

排水性舗装による温度上昇抑制効果に関する実験的研究 *

An Experimental Study about the Reduction Effect of Surface Temperature of the Porous Pavement *

吉田 長裕**・西村 昂***・日野 泰雄****

By Nagahiro YOSHIDA, Takashi NISHIMURA and Yasuo HINO

1. はじめに

近年、環境問題の中でも、ヒートアイランド現象の問題が指摘されることが少なくない。この原因として、都市部におけるエネルギー消費の増大や土地の高度利用に伴う都市部表面の舗装の増加などが挙げられており¹⁾、様々な評価方法によって、そのメカニズムの解明に取り組まれているが²⁾、自然環境下での熱環境評価は非常に難しいのが現状である。

著者らも、これまでに都市表面の変化に伴う影響を把握するため、代表的都市内地物の表面温度を実測し、その変動特性を分析してきた³⁾。その結果、夏季における道路舗装の表面温度が他の地物に比べて著しく高く、これが、表面温度と密接な関係にある気温上昇に大きな影響を与えていることが示された。一方、都市面積に占める道路の占有率は年々増加し、例えば大阪市では約20%に達している⁴⁾。

さらに、著者らは、近年施工例が急増している排水性舗装の特性に着目し、これが温度上昇抑制効果を有する可能性があると考え、試験施工部において一部保水効果による表面温度低下を実測で示した⁵⁾。これは、従来のアスファルトに比べて空隙率が大きく、保水性があり、熱容量が小さいため、熱を放出しやすい特性によるものと考えられる。本来、この排水性舗装は、若干コスト高ではあるが、通常舗装よりも強い強度を有し、その流動性の低さと併せて、車両の走行性能を向上させるとともに、表-1に示すような多様な機能によって⁶⁾、積極的に導入が進められている。

表-1 排水性舗装の効果

排水性舗装の特徴
・雨天時の水はね防止
・ハイドロプレーニングの防止
・夜間、雨天時の視認性の向上
・車両の走行騒音の低減

そこで、本研究では、これまでの研究をさらに進展させ、より一般的な熱特性として、その効果を定量的に把握するため、舗装材料の種類毎に、気象条件を含めた温度変化デ

ータを収集・分析することを目的とした。そのため、各種データを年間を通じて連続測定中であり、本稿では、平成9年12月から平成10年12月までの約1ヶ年によるデータを用いた分析を中心に検討した。

2. 舗装種別の表面温度変化の分析

(1) 実験概要

本実験では、通常舗装と排水性舗装の熱特性の違いを把握するために、以下に示すような3種類の舗装材供試体(図-1参照)を用意し、これらについて同一の自然環境下における連続的な測定が可能となるよう、大阪市立大学工学部C棟屋上(地上6F)に常設することにした。

【供試体の種類】

- ①通常舗装 (50×50×5 (cm)) 4枚
- ②20mm排水性舗装 (50×50×5 (cm)) 4枚
- ③13mm排水性舗装 (50×50×5 (cm)) 4枚

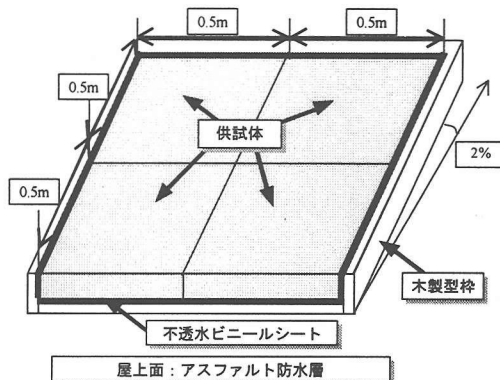


図-1 供試体の概要

②と③の違いは、骨材の粒径の違いで、一般的に粒径が大きいほど走行性能の向上が期待でき、粒径が小さいほど騒音低減効果があるとして施工されている。供試体の作成に当たっては、実際の道路表面の排水勾配と同様にするために、型枠に2%の勾配をつけ、また、底面と側面には不透水シートを敷いて供試体外への水分の流出を制御することとした。排水性舗装供試体の空隙率、透水係数は、舗装要綱に定められた基準値を用いて作成されており、それぞれ15-20(%)、 10^{-2} (cm/sec) となっている⁶⁾。但し、実験で用いた供試体は、概ねそれに準ずるものとし、別途の測定はしていない。

*Key words :環境計画、表面温度、排水性舗装、散水効果

** 学生員, 工修, 大阪市立大学大学院後期博士課程

(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138 TEL/FAX (06)605-2731)

*** 正員, 工博, 大阪市立大学工学部土木工学科教授(同上)

**** 正員, 工博, 大阪市立大学工学部土木工学科助教授(同上)

(2) 測定項目

測定項目は表-2 に示す通りであり、それらの測定個所については以下の条件に従うこととした。

表-2 測定データと測定機器の概要

	測定データ	測定機器	メーカー
各供試体	表面温度	熱伝対	—
	表面湿度	アスマン乾湿計(SK-RHG)	佐藤計量器製作所
	日射量	全天日射計(MS-801F)	英弘精機
気象データ	気温	アスマン乾湿計(SK-RHG)	佐藤計量器製作所
	風速	風杯型風速計(NO.23-SP)	太田計器製作所
	雨量	RAIN COLLECTER (Weather LinkⅢ)	AOR(DAVIS)
	測定データ	備考	測定開始日時
各供試体	表面温度	乾球・湿球温度を熱伝対で測定し、演算	H09/12/29~
	表面湿度	乾球・湿球温度を熱伝対で測定し、演算	H10/05/31~
	日射量	乾球温度を熱伝対で測定	H10/02/07~
気象データ	気温	乾球温度を熱伝対で測定	H09/12/29~
	風速		H09/12/29~
	雨量		H10/04/24~

<温湿度測定>

表面温度：各供試体を4分割した場合の中央地点において、熱伝対を用いて測定する。

表面湿度：供試体の上2cmの位置、アスマン乾湿計の乾球、湿球に熱伝対を設置し、得られる両温度データから収集後演算する。

<気象測定>

気温：供試体付近の地上1.0mの位置に設置したアスマン乾湿計の乾球に、熱伝対を張り付けて測定する。

風速：供試体付近に設置する。

日射量：供試体付近に設置する。

雨量：供試体付近に設置する。

3. 舗装の表面温度の分析

1998年における通常舗装の表面温度の月別時間別変化を図-2に、表面温度の月別最大・最小値を表-3に示す。8月の12-13時における平均値は、50℃を超えており、最大値では60℃を超えていることから、非常に劣悪な状況になることがわかる。また、夏期における夜間の道路表面温度が、30℃を超える日も多く、これが熱帯夜と呼ばれる現象に少なからず影響を及ぼしていると考えられる。

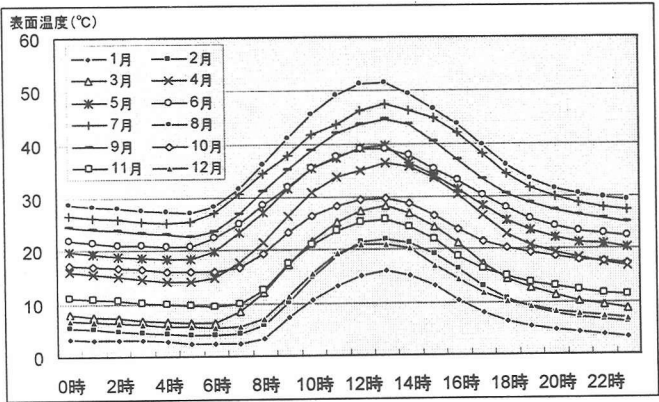


図-2 通常舗装表面温度の月別時間別平均値 (1998年)

表-3 通常舗装表面温度の最大・最小値 (1998年)

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最大温度	28.0	35.7	45.6	58.9	57.6	58.8	61.2	63.1	59.2	44.0	41.9	30.4
最小温度	-3.6	-2.4	1.2	1.1	13.9	15.0	19.3	22.6	20.0	11.2	1.4	0.2

以後の分析では、連続測定による現在までの第一四半期(98年2月7日~98年6月15日)の129日間のデータを用いて、表面温度と各種気象状況、ならびにそれらの関係を分析することとした。

(1) 測定項目間の相関分析

まず、各測定値の関係を見るために、降雨日とその翌日のデータを除いて相関分析を行った(表-4)。これをみると、温度の各供試体間の相関係数は0.99以上と高いことから、いずれの場合もほぼ同様な温度推移をしていると考えられる。また、大気温度との相関も約0.9と非常に高いことから、表面温度と周辺気温が連動していることがわかる。また、日射量は、各供試体の表面温度と比較的高い相関係数(0.7)を示しているが、大気温度との相関は高いとは言えない(0.51)。これは、日射と気温上昇の時間差によるものと考えられる。また、風速と温度の関係では相関が低いが、これは測定間隔が10分間であるために、十分に関係が説明しきれないと考えられる。

表-4 測定項目間の相関係数

単相関	日射量	風速	20mm温度	13mm温度	通常温度	大気温度
日射量	1.000					
風速	0.241	1.000				
20mm温度	0.737	0.098	1.000			
13mm温度	0.744	0.106	0.999	1.000		
通常温度	0.722	0.110	0.995	0.996	1.000	
大気温度	0.514	-0.026	0.923	0.919	0.922	1.000

(2) 舗装種別による表面温度特性の差異

通常舗装と排水性舗装の表面温度の違いを比較するため、ここでは晴天時(44日間)の日射量別に通常舗装と排水性舗装の温度差をみることにした(図-3)。

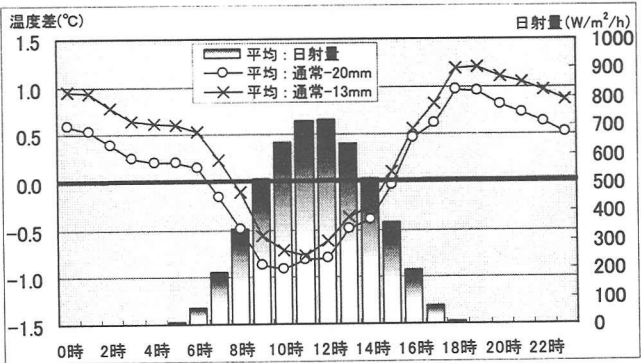


図-3 通常舗装と排水性舗装の温度差の24時間変動

これをみると、温度差そのものは、-1.0～1.2℃の範囲で大きくはないが、日射量の多い時間帯では排水性舗装の温度が高く、日射量が少なくなると通常舗装の温度が高くなる傾向を示している。これは、通常舗装の熱容量が高く、排水性舗装の方が熱を放射しやすいためと考えられる。また、同じ排水性舗装であっても、13mm 粒径の舗装の方が温度上昇抑制の効果は大きいといえる。

(3) 降雨後の表面温度変動

排水性舗装は、高い保水性により温度上昇を抑制する効果があるとされていることから、ここでは、降雨後の各舗装の表面温度変動をみることにした。ただし、分析には、降雨の条件を扱い易くするために、表-5 に示すデータをサンプルとして用いることとした。降雨前後の表面温度の推移を図-4 に示す。降雨前日の天候は晴れで、このときの表面温度の最高値は 50℃を越えている。降雨時間においては、断続的に合計 30.6mm の降雨があった。

表-5 降雨前後の分析使用データ

	使用データ	雨量
降雨前24時間	98/6/1 8:40-98/6/2 8:30	-
降雨24時間	98/6/2 8:40-98/6/3 8:30	30.6 (mm/day)
降雨後24時間	98/6/3 8:40-98/6/4 8:30	-
降雨後25-48時間	98/6/4 8:40-98/6/5 8:30	-

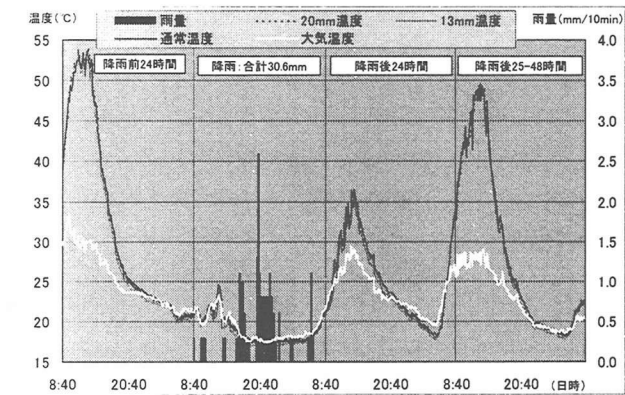


図-4 降雨日前後における降雨と表面温度の様子

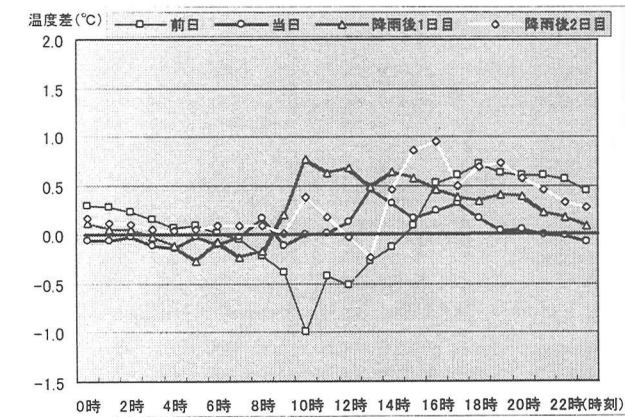


図-5 降雨前後日における通常舗装と排水性舗装の表面温度差 (20mm 排水性舗装)

一方、通常舗装との比較を行うため通常舗装表面温度と排水性舗装表面温度の差の分布として評価することにした (図-5)。これを見ると、降雨日以後の変動は降雨前日に比べると、排水性舗装の温度の方が高くなることはほとんどないことを示していることから、排水性舗装の保水効果がよく示された結果と言える。

次に、これらの結果を踏まえて、舗装材 (因子 A)、日 (因子 B)、時間 (因子 C) の3つの因子に分類し、三元配置分散分析を行った (表-6)。ここで、表面温度に関係する日射量を因子として用いなかったのは、表面温度は夜間も変動しており、日射量の因子を加えるよりも時間変動因子の方が推移の形態を表していると考えられるからである。

表-6 分散分析結果

要因	偏差平方和	自由度	平均平方	F値	P値	寄与率
舗装材	17.34	2	8.67	223.50	0.0000**	0.5
日	1746.55	2	873.28	22515.13	0.0000**	52.7
時間	16328.71	23	709.94	18304.02	0.0000**	42.8
舗装材×日	0.67	4	0.17	4.30	0.0031**	0.0
舗装材×時間	3.74	46	0.08	2.10	0.0013**	0.0
日×時間	3023.99	46	65.74	1694.91	0.0000**	4.0
誤差	3.57	92	0.04			
全体	21124.57	215			** : 1%有意	

これをみると、降雨日 (要因 : 日) と時間の寄与率が52.7%、42.8%となり、この2要因が特出した結果となったが、いずれの要因も統計的には有意な結果であることがわかった。舗装材の違いは、降雨や時間変動要因が大きいために寄与率は低くなったが、図-5から日中の排水性舗装の温度が若干低下する傾向が読みとれるなど、排水性舗装の保水機能を確認することができると考えられる。

4. 排出熱量の分析による排水性舗装の評価

(1) 排出熱量試算の必要性

排水性舗装は降雨などの水分を含んだ時点においては、通常舗装との表面温度差はなく、水分を含んだ後は、前述のような温度差がみられた。降雨後においては、表面温度が低下する一方で、以下に説明する潜熱量が増加するため、それを考慮した排出熱量の評価が必要になる。物体表面から大気へ放出される熱には、以下のように 3 種類がある。

顕 熱 : 大気に直接熱を伝達する熱。物体の温度を上げるのに使われる熱。

潜 熱 : 物質の状態を変えるために費やされる熱。水分の蒸発に伴う熱としてとらえることが多い。

赤外放射 : 物体表面からでる熱エネルギー。
これを、算出する式には以下のものを用いた。

赤外放射 : $W = \varepsilon \sigma t_1^4$

顕熱量 : $Hc = \alpha c(t_1 - t_0)$ (ニュートン冷却則)

潜熱量 : $Hm = (\gamma + Cp \cdot t_1) \cdot Kx \cdot (x_1 - x_0)$ (レイスの関係)
 σ : Stefan-Boltzmann fix number: 5.669E-8 (W/m²/K⁴)

ε : 放射率
 α_c : 対流熱伝達率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
 γ : 水の蒸発潜熱 ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}(0^\circ\text{C})$)
 Cpv : 水蒸気の低圧比熱 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)
 Kx : 物質移動係数 (α_c/Cpm) ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg})$)
 Cpm : 湿り比熱 ($\text{Cpa} + \text{Cpv} \cdot x_0$) ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)
 Cpa : 乾燥空気の高圧比熱 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)
 t_i : 供試体表面温度 ($^\circ\text{C}$)
 t_0 : 大気温度 ($^\circ\text{C}$)
 x_i : 供試体表面比湿 (kg/kg)
 x_0 : 大気比湿 (kg/kg)

この式で、潜熱量は大気中と表面付近の湿度の移動を表しており、顕熱量は、大気と表面付近の熱の移動を表しており、どちらも平衡状態になるまで熱移動が継続することを表している。

(2) 排出熱量からみた排水性舗装の効果

上式を用いて各舗装から排出される熱量を合計し、日射量と比較したものが図-6 である。降雨前後を比べると、降雨後の通常舗装の排出熱量が排水性舗装に比べて若干であるが高ことが分かる。

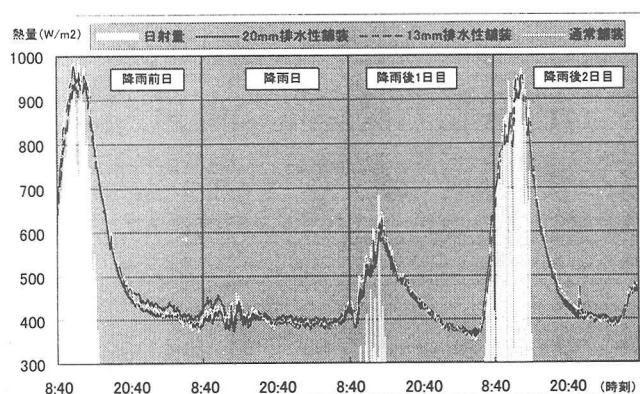


図-6 排出熱量の試算結果

降雨後の排水性舗装の保水性効果を見るために、ここでは特に物質移動に係わる熱量とされる、潜熱と顕熱の比較を行った (図-7)。

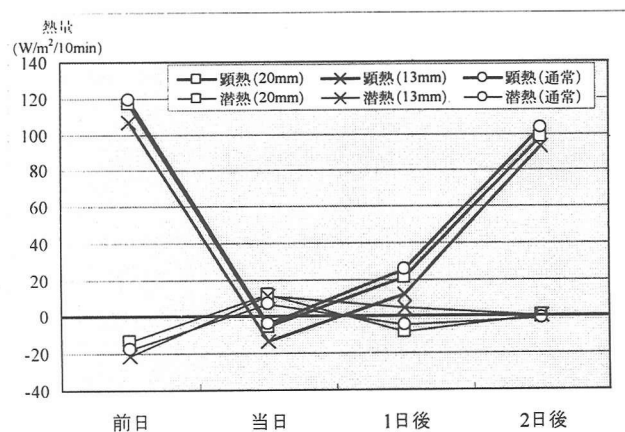


図-7 降雨前後日における顕熱と潜熱量の舗装種別推移

これを見ると、降雨日においてはどの舗装でも潜熱がプラスになっており、水分の蒸発が確認された。降雨後 1 日目においては、13mm 排水性舗装の潜熱のみプラスとなっており、持続効果を確認できた。20mm 排水性舗装における潜熱量は、降雨後 1 日目でマイナスの値を示しており、持続効果は低いと言える。この原因としては、表面形状の違いによって水分の蒸発量が異なることが考えられる。

このように降雨による各熱量の推移を把握したが、水分量の差から得られる潜熱量の値は、温度差から得られる顕熱量や赤外放射量よりもかなり低い。これは、降雨日には大気の湿度も高くなるため、水分の蒸発が進まないことも理由としてあげられる。

5. 散水による温度低減効果

(1) 排水性舗装への散水による温度低減効果

まず、散水によって表面温度がどれくらい低下するのかを把握するために、1998 年 6 月において、散水実験を行った。その概要は、表-7 に示すとおりである。

表-7 散水実験概要

散水日	散水時刻	散水量	水温 ($^\circ\text{C}$)
6月15日	14:15	表面散水 ($3\ell/\text{m}^2$)	21.8
6月16日	14:15	表面散水 ($3\ell/\text{m}^2$)	22.2
6月17日	14:05	飽和量	22.8
6月18日	14:05	飽和量	22.6

注) 飽和量とは、表面に水が浮く状態までの量のこと。

このときの、20mm 排水性舗装、通常舗装、気温、通常舗装との表面温度差を図-8 に示す。これを見ると、散水直後に温度が急激に低下するものの、時間が経つにつれて、その温度変化量は、通常舗装と同様な温度変化に近づいていくことがわかる。

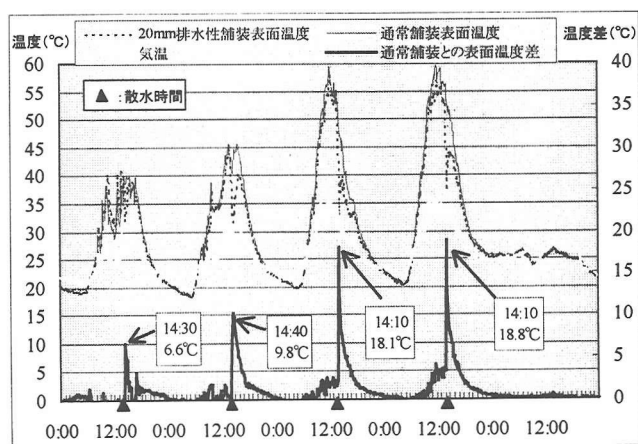


図-8 散水時の各温度と温度差の経時変化

この結果をまとめると、表-9 のようになった。

表-9 散水実験概要

散水日	散水時刻	最低温度 記録時刻	最低時温 度差 1)	低下最終 時刻 2)	継続時間 (分) 3)
6月15日	14:15	14:30	6.6	20:00	345
6月16日	14:15	14:30	10.1	20:40	385
6月17日	14:05	14:10	18.1	20:10	345
6月18日	14:05	14:10	18.8	21:00	415

1) 温度差= (通常表面温度) - (20mm表面温度)
2) 1) 式で1℃未満となった時間
3) (低下最終時刻) - (散水時刻)

これをみると、散水量の違いによる継続時間の違いはほとんどみられず、その日の表面温度が高いほど、散水によって低減効果が大きくなっていることがわかる。また、散水による温度低下は、水温と同等までには至らなかった。これについては、本来、散水した水量とその温度との平衡状態で決まるものと思われるが、本研究では、自然状態での排水状況を優先したため、流出した散水量やその温度は測定しなかった。

(2) 散水時間と舗装の種類の違いによる温度低減効果

次に、供試体や散水時間の違いによる温度低減効果の違いをみるために、8 月に朝と夕方の散水実験を各 2 回ずつ行った。実験日の概要は表-10 に示すとおりである。

表-10 散水実験概要

散水日	散水時刻	散水量	水温
8月4日	19:20	飽和量	29.2
8月13日	7:20	飽和量	29.0
8月18日	19:20	飽和量	29.2
8月21日	7:20	飽和量	29.8

散水実験は、すべての供試体で同時に行っている。ここでは、排水性舗装と通常舗装の違いをみるために、表面温度差の推移をみることにした。

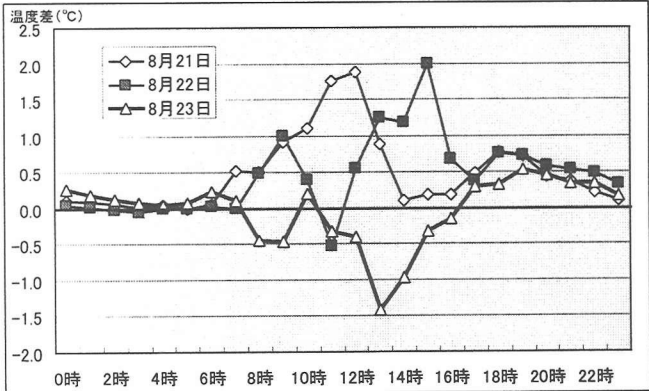


図-9 散水日とその後 2 日間における通常舗装と排水性舗装の表面温度差 (20mm 排水性舗装 : 8 月 21 日散水)

図-9、図-10 は、8 月 21 日の朝 7 時散水時の通常舗装との温度差の推移を排水性舗装の種類別に示したものである。これをみると、どちらのグラフでも、散水を行った朝の 7 時からプラス側を推移しており、これは、排水性舗装の温度低下が大きいことを表している。また、その推移は、次の日の 22 日 17 時頃まで継続していることがわかり、これは排水性舗装の持つ持続効果といえる。

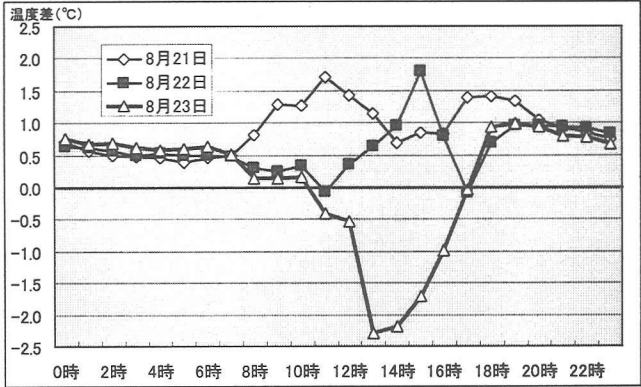


図-10 散水日とその後 2 日間における通常舗装と排水性舗装の表面温度差 (13mm 排水性舗装 : 8 月 21 日散水)

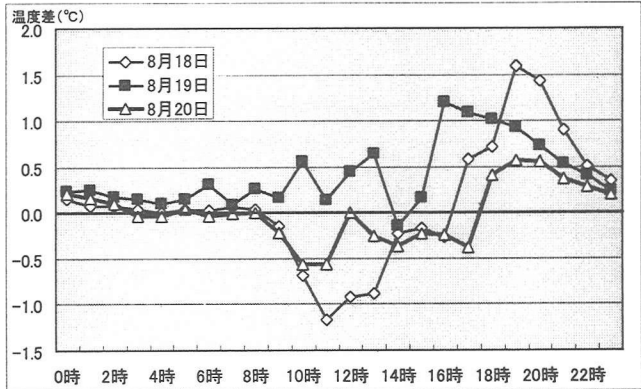


図-11 散水日とその後 2 日間における通常舗装と排水性舗装の表面温度差 (20mm 排水性舗装 : 8 月 18 日散水)

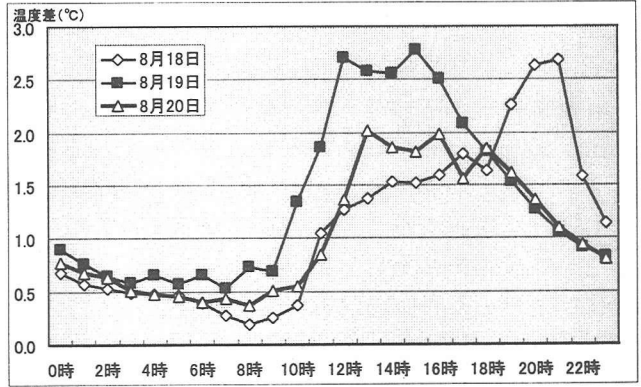


図-12 散水日とその後 2 日間における通常舗装と排水性舗装の表面温度差 (13mm 排水性舗装 : 8 月 18 日散水)

図-11、図-12 は 8 月 18 日の夜 7 時散水時の通常舗装と各排水性舗装の温度差の推移を排水性舗装の種類別に示したものである。これをみると、20mm 排水性舗装では、散水後の 19 時で最高約 1.6℃の違いがみられ、次の日におい

ても、若干ではあるがその影響がみられる。また、13mm排水性舗装では、散水後の21時に約2.7℃の違いがみられ、19日の昼間においても継続した温度差がみられた。

これらの違いをさらに詳細にみるために、供試体底面に設置した熱電対の温度差をみると図-13 のようになる。これをみると、夕方散水を行ってから次の日にかけては、排水性舗装の温度が約0～2.3℃低いことを示しており、つまり、排水性舗装は、供試体内部の熱を散水によって奪い、結果として表面温度低下につながっていると考えられる。

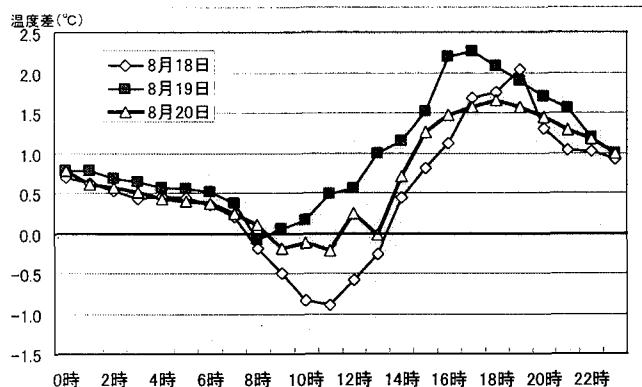


図-13 散水前後日における通常舗装と排水性舗装の底面温度差 (20mm 排水性舗装：8月18日散水)

朝と夜の散水時間の違いでは、朝に散水を行うと効果は大きく、夜に散水すると一時的に効果がみられるものの、次の日には、効果が薄いといえる。つまり、散水による温度低下を期待するには、日射の当たっている時間帯のほうが効果的といえる。

6. まとめと今後の課題

実験から得られた排水性舗装と通常舗装の違いを以下にまとめて示す。

- 1) 晴れの日においては、日射量の多い時間帯においては、排水性舗装の表面温度のほうが高く、夜間になると、排水性舗装の表面温度のほうが低い。
- 2) 降雨に伴う排水性舗装保水効果は、およそ1日持続し、その間の表面温度は通常舗装に比べて低い。
- 3) 潜熱量を考慮した排出熱量の試算を行い、各熱量の排出の程度の時間変化を把握した。
- 4) 排水性舗装では、散水による舗装内部の温度低下が期待できるため、結果として表面温度が低下する。
- 5) 散水の効果は、日射量の多い日中に、より大きい。

以上のことから、排水性舗装は、舗装の色や表面積の違いによって日中表面温度が若干高くなることもあるが、散水や降雨によって、その保水効果の持続機能が水分の蒸発(潜熱)によるエネルギー消費を促進し、また同時に表面温度を低下させるため、都市の温度上昇に影響の大きい道路舗装面の温度上昇を抑える可能性の大きいことが分かった。今後は、温度に影響を与える色等の各種要因を考慮した分析をするとともに、保水性を高めたり、それを持続させるための方法を検討する必要がある。

〈謝辞〉供試体の作成にあたっては、大林道路株式会社にも多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

〈参考文献〉

- 1) 大阪市環境保健局他「大阪市ヒートアイランド対策検討調査報告書」、1994
- 2) 梅干野晃「都市エネルギーに関する実態把握とモデル化」、日本建築学会環境工学委員会都市エネルギー小委員会シンポジウム資料、27～30、1995
- 3) 吉田長裕等「赤外線温度計による都市地物の表面温度変動特性に関する一考察」、土木学会全国大会講演概要、IV-17、1994
- 4) 大阪市計画局、「大阪市の土地利用」、1994
- 5) 吉田長裕等「表面温度の変動特性からみた道路舗装への散水効果に関する基礎的研究」土木計画学研究・講演集、Vol. 20 (1)、pp. 155-158、1997
- 6) 「アスファルト舗装要綱」、(社)日本道路協会 1992

排水性舗装による温度上昇抑制効果に関する実験的研究

吉田 長裕 西村 昂 日野泰雄

近年の環境問題の中でも、都市特有の熱環境問題が取り上げられているが、この主な原因として、都市表面の変化に伴う影響が挙げられている。特に道路舗装は都市面積に占める割合も高く、また、表面温度が著しく高くなることが影響していると考えられる。そこで著者らは、近年施工例が急増している排水性舗装に着目し、過去の実測から温度上昇抑制効果は期待できたものの、一般的な熱特性の把握は十分ではなかった。そのため本研究では、これらの熱特性やその温度上昇抑制効果を定量的に把握するための実験を企画し、気象条件を含めた温度変化データを収集・分析し、排出熱量の計算を試み、また、散水による温度低減効果とその持続効果について定量的な把握を試みた。

An Experimental Study about the Reduction Effect of Surface Temperature of the Porous Pavement

By Nagahiro Yoshida, Takashi Nishimura and Yasuo Hino

Road pavement occupies large area in the urban area, and surface temperature of road pavement becomes remarkably high. In the past study, it has been shown that porous pavement have been expected to show an effect of reduction for rising the surface temperature. In this study, some experimental observations were carried out to consider this effect quantitatively, and surface temperature data, including the reduction effect by water sprinkling water in the actual environmental situation, were collected and analyzed.