高反射率化した道路舗装面上における人体温熱感の検討

道路舗装面の高反射率化によるヒートアイランド緩和（その2）

INFLUENCE OF RADIATION REFLECTED BY COOL PAVEMENT
ON THERMAL SENSATION OF PEDESTRIANSReduction of sensible heat emission by cool pavement
as countermeasure of heat island (Part 2)

近藤 靖史*, 小笠原 岳**, 有働 邦広***

Yasushi KONDO, Takeshi OGASAWARA and Kunihiro UDOH

The urban surface has been covered with concrete buildings and asphalt pavements. They have large thermal capacity and absorb solar heat so that heat island phenomena may appear in the urban area. Therefore increase of solar reflection at the urban surfaces is one of countermeasures of heat island, because high reflective roof (hereafter cool roof) and high reflective pavement (hereafter cool pavement) can cool the urban surface and reduce the heat flux from them to urban air. The measured data in the previous paper shows that cool pavement can reduce sensible heat flux from pavement to urban air. On the other hand, reflected solar radiation from pavement may raise surface temperature of human body and cause discomfort of pedestrians. This paper shows that measured temperature of human body models and calculated SET* on cool pavement are higher than those on ordinary pavement according to the amount of reflective heat. In this paper CFD simulations are conducted to study human body temperature when only pavement for vehicles is coated by the high reflective paint and sidewalk for pedestrians is not high reflective.

Keywords: Cool Pavement, High Reflective Paint, Thermal Sensation, Measurement, CFD

クールペイブメント, 高反射率塗料, 温熱感, 実測, CFD

1 序

近年、都市の気温が上昇するヒートアイランド現象が見られ、都市部特有の環境問題となっている。気温の上昇は冷房負荷増加に対応した人工排熱の増大を招き、さらに都市の気温を上昇させるという悪循環を形成し、都市部における生活の快適性が損なわれる。このようなヒートアイランド現象を抑制する手法として、人工排熱の低減、地表面被覆の改善、都市形態の改善などが挙げられる。

本研究では、前報(その1)¹⁾に引き続き、地表面被覆の改善方法の一つである高反射率塗料の道路舗装面への適用について検討する。道路舗装面に高反射率塗料を塗布し、日射反射率を高めた道路(以降、クールペイブメントと記す)では、道路表面温度の上昇が抑えられ、道路表面から都市大気への顕熱放散量が削減され、ヒートアイランド現象の緩和が期待できる。また、舗装面の高反射率化により昼間の日射熱の蓄熱が抑制され、夜間も道路表面温度は低くなる傾向があり、熱帯夜対策として有効であると考えられる。

前報(その1)では実測および熱収支解析によりクールペイブメントのヒートアイランド現象緩和効果を検討した。本報(その2)では、道路を高反射率化したことによって増大する日射反射量が歩行者の温熱感へ与える影響について検討を行う。道路上の歩行者に着目すると、道路を高反射率化することで温熱感に関わる熱環境要素が変

図1 クールペイブメントの概念図

本論文は、2007年度日本建築学会大会(九州)学術講演会において発表した論文に基づいて加筆・修正したものである。

* 武蔵工業大学工学部 教授・博士(工学)

** 東京理科大学工学部 助教・博士(工学)

(研究当時、武蔵工業大学工学部 客員研究員)

*** 武蔵工業大学大学院 博士前期課程

Prof., Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.

Assistant Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

(Formerly Visiting Researcher, Faculty of Eng., Musashi Institute of Technology)

Graduate Student, Musashi Institute of Technology

化する。まず、日射(短波長放射)に着目するとクールペイプメントは一般舗装道路より日射反射率が高いため、クールペイプメント上の歩行者が受ける反射日射量は一般舗装道路より大きい(図1参照)。次に長波長放射に着目すると、クールペイプメントは一般舗装道路よりも表面温度が低くなるため、クールペイプメント上の歩行者が受ける長波放射量は一般舗装道路上の歩行者が受ける長波放射量よりも小さくなる。したがって歩行者の短波放射受熱量の増加分と長波放射受熱量の減少分によって温熱感が変化する^{2), 3), 4)}。そのほかにも各道路上の気温、着衣の日射反射率の違いなどが温熱感に影響を与えると考えられる。そこで本報では、まず一般舗装道路およびクールペイプメント上の温熱環境を比較するため、人体モデルを用いた実測を夏期・冬期に実施する。次に夏期実測結果を用いて SET* を算出し、温熱感の比較を行う。また、歩行者への反射日射の影響を少なくした上で舗装面から都市大気への顕熱放散量を低減する方法として、車道のみを高反射率化し、歩道は高反射率化しないという場合が考えられる。そこで本報では、このような状況を想定し、CFD 解析を用いて検討を行う。

2 クールペイプメント上と一般舗装道路上の人体モデル表面温度の実測

ここでは、道路舗装面の一部をクールペイプメントとし、人体モデルを用いた実測結果を示す。

2.1 実測概要

東京都某事業所内の道路舗装面の一部(約 8.8m×28m)に高反射率塗料を塗布してクールペイプメント(写真1参照)とし、クールペイプメント上および一般舗装道路上に空気温湿度測定用のポール(写真2参照)と人体モデル(写真3参照)を設置して、人体モデル表面温度、空気温湿度を測定する。人体モデルは鋼板製で内部発熱体を組み込んでいる。また、人体モデル表面の日射反射率は後述のように検討ケースによって変えている。なお、人体モデルでは人体表面での汗の蒸発潜熱を考慮していないため、人体表面温度は実際よりも高くなる(発汗などを組み込んだ生理モデルは3章で検討する)。測定は夏期(2006年7月7日～9月24日)と冬期(2006年12月1日～12月3日)において実施した。各道路舗装面の日射反射率^{注1)}を表1に、測定項目および測定位置を表2に示す。

2.2 検討ケース

検討ケースを表3に示す。衣服の色に対応した日射反射率の違いが人体の温熱感にどのような影響を与えるかを検討するため、Case Sでは裸体の状態を、Case W、Case Bではそれぞれ白色と黒色の衣服を着ている状態を想定し、これらに対応する日射反射率の塗料を人体モデルに塗布し、人体モデル表面温度を測定する。なお人体モデルの上部250mmは頭部とみなし、全てのケースにおいてCase Sと同じ日射反射率の塗料を塗布している。

2.3 夏期実測結果および考察

夏期実測の測定代表日として、Case Sでは8月19日を、Case Wでは9月2日を、Case Bでは9月3日を選定し、実測結果を示す。測定代表日の外界条件を表4に示す。

(1) 日中の人体モデル表面温度と空気温度(図2、表5、表6参照)

図2に夏期実測結果を、表5に日照側人体モデル表面温度の10:00～16:00(以下、日中と記す)の平均値を示す。Case Sに着目すると、

GL+100mmにおける日照側人体モデル表面温度の日中平均値は、一般舗装道路上で48.9℃、クールペイプメント上で49.9℃となり、ク

写真1 実測対象道路 写真2 空気温湿度測定用ポール

写真3 人体モデル

表1 各舗装道路面の日射反射率^{注1)}

道路	地表面の日射反射率[-]
一般舗装道路	0.07
クールペイプメント	0.34

表2 測定項目および測定位置

測定項目	測定位置[mm]	測定点数	測定機器
道路表面温度	道路表面	各舗装面当り1点	T型熱電対
人体モデル表面温度	GL+100,600,1100,1600	日照面、日影面1体当り8点	T型熱電対
道路近傍空気温度	GL+1~5	各舗装面当り1点	T型熱電対
空気温湿度	GL+100,600,1100,1600	各舗装面当り4点	無線小型温湿度計(RTR-53,T&D)
グローブ温度	GL+100,1100	各舗装面当り2点	グローブ球(MT-01GT,英弘精機)
外気温湿度	GL+1500	1点	無線小型温湿度計(RTR-53,T&D)
日射量	GL+100	1点	日射計(MS-801,英弘精機)
放射量	GL+400	各舗装面当り1点	長短波放射計(MR-50,英弘精機)
風速・風向	GL+2100	1点	風向・風速計(WS-001,ゼファー)

表3 検討ケース

ケース名	Case S	Case W	Case B
想定衣服	裸体	白の衣服	黒の衣服
日射反射率[%]	31 ^{5),6)}	65 ^{5),7)}	10 ⁵⁾

表4 測定代表日の外界条件

代表日	ケース名	最高気温	最低気温	平均風速	日積算日射量
8/19	Case S	35.2℃	28.9℃	1.0m/s	23.7MJ/m ²
9/2	Case W	32.4℃	24.6℃	1.2m/s	22.2MJ/m ²
9/3	Case B	33.8℃	25.9℃	1.7m/s	21.0MJ/m ²
12/2	Case S	16.8℃	13.3℃	1.4m/s	7.8MJ/m ²

図2 夏期実測結果(8月19日)

図3 衣服の色別人体表面温度(クールペイブメント日照側)

図4 冬期実測結果(12月2日)

ールペイブメント上の方が約 1°C 高い。また GL+600、1100、1600mm ではそれぞれクールペイブメント上の人体モデルが 0.9°C 、 0.8°C 、 0.7°C 高く、地表面に近い位置ほど人体モデル表面の温度が高い。これは反射日射の影響であると考えられる。表6に日影側人体モデル表面温度の日中平均値を示す。クールペイブメント上の方が日影側人体モデル表面温度はやや高いが、その差は日照側(表5)ほど顕著ではない。

道路表面温度(図2(b)参照)の日中平均値は、クールペイブメントの方が一般舗装道路より 7.2°C 低かった。このため、道路近傍空気温度(図2(c)参照)の日中平均値は、一般舗装道路上が 39.4°C 、クールペイブメント上が 38.3°C で、一般舗装道路上の方が約 1°C 高かった。また、GL+100mmにおける空気温度の日中平均値(図省略)は、一般舗装道路上が 38.0°C 、クールペイブメント上が 37.2°C で、一般舗装道路上の方が約 0.8°C 高かった。一方、GL+600、1100、1600mmの地点では外気温と一般舗装道路上、クールペイブメント上の差がほとんど現れなかった。以上より、空気温度の差は足元付近のみに現れ、一般舗装道路上の方がやや高い。

(2) 夜間の人体モデル表面温度と空気温度(図2参照)

表5 日照側人体モデル表面温度の測定結果(日中平均、単位 $^{\circ}\text{C}$)

測定高さ [mm]	Case S (8月19日)		Case W (9月2日)		Case B (9月3日)	
	一般	クール	一般	クール	一般	クール
GL+1600	47.6	48.3	42.2	42.8	43.9	44.9
GL+1100	47.2	48.0	38.3	38.8	45.0	46.3
GL+600	47.4	48.3	38.1	39.3	44.0	46.3
GL+100	48.9	49.9	39.7	40.1	46.1	47.6

表6 日影側人体モデル表面温度の測定結果(日中平均、単位 $^{\circ}\text{C}$)

測定高さ [mm]	Case S (8月19日)		Case W (9月2日)		Case B (9月3日)	
	一般	クール	一般	クール	一般	クール
GL+1600	44.1	44.6	36.8	38.1	39.4	41.0
GL+1100	(欠損)	44.6	36.2	36.9	40.0	41.7
GL+600	44.0	44.1	(欠損)	36.4	39.7	41.4
GL+100	43.8	44.0	35.4	36.6	39.5	41.1

GL+100mmにおける人体モデル表面温度の18:00~21:00(以下、夜間と記す)の平均値は一般舗装道路上が 33.6°C 、クールペイブメント上が 32.9°C であり、クールペイブメント上の方が約 0.7°C 低い(図2(a)参照)。その他の高さにおいても人体モデル表面温度はクールペイブメント上の方が約 0.7°C 低かった(図省略)。

道路表面温度(図2(b)参照)の夜間平均値は、一般舗装道路で 37.5°C 、クールペイブメントで 34.4°C であり、クールペイブメントの方が約 3°C 低かった。また、道路近傍空気温度(図2(c)参照)の夜間平均値は、

一般舗装道路上が 33.9℃、クールペイプメント上が 31.8℃で、クールペイプメント上の方が約 2℃低い。これは日中に道路内に蓄えられる日射熱が一般舗装道路よりクールペイプメントの方が少ないためであると考えられる。

(3) 衣服の違いによる影響(図 3 参照)

図 3 にクールペイプメント上の日照側人体モデル表面温度の実測結果を、着衣の色別に示す。Case S(裸体 図 3(a))において人体表面温度は道路面に近くなるほどやや高くなっている。また、GL+100mm と 1600mm の日中の平均表面温度差は Case S で約 1.7℃である。一方、Case W(白 図 3(b))では、Case S に比べ人体表面温度は 5～10℃程度低い(ただし、測定日は異なる)。また、Case W では頭部の日射反射率が頭部以外の日射反射率より低いため、GL+1600mm の人体モデル表面温度は GL+100mm より高く、その温度差は日中平均で約 2.6℃となる。Case B(黒 図 3(c))では、Case S より人体表面温度は高い。また、Case B では頭部の日射反射率が頭部以外の日射反射率より高いため、GL+1600mm の人体モデル表面温度は GL+100mm より低く、その温度差は日中平均で約 3.4℃となる。このように、人体モデル表面の日射反射率により人体モデル表面温度は変化し、日射反射率が低い場合、人体モデル表面温度は高くなる。

また、GL+100mm の一般舗装道路上とクールペイプメント上の人体モデル表面温度の日中平均値の差(図省略)は Case S で約 1℃、Case W で約 0.4℃、Case B で約 1.5℃であった。すなわち、衣服の日射反射率が高いほど一般舗装道路上とクールペイプメント上の人体モデル表面温度の差は小さい。

2.4 冬期実測結果および考察(図 4 参照)

冬期実測の測定代表日として、12 月 2 日の実測結果を示す。代表日の外界条件を表 4 に示す(Case W、case B の実測結果は省略)。冬期実測結果は夏期と比べ、人体表面温度は約 10℃、空気温度は約 30℃低い結果となった。これ以外は、夏期の結果と同様の傾向となった。

3 人体生理モデルによる温熱感の検討^{注2)}

3.1 MRT の算出

SET*(新標準有効温度)の算出の際に必要となる、日射の影響を考慮した平均放射温度(以下、MRT と記す)を求める⁸⁾。まず GL+1.1m における微小立方体の各面の放射温度(PRT_i [K])を式(1)で求める。式(1)では、地表面温度や周辺建物の壁面温度($T_{s,ni}$ [K])と形態係数(f_{ni} [-])、および大気放射量(L_a [W/m²])と天空との形態係数($f_{sky,ni}$ [-])を組み込んでいる^{注3)}。

$$PRT_i = \left(\sum_{ni} T_{s,ni}^4 \cdot f_{ni} + \frac{f_{sky,ni} \cdot L_a}{\varepsilon \cdot \sigma} \right)^{0.25} \quad \dots(1)$$

次に PRT_i に人体に対する重み付け(K_i)⁹⁾を行い、長波長放射による放射温度(MRT_L [K])を求める。

$$MRT_L = \sum_{i=1}^6 (K_i \cdot PRT_i) \quad \dots(2)$$

$$(K_i = 0.024 (i = 1, 6), K_i = 0.238 (i = 2 \sim 5))$$

さらに次式より MRT を求める。

表 7 2 Node モデルの計算条件

項目	入力値	項目	入力値
空気温度	実測値(GL+1.1m)	体重	70kg
MRT	計算値	体表面積	1.8m ²
平均風速	実測値	着衣量	0.5clo
相対湿度	実測値(GL+1.1m)	代謝量	58.2W/m ²
大気圧	760mmHg	外部からの仕事	0W

図 5 MRT の算出結果

図 6 2 Node モデルによる SET* の算出

$$MRT = \left(MRT_L^4 + (f_{road} \cdot (1 - \alpha_{cl}) \cdot \rho_r \cdot (J_{DH} + J_{SH}) + f_p \cdot J_{DN} \cdot (1 - \alpha_{cl}) / F_{eff} + J_{SH} \cdot (1 - \alpha_{cl})) \div (\varepsilon \cdot \sigma) \right)^{0.25} \quad \dots(3)$$

式中の記号の説明は末尾の記号表に示した。式(3)および夏期(8 月 19 日)および冬期(12 月 2 日)の実測結果を用いて算出した MRT を図 5 に示す^{注4)}。MRT は(Case B クール)>(Case B 一般)>(Case S クール)>(Case S 一般)>(Case W クール)>(Case W 一般)の順で高い結果となった。Case S におけるクールペイプメント上の MRT は、一般舗装道路上より夏期は日中平均で 4.2℃^{注5)}、冬期は 2.7℃高い。また、一般舗装道路上の Case B の MRT は、Case W より夏期は日中平均で 19.9℃、冬期は 22.8℃高い。すなわち MRT の差異は、道路面の高反射率化による影響より、人体の衣服の日射反射率による影響の方が大きい。また、冬期は夏期に比べ、Case B と Case W の MRT の差が大きくなった。これは冬期の太陽高度が低く、式(3)中の人体に入射する直達日射の割合(f_p)が夏期の約 1.7 倍と大きいことによる。

3.2 2 Node モデルによる SET* の算出

MRT の計算結果と実測結果を用いて、2 Node モデルによる SET* を計算した。計算条件を表 7 に示す。ここでは非定常温熱環境下における生理量とそれに伴う SET* を算出する。また、地表面温度が高温となるため、足裏からの伝導熱量の影響を SET* 算出時に考慮した。足裏の土踏みが受ける伝導熱量(Q_{foot} [W/m²])を式(4)より算出する⁴⁾。

$$Q_{foot} = \lambda \cdot (t_s - t_{sk}) / l \quad \dots(4)$$

式(4)で求めた伝導熱量を SET* 算出の際に顕熱損失量の項に次式のように組み込んだ。

$$Q_{dry} = (1.78(t_{sk} - OT)/(r_a + r_{cl}) - 0.02Q_{foot})/1.8 \quad \cdots(5)$$

式(5)では足裏土踏部の面積が約 0.02m²である¹⁰⁾ことを考慮している。以上のように算出した 2 Node モデルの SET*を図 6 に示す。夏期の SET*の日中平均値は一般舗装道路上よりクールペイプメント上の方が高く、その差は Case S で約 1.0℃、Case W で約 0.3℃、Case B で約 1.3℃であった。すなわち、衣服の日射反射率が高いほど、一般舗装道路とクールペイプメント上の SET*の差が小さくなる。冬期も同様の結果となった。

4 CFD 解析による人体表面温度の検討

本章では建物間の街路の歩道上に立つ人体を想定し、クールペイプメント上と一般舗装道路上に立つ人体表面温度を CFD 解析により算出し、一般舗装道路上とクールペイプメント上での人体の温熱感の差異を検討する^{注9)}。

4.1 解析概要

解析モデルを図 7 に示す。両側に高さ 8m の建物が並ぶ街路を想定する。人体モデルは図 7(b)に示すような単純な形状を想定し、人体発熱は考慮していない^{注7)}。今回の検討条件では人体モデル表面温度に影響する要因のうち日射熱が卓越しているのを、これを 4.2 節で述べる方法で解析した。一方、人体モデルとして数値サーマルマネキン¹¹⁾を適用する方法も考えられるが、考察が容易な単純な形状の人体モデルを想定した。

4.2 解析手法

人体各面、地表面および壁面の各面に与える条件を表 8 に示す。短波放射量については日照部と日影部を考慮して以下のように各面への吸収熱量を算出する。

最初に、表面要素 i が受ける日射エネルギー q_{Di} は式(6)により求められる。

$$q_{Di} = \alpha_i(E_{Di} + E_{Si}) \quad \cdots(6)$$

各面が完全拡散面であると仮定し、表面要素 j から表面要素 i への反射日射量 q_{Aji} は Gebhart の吸収係数 B_{ji} を用いて式(7)より求められる。

$$q_{Aji} = B_{ji} \cdot (1 - \alpha_j)(E_{Dj} + E_{Sj}) \quad \cdots(7)$$

以上より、相互反射を考慮すると表面要素 i の短波受熱量 $q_{R,S,i}$ は式(8)より求められる。

$$q_{R,S,i} = q_{Di} + \sum_{j=1}^n q_{Aji} \quad \cdots(8)$$

式(8)で求めた $q_{R,S,i}$ を人体、舗装面、壁面の各面に発熱量として組み込んだ。一方、長波放射授受は対流・放射連成 CFD 解析により各面の表面温度を求める際に組み込まれる。その際、天空面に規定する仮想天空温度 T_{sky} は Brunt の式より求めた。舗装面の裏面条件として、舗装面より 100mm 下の地中温度の実測値^{注8)}を規定し、建物内は空調室温度 26.0℃を規定した。

4.3 解析ケースおよび解析条件

表 9 に解析ケースを示す。一般舗装道路(Case 1)とクールペイプメント(Case 2)の比較の他に、歩道を一般舗装とし、車道をクールペイプメントにした場合(Case 3)についても検討する。このようにすることにより、舗装面から歩行者への反射日射の影響を小さくした上で、

舗装面から都市大気への顕熱放散量を低減できると期待している。また、人体モデルの衣服は白と黒の 2 パターンとした。表 10 に解

(a) 解析モデル全体

(b) 人体モデル

※図中の①～⑥は表8に対応している

図7 解析モデル 単位:[mm]

表 8 人体・地表面・壁面の各面に与える条件

項目	舗装面		壁面		人体	
	①日照部	②日影部	③日照部	④日影部	⑤日照部	⑥日影部
日射 (短波)	直達日射 天空日射	天空日射	直達日射 天空日射	天空日射	直達日射 天空日射	天空日射
反射日射 (短波)	式(8)より、壁・舗装面間の相互反射を組み込んで算出					
大気放射 (長波)	天空面に仮想天空温度 T_{sky} を規定					
裏面条件	舗装面より 100mm 下の温度を規定 一般舗装：36.1℃ クールペイプメン ト：33.8℃		空調室温度 26℃		なし	
	ユルゲスの実験式(滑面) $\alpha_c=5.8+3.9U_A$ ($U_A \leq 5\text{m/s}$) $\alpha_c=7.1U_A^{0.78}$ ($U_A > 5\text{m/s}$)				$\alpha_c=1.9U_A+3.6U_A\sqrt{\pi}$ $-0.046(U_A\sqrt{\pi})^2+2.4$ (文献 12)	

表 9 解析ケース

Case	人体モデルの衣服の色	舗装面の状態
Case 1w	白 (日射反射率: 65%)	一般舗装道路 (日射反射率: 7.4%)
Case 2w		クールペイプメント (日射反射率: 34.1%)
Case 3w		歩道: 一般舗装道路 車道: クールペイプメント
Case 1b	黒 (日射反射率: 10%)	一般舗装道路
Case 2b		クールペイプメント
Case 3b		歩道: 一般舗装道路 車道: クールペイプメント

※皮膚(頭部)の日射反射率: 31%

表 10 解析条件

解析領域	10.0m(X)×10.0m(Y)×8.0m(Z)
メッシュ分割	95(X)×53(Y)×54(Z)=271,890[mesh]
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
流入条件	$U_{in} = U_A(Z/Z_A)^{0.25}$ ($Z_A=8.0\text{m}$ において $U_A=2.0\text{m/s}$) $T_{in}=33.7^\circ\text{C}$ $k_{in}=1.5 \cdot (T_i \cdot U_{in})^2 \cdot \epsilon_{in} = (C_\mu \cdot k^{1.5})/L$ $L = \{4(C_\mu \cdot k)^{0.5} \cdot Z_A^{0.25} \cdot Z^{0.75}\} / U_{in}$ $C_\mu=0.09$
流出条件	自然流出
壁面応力条件	速度: 地表面・壁面および人体各面は一般化対数則。 その他は Free Slip 温度: 各壁面要素(i)の温度 $\theta_w(i)$ を熱平衡式から算出 $q_{cd}(i) + q_{cv}(i) + q_{R,S}(i) + q_{R,L}(i) = 0$ (流入が正) ① $q_{cd}(i)$: 壁面要素(i)での貫流熱量 ② $q_{cv}(i)$: 壁面要素(i)での対流熱伝達量 $q_{cv}(i) = \alpha_c (\theta_w(i) - \theta_a(i))$ (α_c は人体: 19.5W/m ² ℃、壁面および地表面: 13.6W/m ² ℃) ③ $q_{R,S}(i)$: 壁面要素(i)での短波受熱量 短波受熱量($q_{R,S,i}$ 、式(8))を発熱として各面に与える ④ $q_{R,L}(i)$: 壁面要素(i)での長波放射熱伝達量 $q_{R,L}(i) = \sigma \cdot \epsilon_i \sum B_{ji} (T_{ji}^4 - T_i^4)$
日射エネルギー	直達日射エネルギー: $E_{Di} = A_i \cdot \sin(\theta + h) \cdot J_{DN}$ (水平面: $\theta=0$ 、鉛直面: $\theta=\pi/2$)、 $E_{Si} = A_i \cdot F_{is} \cdot J_{SH}$

析条件を示す。解析日時は実測を行った2006年8月19日12時(太陽高度:66.81°)とし、全天日射量、外気温などは実測値^{注8)}を用いた。

4.4 解析結果および考察

(1)道路表面温度(図8参照)

道路および建物壁面の表面温度を図8に示す。道路表面温度はクールペイプメントの方が一般舗装より約10℃低い結果となった。車道のみを高反射率化した場合では、歩道表面は高温となる。また建物壁面の表面温度は反射日射の影響でクールペイプメントの方が0.6℃高かった。

(2)日照側人体表面温度(図9参照)

日照側人体表面温度を図9に示す。日照側の人体表面温度は、衣服が白の場合(図9(a)~(c))では舗装面からの反射日射の影響は小さく、表面温度の差は顕著ではなかった。一方、衣服が黒の場合(図9(d)~(f))では人体がクールペイプメント上にあるCase 2bで人体表面温度は最も高くなり、Case 1bに比べ、1~2℃程度の差異が見られる。これらの傾向は2章で示した実測結果と良く対応している。また、車道のみを高反射率化したCase 3bでは、Case 1bよりやや人体表面温度が高いものの、Case 2bに比べるとかなり低くなっており、舗装面からの反射日射の影響が小さくなることわかる。

(3)日影側人体表面温度(図10参照)

日影側人体表面温度を図10に示す。日影側の人体表面温度は、衣服が白の場合、道路の日射反射率による差は小さい。一方、衣服が黒の場合、クールペイプメントとしたCase 2bで人体表面温度が高く、日照側人体表面温度とほぼ同じ傾向を示すが、各ケース間の差異は日照側に比べやや小さい。

(4)人体周辺空気温度(図11参照)

図11に人体周辺の空気温度の結果を示す。地表面近傍や人体表面近傍ではそれらの温度に対応した空気温度が形成されている。例えば、地表面近傍の空気温度に着目すると、Case 1とCase 3では歩道表面温度が高いため、これに接する空気温度も高い。ただし、地表面近傍を除いて各ケースに大きな差異はない。

(5)日照側の脚部の放射受熱量(表11参照)

日照側の脚部に着目し、舗装面からの反射日射と長波放射の受熱量を算出し、結果を表11に示す。舗装面からの反射日射の受熱量はクールペイプメントのCase 2で大きく、Case 1の4倍程度となっている。車道のみを高反射率化したCase 3はCase 1よりは反射日射の受熱量は大きい、Case 2に比べると2分の1以下となっている。一方、舗装面からの長波放射の受熱量はCase 1が最も大きく、Case 2が小さい。舗装面からの反射日射と長波放射の受熱量を合計すると、Case 2が大きくなり、やはりクールペイプメントにすることにより、反射日射の影響が大きくなり、歩行者への影響が現れるが、車道のみを高反射率化することにより、歩行者への影響はかなり小さくなる。

5 結論

道路舗装面を高反射率化した場合において、歩行者の温熱感へ与える影響を実測、人体生理モデル、CFD解析によって検討した。その結果得られた知見を以下に示す。

図8 道路・壁面表面温度 単位: [°C]

図9 日照側人体表面温度 単位: [°C]

図10 日影側人体表面温度 単位: [°C]

- (1) 夏期に行った実測において、日中のクールペイブメント上の人体モデル表面温度は一般舗装道路上に比べ 0.5～1.5℃程度高かった。夜間はクールペイブメント上の人体モデル表面温度の方が約 0.7℃低くなった。
- (2) 2 Node モデルを用いて算出した SET*はクールペイブメントの方が日中平均で 0.3～1.3℃程度高くなった。
- (3) 衣服の日射反射率が高いほど、SET*および人体表面温度は低くなり、一般舗装道路上とクールペイブメント上の差が小さくなる。
- (4) CFD 解析結果では、舗装面をクールペイブメントにすることで、舗装面の表面温度が下がり、反射日射の影響により近隣建物の壁面の表面温度はやや高くなった。
- (5) 人体表面温度は衣服が白の場合、衣服の日射反射率が高いため道路面からの反射日射の影響が小さく、クールペイブメントにした場合の人体表面温度の上昇も小さい。今回の CFD 解析では衣服が黒の場合では反射日射の影響が大きくなりクールペイブメント上の人体表面温度は一般舗装より 1～2.5℃程度高くなった。

以上の結果から、人体の温熱感に対して、高反射率塗料を道路舗

装面に塗布したクールペイブメント上の方が不快に感じる場合が多いと考えられる。しかし、道路の高反射率化による影響よりも衣服の日射反射率による影響の方が大きい。また、車道のみを高反射率化することにより、舗装面から歩行者への反射日射の影響を大きくせずに、舗装面から都市大気への顕熱放散量の低減を図ることができると考えられる。

謝 辞

研究を進めるにあたり、日本ペイント・金森博氏、関電工・阿部有希子氏(研究当時・マイクロベース)、軽部亮氏(研究当時・武蔵工業大学生)、中島由佳里氏(同左)、永江崇彦氏(同左)をはじめとする多くの方々に協力を賜った。ここに記して、謝意を表します。

本論文に関する既発表論文

- ① 永江崇彦・近藤靖史・小笠原岳・金森博・阿部有希子・有働邦広：クールペイブメント上における人体温熱感 その 1 実測および人体生理モデルによる検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)D-1、pp.619-620、2007.8
- ② 有働邦広・小笠原岳・近藤靖史：クールペイブメント上における人体温熱感 その 2 CFD 解析による人体表面温度の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)D-1 pp.621-622、2007.8

参考文献

- 1) 近藤・小笠原・金森：実測と熱収支解析による道路舗装面からの顕熱放散量の検討 道路舗装面の高反射率化によるヒートアイランド緩和(その 1)、日本建築学会環境系論文集、第 628 号、pp.791-797、2008.6
- 2) 森川・村上・大黒他：住宅団地を対象とした各種屋外温熱環境改善対策の効果に関する CFD 解析(その 2)舗装面の高反射塗装および壁面緑化の効果、日本建築学会学術講演梗概集(東海) D-2 環境工学 II、pp.623-624、2003.9
- 3) 若間・西岡・鍋島：高反射性舗装の形成する街路空間の熱環境(その 1) 表面温度・放射の実測と作用温度の計算、日本建築学会学術講演梗概集(東海) D-2 環境工学 II、pp.689-690、2003.9
- 4) 赤川・竹林・森山：熱環境改善舗装上の温熱環境に関する研究 湿潤舗装、遮熱舗装、アスファルト、天然芝の比較、日本建築学会学術講演梗概集(九州) D-2 環境工学 II、pp.627-628、2007.8
- 5) 徳本・国岡・篠原：人体の日射受熱量に関する研究(その 2)日本各地における人体の顕熱放散量の推定結果について、日本建築学会学術講演梗概集(九州) D-2 環境工学 II、pp.389-390、1998.9
- 6) 鄭・堀越・梅村ら：都市の街路および開放空間における熱放射環境、日本建築学会計画系論文集、第 493 号、pp.77-84、1997.3
- 7) 日本機械学会：伝熱工学資料改訂第 4 版 1986
- 8) 真嶋・梅宮・吉田・リジャル：都市内街区における路地の熱的快適性評価—京都西陣地区における調査—、日本建築学会環境系論文集、第 622 号、pp.41-48、2007.12
- 9) 中村：建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について、日本建築学会計画系論文集、第 376 号、pp.29-35、1987.6
- 10) 山崎・鈴木・河内・楠本・西澤：足の事典、朝倉書店、1999.12
- 11) 大森・梁・加藤・村上：大規模複雑形状に対応する対流・放射連成シミュレーション用放射伝熱解析法の開発 第 3 報サーマルマネキンによる実験値と計算値の比較、空気調和・衛生工学会論文集、No.95、pp.45-52、2004.10
- 12) 小野・村上・大岡ら：屋外空間における人体表面の平均対流熱伝達率の予測式の開発(その 2)CFD 解析に基づく人体表面の平均対流熱伝達率の予測式の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)D-2 環境工学 II、pp.653-654、2005.9
- 13) 工藤・森川・市原：放射・対流連成による温熱環境解析に関する研究 その 1 サーマルマネキンへの適用、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1297-1300、1996.9

図 11 人体周辺空気温度 単位：[℃]

注

- 注1) 長短波放射計の測定値より算出した。
- 注2) 2 Node モデルによる SET*の算出には早稲田大学建築学科田辺新一教授の研究室提供のソフトを使用させて頂いた。
- 注3) 壁面の表面温度は放射熱画像で計測した。また、形態係数は、GL+1.1m 上に微小立方体を想定し、この微小立方体の各面と道路、周囲建物面、天空との幾何学的関係を測量や写真などから求め、算出した。
- 注4) 式(3)中の f_{road} は 0.43 とした。この値は、注 3 に示す方法で求めた微小立方体と道路面との形態係数に、式(2)中の K_i の重み付けをした上で f_{road} を算出した。なお、式(3)では、道路以外の面、例えば建物面からの日射反射を無視している。また、式(3)中の f_p は次式から求めた。 $f_p=0.42\cos h + 0.043\sin h$ 、ここで h は太陽高度。また、 F_{eff} は 0.725 と仮定した。また、夏期は半袖シャツを着用しており、腕、手、頭は皮膚が露出している状態を想定した。したがって、人体表面の約 19% が皮膚が露出し、その他の面は衣服として、それぞれの日射反射率を面積で重み付け平均した値を夏期の人体の日射反射率(α_{cl})とした。冬期は長袖着用とし、手と頭の皮膚が露出しているものとした。
- 注5) Case S の場合について、クールベイブメント上と一般舗装道路上の MRT の差に対する式(3)の各項の影響を考える。式(3)の右辺大括弧内第 1 項の長波長放射の影響による MRT の差は 2.1℃であり、一般舗装道路上が高い。一方、式(3)の右辺大括弧内第 2 項の道路からの反射日射の影響による MRT の差は 6.2℃であり、一般舗装道路上が低い。
- 注6) 人体の表面温度は温熱感に対応することが知られており、本研究ではこれに着目した。また、実測と同様に人体表面での汗の蒸発潜熱を考慮していないため、人体表面温度は実際より高く算定される。
- 注7) 今回の計算条件では、人体モデルの表面温度に対する人体発熱の影響は日射熱の影響に比べて非常に小さいので人体発熱は考慮していない。また、文献 13)を参考にして人体モデル内部の熱伝導率は 0.6W/(m・K)とし、人体モデル表面での放射率 ε は 0.9 としている。
- 注8) 全天日射・地面裏面の内部温度(GL-200mm)については 12 時～14 時の平均値を用いた。
- 注9) 人体の足裏にはゴム底(厚さ 10mm)を想定しており、舗装面からの熱伝導は抑えられている。

記号表

A_i : 表面要素 i の面積[m ²]	B_{ij} : Gebhart の吸収係数[-]
C_μ : モデル定数[-](=0.09)	
E_{Di} : 表面要素 i への直達日射エネルギー[W]	
E_{Si} : 表面要素 i への天空日射エネルギー[W]	
f_{ni} : 微小立方体の各面と地表面な どの間の形態係数[-]	F_{eff} : 有効放射面積率[-]
$f_{sky,ni}$: 微小立方体の各面と天空間の 形態係数[-]	
f_p : 人体に入射する直達日射の割合[-]	
f_{road} : 微小立方体と道路面間の形態 係数[-]	h : 太陽高度[°]
J_{DH} : 水平面直達日射量[W/m ²]	J_{SH} : 水平面天空日射量[W/m ²]
J_{DN} : 法線面直達日射量[W/m ²]	k_{in} : 乱流エネルギー[m ² /s ²]
K_i : 人体に対する重み付け[-]	L_a : 大気放射量[W/m ²]
L : 長さ[m]	MRT_L : 地表面・天空面からの長波長放 射による平均放射温度[K]
l : 靴底の厚さ[m](=0.01)	Q_{dry} : 顕熱損失量[W/m ²]
OT : 作用温度[K]	
Q_{foot} : 足裏の土踏みが受ける伝導熱量[W/m ²]	
PRT_i : 微小立方体各面の放射温度[K]	
q_{Aij} : 表面要素 i で反射した日射量の内、表面要素 j に到達し吸収される日射量 [W]	
q_{Di} : 表面要素 i が吸収する日射量[W]	
$q_{R,S,i}$: 表面要素 i の短波受熱量[W]	
r_a : 着衣外表面から環境までの顕熱抵抗[m ² ・K/W]	
r_{cl} : 皮膚表面から着衣外表面までの顕熱抵抗[m ² ・K/W]	
T : 絶対温度[K]	T_{in} : 流入空気温度[℃]
TI : 乱れ強さ[-](=0.1)	T_{sky} : 仮想天空温度[℃]
$T_{s,ni}$: 地表面温度および周辺建物の壁面温度[K]	
t_s : 地表面温度[K]	t_{sk} : 皮膚表面温度[K]
U_A : 高度 Z_A における風速[m/s]	Z : 高さ[m]
Z_A : 基準高さ[m]	α_c : 対流熱伝達率[W/m ² ・K]
α_{cl} : 人体表面の日射反射率[-]	α_i : 表面要素 i の日射吸収率[-]
ε : 放射率[-]	
ε_i : 表面要素 i の放射率[-](天空面:1.0 その他の面:0.9)	
ε_{in} : 乱流消失率[m ² /s ³]	ε_s : 地面の放射率[-](=0.9)
λ : 靴底(硬質天然ゴム)の熱伝導率[W/m・K](=0.16)	
ρ_r : 地表面の反射率[-]	
σ : ステファン・ボルツマン定数[W/m ² ・K ⁴](=5.67×10 ⁻⁸)	
θ : 表面要素 i における外向き法線ベクトルに対する太陽光の入射角[rad]	

(2008年7月8日原稿受理, 2008年11月27日採用決定)