

# 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

田中孝典<sup>1</sup>・三浦哲彦<sup>2</sup>・清田 勝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程 (〒840 佐賀市本庄町1)

<sup>2</sup>正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部建設工学科

<sup>3</sup>正会員 工博 佐賀大学助教授 理工学部建設工学科

高齢社会に備え、社会的弱者が安全で快適に歩けるとの観点から歩行者系道路舗装材を検討していく必要がある。本報告は、高齢者等の歩行者が感知する快適性に対する配慮の一つとして歩行環境に影響を及ぼす舗装材の熱特性を取り上げるものである。対象とした舗装材は自然と適合した色彩及び雨水に対する透水性を有するとともに、歩行空間の温度低減及び歩行時における足への衝撃低減を図ることを目的とした土系舗装材と、従来の舗装材であるアスファルト及びコンクリート舗装であり、人体の体温調節系モデルを組み合わせた温熱指標により各舗装材の熱特性が歩行環境に及ぼす影響の比較と土系舗装材の効果について確認を行った。

**Key Words :** pavement material, person of advanced age, pedestrian, thermal characteristics

## 1. はじめに

近年、色彩やデザイン等の工夫を凝らした様々な舗装が歩行者系道路等に用いられるようになってきた。しかし、景観等に対する配慮とは別に、高齢社会を迎えるにあたり社会的弱者が安全で快適に歩けるとの観点から、歩行者系道路舗装材を検討していく必要がある。

建設行政においても高齢社会に備えて、健康で心豊かに生きるための住宅・社会資本整備を目指した「生活福祉空間づくり大綱」<sup>1)</sup>を策定した。同大綱において、高齢者、障害者を含む全ての人々に対する福祉インフラ整備の推進が大きな柱の一つとなっている。その具体的な推進方策である「福祉のまちづくり計画策定の手引き」<sup>2)</sup>に関連した施策に‘人にやさしい歩道舗装’<sup>3)</sup>が示されている。それは、景観等に対する視覚快適性の配慮は当然のことながら、水溜まりがなく、歩きやすい、膝に負担がかからない等の、歩行者の通行安全及び快適性に配慮した歩道舗装を整備していく必要性が示されている。こうした情勢を踏まえ、筆者らは歩行時における足への衝撃、歩行者の熱環境及び透水性等の観点から舗装材の検討を行ってきている<sup>4)</sup>。その研究の一環として、若者層を対象としたアンケート調査を行った結

果<sup>5)</sup>、舗装材の熱特性が歩行者に影響を及ぼすことが明らかになった。本文では歩行環境に比較的大きな影響を及ぼす、舗装材の熱特性を検討した。

都市域における道路及び建物屋上等の舗装材はヒートアイランド現象を引き起こす要因の一つとして、広域的な都市の熱環境の観点から舗装材の熱特性について検討がなされている<sup>6), 7), 8)</sup>。市街地空間内の熱環境に関しては、Burt et al.<sup>9)</sup>、中村ら<sup>10)</sup>の研究がある。Burt et al. は市街地空間の熱収支及び人体の熱収支等を組み合わせた数値モデルにより市街地空間における人体の熱環境状態について検討を行っている。中村らは2次元長方形空間を取り上げ、建物方位、人の位置、地面材料の違いの他、日なた及び日陰の影響等から人体の熱環境状態に関する数値解析的検討を行っている。

本研究では実際の歩行空間において測定した舗装材の表面温度及び気象データ等を数値解析の入力値とし、放射量の計算においては短波長放射及び長波長放射の相互反射を考慮し、舗装材の違いが歩行者に及ぼす影響について温熱指標により数値的検討を行う。なお、温熱指標を求めるために入力する値の一つである人体の生理的状態を示す皮膚温及びぬれ面積率については、人体の体温調節を数式表現したモデル（以下、体温調節系モデルという）により算

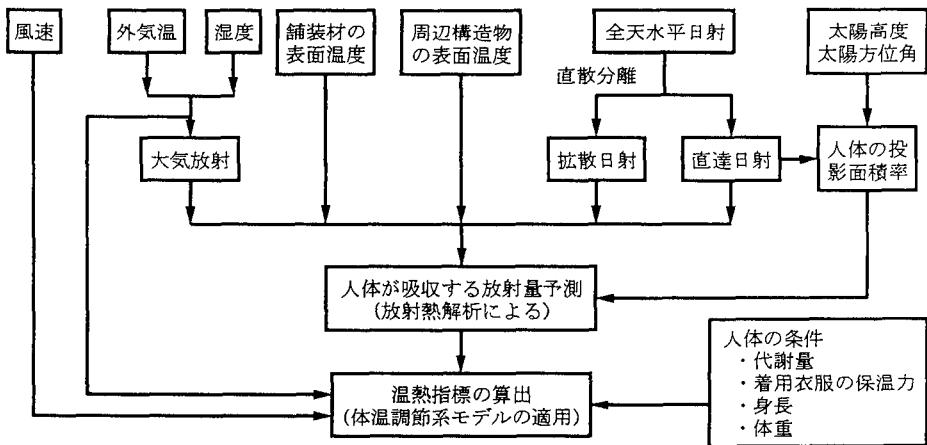


図-1 鋪装材の熱特性が人体に及ぼす影響の検討

定する。

対象とする舗装材は自然と適合した色彩及び雨水に対する透水性を有するとともに、歩行空間の温度低減及び歩行時における足への衝撃低減を図ることを目的とした土系舗装材と、従来の舗装材であるアスファルト及びコンクリート舗装である。体温調節系モデルは、人体の体温調節系の基本的事項を考察するものであり、体温調節系の特性を忠実に模擬するシミュレーションではなく、また、温熱指標は定常状態を前提としているため、実際の人体の熱収支を示すものではないが、これらは熱環境の状態を数値的に表現できる特徴をもっている。

## 2. 舗装材の熱特性と人体への影響

### (1) 人体が吸収する放射量予測

図-1に舗装材の熱特性が人体に及ぼす影響のフローチャートを示す。測定するデータは歩行空間に入射する全天水平日射量、同空間における外気温、湿度、風速と舗装材表面温度及び建物等の舗装材周辺構造物の表面温度である。ここでは、人体が吸収する放射量の計算について述べる。本計算では、歩行者を同空間の舗装材上に静止している人体と仮定し、歩行動作に伴う人体の形状変化等を考慮していない。放射量の計算に入力するデータは、舗装材表面温度、建物等の舗装材周辺構造物の表面温度、大気放射量、拡散日射量及び直達日射量である。大気から地表への大気放射量は、外気温と湿度を用いてBruntの式<sup>11)</sup>から算定し、また拡散日射量及び直達日射量は全天水平日射量を分離して求める<sup>12)</sup>。

人体が吸収する放射量は、舗装材及び建物等の舗装材周辺構造物の各表面要素から射出される放射量、

大気放射量、拡散日射量及び直達日射量に分類される。このうち、舗装材及び建物等の舗装材周辺構造物の各表面要素から射出される放射量は、各表面要素の自己放射量<sup>13)</sup>及び各表面要素が反射する大気放射の長波長放射量と、各表面要素が反射する拡散日射及び直達日射の短波長放射量である。表面要素*i*から正味射出される長波長放射量  $R_{L(i)net}$  及び短波長放射量  $R_{S(i)net}$  は、相互反射を考慮した放射熱解析<sup>13), 14)</sup>により、それぞれ式(1)、式(2)によって計算する。

$$R_{L(i)net} = \varepsilon_{Li} \sigma (273 + T_i)^4 + \sum (R_{L(j)net} F_{j \rightarrow i}) (1 - \varepsilon_{Li}) + J_a F_{sky \rightarrow i} (1 - \varepsilon_{Li}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{Li}$  は表面要素*i*の長波長放射率、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )、 $T_i$  は表面要素*i*の表面温度、 $R_{L(j)net}$  は任意の表面要素*j*から正味射出される長波長放射量、 $F_{j \rightarrow i}$  は任意の表面要素*j*から表面要素*i*への形態係数、 $J_a$  は大気放射量、 $F_{sky \rightarrow i}$  は空から表面要素*i*への形態係数である。

$$R_{S(i)net} = I_{ids} (1 - \varepsilon_{Si}) + \sum (R_{S(j)net} F_{j \rightarrow i}) (1 - \varepsilon_{Si}) + I_{diff.} F_{sky \rightarrow i} (1 - \varepsilon_{Si}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

ここに、 $I_{ids}$  は表面要素*i*に入射する直達日射量、 $\varepsilon_{Si}$  は表面要素*i*の短波長放射率、 $R_{S(j)net}$  は任意の表面要素*j*から正味射出される短波長放射量、 $I_{diff.}$  は拡散日射量である。ここで、形態係数とは2面間の幾何学的関係により決まる定数(無次元)である。すなわち、2面間の形態係数は一方の面から射出される放射量のうち、他面に到達する放射量

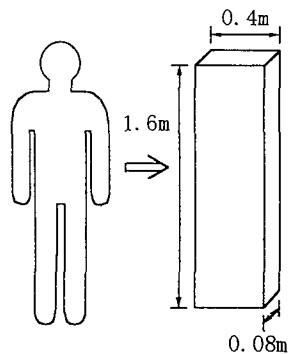


図-2 人体の直方体モデル

の割合を示す。

舗装材及び建物等の舗装材周辺構造物の表面要素 $i$ から人体が吸収する放射量 $R_{abs.(i)}$ は、式(3)により計算する。

$$R_{abs.(i)} = (\varepsilon_{PL} F_{p \rightarrow i} R_{L(i)net} + \varepsilon_{PS} F_{p \rightarrow i} R_{S(i)net}) A_{rad} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{PL}$ は人体の長波長放射率、 $F_{p \rightarrow i}$ は人体から表面要素 $i$ への形態係数、 $\varepsilon_{PS}$ は人体の短波長放射率、 $A_{rad}$ は着用衣服を考慮した人体の有効放射面積率である。

また、人体が直接吸収する大気放射量 $R_{abs.(J_a)}$ 及び拡散日射量 $R_{abs.(I_{diff.})}$ は、それぞれ式(4)、式(5)により計算する。

$$R_{abs.(J_a)} = \varepsilon_{PL} F_{p \rightarrow sky} J_a A_{rad} \quad (\text{W/m}^2) \quad (4)$$

$$R_{abs.(I_{diff.})} = \varepsilon_{PS} F_{p \rightarrow sky} I_{diff.} A_{rad} \quad (\text{W/m}^2) \quad (5)$$

ここに、 $F_{p \rightarrow sky}$ は人体から空への形態係数である。

以上に示した舗装材及び建物等の舗装材周辺構造物の各表面要素から射出される放射量、大気放射量及び拡散日射量から人体が吸収する放射量の計算においては、人体の形状を図-2に示す直方体<sup>15)</sup>にモデル化した。なお、着用衣服を考慮した人体の有効放射面積率 $A_{rad}$ は式(6)により計算する。

$$A_{rad} = A_{eff}(1 + 0.15 I_{clo}) \quad (6)$$

ここに、 $A_{eff}$ は立位状態における裸体時の有効放射面積率 $0.725^{16)}$ 、 $0.15 I_{clo}$ は裸体時の体表面積に対する衣服着用時の体表面積増加率<sup>16)</sup>、 $I_{clo}$ は着用衣服の保温力である。

着用衣服の保温力 $I_{clo}$ は、着用衣服の個々の保温力 $clo$ を加算し式(7)<sup>17)</sup>によって求める。

$$I_{clo} = (3/4) \sum clo + (1/10) \quad (7)$$

一方、直達日射に対する人体の有効放射面積率は太陽高度と太陽方位角に依存するため、人体が直接吸収する直達日射量 $R_{abs.}(I_{dir.})$ は太陽高度と太陽方位角の変化に伴う人体の投影面積率( $A_p/A_{Du}$ )を考慮して、式(8)によって計算する。

$$R_{abs.}(I_{dir.}) = \varepsilon_{PS} I_{dh} (A_p/A_{Du}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (8)$$

ここに、 $I_{dh}$ は水平直達日射量、 $A_p$ は人体の投影面積、 $A_{Du}$ は体格に影響される人体の体表面積である。

人体の投影面積 $A_p$ は、人体の形状を楕円柱(長軸 $0.146\text{m}$ 、短軸 $0.095\text{m}$ 、高さ $1.499\text{m}$ )とした式(9)によって計算<sup>18)</sup>し、人体の体表面積 $A_{Du}$ は式(10)に示すDuboisの式<sup>16)</sup>により求める。

$$A_p = \pi ab \sin \theta + 2bc \cos \theta (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)^{0.5} \quad (\text{m}^2) \quad (9)$$

ここに、 $a$ は楕円柱の長軸の長さ、 $b$ は楕円柱の短軸の長さ、 $\theta$ は太陽高度、 $\phi$ は太陽方位角、 $c$ は楕円柱の高さである。

$$A_{Du} = 0.203 W^{0.425} H^{0.725} \quad (\text{m}^2) \quad (10)$$

ここに、 $W$ は体重(kg)、 $H$ は身長(m)である。

## (2) 温熱指標の算出

人体は体内で生産される熱量と外界の温熱環境条件により定まる放射量を平衡させることにより、体温の恒常性を保っている。この体温を調節するための主な操作量は、皮膚への血流量の変動及び発汗である。体内で発生した熱量は体組織を熱伝導と血液循環によって皮膚表面へ流れ、皮膚表面へ伝達された熱量は対流、伝導及び放射による非蒸発性熱放散と呼吸及び発汗による蒸発性熱放散により外界へ放散される。この人体と外界の熱平衡に基づく、Gaggeらの簡易的な人体の体温調節系モデル<sup>19)</sup>を基にして作成したプログラムにより人体の生理的状態を示す皮膚温とぬれ面積率を予測する。ここで、ぬれ面積率とは発汗により全身皮膚面が湿潤状態にあるとき、全面積の何%が完全に湿潤し、残りは完全に乾燥しているものと考えてよいかの面積の割合を示したものである。全面が完全湿潤状態のときはぬれ面積率は1.0の値をとり、発汗がない場合でも不感蒸発から0.06の値をとる。入力する環境条件は、外気温、湿度、風速及び人体が吸収する放射量から求められる平均放射温度<sup>20)</sup>であり、一方、人体条件は身長、体重、作業量(以下、代謝量という)と着用衣服の

保温力である。この体温調節系モデルは人体を深部と殻に2分割した簡易な円筒モデルであり、身体各部位の形態と、熱産生速度及び血流状態等の他、人体の性別、年齢、健康状態及び温度履歴等を考慮していない。同モデルは体温調節についてある初期設定値からのズレを示す温シグナル、冷シグナルを計算し、皮膚温、ぬれ面積率、体温及び皮膚血流量を数値計算するものである。しかし、現実の人体の体温調節系は独立したシステムではなく系を分割できない。そのため、同モデルは体温調節系の特性を忠実に模擬するシミュレーションではないが、複雑な生体システムである体温調節系を総合的かつ定量的に表現できる特徴を有している。

次に、予測した皮膚温及びぬれ面積率と着用衣服の保温力を人体条件、また、外気温、湿度、風速及び作用温度<sup>20)</sup>を環境条件の入力値とし、人体と外界の熱平衡に基づいたASHRAE（アメリカ空調学会）のスタンダードな温熱指標である新有効温度<sup>21)</sup>（以下、ET\*という）を計算する。

最近、屋外における新しい温熱感指標として、人体の熱収支に基づいた仮想熱負荷量（以下、VTLという）が神田ら<sup>22)</sup>により提案されている。VTLは既存の温熱指標と比べて人体の温熱感と相関が高く、その有効性が確認されている<sup>22), 23)</sup>。一方、ET\*は定常状態を前提としているため、実際の人体の熱収支を示すものではなく、基本的には屋内用温熱指標である。しかし、発汗による体温調節機能をも含んだ熱平衡に基づき、環境側（気温、湿度、気流、放射）及び人体側（代謝量、皮膚温、ぬれ面積率、着用衣服の保温力）の諸条件を変数としており、比較的広範な環境に応用できる温熱指標であるとともに、原理的には屋外への適用が可能であると考えられる。ここで、作用温度とは、現実の非等温環境（気温≠平均放射温）下の人体が対流及び放射による熱放散と等量の熱放散が行われる仮想上の等温環境温度（気温=平均放射温）であり、外気温と平均放射温度をそれぞれ対流と放射の熱伝達率で平均したものである。

以上の手順により舗装材の違いが歩行者に及ぼす影響について検討を行う。

### 3. ケーススタディー

### (1) ケーススタディーの概要

図-3は対象とした工場内の敷地における歩行空間であり、舗装材はアスファルト、北側建物壁面及び南側建物壁面の材質はコンクリートである。同空間において舗装材の違いが歩行者に及ぼす影響につ

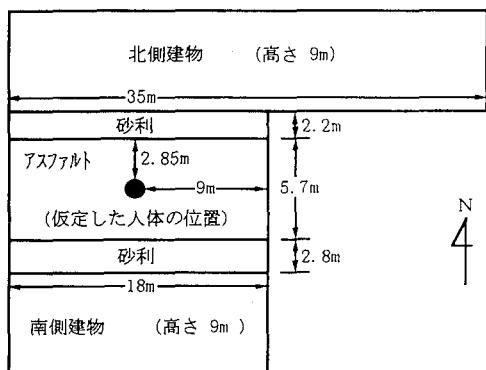


図-3 対象とした歩行空間

表-1 各模型舗装試験体の物性値

物性値 舗装材	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	空隙率 (%)	透水係数 (cm/s)
アスファルト	2,100	5	0
コンクリート	2,300	4	$2 \times 10^{-13}$ <sup>24)</sup>
土系舗装A	1,600	25	$3.6 \times 10^{-1}$
土系舗装B	1,650	20	$3.0 \times 10^{-2}$
土系舗装C	1,900	15	$9.2 \times 10^{-3}$

いて検討を行う。対象とした舗装材は、土系舗装材と従来の舗装材であるアスファルト及びコンクリート舗装である。これらの材料を用いた模型舗装の試験体を縦50cm、横50cm、厚さ15cm（表層厚5cm、碎石厚10cm）の寸法で作製した。表-1に各模型舗装試験体の物性値を示す。この試験体を直達日射が入射する南側建物の東側におけるオープンスペース（地表面は土）に置き、試験体表面温度と南側及び北側に建物が位置し、地表面がアスファルト舗装、砂利である歩行空間の舗装材表面温度、両建物壁面温度及び砂利表面温度を放射温度計を用いて測定した。全天水平日射量は南側建物の東側オープンスペース（地表面は土）において全天日射センサーにより測定し、また歩行空間の舗装材中央付近（仮定した人体の位置）においては直達日射を遮蔽した状態の温湿度計により外気温及び湿度を、風速については地上高さ1mにおいて風杯型風速センサにより測定した。なお、気象データの測定はハイブリッドレコーダ（SH-100PD）により5秒間隔で瞬時値を記録した。ここで、土系舗装材とは路面表層となる自然土をセメント系固化材により安定処理した自然土舗装である。ここでは、自然土として砂利、砂、まさ土を用いた3種類の舗装（以下、土系舗装A、B、Cという）を対象とする。

表-2 太陽高度及び太陽方位角

佐賀地方：北緯33° 15'		
時刻 (TIME)	太陽高度 (degree)	太陽方位角 (degree)
8:00	30.85	-96.54
9:00	43.37	-88.72
10:00	55.84	-78.86
11:00	67.71	-62.92
12:00	76.81	-26.40
13:00	75.74	35.13
14:00	65.82	66.38
15:00	53.78	80.75
16:00	41.28	90.11
17:00	28.78	97.76
18:00	16.49	104.98

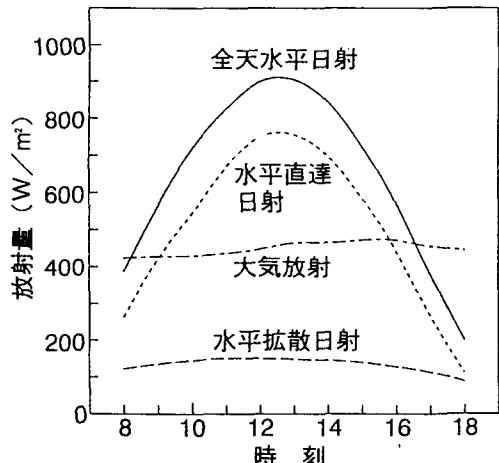


図-4 歩行空間に入射する放射量

## (2) 気象データ及び表面温度測定値

測定は1996年7月17日の8時から18時まで行った。表-2に測定日の太陽高度及び太陽方位角を示す。図-4は、測定によって得られた歩行空間に入射する放射量である。同図に示した水平直達日射量と水平拡散日射量は測定した全天水平日射量の分離値<sup>12)</sup>であり、大気から地表への大気放射量は外気温と湿度を用いてBruntの式<sup>11)</sup>から算定した。外気温及び湿度の測定値を図-5に、風速の測定値を図-6に示す。図-7は、歩行空間において測定（測定数5点）したアスファルト舗装表面温度、建物壁面表面温度及び砂利表面温度の平均値である。8時から17時の間、アスファルト舗装全面には直達日射が入射し、建物の影はなかった。建物壁面については、9時から16時の間、北側建物壁面に直達日射が入射し、南側建物壁面へ入射する直達日射はなかった。一方、

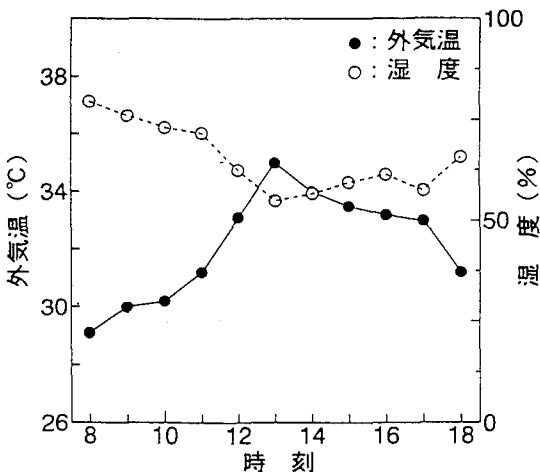


図-5 外気温及び湿度の測定値

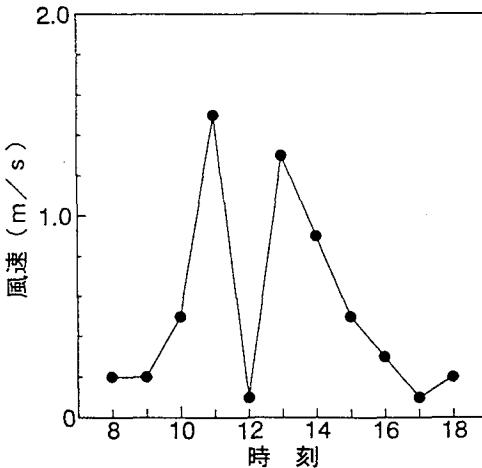


図-6 風速の測定値

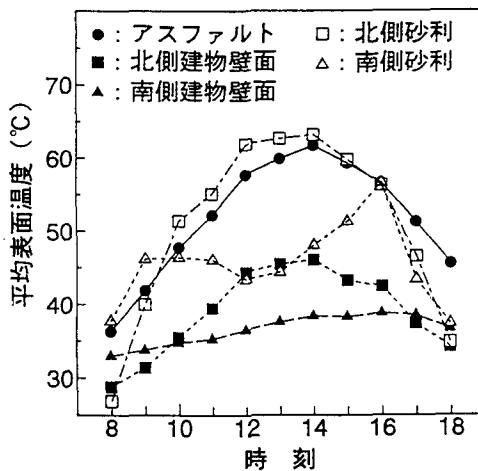


図-7 歩行空間において測定したアスファルト建物壁面及び砂利の平均表面温度

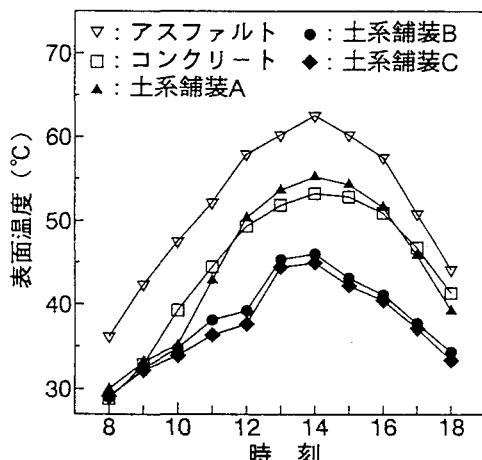


図-8 混潤状態における各模型舗装試験体の表面温度測定値

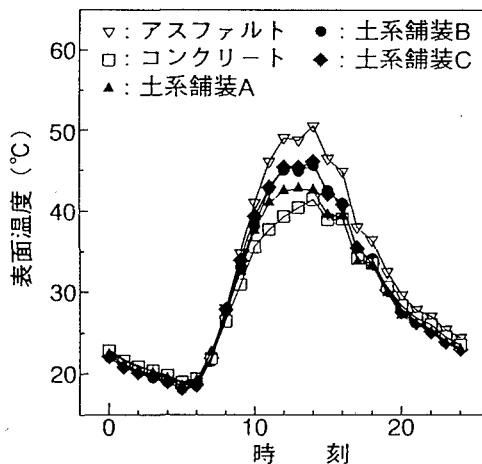


図-9 乾燥状態における各模型舗装試験体の表面温度測定値

9時から16時を除いた測定時間帯では直達日射は南側建物壁面へ入射し、北側建物壁面へ入射する直達日射はなかった。なお、図-7に示した砂利の平均表面温度のうち、砂利面において日なたと日かけ部分が共存している場合には、測定した日なた及び日かけの砂利表面温度に各部分の面積の重みを付けて算定し、その値を平均表面温度とした。そのため、10時から16時において直達日射が全面に入射する北側砂利の表面温度は、日なたと日かけ部分が共存する南側砂利のそれより高かった。

図-8は南側建物の東側オープンスペースに置いた各模型舗装試験体の表面温度測定値である。土系舗装材は、透水性を有しているため前日の降雨により湿潤状態であった。土系舗装B,Cの表面温度は、

表-3 計算に用いた形態係数

To From	北側建 物壁面	北 砂 利	南側建 物壁面	南 砂 利	舗装材	空 (建物間の 上面、側面)
北側建 物壁面	0.000	0.103	0.151	0.037	0.149	0.560
北 砂 利	0.404	0.000	0.090	0.000	0.000	0.506
南側建 物壁面	0.294	0.022	0.000	0.120	0.115	0.449
南 砂 利	0.117	0.000	0.383	0.000	0.000	0.500
舗装材	0.234	0.000	0.182	0.000	0.000	0.584
空 (建物間の 上面、側面)	0.245	0.052	0.189	0.065	0.156	0.293
人 体	0.193	0.022	0.134	0.024	0.376	0.251

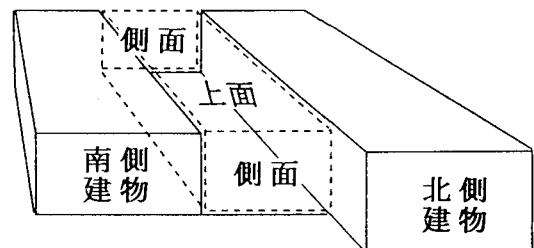


図-10 形態係数算出における閉空間系の一例  
(空(建物間の上面、側面)から南側  
建物壁面への形態係数算出の場合)

アスファルト及びコンクリートに比べて低く、土系舗装Aの表面温度はコンクリートのそれと大きな差はなかった。一方、図-9は晴天が続いた状態において測定した各模型舗装試験体の表面温度の一例を示したものである。乾燥状態における3種類の土系舗装材の表面温度は、アスファルトとコンクリートの中間の値を示す。湿潤状態にある土系舗装B,Cは、間隙水の影響により熱容量が大きいこと、ならびに水分蒸発によって舗装材の熱が気化熱として消費されたこと、等の原因により表面温度の変化は相対的に小さかったものと考えられる。また、これまでの実験結果からアスファルトに対する土系舗装B,Cの表面温度は雨天直後の晴天において最も差が大きく、時間経過に伴いその差は小さくなることから、今後は保水性を継続する路盤工法の検討が望まれる。

### (3) 人体が吸収する放射量

ここでは、歩行者を図-3に示した空間のアスファルト舗装中央に静止し真東を向いている人体と仮定し、その人体が吸収する放射量を求めた。本計算に用いた形態係数の算定値を表-3に示す。図-10

表-4 計算に用いた放射率

構成面		放射率	長波長放射率	短波長放射率
舗	アスファルト	0.94 <sup>25)</sup>	0.92 <sup>25)</sup>	
	コンクリート	0.94 <sup>25)</sup>	0.84 <sup>25)</sup>	
装材	土系舗装A	0.89	0.86	
	土系舗装B	0.88	0.89	
	土系舗装C	0.88	0.88	
砂利	0.87 <sup>26)</sup>	0.88 <sup>25)</sup>		
北側建物壁面	0.94 <sup>25)</sup>	0.84 <sup>25)</sup>		
南側建物壁面	0.94 <sup>25)</sup>	0.84 <sup>25)</sup>		
空	1.00	1.00		

表-5 着用衣服の個々の保温力

衣 服	保温力(clo)
半袖ニットシャツ	0.22
ズボン(薄手)	0.26
ブリーフ	0.06
ソックス	0.03
短靴	0.04

表-6 人体の条件

着用衣服の保温力 I clo	0.56 clo
体 重 W	65 kg
身 長 H	1.70 m
長 波 長 放 射 率 $\varepsilon_{PL}$	0.95 <sup>27)</sup>
短 波 長 放 射 率 $\varepsilon_{PS}$	0.67 <sup>27)</sup>

は形態係数算出における閉空間系の一例として、空から南側建物壁面への形態係数を算出する場合の閉空間系を示したものであり、その形態係数は一辺を共有して互いに垂直な位置関係にある矩形板の算出式<sup>14)</sup>により求めた。表-4に示す土系舗装材の長波長放射率は、表面の一部に黒体スプレー（長波長放射率0.94）を噴射した試験体（縦15cm、横15cm、厚さ5cm）を乾燥炉で適度に加熱し、長波長放射率を0.94に設定した放射温度計を用いて黒体スプレーを噴射した部分の表面温度測定を行い、次に、黒体スプレーを噴射していない部分の表面温度を測定し、その温度が先に測定した温度になるまで放射温度計の長波長放射率を変化させたときの値である。また、土系舗装材の短波長放射率については、図-9に示す同舗装材のアスファルト及びコンクリートに対する表面温度と同舗装材の表層である自然土、アスフ

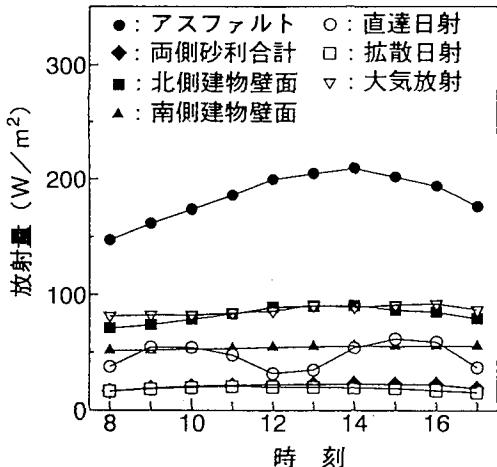


図-11 人体が吸収する放射量の分析

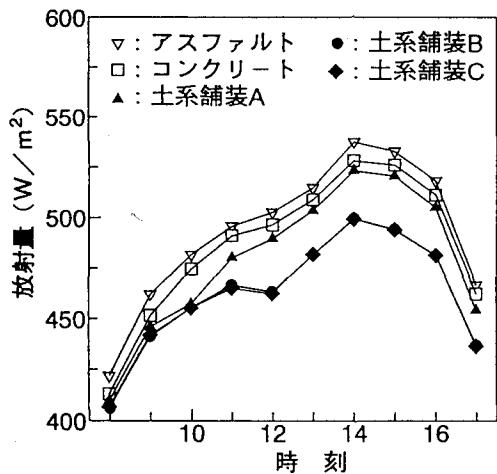


図-12 舗装材を置き換えた場合の人体が吸収する放射量の比較

タルト及びコンクリートの短波長放射率<sup>25)</sup>を考慮して想定したものである。表-5、6は着用衣服及び人体に関する条件である。図-11は人体が吸収する放射量の分析結果である。各時刻において、人体が吸収するアスファルト舗装からの放射量は人体が吸収する放射量の35~40%であり、アスファルト舗装が人体に及ぼす放射量の影響は大きい。

次に、空からの形態係数及び建物壁面等の影響により歩行空間におけるアスファルト舗装とアスファルト模型舗装試験体の表面温度は同値ではなかったが、これら測定値に大きな差がなかったために、図-8に示した土系舗装材とコンクリートの表面温度を用いて、同空間のアスファルト舗装を土系舗装材及びコンクリートに置き換えた場合の、人体が吸収する放射量を求め、その結果を図-12に示す。計算

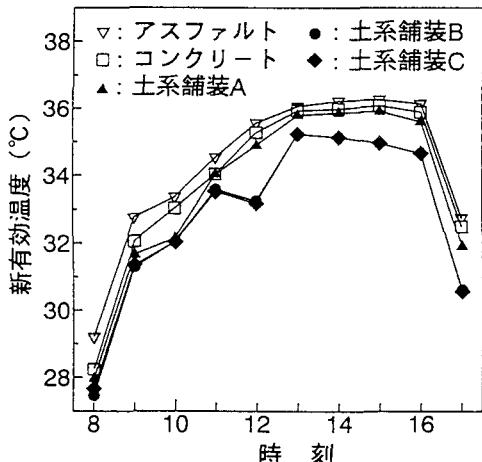


図-13 鋪装材を置き換えた場合の  
新有効温度の比較

表-7 湿熱生理的な中立状態値

平均皮膚温 $T_{sk}$	33.9 °C
平均体温 $T_{cr}$	36.4 °C
ぬれ面積率 $\omega$	0.06
血液の比熱 $C_{bl}$	1.163 W·h/l·°C
皮膚血流量 $V_{bl}$	6.3 l/m²·h
体組織の熱伝導率 $K_s$ (最小値)	5.23 W/m²·°C
体組織の比熱 $C_p$	0.97 W·h/kg·°C

結果から舗装材の違いによる建物壁面からの放射量の差は小さく、同図における放射量の差は舗装材からの放射量の差によるものと考えてよい。各時刻において、人体が吸収する放射量が最も大きい舗装材はアスファルトである。これは、アスファルトの表面温度が高く、自己放射量が大きかったためである。また、コンクリートは直達日射量及び拡散日射量に対する反射量が大きいために、人体が吸収するコンクリートからの放射量はアスファルトと比べて大きな差はなかった。

湿潤状態における土系舗装B,Cはアスファルト及びコンクリートに比べて表面温度が低いために自己放射量が小さく、また、直達日射量及び拡散日射量に対する反射量がコンクリートに比べて小さいことから、人体が吸収する同舗装材からの放射量は、アスファルト及びコンクリートに比べて小さい結果となつた。

#### (4) 新有効温度 (ET\*)

アスファルト舗装を土系舗装材及びコンクリート舗装に置き換えた場合の、ASHRAEのスタンダードな

温熱指標であるET\*を求め、その結果を図-13に示す。ET\*計算の入力値となる皮膚温とぬれ面積率(発汗による皮膚面の湿潤度を表すもの)は、表-6に示す条件において代謝量が116W/m<sup>2</sup> (歩行速度0.9m/sにおける代謝量)<sup>28)</sup>である人体を対象に、体温調節系モデルに基づいたプログラムにより求めた。ここで、代謝量とは1時間あたり体表面積1m<sup>2</sup>の発熱量を表すものである。標準的体格(体重65kg、身長1.70m)の人が安静状態における代謝量は41~47W/m<sup>2</sup>である。同プログラムにおける体温調節の初期設定値は表-7に示す体温調節機能が働いていない温熱生理的な中立状態<sup>29)</sup>とし、対流熱伝達係数は式(11)<sup>30)</sup>を用い、放射熱伝達係数は4.65W/m<sup>2</sup>·K<sup>31)</sup>とした。

$$hc = 8.59V^{0.531} \quad (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (11)$$

ここに、Vは風速(m/s)である。

代謝量116W/m<sup>2</sup>の人体が快適に感じるET\*は19~26°C<sup>28)</sup>の範囲(以下、快適範囲とい)であり、各舗装材ともこの快適範囲を超えている。しかし、各舗装材のET\*を比較すると、土系舗装B,Cはアスファルト及びコンクリートより低く、快適範囲に近い値であった。これは、土系舗装B,Cにおいて人体が吸収する放射量が、アスファルト及びコンクリートに比べて小さいためである。よって、湿潤状態にある土系舗装B,CはET\*低減に効果がある。

## 4. 結論

2つの建物が平行して位置する歩行空間の舗装材を対象に、夏期の気象条件下で舗装材の違いが歩行環境にどのような影響を及ぼすかについて、人体の体温調節系モデルにより算定した人体の皮膚温及びぬれ面積率と、気象データを入力値として求められた温熱指標により概略的検討を行った。本報告で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 人体が吸収する放射量を分析した結果、舗装材からの放射量が人体に及ぼす影響は大きい。
- (2) 湿潤状態にある土系舗装B,Cは、アスファルト及びコンクリートに比べて表面温度が低いため、人体が吸収する放射量低減に効果がある。
- (3) 温熱指標の一つである新有効温度(ET\*)により各舗装材を比較した結果、湿潤状態にある土系舗装B,Cは新有効温度(ET\*)低減に効果がある。
- (4) 舗装材の表面温度が歩行者の熱環境に影響を及ぼし、また表面温度の低下が歩行者の熱環境の改善に寄与することを確認した。

謝辞：本研究は東京舗装工業（株）との共同研究である。本報告をまとめるにあたり、同社の相子榮吉氏、花木和文氏及び浜武章氏に多大な御協力を賜りました。ロックペイント（株）九州工場の福山一郎氏には実験上の便宜を図っていただき、また、本文をまとめるにあたり佐賀大学の原田嘉文博士及び伊藤幸広博士に多大な御指導を賜りました。実験に際しては本学大学院の平川範貴君及び本学学生の熊川整君から多大な御援助を賜りました。記して感謝の意を表します。

### 記号説明

- $R_{L(i)net}$  = 表面要素*i*から正味射出される長波長放射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $R_{S(i)net}$  = 表面要素*i*から正味射出される短波長放射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $\sigma$  = ステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )
- $\varepsilon_{Li}$  = 表面要素*i*の長波長放射率
- $\varepsilon_{Si}$  = 表面要素*i*の短波長放射率
- $\varepsilon_{PL}$  = 人体の長波長放射率
- $\varepsilon_{PS}$  = 人体の短波長放射率
- $T_i$  = 表面要素*i*の表面温度 (°C)
- $F_{j \rightarrow i}$  = 表面要素*j*から表面要素*i*への形態係数
- $F_{sky \rightarrow i}$  = 空から表面要素*i*への形態係数
- $F_{p \rightarrow i}$  = 人体から表面要素*i*への形態係数
- $F_{p \rightarrow sky}$  = 人体から空への形態係数
- $J_a$  = 大気放射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $I_{dh}$  = 水平直達日射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $I_{diff.}$  = 拡散日射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $I_{ids.}$  = 表面要素*i*に入射する直達日射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $Rabs.(i)$  = 表面要素*i*から人体が吸収する放射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $Rabs.(J_a)$  = 人体が直接吸収する大気放射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $Rabs.(I_{diff.})$  = 人体が直接吸収する拡散日射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $Rabs.(I_{dir.})$  = 人体が直接吸収する直達日射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $A_{rad}$  = 着用衣服を考慮した人体の有効放射面積率
- $A_{eff}$  = 立位状態における裸体時の有効放射面積率
- $I_{clo}$  = 着用衣服の保温力
- $A_p$  = 人体の投影面積 ( $\text{m}^2$ )
- $A_{Du}$  = 人体の体表面積 ( $\text{m}^2$ )
- $\theta$  = 太陽高度 (度)
- $\phi$  = 太陽方位角 (度)
- $W$  = 体重 (kg)
- $H$  = 身長 (m)

### 参考文献

- 1) 建設省：生活福祉空間大綱, pp. 1-27, 1994.
- 2) 建設省、厚生省：福祉のまちづくり計画策定の手引き, pp. 1-25, 1996.
- 3) 中村英夫：高齢社会とまちづくり、「第8回測量の日」記念、技術講演会テキスト、(社)佐賀県測量・設計業協会, pp. 38-39, 1996.
- 4) 田中孝典、清田勝、井上伸一、相子榮吉：高齢者・身障者への影響を考慮した舗装材料の特性について、第15回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 137-140,

1995.

- 5) 田中孝典、三浦哲彦、清田勝、相子榮吉、花木和文：歩行者系道路舗装材の快適性に関する一考察、「舗装」建設図書, No. 3, Vol. 32, pp. 19-23, 1997.
- 6) 浅枝隆：都市インフラストラクチャの表面被覆と熱収支、都市の熱環境に関する学際シンポジウム, pp. 31-39, 1995.
- 7) 花木啓祐、一ノ瀬俊明：土木工学分野での都市熱環境研究の動向、都市の熱環境に関する学際シンポジウム, pp. 22-30, 1995.
- 8) 福田萬大、深沢邦彦、荒木美民、藤野毅、浅枝隆：夏期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) Burt et al. : The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature, *Int.J.Biometeor.*, Vol. 26, pp. 3-26, 1982.
- 10) 中村泰人、平岡久司：2次元長方形市街地空間の路上にある人体の熱負荷に関する解析的研究、日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 369, pp. 12-21, 1986.
- 11) 田中俊六、武田仁：最新建築環境工学、井上書院, pp. 76-84, 1989.
- 12) 宇田川光弘、木村建一：水平全天日射量観測値よりの直達日射の推定、日本建築学会論文報告集, pp. 83-84, 1978.
- 13) 内田秀夫：大学演習伝熱工学、裳華房, pp. 340-342, 1983.
- 14) Siegel,R. and Howell,J.R. : *Thermal radiation heat transfer*, International Student Edition, pp. 295-306, 1977.
- 15) Tetsumi Horikoshi and Yataro Kobayashi : Configuration factors between a rectangular solid as a model of the human body and rectangular planes, for evaluation of the influence of thermal radiation on the human body, *Journal of architecture*, Architectural Institute of Japan, pp. 91-99, 1978.
- 16) Gagge,A.P. and Nishi,Y. : Heat exchange between human skin surface and thermal environment, Chapter 5, *Handbook of physiology, Reactions to environmental agents*, American physiological society, pp. 69-92, 1977.
- 17) 長田泰公編：新生理科学大系22巻、医学書院, pp. 148-149, 1987.
- 18) Underwood,C.R. and Ward,E.J. : The solar radiation area of man, *Ergonomics*, Vol. 9, No. 2, pp. 155-168, 1966.
- 19) Gagge,A.P. Stolwijk,J.A.J. and Nishi,Y. : An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Transactions*, Vol. 77, pp. 247-262, 1971.
- 20) Bjarne W.Olesen and Ruth Nielsen : Radiant Spot Cooling of Hot Working Places, *ASHRAE Transactions*, pp. 593-608, 1981
- 21) Gagge,A.P. Fobelet,A.P. and Berglund,L.G. : A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transactions*, pp. 709-724, 1986.
- 22) 神田学、柳本記一、宇梶正明：屋外における新しい温熱感指標の提案、土木学会論文集, No. 545/I-36,

- pp. 1-10, 1996.
- 23) 木内豪, 栗城稔, 小林裕明 : 屋外空間における夏期の温熱環境評価指標の検討, 土木技術資料, Vol. 38, No. 12, pp. 32-37, 1996.
  - 24) 岡田清 : 土木材料学, オーム社, pp. 253-254, 1982.
  - 25) 日本機械学会 : 伝熱工学資料改訂第4版, pp. 185-189, 1986.
  - 26) 河村武 : 都市の大気環境, 東京大学出版会, pp. 169-171, 1979.
  - 27) Arens,E. Gonzalez,R. and Berglund,L. : Thermal comfort under an extended range of environmental conditions, *ASHRAE Transactions*, pp. 18-26, 1990.
  - 28) *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, Chapter 8, Physiological Principles Comfort and Health, pp. 8.1-8.36, 1985.
  - 29) 中山昭雄編 : 温熱生理学, 理工学社, pp. 49-51, 1981.
  - 30) Nishi,Y. and Gagge,A.P. : Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, *J.Appl.Physiol.* No. 29, p. 830, 1970.
  - 31) 大原孝吉編 : 新生理科学大系22巻, 医学書院, pp. 91-95, 1987.

(1996. 11. 19受付)

## EFFECT OF THERMAL CHARACTERISTICS OF PAVEMENT MATERIAL ON PEDESTRIANS

Takanori TANAKA, Norihiko MIURA and Masaru KIYOTA

Various new types of pavement materials have been developed for pedestrian precincts. It is necessary to investigate pavement materials for pedestrian precinct considering pedestrians safety and comfort for an aging society. Administration of construction is also studying adjustment of pavement at sidewalks from a point of view described above. This report treats thermal characteristics of pavement materials which is one of factors influencing pedestrians comfort. It investigates thermal characteristics of pavement material by applying a core-shell model of human temperature regulation and a rational temperature index.