

冬季自然状態における保水性舗装の 熱環境特性に関する実験的研究

福田萬大¹・浅枝隆²・藤野毅³

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

²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)

³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)

夏季における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、舗装表面温度を低く保つことができる保水性舗装が有効と考えられる。しかし、冬季には通常のアスファルト舗装と比べ保水性舗装の周辺が冷熱環境にならないか、凍結しやすく交通安全上の問題はないかといった点を明らかにするため、屋外の舗装サンプルを用い冬季の舗装温度や日射量、赤外放射量などを連続して測定した。その結果、熱放射環境の観点から保水性舗装は通常のアスファルト舗装とほぼ変わらず、冷熱環境とはならないことが分かった。また、夜間から早朝にかけての路面温度は、通常の舗装が氷点以下になっても、保水性舗装は0°C付近を長く保っているという結果も得られた。

Key Words: *heat island, urban environment, permeable pavement, cold thermal environment, heat balance of pavement*

1. まえがき

ヒートアイランドに代表される都市の熱環境問題を緩和するため、都市内部面積の10~20%を占める道路舗装からの顕熱、赤外放射、日射の反射などを低減させることの有効性が提示されている^{1)~4)}。このためには、都市内散水を行ったり、保水性を有する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ぐことが効果的である。なかでも、土のように保水性を有する舗装であれば、吸水した水分を長く保持できるという特性をいかすことができると考えられる^{5)~8)}。

このような考え方で、筆者らは舗装の大部分を占める車道を対象とした保水性(半たわみ系)舗装を考案した。夏季における実験から、保水性舗装に水を給水または散水して保水させた場合、その表面温度はアスファルト舗装より15~20°C程度低くできることを示した。また、この際の蒸発潜熱量は160~280W/m²(舗装面に入射する熱量の約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

大きいことも実験的に明らかにできた^{9)・10)}。

しかし、保水性舗装は舗装温度が低いため、冬季においては冷熱環境とならないか、凍結しやすく交通安全上の問題はないか、積雪時に融雪しにくく除雪が困難ではないのか、などといった疑問点が残されている。過去に冬季における地表面の熱収支に関する研究¹¹⁾、舗装路面の凍結に関する研究^{12)・13)}などが行われているものの、特に冬季での保水性舗装に関する研究はあまり見受けられない。

本論文では、これらの問題点を明らかにするため、冬季自然状態(降雨後、晴天時、積雪時)における保水性舗装の温度および日射量、赤外放射量などを通常の舗装と比較しながら測定し、熱収支解析を行って考察を加えた。

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

舗装サンプルは図-1に示す6種類を選定した。

この舗装サンプルは、1997年7月に屋外実験場

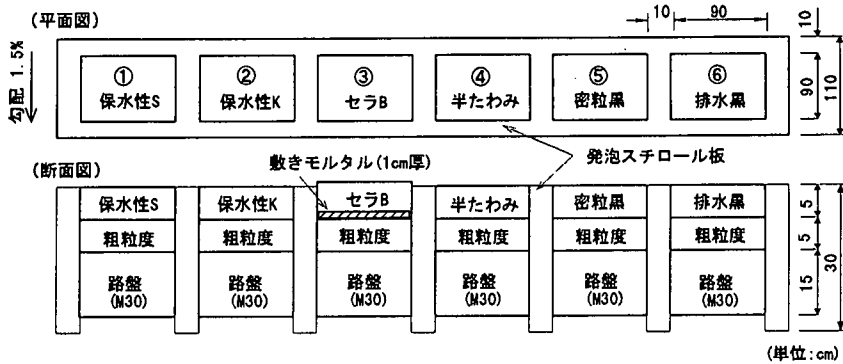


図-1 各舗装サンプルの配置

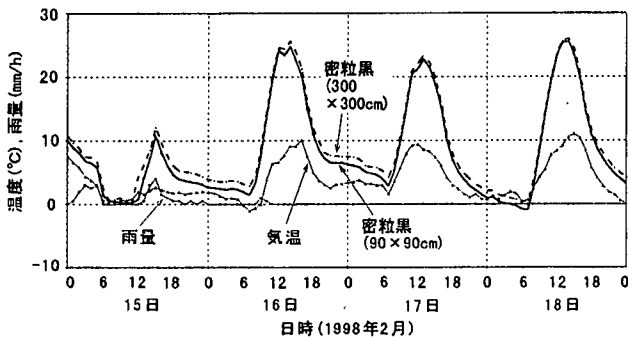


図-2 舗装サンプル大小の舗装表面温度の比較

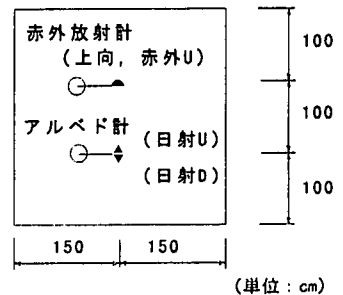


図-3 日射量・赤外放射量の測定方法

(埼玉県鴻巣市)で構築した平面寸法90×90cm(舗装表面勾配=1.5%)のもの¹⁰⁾である。また、比較用として過去の実験で使用した土系舗装⁹⁾(関東ローム, 厚さ15cm)も使用した。これらの舗装サンプルは、いずれも自然状態での測定を行った。

各舗装サンプルの内訳は、半たわみ性舗装¹⁴⁾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), 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)および水密な舗装である半たわみ性舗装(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)と排水性アスファルト舗装(黒色, 以下, 排水黒と記す)の6種類である。(なお, 本論文では保水性S, 保水性K, セラBをまとめて保水性舗装と呼んでいる。)

表層厚はいずれも5cmであり, 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。

著者らは夏季における密粒黒および排水黒について, 平面寸法300×300cmと90×90cmの同時刻にお

る両者の舗装表面温度差が, 最大1°C程度と極めて小さいことを確かめている¹⁰⁾。冬季においても同様な結果となるかを確かめるため, 降雨後晴天となった4日間(1998年2月15~18日)について比較した。

図-2に示すように, 同時刻における300×300cmの舗装表面温度差は最大でも日中が1°C, 夜間が2°C程度高いだけであり, 平面寸法を90×90cmと小さく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。なお, 2月18日早朝の両者の温度は0°C前後となっているが, 密粒黒は水密な舗装で蒸発潜熱などの影響はほとんどないことを考慮すると, 日中~夜間の温度差がそのまま早朝まで続いたものと考えられる。

b) 使用材料の主な性状

各舗装構成層に使用した材料の主な性状を表-1~4に示す。開粒度のアスファルト混合物(以下, アスコンと記す)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, 路盤材は粒調砕石(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ロートによる目標フロー値を10~11秒程度とした^{21)・14)・15)}。使用した保水性舗装材(保水性S, 保水性KおよびセラB)は, 厚さ5cmに吸水する時間が30分前後のものである。

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 アスコン	排水黒 アスコン	粗粒度 アスコン	開粒度 アスコン
	最大粒径 (mm)		13	13	20
バイ ング ダ	種類	ストリートアスファルト60~80			
	バインダ 量 (%)	5.4	4.2	5.0	4.2
	プラントミックス		高粘度		改質Ⅱ型
	改質剤添加率	—	7%	—	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	⑤	⑥	—	①②④
	基層	—	—	①~⑥	—

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 (%)	単体量 (kg/m ³)			P-ロ ット 値 (秒)	圧縮 強度 σ _c (N/mm ²)
		水 W	普通 セメント C	SBR系 ラテックス		
半たわみ ④ (灰色)	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 (淡茶色)				
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	単体量 (kg/m ³)							P-ロ ット 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 (暗灰色)	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	マーシャル安定度 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 (白色)	注入材	285	4.0	605	189	23	—	850	1.91	—	10.9	0.1	46.3	1.1
	舗装材	マーシャル安定度 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

(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のみ舗装表面から10と40mm (表層), 85mm (基層中央), 185mm (路盤中央) の深さに、その他は全て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。空隙率の大きい排水黒については、熱電対の受感部を粗骨材中に埋め込みセメントペーストで固定した⁸⁾。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、地上約1.5mの高さにおける気温、湿度を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, HMW20UB) により測定し、30分間の降雨量および平均風速を転倒ます型雨量計および三杯式風速計 (高さ1.5m) により測定した。なお、積雪時の雨量は雨量計上の雪が融けた水を融雪水量として測定した。

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, サーモダックE) に取り込んだ。

b) 日射量・赤外放射量の測定方法

上空からの日射量 (日射U) と舗装表面からの日射反射量 (日射D) および赤外放射量 (赤外U) は、

表-5 各舗装表層面のアルベド¹⁰⁾

表層材名	アルベド 測定値	
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	
排水黒	0.05	
土	0.09	

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) を用い、舗装温度の測定と同時に30分間隔で測定した。測定位置は図-3に示すように、平面寸法3×3mの舗装サンプル (密粒度アスコン, 黒色) の中央部、高さ20cmである。

3. 舗装サンプルの温度等測定結果

観測した冬季のデータから、2月15日の降雨後に晴天が続いた1998年2月16~20日の5日間および1月8~9日に約25cm積雪した1998年1月9~13日の5日間について、気象、日射量・赤外放射量および舗装温度

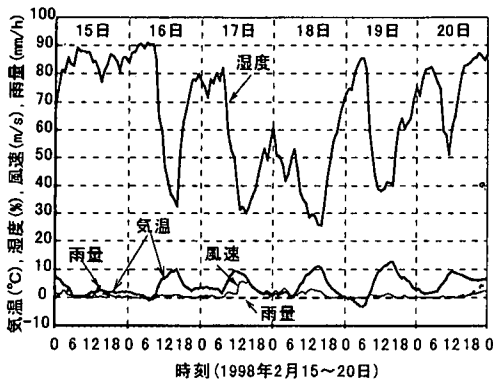


図-4 気象データの経時変化

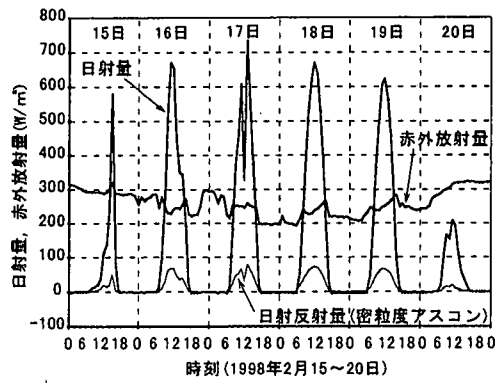


図-5 日射量・赤外放射量の経時変化

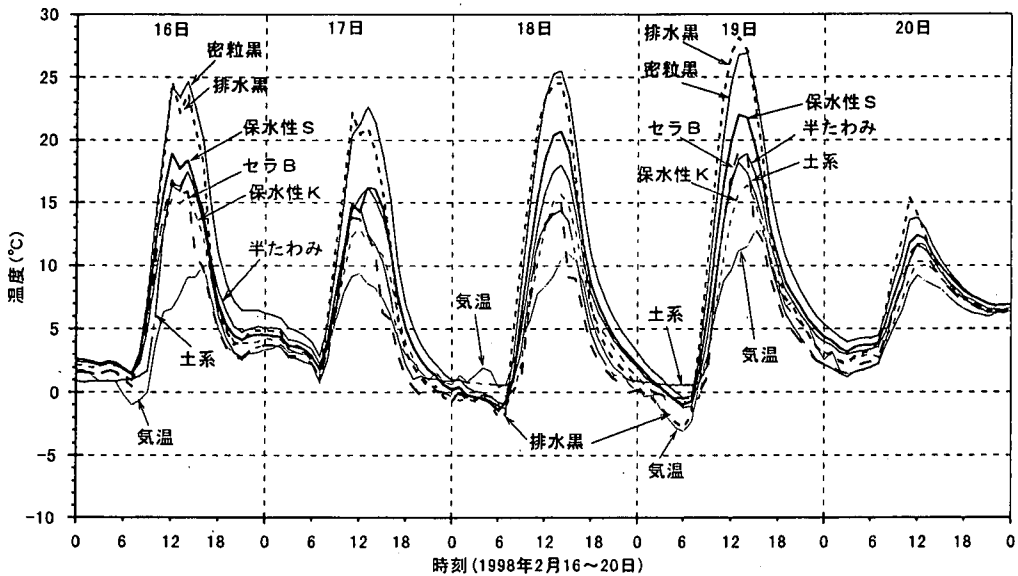


図-6 舗装表面温度の経時変化(降雨後～晴天時)

の経時変化を次に示す。なお、観測データを説明するにあたって必要な舗装表面のアルベドを表-5に示す。

(1) 降雨後～晴天時の測定結果

a) 気象データ等の測定結果

1998年2月15～20日における気象データおよび日射量・赤外放射量の経時変化を、降雨日(2月15および20日)も含めて図-4～5に示す。2月15日は雨天(総降雨量23mm)であり、2月16日の明け方から19日まで4日間晴天が続いたのち、20日は曇天で午後から降雨となった。

観測された晴天日(2月16～19日)の最高の日射量はおよそ650W/m²程度、赤外放射量は250W/m²程度であった。夏季における日射量が800W/m²程度、赤

外放射量が400W/m²程度に比べ、冬季は日射量が20%程度、赤外放射量が40%程度小さい結果であった。

b) 舗装表面温度の時刻変化

降雨後～晴天時(2月16～20日)における舗装表面温度の経時変化を図-6に示すが、この特徴は以下のようにまとめることができる。

2月16日(降雨直後)早朝の最低気温は-1℃であるが、舗装表面温度は最も低い排水黒でも0.5℃といずれも気温より高くプラス側の温度である。昼間の舗装表面温度は密粒黒および排水黒が約25℃で最も高く、保水性S、半たわみ、土系、セラBが17～19℃でこれに次ぎ、アルベドが大きく水を含む保水性Kは約15℃とやや低い。

過去の夏季自然状態における降雨翌日の舗装表面温度を参考に示すと、密粒黒および排水黒が53～56

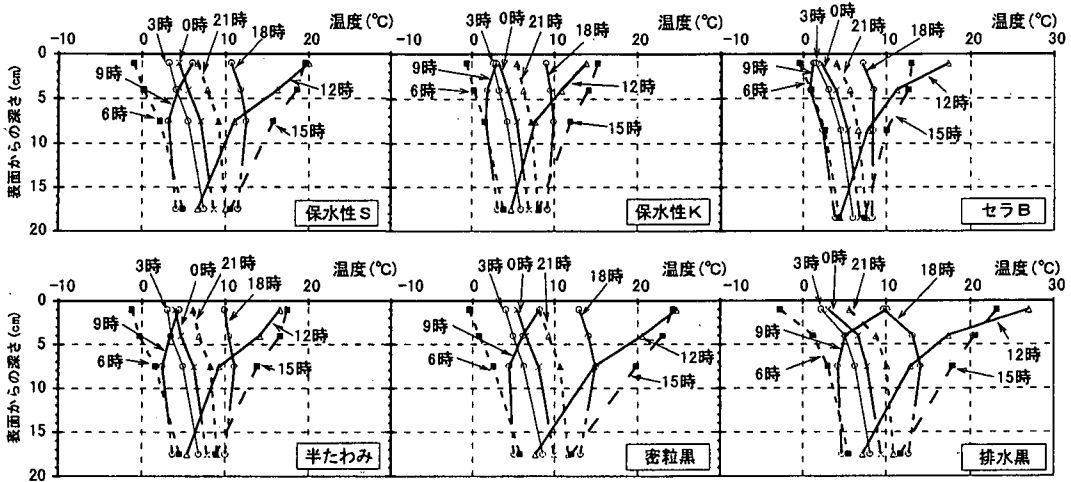


図-7 舗装の深さ方向温度変化(晴天時, 1998年2月19日6時~20日3時)

°C, 半たわみ, 保水性Sが43~46°C, 土系, セラB, 保水性Kが35~39°Cであった¹⁰⁾。昼間の舗装表面温度の順序は, 冬季も夏季もほぼ同じであるといえる。

18日早朝の最低温度は, 気温が0.5°Cとプラスであるが, 土系が1°Cであるのを除くと, 排水黒が-2°C, その他は-0.5~-1°Cでいずれもマイナスを示している。これは, 図-4の気象データから明らかのように, 17~18日夜間の湿度は50%前後と低く, 放射冷却が強かったためと考えられる。

19日早朝の最低温度は気温が-3°Cと冷え込み, 舗装表面温度も土系の1°Cを除くと, 排水黒が-3°C, その他は-0.5~-1°Cでいずれもマイナスを示している。

冬季昼間は, 舗装面の受ける熱入射量が夏季より小さく, 水密な舗装(密粒黒, 半たわみ)と保水性舗装との舗装表面温度に夏季ほど大きな差が見られない。冬季夜間においても, 日中の舗装温度が高い密粒黒と保水性舗装との表面温度に大きな差は見られず, また, 排水黒は最も低い表面温度を示している。

c) 舗装の深さ方向温度変化

晴天時(2月19日6時~20日3時)の, 3時間ごとの深さ方向温度変化を図-7に示す(降雨後の2月16~17日とは深さ方向の温度変化の傾向に大きな差はないので, 煩雑さを避けるため晴天時のみ示す)。

早朝6時の深さ方向の温度は, 深さ18cmから舗装表面にむかいはじめに低下しているが, 他の舗装と比較し排水黒の表面付近の温度低下が大きい。

9時にはどの舗装も表面温度が上昇しているが,

特に黒色でアルベドの小さい密粒黒および排水黒の表面温度上昇が大きい。しかし, 温度勾配(表面と深さ7.5cmの温度差)で見ると, 排水黒の6°Cに対し暗灰色である保水性Sは密粒黒とほぼ同じ3°Cであり, その他の舗装より大きい。

この傾向は12~15時でさらに顕著に見受けられ, 表面温度は排水黒が27°C, 密粒黒が25°C, 保水性Sが20°Cであり, その他の舗装では最も高い温度でもセラBの18°Cである。

日没後(18時)の表面温度は, 密粒黒が最も高く13°Cであり, 保水性S, 排水黒, 半たわみが10~11°C, 保水性Kが9°Cで, セラBは7°Cと最も低い。これを温度勾配(表面と深さ7.5cmの温度差)で見ると, 排水黒が4°Cで最も大きく, その他の舗装は1~2°Cと小さい。

舗装表面温度の日振幅(最高温度-最低温度)を比較すると, 排水黒が30°Cで最も大きく, 密粒黒が25°C, 保水性Sが21°C, 半たわみが19°C, セラBが18°Cであり, 保水性Kは15°Cで最も小さい。

また, 排水黒は最も高い表面温度を示すとともに, 最も低い表面温度をも示す。

この理由として, 舗装表面が黒色系でアルベドの小さいものは日射をよく吸収するため, アルベドの小さいものから順に日中の表面温度が上昇すること, 夏季において特に排水黒のように大きい空隙をもつ舗装は, 舗装より低温の大気との間で空気の交換があり, 舗装表面近傍の温度を低下させる効果のあることが示されているが¹⁰⁾, 冬季においても同じ現象が生じていることがあげられる。

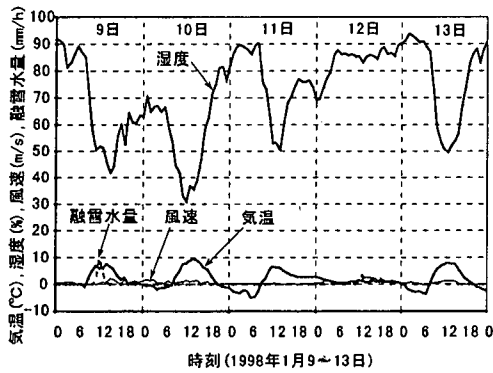


図-8 気象データの経時変化

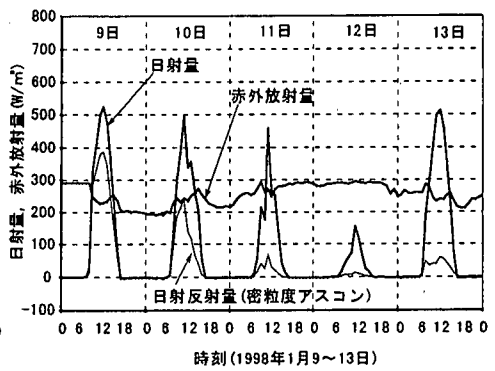


図-9 日射量・赤外放射量の経時変化

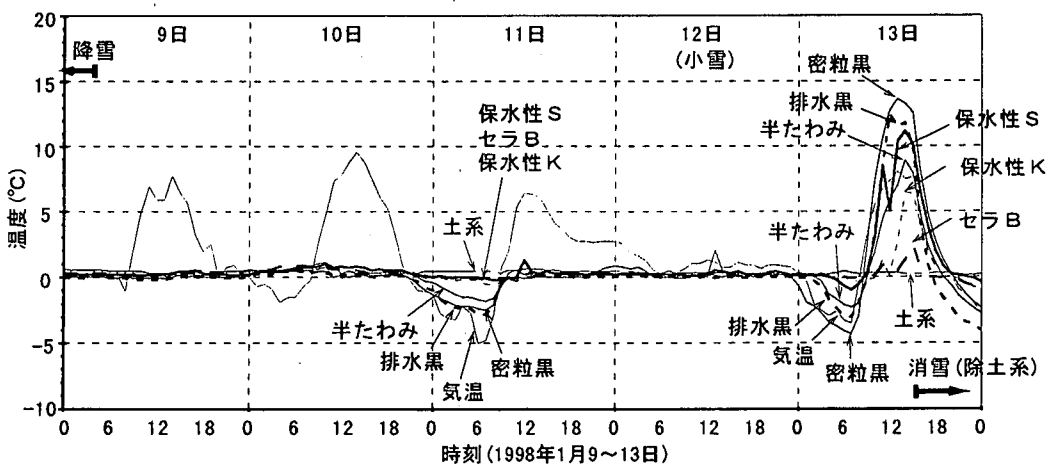


図-10 舗装表面温度の経時変化(積雪時)

(2) 積雪時の測定結果

a) 気象データ等の測定結果

1998年1月9～13日における気象データ、日射量、日射反射量、赤外放射量の時刻変化を図-8～9に示す。1月8日夕方～9日明け方に降雪(積雪約25cm)があり、12日は小雪がちらついていたが、その後13日の午後には消雪し、積雪量は水当量(水の厚さ換算量、総融雪水量)で33mmが記録された。

b) 舗装表面温度の時刻変化

積雪時(1月9～13日)における舗装表面温度の経時変化を図-10に示す。

なお、舗装サンプルの周囲には発泡スチロール板を設置していたため、舗装サンプルの周囲10cm程度は中央付近よりも積雪深が大きかったが、90×90cmのいずれの舗装サンプルも中央70×70cm程度はほぼ同じ積雪深であった。

積雪後約2日間(1月9日～10日20時)の表面温度は、各舗装ともほぼ0～1℃とプラスの温度を保っている。

1月10日夜には気温が低下しはじめ、1月11日明け方の最低気温は-5℃と冷え込んだ。この間の舗装表面の最低温度は、排水黒、密粒黒、半たわみが-2～-3℃と低く、土系、保水性S、保水性K、セラBが-0.5～+0.5℃であり、両者には明らかな差が見られる。同様な傾向は1月13日早期にも観測された。

保水性S(W)と密粒黒を例にとると、表-6に示すように両者の熱容量はほぼ同じであり、両者の温度差(約3℃)を熱容量の違いからは説明できない。これは、保水性舗装のように舗装体中に水を含んでいる場合、その水が凍る際に氷の融解潜熱に相当する熱量を放出するが、水密的な舗装はそのための熱量が不要であり、保水性舗装よりも低い温度を示したのではないかとと思われる。

c) 舗装の深さ方向温度変化

積雪時(1月10日6時～11日3時)における3時間ごとの舗装の深さ方向温度変化を図-11に示す。

各舗装とも、昼間～夜間における深さ方向の温度勾配はほぼ一定しており、特に昼間の表面温度は0

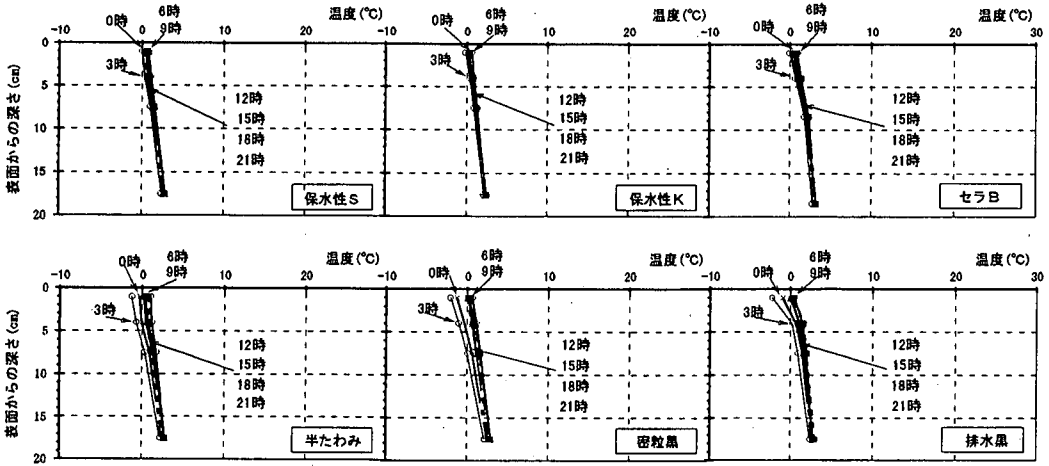


図-11 舗装の深さ方向温度変化(積雪時, 1998年1月10日6時~11日3時)

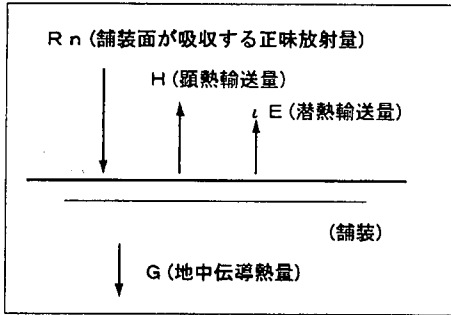


図-12 舗装表面での熱収支

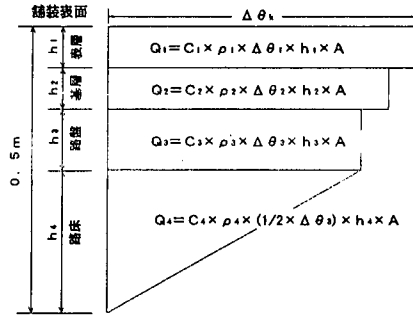


図-13 舗装貯熱量の計算モデル

~1°Cを保っている。しかし、夜間0~3時の排水黒、密粒黒、半たわみの表面温度は保水性舗装よりも低い温度を示している。

4. 舗装面・積雪面における熱収支の検討

舗装内の熱移動の現象をより簡単に理解するため、夏季において行ったのと同様の熱収支解析法¹⁰⁾を用いて、次に熱の収支を見積ってみる。

解析対象期間は、1998年の2月16~17日(降雨後)および19~20日(晴天時)と1月10~11日(積雪時)とに分け、それぞれの昼間(6~18時)および夜間(18~6時)について検討する。

(1) 降雨後および晴天時の熱収支の計算方法

1998年2月16~17日(降雨後)、19~20日(晴天時)に得られた昼間(6~18時)および夜間(18~6時)の1時間ごとのデータを用い、舗装サンプルの舗装表面における単位時間(1時間)、単位面積(1m²)の熱収支を以下のように考える。

図-12に示すように、舗装面が吸収する正味放射量(R_n)を式(1)で表す^{11), 16)}。

$$(R_n) = S(1 - \alpha) + R_d - R_u = H + \iota E + G \quad (1)$$

ここで、 S : 日射量 (W/m^2)、 α : 舗装面のアルベド(表-5参照)、 R_d : 上空からの下向き赤外放射量 (W/m^2)、 R_u : 舗装面からの上向き赤外放射量 (W/m^2)、 H : 顕熱輸送量 (W/m^2)、 ι : 水の気化潜熱 ($2453 \times 10^3 J/kg$)、 E : 蒸発量 ($kg/m^2/s = mm/s$)、 G : 地中伝導熱量 (W/m^2) である。

このうち、 S 、 α 、 R_d は実測値を用いる。 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、 $\sigma: 5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$ 、 T_s : 舗装表面温度 K) により求める。

なお、舗装表面付近の昼の温度勾配から推定した深さ0cmの舗装表面温度は、深さ1cmの実測温度よりも約0.5~1°C高く、この場合の射出率は通常用いられる値である0.98程度となる。しかし、本研究では舗装表面から深さ1cmの実測温度を表面温度としていることから、射出率(ϵ)は1.0を使用して赤外放射量を計算した。

表-6 計算に用いた比熱および密度

舗装材料の種類 (D:乾燥, W:湿潤)	比熱 (kJ/kg/K)	密度 (kg/m ³)	熱容量 (kJ/m ³ /K)
密粒黒, 半たわみ, 粗粒度	0.9	2350	2115
排水黒	D	0.9	2000
	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	2640

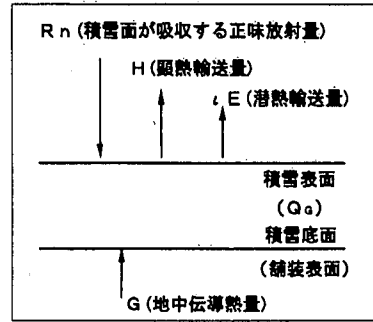


図-14 積雪層の熱収支

また、顕熱輸送量Hは式(2) (顕熱に対するバルク式)により計算する。

$$H = C_p \rho C_H U (T_a - T_s) \quad (2)$$

ここで、 $C_p \rho$: 空気の体積熱容量 (1.21×10^3 J/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) の実測値 , T_s : 舗装表面温度 (°C) の実測値である。

ただし、 C_H は夏季の熱収支解析¹⁰⁾において使用した値である。表-6に示す各層の比熱は、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た計算値を用い、降雨後は湿潤の値を、晴天時は乾燥の値を使用する。路床部は路盤と同様の材料を使用しているので路盤材と同じ値を使用する。

地中伝導熱量Gは図-13を参考にして次式から求める。

$$G = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (3)$$

ここで、 $Q_1 \sim 4$ 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) , $\Delta \theta_k$: 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(4)から求まる。

$$Q_k = C_k \rho_k \Delta \theta_k h_k A \quad (4)$$

なお、舗装の深さ方向温度の日変化を考える場合、熱伝導がほぼ0となる深さは50cm程度である¹⁰⁾ことから、路床部の地中伝導熱量 Q_4 の計算は路床上部の単位時間における温度差として、路盤の温度差 ($\Delta \theta_3$) を使用し、舗装表面から50cm下の温度差は0として計算する (図-13参照)。

潜熱輸送量 (ιE) は、以上の方法で算定した1時間ごとの各値を使用し、式(1)を変形した式(5)から求まる。

$$\iota E = S(1 - \alpha) + R_d - (R_u + H + G) \quad (5)$$

表-7 積雪面のアルベドの経日変化

測定日時(1998年1月)	アルベド(12時の値)
9日	0.74
10日	0.41
11日	0.12
12日 (小雪)	0.09
13日	0.12

(2) 積雪時の熱収支の計算方法

1998年1月10~11日 (積雪時) に得られた昼間 (6~18時) および夜間 (18~6時) の1時間ごとのデータを用い、積雪層 (0°Cで一定とする) における単位時間 (1時間) , 単位面積 (1m²) の熱収支を以下のように考える。

図-14に示すように、積雪層が表面と底面から得る正味エネルギー (Q_c) を式(6) , (7)で表す¹⁰⁾。式(6) , (7)を等しいとおいて整理すると式(8)となる。

$$Q_c = S(1 - \alpha) + R_d + G - (R_u + H + \iota E) \quad (6)$$

$$Q_c = e \quad (7)$$

$$S(1 - \alpha) + R_d + G - (R_u + H + \iota E) - e = 0 \quad (8)$$

ここで、 S : 日射量 (W/m²) , α : 積雪表面のアルベド (実測値、表-7) , R_d : 下向き赤外放射量 (W/m²) , G : 積雪底面から入ってくる地中伝導熱量 (W/m²) , R_u : 積雪表面からの上向き赤外放射量 (W/m², 射出率0.97¹⁰⁾を使用) , H : 顕熱輸送量 (W/m²) , ι : 水の気化潜熱 (2500×10^3 J/kg, 0°C) , E : 水の蒸発量 (kg/m²/s = mm/s) , e : 熱収支残差 (W/m²) である。

ただし、熱収支残差項 (e) は熱収支を0にするため、本研究で仮に設定したものであるが、大部分は積雪の融解または凍結の潜熱に相当すると考えられる。

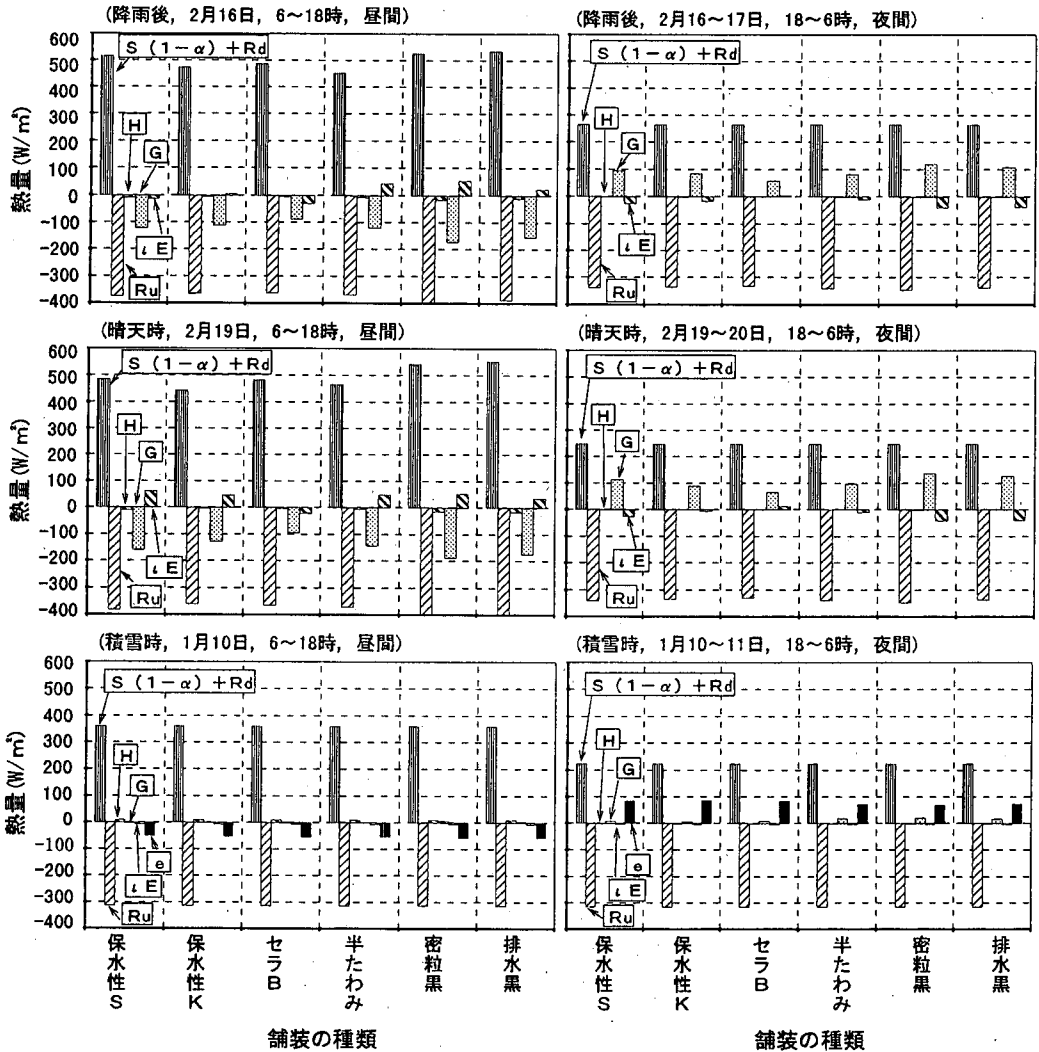


図-15 各舗装サンプルの冬季（昼間、夜間）における単位面積(1m²)あたりの熱収支

このうち、 S 、 α 、 R_d は実測値を用い、 G 、 R_u 、 H は前節と同様の手法により求め、表-6に示す保水性舗装の熱容量は湿潤(W)の値を用いる。

潜熱輸送量 (lE , W/m²) は式(9) (潜熱に対するバルク式) で計算する。

$$lE = l \rho C_E U (q_s - q_a) \quad (9)$$

ここで、 l : 水の気化潜熱 (2500×10³J/kg, 0℃), ρ : 空気の密度 (1気圧, 0℃で1.29 kg/m³), C_E : バルク輸送係数 (1.6×10⁻³= C_H を使用), U : 地上1.5mにおける風速 (m/s), q_s : 積雪表面温度 ($T_s = 0^\circ\text{C}$)における飽和比湿 (kg/kg), q_a : 気温 (T_a)における比湿 (kg/kg) である。

(3) 舗装表面の熱収支の検討

各舗装サンプルを対象として、以上の方法により潜熱輸送量 (lE) を昼間 (6~18時) および夜間 (18時~6時) の各12時間について計算した結果を図-15に示し、夏季昼間の測定結果¹⁰⁾と比較しながら検討を加える。

2月16~17日 (降雨後), 2月19~20日 (晴天時) における熱入射量 [$S(1-\alpha)+R_d$] は、およそ昼間が440~550W/m², 日射のない夜間は250~270W/m²であった。夏季はおおよそ昼間が800~1000W/m², 夜間が400W/m²であり、冬季の熱入射量は昼間が夏季の55%程度、夜間が65%程度の値であった。

保水性舗装の降雨後 (昼間) の潜熱輸送量 (lE) は、最高でもセラBが30W/m² (蒸発量が約0.5

mm/12h)程度であり、夏季における保水性舗装の潜熱輸送量が160~280W/m²であるのに比べ非常に小さい。潜熱輸送量を式(9)により計算した場合でも15~30W/m²と小さく、冬季の蒸発量は極めて少ないといえる。

なお、半たわみ、密粒黒および排水黒は、潜熱輸送量がほぼゼロでなくてはならないが、計算では20~50W/m²程度プラスであり、舗装に給熱する値を示している。しかし、夏季の解析結果(±40W/m²程度)から判断すると誤差範囲と考えられる。

保水性舗装の晴天時(昼間)の潜熱輸送量(Q_E)は、セラBが20W/m²(蒸発量で約0.4mm/12h)で降雨後よりやや小さい値であるが、いずれにしても夏季に比べ冬季の蒸発量は極めて小さい。また、顕熱輸送量も最高15W/m²程度で極めて小さい。

1月10~11日(積雪時)の熱収支解析は積雪層を対象に行っているため、昼間・夜間とも各舗装サンプルの熱入射量[$S(1-\alpha)+R_d$]、赤外放射量(R_o)、顕熱輸送量、潜熱輸送量は同じ値である。

12時間の平均で、およその熱入射量は昼間が360W/m²、夜間が220W/m²、赤外放射量は昼間、夜間ともに310W/m²であり、晴天時に比較して積雪時は昼間、夜間ともに熱入射量が85%程度、赤外放射量が90%程度であった。

顕熱輸送量、潜熱輸送量は昼間・夜間ともに10W/m²以下と小さく、地中伝導熱量は夜間の方が昼間よりやや大きいものの、各舗装サンプルに大きな差はなく、最高でも密粒黒の23W/m²と小さい。

積雪時に見積もった熱収支から、熱収支残差(e)として昼間が-50~-60W/m²程度、夜間が+70~+90W/m²程度の値が、全ての舗装サンプルについて計算された。この熱収支残差は、昼間には雪を融解させるため、夜間は融雪した水を凍らせるため使われる熱量ではないかと推察される。

5. 舗装の熱的特性に関する考察

保水性舗装(保水性S、保水性K、セラB)と通常の舗装(半たわみ、密粒黒、排水黒)を比較しながら、熱的特性および熱収支計算上の誤差について以下に考察する。

(1) 冬季における保水性舗装の熱的特性

晴天日である2月19日昼間の熱入射量[$S(1-\alpha)+R_d$]を例にとると、保水性舗装および半たわみは440~490W/m²、密粒黒および排水黒は540~550W/m²であり、保水性舗装および半たわみは密粒黒および排水黒よりも熱入射量が少ない。このため、舗装

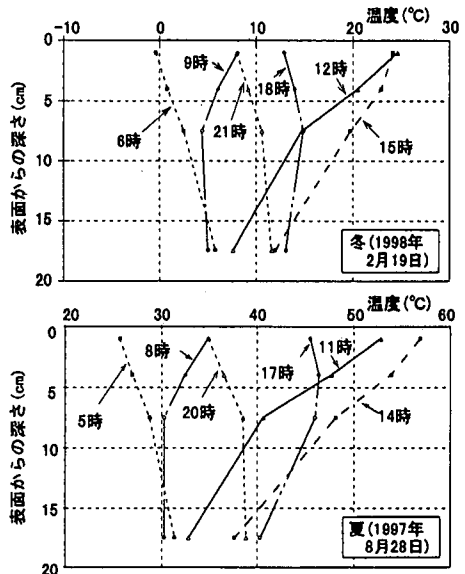


図-16 冬季と夏季の深さ方向温度変化の比較(密粒黒)

表面温度を見ると、アルベドが小さい密粒黒および排水黒は、保水性舗装および半たわみよりも高い温度を示している。

総熱放射量($S\alpha+R_o$)は特に図示していないが、2月19日昼間については、およそ保水性Sが460W/m²、保水性Kが480W/m²、セラBが440W/m²、半たわみが460W/m²、密粒黒が420W/m²、排水黒が410W/m²であり、夜間はいずれも330~350W/m²であった。

冬季における保水性舗装面からの総熱放射量は、昼夜ともに、通常の舗装(密粒黒、排水黒、半たわみ)と同程度かやや大きい程度であり、熱放射の観点からは、保水性舗装が冷熱環境をもたらすことはないといえる。

舗装表面温度が低温となる夜半~早朝の一例として、2月19日6時頃の舗装表面温度は土系を除き全てマイナスの温度であるが、排水黒が気温と同じ-3°Cで最も低く、その他は-0.5~-1°Cとそれよりやや高い温度を示している。

前日(2月18日)の舗装表面温度は排水黒が密粒黒と同じ25°Cで最も高いが、排水黒は舗装より低温の大気との間で空気が交換することにより、水密的舗装である密粒黒や半たわみより低温となったと考えられる。

保水性舗装は降雨後3日以上経過しているが、冬季の舗装面からの蒸発量が夏季より緩慢であることを考慮すると、舗装中に水分がまだ含まれていたために温度がそれほど低下しなかったのではないかと考えられる。保水性舗装に含まれる水分が舗装表面温度の低下を遅らす効果は、特に積雪時(1月11日

と13日の早朝)に明確に認められる。

このように、保水性舗装と通常の舗装を比べた場合、保水によって保水性舗装の熱容量を増加させるだけでなく、そこに含まれる水が氷結するまで舗装温度がマイナスとにならないことは、交通安全の観点から有効と考えられる。

(2) 熱収支計算の誤差要因について

晴天時における密粒黒および排水黒の潜熱輸送量が、夏季は平均的にゼロであったのに、冬季には20~50W/m²程度プラスで舗装に給熱する値を示したことについて、若干の考察を加える。

図-16は密粒黒の深さ方向温度変化を冬季(1998年2月19日)と夏季(1997年8月28日)について、日の出時刻から3時間ごとに示したものである。図は冬季と夏季を30℃ずらして示しているが、冬季は夏季よりもやや日温度振幅は小さいものの、深さ方向温度の時刻変化には両者に相似的な傾向が見られる。これは、舗装の深さ方向の日温度振幅が、冬と夏では極端に変わらないことを示している。

過去に行った実験⁹⁾では密粒黒の路盤中(深さ25cm)に熱流計を埋設していたので、地中伝導熱量を推定するため、図-16とほぼ同じ舗装表面温度の日変化を示す過去のデータを抽出した〔図-17(上)〕。

測定結果から舗装表面温度および地中伝導熱量の時刻変化を示すと図-17(下)のようであった(図は対象とする日の前後を含めた3日間について示す)。図-17(下)から深さ25cmにおける上向き熱流量は、冬の方が夏よりも常に10~20W/m²程度大きいことがわかる。

本論文の熱収支解析では、深さ50cmにおける温度の日変化はないとして解析を行ったが、例えば東京地方の2月では、深さ3mの地中温度が14℃程度¹⁾で、密粒黒の深さ50cmにおける温度(約9℃)より高い。このことから、冬季においては地中から舗装表面に向かう熱流が常にあり、夏季よりも冬季の地中伝導熱量が大きくなることも考えられる。

また、夜間に降りる露や霜の影響を調べるため、冬季に30×30×5cmの供試体(密粒黒)を台秤に載せ、数日にわたり連続して重量測定を行った。その結果、夜間に水量換算で最大0.3mm/m²程度の重量増加が観測された。これを12時間での潜熱輸送量に換算すると、夜間の結露を仮定すれば17W/m²プラス、昼間の蒸発を仮定すれば17W/m²マイナスすることに相当する。

この外にも誤差の要因は考えられるが、これらの要因を調べることも熱収支解析法の精度を高めるために重要であろう。

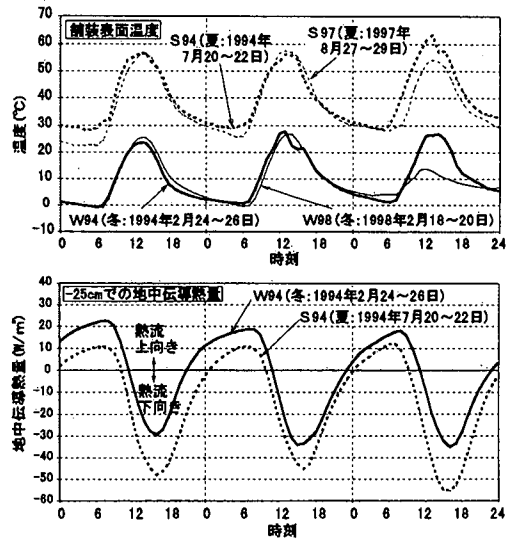


図-17 冬季と夏季の地中伝導熱量の比較(密粒黒)

6. 結論

夏季の舗装温度を低く保つことができる保水性舗装は、都市の熱環境を緩和するために有効であると考えられる。しかし、冬季において通常の舗装(密粒黒・排水黒・半たわみ)と比べ冷熱環境とならないか、凍結しやすく交通安全上の問題はないか、積雪時の融雪が遅くならないかといった問題点を明らかにするため、通常の舗装と比較しながら舗装温度や日射量・赤外放射量の測定を行った。

本研究の範囲でその結果をまとめると以下のようである。

(1) 冬季降雨後の昼間は、保水性舗装に含まれる水分の蒸発量が夏季よりはるかに少なく、水密な舗装(密粒黒、半たわみ)と保水性舗装との舗装表面温度には、夏季ほど大きな差が見られない。しかし、排水黒は早朝に最も低い表面温度を示す。

(2) 冬季において保水性舗装が道路周辺の熱放射環境に及ぼす影響は、通常の舗装とほぼ同様で、夏季に低い温度を保つ保水性舗装が、冬季に冷熱環境をもたらすことはないといえる。

(3) 冬季の早朝や積雪時における保水性舗装の表面温度は、通常の舗装の温度が氷点下となった場合でも0℃付近を長く保っており、交通安全上、通常の舗装と比べて保水性舗装が特に問題となることはないと考えられる。

なお、本研究の熱収支解析法によった場合、誤差となる要因として、冬季は地下からの上向き地中伝

導熱量が、夏季は地上からの下向き地中伝導熱量があることや、露や霜が降りる影響などが考えられる。熱収支の計算精度を高めるためには、入射量・放射量の測定精度を高めるだけでなく、年変化スケールでの地中の熱流量を計測することや露量、蒸発量の測定方法について検討することも必要であり、これらは今後の研究課題と考える。

参考文献

- 1) 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.
- 2) ガタカ, 浅枝隆, ユスマハト・アツ: 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.
- 3) 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.
- 4) 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, VII-6, pp. 49~58, 1998.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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, V-36, pp. 149~158, 1997.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 近藤純正, 安田延壽, 山崎剛, 松島大: 陸面過程のパラメータ化とその検証に関する研究, 平成7年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書, 1996.
- 12) 武市靖, 前野紀一, 久保宏: 路面凍結の検知と推定手法に関する研究, 土木学会論文集, No. 440, IV-16, pp. 155~164, 1992.
- 13) 武市靖: 路面凍結の予測に関する研究, 土木学会論文集, No. 470, IV-20, pp. 175~184, 1993.
- 14) アスファルト舗装要綱, (社)日本道路協会, 1992.
- 15) 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.
- 16) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp. 132~133, pp. 242~244, 1994.
- 17) 農林水産省, 気象庁: 農業気象資料第3号, 地中温度等に関する資料, 1982.

(1999.3.9 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF WATER IN PERMEABLE PAVEMENTS ON THE THERMAL ENVIRONMENT IN WINTER

Takatomo FUKUDA, Takashi ASAEDA and Takeshi FUJINO

Water absorbed permeable pavements have a high ability to maintain low temperature during summer time. But if the pavement has the same characteristics like as summer, it is undesirable for an urban thermal environment in winter. Field observations for 3 kinds of permeable pavements and 3 kinds of ordinary asphalt pavements were prepared to evaluate an urban thermal environment in winter. At the results, thermal radiation and temperature at the surface of permeable pavement was similar to ordinary pavements because of low evaporation rate. Furthermore, surface temperature of ordinary pavements showed the value under the freezing point at the daybreak, while that of permeable pavements keep nearly 0 °C. Heat balance of pavement was estimated by using heat capacity method in winter.