

フラクタル日除けによる屋外暑熱環境の緩和に関する研究[†] —熱収支モデルによる表面温度予測手法の検討—

蝦名 聖二[※]

(0000年00月00日受理)

Study on mitigation of outdoor thermal environment by fractal sunshade —The surface temperature prediction method using the heat balance model—

Seiji EBINA

(Received □□ 00,0000)

1. はじめに

ヒートアイランド現象に伴う影響の一つとして、都市生活者の熱ストレスの増大が指摘されており、従来のヒートアイランドの発生要因を削減する対策（緩和策）に加え、人の熱ストレスによる健康影響などをできるだけ軽減していく対策として「適応策」の推進が必要である。適応策としては、多くの人が利用する空間の温熱環境を局所的にでもより快適な空間にすることができれば、夏季の日中においても人が積極的に利用可能となる。快適空間の創出方法として都市に樹木を増やすことが理想的ではあるが、実際には生育環境・維持管理などの問題がある。そのため緑化や屋根散水などと比較し、設置・維持コストのかからない人工物を用いて快適空間を創出することが必要となる。その一つとして、従来の日除けとは全く異なる発想で開発されたフラクタル日除けがある (Fig.1、2)。フラクタル日除けは、小片をシェルピンスキー四面体型のユニットで多数組み合わせたもので、シェルピンスキーのガasket (Fig.3) を3次元的にした形状となっている。この日除けは、一般の日射遮蔽部材とは異なり高温化しないため、快適空間を形成できる可能性が高いといわれているが、その物理的メカニズムの定量的な把握までには至っていない。

そこで本研究では、フラクタル日除けの物理的メカニズムを定量的に把握するため、季節毎の日射遮蔽率の変化を把握するとともに、放熱特性を左右する対流熱伝達率を様々な手法を用いて検討した。それらの結果を用いて、任意の条件下でのフラクタル日除けの表面温度を予測できる熱収支モデルを構築した。

2. 実験概要

2.1 フラクタル日除けによる日射遮蔽効果の長期測定

2.1.1 実験対象空間と測定項目・測定点

本学のキャンパス内にある都市スケールモデルサイトに、市販されているプラスチック素材のフラクタル日除け (Fig.1) を設置した区画 (フラクタル街区) を設け、日除け上下における日射量の測定を行った (Fig.4)。そして、その結果をもとに日射遮蔽率を求めた。周辺の温熱環境把

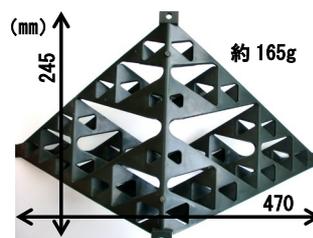


Fig.1 フラクタル日除け (一部材)



Fig.2 日除け設置の状況



ひとつの正三角形から始まり、中央にある三角形を抜き取るという手順でつくられる。取り除かれる三角形は元の正三角形の各辺の中点を結んで求められる。

Fig.3 シェルピンスキーのガasket

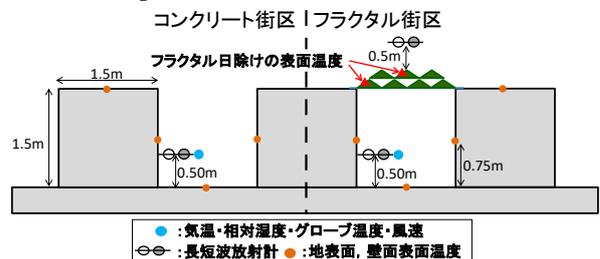


Fig.4 測定断面図

握のため、温熱4要素 (気温、湿度、放射、風速)、表面温度の測定も同時に行った。設置に使用している市販のフラクタル日除けは、北緯35度における8月10日頃の太陽高度が70度になるとき、日射遮蔽率が最大となるような構造になっている。

2.1.2 実験期間

実験期間は、平成24年8月21日～10月31日の約2ヵ月間、平成25年4月10日～7月15日の約3ヵ月間、計5ヵ月である。

2.2 対流熱伝達率の測定

2.2.1 測定場所・測定対象・測定項目

測定場所を本学キャンパス内の建築棟屋上とし、試験体を屋上面から1mの高さに設置した (Fig.5)。試験体には、0.4mm厚のアルミ板で2種類の形状を作成した。形状の種類は、市販のフラクタル日除けと同じ分割数のもの (Fig.6 ①、分割3) と、分割のないもの (Fig.6 ④、分割無) とした。測定項目と測定機器についてはTable.1に示す。

[†]本研究の一部は、2013年度日本建築学会で発表した。

[※]建築学専攻

2.2.2 実験方法

本研究では、ろ紙表面からの水分蒸発量を直接測定するろ紙面水分蒸発量秤量法（以下、ろ紙法）を試みた。試験体の熱伝達特性を評価する指標として、単位温度差あたりの熱フラックスを表す対流熱伝達率（ α_c ）を用い、ろ紙面水分蒸発量を利用した物質伝達率（ k ）から求める。物質伝達率は、蒸発速度（ E ）を算出し（式1）、ろ紙表面と大気の絶対湿度の差で除することにより求められる（式2）。

物質伝達率の測定に際しては、試験体である0.4mm厚のアルミ板の表面に1mm厚のろ紙を接着した（Fig.7）。

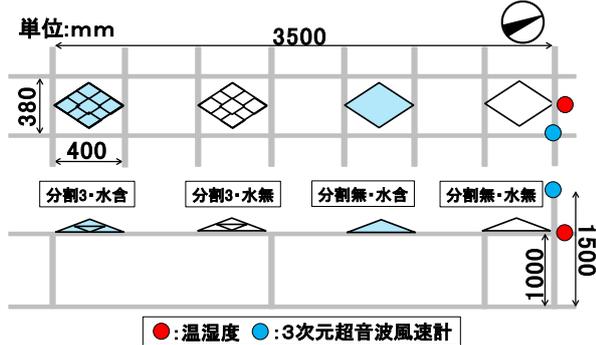


Fig.5 試験体設置状況（上図：平面、下図：立面）

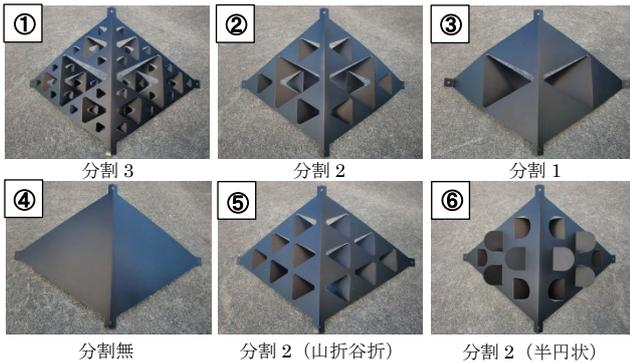


Fig.6 試験体の種類（図は黒色のもの）

Table.1 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	インターバル
外気温度	温湿度計	1秒
相対湿度	[強制ファン・日射遮蔽シェルタ付]	
風速	3次元超音波風速計	
表面温度	サーモカメラ	30分

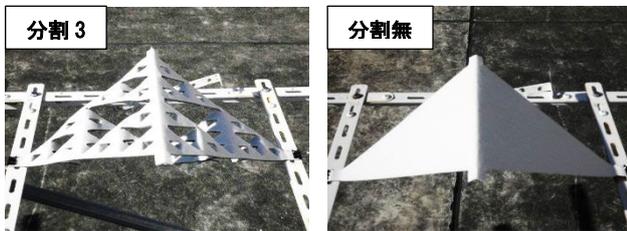


Fig.7 ろ紙を接着した試験体



Fig.8 養生時の状況



Fig.9 暴露時の状況

に滴り落ちない程度の水を含ませた試験体を、外気温となるべく温度差が生じないように1分間養生した（Fig.8）。その後、約30分間暴露し（Fig.9）、暴露前後の重量変化（蒸発量）をもとに物質伝達率を算出した。ろ紙面の絶対湿度を算出するための表面温度は、サーモカメラにより暴露前後の表面を固定位置から撮影し、取得した熱画像から求めた（Fig.10）。対流熱伝達率は、物質伝達と熱伝達のアナロジーを仮定して求めた（式3）。

$$E = \frac{\Delta w}{A \times H} \quad \text{--- (式1)}$$

E : 蒸発速度 [kg/m²・s] Δw : 水分蒸発量 [kg]
 A : ろ紙表面積 [m²] H : 測定時間 [s]

$$k = \frac{E}{\Delta x} \quad \text{--- (式2)}$$

k : 物質伝達率 [kg / (m²・s・(kg/kg'))]
 Δx : 表面と大気の絶対湿度の差 [kg/kg]

$$\frac{\alpha_c}{C} = 0.83k \quad \text{--- (式3)}$$

α_c : 対流熱伝達率 [W / m²・K]

C : 湿り空気比熱 [J/kg・K]

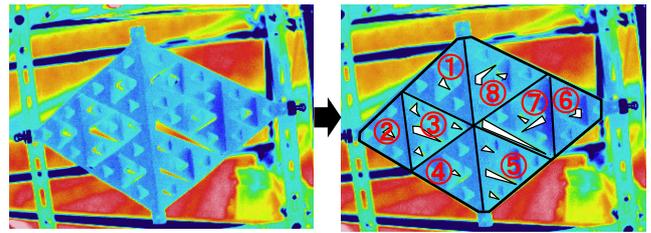


Fig.10 表面温度の求め方

3. 季節による日射遮蔽効果の比較

3.1 透過率・反射率・吸収率の比較

フラクタル日除けによる日射遮蔽性能の評価をするため、透過率・反射率・吸収率の時系列変化を季節毎に比較した（Fig.11）。反射率は、南中時前後の比較をすると季節による違いはほとんどみられない。透過率・吸収率は、4月13日にばらついていた値が、6月中旬～8月下旬頃にかけて比較的安定した値を示し、継続的に多くの日射を遮蔽している。9月に入るとまたばらつき始め4月と似た変化を示す。10月16日には9月以上に多くのばらつきがみられ安定した遮蔽はされず、日射を積極的に取り入れている。

3.2 季節による日射遮蔽率の比較

季節によってどの程度日射遮蔽率が異なるか把握するため、南中時付近の11時～13時における日射遮蔽率の平均を求め比較した（Table.2）。4月中旬～9月上旬の日射遮蔽率は80%以上と、多くの日射を遮蔽している。10月半ばになると52%と多くの日射が透過されている。したがって、遮蔽率は最大となる夏場から徐々に低くなっていき、10月近傍になると日射が透過する量が極端に増え、結果として積極的に多くの日射を取り入れていることがわかる。

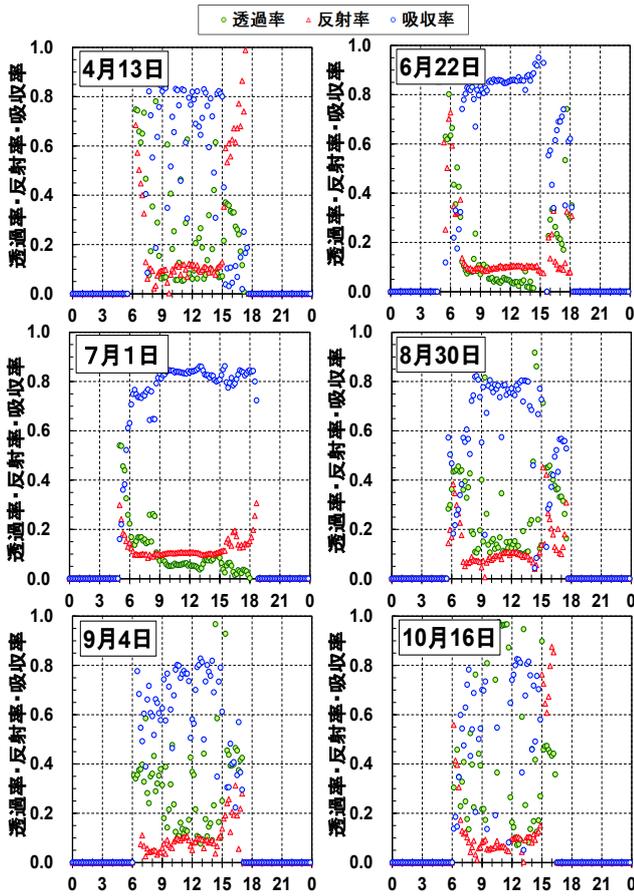


Fig.11 季節毎の透過率・反射率・吸収率

Table.2 日射遮蔽率の比較 (11時~13時の平均)

日付	4/13	6/22	7/1	8/30	9/4	10/16
吸収率 (%)	72	86	84	76	72	44
反射率 (%)	11	10	11	10	9	8
透過率 (%)	17	4	5	14	19	48
遮蔽率 (%)	83	96	95	86	81	52

4. 対流熱伝達率の算出

4.1 ろ紙面水分蒸発量秤量法による対流熱伝達率の算出

ろ紙法によって算出した対流熱伝達率と風速の対応関係を求めた (Fig.12)。市販されているフラクタル日除けと分割数の同じ分割 3

は、風速が小さいときでも分割無の約 2 倍以上熱伝達率が大い。また、分割 3 は風速が大きくなるにつれて熱伝達率も大きく変化している。したがって、風の強弱に関係なく分割 3 のフラクタル形状の試験体の方が、表面温度が上昇しにくいことがわかる。

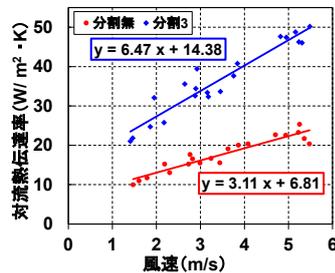


Fig.12 熱伝達率と風速の関係(ろ紙法)

4.2 熱収支連立法による対流熱伝達率算出方法の提案

4.2.1 熱収支の概要

本研究では、熱収支式の連立によりその項を消去することで、対流熱伝達率を算出する。熱収支式の連立から対流熱伝達率を算出するため、ここでは熱収支連立法 (以下、連立法) と呼ぶ。

熱収支は以下の式で示される。

$$R_n = H + IE + G = (1 - a)S \downarrow + L \downarrow - \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (式 4)$$

$$H = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (式 5)$$

R_n : 正味放射量[W/m²]

H : 顕熱輸送量[W/m²]

IE : 潜熱輸送量[W/m²]

G : 伝導熱[W/m²]

a : 反射率[-]

$S \downarrow$: 下向き日射量[W/m²]

$L \downarrow$: 下向き赤外放射量[W/m²]

σ : 長波長放射率[-]

α_c : 対流熱伝達率[W/(m²·K)]

T_s : 表面温度[K]

T_a : 気温[K]

ε : ステファンボルツマン定数[W/(m²·K⁴)]

以下に 2 条件の算出方法をそれぞれ示していく。

4.2.2 日射反射特性が異なる場合

同一の屋外環境下に置かれ、日射反射率の異なる 2 つの試験体 W (白色)、B (黒色) の熱収支を考える。両者の形状が同一で、同一環境下にあるとすると対流熱伝達率は同値と見なせるため、W、B の熱収支式の連立により対流熱伝達率の算出式が導き出される (式 6)。

$$\alpha_c = \frac{(a_B - a_W) S \downarrow - 2 \varepsilon \sigma (T_{sW}^4 - T_{sB}^4)}{2(T_{sW} - T_{sB})} \quad (式 6)$$

試験体は、市販のフラクタル日除けをもとに、0.3 mm 厚のアルミ板で 6 種類の形状を白と黒の塗料で色付けした計 12 種類である (Fig.6)。Fig.6 の①②③④は分割数が異なるが、全てフラクタル形状である。⑤⑥は、分割した面積が②と等しくなるよう工夫した独自の形状となっている。

算出した対流熱伝

達率と風速の対応関

係を求めた (Fig.13)。

まず、フラクタル形

状の試験体の結果を

比較してみると、分

割数が増すごとに対

流熱伝達率が大きく

なっているのがわか

る。

分割無と分割 1 は、

風速が大きくなると

熱伝達率の変化は小

さいが、分割 2 と分

割 3 は風速が大きくなると

熱伝達率も大きく変

化している。フラク

タル形状でない試験

体の結果をみても、

分割 2 山折谷折は、

フラクタル形状の分

割 2 と比較して約 2

分の 1 の熱伝達率と

なる。分割 2 半円状

は、フラクタル形状

分割 1 とほぼ同じ熱

伝達率となる。したが

って、分割数が同一

でもフラクタル形状

であることにより表

面温度が上昇しにく

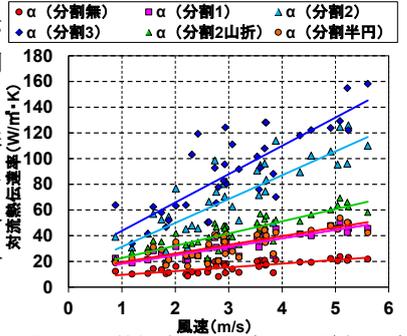


Fig.13 熱伝達率と風速の関係(連立法)

る。分割無と分割 1 は、風速が大きくなっても熱伝達率の変化は小さいが、分割 2 と分割 3 は風速が大きくなると熱伝達率も大きく変化している。フラクタル形状でない試験体の結果をみても、分割 2 山折谷折は、フラクタル形状の分割 2 と比較して約 2 分の 1 の熱伝達率となる。分割 2 半円状は、フラクタル形状分割 1 とほぼ同じ熱伝達率となる。したがって、分割数が同一でもフラクタル形状であることにより表面温度が上昇しにくいといえる。また、ろ紙法で算出した対流熱伝達率と比較してみると、分割無はほぼ同じ値になっているが、分割 3 は約 3 倍大きく同値にはならなかった。

そこで、再度検討してみると算出に使用した式はすべての試験体において、日除け下に透過する日射が無いものと仮定している。実際は、試験体の分割数が増すほどに透過する日射量も増加していくため、透過分の日射量も熱収支式に考慮するなどさらなる検討が必要となってくる。

4.2.3 潜熱輸送量が異なる場合

同一の屋外環境下に置かれ、潜熱輸送量の異なる2つの試験体 dry、wet の熱収支を考える。両者の形状が同一で、同一環境下にあるとすると対流熱伝達率は同値と見なせるため、dry、wet の熱収支式の連立により対流熱伝達率の算出式が導き出される (式7)。

$$\alpha_c = \frac{(I_{Ewet} - I_{Edry}) - 2\varepsilon\sigma(T_{sdry}^4 - T_{swet}^4)}{2(T_{sdry} - T_{swet})} \quad \text{(式7)}$$

ろ紙法で水を含ませた試験体だけではなく、含ませていない試験体の表面温度も同時に測定した (Fig.5)。この結果から式7を用いて対流熱伝達率を算出し、風速との対応関係を求めた (Fig.14)。

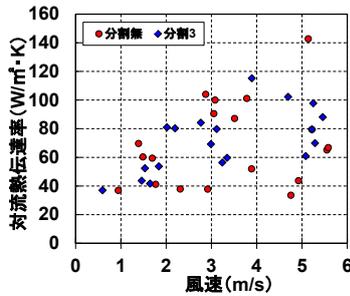


Fig.14 熱伝達率と風速の関係

分割無、分割3ともに、おおよその傾向は把握できるがばらつきが大きく定式化は難しい。ばらつく理由を検討してみると、サーモカメラで撮影し求めた表面温度に誤差が生じていることがわかった。一方、ろ紙法で算出した対流熱伝達率はばらつきが少なかった。これは、ろ紙法が表面温度に誤差が生じて対流熱伝達率の値に影響しにくいと考えられる。以上から、サーモカメラを用いて正確な表面温度を求めることは、容易にできるものではないということがわかった。

5. 熱収支モデルによる表面温度の予測

求めた日射遮蔽率と対流熱伝達率の結果から表面温度の予測値を導出し、2012年11月20日の実測値と比較した。予測値は、試験体ごとの透過率を実測により求めているため、全ての試験体において日射の透過が無いものと仮定し算出している。その結果、実測値で分割無の表面温度が14時頃にピークとなるが、予測値では11時頃にピークがみられる (Fig.15)。この日は、日中の風速が安定し気温は14時頃、日射量は11時頃にピークとなっていた (Fig.16)。以上から、熱収支モデルでは試験体が蓄熱しないと仮定しているため、日射量のピークである11時頃の表面温度が最も高くなったと考えられる。

次に任意の条件下で、分割無と分割3の表面温度の予測を試みた。使用している熱収支モデルは日射の透過が無いものとしているので、日射を透過する分割3は実際の値に近づくように透過率を30%と仮定した。また、分割3のようなフラクタル形状の場合、透過率は季節や時間帯によって時々刻々と変化するが、今回は一定であると仮定し算出した。ろ紙法の熱伝達率を用いた Fig.17(a)をみると、日射量が少ないときは分割無と分割3の表面温度に違いはみられないが、日射量が多くなるにつれ差が大きくなる。(b)(c)(d)は、日射量、気温、日射吸収率の異なる条件を想

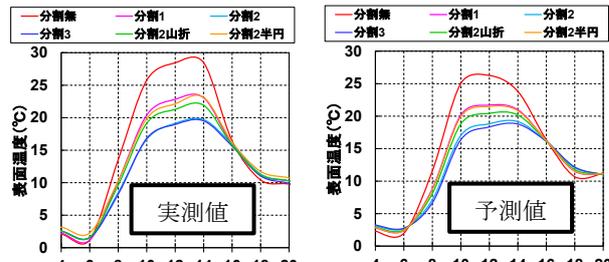


Fig.15 表面温度の実測値と予測値 (熱収支連立法からの α_c を使用)

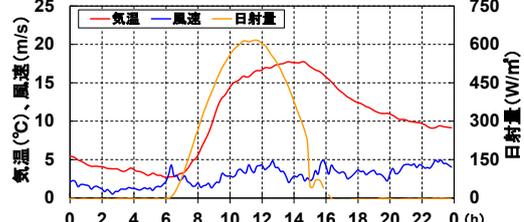
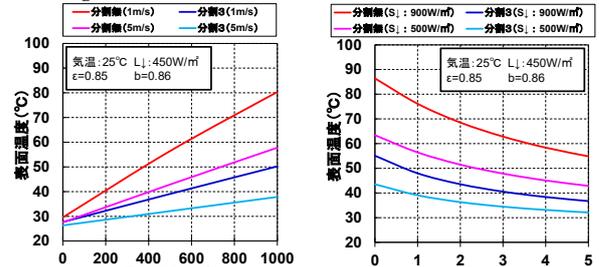
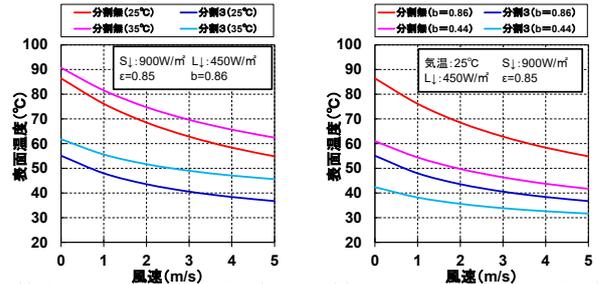


Fig.16 実測値に使用した日の気温・風速・日射量



(a) Ts と S_i の関係 (風速の違い)

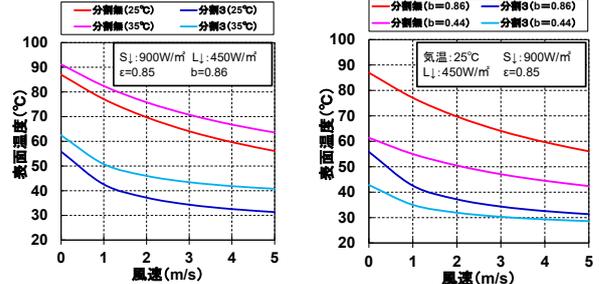
(b) Ts と u の関係 (日射量の違い)



(c) Ts と u の関係 (気温の違い)

(d) Ts と u の関係 (吸収率の違い)

Fig.17 予測した表面温度 (ろ紙法からの α_c を使用)



(a) Ts と u の関係 (気温の違い)

(b) Ts と u の関係 (吸収率の違い)

Fig.18 予測した表面温度 (熱収支連立法からの α_c を使用)

定し、それぞれ表面温度と風速の対応関係を求めたものである。環境条件が異なっても、分割3の表面温度が分割無に比べ上昇しにくいことがわかる。熱収支連立法の熱伝達率を用いた場合は、Fig.18(a)(b)から分割無の表面温度はろ紙法の熱伝達率を用いた予測値とほぼ同値を示し、分割3は風速0~1m/s間で急激な表面温度低下がみられる。

6. 結論 フラクタル日除けの日射遮蔽率と対流熱伝達率を求めた結果、対流熱伝達率はろ紙法に比べ熱収支連立法で求めた値が3倍ほど大きかった。熱収支モデルによる表面温度の予測をすると、フラクタル日除けは条件の異なる屋外環境でも表面温度が上昇しにくいことがわかった。