

市が尾駅前における遮熱性舗装の熱環境調査結果

小田切幸次、関浩二、松島由佳（横浜市環境科学研究所）、内藤純一郎（横浜市環境創造局）

Thermal environment survey result of heat shield pavement in front of Ichigao Station

Koji Otagiri, Koji Seki, Yuka Matsushima (Yokohama Environmental Science Research Institute)
Junichiro Naito (Yokohama Environmental Planning Bureau)

キーワード：ヒートアイランド、遮熱性舗装、微気象観測、サーモグラフィ

要旨

横浜市ではヒートアイランド対策のひとつとして、舗装路面の温度上昇を抑制する「すず風舗装」事業を平成15年度から実施している。本調査では、車道に敷設された遮熱性舗装による「暑さ」の低減効果について考察するため、平成28年夏季に横浜市青葉区内にある遮熱性舗装上と近隣の通常舗装上で熱環境調査を実施した。その結果、日中は通常舗装と比較して遮熱性舗装の表面温度がおよそ10℃低いなど、日中の歩行者の暑熱環境を緩和する効果が生じていることを確認した。一方、遮熱性舗装は日射の反射率が高いため、上向きの日射量は通常舗装と比較して遮熱性舗装の方が高かった。より効果的に「暑さ」が緩和された空間を生み出すためには、遮熱性舗装を敷設する際に車道と歩道の間に植栽を設置するなど、歩行者や外壁への放射熱の影響を軽減させることが必要となる。

1. はじめに

横浜市などの大都市では地球温暖化の影響に加えヒートアイランドの影響により、暑熱環境の悪化による人への影響が顕在化してきている。横浜市道路局では、平成15年度からヒートアイランド対策のひとつとして「すず風舗装」事業を実施しており、平成28年度までに76件、165,000 m²を整備した。すず風舗装の概略図を図1に示す。すず風舗装には保水性舗装と遮熱性舗装があるが、どちらも舗装路面の温度上昇を抑制する効果を持ち、周囲への排熱を抑え、ヒートアイランドの影響を緩和すると言われている¹⁾。このため東京2020オリンピック・パラリンピックなどでも観客を熱中症から守るために保水性舗装や遮熱性舗装を導入する動きなどがある²⁾。

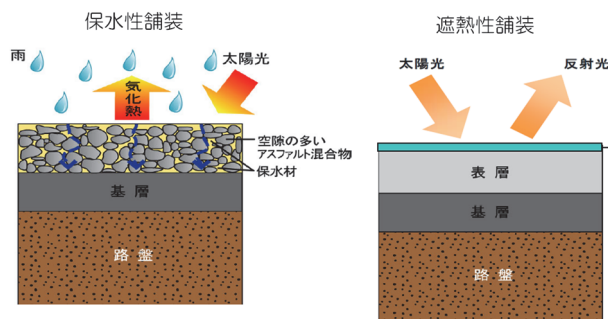


図1 すず風舗装の概略図¹⁾

保水性舗装や遮熱性舗装の既往研究においては、車道では経年劣化に伴う路面温度の低減効果の低下が見られたものの、歩道では低減効果の持続が確認されたとの報告がある³⁾。また、横浜市環境科学研究所では平成27年

に新横浜公園の園路（歩道）に敷設された遮熱性舗装について、暑熱環境の緩和効果を検証し、日射の高反射化による路面温度の低減効果を確認している⁴⁾。本稿では、遮熱性舗装が敷設された車道における「暑さ」の低減効果を明らかにするとともに、これらの地表面の改良技術を用いた、市街地における効果的な熱環境改善方法について考察した。

2. 調査方法

2-1 調査地点及び調査期間

車道に敷設された遮熱性舗装による「暑さ」の低減効果を明らかにするため、市が尾駅前の遮熱性舗装上（平成27年度に敷設）と青葉土木事務所敷地内の通常舗装上で、平成28年8月4日の10:00から20:00まで熱環境調査を実施した。調査地点の位置を図2に示す。なお、調査日は日中わずかに雲がかかったものの、終日概ね晴れの天気となっていた。



図2 調査地点の位置図
(国土地理院航空写真を引用⁵⁾)

2-2 測定項目及び測定方法

気温・相対湿度・風向風速（市が尾駅前のみ）・黒球温度・赤外放射量（上向き）・日射量（上向き、下向き）の7項目を、1分間隔で測定した。また、赤外線サーモグラフィを用いて赤外面像の測定も実施した。気温及び相対湿度の測定では、測定器のセンサーを自作のシェルターに格納し、気象庁での温度計設置の基準⁶⁾に準拠して、地面の高さから約1.5 mの位置で測定を行った。黒球温度の測定では、センサー部を直径約15 cmの黒球（株）安藤計器製工所製CK-150）に格納し、地面の高さから約1.5 mの位置で測定を行った。本調査に使用した測定器の形式及び仕様を表1、測定器の外観及び観測状況を図3～5に示す。

表1 調査に使用した測定器の型式・仕様

測定項目	気温 (乾球温度)	黒球温度	相対湿度
メーカー	(株) ティアンドデイ		
型式	TR-52i		TR-72wf
測定範囲	0～55℃	-60～155℃	10～95% RH
測定精度	±0.5℃	±0.3℃ (-20～ 80℃ において)	±5% RH (25℃、 50% RH において)
測定分解能	0.1℃	0.1℃	1% RH

測定項目	赤外放射量	日射量	地表面温度
メーカー	Hukseflux Thermal Sensors B. V.		日本アビオ ニクス(株)
型式	LP02	IR02	R500S
測定範囲	0～2000W/m ²	-1000～1000 W/m ²	-40～120℃
測定精度	±5%(通常)	±10% (1日の合 計)	±1℃
測定分解能	—	—	0.03℃ (30℃時)

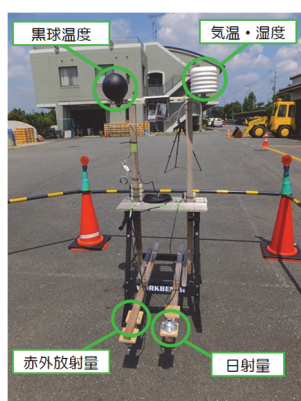


図3 測定器の外観
(青葉土木事務所の測定器を撮影)



図4 測定器での観測状況
(市が尾駅前の遮熱性舗装)



図5 測定器での観測状況
(青葉土木事務所内の通常舗装)

2-3 暑さ指数の算出

暑さ指数(WBGT)は、熱中症を予防することを目的として、1957年にYaglouとMinard⁷⁾によって提案された指標である。この指標は人体と外気との熱のやりとり(熱収支)に着目した指標で、人体の熱収支に与える影響の大きい湿度、日射・放射などの周辺の熱環境、気温の3つを取り入れたものである。

暑さ指数(WBGT)は労働環境や運動環境の指針として有効であると考えられている。例として、日本生気象学会が2013年に公表した「日常生活における熱中症予防指針(Ver.3)」⁸⁾を表2に示す。この他に、運動に関する指針として、(公財)日本体育協会が「熱中症予防運動指針」⁹⁾を公表している。また、労働環境における暑さ指数(WBGT)について、国際的にはISO 7243¹⁰⁾、国内ではJIS Z 8504¹¹⁾として規格化されている。

屋外での暑さ指数(WBGT) [℃]は、湿球温度を t_w [℃]、黒球温度を t_g [℃]、乾球温度を t_d [℃]とすると、式(1)で与えられる。

$$WBGT = 0.7 t_w + 0.2 t_g + 0.1 t_d \quad (1)$$

本調査では、乾球温度 t_d 及び黒球温度 t_g については実測値、湿球温度 t_w については乾球温度及び相対湿度から算出した計算値を用いて、暑さ指数を算出した。

ここで、本調査における湿球温度 t_w の算出方法について述べる。乾球温度 t_d における水の飽和蒸気圧を E [hPa]、相対湿度をRH [%]とすると、蒸気圧 e [hPa]は式(2)で与えられる。

表2 日常生活における熱中症予防指針 (Ver. 3)

温度基準 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31℃以上)	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
嚴重警戒 (28℃以上 31℃未満)		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25℃以上 28℃未満)	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に充分に休息を取り入れる。
注意 (25℃未満)	強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

$$e = E \times \frac{RH}{100} \quad (2)$$

一方、湿球温度 t_w における水の飽和蒸気圧を E' [hPa]、気圧を P [hPa] とすると、蒸気圧 e は Sprung の式¹²⁾ を用いて、式(3)で与えられる。なお、本調査では、気圧 P のデータとして、気象庁が提供する横浜地方気象台の気象データ¹³⁾ を使用した。

$$e = E' - 0.000662 \times P(t_d - t_w) \quad (3)$$

また、本調査では水の飽和蒸気圧の近似式として、Tetens のパラメータ値¹⁴⁾ による August-Roche-Magnus の式^{15)、16)} を使用した。この近似式による飽和蒸気圧の相対誤差が 0~50℃ の範囲では 1 %未満¹⁷⁾ であることから、本調査においては無視できる程度の誤差と考えられる。この近似式では、乾球温度 t_d と湿球温度 t_w における水の飽和蒸気圧 E 及び E' は、それぞれ、式(4)、式(5)で表される。

$$E = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 t_d}{t_d + 237.3}} \quad (4)$$

$$E' = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 t_w}{t_w + 237.3}} \quad (5)$$

本調査では、式(2)~(5)から湿球温度 t_w の計算値を算出した上で、式(1)から暑さ指数 (WBGT) を算出した。

3. 結果と考察

3-1 日射量

遮熱性舗装と通常舗装における、下向きの日射量の時間変化を図6、上向きの日射量の時間変化を図7、下向きの日射量に対する上向きの日射量の割合(日射の反射率)を図8に示す。

下向きの日射量は通常舗装、遮熱性舗装ともに違いは見られなかった。遮熱性舗装で16:30以降に急激に日射量が低下しているのは、ビルの影に入ったためである。

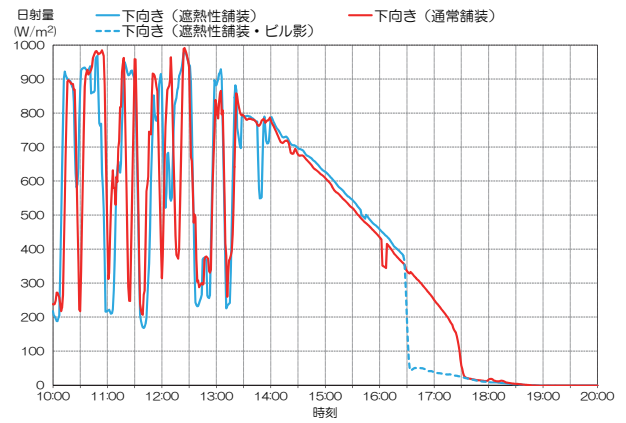


図6 下向きの日射量の時間変化

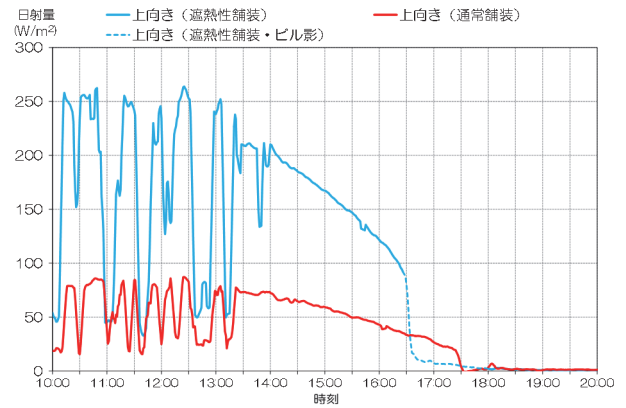


図7 上向きの日射量の時間変化

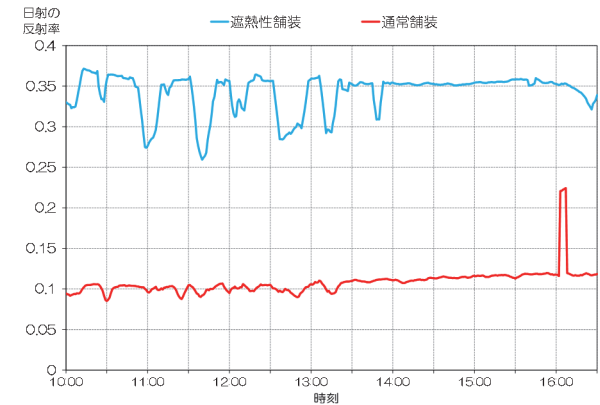


図8 日射の反射率の時間変化

このため、遮熱性舗装での16:30から18:00までの下向きの日射量は参考値とする。

一方、上向きの日射量は通常舗装と比較して、遮熱性舗装において高い値を示した。これは遮熱性舗装では日射をより多く反射したためであると考えられる。なお、ビルの影に入ったため、16:30から18:00までの遮熱性舗装での上向きの日射量は参考値とする。

また日射の反射率は値が高いほど、天空方向から地面に向かう日射を地面で反射し、天空方向に返す割合が高いことを示すものであるが、図8より、通常舗装と比較して遮熱性舗装の方が日中は日射の反射率が高かった。

3-2 赤外放射量

遮熱性舗装と通常舗装における、上向きの赤外放射量の時間変化を図9に示す。

赤外放射量は物体の温度に依存するため、日射量の時間変化と比較すると、赤外放射量は時間変化のばらつきが小さい。また上向きの赤外放射量は調査期間を通して遮熱性舗装の方が通常舗装より低く、平均して 30 W/m^2 の差が見られた。これは遮熱性舗装では日射を多く反射することで、地面に蓄積される熱が抑制されていたためであると考えられる。

16:30 から 18:00 の間、遮熱性舗装と通常舗装は並行して赤外放射量が低下しているが、前章で触れたとおり、遮熱性舗装では同時間帯にビルの影に入っているため、この時間の遮熱性舗装での赤外放射量は参考値とする。

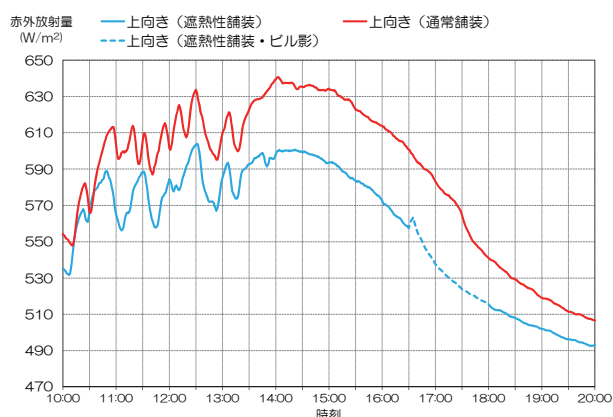


図9 上向きの赤外放射量の時間変化

3-3 赤外画像による表面温度

遮熱性舗装と通常舗装における、赤外画像の表面温度を測定した結果について、日中の画像を図10に、測定期間内における表面温度の時間変化を図11に示す。

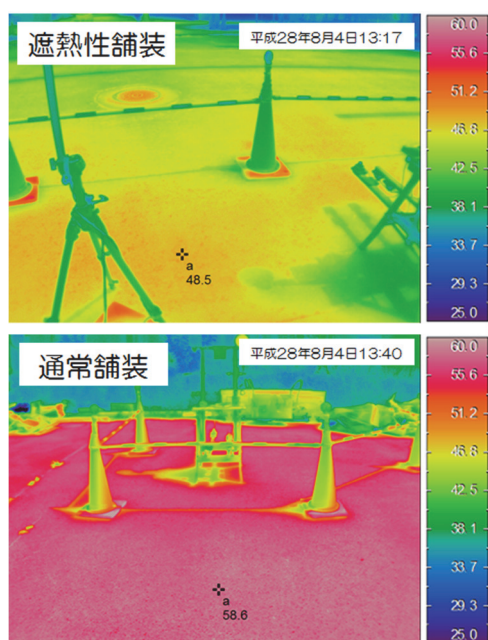


図10 赤外画像による日中の表面温度

日中、通常舗装と比較して遮熱性舗装の表面温度はおよそ $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 低かった。

遮熱性舗装において 16:30 から 18:00 の間にビルの影に入っていたため、参考値とはなるが、日没後も通常舗装より遮熱性舗装の方が表面温度は低いことを確認した。

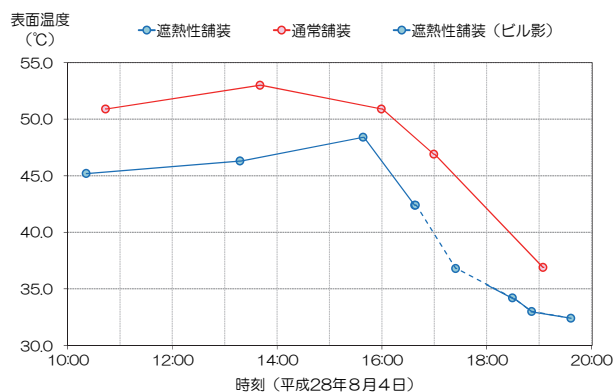


図11 赤外画像による表面温度の時間変化

3-4 気温及び暑さ指数

遮熱性舗装と通常舗装における、気温の時間変化を図12に、暑さ指数の時間変化を図13に示す。

気温は遮熱性舗装及び通常舗装ともに、観測開始の 10:00 から日没前の 17:30 前後まで $30 \text{ }^\circ\text{C}$ を超えていた。観測期間内の平均気温は遮熱性舗装では $32.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、通常舗装では $33.0 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、気温差は $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ と顕著な気温差は見られなかった（遮熱性舗装においてビルの影に入った 16:30 から 18:00 の間を除く）。

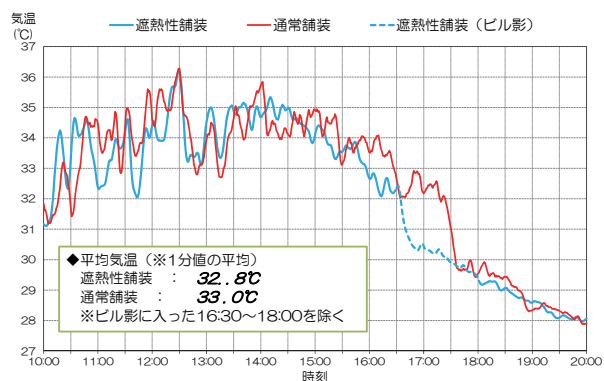


図12 気温の時間変化

暑さ指数は遮熱性舗装及び通常舗装ともに、観測開始直後から、熱中症予防指針で“外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する”とされる嚴重警戒 ($28 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上 $31 \text{ }^\circ\text{C}$ 未満) に該当する値を観測した。また 12:00~14:00 においては、熱中症予防指針で“外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する”とされる危険 ($31 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上) に該当する値を観測した時間もあった。

観測期間内の暑さ指数の平均値について、日中（観測開始 10:00~日没時刻 18:42¹⁸⁾のうち、ビルの影に入った 16:30~18:00 を除く）は、遮熱性舗装では $29.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、通常舗装では $29.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、夜間（日没時間 18:42~観測終了

20:00)は遮熱性舗装では25.8℃、通常舗装では25.9℃であった。日中及び夜間ともに暑さ指数の平均値の差は0.1~0.2℃であり、顕著な差は見られなかった。

既往研究において、遮熱性舗装と通常舗装で鉛直方向に気温を観測したところ、地面に近い高さほど、両者の気温差が大きかったとの報告がある¹⁹⁾。地面から近い高さでは、地面からの放射熱を受けて、地面に近い大気は暖められるが、本調査で測定した高さ1.5mの場合、放射熱が拡散するため、遮熱性舗装と通常舗装とでは、気温や暑さ指数に明瞭な差が見られなかったと考えられる。

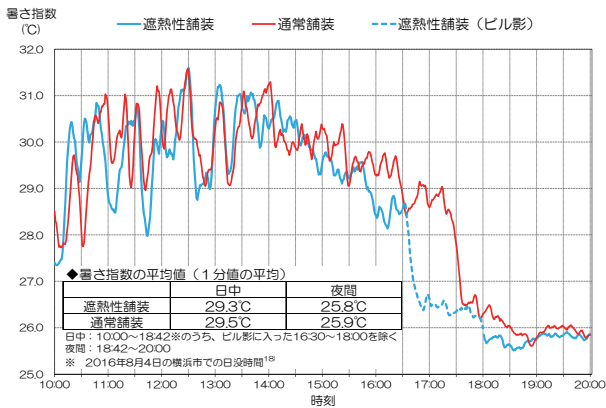


図13 暑さ指数の時間変化

3-5 人が受ける熱放射量の時間変化

人が受ける熱放射量は、①太陽光からの下向き日射量、②雲、大気中の水蒸気や塵からの下向き赤外放射量、③地面で反射する上向き日射量、④地表面からの上向き赤外放射量の4つに大別される。

本調査では、遮熱性舗装において16:30から18:00の間にビルの影に入った時間を除くと、下向き日射量と下向き赤外放射量は遮熱性舗装及び通常舗装ともにほぼ同じと見なすことができる。このことから、両地点において人が受ける熱放射量は、上向き日射量と上向き赤外放射量の和で評価できる²⁰⁾。また日没後は下向き日射量と上向き日射量は無くなることから、夜間に人が受ける熱放射量は上向き赤外放射量のみとなる。

そこで、遮熱性舗装と通常舗装における上向き日射量と上向き赤外放射量の和の時間変化を図14に示す。

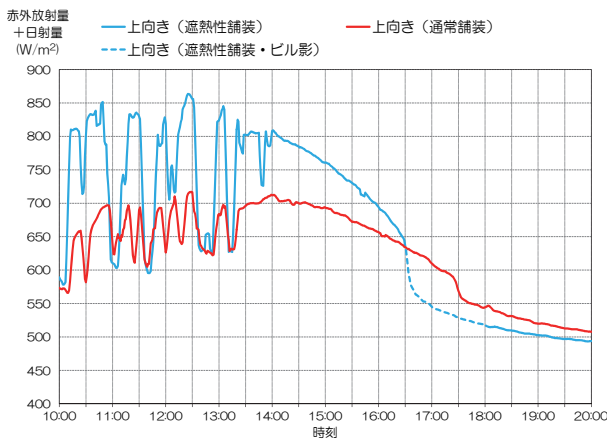


図14 上向き日射量と上向き赤外放射量の和の時間変化

16:30から18:00までの間を除いた日中の上向き日射量と上向き赤外放射量の和は、通常舗装と比較して、遮熱性舗装の方が高く、平均で約78 W/m²の差が見られた。これは、遮熱性舗装では蓄える熱が少なくなることによる上向き赤外放射量の低下より、日射の反射率が高いことによる上向き日射量の増加の方が大きいためであると考えられる。このことから日中の遮熱性舗装では、歩行者が受ける熱放射量(上向き日射量と上向き赤外放射量の和)が強まり、大人と比べて地面により近い子どもなどの暑熱環境を悪化させる可能性がある。一方、夜間(18:42から20:00まで)においては、上向き日射量と上向き赤外放射量の和は通常舗装と比較して、遮熱性舗装の方が低く、平均で約21 W/m²の差が見られた。本調査より、夜間の遮熱性舗装は歩行者が感じる熱放射量(上向き日射量と上向き赤外放射量の和)を平均で約4%低減させ、暑熱環境を緩和する効果が見られた。

3-6 効果的な遮熱性舗装の活用方法について

遮熱性舗装上で人が感じる暑さを整理した概念図を日中(図15)と夜間(図16)別に示す。遮熱性舗装により、日中は日射の一部が吸収されずに反射される。これにより本来、路面に吸収されるはずの熱が減るため、路面温度の上昇が抑制され、人が受ける赤外放射量は減る。しかし、路面で反射される日射量が増加するため、人が受ける全体の熱放射量は増加し、歩行者が受ける熱環境を悪化させる可能性がある。

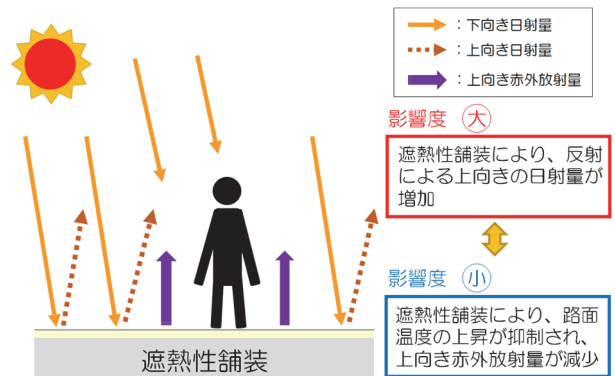


図15 日中に遮熱性舗装上で人が感じる暑さ

※まちなかの暑さ対策ガイドライン(環境省)²¹⁾を一部改変

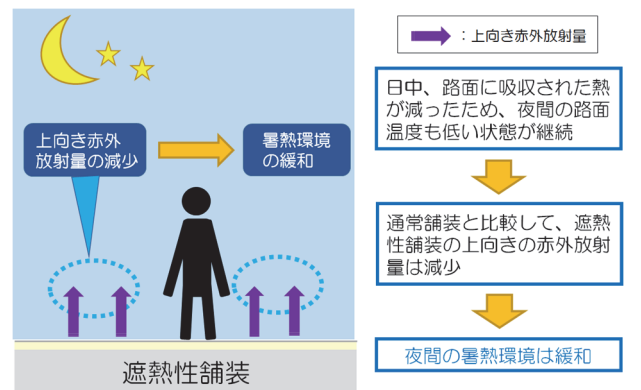


図16 夜間に遮熱性舗装上で人が感じる暑さ

※まちなかの暑さ対策ガイドライン(環境省)²¹⁾を一部改変

このことから、遮熱性舗装での日射を反射する特性を活かすため、日当たりの良い場所に敷設することも不可欠であるが、遮熱性舗装で反射した日射の周囲への影響を考慮すると、植栽の設置等によって歩行者や外壁等への放射熱の影響を軽減させることも重要である²¹⁾。

このような工夫を行うことで、より効果的に「暑さ」が緩和された空間を生み出すことが可能になると考えられる(図17)。

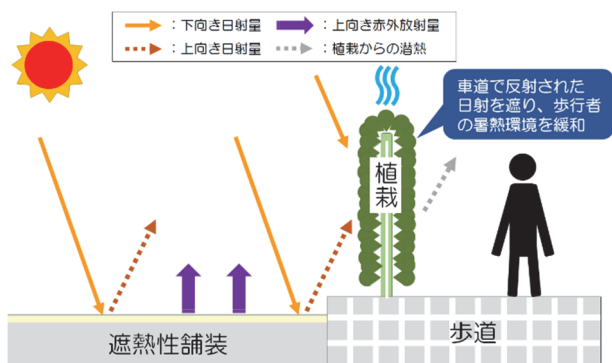


図17 遮熱性舗装による暑熱環境緩和の概念図
※まちなかの暑さ対策ガイドライン(環境省)²¹⁾を一部改変

4. おわりに

遮熱性舗装が敷設された車道上における「暑さ」の低減効果を明らかにするため、市が尾駅前での遮熱性舗装上と青葉土木事務所敷地内の通常舗装上で、平成28年8月4日の10:00から20:00まで熱環境調査を実施した。

調査の結果、上向き赤外放射量や表面温度については、遮熱性舗装と通常舗装との間に明瞭な差が見られ、遮熱性舗装によって、暑熱環境を緩和する効果が生じていることを確認できた。

一方、気温や暑さ指数については、遮熱性舗装と通常舗装とでは、明瞭な差は認められなかった。また遮熱性舗装における日射の反射率が高いため、上向き日射量と上向き赤外放射量の和については、通常舗装と比較して、日中は遮熱性舗装の方が高かった。このことから日中の遮熱性舗装では、歩行者が受ける熱放射量が強まり、暑熱環境を悪化させる可能性がある。

このため、遮熱性舗装を敷設する際には、日当たりの良い場所に敷設するほか、植栽の設置等によって歩行者や外壁等への放射熱の影響を軽減させることが、より効果的に暑熱環境を緩和するために必要となる。

謝辞

本調査の実施に当たり、横浜市青葉土木事務所に気象観測の調査場所の提供など、多大なご協力をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

文献

- 1) 横浜市道路局：すず風舗装整備事業パンフレット、4pp. (2008)
- 2) 東京都建設局：「路面温度上昇抑制機能を有する舗装の整備」について、東京2020に向けた東京都「暑さ対

- 策」推進会議、2pp. (2017)
- 3) 平田健一：環境舗装に関する追跡調査、平成25年度スキルアップセミナー関東要旨集、4pp. (2017)
- 4) 内藤純一郎、小倉智代、関浩二、松島由佳：新横浜公園における熱環境調査－遮熱性舗装や日射遮蔽による暑熱低減効果－、横浜市環境科学研究所年報、16、33-37 (2017)
- 5) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス、<http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1> (2017年10月時点)
- 6) 気象庁：気象観測の手引き、81pp. (1998)
- 7) C. P. Yaglou and D. Minard：Control of heat casualties at military training centers, *A. M. A. Arch. Ind. Health*, 16, 302-316 (1957)
- 8) 日本生気象学会：日常生活における熱中症予防指針 Ver.3 確定版、<http://seikishou.jp/pdf/news/shishin.pdf> (2017年9月時点)
- 9) 公益財団法人日本体育協会：スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック(平成25年度改定版)、52pp. (2013)
- 10) International Organization for Standardization：ISO 7243:1989 Hot environments—Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature) (1989)
- 11) 日本工業規格：JIS Z 8504:1999 人間工学—WBGT(湿球黒球温度)指数に基づく作業者の熱ストレスの評価—暑熱環境(1999)
- 12) 日本工業規格：JIS Z 8806:2001 湿度—測定方法(2001)
- 13) 気象庁：過去の気象データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2017年10月時点)
- 14) O. Tetens:Über einige meteorologische Begriffe, *Z. Geophys.*, 6, 297-309 (1930)
- 15) O. A. Alduchov and R. E. Eskridge：Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure, *J. Appl. Meteor.*, 35, 601-609 (1996)
- 16) M. G. Lawrence：The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 225-233 (2005)
- 17) 菅原広史、近藤純正：飽和水蒸気圧の計算誤差、水文・水資源学会誌、7(1)、440-443 (1994)
- 18) 国立天文台：歴計算室、<http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/> (2018年3月時点)
- 19) 小作好明、山本憲之：遮熱性舗装における顕熱と気温の観測、平成24年度東京都土木技術支援・人材育成センター年報、57-64 (2012)
- 20) 赤川宏幸、竹林英樹、森山正和：湿潤舗装と遮熱舗装上の温熱環境改善効果に関する実験的研究、日本建築学会環境系論文集、73(623)、85-91 (2008)
- 21) 環境省：まちなかの暑さ対策ガイドライン、57pp. (2016)