

都市の熱環境を緩和する舗装技術 ～遮熱性舗装の反射特性と周辺環境への効果～

渡邊一弘・若林由弥

1. はじめに

近年、東京をはじめとする大都市への人口集中はますます顕著になっており、ヒートアイランド現象による人の健康や生活への影響が問題視されている。ヒートアイランド現象の主な要因の1つとして、舗装により地表面が覆われることによる蒸発散作用の減少や地表面の高温化が挙げられ、道路分野についても対策が求められている。

こうした中、環境省の「ヒートアイランド対策要綱」¹⁾では、路面温度を低下させる可能性のある舗装について取り上げている。更に、国土交通省に設置された「アスリート・観客にやさしい道の検討会」(以下「アスリート検討会」という。)がとりまとめた「アスリート・観客にやさしい道づくりに向けた提言」²⁾においても、2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会におけるアスリート・観客の暑さ対策の1つとして、路面温度上昇抑制機能を有する舗装の活用が示されている。特に遮熱性舗装(写真-1)については、散水作業や降雨によらずとも安定した効果が持続的に発現することから積極的な採用をすることが言及されている。

遮熱性舗装は、舗装表面に到達する日射エネルギーのうち、対象物を直接温める性質を有する近

赤外線を高効率で反射することで、路面温度の上昇を抑制する舗装である。この舗装は舗装内への熱の蓄積を抑制するため、日中の路面温度低減効果だけでなく、夜間の熱放射による熱帯夜の軽減にも効果があると考えられている。

前述のアスリート検討会をはじめ、遮熱性舗装の路面温度については多数の検討結果があり、通常のアスファルト舗装に比べ路面温度が低くなることが確認されている。これらの結果を踏まえ、現在、国道や都道等の一部で遮熱性舗装の整備が進められているところである。しかし一方で、路面への光を反射するというメカニズムから、いわゆる「照り返し」による熱エネルギーや紫外線の反射について人体への影響に関する指摘³⁾もある。

本報文では、遮熱性舗装についてその反射特性や気温等の周辺環境、人体への影響に関する検討結果について、種々の文献等で得られている知見を最新の測定データ等も交えて体系的に整理し、とりまとめ紹介する。

2. 遮熱性舗装の反射特性

2.1 入射光の各波長領域における反射特性

本節では、遮熱性舗装が有する、入射光の各波長領域における反射特性について整理する。入射光である太陽光線は、波長によって対象物に与える影響が異なる。赤外線は物体にぶつかった時そのエネルギーの一部が吸収され物体の温度上昇を起こす。これに対し紫外線は、その波長によってUV-A、UV-B、UV-Cの3種類に分類され、地表に到達しないUV-Cを除く紫外線のうち、特にUV-Bは皮膚や眼にとって有害となることが明らかになっている⁴⁾。また、赤外線と紫外線の間の波長領域の可視光線は人の眼にまぶしさを感じさせる原因となる。

図-1および図-2に、路面温度上昇抑制舗装研究会(以下「クール舗装研究会」という。)が公表している、日射反射率について分光光度計により測定した結果⁵⁾を示す。まず、赤外線(図-1)について、遮熱性舗装が通常のアスファルト舗装よ



写真-1 遮熱性舗装
(左：遮熱性舗装、右：通常のアスファルト舗装)

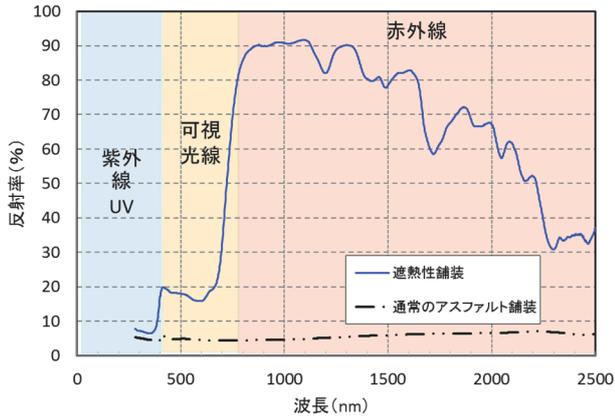


図-1 全波長領域の日射反射率⁵⁾

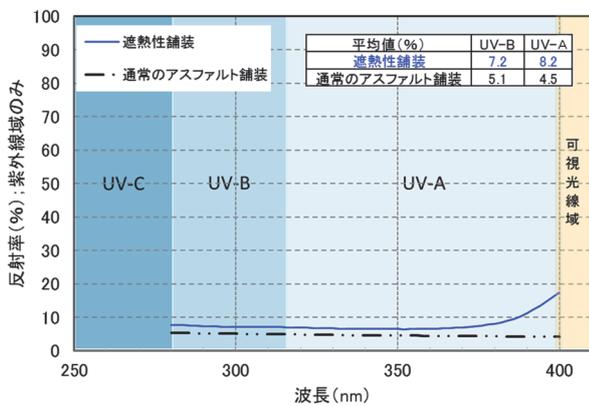


図-2 紫外線領域の日射反射率⁵⁾

り高い反射率を有していることが分かる。一方、紫外線（図-2）については、遮熱性舗装の反射率はUV-Bで平均7.2%となっており、平均5.1%である通常のアスファルト舗装と比較するとやや高いものの、100%である入射光との比を考慮すれば大きな差はないと考えられる。また、可視光線についても、紫外線ほどではないものの、赤外線に比べ反射率を大きく抑えている。

以上の結果より、遮熱性舗装は、赤外線を効率良く反射し舗装の温度上昇を抑制する効果を有していること、人体に有害であるUV-Bについて通常のアスファルト舗装と同程度まで反射を抑えていること、まぶしさを感じる可視光線についても反射を一定程度まで低減する工夫がなされていること、など優れた技術であることが分かる。

2.2 反射方向に関する反射特性

遮熱性舗装は、2006年頃に開発・試作された後、メーカー等で改良が加えられ、現在の仕様となっている。開発当初の一部の遮熱性舗装（以下「2006年遮熱」という。）は、白色系塗料により入射光をそのまま反射するものであり、舗装上の

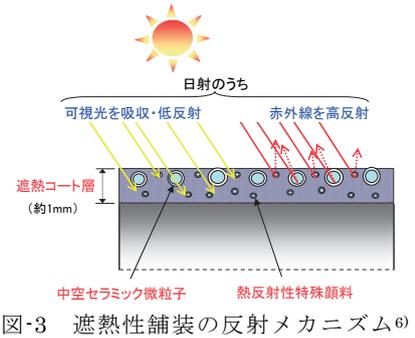


図-3 遮熱性舗装の反射メカニズム⁶⁾

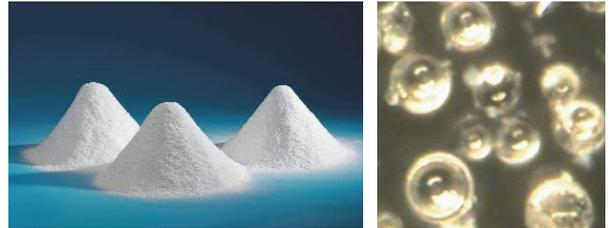


写真-2 中空セラミック粒子
(左：等倍撮影、右：光学顕微鏡撮影)

人体は直接的に照り返しによる影響を受ける。近藤ら⁷⁾は、通常のアスファルト舗装上と2006年遮熱上のそれぞれにおいて、内部に発熱体を組み込んだ亜鉛鉄板製の人体モデルを設置し、表面温度を比較する実験を行っている。その結果、通常のアスファルト舗装上よりも2006年舗装上の方が人体モデルの表面温度が上昇したという実験結果が報告されている。

これに対し、現在の遮熱性舗装は、図-3のように中空セラミック粒子（写真-2）等を加えることで、入射した方向に光を反射させる「再帰性反射」を考慮したものとなっている。

こうした遮熱性舗装の反射特性については、筒井ら⁸⁾が変角分光測定器を用いて、相対反射光強度を比較する実験を行っている。図-4に実験の概要を示す。なお、ここでいう相対反射光強度は、反射材を硫酸バリウム白色板とし入射角度を60°とした時の受光角度120°における受光強度を100%基準と設定した際の各角度における受光強度の相対値を表している。図-5～図-8に、近赤外線領域（波長900nm）および可視光領域（波長580nm）における、入射角度60°および30°の入射光に対する反射光の相対反射強度測定結果を示す。いずれの波長においても、2006年遮熱は正反射領域（入射角度60°の場合は110～130°、入射角度30°の場合は140～160°）で卓越しているが、現在の遮熱性舗装ではそれらが消失、さらに入射側の方向である10～90°の相対

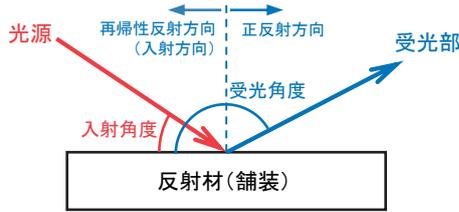


図-4 筒井ら⁸⁾による実験概要

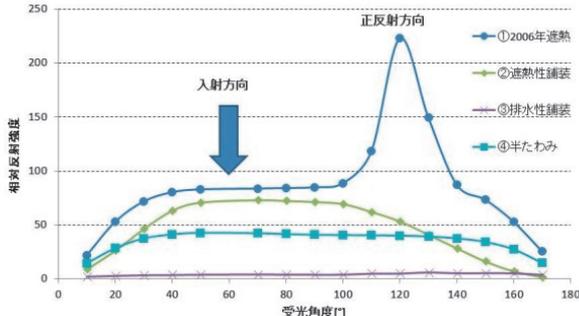


図-5 相対反射強度測定結果⁸⁾
(入射角度60°、波長900nm)

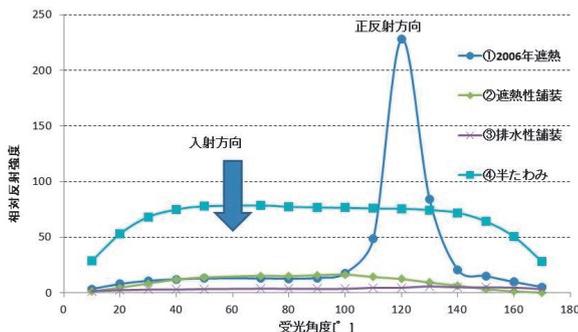


図-6 相対反射強度測定結果⁸⁾
(入射角度60°、波長580nm)

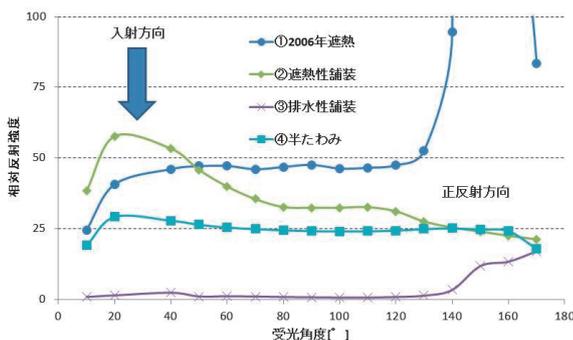


図-7 相対反射強度測定結果⁸⁾
(入射角度30°、波長900nm)

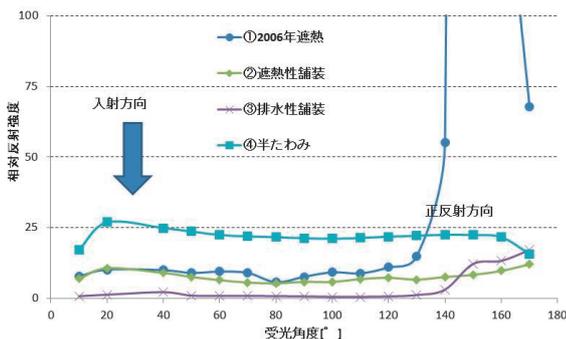


図-8 相対反射強度測定結果⁸⁾
(入射角度30°、波長580nm)

反射強度よりも低減されていることが分かる。

以上の結果から、現行の遮熱性舗装は再帰性反射を考慮した反射特性を有しており、照り返しによる影響は2006年遮熱に比べ大幅に低減されていることがいえる。

3. 遮熱性舗装の周辺環境や人体への影響

3.1 気温および暑さ指数に関する検討

遮熱性舗装と通常のアスファルト舗装について路面温度を比較した例は多くあるものの、舗装上の気温や、熱中症対策の指標として採用されている暑さ指数 (Wet Bulb Globe Temperature、以下「WBGT」という。) について比較した例は少ない。

アスリート検討会は、2015年の7月から9月の期間中に国道246号の遮熱性舗装および通常のアスファルト舗装上のWBGTを測定している⁹⁾。表-1に測定結果を示す。表中の密粒舗装および排水性舗装は通常の色黒のアスファルト舗装を指す。この結果より、アスリート検討会では遮熱性舗装と通常のアスファルト舗装で、舗装上のWBGTについて有意な差はないと結論づけている。一方で、遮熱性舗装の方が通常のアスファルト舗装よりも明らかにWBGTや気温が高くなると指摘した研究成果も存在する³⁾。

これに対し、クール舗装研究会では2019年9月に10箇所の遮熱性舗装およびその近辺の通常のアスファルト舗装上におけるWBGTおよび気温を測定し、その結果について公表している⁵⁾。表-2に測定結果を示す。この結果より、クール舗装研究会では、遮熱性舗装上の気温およびWBGTは、通常のアスファルト舗装上のものと有意な差がないとしている。

気温やWBGTの測定値は、風向や風速、付近の建物や林・草むら等の有無など測定環境に左右

表-1 2015年7月～9月のWBGT比較結果
(国土交通省公表資料⁹⁾を元に作成)

測定位置	平均WBGT (°C)			
	密粒舗装	排水性舗装	遮熱性舗装	
全期間 (N=10,800)	高さ50cm	24.6	24.4	24.4
	高さ150cm	24.5	24.5	24.6
気温30°C以上 (N=2,555)	高さ50cm	28.3	28.5	28.3
	高さ150cm	28.0	28.3	28.2
気温35°C以上 (N=387)	高さ50cm	30.2	30.7	30.3
	高さ150cm	29.8	30.4	30.0

されるものであり、全くの同環境において遮熱性舗装上と通常のアスファルト舗装上の温度環境について比較することは困難である。そのため有意差を確認するためには、多数の箇所にて測定したデータを比較することが有効である。従って、遮熱性舗装上と通常のアスファルト上における気温およびWBGTについては、クール舗装研究会が示したとおり、有意な差はないと考えられる。

3.2 人体表面温度に関する検討

前項で述べた手法とは別に、舗装上の人体への熱環境の影響を確認する手法として、実際の人間が舗装上に立った時の人体表面温度を測定し、比較する手法がある。

村上ら⁶⁾は、2017年および2018年の夏季の日中において、通常のアスファルト舗装と遮熱性舗装にそれぞれ20分直立で滞在した後の人体表面温度について、赤外線カメラを用いて測定し比較している。写真-3に赤外線カメラによる人体表面温度測定の例を示す。なお、2017年は被験者3人に対し約1時間の休憩をはさみ同一箇所にて測定を実施し、2018年は15名の被験者を6箇所に分け、別の日の同一時間帯に測定を実施している。図-7に測定結果を示す。図中の低騒音舗装は通常の色黒のアスファルト舗装を指す。

また、2019年にはクール舗装研究会においても、22箇所において延べ138人の被験者を対象に、2017年と同様の方法で30分直立後の人体表面温度を測定し、比較した結果を公表している⁵⁾。図-8に測定結果を示す。

これらの結果から、遮熱性舗装上における人体表面温度は通常のアスファルト舗装上と同程度あるいは低くなっていることが分かる。特に太もも以下の表面温度については、いずれの測定結果でも遮熱性舗装の方が小さくなっていることから、



写真-3 赤外線カメラによる人体表面温度測定例⁶⁾

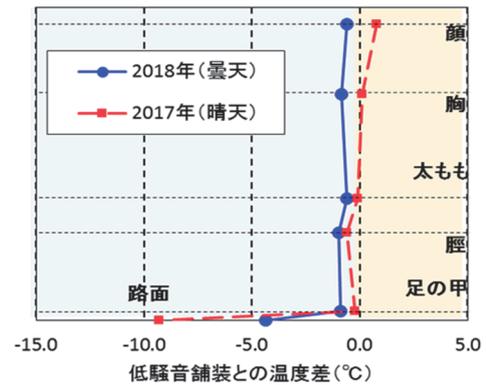


図-7 人体表面温度比較結果（2017年、2018年）⁶⁾

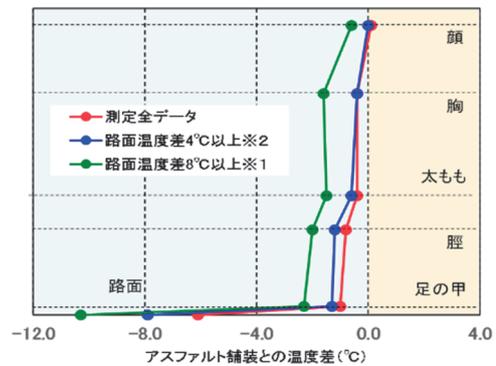


図-8 人体表面温度比較結果（2019年）⁵⁾
 (※1：8箇所、※2：19箇所)

表-2 2019年9月のWBGT・気温比較結果
 (公表資料⁵⁾を元に作成)

	測定位置	データ数	平均WBGT (°C)		平均気温 (°C)	
			通常の舗装	遮熱性舗装	通常の舗装	遮熱性舗装
全期間	高さ50cm	429	23.9	23.9	27.8	27.8
	高さ150cm	698	25.8	26.1	30.1	30.0
気温30°C以上	高さ50cm	219	29.4	29.3	34.0	34.0
	高さ150cm	451	29.2	29.5	34.1	33.9
気温35°C以上	高さ50cm	77	30.7	30.6	36.8	36.6
	高さ150cm	167	30.5	30.4	36.6	36.1

路面温度の上昇が抑制された結果、足下から人体表面温度の上昇についても抑制されたと考えられる。また、2019年の測定結果では、路面温度の差が大きいほど人体表面温度の差も大きくなっており、路面温度の上昇抑制が人体表面の温度上昇抑制に寄与しているという先述の考察と整合的なものとなっている。

なお、いずれの測定においても、同一人物が通常のアスファルト舗装と遮熱性舗装の上に立った際の人体表面温度の比較を行っているため、測定時刻にずれが生じるなど、完全な同一条件下での測定とはなっていない。しかし、測定は日中の安

定した日照時間帯で実施されており、遮熱性舗装と通常のアスファルト舗装の測定順序は被験者によって様々であると考えられるため、多数のデータを取得することで測定環境による誤差は小さくなっていると考えられる。

3.3 遮熱性舗装上における測定値に関する検討

3.1で遮熱性舗装と通常のアスファルト舗装で舗装上のWBGTは大きな差がない一方で、3.2では遮熱性舗装上において特に太もも以下の人体表面温度が低くなる結果となっている。こうした結果の違いは、舗装上においてWBGTの値と人体が受ける影響が異なることを示唆している。

田中ら¹⁰⁾は、写真-4に示す長短波長放射計を用いて遮熱性舗装と通常のアスファルト舗装上における上下方向の長波長および短波長の放射量を測定している。ここで短波長放射は太陽放射エネルギー、長波長放射は大気や地表面等の放出する放射エネルギーを指す。すなわち、下向き短波長放射は全天日射、上向き短波長放射は舗装路面が反射した全天日射、下向き長波長放射は大気放射、上向き長波長放射は舗装の自己放射と舗装路面が反射した大気放射の合計となる。田中らの測定によると、遮熱性舗装は通常のアスファルト舗装に比べ、反射する全天日射（上向き短波長放射）は大きい一方、舗装の自己放射と舗装路面が反射した大気放射の合計（上向き長波長放射）は小さくなるという結果が得られており、前節までの考察と整合的なものとなっている。

また、合わせて田中らは、既往の知見より、長波長放射率（大気等が放出する放射エネルギーを吸収する率）はWBGTの測定に用いられるグローブ温度計と人体で同等であることに対し、短波長放射率（直達や反射した太陽放射エネルギー

を吸収する率）はグローブ温度計と人体で大きく異なっていることを指摘している。これより田中らは、短波長放射をより多く反射する遮熱性舗装上において、グローブ温度計は人体が受ける放射量に対して過大な測定結果を示してしまう可能性があることを示唆している。さらに、人体が吸収する放射量を評価する際は人体の形状について考慮する必要があることについても言及している。

上記を踏まえ、田中らは実測した路面温度や気象データ等を入力値として、舗装上における人体が吸収する放射量に関する数値的検討を行っている。図-9～図-11に数値計算結果を示す。図-9および図-11は、図-9に示す放射量のうち、長波長

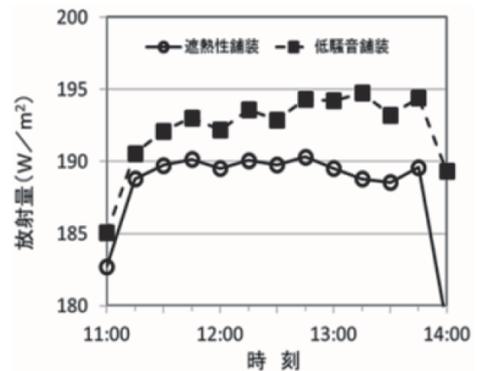


図-9 人体が吸収する舗装からの放射量¹⁰⁾

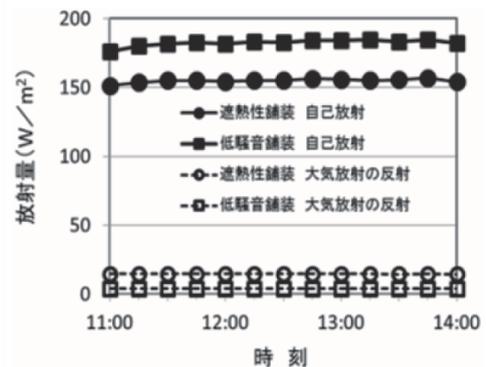


図-10 人体が吸収する舗装からの長波長放射量¹⁰⁾

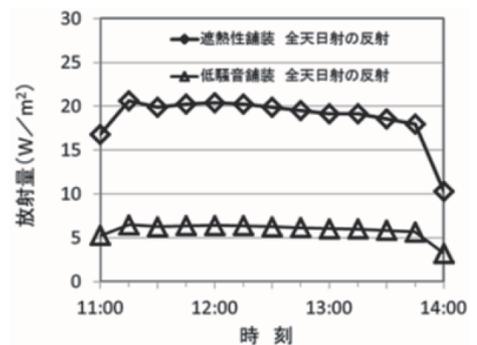


図-11 人体が吸収する舗装からの短波長放射量¹⁰⁾



写真-4 長短波長放射計¹⁰⁾

放射量と短波長放射量をそれぞれ示したものである。図中の低騒音舗装は通常の色黒色のアスファルト舗装を指す。数値計算の結果、遮熱性舗装は路面温度低下による舗装の自己放射が少なくなったことにより、人体が吸収する舗装からの放射量について、通常のアスファルト舗装に比べて若干ではあるが、小さい結果（時間帯によって差があるが最大3%程度）が示されている。

以上の結果より、田中らは黒球形状であるグローブ温度計は短波長放射の反射の影響を過大に反映してしまうことなどから、遮熱性舗装の人体に対する放射量の評価には適していない可能性があることを示している。

このように、遮熱性舗装上の熱環境を評価する際には、遮熱性舗装が有する固有の反射特性を考慮する必要があり、通常の方法では不十分な可能性があることにも留意が必要である。

4. まとめ

本報文では、遮熱性舗装の反射特性や周辺環境および人体への影響に関する検討結果をとりまとめ紹介した。内容をまとめると以下のとおりである。

- (1) 遮熱性舗装は赤外線を効率よく反射し、舗装への熱の吸収を抑制する一方、人体に害のある紫外線の反射については通常のアスファルト舗装と大きく変わらない。
- (2) 近年の遮熱性舗装は、入射側に光を反射する「再帰性反射」を考慮した反射特性を有しており、照り返しによる影響は開発当初より大幅に低減されている。
- (3) 通常のアスファルト舗装上と遮熱性舗装上で気温およびWBGTを多数測定し比較したところ、有意な差は見られない。
- (4) 一方、通常のアスファルト舗装上と遮熱性舗装上で人体表面温度を比較した結果では、特に太もも以下の部位で遮熱性舗装上の方が通常のアスファルト舗装より低くなっている。
- (5) 実際に測定した放射量および路面温度から、人体が受ける放射量を数値計算により算出した結果、遮熱性舗装上で受ける放射量は通常のアスファルト舗装上より若干小さくなっている。

- (6) 遮熱性舗装上の熱環境を評価する際には、遮熱性舗装が有する固有の反射特性を考慮する必要があり、グローブ温度計を使用して測定されるWBGTなど通常の評価方法では不十分な可能性があるため留意が必要である。

今後も遮熱性舗装に関する研究等について引き続き注視するとともに、ヒートアイランド現象への有効な一手として遮熱性舗装が適切に整備されるよう、適宜情報発信を行っていききたい。

参考文献

- 1) 環境省：ヒートアイランド対策大綱、2013
- 2) アスリート・観客にやさしい道の検討会：アスリート・観客にやさしい道づくりに向けた提言、2016
- 3) 例えば、樫村修生、斉藤雄司、星秋夫：日射のある遮熱環境において遮熱性舗装路面上の空間は熱中症リスクを高める、日生気誌、Vol.56、No.3、2019
- 4) 環境省：紫外線環境保健マニュアル2015、2015
- 5) 路面温度上昇抑制舗装研究会：遮熱性舗装上の温度等Q&A、
http://www.coolhosouken.com/data_s/data_2019_11_01.pdf。(2019年12月確認)
- 6) 村上浩、島崎康弘、岩間将彦：遮熱性舗装上における人体への影響に関する各種検証結果、舗装、Vol.53、No.6、pp.3～6、2018
- 7) 近藤靖史、小笠原岳、有働邦広：高反射化した道路舗装面上における人体温熱感の検討、日本建築学会環境系論文集、Vol.74、No.637、pp.323～330、2009
- 8) 筒井宏明、岡田紘明、内川圭太：遮熱性舗装の反射特性、舗装、Vol.53、No.6、pp.20～24、2018
- 9) 国土交通省：東京オリンピック マラソンコースへの遮熱性舗装の導入の経緯、
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/utilization/pdf/04-1.pdf>。(2019年10月確認)
- 10) 田中孝典、村上浩：人体が遮熱性舗装から受ける熱量（放射量）に関する一検討、舗装、Vol.55、No.11、pp.14～19、2019

渡邊一弘



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路基盤研究室長
WATANABE Kazuhiro

若林由弥



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路基盤研究室 研究官
WAKABAYASHI Yuya