

気象観測データを用いた舗装表面 放出熱量の推定に関する研究

福田萬大¹・浅枝隆²・藤野毅³

¹正会員 工博 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 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)

舗装から放出される熱量を推定するため、夏・冬を含む約8ヶ月間にわたり、アスファルト舗装の表面温度および日射量、赤外放射量、気温、湿度、風速、雨量の観測を行った。次に、観測結果の重回帰分析を行い、アスファルト舗装表面温度、日射量、赤外放射量に対する推定式を作成して、実測値との適合性を調べた。その結果、積雪時、強風時、路面凍結時を除き、推定値と実測値との差は最大でも舗装表面温度が5℃以内、日射量・赤外放射量は50W/m²以内であることがわかった。また、夏・冬の晴天時および秋の降雨時における舗装表面からの放出熱量（赤外放射量+日射反射量+顕熱量）の推定値と実測値の差は最大でも50W/m²以内でよい相関を示した。

Key Words : *heat island, asphalt pavement, thermal radiation, meteorological observation data, multiple regression analysis*

1. まえがき

都市部において問題となっているヒートアイランド現象に対し、道路舗装の与える影響は必ずしも小さくないことが指摘されている^{1), 2), 3)}。この原因として、都市部面積の10~20%を占める道路のほとんどが水密性の舗装で覆われているため、水の蒸発による潜熱輸送が期待できないことや、黒色で舗装表面温度が高いため、アスファルト舗装表面から多量の赤外線を放射していることなどがあげられる。

都市内舗装のほとんどは黒色の水密なアスファルト舗装であるが、その放出熱量を見積もることにより、都市内の建物など他の構造物と舗装との熱的影響を比較することができる。

アスファルト舗装表面から上空へ放出される熱には、赤外放射、日射の反射、顕熱（舗装表面と空気との熱伝達）および潜熱がある。このうち赤外放射量は舗装表面温度から、日射の反射量は日射量と舗装表面のアルベド（日射反射量/日射量）から、顕熱輸送量は風速と舗装表面温度および気温から計算できる。なお、水密なアスファルト舗装の場合、降

雨後の潜熱輸送量は小さいと考えられる⁴⁾ため、本研究では考慮していない。

舗装表面温度のデータがない場合は、リモートセンシングによる熱画像からも表面温度をとらえることができる⁵⁾が、日射量や気温、風速などの気象観測値から舗装表面温度を推定できれば、舗装表面からの放出熱量を見積もることが容易になる。

著者らは、舗装周辺における熱的環境を改善するため車道用の保水性舗装を考案し、その表面から水を蒸発させ気化潜熱を奪わせて舗装表面温度を低下させることが有効であることを、熱容量にもとづく熱収支解析法により明らかにした⁴⁾が、この際、経時的にアスファルト舗装の内部温度および気象の観測を行った。

本研究では、過去の実験で得られた気象観測データ（日射量、赤外放射量、気温、湿度、風速）を説明変数にとり、重回帰分析によりアスファルト舗装の表面温度を推定した。また、舗装表面温度と気象観測データ（気温、湿度、風速）を説明変数として、上空からの日射量および赤外放射量を推定した。

これらの重回帰式を用いて、アスファルト舗装表

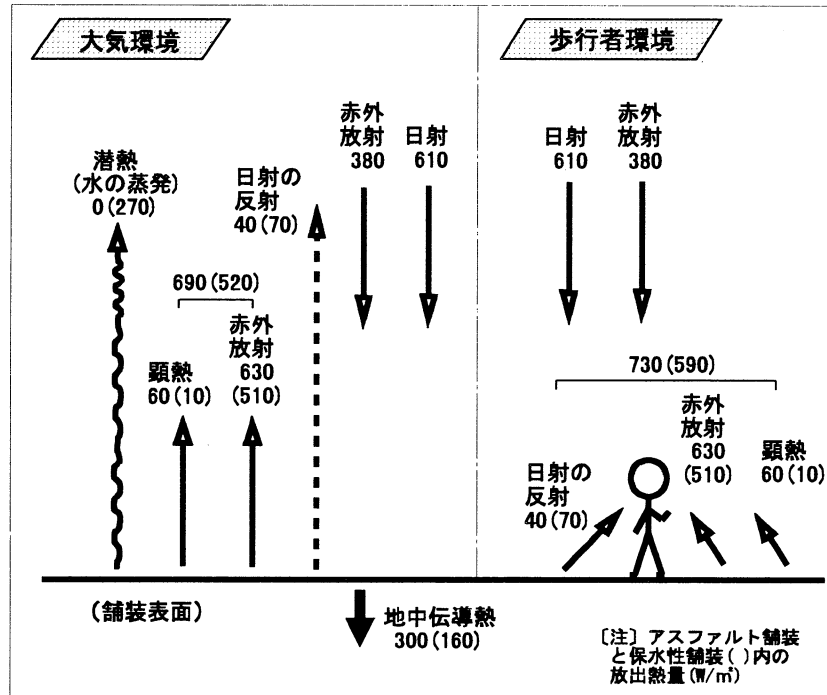


図-1 舗装表面における熱放出モデルと夏季日中（1997年8月28日9～17時平均）の放出熱量計算例

面から上空への放出熱量（赤外放射量，日射反射量，顕熱輸送量）を推定し，実測データから計算した放出熱量と比較して重回帰式の適合性を調べた。

2. 舗装表面における熱収支

舗装表面には太陽からの日射および大気や雲からの赤外放射が入射して舗装を暖める。一方，舗装からは表面のアルベドに応じて日射を反射するとともに，赤外放射および顕熱を上空に放出している。

このような舗装表面における熱放出モデルを図-1に示す。図は，大気環境および歩行者環境（歩行者に対する潜熱の影響はない）についての熱放出状態および夏季におけるアスファルト舗装と保水性舗装表面からの放出熱量を計算した一例を示している。

舗装表面における熱収支式は，図-2を参考として以下のように表すことができる^{4), 6)}。

舗装表面が吸収する正味放射量（ R_n ）は，式(1)～(2)で示される。

$$R_n = S_d (1 - \alpha) + (R_d - R_u) \quad (1)$$

$$= H + \epsilon E + G \quad (2)$$

ここに， S_d ：日射量(W/m^2)， α ：舗装表面のアルベド， R_d ：大気からの下向きの赤外放射量(W/m^2)， R_u ：舗装表面からの上向きの赤外放射量(W/m^2)， H ：顕熱輸送量(W/m^2)， ϵ ：水の気化潜熱 [2453×10^5 (J/kg)]， E ：蒸発量 [$(\text{kg}/\text{m}^2)/\text{s}$]

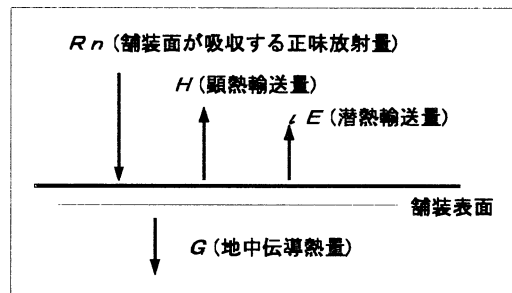


図-2 舗装表面における熱収支

mm/s ）， G ：地中伝導熱量(W/m^2) である。

舗装表面から放出される赤外放射量（ R_u ）はステファン・ボルツマン式である式(3)から求まる。

$$R_u = \epsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 \quad (3)$$

ここに， ϵ ：舗装表面の長波放射に対する射出率， σ ： 5.67×10^{-8} ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4$)， T_s ：舗装表面温度($^{\circ}\text{C}$)である。

日射反射量（ S_u ）は式(4)より，顕熱輸送量（ H ）は式(5)のバルク式より求まる。

$$S_u = S_d \alpha \quad (4)$$

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (5)$$

ここに， S_d ：日射量(W/m^2)， α ：舗装表面のアルベド， $C_p \rho$ ：空気の体積熱容量 [1.21×10^5 ($\text{J}/\text{K}/\text{m}^3$)]， C_H ：バルク輸送係数， U ：風速(m/s)， T_s ：舗装表面温度($^{\circ}\text{C}$)， T_a ：気温($^{\circ}\text{C}$) である。

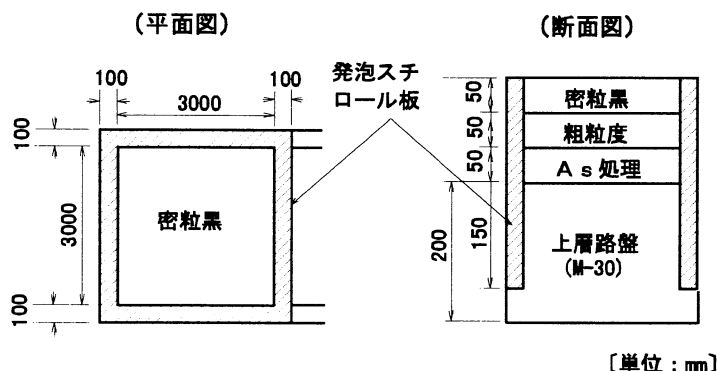


図-3 舗装サンプルの概要

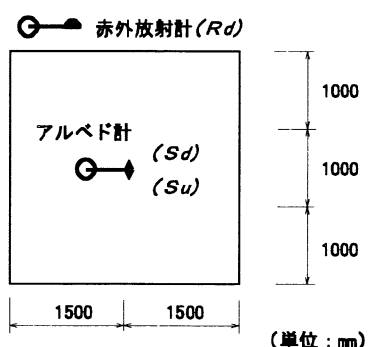


図-4 アルベド計，赤外放射計の測定位置

表-1 舗装材料の主な性状

舗装材料の種類		密粒度 アスコン	粗粒度 アスコン	アスファルト 安定処理	備考
項目					
最大粒径(mm)		13	20	30	—
バインダ	種類	St	St	St	St: ストレートアスファルト
	針入度(1/10mm)	67	67	67	
	軟化点(°C)	49	49	49	
	バインダ量(%)	5.5	4.8	4.0	
マーシャル 試験	供試体密度(g/cm³)	2.389	2.405	2.435	アスファルト舗装要 綱 ⁸⁾ ，舗装試験法便 覧 ⁹⁾
	空隙率(%)	3.4	6.3	3.7	
	安定度(kN)	10.3	9.2	11.4	
アルベド		0.08	—	—	

本研究で推定しようとする舗装表面の放出熱量 (R_u , S_u , H) は，(3)～(5)式からわかるように，舗装の表面温度とアルベド，上空からの日射量と赤外放射量，気温，風速が与えられれば見積もることができる。

3. 実験概要

(1) 舗装サンプルの概要および測定方法

a) 試験舗装の構築

選定した舗装サンプルは，東京都区内の一般的な舗装構成を参考として1993年7～8月に屋外実験場（埼玉県鴻巣市）で構築した9種類の舗装⁷⁾のうち，密粒度のアスファルト混合物（以下，アスコンと記す）を表層としたもので，図-3に示すように平面寸法は3×3mである。

舗装構成層の使用材料は，表層が密粒度アスコン（以下，密粒黒と記す），基層が粗粒度アスコン，路盤がアスファルト安定処理および粒度調整碎石であり，その主な性状を表-1に示す。

周辺地盤からの伝熱の影響を避けるため，舗装サンプルの周囲は発泡スチロール（厚さ10cm）を表面から深さ30cmまで設置して断熱した。

b) 密粒黒舗装表面温度および気象観測方法

密粒黒の舗装表面温度は，表面から1cmの深さに熱電対温度計（タイプT，素線径0.65mm）を埋設して測定した。

気象観測は，百葉箱中で地上1.5mの高さにおける気温，湿度を熱電対温度計（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，また，30分間の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。

これらの測定値は，1993年8月から1995年9月および1997年8月から1998年3月まで，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。

c) 日射量および赤外放射量の測定方法

上空からの日射量，赤外放射量および日射反射量（いずれも瞬間値）は，図-4に示す位置にアルベド計および赤外放射計（英弘精機社製，MR-22およびMS-200）を設置し測定した。

これらの測定値は，1997年8月から1998年3月まで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。

表-2 密粒黒舗装表面温度の回帰式とデータの範囲

回 帰 式 No.	目的変数 (Y)	密粒黒舗装表面温度 (T_s , °C)					
	説明変数 (X_i)	—	X_1 (日射量 S_d , W/m ²)	X_2 (赤外放射 量 R_d , W/m ²)	X_3 (気温 T_a , °C)	X_4 (湿度 RH , %)	X_5 (風速 U , m/s)
6	回帰係数記号	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
	回帰係数	2.342	0.017	-0.002	1.245	-0.025	-0.282
7	標準回帰係数	—	0.292	-0.009	0.827	-0.033	-0.023
	重相関係数 (R)	0.980					
データ の範囲	最大値	—	1016	472	38.0	94.0	8.8
	最小値	—	0	188	-6.5	13.5	0

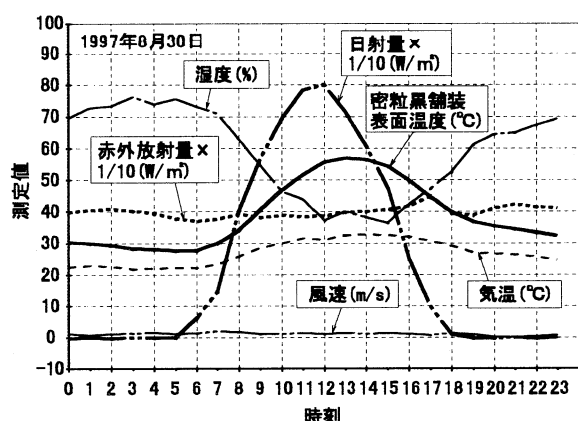


図-5 密粒黒舗装表面温度・気象データの経時変化例

4. 舗装表面温度の推定

(1)重回帰分析方法

密粒黒舗装の表面温度の説明変数として重回帰分析¹⁾にとりあげたのは、日射量 (S_d)、赤外放射量 (R_d) および気温 (T_a)、湿度 (RH)、風速 (U) である。

これらの観測値がそろっている1997年8月～1998年3月の降雨時を除く日中 (7時～18時30分) を対象として解析を行った (データ数4605)。

なお、成田らも指摘している¹⁾が、図-5に示すように舗装表面温度は約1時間前の日射量の影響を強く受けることから、日射量は1時間前 (6時～17時30分) の観測値を使用している。

(2)舗装表面温度の重回帰分析結果

密粒黒舗装表面温度を目的変数とした重回帰分析結果から、重相関係数の大きい2つについて表-2および式(6)～(7)に示す。

$$T_s = 2.432 + 0.017 S_d - 0.002 R_d + 1.245 T_a - 0.025 RH - 0.282 U \quad (6)$$

$$T_s = 0.100 + 0.018 S_d + 1.225 T_a \quad (7)$$

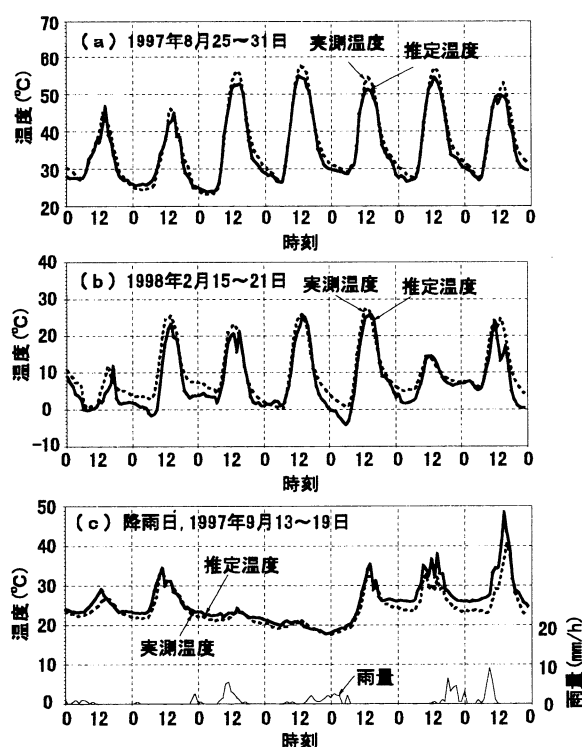


図-6 密粒黒舗装表面温度の測定値と推定値〔式(6)〕の比較

ここに、 T_s : 密粒黒舗装表面温度(°C)、 S_d : 日射量(W/m²)、 R_d : 赤外放射量(W/m²)、 T_a : 気温(°C)、 RH : 湿度(%), U : 風速(m/s) である。

表-2で、各説明変数の平均が0、標準偏差が1となるよう基準化した標準回帰係数を見ると、密粒黒舗装表面温度に対する寄与の大きい説明変数は、気温および日射量であることがわかる。

(3)舗装表面温度の適合性の検討

晴天時の夏 (1997年8月25～31日) および冬 (1998年2月15～21日)、降雨時の秋 (1997年9月13～19日) の各7日間について、密粒黒舗装表面温度の測定値と式(6)による推定値を比較した結果を図-6 (a～c) に示す。

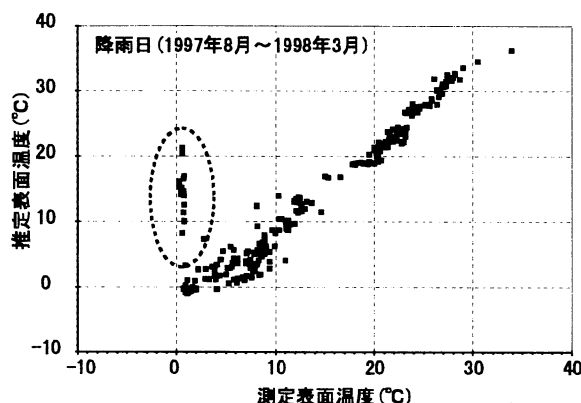


図-7 降雨日の舗装表面温度の測定値と推定値の比較

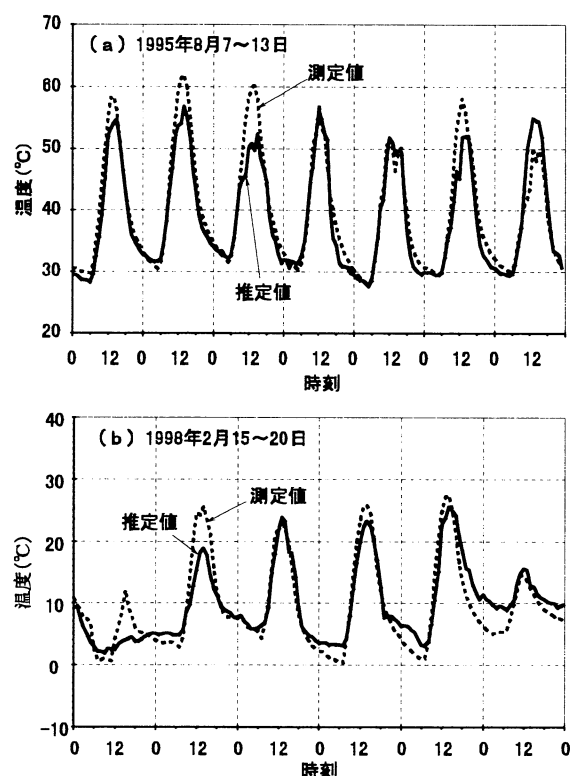


図-8 大手町のデータによる舗装表面温度の比較

表-2の回帰式は降雨時を除く日中のデータから求めたものであるが、図から明らかなように、降雨日を含めても最大5°C以内の誤差で舗装表面温度が推定されている。ただし、図-7に示すように、降雨時で舗装表面温度が0°C付近となる場合（図の○内）や降雨後の強風時および積雪時には、水の蒸発や凍結・融解の潜熱の影響で測定値と推定値の整合性が悪くなり、回帰式は適用できないと考えられる。

次に、本研究の実験場（埼玉県鴻巣市）から約50 km離れた大手町（東京都）における日射量（東京管区气象台地上気象観測原簿による）の値を式(6)に適用し、舗装表面温度を比較した結果を図-8（a～b）に示す。

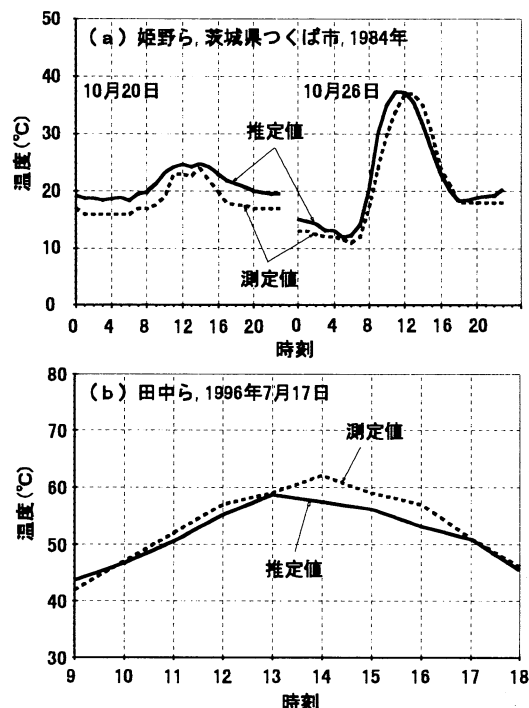


図-9 文献データ^{11), 12)}による舗装表面温度の比較

日射量は雲量などの影響を強く受けるため、鴻巣市と大手町の日射量に違いがあることは容易に想像できる。しかし、夏季と冬季の連続6～7日について測定値と推定値を比較した結果、日中12時前後の舗装表面温度ピーク値付近では最高約5°C程度の差があるものの、舗装表面温度の経時変化の様子はかなり再現できていると考えられる。

また、文献データ^{11), 12)}に示される日射量の値を用いて舗装表面温度を比較した結果を図-9（a～b）に示す。ここで、図-9（a）¹¹⁾は赤外放射量の値がないため式(7)を、図-9（b）¹²⁾は式(6)を使用しているが、観測日や場所が異なる場合でも、測定値と推定値は極めて良い相関を示している。

5. 日射量，赤外放射量，舗装表面放出熱量の推定

舗装から放出される熱量や舗装表面の熱収支を求めるための日射量，赤外放射量を，同様な手法で以下に推定する。

(1)日射量，赤外放射量の重回帰分析結果

日射量，赤外放射量を目的変数とした重回帰分析結果から、重相関係数の大きいものを表-3～4、式(8)～(12)に示すが、最も大きい重相関係数は、日射量の場合0.87，赤外放射量の場合0.96が得られた。

表-3 日射量の回帰式

回帰式 No.	目的変数 (Y)	日射量 (S_d , W/m ²)				
	説明変数 (X _i)	—	X ₁ (密粒黒舗装表面温度 T_s , °C)	X ₂ (気温 T_a , °C)	X ₃ (湿度 RH, %)	X ₄ (風速 U , m/s)
	回帰係数記号	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
8	回帰係数	139.111	31.183	-33.647	-2.278	16.679
	標準回帰係数	—	1.829	-1.311	-0.175	0.080
	重相関係数(R)	0.871				
9	回帰係数	189.387	31.185	-33.684	-2.766	—
	標準回帰係数	—	1.830	-1.312	-0.212	—
	重相関係数(R)	0.868				
10	回帰係数	31.889	36.917	-41.707	—	—
	標準回帰係数	—	2.166	-1.625	—	—
	重相関係数(R)	0.849				

表-4 赤外放射量の回帰式

回帰式 No.	目的変数 (Y)	赤外放射量 (R_d , W/m ²)				
	説明変数 (X _i)	—	X ₁ (密粒黒舗装表面温度 T_s , °C)	X ₂ (気温 T_a , °C)	X ₃ (湿度 RH, %)	X ₄ (風速 U , m/s)
	回帰係数記号	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
11	回帰係数	140.269	-0.186	6.577	1.504	1.467
	標準回帰係数	—	-0.039	0.908	0.408	0.025
	重相関係数(R)	0.955				
12	回帰係数	142.912	—	6.312	1.487	—
	標準回帰係数	—	—	0.871	0.404	—
	重相関係数(R)	0.954				

$$S_d = 139.111 + 31.183 T_s - 33.647 T_a - 2.278 RH + 16.679 U \quad (8)$$

$$S_d = 189.387 + 31.185 T_s - 33.684 T_a - 2.766 RH \quad (9)$$

$$S_d = 31.889 + 36.917 T_s - 41.707 T_a \quad (10)$$

$$R_d = 140.269 - 0.186 T_s + 6.577 T_a + 1.504 RH + 1.467 U \quad (11)$$

$$R_d = 142.912 + 6.312 T_a + 1.487 RH \quad (12)$$

ここに、 S_d : 日射量(W/m²), T_s : 密粒黒舗装表面温度(°C), T_a : 気温(°C), RH : 湿度(%), U : 風速(m/s), R_d : 赤外放射量(W/m²) である。

(2)日射量、赤外放射量の適合性の検討

舗装表面温度の場合と同様に、晴天の続いた夏の1997年8月25～31日および冬の1998年2月15～21日、降雨の続いた秋の1997年9月13～19日の7日間について、日射量・赤外放射量の測定値と式(8)・式(11)による推定値を比較した結果を図-10(a～c)および図-11(a～c)に示す。

日中の日射量は、図-10から降雨日も含めほぼ100 W/m²以内の誤差で推定可能と思われる。しかし、日射のない夜間の推定値はプラスに計算されることが多いため、日射量の推定は日の出～日没の間で行う方が推定精度は良い。

赤外放射量は昼夜を問わず、夏・冬の晴天時、秋の降雨時ともに測定値と推定値は極めて良い相関を示しており、その差は最大でも50W/m²程度で、経時

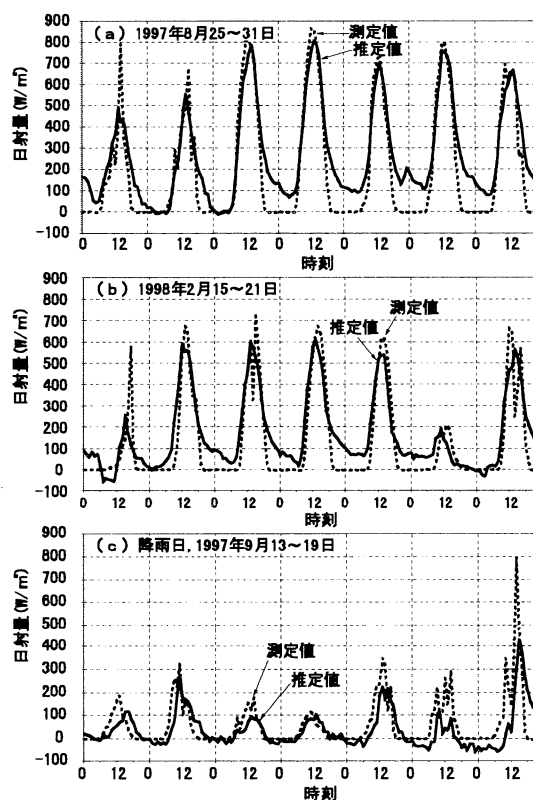


図-10 日射量の測定値と推定値の比較

変化の様子もよく再現している。

次に、文献データ^{11), 12)}について日射量を推定した結果を図-12(a～b)に、赤外放射量の推定結果を図-13に示す。

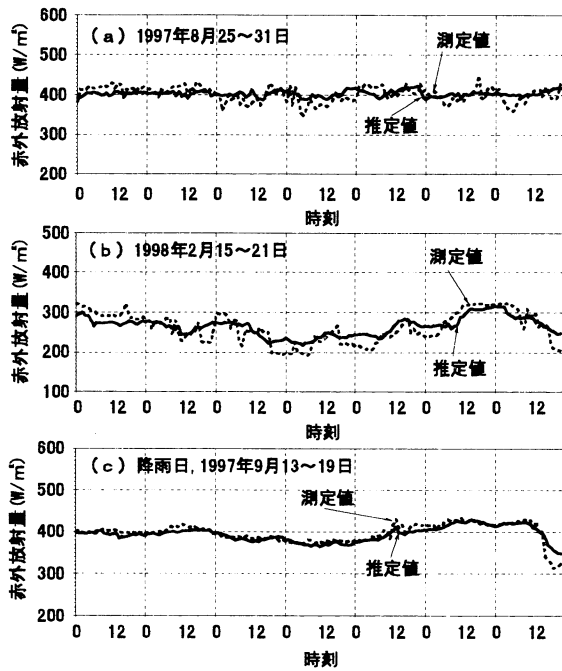


図-11 赤外放射量の測定値と推定値の比較

ただし、図-12 (a) は湿度の値がないために式(10)を、図-12 (b) は式(8)を、図-13は式(11)を使用している。日射量の推定値は最高100～150W/m²程度小さめの値を示しているものの、日射量の経時変化の様子はよく再現されており、赤外放射量の推定値は最高でも50W/m²程度の差である。

(3) 舗装表面放出熱量の推定

密粒黒舗装表面からの放出熱量 (Q_T) は式(13)で表される。

$$Q_T = R_u + S_u (= S_d \alpha) + H \quad (13)$$

Q_T の計算値 (測定した舗装表面温度、日射量から計算) と推定値 [式(6), (8)で推定した舗装表面温度、日射量から計算] を、夏季 (1997年8月25～31日) と冬季 (1998年2月15～21日) および降雨日 (1997年9月13～19日) について比較した結果を図-14 (a～b) に示す。

計算には式(3)～(5), (13)を使用した。舗装表面温度の推定値には式(6)を、日射量の推定値には式(8)を用い、式(3)の ε は1.00を、式(4)の C_n は 1.6×10^{-5} を⁵⁾、式(5)の α には0.08を使用した。

図-14 (a) から放出熱量の計算値と推定値は、夏季および冬季ともに良い相関を示し、おおむね50 W/m²以内の誤差で推定されているといえる。

また、図-14 (b) の降雨日についても9月13～18日の計算値と推定値はほぼ同様の値であるが、9月19日のみ推定値が計算値より150W/m²程度大きい値となっている。この日は図-6に示すように、最高の

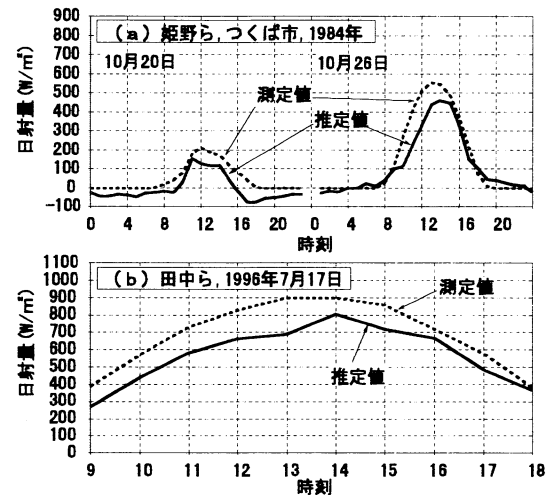


図-12 文献データ^{11), 12)}による日射量の比較

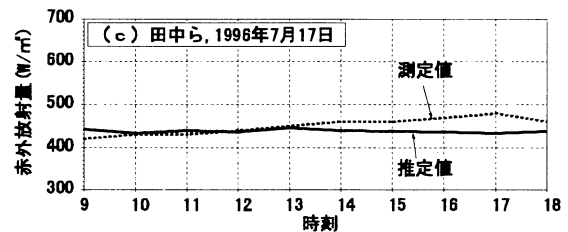


図-13 文献データ¹²⁾による赤外放射量の比較

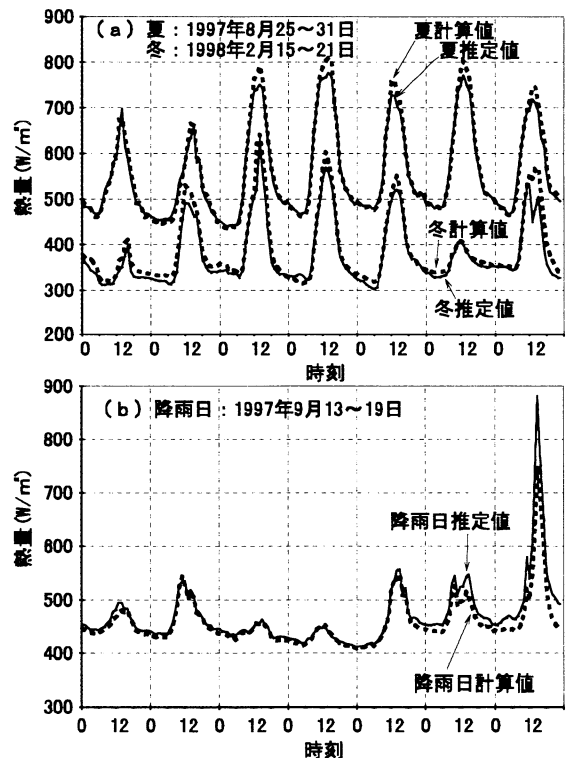


図-14 密粒黒舗装表面からの放出熱量の比較

舗装表面温度の測定値が推定値より約8℃低い。これは、降雨が昼頃に止んだ後、風速6m/sをこえるかなり強い風が吹いたため、路面が水の蒸発潜熱を奪われ急激に表面温度が低下したものと考えられ、このような強風時の推定精度は悪い。

6. 結論

重回帰分析により密粒黒舗装表面温度，日射量，赤外放射量の推定式〔式(6)～(12)〕を得た．各推定式は，説明変数が多いものほど高い重相関係数を与えるが，これらを式(13)に適用することで，舗装から放出される熱量はおおむね $50\text{W}/\text{m}^2$ 以内の誤差で推定できることがわかった．

ただし，積雪日および降雨後の強風時や低温で路面が凍結する恐れのある場合を除き，日射量は日の出から日没の間で適用するのがよい．

① 密粒黒舗装表面温度の推定式：

$$T_s = 2.432 + 0.017 S_d - 0.002 R_d + 1.245 T_a - 0.025 RH - 0.282 U \quad (6)$$

$$T_s = 0.100 + 0.018 S_d + 1.225 T_a \quad (7)$$

② 日射量の推定式：

$$S_d = 139.111 + 31.183 T_s - 33.647 T_a - 2.278 RH + 16.679 U \quad (8)$$

$$S_d = 189.387 + 31.185 T_s - 33.684 T_a - 2.766 RH \quad (9)$$

$$S_d = 31.889 + 36.917 T_s - 41.707 T_a \quad (10)$$

③ 下向き赤外放射量の推定式：

$$R_d = 140.269 - 0.186 T_s + 6.577 T_a + 1.504 RH + 1.467 U \quad (11)$$

$$R_d = 142.912 + 6.312 T_a + 1.487 RH \quad (12)$$

④ 舗装表面放出熱量の推定式：

$$Q_r = R_u + S_d \alpha + H \quad (13)$$

ここに， T_s ：密粒黒舗装表面温度($^{\circ}\text{C}$)， S_d ：日射量(W/m^2)， R_d ：下向き赤外放射量(W/m^2)， T_a ：気温($^{\circ}\text{C}$)， RH ：湿度(%)， U ：風速(m/s)， Q_r ：密粒黒舗装表面からの放出熱量(W/m^2)， R_u ：式(3)による上向き赤外放射量(W/m^2)である．

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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.
- 5) 梅干野晃：建築学の立場から見た都市熱環境，都市の熱環境に関する学際シンポジウム，土木学会，pp.10～21，1995.
- 6) 近藤純正編著：水環境の気象学，朝倉書店，p.86，pp.132～133，p.151，1994.
- 7) 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.
- 8) アスファルト舗装要綱，(社)日本道路協会，1992.
- 9) 舗装試験法便覧，(社)日本道路協会，1988.
- 10) 奥野忠一，久米均，芳賀敏郎，吉澤正：多変量解析法(改訂版)，日科技連出版社，1981.
- 11) 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，V-4，pp.123～132，1986.
- 12) 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，VII-6，1998.

STUDY ON THE ESTIMATED THERMAL RADIATION FROM AN ASPHALT PAVEMENT SURFACE USING METEOROLOGICAL OBSERVATION DATA

Takatomo FUKUDA, Takashi ASAEDA and Takeshi FUJINO

The field observation was continued to estimate the thermal radiation from asphalt pavement. The surface temperature, solar radiation, infrared radiation, temperature, humidity, wind velocity and precipitation were observed for a period of about 8 months including summer and winter. Surface temperature, solar radiation and infrared radiation measured were compared with that of calculated using multiple regression analysis equations, surface temperature and the radiations were estimated within 5°C and $50\text{W}/\text{m}^2$. The equations are able to estimate the total heat flux (= infrared radiation + reflected solar radiation + sensible heat transportation) from pavement surface and showed a good correlation with the measured.