

暑熱環境に関する調査結果（2015～2017年度）

Survey Results of Hot Environment on Different Ground Surfaces (2015-2017)

油座 郁美 Ikumi YUZA
高垣 勇介 Yusuke TAKAGAKI
原 美由紀 Miyuki HARA

米屋 由理 Yuri YONEYA
中島 美穂 Miho NAKAJIMA

要旨

アスファルトと芝生それぞれの地表面被覆上における暑熱環境について測定調査を実施した。アスファルトは芝生よりも日射反射率が低く、蓄熱性が高いことから、赤外放射量、地表面温度、及び気温や暑さ指数（WBGT）が芝生上よりも上がりやすい傾向にあった。このことから、地表面被覆の違いが暑熱環境に影響を及ぼしていることがわかった。また、暑さ指数（WBGT）は地表面に近いほど高くなる傾向にあり、地表面被覆の状況を問わず、大人より背丈の低い子供の方がより厳しい暑熱環境下にいることが示唆された。

キーワード：地表面被覆、アスファルト、ヒートアイランド現象、熱ストレス

Key words: Ground surface, Asphalt, Heating island phenomenon, Heat stress

1 はじめに

地球温暖化やヒートアイランド現象が進行すると暑熱環境が悪化し、身体への熱ストレスが増大する。市街地における熱ストレスの要因は、気温や湿度、日射以外にも、舗装された路面や建築物等、周囲の人工物から受ける熱が挙げられる。したがって、熱ストレスを低減する適応策を考えるにあたっては、人の暑さの感じ方に関する熱放射という視点を加えて評価する必要がある¹⁾。

本調査では、都市部で多用されている地表面としてアスファルト、緑化部分の例として芝生を選定し、それぞれの地表面被覆が暑熱環境に及ぼす影響について、熱に係る環境要素を含めて測定・解析した。今回、2015～2017年度に日中の晴天下で実施した調査の結果をとりまとめた。異なる地表面被覆で比較した場合と、異なる測定高さで比較した場合について、それぞれ解析したため報告する。

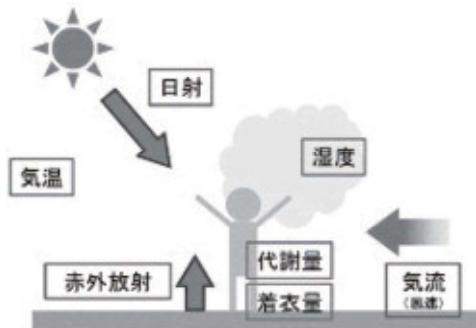


図1 体感に関わる環境要素のイメージ¹⁾

2 調査内容

2.1 調査項目

暑熱環境について調べるため、気温、湿度、黒球温度、暑さ指数（以下、WBGT）を2～4地点で調査し、比較することとした。WBGT（Wet Bulb Globe Temperature：湿球黒球温度）とは、気温、湿度に加え、熱放射等も考慮した

数値であり、環境省において熱中症予防に係る温熱指標として用いられている計算値である²⁾。この WBGT については、気温、湿度、黒球温度の測定値を用いて、以下の式³⁾に基づいて算出した。なお、自然湿球温度については、Sprung の式⁴⁾、飽和蒸気圧に関する式⁵⁾から二分法⁶⁾によって得られる計算値を用いた。

$$\text{WBGT} = 0.7 \times \text{Tw} + 0.2 \times \text{Tg} + 0.1 \times \text{T}$$

T : 乾球温度 [°C] Tw : 自然湿球温度 [°C] Tg : 黒球温度 [°C]

また、熱放射環境の状況について併せて調べるため、地表面温度、日射量、赤外放射量を同時に測定した。赤外放射とは、あらゆる物体が放射している赤外領域の電磁波のことであり、そのエネルギー量は物体の温度に依存する。本調査では、「地表面からの赤外放射」を調査対象として測定することとした。

調査項目及び調査方法の詳細は表1、用いた測定機器の詳細は表2及び図2、3のとおりである。

表1 調査項目及び調査方法

調査項目	調査方法	備考
気温・湿度	機器で直接測定	
黒球温度	機器で直接測定	
暑さ指数（WBGT）	計算式に基づき測定値を用いて算出	2～4条件で比較調査
全天日射量	機器で直接測定	
反射日射量	機器で直接測定	
赤外放射量	機器で直接測定	
地表面温度	機器で直接測定	調査地点全体を面的に調査

表2 測定項目及び測定機器

測定項目	測定機器名称	型番	測定間隔
気温／湿度	放射シールド付温湿度センサー	TR-3310 (株)T&D	
黒球温度	黒球温度計	PGT-02 (株)ブリード	5分
全天／反射日射量	日射計	MS-601 英弘精機㈱ 又は PCM-01N (株)ブリード	
赤外放射量	赤外放射計	PRI-01 (株)ブリード	
地表面温度	赤外線サーモグラフィー	G100EX 日本アビオニクス㈱	15分



図2 温湿度センサーと黒球温度計



図3 日射計と赤外放射計



図4 測定地点の様子 (2017年7月11日)

2.2 調査場所及び条件

川崎生命科学・環境研究センター (LiSE) 敷地内のアスファルト部分と芝生地において、夏期（7～9月）の好天時に測定を行った。測定した高さは、気象庁が気温等の観測基準としている⁴⁾ 1.5m と、より地表面に近く地面からの影響を受けやすい子供の背丈を想定した高さ 0.6m の2通りとした。日中（概ね8時～16時）の日向で行った調査の状況は表3及び図4のとおりである。

表3 調査状況一覧

年	月日	アスファルト		芝生	
		0.6m	1.5m	0.6m	1.5m
2015	7月24日		○*		○
	7月31日	○*		○	
	8月6日	○*	○		
	8月11日			○*	○
2016	8月25日	○			
	9月9日	○		○	
	7月11日	○	○	○	○
	7月21日	○	○	○	○
	8月9日	○	○	○	○
	8月23日	○	○	○	○
2017	8月24日	○	○	○	○
	8月25日	○	○	○	○

*2015年の日射量と赤外放射量(印)を付した1地点で状況調査のみ実施

3 調査結果

3.1 地表面被覆の違いによる影響

3.1.1 気温

図5は同じ測定高さで地表面被覆が異なる2地点の気温推移例であり、表4はその2地点の気温差平均についてまとめたものである。

0.6m と 1.5m どちらの測定高さにおいても、図5のように、アスファルト上の気温の方が芝生上より高い推移をする傾向にあった。アスファルト上と芝生上の気温差は、一日を通して平均すると、概ねどの調査日においても 0.1～0.5 ℃程度あった。この気温差について、13時以前と以降と時間帯を分けて解析してみると、13時以前よりも以降の方が気温差は大きくなっていることが示唆された。また、全ての調査日においてアスファルト上 0.6m 地点の気温が最も高くなっていること、芝生上の地点と比べると、気温の変化が大きく、より厳しい暑熱環境になりやすい環境であるということがわかった。

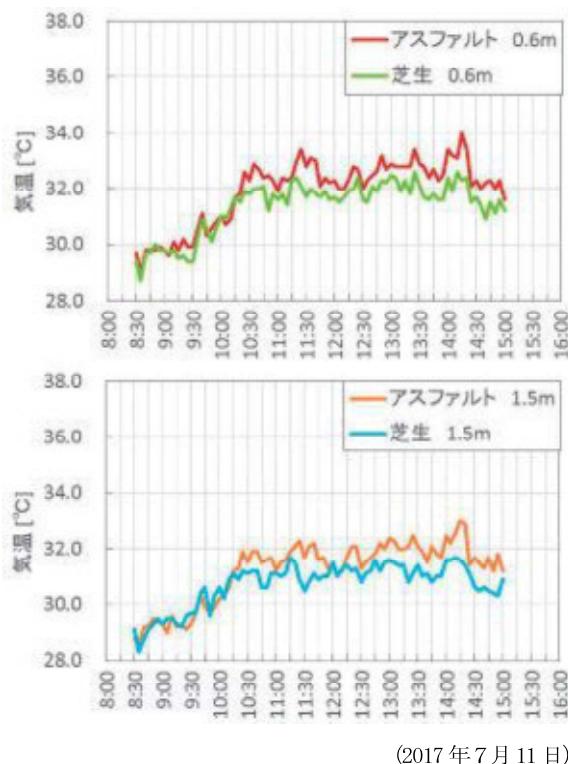


図5 同じ測定高さ毎の気温の推移例

表4 地表面被覆が異なる2地点間の気温差
((アスファルト)-(芝生)) 平均

年月日	0.6m 地点 [°C]			1.5m 地点 [°C]		
	全	13:00 以前	13:00 以降	全	13:00 以前	13:00 以降
2015/7/24	-	-	-	+0.1	+0.1	+0.2
7/31	+0.5	+0.3	+0.7	-	-	-
2016/8/25	-	-	-	+0.2	+0.1	+0.3
9/ 9	0.0	0.0	0.0	-	-	-
2017/7/11	+0.5	+0.4	+0.6	+0.4	+0.3	+0.6
7/21	+0.3	+0.2	+0.4	+0.3	+0.3	+0.4
8/ 9	0.0	0.0	+0.1	+0.2	+0.2	+0.2
8/23	+0.1	+0.1	+0.1	0.0	-0.1	+0.2
8/24	+0.1	+0.1	+0.2	+0.3	+0.3	+0.3
8/25	+0.1	0.0	+0.2	+0.3	+0.2	+0.4

3.1.2 黒球温度とWBGT

図6は同じ測定高さで地表面被覆が異なる2地点の黒球温度の推移例であり、表5はその2地点の黒球温度差平均についてまとめたものである。

どちらの測定高さにおいても、図6のように、黒球温度はほとんどの時間帯でアスファルト上の方が芝生上よりも高くなる傾向にあった。気温と同様に13時以前と以降で分けてみると、概ねどの調査日においても13時以降の方が13時以前より差は大きくなつておらず、気温で見られた傾向と一致した結果になつていた。

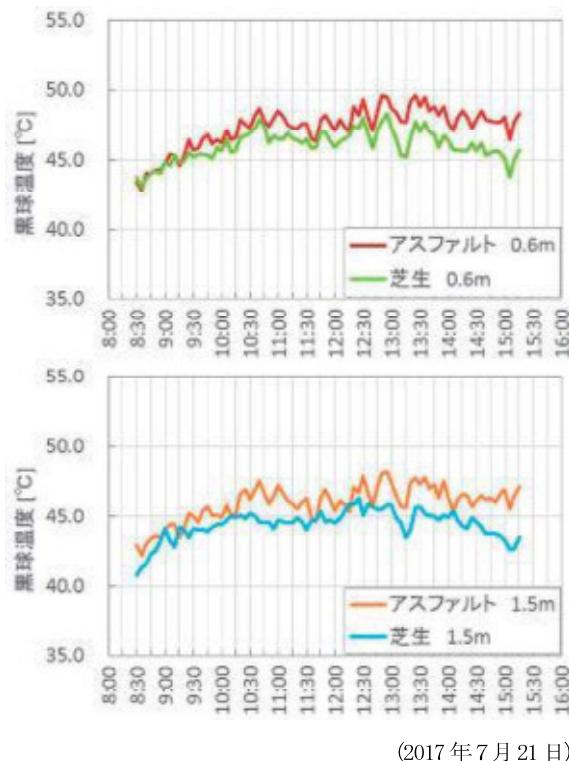


図6 黒球温度の推移例

表5 地表面被覆が異なる2地点間の黒球温度差
((アスファルト)-(芝生)) 平均

年月日	0.6m 地点 [°C]			1.5m 地点 [°C]		
	全	13:00 以前	13:00 以降	全	13:00 以前	13:00 以降
2015/7/24	-	-	-	+0.2	+0.1	+0.5
7/31	+1.9	+0.1	+4.8	-	-	-
2016/8/25	-	-	-	+0.1	-0.3	+0.8
9/ 9	-0.7	-1.0	-0.2	-	-	-
2017/7/11	+1.5	+1.1	+2.1	+1.2	+0.8	+2.0
7/21	+1.1	+0.7	+1.6	+1.3	+1.1	+1.6
8/ 9	+0.5	+0.1	+1.3	+1.0	+0.6	+1.5
8/23	+0.2	-0.1	+0.6	0.0	-0.6	+1.0
8/24	+0.6	+0.4	+0.8	+1.0	+0.7	+1.4
8/25	+0.6	+0.5	+0.8	+0.6	+0.5	+0.7

図7は同じ測定高さで地表面被覆が異なる2地点のWBGT推移例であり、表6はその2地点のWBGT差平均についてまとめたものである。これらに示したとおり、気温、湿度、及び黒球温度から算出されるWBGTに関しては、地表面被覆の違いによる差は気温と同様、概ねどの調査日においても見られた。

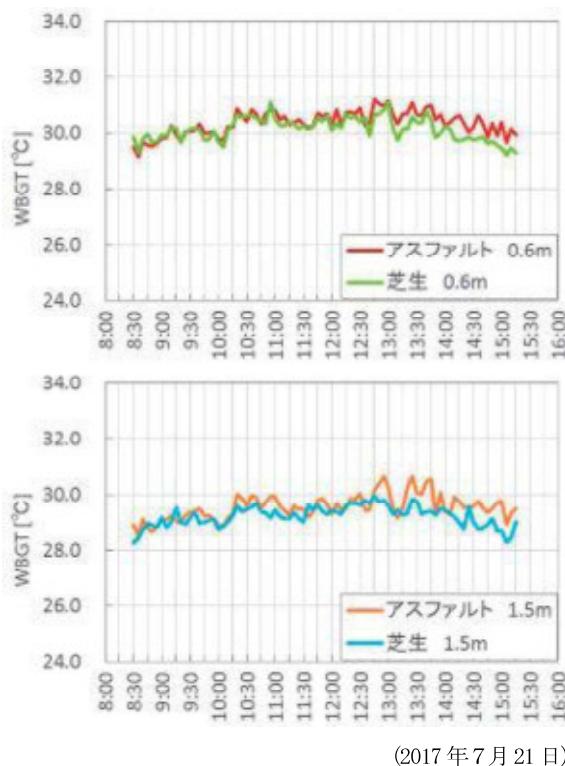


図7 同じ測定高さ毎のWBGTの推移例

表6 地表面被覆が異なる2地点間のWBGT差
(アスファルト)-(芝生) 平均

年月日	0.6m 地点 [°C]			1.5m 地点 [°C]		
	全	13:00 以前	13:00 以降	全	13:00 以前	13:00 以降
2015/7/24	-	-	-	0.0	0.0	+0.1
7/31	+0.4	0.0	+1.1	-	-	-
2016/8/25	-	-	-	0.0	-0.1	+0.2
9/ 9	-0.3	-0.3	-0.2	-	-	-
2017/7/11	+0.3	+0.2	+0.5	+0.2	+0.1	+0.4
7/21	+0.2	+0.1	+0.4	+0.3	+0.2	+0.4
8/ 9	0.0	-0.1	+0.2	+0.1	0.0	+0.3
8/23	0.0	-0.1	+0.1	-0.2	-0.3	+0.1
8/24	+0.1	0.0	+0.1	+0.1	+0.1	+0.2
8/25	+0.1	+0.1	+0.2	0.0	-0.1	+0.1

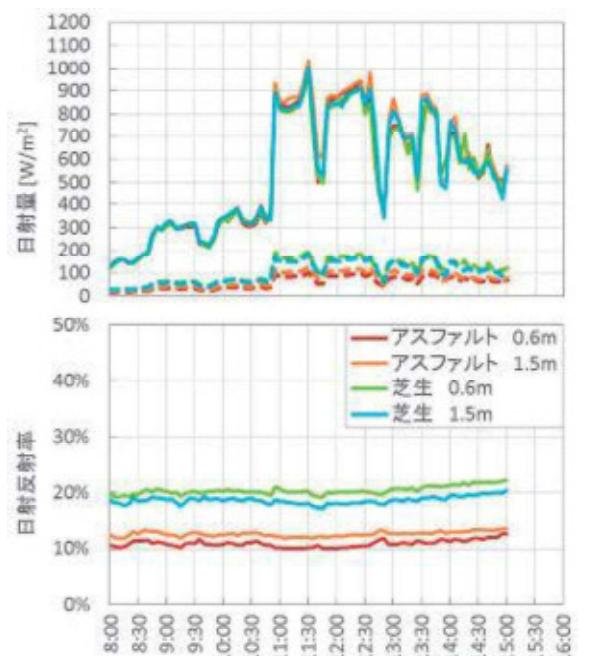
3.1.3 日射量

表7は各測定日における各地点の平均日射反射率をまとめたものであり、図8は全天日射量、反射日射量及び日射反射率の推移例である。

全天日射量(上空からの下向き日射量)に対する反射日射量(地面で反射した上向き日射量)の割合を、日射反射率として算出したところ、どちらの測定高さにおいても、芝生の日射反射率は20%程度であったのに対し、アスファルトの日射反射率はその半分の10%程度であった。この結果は、全ての調査日で概ね同様に得られた。図8に示したグラフ中の11時頃までのように、調査地点上空を雲が通過することによって、日射が遮られて日射量が減る時間帯があっても、日射反射率は一定の値を維持していた。また、全天日射量が最も多くなるのは、どの調査日においても正午前後であった。

表7 各測定日における各地点の平均日射反射率

0.6m 地点		1.5m 地点	
アスファルト	芝生	アスファルト	芝生
10~13%	18~22%	12~15%	17~20%



※上段のグラフは直線が全天日射量、破線が反射日射量を示す
(2017年8月24日)

図8 日射量及び日射反射率の推移例

したがって、天候や測定高さに関わらず、アスファルトより芝生の方が日射を反射しやすく、日射反射率は常に一定となることがわかった。

3.1.4 赤外放射量と地表面温度

図9は赤外放射量の推移例、図10は撮影した赤外線サーモグラフィー画像の例、図11は地表面温度の推移例、図12は地表面温度と赤外放射量の関係例であり、表8は同じ測定高さの2地点の赤外放射量差の平均、表9は地表面温度差の平均、また、表10は最大赤外放射量についてまとめたものである。

全ての調査日において、どちらの測定高さでも、図9のように芝生よりアスファルトの方が赤外放射量は多くなっていた。同じ測定高さで比較すると、地表面被覆の違いによる差は、午前よりも午後の方が大きくなっていた。

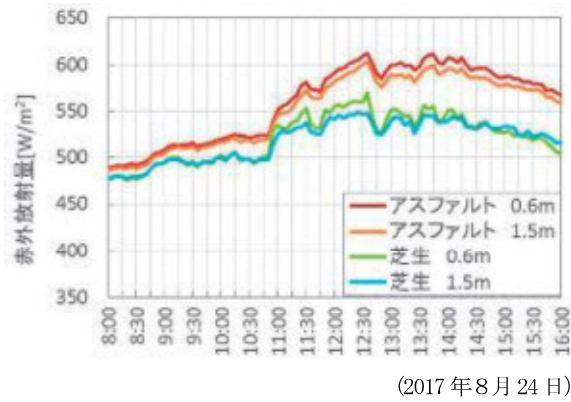


図9 赤外放射量の推移例

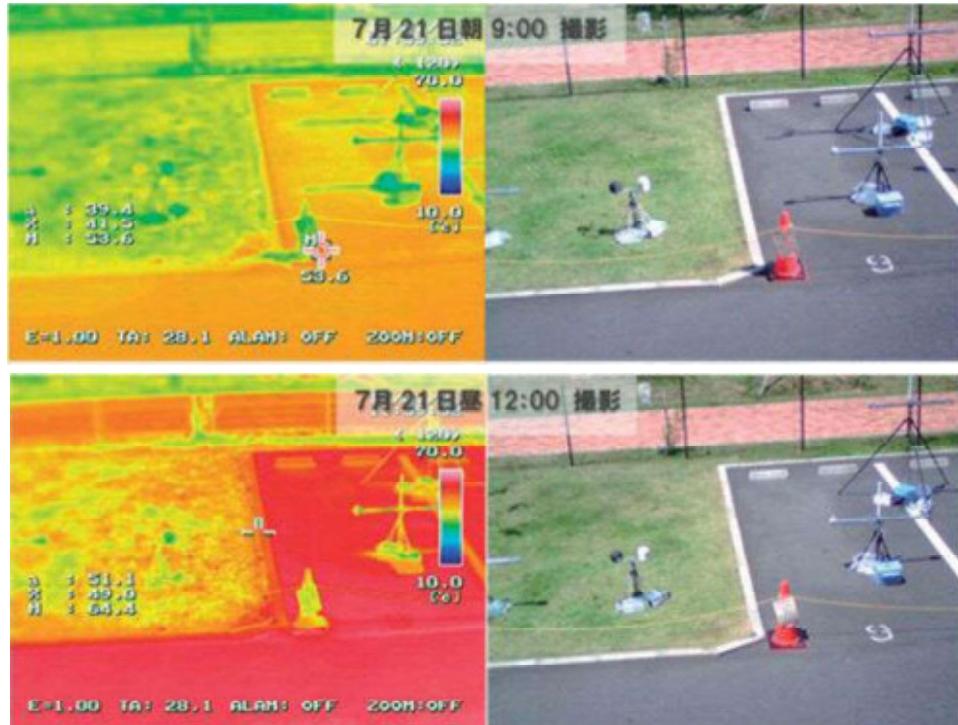


図10 撮影したサーモグラフィー画像例 (2017年7月21日)

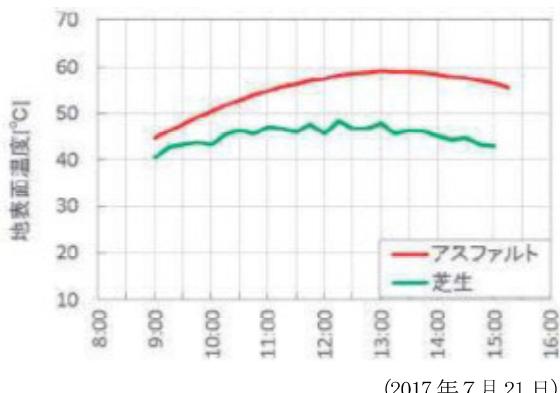


図11 各地表面被覆の温度推移例

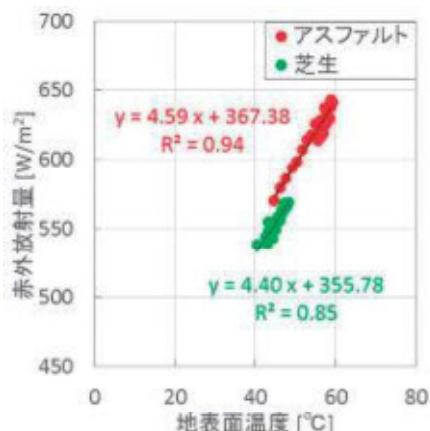


図12 地表面温度と赤外放射量の関係

表8 地表面被覆が異なる2地点間の赤外放射量差
((アスファルト)−(芝生)) 平均

年月日	0.6m 地点 [W/m ²]			1.5m 地点 [W/m ²]		
	全	13:00 以前	13:00 以降	全	13:00 以前	13:00 以降
2016/8/25	-	-	-	+41.9	+33.8	+55.4
9/ 9	+44.8	+38.9	+54.5	-	-	-
2017/7/11	+43.2	+40.4	+47.7	+37.1	+35.6	+39.6
7/21	+53.2	+49.1	+59.7	+6.6	+6.6	+6.6
8/ 9	+59.5	+48.2	+77.8	+46.4	+38.7	+58.9
8/23	+45.2	+39.9	+53.8	+37.0	+31.8	+45.3
8/24	+38.4	+26.1	+58.3	+34.0	+24.6	+49.3
8/25	+35.7	+35.5	+35.9	+33.6	+35.5	+30.6

表9 異なる地表面被覆の温度差
((アスファルト)−(芝生)) 平均 [°C]

年月日	全	13:00	13:00
		以前	以降
2016/8/25	+9.6	+7.6	+12.7
9/ 9	+9.6	+8.6	+11.1
2017/7/11	+7.8	+4.9	+12.3
7/21	+7.4	+6.4	+9.0
8/ 9	+12.9	+10.4	+16.8
8/23	+10.0	+8.7	+12.0
8/24	+8.8	+6.0	+13.1
8/25	+8.6	+8.7	+8.5

表10 0.6m 地点における最大赤外放射量 [W/m²]

年月日	アスファルト	芝生
2016/9/ 9	608	547
2017/7/11	616	555
7/21	645	569
8/ 9	638	564
8/23	612	557
8/24	612	570
8/25	590	551

また、撮影した赤外線サーモグラフィー画像から読み取ったアスファルト及び芝生の地表面温度は、図11に示したような推移をしていた。表9に示したようにどの調査日も、一日を通してアスファルトの方が地表面温度は高く、芝生との最大温度差は15~20°C程度であった。最大温度差は、概ね13時頃に観測される傾向であった。午前から午後にかけてアスファルトと芝生の差が広がる傾向は、赤外放射量の推移でも見られた傾向である。そこで、0.6m 地点で測定した赤外放射量と地表面温度の関係を調べてみたところ、図12に示したように強い正の相関が見られた。この関係性は、赤外放射量の測定高さが 0.6m と 1.5m どちらであっても、全調査日で確認することができた。

赤外放射量及び地表面温度で見られたアスファルトと芝生の差、また、午後にかけてその差が広がる推移傾向の原因として、蓄熱性の違いによるものが考えられる。表10に示したとおり、0.6m 地点で測定した赤外放射量の最大値を比較してみると、芝生は平均して 560W/m² 程度であったのに対し、アスファルトでは 620W/m² 程度と、概ね全調査日で大きな差が生じていた。前項で述べた日射反射率については、芝生の方がアスファルトよりも高くなっていた。よって、この日射反射率の高さに反比例して、アスファルトの方が芝生よりも熱を溜め込みやすい性質を持つことが推測された。

また、周囲の輻射熱の影響を受ける黒球温度についても、午前から午後にかけてアスファルトと芝生の差は広がっており、赤外放射量及び地表面温度と傾向が一致していた。

3.1.5 各測定項目の関係について

これらの結果をまとめて表11に示した。地表面被覆が違うということは、日射反射率に差があるということに等しく、故に地表面温度及び赤外放射量に差が生じ、その差から、気温、黒球温度やWBGTに影響を及ぼすという関係が推測された。芝生といった自然物ではなく、人工物であるアスファルトの地面は、日射反射率が比較的低く、熱を溜め込みやすい性質があるため、地表面温度が高くなりやすく、赤外放射量が多く、その被覆上における気温等が上がりやすい傾向にあるものと考えられる。

表11 調査結果から見られた被覆の違いによる傾向一覧

項目	アスファルト	芝生
日射反射率	低い	高い
地表面温度	高い	低い
赤外放射量	多い	少ない
黒球温度	高い	低い
気温	高い	低い
WBGT	高い	低い

3.2 測定高さの違いによる影響

3.2.1 気温

図13は同じ地表面被覆で測定高さが異なる2地点の気温推移例であり、表12はその2地点の気温差平均についてまとめたものである。

表12に示したように、同じ地表面被覆の地点で比較してみると、アスファルトと芝生どちらにおいても 1.5m より 0.6m 地点の方が気温は高くなっていた。図13のように、0.6m 地点の方が一日を通して高い推移となる傾向は、どの調査日においても見られた。0.6m という測定高さが子供の背丈を想定して設定したものであることを鑑みると、この傾向は、地表面被覆の状態に関わらず、大人よりも子供の方がより厳しい暑熱環境下にいるということを示唆している。

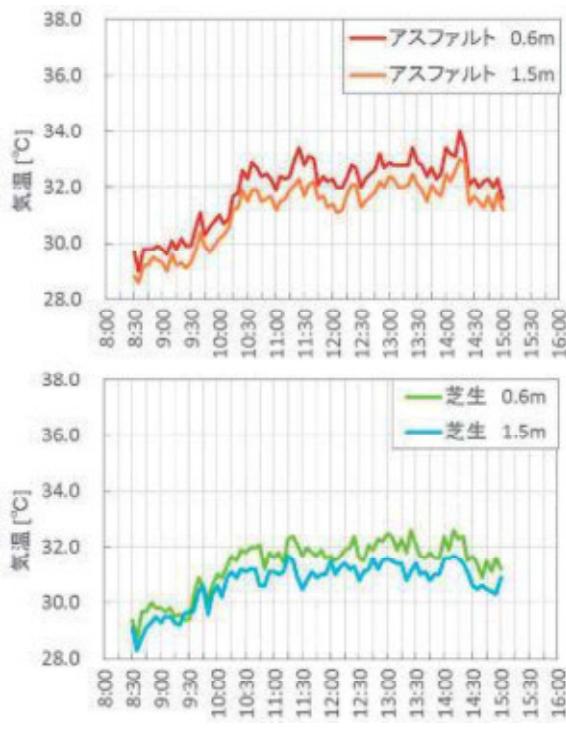


図13 同じ地表面被覆毎の気温の推移例

表12 測定高さが異なる2地点間の気温差
((0.6m 地点) - (1.5m 地点)) 平均

年月日	アスファルト [°C]			芝生 [°C]		
	全	13:00 以前	13:00 以降	全	13:00 以前	13:00 以降
2015/8/ 6	+0.5	+0.5	+0.4	-	-	-
8/11	-	-	-	+0.4	+0.3	+0.4
2017/7/11	+0.6	+0.6	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5
7/21	+0.5	+0.5	+0.4	+0.5	+0.6	+0.4
8/ 9	+0.1	+0.2	0.0	+0.3	+0.4	+0.1
8/23	+0.2	+0.4	-0.2	+0.2	+0.3	0.0
8/24	0.0	0.0	0.0	+0.2	+0.3	+0.2
8/25	0.0	+0.1	-0.1	+0.2	+0.2	+0.1

3.2.2 WBGT

図14は同じ地表面被覆で測定高さが異なる2地点のWBGT推移例であり、表12はその2地点のWBGT差平均についてまとめたものである。

表13に示したように、同じ地表面被覆毎に比較してみると、アスファルトと芝生どちらにおいても 1.5m より 0.6m 地点の方が高い WBGT になっていた。図14のように、0.6m 地点の方が一日を通して高い推移となる傾向は、どの調査日においても見られた。表6と表12を比べてみると、地表面被覆の違いによる差よりも、測定高さの違いによる差の方が大きいことがわかった。よって、気温と同様に WBGT の結果からも、大人より子供の方がより厳しい暑熱環境下にいるということが示唆された。

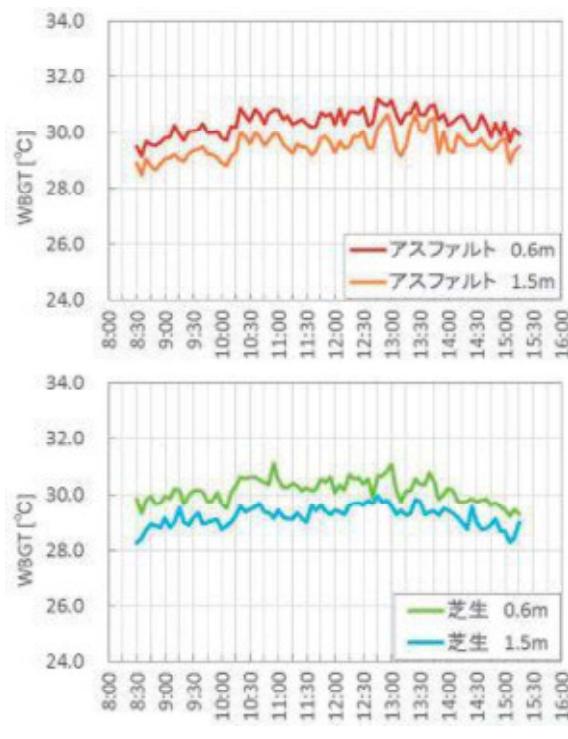


図14 同じ地表面被覆毎の WBGT の推移例

表13 測定高さが異なる2地点間の WBGT 差
((0.6m 地点) - (1.5m 地点)) 平均

年月日	アスファルト [°C]			芝生 [°C]		
	全	13:00 以前	13:00 以降	全	13:00 以前	13:00 以降
2015/8/ 6	+0.3	+0.3	+0.4	-	-	-
8/11	-	-	-	+0.3	+0.3	+0.4
2017/7/11	+0.8	+0.9	+0.7	+0.7	+0.8	+0.7
7/21	+0.7	+0.8	+0.6	+0.8	+0.9	+0.6
8/ 9	+0.6	+0.6	+0.5	+0.7	+0.7	+0.6
8/23	+0.5	+0.7	+0.1	+0.3	+0.5	+0.1
8/24	+0.5	+0.6	+0.4	+0.6	+0.6	+0.5
8/25	+0.6	+0.7	+0.4	+0.5	+0.5	+0.4

測定高さが同じで地表面被覆が異なる2地点間の差は、13時以前よりも以降の方が大きくなっていたのに対し、地表面被覆が同じで測定高さが異なる2地点間の差は、13時以前より以降の方が小さくなる傾向が見られた。このことから、アスファルトと芝生どちらにおいても、地表面に近い地点から暑熱環境は厳しくなり、午後にかけて徐々に地表面から離れた地点へと厳しさが広がっていくことが推測できる。したがって、芝生よりもアスファルト上の方が厳しい暑熱環境になりやすいが、地表面に近い地点から厳しさが広がっていくという過程は地表面被覆が異なっても同じであるということがわかった。

3.2.3 日射量と赤外放射量

気温や WBGT と異なり、日射量及び赤外放射量については、測定高さの違いによる大きな差は見られなかった。

4 まとめ

同じ測定高さで比較すると、アスファルトは芝生に比べて日射反射率が低く、地表面温度が高く、赤外放射量が多くなっていた。このことから、アスファルトの方が芝生よりも蓄熱性の高い地表面被覆であることが示唆された。気温、黒球温度、及び WBGT は芝生よりアスファルト上の方が高くなる傾向が見られ、地表面被覆は暑熱環境に影響を及ぼす一因であることが推測された。

これらの結果から、アスファルトは芝生に比べて暑熱環境を厳しくする地表面被覆であることがわかった。

また、気温、WBGT については同じ地表面被覆でも、より地表面に近い方が高くなる傾向が見られたことから、大人よりも子供の方が常に厳しい暑熱環境下にいるということが示唆された。

気象庁の報告⁷⁾によると、ヒートアイランド化の影響は日中よりも夜間に顕著であることがわかっている。今後は、夜間を含めた測定を行い、日中に温められたアスファルトと芝生が暑熱環境にどのような影響を与えていたか、さらに調査をしていく予定である。また、今回調査対象としたアスファルトと芝生以外の地表面被覆も調査することで、被覆の違いが暑熱環境に与える影響について併せて検討していきたい。

文献

- 1) 環境省：ヒートアイランド対策マニュアル～最新状況と適応策などの対策普及に向けて～、(平成24年3月)
- 2) 環境省：熱中症予防情報サイト、
<http://www.wbgt.env.go.jp/>
- 3) 日本工業規格：人間工学-WBGT（湿球黒球温度）指標に基づく作業者の熱ストレスの評価-暑熱環境、JIS Z 8504 (1999)
- 4) 気象庁：気象観測の手引き、(平成10年9月)
- 5) 気象庁：地上気象常用表、(昭和34年)
- 6) 高橋大輔：数値計算、岩波書店、21～27 (1996)

7) 気象庁：ヒートアイランド監視報告 2016、(平成29年7月)