

路面温度のヒート抑制を目的とした 機能性舗装に関する一検討

吉中 保¹・根本信行²

¹正会員 日本舗道株式会社 技術研究所 (〒140-0002 東京都品川区東品川 3-32-34)

²正会員 工博 日本舗道株式会社 技術研究所 (〒140-0002 東京都品川区東品川 3-32-34)

道路舗装に代表されるアスファルト舗装は、太陽光の日射エネルギーを吸収し易く、特に夏期においては路面温度が高くなりやすい。都市部においてはヒートアイランド現象を含めた都市環境対策として、また、歩行者に対する歩道空間の熱環境を改善する対策方法として、路面温度の上昇を抑制する機能を有する舗装の開発が期待されている。ここでは、吸水・蒸発特性など保水能力に優れた保水性舗装と、太陽光の日射などによるエネルギー入射量を制御できる技術を応用した遮熱性舗装について、日照時間や降雨量が異なる時期に屋外における測定を実施した結果、両舗装は路面温度の上昇抑制に有効であり、路面からの長波放射量や顕熱輸送量の低減に寄与できることが確認できた。

Key Words : *water supplied pavement, solar radiation reflective pavement, lowering surface temperature, sensible heat transportation, heat balance*

1. はじめに

道路舗装に代表されるアスファルト舗装は、一般的に黒色であるため太陽光の日射熱を吸収し易く、また、自然地盤のような潜熱による熱の放出が期待できないことから路面温度が高くなりやすい。特に、夏期においては路面温度が 60 程度に達することも珍しくなく、都市部のような舗装比率の高い箇所ではヒートアイランド現象を含めた都市環境対策^{1) 2)}として、また、歩行者に対する歩道空間の熱環境³⁾を改善する対策方法として、路面温度の上昇を抑制する機能を有する舗装^{4) 5)}の開発が期待されている。

舗装路面上においては、太陽光の日射などによる地表面へのエネルギー入射に対して、地表面からさまざまな形態で大気中へエネルギーを放出することによって、熱収支のバランスが保たれている。近年実用化が進められている保水性舗装は、一般的な舗装路面のように顕熱輸送や長波放射に依存したエネルギー放出の他に、舗装体の空隙中に保持させた水分の蒸発に伴う潜熱輸送も付与させることによって、路面温度の上昇を通常よりも抑制しようとするものである。保水性舗装の水分の供給を基本的に降雨によって賄うものとするれば、空隙中に充填する保水材料の性能としては、高い保水能力を有することが基本的に必要であり、そして、舗装路面に接触した雨水をすばやく取り込むための早い吸水性と、効果を長く持続させるための水分蒸発量の制御が可能なこと

が求められ、当該舗装の開発に当たっての重要なポイントといえる。

一方、最近では、太陽光の日射などのエネルギー入射を制御できる遮熱技術^{6) 7)}の開発が進み、これをアスファルト舗装に適用すれば舗装路面へのエネルギー入射量を制限することが可能となり、路面温度の上昇を抑制することができる。さらに、この技術を排水性舗装等に適用すれば、その舗装が本来持つ機能の他にも、遮熱性舗装として新たに路面温度抑制機能を付与することも期待できる。

太陽放射の影響による都市環境や歩行環境を改善するためには、路面温度の上昇を抑制し、路面から赤外線として放射される長波放射量と、路面が大気を直接暖める顕熱輸送量の低減を図ることが重要と考えられる。ここでは、保水性舗装と遮熱性舗装について、日照時間や降雨量が異なる時期に屋外における各種の測定を実施し、路面温度と長波放射量および顕熱輸送量の抑制に着目した検討結果を示す。

2. 舗装路面の熱収支

既往の文献⁸⁾等によれば、地表面では、太陽放射をエネルギー源として、太陽光の日射(短波放射; $3\mu\text{m}$ 以下)と暖められた大気からの長波放射($3\mu\text{m}$ 以上)によるエネルギー入射に対して、日射の地表面における反射と暖められた地表面からの長波放射、顕熱輸送、および潜熱輸送によってバランス

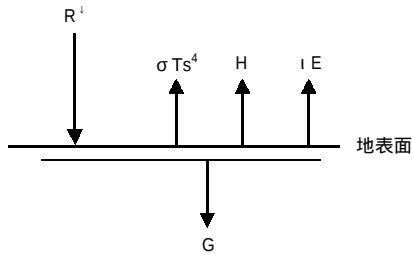


図-1 舗装路面の熱収支

する。地表面の熱収支は図-1のように表され、式(1)⁹⁾によって示される。このとき、 R^i は式(2)⁹⁾で定義される地表面への入力放射量である。

$$R^i = \sigma T_s^4 + H + i E + G \quad (1)$$

$$R^i = (1 - \text{ref}) S^i + L^i \quad (2)$$

ただし、 σT_s^4 ：地表面が放出する長波放射量（ σ ：ステファン・ボルツマン定数、 T_s ：地表面温度）、 H ：顕熱輸送量、 $i E$ ：潜熱輸送量、 G ：地中伝導熱、 ref ：地表面のアルベド、 S^i ：日射量、 L^i ：大気からの長波放射量である。顕熱輸送量と潜熱輸送量は式(3)、(4)のバルク式で示される⁹⁾。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (3)$$

$$i E = i \rho \beta C_H U (q_s - q) \quad (4)$$

ただし、 $c_p \rho$ ：空気の体積熱容量、 C_H ：バルク輸送係数、 U ：風速、 T ：気温、 i ：水の気化潜熱、 ρ ：空気の密度、 β ：地表面の蒸発効率、 q_s ：地表面温度 T_s に対する飽和比湿、 q ：比湿である。

特に歩行環境に着目した場合、屋外における人体の熱環境に関する既往の文献¹⁰⁾によれば、夏季のコンクリート版上における人体に吸収される入射放射成分のうち、最も入射量が多いのが路面からの長波放射であり、最も少ないのが路面からの反射日射である。また、ヒアリング調査¹¹⁾によれば、歩行者は夏の歩行時に黒色のアスファルト舗装に暑苦しさを覚え、路面からの熱気には不快感を感じている。すなわち、路面から放射される長波放射と、路面が大気を直接暖める顕熱輸送が歩行環境に影響を与えており、両者に影響を与える路面温度を抑制することが歩行環境の改善につながるものと考えることができる。

ここでは、保水性舗装と遮熱性舗装について、路面温度と長波放射量および顕熱輸送量の抑制に着目した検討を行うこととした。

3. 保水性舗装に関する検討

開発した保水性舗装は、開粒度アスファルト混合物の空隙（空隙率約24%）に保水材料（以下、保水性セメントミルクと称す）を充填するもので、舗装体中からの水の蒸発に伴う潜熱輸送によって熱の放出

表-1 保水性セメントミルクの配合

配合名称	配 合 (wt%)				
	セメント	水	保水剤	吸水促進剤	吸水促進剤
基 本	40.0	60.0	-	-	-
配合 A	39.4	59.2	0.3	0.6	0.5
配合 B	39.6	59.5	0.3	0.6	-
配合 C	39.7	59.5	0.3	-	0.5
配合 D	39.9	59.8	0.3	-	-

セメントは基本的に超速硬セメントを使用し、状況に応じて凝結遅延剤も併用する。

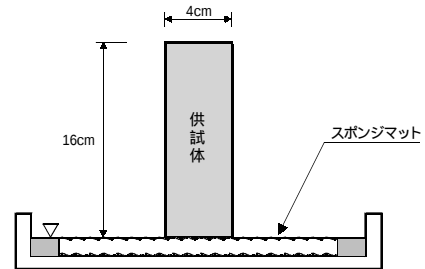


図-2 吸水試験装置

を促進させ、路面温度の上昇を抑制するものである。なお、保水性セメントミルクは、高い保水性能を有し、しかも吸水速度が早く、水分蒸発量を制御できることを目標として、使用する材料と配合を選定することとした。

ここでは、保水性セメントミルクの吸水特性および蒸発特性に着目した配合の設定と、それを用いた保水性舗装の基本性状の結果を示し、試験施工を実施して路面温度と長波放射量および顕熱輸送量の観点からの保水性舗装の効果について検証した。

(1) 保水性舗装の基本性状

a) 保水性セメントミルクの吸水・蒸発特性

ここでは、表-1に示す5配合の保水性セメントミルクの供試体（W 4cm × H 4cm × L 16cm）を作製し、吸水試験および蒸発試験を実施した。基本配合（重量比）はセメント 40%、水 60%とし、さらに添加剤として、降雨時における吸水速度を高めるための吸水促進剤と、蒸発特性を制御するための保水剤の添加の適否についても検討することとした。なお、吸水促進剤は保水性セメントミルク中に毛細管として最適な連続した微細泡が得られる材料であり、は水分の誘導能力が極めて高い繊維状の材料である。

吸水特性は、絶乾状態の供試体を湿潤させたスポンジマット上に静置して、吸水に伴う供試体の吸水容積率の変化と最大吸水容積率により評価するものとした。まず、供試体を室内で静置乾燥させて重量変化がないことを確認し、乾燥重量を求めた。次に、20℃に設定した恒温室内において、図-2に示すような吸水装置に供試体を静置して吸水させ、吸水開始

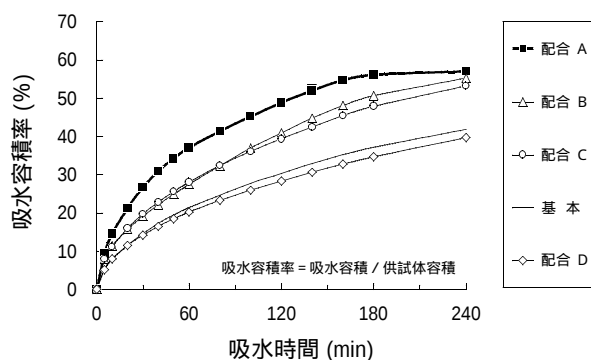


図-3 吸水容積率の経時変化

表-2 5 配合の吸水容積率結果

配合名称	30分吸水容積率 (%)	60分吸水容積率 (%)	最大吸水容積率 (%)
基 本	14.5	21.4	52.6
配合 A	26.6	37.0	58.3
配合 B	19.7	28.0	58.0
配合 C	19.0	27.4	56.4
配合 D	14.1	20.2	53.7

最大吸水容積率 = 24時間水浸後の吸水容積 / 供試体容積
30, 60分吸水容積率 = 吸水容積 / 供試体容積

後の時間経過に伴う供試体重量を測定し、式(5)により吸水容積率を計算した。

$$\text{吸水容積率} = \text{吸水容積} / \text{供試体容積} \quad (5)$$

また、測定終了後には 24 時間水浸させて最大吸水容積率を求め、続いて蒸発特性の評価を行うこととした。図-3に保水性セメントミルクの吸水容積率の経時変化を示し、吸水開始 30 分後および 60 分後の吸水容積率と最大吸水容積率を表-2に示す。

図-3より、各配合とも吸水開始後の時間経過に伴って吸水容積率が増加するが、吸水速度には違いがみられた。吸水促進剤と保水剤を添加した配合 A, B, C は、吸水容積率の増加が基本配合よりも高く、保水剤のみを添加した配合 D は、基本配合よりもやや低下する傾向がみられた。このことから、吸水促進剤には吸水速度を早める効果があるが、保水剤は供試体内部の毛細管を移動する水分を取り込んで膨潤し、吸水速度を高める効果は認められなかった。表-2より、最も吸水性が良好な配合 A は、基本配合よりも 30 分および 60 分における吸水容積率が約 1.8 倍に向上しており、短時間でより多くの水分を取り込むのに優れている。さらには最大吸水容積率が基本配合の 52% に対して 58% と約 6% 拡大し、保水能力も向上した。また、表-2の最大吸水容積率における配合 D と基本配合の結果からすれば、保水剤の添加は必ずしも最大吸水容積率を低下させるものではないことがわかった。

蒸発特性は、最大吸水状態の供試体を 20 の恒温

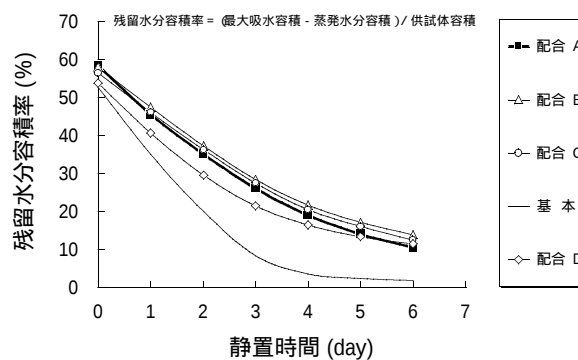


図-4 残留水分容積率の経時変化

表-3 保水性舗装の構成と性状

項 目	構成および測定値
アスコン配合	半たわみ性 型
使用アスファルト	改質 型アスファルト
セメントミルク配合	保水性 配合 A
動的安定度 (回/mm)	8,400
ラベリング損失量 (cm ²)	1.07

ラベリング試験はクロスフェン5mmを使用した。

室に静置して、自然蒸発に伴う供試体残留水分の変化により評価するものとした。残留水分容積率は、静置開始後の時間経過に伴う蒸発水容積を求め、式(6)により計算した。

$$\text{残留水分容積率} = (\text{最大吸水容積} - \text{蒸発水分容積}) / \text{供試体容積} \quad (6)$$

図-4に示す保水性セメントミルクの残留水分容積率の経時変化より、配合 A ~ D の残留水分容積率は、経時変化に伴う容積率の低下が基本配合よりも緩やかとなっている。静置開始 3 日後で比較すると、基本配合の残留水分が約 8% となっているのに対して、配合 D は約 21%、配合 A, B, C は約 28% となっており、保水剤の添加が水分の蒸発量を抑制する効果が認められた。

以上のことより、吸水速度が早く、しかも蒸発特性にも比較的優れるのは配合 A と判断した。

b) 保水性舗装の一般性状

保水性舗装に使用する開粒度アスファルト混合物は、アスファルト舗装要綱に示される半たわみ性舗装用アスファルト混合物 型を使用し、アスファルトには改質 型を用いることとした。

ここでは、配合 A の保水性セメントミルクを充填した保水性舗装混合物について、動的安定度およびラベリング損失量を試験した結果を表-3に示す。これより、動的安定度は 8,400 回/mm、ラベリング損失量は 1.07cm²であり、特に問題ない結果が得られたが、適用箇所の交通条件によっては開粒度アスファルト

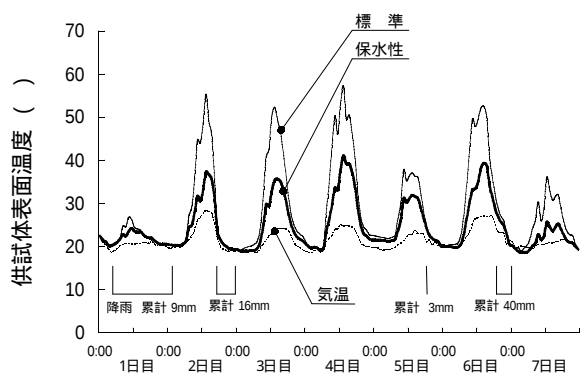


図-5 供試体表面温度の測定結果

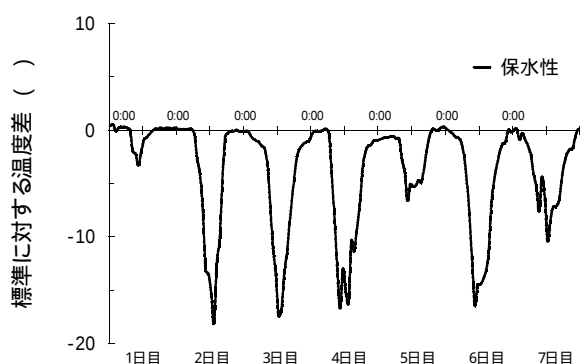


図-6 保水性舗装の標準に対する温度差

混合物に高粘度改質アスファルトを使用することも考えている。

c) 保水性舗装の路面温度特性

選定した配合Aの保水性セメントミルクを用いて作製した保水性舗装のホイールトラッキング試験用供試体（ $t=5\text{cm}$ ）を屋外（東京都品川区）に設置して、供試体の表面温度を測定した。ここでは、比較のために同様に設置した密粒度アスファルト混合物（13mmTOP，標準と称す）に対する、保水性舗装の表面温度特性について検討した。

測定期間の7日間のうち、最高気温は約 28℃，降雨量は累計 68mm であった。供試体表面の温度測定結果を図-5に、保水性表面温度の標準に対する温度差を図-6に示す。

7日間の測定期間における保水性舗装の表面温度は、日中、夜間共に、標準よりも低い傾向を示した。測定2日目の表面最高温度は、標準が約 55℃ に対して保水性が 37℃ と、約 18℃ もの温度差が得られている。保水性舗装の表面色が半たわみ性舗装に近似した明色であることを考えれば、この結果は、保水能と舗装表面の明色化による相乗効果によるものと判断できる。また夜間においても、標準との温度差がなくなる時間帯はわずかであった。なお、測定1日目は日中の降雨のため、保水性と標準との温度差が縮小した。

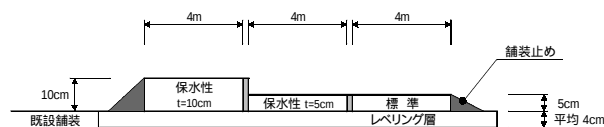


図-7 試験施工の舗装断面



写真-1 保水性セメントミルクの充填状況



写真-2 切り出した舗装体の断面
（保水性舗装 5cm）

表-4 保水性舗装のすべり抵抗

項 目			測定値
すべり抵抗	BPN	dry	76
		wet	65
	DF (μ)	40 km/h	0.61
		60 km/h	0.54

（２）保水性舗装の試験施工による検討

前項(1)で設定した保水性舗装について、構内ヤード（埼玉県さいたま市）において試験施工を実施した。ここでは、実際のプラントと舗設機械を使って保水性舗装を舗設し、施工性の確認と、標準の密粒度アスファルト混合物を使用した工区との比較から温度低減効果を検討した。なお、保水量の違いによる効果も検討に含めるため、保水性舗装の厚さは2種類設定した。

a) 保水性舗装の構築

試験施工においては、図-7に示すとおり、舗装厚さ $t=5\text{cm}$ と $t=10\text{cm}$ の保水性舗装工区、および $t=5\text{cm}$ の標準工区の計3工区を設定した。レベリング層として既設の碎石路盤上に $t=4\text{cm}$ の密粒度アスファルト混合物（13mmTOP）を舗装し、その上に保水性舗装を舗装した。舗装方法は、通常の半たわみ性舗装と同様に、転圧終了した開粒度アスファルト混合物の温度が低下した後、保水性セメントミルクを充填した。

半たわみ性舗装用アスファルト混合物は3.(1)b)と同様のものとし、保水性セメントミルクは配合Aとした。保水性セメントミルクの充填作業においては、施工性に特に問題となる点は見受けられず、所定厚さに十分浸透できた。保水性セメントミルクの充填作業状況を写真-1に示し、試験後に切り出した舗装体の断面を写真-2に示す。また、舗設1ヶ月後に測定したすべり抵抗値は表-4に示すとおりであり、保水性舗装は一般的な半たわみ性舗装と同程度の結果であった。

b) 路面温度の測定結果

試験施工ヤードには路面温度の測定用として熱電対を設置し、保水性舗装工区はセメントミルクを充填する前に開粒度アスファルト混合物の骨材面（路面から約5mm下）に接着剤で固定し、標準工区は舗設直後に約5mm程度の穴を空けて設置した。

ここでは、標準工区に対する保水性舗装工区の表面温度特性と、舗装厚さによる特性について検討した結果を示す。測定期間は平成12年9月の7日間で、測定時期の気象データ¹を図-8、図-9に示し、路面温度の測定結果を図-10に、また保水性路面温度の標準に対する差を図-11に示す。

測定期間の2日目から3日目にかけての深夜にまとまった降雨（累計57mm）があり、保水性舗装は吸水した状態となった。図-10より、降雨後に晴れた3日目の最高路面温度は標準が40℃に対して保水性5cmが32℃、4日目日の晴天時は標準が50℃に対して保水性5cmが34℃であり、晴天が続くなかで標準の最高温度が10℃上昇しているのに対して、保水性5cmが2℃の上昇に留まっている。また、保水性舗装の表面色は半たわみ性舗装に近似した明色でアルベドが約0.41であり、舗装表面色と保水性による効果と合せて路面温度の上昇の抑制に寄与していると考えられた。

保水性5cmと10cmを比較すると、保水性5cmでも最高路面温度が約35℃以下に留まっていることから、日中における両者の明確な差はみられないが、図-11の特に夜間における標準との路面温度差をみると、保水性10cmの方が5cmよりも低くなる傾向がみられた。

以上より、試験施工において構築した保水性舗装は、前項(1)と同様に、路面温度の抑制に効果がみられた。

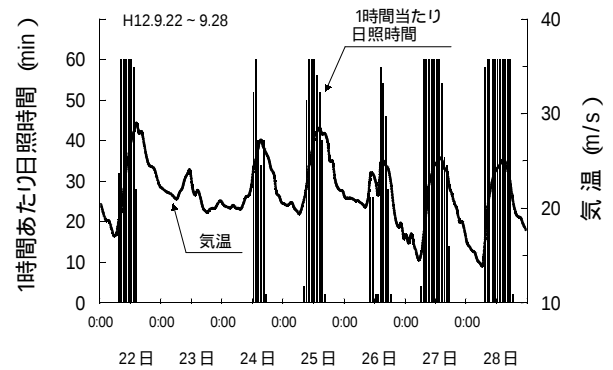


図-8 測定期間の日照、気温データ¹

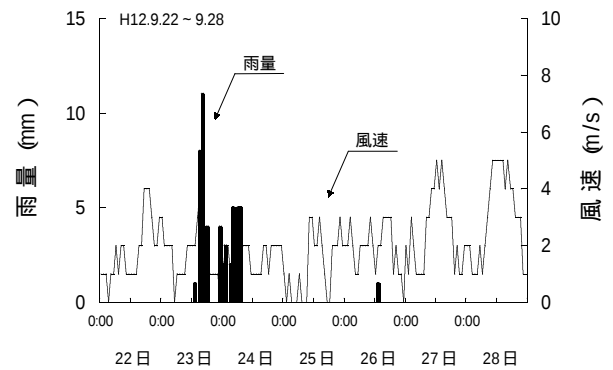


図-9 測定期間の雨量、風速データ¹

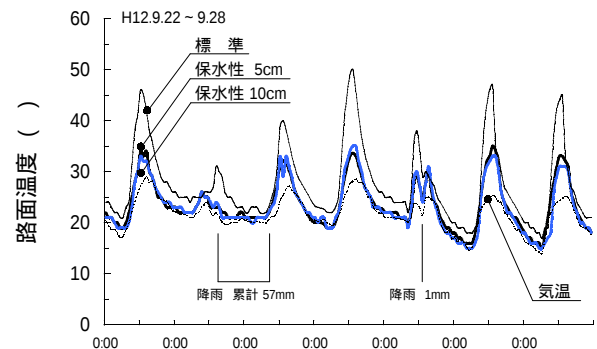


図-10 路面温度の測定結果

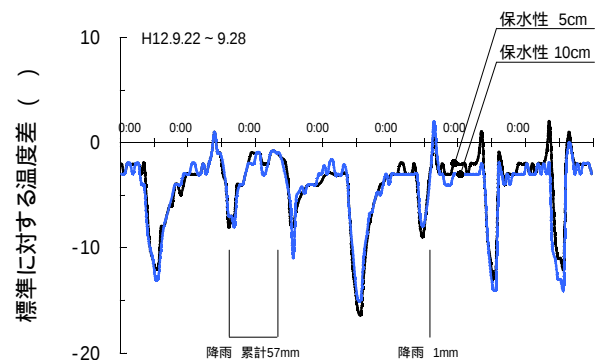


図-11 保水性舗装の標準に対する路面温度差

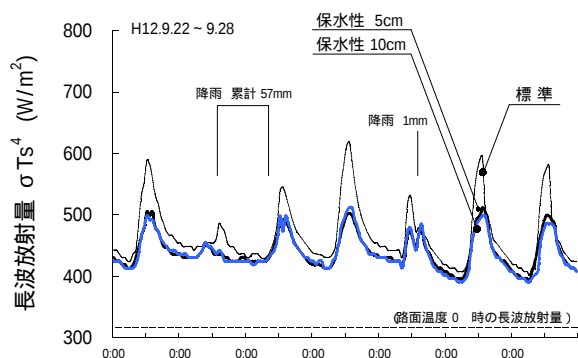


図-12 保水性舗装の長波放射量

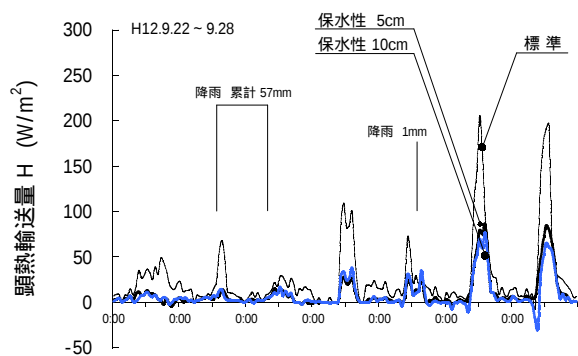


図-13 保水性舗装の顕熱輸送量

表-5 保水性舗装の7日間の集計値

測定期間		H12 9/22 ~ 9/28		
舗装種別		標準	保水性 5cm	保水性 10cm
長波放射量 σT_s^4	平均値 (W/m²)	464.9	439.7	437.9
	低減率 (%)	-	5.4	5.8
	最大値 (W/m²)	618.3	511.2	511.2
	最小値 (W/m²)	401.9	390.9	390.9
顕熱輸送量 H	平均値 (W/m²)	26.3	9.5	7.8
	低減率 (%)	-	63.9	70.3
	最大値 (W/m²)	205.2	86.2	76.5
	最小値 (W/m²)	- 6.4	- 4.3	- 29.4
気温	平均値 (°C)	21.6		
	最高気温 (°C)	29.0		
	最低気温 (°C)	13.9		
日照時間	期間累計値 (h)	2496		
降雨量	期間累計値 (mm)	58		
風速	期間平均値 (m/h)	1.9		

顕熱輸送量のプラスは舗装側から大気側への熱移動を示し、マイナスは大気側から舗装側への熱移動を示す。

c) 長波放射量と顕熱輸送量の特長

ここでは、測定した路面温度や気温、風速のデータを基に計算した長波放射量と顕熱輸送量をそれぞれ図-12、図-13に示し、7日間の集計値を表-5に示す。

図-12より、保水性舗装の長波放射量は、24時間を通じて標準よりも少ない傾向を示した。表-5の平均値でみれば、標準が約 465W/m² に対して保水性 5cm が約 440W/m²、保水性 10cm が約 438W/m² と、7日間の測定期間において平均して 5 ~ 6%程度低減した。一方、測定期間の最大値でみれば、保水性舗装は、長波放射量が最大となる日中のピーク放射量

を約 107W/m² 抑制している。さらに、最小値についても保水性舗装の方が約 11W/m² 減少しており、夜間における長波放射量の抑制にも効果がみられた。

図-13より、保水性舗装の顕熱輸送量は、長波放射量と同様に保水性舗装の方が標準よりも少ない傾向を示し、日照時間が長い6日目のピーク値では、標準が約 205W/m² に対して保水性 5cm が約 79W/m²、保水性 10cm が約 69W/m² であった。表-5の7日間の低減率は、標準に対して保水性 5cm が約 64%、保水性 10cm が約 70%であり、舗装路面から大気への顕熱輸送量は保水性舗装の厚さによって変化し、より厚い方が低減量が大きい結果であった。特に風速が速い6日目と7日目において、舗装厚による差が顕著に現れており、風速が速まるにつれて保水能が大きい舗装厚 t=10cm の方が水の蒸発に伴う潜熱輸送量が多くなるものと推定され、路面温度が抑制されると同時に、風速がパラメータに含まれる顕熱輸送量の抑制に効果が得られた。

以上より、保水性舗装は、保水能と半たわみ性舗装に近似した舗装表面色による相乗効果によって路面温度の上昇を抑制することが可能であり、それに伴い長波放射量と顕熱輸送量も低減できる。保水能を高めることを目的として保水性舗装の舗装厚さを厚く設定すれば、路面温度の抑制効果を向上させ、特に顕熱輸送量の低減に効果が得られる。

4. 遮熱性舗装に関する検討

ここでの検討における遮熱性舗装は、遮熱技術^{6) 7)}をアスファルト舗装に応用したものである。遮熱技術にはさまざまなタイプがあるが、ここでは中空セラミック粒子を用いるものを適用した。

遮熱技術は、中空セラミック粒子を対象物の表面近傍に存在させることで、電磁波の波長に対する反射率を制御できるものである。図-14⁷⁾の遮熱材料と汎用塗料の黒色同士で比較すると、約 700nm 以下の可視域での反射率がほぼ同じであることから肉眼では近似した色として認識されるが、汎用塗料の方は波長域にかかわらずに約 5%程度の反射率で推移するのに対し、遮熱材料の方は約 700nm 以上の赤外線波長域における反射率が高いことから赤外線の吸収量を抑制できる。太陽光の日射は約 150 ~ 3000nm の範囲に約 99%のエネルギーを持っており⁹⁾、同じ黒色であっても赤外線波長域の反射率が高い遮熱技術を適用した方が温度が上昇しにくく、さらに明色化を図ることによって可視域での反射率も高められるので、更なる温度上昇の抑制に効果がある。

このように、日射や長波放射などの吸収を抑制する働きを持ち、さらに空気層と舗装との断熱層として

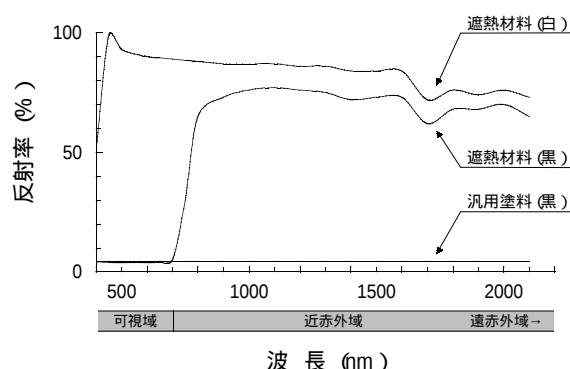


図-14 遮熱技術の反射率特性（一部筆者加筆）⁷⁾

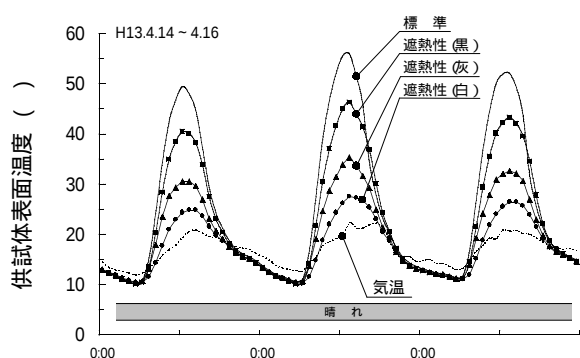


図-15 遮熱性舗装の色調による供試体表面温度

も機能する遮熱技術をアスファルト舗装に適用することによって、太陽光の日射などによるエネルギー入射量を制限することが可能となり、ひいては路面温度の上昇を抑制することが期待できる。

（１）遮熱性舗装の路面温度特性

ここでは、遮熱性舗装の表面温度特性について、遮熱性舗装の色調と温度抑制効果との関係を示し、次に夏季晴天下と梅雨時期における日照時間等の気象条件の影響に対する効果の発現性について示す。

実験方法は、遮熱技術を適用した密粒度アスファルト混合物（13mmTOP）のホイールトラッキング試験用供試体（ $t=5\text{cm}$ ）を作製し、保水性舗装の場合と同様に屋外に設置して、供試体の表面温度を7日間測定した。標準として、遮熱材料を用いない密粒度アスファルト混合物（13mmTOP）も同様に設置した。

a) 遮熱性舗装の色調と温度抑制効果

舗装路面に太陽光が当たった場合、一般的には黒色の方が日射を吸収しやすいことから路面温度が上昇しやすく、また、白色の場合には日射の反射量が増すことから路面温度が上がりにくい。ここでは、遮熱性舗装の色調を変化させた場合の路面温度を測定し、標準路面と同様の黒色とした場合の遮熱技術による温度抑制効果の確認と、より温度抑制が図れると予想された灰色や白色の場合についての効果を検討した。

測定は平成13年4月の3日間で、気温約23℃の晴れの条件で行った。図-15に示す測定結果より、標準と遮熱性舗装の黒色同士を比較した場合、測定2日目においては標準の最高温度が約56℃に達しているのに対して遮熱性舗装は約46℃であり、この温度差約10℃が遮熱技術による直接的な温度低減効果であると考えられる。

一方、遮熱性舗装の色調別で観察すると、同様に2日目においては灰色が約35℃、白色が約27℃であり、明色化することによって温度低減効果が拡大することがわかる。標準との差は、灰色の場合約21℃、白色の場合約29℃であった。アルベドを測定すると、標準は約0.08～0.10、灰色は約0.20～0.28、白色は約0.43～0.48（コンクリートの0.44⁴⁾）に近似）であり、色調を明色化した場合の温度抑制効果は、遮熱技術によるものと、アルベドの変化による日射入射量の抑制との相乗効果によるものと推察された。

実道で適用することを想定した場合、遮熱性舗装は灰色が適切であると予想されたことから、本検討においては灰色を選定することとした。

b) 夏季の晴天時における特性

ここでは、晴天時における遮熱性舗装の路面温度の抑制効果について検討する。実験方法は4.(1)a)に準拠し、遮熱性舗装の表面色はa)で選択した灰色とした。測定期間は平成13年7月の夏季晴天時の7日間であり、期間内の最高気温は約35℃であった。測定期間の気象データ¹⁾を図-16、図-17に示し、表面温度の測定結果を図-18に、また遮熱性舗装の標準に対する温度差を図-19に示す。

図-18より、日照時間が少なかった3日目を除き、標準の表面温度が連日にわたって60℃程度となっているのに対し、遮熱性舗装は約43℃程度に留まっている。日照時間が少ない3日目についても同様に、標準が約49℃に対して約39℃と、遮熱性舗装の方が低い結果であった。また、図-19より、遮熱性舗装の標準に対する温度差は、7日間の測定の中で最大約20℃にも達することが確認できた。

以上より、遮熱性舗装は、日射によって表面温度が高くなりやすい夏季において路面温度の上昇の抑制に効果が得られ、舗装路面への天空からの入射放射量 R' に対する波長別反射率（図-14）を制御することによって、アルベドを約0.2程度に抑制しつつ、路面温度の上昇を抑制できる。

c) 曇りや雨天時における特性

ここでは、曇りや雨天時における表面温度の測定結果と前項b)の晴天時とを比較することによって、日照等の気象条件による効果発現の差について検討する。測定期間は平成13年6月の梅雨の時期における7日間で、期間内の最高気温は約28℃、降雨量は累計68mmであった。測定期間の気象データ¹⁾

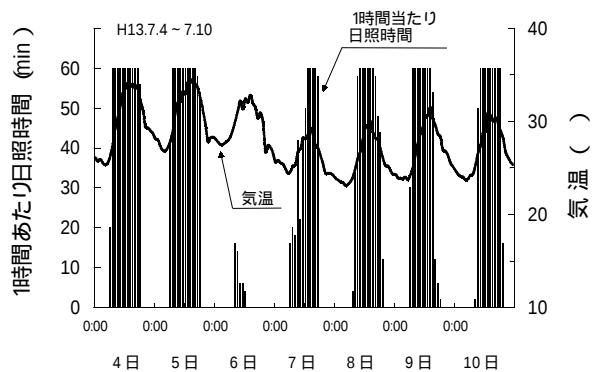


図-16 夏季晴天時の日照，気温データ¹

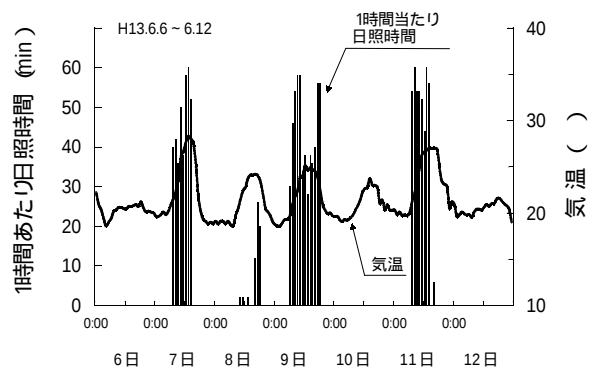


図-20 梅雨時期の日照，気温データ¹

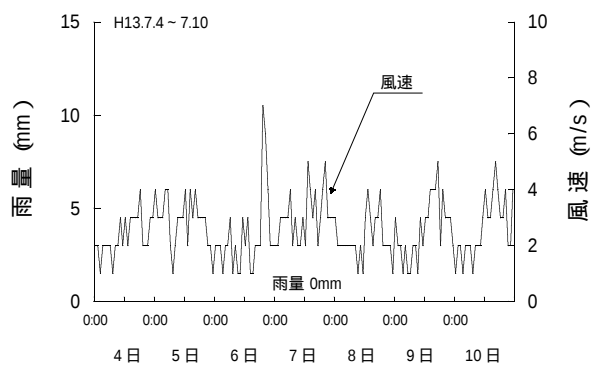


図-17 夏季晴天時の雨量，風速データ¹

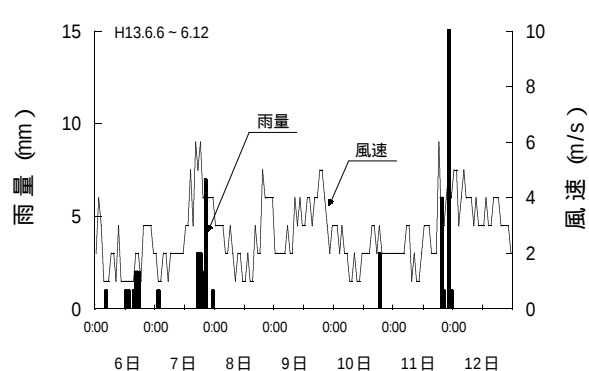


図-21 梅雨時期の雨量，風速データ¹

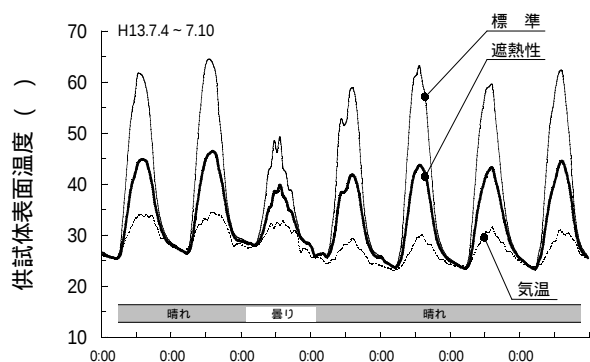


図-18 供試体表面温度の測定結果
(夏季晴天時)

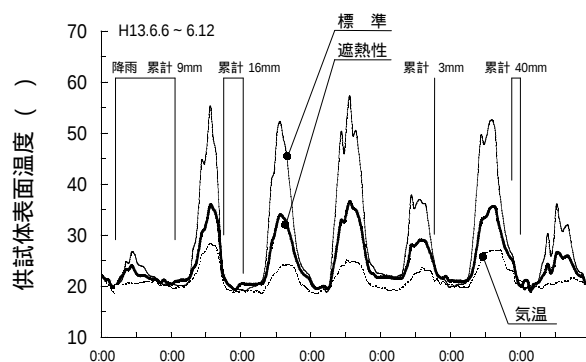


図-22 供試体表面温度の測定結果
(梅雨時期)

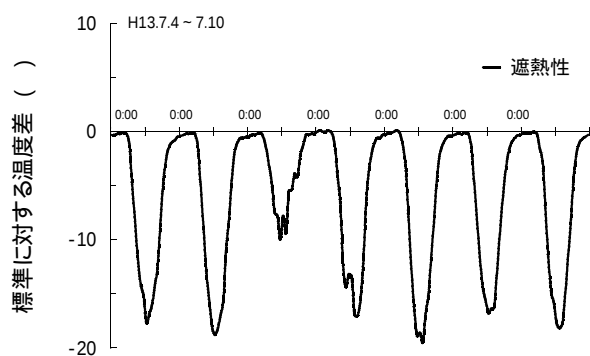


図-19 遮熱性舗装の標準に対する温度差
(夏季晴天時)

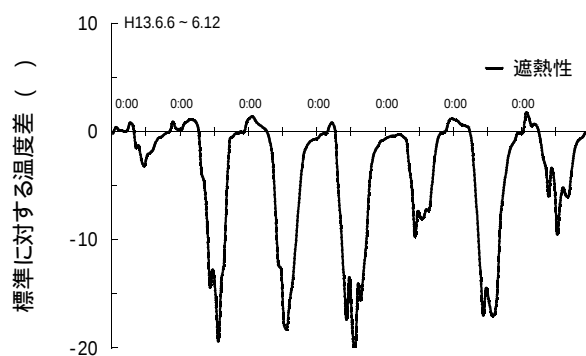


図-23 遮熱性舗装の標準に対する温度差
(梅雨時期)

を図-20、図-21に示し、供試体の表面温度の測定結果を図-22に、また遮熱性舗装の標準に対する温度差を図-23に示す。

図-22より、断続的に降雨があった1日目においては、標準の最高表面温度が約27℃に対して遮熱性舗装が約24℃であり、同様の5日目では約37℃に対して約29℃と、曇りや雨の日においても遮熱性舗装の方が低い結果であった。図-23より、遮熱性舗装の標準に対する温度差は、降雨量や気温の影響を受けて変動するものの、日照時間が観測されない日においてもその差は最大3℃～10℃程度認められた。

日照が少ない場合においても、遮熱性舗装による路面温度の抑制効果が得られた。これは、曇りの場合でも大気からの長波放射量 L^+ が入射してきており、遮熱技術によって赤外線波長域の反射が行われていることから、日照がほとんどないような場合においても路面温度の上昇の抑制が図れている。

（2）長波放射量と顕熱輸送量の特性

ここでは、前項 b)の夏季の晴天時における長波放射量と顕熱輸送量について計算した結果を図-24、図-25に示す。また、c)の梅雨の時期を含めた両期間についてまとめた結果を表-6に示す。

図-24および表-6より、夏季の測定期間における長波放射量は、遮熱性舗装の方が標準よりも低く、平均値でみれば標準が約539W/m²に対して遮熱性舗装が約496W/m²と、平均して約8%程度低減した。測定期間のピーク値でみると、遮熱性舗装の方が最大値で約145W/m²減少しており、長波放射量が最大となる日中の放射量を抑制することができる。一方、日照時間が少ない梅雨の測定期間における長波放射量についても平均して約6%低減しており、気象条件にかかわらず全般的な傾向として遮熱性舗装の長波放射量の抑制が認められた。

図-25より、遮熱性舗装の顕熱輸送量は、長波放射量と同様に遮熱性舗装の方が標準よりも少ない傾向を示した。表-6より、6月と7月の各7日間における測定期間の顕熱輸送量の低減率は、それぞれ55.9%、56.1%であった。このように、遮熱性舗装の表面温度が平均的に標準よりも低くなるので、舗装路面が直接大気を暖める顕熱輸送量を約56%も抑制できる。また、月別の顕熱輸送量の低減率はほぼ同様であり、長波放射量と同様に、日照時間や降雨量等の気象条件が大きく異なっても低減率はほとんど変化しないことを示唆している。

以上より、遮熱性舗装は、遮熱技術によって路面温度の上昇を抑制でき、コンクリート舗装と比べても反射日射量が抑制されているアルベド約0.20～0.28の状態（灰色）でも、標準よりも約20℃程度

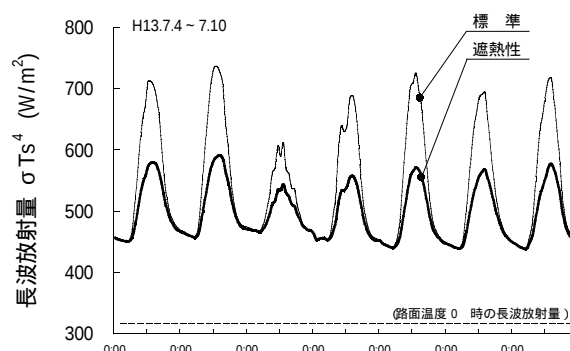


図-24 遮熱性舗装の長波放射量（夏季）

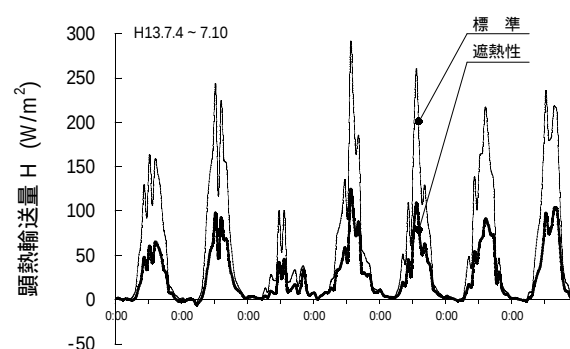


図-25 遮熱性舗装の顕熱輸送量（夏季）

表-6 遮熱性舗装の7日間の集計値

測定期間		H13 6/6～6/12		H13 7/4～7/10	
舗装種別		標準	遮熱性舗装	標準	遮熱性舗装
長波放射量 σT_s^4	平均値 (W/m ²)	472.2	445.2	538.8	495.5
	低減率 (%)	-	5.7	-	8.0
	最大値 (W/m ²)	675.3	521.9	736.1	591.2
	最小値 (W/m ²)	411.9	413.6	439.1	438.5
顕熱輸送量 H	平均値 (W/m ²)	36.3	16.0	56.9	25.0
	低減率 (%)	-	55.9	-	56.1
	最大値 (W/m ²)	252.5	92.9	286.5	122.9
	最小値 (W/m ²)	-10.1	-8.7	-4.6	-6.2
気温	平均値 (℃)	21.4		27.9	
	最高気温 (℃)	28.3		34.5	
	最低気温 (℃)	18.6		23.1	
日照時間	期間累計値 (h)	1452		3854	
降雨量	期間累計値 (mm)	68		0	
風速	期間平均値 (m/h)	2.7		2.6	
備考		梅雨		夏季	

顕熱輸送量のプラスは舗装側から大気側への熱移動を示し、マイナスは大気側から舗装側への熱移動を示す。

低減できることがわかった。コンクリート舗装と同程度のアルベドである白色とした場合には、路面温度の低減効果が最大約29℃にも達することが4.(1)a)から得られており、長波放射量や顕熱輸送量が路面温度に依存することを考えれば、実際の道路で適用が可能な舗装の表面色を更に検討することによって、都市環境や歩行環境に対してより効果が高い遮熱性舗装とすることができることを示している。

5. まとめ

本検討の結論を以下に示す。

保水性舗装と遮熱性舗装は、路面温度の上昇を抑制する機能を有する舗装として有効である。

保水性舗装に用いる保水性セメントミルクは、各種の添加剤を使用することで、最大吸水容積率や吸水特性、蒸発特性を改善することができる。

保水性舗装は、通常の舗装よりも路面温度を抑制し、長波放射量と顕熱輸送量を低減することができる。そして、舗装厚の厚い方が低減効果が大い。遮熱性舗装は、通常の舗装と同様の黒色としても路面温度を 10 程度低減する効果があり、色調を考慮することによって更に高い効果が得られる。遮熱性舗装は、保水性舗装と同様に長波放射量と顕熱輸送量の低減に有効であり、通常の舗装に対する低減率が日照時間や降雨等の気象条件に影響されにくい。

以上より、保水性舗装と遮熱性舗装は、都市部におけるヒートアイランド現象を含めた都市環境対策や、歩行者に対する歩道空間の熱環境を改善する対策方法として有効と考えられる。

6. おわりに

道路舗装の路面温度の上昇を抑制する方法としては、舗装体に保水能を持たせて水分の蒸発潜熱によるエネルギー放出時の熱輸送経路を新たに付加させる方法と、太陽光や大気からのエネルギー入射量を直接制御する方法が考えられ、ここでは、これら二つの方法についての検討を行い、その有効性を示した。

その中で、エネルギー入射量を制御できる遮熱技術を応用した遮熱性舗装は、まだ検討を始めたばかりであるが、さまざまなアスファルト混合物に対する適用が期待できる。特に、施工実績が急速に伸びつつ

ある排水性舗装へ適用すれば、車両の走行安全性や道路交通騒音の低減に対する機能を保持しつつ、路面温度の上昇抑制など熱環境対策にも有効な、新たな機能を付加させることも可能である。

今後も、保水性舗装と遮熱性舗装に関する検討を進め、道路を取り巻く環境対策に寄与できる舗装技術として確立させていきたい。

参考文献

- 1) 木内豪, 小林裕明: 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, 土木学会論文集 No.622 -11, pp.23 ~ 33, 1999.5
- 2) 原田朗: 大気汚染と気候の変化 - 人間社会と気候の関係 -, 東京堂出版, 1993.2
- 3) 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/ -6, pp.49 ~ 58, 1998.2
- 4) 福田萬大, 越川喜孝, 辻井豪, 浅枝隆, 藤野毅: 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, 土木学会論文集 No.613 V-42, pp.225 ~ 236, 1999.2
- 5) 徳本行信, 岡田恒夫, 松下守雄, 吉田孝介: 都市の高温化の解消を図る保水性舗装の開発, ASPHALT Vol.42 No.203, pp.34 ~ 43, 2000
- 6) 木下啓吾: 冷暖房効果を向上させる熱反射性遮熱塗料, 工業材料 Vol.46 No.5, pp.35 ~ 38, 1998.5
- 7) 野田憲康: 色彩も豊かな太陽光遮熱塗料, 塗装と塗料 No.601, pp.30 ~ 37, 2000.2
- 8) 舗装工学研究小委員会報告書 ポーラス舗装の熱環境特性に関する調査結果報告書, (社)土木学会地盤工学会委員会, 2000.6
- 9) 近藤純正(編著): 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書店, 1999.10
- 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 -30, pp.35 ~ 44, 1995.2
- 11) 吉田長裕, 西村昂, 日野泰雄: 歩行者意識からみた道路空間の熱環境評価に関する分析, 土木計画学研究・論文集 No.17, pp.107 ~ 112, 2000.9
- 1) Pinpoint Weather, <http://www.nifty.ne.jp/PPW/>

EVALUATION OF A PAVEMENT FOR HEAT CONTROL OF ROAD SURFACE TEMPERATURE

Tamotsu YOSHINAKA, Nobuyuki NEMOTO

Asphalt concrete pavement can easily absorb solar radiation heat because it is generally black in color and in summer, pavement surface temperature increases easily. In the urban region, development of a pavement that is able to control the rise of road surface temperature is expected as the city environment measure including heat island phenomenon, and also as a measure to improve heat environment in the pedestrian sidewalk space. In this research, the efficiency of the pavement to control the increase of pavement surface temperature was evaluated by taking measurements in periods with different daylight times and amount of rainfall on water supplied permeable pavement and solar radiation reflective pavement, which can control energy absorption of solar radiation.