

フラクタル日除けによる放射環境改善効果

Thermal radiant environment measurements with fractal blind

中村 美紀*¹ 酒井 敏*¹ 大西 将徳*² 古屋 姫美愛*³
Miki NAKAMURA Satoshi SAKAI Masanori ONISHI Kimie FURUYA

*¹ 京都大学大学院 人間・環境学研究科 Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

*² 日本科学未来館 The National Museum of Emerging Science and Innovation(Miraikan)

*³ 京都大学 理学部 Faculty of Science, Kyoto University

Corresponding author: Miki NAKAMURA, miki@gaia.h.kyoto-u.ac.jp

ABSTRACT

It is scorching hot in urban area under the strong sunshine of the summer. It is because that the surface temperature of the urban area is higher than the rural and the thermal radiant environment is poor. This poor environment in urban area can be greatly improved by fractal sunshades. The sunshade consists of many units of Sierpinski's tetrahedron which has the almost same fractal dimension as trees. This paper shows results of comparative measurements of radiant environment in visual, near-infrared and thermal infrared bands under the fractal sunshade and a parasol. The results showed that the MRT under the sunshade was lower by 17 degree than that under the parasol. Furthermore, some sensory tests and long term measurements showed some results favorable to the sunshade.

キーワード: フラクタル日除け, 放射環境

Key Words : Sunshades with fractal shapes, Radiant environment

1. はじめに

都市のヒートアイランドが社会問題となっているが、都市部が郊外より暑く感じられるのは、都市部の表面温度が高く、熱放射環境が悪いことが一つの原因である。そのような放射環境を改善する方法としてフラクタル日除けが酒井 (2010) ⁽¹⁾によって提案されている。フラクタル日除けは、小さな日除けをフラクタル的に組み合わせたもので、特定の方向の光を 100%遮光することができると同時に、放熱効果が高く、日除け自体の温度が上がらず、日除けからの熱放射を低く保つことができる。ここでは、そのフラクタル日除けの効果を検証する。

人間の温熱感に関わる放射環境としては、熱赤外の放射だけでなく、可視光、近赤外線を含む短波放射も重要な要素である。詳細な放射環境の観測としては、浅野ら⁽²⁾による 3 次元熱画像の作成による放射場の評価、He and Hoyano⁽³⁾による膜構造下の熱環境計測、足永⁽⁴⁾による全球的なトラバース計測を用いた地物単位の短波・長波の分布を実測がある。

このような研究は特殊な精密測定器を用いたものであるが、本研究では、暑さに関する可視光、近赤外線、熱赤外線のおおよその寄与の割合を知ることと、何が (どこが)

暑さの原因となっているかを特定することを目的として、市販のカメラを使った簡易測定を行った。具体的には、近赤外線の撮影ができるビデオカメラを用いて、フィルタを交換することで、可視光と近赤外線の環境比較を行った。また、熱赤外線を測定するためのサーモカメラ、および上述のビデオカメラは視野がそれほど広くないため、入手が容易なステンレス半球を使って測定を行い、MRT を算出した。

さらに、放射環境改善の結果として、日除け下の地表面温度を測定するとともに、来客者の滞在時間から、フラクタル日除けの官能評価を試みた。

2. 放射環境測定

2008 年 7 月 19 日～9 月 1 日に、京都市の三条烏丸にある商業施設「新風館」にてフラクタル日除けの公開実験を行った(図 1)。この期間の中で、よく晴れた日の正午前後にフラクタル日除け下とパラソル下の放射環境を測定して比較した。

2.1 実験概要

今回用いたフラクタル日除けは、屋根材として使われる塩

化ビニールの波板を切って重ねたシェルピンスキー四面体型のユニット（図 2）を多数組み合わせたものである。このユニットは、特定の方向の光は 100%遮光する(図 2a)が、方向によって遮光率はかなり低くなる(図 2b)。この商業施設の営業時間が午前 11 時からであることを考慮して、13 時頃に遮光率が最大となるような方向に日除け全体を設置したが、イベントの都合でしばしば移動させることがあり、その際には 12 時頃に遮光率が最大となる。その他の時間帯には、ある程度日射を透過するが、短い時間を除いて遮光率は概ね 50%以上である。また、使用した塩化ビニールの波板は近赤外をよく透過するので、それを遮蔽するために、表面に塗装を施してある。

このフラクタル日除けは高さ約 2.7m のアルミトラスの上 に設置されており、日除け自体の最上部の地上高は約 3.6m である。面積は約 100m²である。

2.2 測定方法

市販の家庭用ビデオカメラ、サーモカメラとステンレス半球を用いて、可視光、近赤外線、熱赤外線強度を測定した。熱赤外線の測定には NEC Avio 赤外線テクノロジー株式会社製サーモカメラ TVS-200EX を使用した。測定波長範囲は、8 μ m～14 μ m である。可視光および近赤外線の測定にはデジタルビデオカメラ SONY DCR-PC300K を使用した。可視光の測定はビデオカメラの通常モードで行い、近赤外線の測定はビデオカメラをナイトショットモードにして、800nm のカットオンフィルタと ND フィルタを装着

して行った。ナイトショットモードとは、ビデオカメラの赤外線カットフィルタを外して撮影する機能で、CCD 素子で検出できる限界の波長(およそ 1 μ m)まで撮影できる。

広い立体角での撮影を行うため、ステンレス製半球ミラーの前にカメラを置いて、ステンレス半球に映った画像を撮影した。この方法では、半球ミラーに映った画像を、無限遠から撮影した時、撮影された画像上での面積と立体角が一致し、半球には全方位（立体角 4 π ）が映る。

実際には、有限の距離から撮影するので、340° 程度の画角となり、画像上の面積と立体角の関係も完全に一様にはなくなるが、平均的な放射強度を計算するのに際して、この歪による影響は小さく、今回の測定では最大で±2 W/m² 程度である。そこで、ここでは、ステンレス半球に映った範囲を単純平均して全方位の平均値とみなすことにする。

ステンレス半球の熱赤外の反射率は、熱した鉄板や氷を用いて測定を行った。物体をサーモカメラで直接測定した値と、ステンレス半球に反射した値から反射率を求め、解析ではその値から補正を行っている。

また、可視光、近赤外の放射強度は、よく晴れた日に水平に置いた白色板を撮影して、その画像上の明るさを基準に、カメラの絞り情報などから求めた。これは、家庭用ビデオカメラは露出調整等を行った画像を出力するためであり、この解析では、撮影時の記録情報を基にして、実際の明るさに復元している。この際、白色板が太陽放射を全反射しているものとし、その日射量は撮影と同時刻の大坂管



図 1 フラクタル日除け全景。於新風館中庭。8月1日 12:45 頃撮影。

区気象台の値を用いた。また、可視光域と近赤外域の放射量は、太陽放射の全エネルギーの約 46.6%が可視光線域、同じく 46.6%が赤外域に含まれることから⁶⁾、それぞれ太陽放射量の半分を占めていると仮定した。

測定日は 2008 年 8 月 10 日 12:30 前後で、そのときの気温は 34°Cであった。

2.3 解析結果

可視光、近赤外、熱赤外の波長域で撮影した画像を図 3 に示す。この中で熱赤外線画像を見ると、フラクタル日除けの下は、日除け自体を含めて、気温より極端に高い温度になっている部分がなく、全体的に放射環境が改善されていることがわかる。

半球全面から求めたそれぞれの波長域での放射強度は、フラクタル日除けの下で、可視光は 29[W/m²]、近赤外は 21[W/m²]、熱赤外は 19[W/m²]である。同様にパラソルの放射量は、可視光は 24[W/m²]、近赤外は 109[W/m²]、熱赤外は 73[W/m²]である。ここで、熱赤外の放射強度は気温 (Ta) に対応する放射強度 (σTa^4) を差し引いてある。すなわち、これらの放射強度は、真っ暗で気温と同じ温度の壁面に囲まれた状態を基準にした値である。さらに、この結果から MRT の算出を行った結果、フラクタル日除けは 44°C、パラソルは 61°Cとなった。

それぞれの場所で、各波長域の放射の寄与を比較すると、

(a)



(b)



図 2 フラクタルユニット

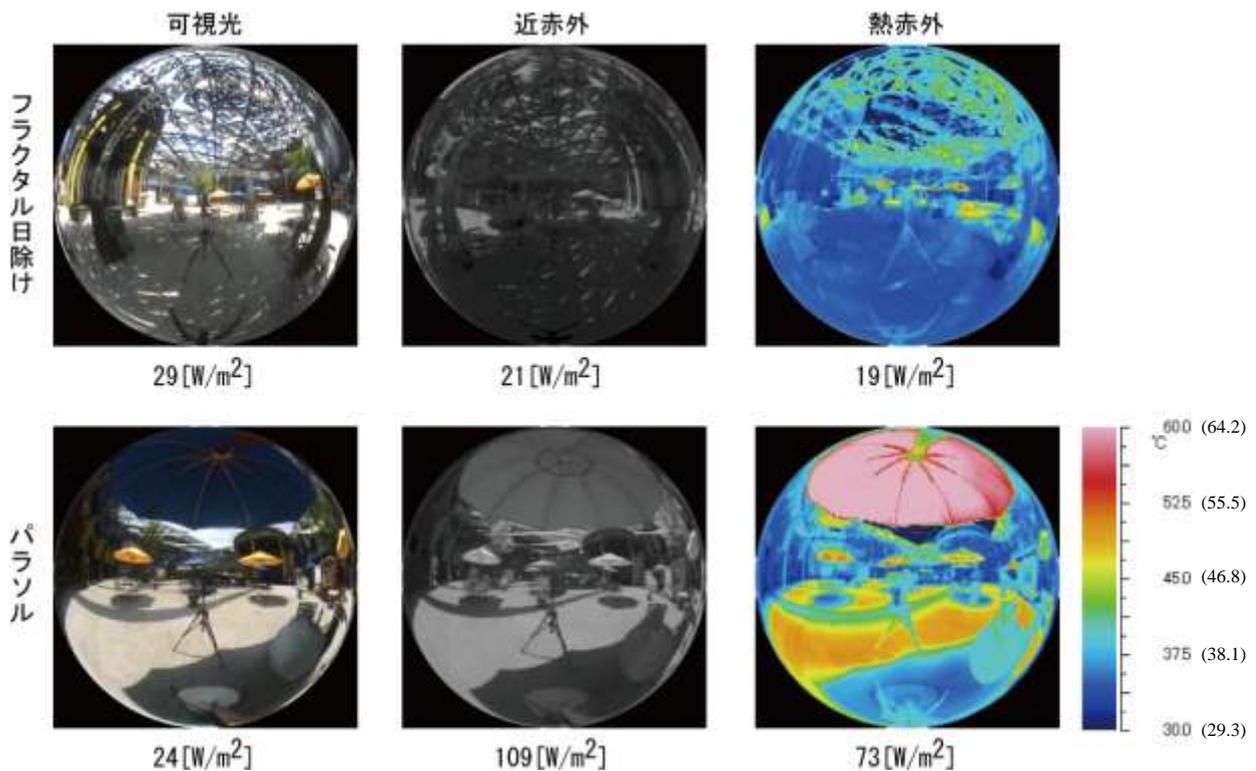


図 3 フラクタル日除け下とパラソル下の放射環境の比較。すべてステンレス半球に映った画像を撮影している。熱赤外のカラーバーの値は、サーモカメラの出力値と反射率で補正をした値 (カッコ内) を示す。

フラクタル日除けの下は、近赤外線が弱い割に可視光域で明るいことがわかる。これは、フラクタル日除けが直射日光をほぼ遮光しながら、散乱光はかなり透過する構造になっていることが大きな要因である。青空からの散乱光は直射日光に比べて近赤外線の割合が低いので、人間の目には明るく感じる割に、暑さを感じない光となっている。

これに対して、パラソルのような日除けは、パラソル自体の温度が高くなり、そこからの熱赤外線がかなり強い。この実験ではパラソルの面積が小さく直射日光が当たっている地表面の影響が排除できていないが、パラソルの熱赤外線画像を見ると、日陰を作ることによる地表面の温度低下よりも、パラソル自体の温度が上がる効果のほうが大きいことがわかる。仮に無限に広いパラソルで覆った場合を考え、パラソルの温度が 60°C、地表面温度が気温と同じであるとすると、熱赤外放射は 106W/m² となり、さらに悪化する。

さらに、パラソルは可視光でみて陰を作っているようでも近赤外をかなり透過し、見た目ほど日除けとしての効果を発揮していないことがわかる。これは、このパラソルに限ったことではなく、多くのパラソルはこのような傾向がある。また、屋根用の塩ビ板も同様に近赤外線を透過しているものが多い。

この実験で使用したフラクタルユニットも屋根用の塩ビ版に近赤外を遮蔽するための塗装を施したものであるが、40°C程度までしか温度が上がらないので、温度で変形するようなことはない。これに対して、同じ素材の大きな板に同じ塗装を施して直射日光下に置いたところ、70°C以上になって、熱で変形してしまった。このことから、大きな面を持つ樹脂系素材で日射を完全に遮光することは難しいことがわかる。

3. フラクタル日除け下の地表面温度

地表面温度は、その場所の放射収支に大きな影響を受けると同時に、地表面が高温になることで放射される熱赤外線は、その場所の放射環境に大きく影響する。したがって、地表面温度はその場所の暑熱環境を左右する重要な指標である。また、地表面温度は放射量が短い時間で激しく変動しても、あまり変化せず、ある程度の時間の積分量として現れるため、平均的な放射環境を知るには都合のよい量である。そこで、前述の新風館での実験では、約1カ月にわたり、地表面温度を連続記録し、さらに、この日よけを高校の屋上に移設して、約8カ月にわたって季節による変化を測定した。

3.1 測定概要

新風館での実験では、地面の表面温度をフラクタル日除け下、パラソル下、日向の3か所で観測を行った。観測期間は、2008年7月28日～8月25日である。サーミスタ温

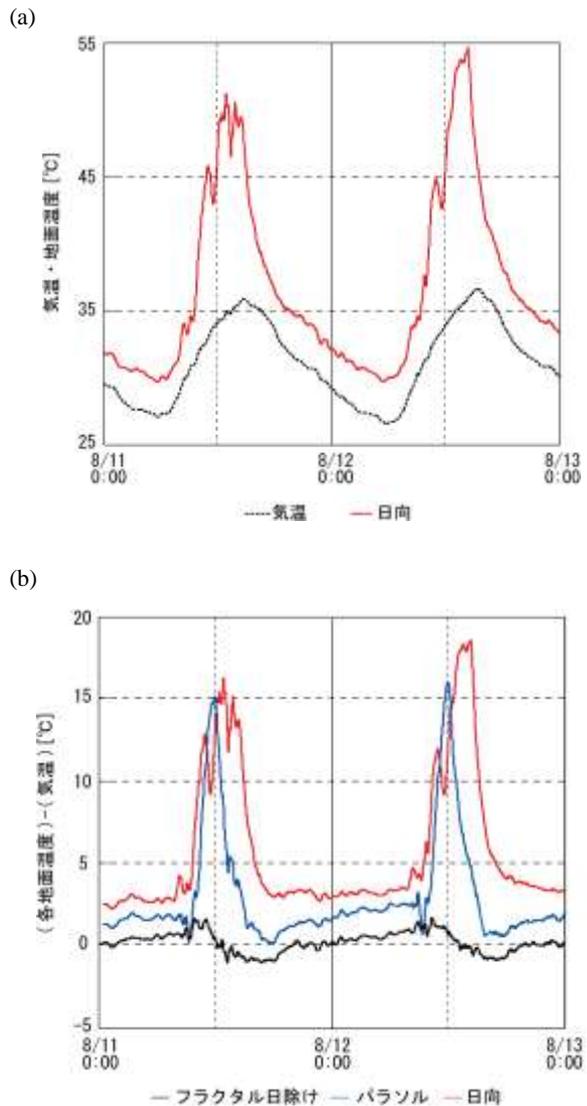


図4 新風館で観測された気温と日向の地表面温度の変化(a)と各地表面温度の気温との差(b).

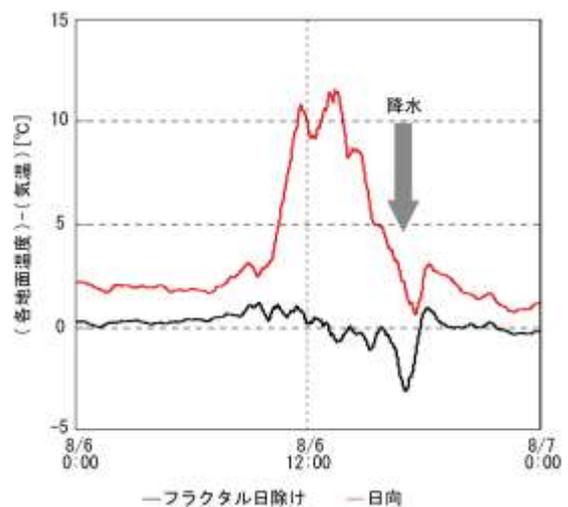


図5 新風館で観測された降水時の地表面温度の変化

度計とデータロガー⁽⁶⁾を用いて気温の測定及び記録を行い、地表面温度の測定には放射温度計⁽⁷⁾を用い、気温と同じデータロガーに記録した。サンプリング間隔は1秒毎である。解析には30分移動平均値を使用した。また、日照時間と降水量は気象庁の10分毎の値を用いた。

地表面はベージュ色のアスファルト舗装であり、通常の道路に比べて白く、反射率は比較的高いと思われる。

新風館での実験終了後、このフラクタル日除けを京都府立八幡高校の屋上に移設し、長期特性計測を行った。期間は2008年12月から2009年7月までで、日向の屋上面と、フラクタル日除け下の屋上面の温度を測定した。この測定でも、サンプリング間隔は1秒毎である。

この校舎の屋上面には防水シートが張られているため、新風館のアスファルト舗装に比べて熱慣性は小さいと思われる。

なお、この測定は当初、1年間測定を行う予定であったが、8月の雷による機器のトラブルで欠測が生じ、さらにその後、カラスがいたづらを覚えてしまったために、測定困難になってしまった。

3.2 地表面温度の日変化

新風館での晴れた日の気温と日向の地表面温度の典型的な変化を図4aに示す。地表面の反射率が高いため、通常のアスファルト舗装に比べると、温度上昇は比較的小さいが、それでも地表面温度は50℃を超える。

この日の、日向、フラクタル日除け下、パラソル下の地表面温度を比較したものが図4bである。ここでは、比較しやすいように、気温との温度差で示してある。これを見ると、フラクタル日除け下の地表面温度は気温にかなり近い値を示し、気温より低くなることさえあることがわかる。この特徴はグラフに示した期間だけでなく、観測全期間を通して同様である。これは、日除けによって直射日光がある程度遮られた結果、その日射による地表面温度の上昇が気温の上昇に追いついていないことを意味する。すなわち、フラクタル日除け下の地面は木漏れ日状の光を受けるため、一つの場所で見ると太陽の動きにつれて、短時間で放射収支が大きく変わるが、時間平均としては大きな熱エネルギーを吸収していない事がわかる。

それに比べて、パラソル下の地面は1日の間の遮光時間が短い上に、近赤外線が透過していることもあって、昼間

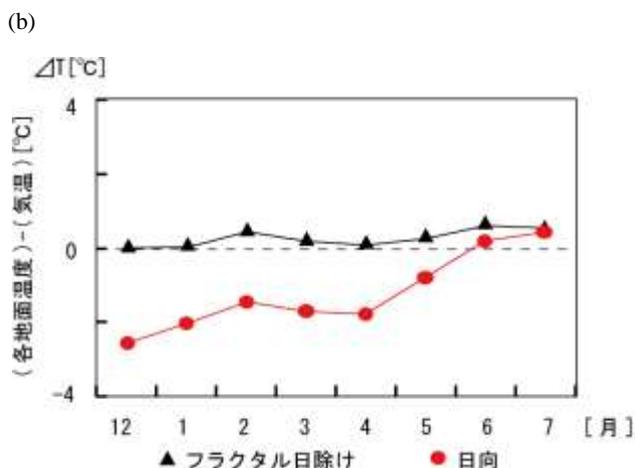
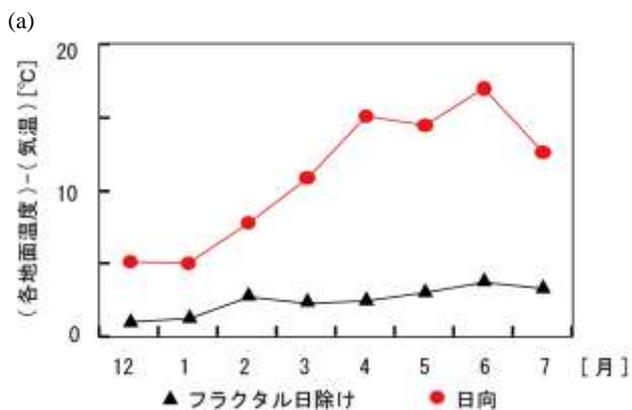


図6 京都八幡高校で観測された地表面温度の季節変化 (a:昼間, b:夜間)



図7 日向に置いたガラス(a)とフラクタル日除け下のガラス (b)

の間に蓄熱して夜間まで表面温度が気温より高い結果となっている。つまり、パラソル程度の日陰では、地表面が受ける1日分の日射を大きく減らすことはできず、夜間の放射冷却で冷却しきれない熱量を吸収してしまっ、放射収支が大きく崩れていることを示している。

また、8月6日の夕方に1時間で10mmの降水が観測された時の温度変化を図5に示す。降水が夕方、もともと気温の変化が激しい時間帯であったため、温度そのものではなく、気温との温度差を示した。これを見ると、降水があった時間に日向もフラクタル下も路面温度が気温に対して2-3℃低下し、路面が冷却されていることがわかる。しかし、降水がなくなってから30分程度で、降水前の温度差に戻ってしまい、日向では降水以前に蓄積した熱により大気が加熱されている。このことから、打ち水等の一時的な散水は、その瞬間には表面温度を下げる効果があるが、その効果は短時間しか持続しないことがわかる。

3.3 地表面温度の季節変化

新風館の実験終了後に行った八幡高校屋上でのフラクタル下と日向の屋上面温度の長期測定結果を図6に示す。1日の温度変化の特徴は、新風館での測定と同様なので、季節的な特徴を見るために、昼間(9時-15時)と夜間(21時-3時)で、気温と地表面(屋上面)温度との差を1カ月平均した。この平均操作は天気に関わらず、すべての測定値を対象に行った。

図6aは昼間の平均的な屋上面温度の季節変化である。フラクタル日除け下の屋上面温度は期間全体を通して気温と大きな差はないが、日向の屋上面は気温よりかなり高くなっており、その温度差は日射が強くなる夏に特に大きい。これは、屋上面での放射収支が加熱側に大きくずれていることを示している。

夜間の屋上面温度の季節変化を図6bに示す。ここでもフラクタル日除け下は気温とほとんど変わらない。それに対して日向の屋上面は、夜間の放射冷却で気温より低くなっていることがわかる。その温度差は冬季ほど大きい。放射冷却の強さは季節によってそれほど大きくは変わらないので、夏に気温との温度差がほとんどなくなるのは、昼間の蓄熱によるものと思われる。

8月の新風館での測定では、夜間でも日向の地表面温度は気温よりかなり高く、フラクタル下の地表面温度と比べても高くなっていたが、八幡高校屋上での観測では7月の夜間の屋上面温度はフラクタル下も日向もほとんど差がない。これは、屋上面が防水シートで覆われていて熱慣性が小さいために、放射冷却で冷やせる程度の熱量しか溜まっていなかったからではないかと思われる。

夜間の放射冷却に対するフラクタル日除けの効果を検証するため、1m²のガラスを冬季に置いて霜が降りる様子を比較した。日向に置いたものを図7a、フラクタル下に置いたものを図7bに示す。これらの写真は2009年1月14日の朝8時ごろ撮影したものである。日向に配置したガラスに

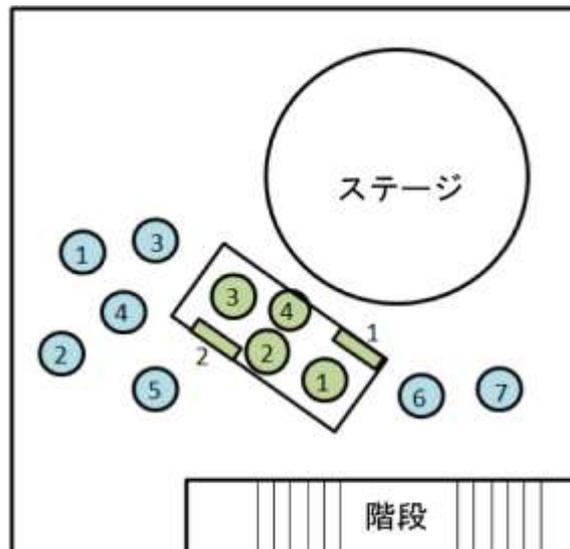


図8 フラクタル日除けとパラソルのテーブル配置図
 ● : フラクタル日除け下のテーブル及び長椅子
 ● : パラソル下のテーブル

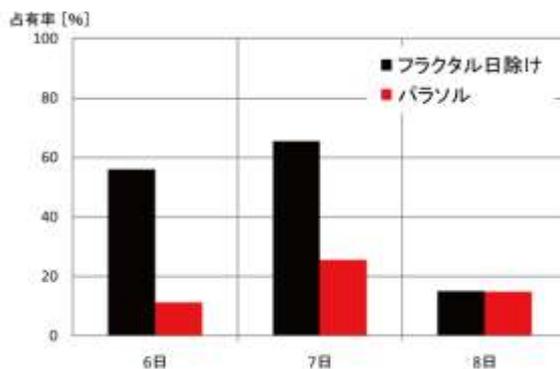


図9 椅子の占有率 解析結果
 調査時間は6,7日:12:00-14:00,
 8日:12:30-14:00である。

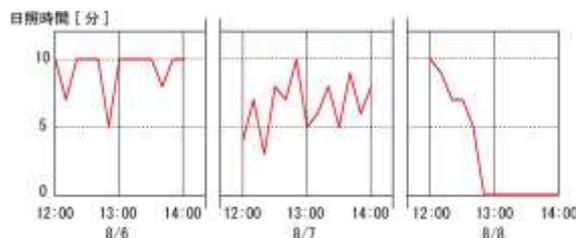


図10 2008年8月6日~8日の気温及び日射量
 6,7日に比べ、8日は観測開始直後に日照がなくなった。

はかなり霜が降りて、堅く凍結していたが、フラクタル日除け下ではうっすら霜が降りる程度で、少し日光が当たると融けて蒸発してしまった。このことから、フラクタル日除けは、屋上面の夜間の放射冷却を和らげる効果もあることがわかる。

1年を通して考えると、フラクタル日除けは、昼間の日射も夜間の放射冷却も抑える効果があるが、日射が強い夏季には、相対的に日射遮蔽の効果が強く、冬季には相対的に放射冷却を抑える効果が大きくなる。結果として、地表面での放射収支の絶対値が、フラクタル日除けがない場合に比べてかなり小さくなり、地表面温度は気温に近い変動をするようになる。

4. フラクタル日除けの官能評価

ここまで、熱に関する物理的な量の解析をしてきたが、人が感じる暑さは、そのような物理量だけでは決まらず、感覚的な要因も大きい。そのような官能評価は、個人差や先入観を取り除くことが難しいが、幸い新風館での実験は不特定多数が出入りする公開実験であったため、予備知識をもたない人々の行動から、人間の感覚による評価が可能であると考えた。そのため、あえてフラクタル日よけに関する詳しい説明は表示せずに、フラクタル日除けの下とパラソル下に置かれた椅子に座る人数と座っている時間を観察した。

4.1 観察概要

新風館に設備されているパラソル7個を使用して、フラクタル日除けとの比較調査を行った。パラソルにはテーブルを1個ずつ配置し、フラクタル日除けにはテーブルを4個と、長椅子を2個配置した(図8)。調査内容は利用人数とそれぞれの利用時間である。期間は2008年8月6日~8月8日の3日間とし、6~7日は12:00~14:00、8日は12:30~14:00の時間帯で行った。解析は、それぞれの椅子の占有率と、椅子に座る人の特徴的滞在時間について行った。

4.2 解析結果

(1) フラクタル日除けとパラソルの椅子の占有率解析

椅子の占有率は、観察時間内に、各テーブルを使用した人数と滞在時間から延べ滞在時間を計算し、観察時間に椅子の数をかけたもので除して百分率で表した。この際、フラクタル日除けの下に配置した長椅子は、複数の人が座るため、対象外とした。

図9に椅子の3日間の占有率解析の結果を示す。6~7日はパラソルに比べてフラクタル日除けの方が数倍占有率は高く、8日のそれはあまり変わらない。京都地方気象台の10分値日照データ(図10)をみると、6~7日の観測時間は日照時間が多くあったのに対し、8日は観察開始直後に日照がほぼなくなったことがわかる。

この3日間で見ると、日照がない時には占有率に差は

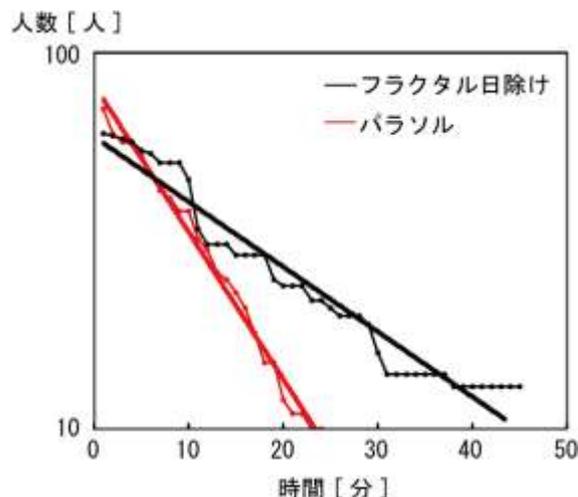


図11 椅子に座る人の特徴的滞在時間(6-7日)
縦軸は対数軸である。特徴的滞在時間は、フラクタル日除けは25分、パラソルは11分である。

(a)



(b)



図12 太陽光100%遮光時(正午)の様子(a)と光が漏れてきた時(13時半)の様子(b)。

なく、日照があるときには、パラソルに比べてフラクタル日除けの方が明らかに占有率が高い。

(2) フラクタル日除けとパラソルの椅子に座る人の特徴的滞在時間の解析

椅子に座った人が、その椅子に座っている時間を分単位で求め、すべての人が同時に座ったとして、経過時間とともに座っている人数の変化を示したのが図 11 である。なお、この解析には、よく晴れて日照時間が比較的長かった 6、7 日のデータを用いた。

このグラフは単調減少するが、指数関数的な減少をすると仮定して近似曲線（グラフ上は直線）を求めて、その傾きから、特徴的滞在時間を求めた。その特徴的滞在時間はフラクタル下で約 25 分、パラソル下で約 11 分であった。このことから、パラソルに比べてフラクタル日除けの方が長く座っている人が多いことがわかる。

ここで求めた椅子の占有率と滞在時間が直接、暑さの指標になるわけではないが、少なくとも、占有率が高く滞在時間が長いということは、その分、暑さも含めて不快感が少ないことを意味していると考えられる。したがって、フラクタル日除けは、感覚的にも心地よい環境を作ることができていると考えられる。

4.3 視覚効果

このフラクタル日除けは特定の方向の日射は 100% 遮ることができるが、時間とともに太陽が移動すると、木漏れ日のように太陽光が漏れてくる。この時、物理的にはフラクタルの下放射環境は明らかに悪化しているはずであるが、実際にその場にいると、感覚的には必ずしも「悪化」したように感じられない。

図 12 は、100% 遮光した時と、光が漏れてきた時の様子である。この時は中庭で行われるイベントの都合でフラクタル日除けの方向が正午に 100% 遮光する方向に向けられており、図 12a は正午、図 12b は午後 1 時半の様子である。

この 2 枚の写真を比べると、図 12a は曇りの日のような風景でメリハリがなく、どこことなく気だるさが漂う。それに対して図 12b は、差しこむ光がきれいで、爽やかな印象を持つ。実際に現場にいる感覚でも、差しこむ光による暑さよりも、この爽やかさのほうが上回っている感じがする。

今回の実験では定量的な測定ができなかったが、人間の暑さに関する感覚についても、このような視覚的な効果がかなり効いていると思われるので、今後、心理的、生理的な面からの検討が必要であると思われる。

5. まとめ

本論文では、フラクタル日除けによる放射環境の改善効果を検証した。

2008 年夏の新風館での公開実験で、熱赤外に加えて可視光と近赤外の放射環境を測定した。その結果、フラクタル

日除け下は、パラソル下と比較して可視光では比較的明るいものに対して、近赤外、熱赤外の放射量が少ないことがわかった。すなわち、フラクタル日除けは明るさを確保しつつ、暑さを感じる赤外線放射量を低下させる効果がある。

また、地表面温度を計測した結果、フラクタル日除け下は常に日陰になっているわけではないのにも関わらず、年間を通して、気温に近い温度を示すことがわかった。これは、フラクタル日除けが地表面の極端な放射収支のアンバランスを防いでいることを示している。

さらに、フラクタル日除けとパラソルの下の椅子に座る人を観察することで、人間の感覚による評価を試みた。その結果、日照がある程度ある環境下では、フラクタル日除け下はパラソル下に比べて、椅子の占有率が高く、さらに、一度座った人がより長く座っていることがわかった。このことから、物理的な量だけでなく、人間の感覚としても、フラクタル日除けは「心地よさ」をもたらしているものと考えられる。

全体として、フラクタル日除けの下は、木漏れ日状の光を受けるため明るく感じるが、赤外線の放射量が少ないために、暑さをあまり感じず、パラソルなどの日よけに比べて心地よい空間を提供できると考えられる。

謝辞

この研究は株式会社積水インテグレーションリサーチ、株式会社関西 TLO、京都市、新風館の協力で行われた。

参考文献

- (1) 酒井敏, 中村美紀, 大西将徳, 飯澤功, 古屋姫美愛, フラクタル日除け 樹木の形に学ぶ新発想のヒートアイランド対策, 日本ヒートアイランド学会誌, Vol.5(2010), pp.17-22.
 - (2) 浅野耕一, 梅干野晃, 山田貴代, 松永徹志, 建築外部空間における熱環境解析のための 3 次元熱画像の製作方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.508(1998), pp.35-41
 - (3) Jiang He and Akira Hoyano, Measurement and simulation of the thermal environment in the built space under a membrane structure, Building and Environment, No.44(2009), pp.1119-1127
 - (4) 足永靖信, 屋外空間における短波および長波の放射強度の分布に関する実測, 日本建築学会計画系論文集, No.500(1997), pp.71-77
 - (5) 小倉義光, 一般気象学(1984), 東京大学出版会
 - (6) 酒井敏, 梅谷和弘, 飯澤功, 伊藤文, 小野耕作, 矢島新, 飴村尚起, 森永修司, 都市熱環境観測システムの開発研究, 天気, vol.56(2009), pp.337-351
 - (7) Sakai.S, A.Ito, K.Umetani, I.Iizawa and M.Onishi, A Practical Pyrgometer Using the Representative Angle. J. Atmos. Ocean. Tech., vol.26(2009), pp.647-655
- (Received November 4, 2010, Accepted March 24, 2011)