

熱線再帰フィルム及びフラクタル日除けを用いた暑さ対策の効果検証

榎原 正敬¹・小田切 幸次¹・関 浩二²

¹横浜市 環境創造局 環境科学研究所

(〒221-0024 横浜市神奈川区恵比須町1番地澁澤ABCビルディング1号館5階)

²横浜市 環境創造局 (〒231-0017 横浜市中区港町1-1)

熱中症予防を含む都市の暑さ対策推進の一環として、熱線再帰フィルムとフラクタル日除けの定量的な効果検証を行った。従来の遮熱フィルムでは屋外の地表面における日射量が11%増加したが、熱線再帰フィルムでは遮熱効果を保持したまま、屋外の日射量は増加しなかった。また、フラクタル日除けの調査では暑さ指数(WBGT)が最大3.4℃低減されたが、日除け面積に応じて暑さ指数の低減に違いがあることが示唆された。

キーワード 熱線再帰フィルム, フラクタル日除け, ヒートアイランド, 適応策

1. はじめに

地球温暖化やヒートアイランド現象などの影響により、横浜市内の平均気温は長期的に上昇傾向にあり¹⁾、熱中症患者数の増加など人の健康への悪影響が懸念されている。環境省は、「まちなかの暑さ対策ガイドライン」で、これまでの日傘や打ち水などのソフトな取り組みから、まちなかの暑さ対策を積極的に取り組んでいくことが重要であるとしている²⁾。また、横浜市気候変動適応方針においても、より深刻化する気候変動の影響に対応し、被害を最小化・回避するため、適応策を推進していくことを喫緊の課題としている³⁾。

当研究所では、これまで市内の気温観測によるヒートアイランド現象の実態解明⁴⁾や、暑熱環境への適応策の効果検証⁵⁾などを行っている。今回、熱線再帰フィルムと、以前から当研究所で効果検証中であるフラクタル日除けについて、暑さ対策効果の調査を実施した。

2. 調査概要

(1) 熱線再帰フィルムの調査

調査期間は平成29年7月21日から8月25日、調査地点は横浜市立小学校1校(3階の3教室内及びグラウンド)とした。第1の教室には熱線再帰フィルムを、第2の教室には従来の遮熱フィルムをそれぞれ窓の内側に施工し、残り1教室は対照としてフィルムを貼らない状態とした。

また、カーテン等の障害物を排除して他の条件は同じ状態にして測定した。グラウンドの測定地点は、各教室からの反射の影響を事前に計算し、太陽の動きに合わせて移動させた。7月26日から8月24日までの間に3教室内の温度及び黒球温度を、7月28日及び8月22日から24日に3教室内及びグラウンドでの日射量及び相当外気温度をそれぞれ測定した。温度及び黒球温度には、(株)ティアンドディ製TR-52iを用い、日射量には英弘精機(株)製MS-402を用い、相当外気温度の測定はJSTMJ6110に準拠してそれぞれ測定を行った。

相当外気温度(℃)とは、外気温に日射や長波放射の影響を温度として加味した仮想の空気温度で、式(1)で示される⁷⁾。

$$SAT = \theta_a + \frac{\alpha_s}{h_{se}} J + \frac{\varepsilon_s}{h_{se}} J_n \quad (1)$$

SAT : 相当外気温度(℃)

θ_a : 外気温(℃)

α_s : 日射吸収率

J : 日射量(W・m²)

ε_s : 放射率

J_n : 長波放射量(W・m²)

h_{se} : 外気側表面熱伝達率(W・m²・K⁻¹)

(2) フラクタル日除けの調査

調査場所は、市立2保育園(以下、A保育園及びB保育園と呼ぶ。)とした。調査期間は、A保育園は平成29年

表-1 測定機器

測定項目	測定機器	型式
温度	温度データロガー	(株)ディアンドディ製 TR-52i
黒球温度	温度データロガー	(株)ディアンドディ製 TR-52i
相対湿度	温湿度データロガー	(株)ディアンドディ製 TR-72wf
日射量	日射量計	Hukseflux Thermal Sensors製 LP-02
	データロガー	日置電機(株)製 LR5041
赤外放射量	赤外放射量計	Hukseflux Thermal Sensors製 IR-02
	データロガー	日置電機(株)製 LR5041
	温度データロガー	(株)ディアンドディ製 TR-55i
表面温度	赤外線サーモグラフィカメラ	日本アビオニクス(株)製 R300SR 日本アビオニクス(株)製 R500EX

8月23日及び25日、B保育園は平成29年8月29日及び9月5日を起点とし、それぞれ午前8時からの24時間について測定を行った。

各保育園の調査には、同じフラクタル日除け（セクスイハイムサプライ（株）製エアリーシェード）を用いた。ただし、大きさはA保育園が幅5.4m×奥行3.6m、B保育園が幅3.6m×奥行3.6mである。

調査地点は、各保育園での日なたの地点及びフラクタル日除けの下の地点とした。調査項目のうち、気温、相対湿度、黒球温度、日射量及び赤外放射量は午前8時から翌日午前8時までの間20秒間隔で測定した。なお、日射量は直接的に届くものと地面等に反射して届くものを

表-2 測定期間中の気象状況

日付	降水量 (mm)	日照時間 (h)	天気概況	
			昼(06:00-18:00)	夜(18:00-翌日06:00)
7月26日	8.5	0	雨時々曇	曇時々雨
7月27日	0.5	0	曇一時雨	曇時々雨
7月28日	0.5	8.5	薄曇一時晴	曇
7月29日	18.5	4.3	曇後一時雨	雨後一時曇
7月30日	0.5	1.2	曇	晴時々曇
7月31日	--	10.8	晴	晴後曇
8月1日	17.5	1	曇後雨、雷を伴う	雨後曇
8月2日	2	0	曇時々雨	曇一時雨
8月3日	0	2.5	曇	曇時々雨
8月4日	1.5	0.5	曇	曇時々雨
8月5日	--	6.8	曇時々晴	曇時々晴
8月6日	--	9.5	晴	晴
8月7日	2.5	4.8	曇一時晴	曇時々雨
8月8日	0	5.1	曇後晴	曇後晴
8月9日	0	9.8	晴後一時曇	曇時々雨
8月10日	3.5	1.4	曇時々雨	雨一時曇
8月11日	7	0	雨一時曇	雨時々曇
8月12日	7	3.1	曇時々雨後一時晴	晴後一時薄曇
8月13日	0	4.7	晴時々曇	曇一時雨
8月14日	15.5	0	曇時々雨	曇時々雨
8月15日	32.5	0	大雨一時曇	雨時々曇
8月16日	18	0	雨	雨後時々曇
8月17日	0.5	0	曇	曇時々雨
8月18日	0	3.2	曇時々晴一時雨	曇一時晴
8月19日	31	4.9	晴時々曇一時雨、雷を伴う	大雨時々曇、雷を伴う
8月20日	5	×	曇	曇一時雨
8月21日	0	3.1	曇時々晴一時雨	薄曇時々晴
8月22日	--	3.2	曇	晴時々曇
8月23日	--	10.6	晴後曇	薄曇時々晴
8月24日	0	8.2	曇時々晴	晴時々薄曇
8月25日	--	6.7	薄曇	晴時々薄曇
8月26日	0	4.8	曇一時晴	曇
8月27日	--	4.8	曇後一時晴	晴後一時曇
8月28日	--	8.1	曇後晴	曇後一時晴
8月29日	0	6.4	薄曇後一時晴	薄曇後一時晴
8月30日	0	5.8	晴後一時曇	晴時々曇
8月31日	4.5	0.2	雨後一時曇	曇
9月1日	10	2.3	曇後一時雨	雨時々曇
9月2日	14	5.9	雨後晴	晴一時曇
9月3日	--	6.9	晴一時曇	晴後曇
9月4日	4.5	0	曇時々雨	曇時々雨
9月5日	0	5.2	曇	曇後雨
9月6日	5	0	曇時々雨	曇時々雨

それぞれ測定するため、半球状に上方向と下方向に分割した。赤外放射量は地表面からの上向きの赤外放射量を見るため、半球状下方向について測定した。地面の表面温度はフラクタル日除けの下、日なた、日除けと日なたの境界地点をそれぞれ15分に1回、測定場所全体を1時間に1回撮影した。各種測定には表-1の測定機器をそれぞれ用いた。

評価にあたって、屋外での暑さ指数(WBGT[°C])は式(2)で表される⁹⁾。本調査では、乾球温度 T_d 及び黒球温度 T_g の実測値、並びに乾球温度及び相対湿度の実測値から算出した湿球温度 T_w の計算値を用いてWBGTを算出した。湿球温度 T_w の算出には、Sprungの式⁹⁾を使用し、水の飽和蒸気圧の近似式としてTetensのパラメータ値¹⁰⁾によるAugust-Roche-Magnusの式^{11,12)}を使用した。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_d \quad (2)$$

- T_w : 湿球温度(°C)
- T_g : 黒球温度(°C)
- T_d : 乾球温度(°C)

3. 調査結果

(1) 熱線再帰フィルムの調査結果

a) 教室内の温度、黒球温度、日射量及び相当外気温度について

調査期間の天候は、横浜地方気象台によると表-2の通りであり、測定期間中の多くの日で曇天や雨天となっていた。全測定項目を測定した日時のうち、最も日照時間が長かったのは8月23日の午前9時から午前10時であった。この時間帯の各測定データを図-1に示す。

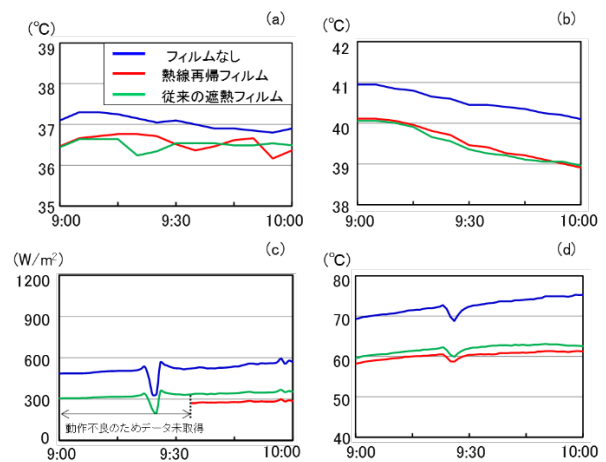


図-1 教室内での(a)温度、(b)黒球温度、(c)日射量、(d)相当外気温度

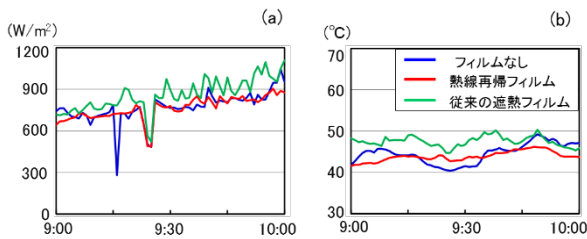


図-2 グラウンドでの(a)日射量, (b)相当外気温度

熱線再帰フィルムを貼った教室では、フィルムを貼らない教室と比較して平均値で、温度が0.5°C低く、黒球温度が1.0°C低く、日射量は49%低く、相当外気温度は12.2°C低かった。また、従来の遮熱フィルムを貼った教室では、フィルムを貼らない教室と比較して平均値で、温度が0.5°C低く、黒球温度が1.1°C低く、日射量は37%低く、相当外気温度は10.6°C低かった。

この結果から、熱線再帰フィルムを貼ることで直接的な日射量を抑制し、室内の温度上昇を抑えることが分かった。また、従来の遮熱フィルムも熱線再帰フィルムと同程度の遮熱効果であった。

b) グラウンドでの日射量, 相当外気温度について

教室と同じく、日照時間が長かった8月23日の午前9時から午前10時における、グラウンドでの日射量及び相当外気温度を図-2に示す。従来の遮熱フィルムを貼った教室の影響を受ける場所では、フィルムを貼らない教室の影響を受ける場所と比較して平均値で、日射量が11%高く、相当外気温度が3.0°C高かった。それに対して、熱線再帰フィルムを貼った教室の影響を受ける場所では、フィルムを貼らない教室の影響を受ける場所と比較して平均値で、日射量が1%低く、相当外気温度が0.6°C低かった。

この結果から、従来の遮熱フィルムでは熱線をそのまま地上に反射させるため、地上の日射量が増加したのに対し、熱線再帰フィルムでは熱線を天空に反射させることで、地上に向かう熱線を従来の遮熱フィルムより低減させることが実証された。

(2) フラクタル日除けの調査結果

a) 気温, 黒球温度及び相対湿度について

調査期間の天候は、表-2の通りであり、概ね良好であった。測定期間中最も日照時間が長かった、A保育園における8月23日午前8時から午後5時までの気温、黒球温度、相対湿度の測定結果及び算出したWBGTを表-3に示す。フラクタル日除けの下の地点の気温、黒球温度は、ほぼすべての時間帯で、日なたの地点よりも低かった。熱中症予防の指数であるWBGTは最大で3.4°C低下した。

A保育園とB保育園で、日なたにおける上方向からの日射量の総計に近い、8月23日と8月29日について平均値を比較したものを表-4に示す。

表-3 気温, 黒球温度, 相対湿度及びWBGT

		気温 (°C)	黒球温度 (°C)	湿度 (%)	WBGT (°C)
日なた	平均値	36.2	48.8	36.6	30.2
	最大値	39.3	58.5	51.5	32.2
フラクタル日除け	平均値	35.2	40.4	42.1	28.8
	最大値	37.5	43.8	59.5	29.8
差 (フラクタル-日なた)	平均値	-1.0	-8.3	5.5	-1.4
	最大値	-2.6	-15.7	12.4	-3.4

表-4 各保育園での結果比較

		気温 (°C)	黒球温度 (°C)	湿度 (%)	WBGT (°C)
A保育園	日なた	36.2	48.8	36.6	30.2
	フラクタル日除け	35.2	40.4	42.1	28.8
	差(フラクタル-日なた)	-1.0	-8.3	5.5	-1.4
B保育園	日なた	31.9	39.9	58.1	28.7
	フラクタル日除け	31.4	35.9	60.8	27.9
	差(フラクタル-日なた)	-0.5	-4.1	2.7	-0.8

表-5 日射量及び赤外放射量

		日射量 (W/m²)		赤外放射量 (W/m²)
		上方向	下方向	下方向
日なた	平均値	522.9	84.1	603.6
	最大値	1094.1	192.9	672.2
フラクタル日除け	平均値	192.9	31.3	540.4
	最大値	774.4	61.2	565.7
差 (フラクタル-日なた)	平均値	-329.9	-52.8	-63.2
	最大値	-882.7	-131.8	-113.4

WBGTがA保育園では1.4°C、B保育園では0.8°C低減されていた。測定日や周辺環境が異なるため単純な比較はできないが、フラクタル日除けの面積が大きいほど気温やWBGTがより低減される可能性が示唆された。今後、同条件下でフラクタル日除けの大きさの違いを調査する必要がある。

b) 日射量, 赤外放射量及び赤外線画像について

A保育園における8月23日午前8時から午後5時までの日射量及び赤外放射量の結果を表-5に示す。日射量は、上方向が平均55%、最大89%、下方向が平均54%、最大76%低減された。周囲や地面からの輻射熱を示す下方向からの赤外放射量は、平均10%低減された。

8月23日午前10時頃に、A保育園で撮影した赤外線画像を図-3に示す。この赤外線画像から地面の表面温度を確認したところ、フラクタル日除けの下の地点で39.6°Cであり、日なたの地点で51.8°Cであった。また、日中の表面温度差は平均で9.4°C、最大で17.0°Cだった。B保育園でも同様に確認したところ、平均で8.1°C、最大で16.5°Cだった。これらの結果から、フラクタル日除けは直射日光を遮ることで、人が直接受ける放射熱を大きく低減し、副次的に地面の表面温度が上昇するのを抑制す

ることで、輻射熱も低減させ複合的に暑さを緩和していることがわかった。

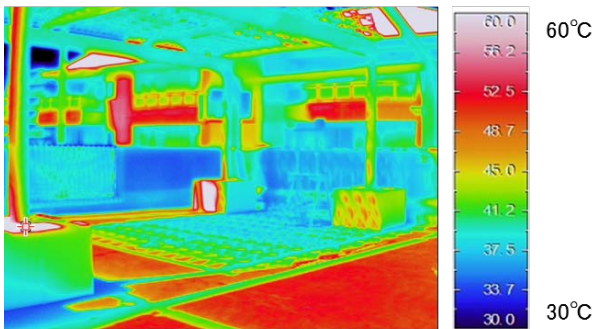


図-3 赤外線サーモグラフィーカメラの画像

4. まとめ

熱中症等の健康被害のリスク低減のため、暑さ対策技術の定量的な効果検証を行った。

熱線再帰フィルムは、従来の遮熱フィルムと比較すると、室内環境は同程度の遮熱効果が確認できた。また、屋外環境については、従来の遮熱フィルムでは照り返しによって日射量が11%増加していたが、熱線再帰フィルムでは照り返しによる日射量の増加が見られなかった。これらのデータにより、熱線再帰フィルムの遮熱効果による室内環境の改善効果や、屋外への照り返し抑制の効果を定量的に示した。

フラクタル日除けは、設置していない時と比較して、ほぼすべての時間帯で気温、黒球温度が低い結果であった。日中、A保育園では気温が平均1.0°C、WBGTが平均1.4°C低減し、B保育園では気温が平均0.5°C、WBGTが平均0.8°C低減した。ここから、フラクタル日除けの面積が大きいほど、気温やWBGTがより低減する可能性が示

唆された。また、日射量は平均で50%程度低減し、赤外放射量は平均で10%低減しており、フラクタル日除けが作る日陰が直接的にも間接的にも、気温の低減に寄与していることが定量的に分かった。

今後は、屋外で実際に導入可能な暑さ対策に関する調査や効果検証を行っていく予定である。

謝辞：熱線再帰フィルムの暑さ対策効果の調査を行うにあたり、デクセリアルズ(株)様、(株)JVCケンウッド様のご協力をいただきました。

ご協力いただいた皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁：ヒートアイランド監視報告2016, pp5.(2017).
- 2) 環境省：まちなかの暑さ対策ガイドライン改訂版, pp1.(2018).
- 3) 横浜市：横浜市気候変動適応方針, pp17.(2017).
- 4) 関浩二ら, 横浜市内における2015年夏季の暑さ指数(WBGT)の調査, 横浜市環境科学研究所報第41号(2017), pp.38-44.
- 5) 関浩二ら, 横浜赤レンガ倉庫でのフラクタル日除けを用いた暑さ対策効果の調査, 横浜市環境科学研究所報第42号(2018), pp.17-22.
- 6) 内藤純一郎ら, 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報第41号(2017), pp.33-37.
- 7) (財)建材試験センター, 建材試験情報8月号(2011), pp30-35.
- 8) 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).
- 9) 日本工業規格：JIS Z 8806:2001 湿度—測定方法(2001).
- 10) O. Tetens : Uber einige meteorologische Begriffe, *Z. Geophys.*, **6**, 297-309(1930).
- 11) O. A. Alduchov and R. E. Eskridge : Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure, *J. Appl. Meteor.*, **35**, 601-609(1996).
- 12) M. G. Lawrence : The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air. A Simple Conversion and Applications, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 225-233(2005).