巻4号, pp. 3～7, 1992.
- 8) Asaeda, T. and Ca, V. T. : The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model, *Boundary-Layer Meteorology* 65, pp. 159～179, 1993.
- 9) 浅枝隆、北原正代、藤野毅、和氣重紀夫：加熱された舗装面上空の大気加熱過程の解析、土木学会論文集, No. 467, pp. 39～47, 1993. 5.
- 10) 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, pp. 35～44, 1995. 2.
- 11) 田中孝典、三浦哲彦、清田勝：歩行環境に影響を及ぼす歩行者系道路舗装材の熱特性について、土木学会論文集, No. 587, pp. 49～58, 1998. 2.
- 12) Asaeda, T., Ca, V. T. and Wake, A. : Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere,

- Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 3, pp. 413~427, 1996.
- 13) 岡田カ, 浅枝隆, ヌスマハド'ア' : 地中水分の分散を利用した夏季の舗装表面の温度緩和-保水性舗装の利用-, 水工学論文集, 40, pp. 449~454, 1996.
- 14) 木内豪, 神田学, 栗城稔, 小林裕明 : 都市内散水による気候緩和効果の現地観測, 水工学論文集, 38, pp. 381~386, 1994. 2.
- 15) Ca V. T., Asaeda T. and Ashie Y. : Investigation on the effects of pavement material on the micro-scale thermal environment, 環境システム研究, 24, pp. 601~606, 1996.
- 16) 三田浩史, 菅野克美, 浅枝隆 : 路面温度の上昇抑制機能を有する舗装構造に関する検討 (その1), 土木学会第50回年次学術講演会第5部, 1995.
- 17) 深沢邦彦, 福田萬大, 藤野毅 : 路面温度の上昇抑制機能を有する舗装構造に関する検討 (その2), 土木学会第50回年次学術講演会第5部, 1995.
- 18) 深沢邦彦, 福田萬大, 浅枝隆 : 路面温度の上昇抑制機能を有する舗装構造に関する検討, 第21回日本道路会議論文集, 1995.
- 19) 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, pp. 149~158, 1997. 8.
- 20) アスファルト舗装要綱, (社)日本道路協会, 1992. 12.
- 21) コンクリート標準示方書規準編, JSCE-F521-1994, (社)土木学会, p. 381, 1996. 3.
- 22) 福田萬大, 越川喜孝, 辻井豪, 吉野康啓 : 夏季における保水性半たわみ系舗装の路面温度上昇抑制効果, 土木学会第53回年次学術講演会第5部, 1998.
- 23) 玉木恭介, 牧恒雄, 加藤雅義, 川上正文 : グランドの防塵工法に関する研究, 土木学会第47回年次学術講演会第5部, 1992.
- 24) 地上気象観測指針, (財)日本気象協会, pp. 99~102, 1993. 3.
- 25) 近藤純正編著 : 水環境の気象学, 朝倉書店, pp. 132~133, p. 151, 1994. 12.

(1998. 5. 18 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF WATER SUPPLIED PERMEABLE PAVEMENTS ON THE THERMAL MITIGATION IN SUMMER

Takatomo FUKUDA, Yoshitaka ECHIGAWA, Tsuyoshi TSUJII,
Takashi ASAEDA and Takeshi FUJINO

Field observations for 6 kinds of water supplied permeable pavements and 6 kinds of ordinary asphalt pavements were prepared to evaluate the mitigation effect of urban thermal environment in summer. Permeable pavements were supplied with water every 3 hours in the daytime. Compared with ordinary pavements, permeable pavements has high ability to maintain low temperature just like soil throughout a day with its absorptivity of the supplied water. Evapotranspiration of permeable pavement is equal roughly to evapotranspiration from water surface, and heat balance of pavement can estimate easily by using heat capacity method.