

フラクタル図形を用いた平行光の拡散に関する研究

A STUDY ON THE EFFICENCY OF FRACTAL SUNSHADE AS SUNLIGHT DIFFUSER

環境図形科学研究室 春田 昌也

近年、フラクタル図形である疑似樹木形状の日除けを用い、眺望を確保した上で熱環境を改善する方法が提案されている。フラクタル図形とは自己相似を用いた繰り返し図形であり、日除けの形状はフラクタル次元 2 次元である。本報では、フラクタル図形単体に平行光を入射させるシミュレーションを行い、拡散光の空間分布を分析し、拡散材としてのフラクタル図形の有効性を明らかにした。また、この空間分布をもとにフラクタル日除けの使用方法についてモデル提案を行った。

Recently, 2D fractal sunshade which is a pseudo random trees, was proposed as a method for improving the thermal environment while securing the view through the shade. The fractal shape is defined as repeated figure with self-similar. In this paper, incident sunlight to a single fractal sunshade was simulated at first to analyze the spatial distribution of the scattered light, and evaluate the effectiveness of the fractal shape as a light diffusion material. Then, a fractal sunshade usage mode was proposed based on of the spatial distribution.

1. はじめに

冷暖房負荷の増大や過度の光量の流入等の熱、光の害を避け、量、質を考慮した日照日射の制御を行うためには日除けは不可欠な設備である。また、採光面を考慮すると太陽高度に依存せずに入射光束を均等拡散でき、窓に設置した時に眺望が確保できるパッシブな装置が求められる。この条件を満たす拡散日除け装置として酒井らは正四面体フラクタル図形を用いた日除けを提案している^[1]。図 1 に示すように、この日除けは全国各地に提案されており、大阪市立大学高原記念館にもその一例として設置されている。この日除けを用いることで、熱環境の改善が明らかにされ、地表面温度を約 10 度低下できることが知られている^[1]。しかし、このフラクタル図形が導く相互反射を含めた光の流れについては明らかにされていない。本報では、アメリカ合衆国のローレンス・バークレイ国立研究所が開発した拡張可能な準モンテカルロレイトレーシング照明シミュレーションプログラムである RADIANCE を用いて、フラクタル図形単体に平行光を入射させた際の拡散性を分析し、拡散光配光分布の可視化を行い、フラクタル図形の有効性を明らかにするものである^[2]。また、求められた拡散光配光分布をもとに、フラクタル図形の実空間への提案について検討した。

2. フラクタル図形とは

フラクタル図形とは、図 2 のように図形の「部分

と「全体」が自己相似形であるもので(図 2 参照)、海岸線や樹木の枝分かれの形状などに見られる複雑な図形を数学的に表現したもので、シェルピンスキーのギャスケットなどがよく知られており、平面だけではなく立体にも応用されている。これらのフラクタル図形は無限に繰り返される自己相似のため、正確に作図することはできない。また、これらの図形の特徴は、整数以外の値を含めたフラクタル次元(以下 FD)により評価されることである。FD とは、より細かなスケールへと拡大するにつれ、あるフラクタルがどれだけ完全に空間を満たしているかを示す統計的な量である。空間の分割数 l とその空間を N 個で満たす時、FD は

$$FD = \log_l N \quad \dots \dots \dots (式 1)$$

と表される^[3]。

式 1 より、シェルピンスキーのギャスケットでは空間を 2 分割する中に正三角形を 3 個で満たす図形が繰り返されるため、FD は 1.58 次元である。フラクタル日除けである正四面体フラクタル図形では空間を 2 分割する中に正四面体を 4 個で満たす図形が繰り返される



図 1 フラクタル日除け

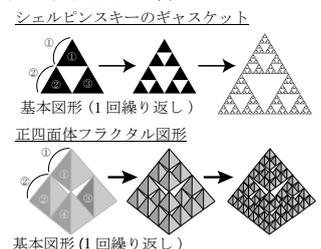


図 2 フラクタル図形

ためFDは2次元となる。つまり、形状としては3次元(立体)だがFDでは2次元(平面)の物体となり、空間的な平面と解釈することができる。

3. 正四面体フラクタル図形の拡散性の評価

3.1. 拡散性の評価方法

既存の拡散装置や他のフラクタル図形と比較し、正四面体フラクタル図形の評価を行う。光環境の分析では拡散性について定義することは難しく、障子紙のような透過拡散面とブラインドのような日照調整装置を同様に評価する手法は提案されていない。そこで本研究では、入射光の裏側の光の流れに注目し拡散性を評価することを試みた(図3参照)。

ブラインドや障子紙は、強い法線照度を持つ平行光(直射日光等)の強度と指向性を緩和するために設置され、装置がなければ室内には指向性の強い平行光が入射する。開口部に拡散装置を設置すれば、強い平行光が入射する。拡散装置が光を拡散、透過させることにより入射光の反対側には分散した光の流れが出現し、反対側に設置された面は、平均的な輝度分布となる。このため、この輝度分布を確認すれば、装置の拡散性を評価することができる。

各図形のモデリングには、モデリングツールであるBlender2.67を使用した。そして、RADIANCEを用いて評価図形を500mm立方体内に収まる大きさで中心に配置し、図4のように評価図形の重心から水平方向に基準方向を設定し、平行光の入射角度を設定した。入射方向は、実空間の太陽光の高度の変化を考慮して入射方向は0度から80度まで10度刻みとし、90度の場合は直接光源を見ることになるため取り扱わない。レンダリングは、評価図形を真下から見上げる形として平行投影を行い、その輝度分布と平均輝度を算出した。見上げ面の輝度分布は、輝度 0cd/m^2 の空間に評価図形が浮かぶ状態となるため、均等拡散面の立方体では光が裏側に回ることがないため、輝度分布画像はすべての点で 0cd/m^2 となる。この方法を用いて、正四面体フラクタル図形、既存の拡散装置(ブラインド、障子紙)、他のフラクタル図形(シェルピンスキーギャスケット)の場合との比較を行った。評価図形の拡散反射率を表1に示す。平行光の強さは法線照度 $10,000\text{lx}$ とした。

3.2. 正四面体フラクタル図形の結果と分析

正四面体フラクタル図形の輝度分布を図5に示す。水平方向である入射角0度、鉛直方向に近い80度の場合を含む全てのケースで輝度値が正の値となる部分が出現した。入射角度別の各拡散評価図形の平均輝度の値を図6に示す。平均値は輝度値が正の値となる部分の値の平均である。フラクタル図形の隙間を含むレンダリング正方形画面内全体の平均値ではない。

シェルピンスキーのギャスケットでは、裏側に光は回り込まず、どの角度においても 0cd/m^2 である。

表1 各図形の反射(透過)率

正四面体フラクタル図形(拡散反射率)	0.6
ブラインド(拡散反射率)	0.6
障子紙(拡散透過率)	0.36
シェルピンスキーのギャスケット(拡散反射率)	0.6

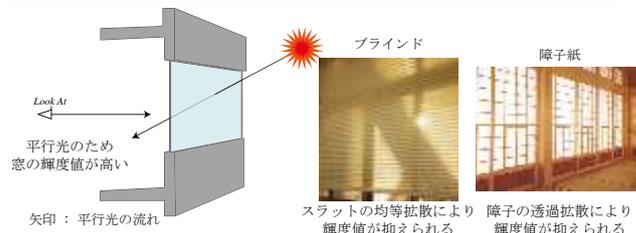


図3 拡散性の評価方法

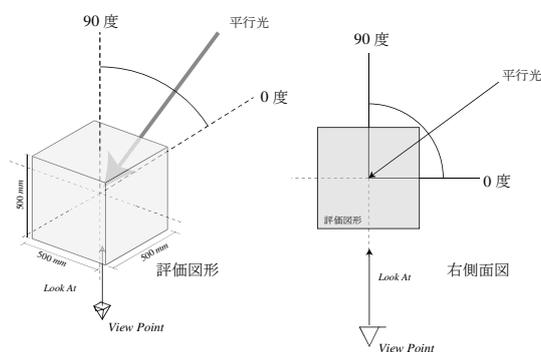


図4 シミュレーション評価方法

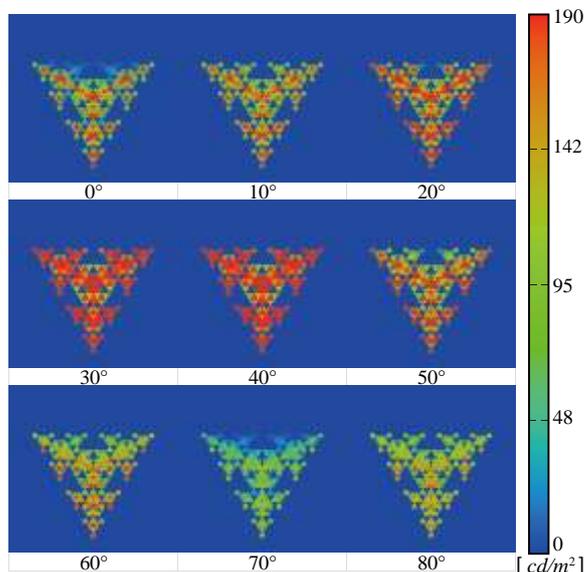


図5 正四面体フラクタル図形の輝度分布

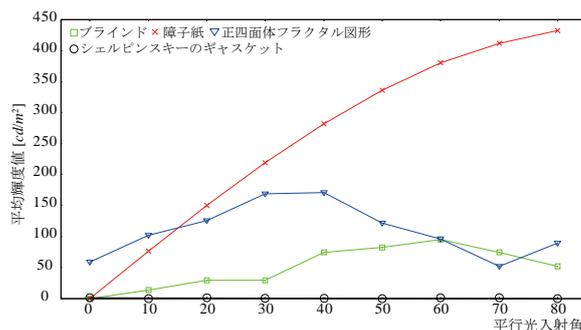


図6 入射角度別の各拡散評価図形の平均輝度

既存の拡散装置では、平均輝度値は平行光の入射角に依存しており、特に障子紙では余弦則に従う結果となった。一方で正四面体フラクタル図形の平均輝度値は、既存の拡散装置と比べて平行光の角度によらず一定の値となった。特に正四面体フラクタル図形では、平行光入射角が低角度の場合、既存の拡散装置よりも輝度の値が高い結果となった。これは、正四面体フラクタル図形が拡散装置としてだけでなく、昼光照明が望めない(太陽高度0から10度)時間帯^[4]においても光を室内に入射させる採光装置としても機能する可能性を示している。

3.3. 方位変化に伴う輝度変化の検討

正四面体フラクタル図形の方位を変化させた場合の見上げ面輝度の安定性に関する検討を行った。図7に示すように方位角は30度、45度、60度と変化させそれぞれの場合について高度0度から80度まで10度刻みに変化させた場合の見上げ輝度の平均値を算出した(図8参照)。平行光の強さやフラクタル図形の拡散反射率は前節の検討と同様である。

図8のように平均輝度値は方位変化の影響は小さく、平行光の入射角に依存しないことが分かった。また、平行光入射角が低角度で大きな変化が見られ、方位角30度で入射角が0度の場合、輝度値がほぼ0cd/m²となった。これは、正四面体の面構成上この角度からの平行光は拡散せず、有効な拡散性を得られていないことを意味している。つまり、設計等にフラクタル日除けを用いる場合、拡散性を期待できない方向に留意しなければならない。さらに、平行光を鉛直下に落とす日除けとして考えた場合、方位角0度の入射光の場合が理想的であることが分かった。正四面体フラクタル図

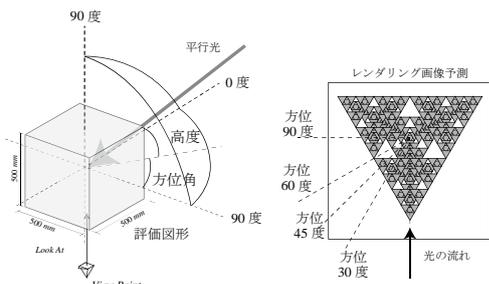


図7 方位変化の方法

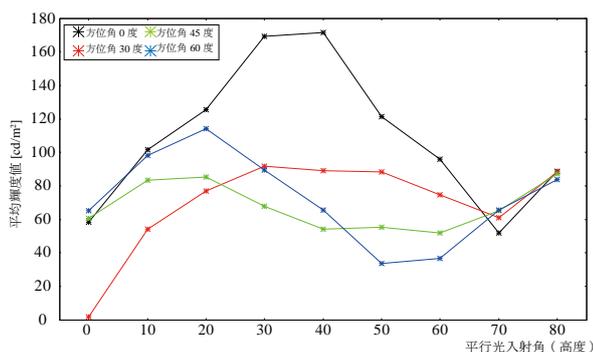


図8 方位角度変化入射角度別の平均輝度

形では以上のような結果となったが、これはFD2次元のフラクタル図形に共通する特徴であるのか、正四面体フラクタル図形固有の特徴なのか明らかではない。そこで、次に立方体を用いてフラクタル図形を作成しフラクタル図形のFDと拡散性の関係について検討を行った。

4. 立方体フラクタル図形

4.1. 立方体フラクタル図形モデリング

フラクタル日除けとして用いられている正四面体フラクタル図形では、底面が三角形のため日除けとして配置を考えることが難しい。また正四面体を用いた他のFD2次元のフラクタル図形を発見することが困難である。そこで、立方体を用いた底面が正方形となるフラクタル図形を提案し、FDの変化とフラクタル図形の配置方法の違いを検討した。ここでは、空間的に2次元の広がりを持つことが相互反射による拡散性に大きく影響すると考え、立方体フラクタル図形として立方体の面を最大限に利用するため、全ての軸方向へ平行投影した際に平面に圧縮されるフラクタル図形を考案しそれを立方体フラクタル図形として検討を行った(図9参照)。

4.2. 立方体フラクタル図形の拡散性の評価

立方体フラクタル図形で正四面体と同様のシミュレーションを行った結果の輝度分布を図10に示す。拡散

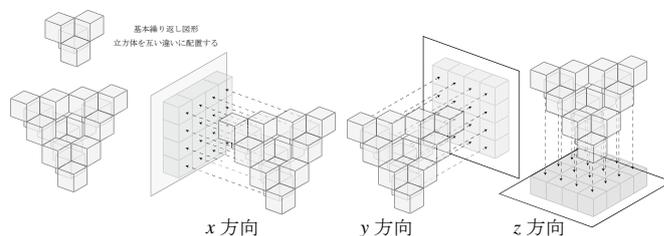


図9 立方体フラクタル図形のx, y, z方向から平行投影

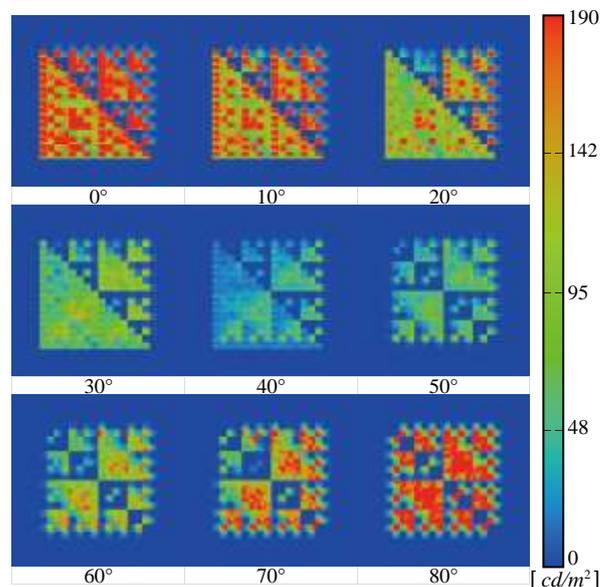


図10 立方体フラクタル図形の輝度分布

反射率は0.6とした。

前節の結果と比較した結果、正四面体フラクタル図形と同様に拡散性が平行光入射角に依存しないことが分かった。低角度の入射光の採光装置としてフラクタル図形に注目すると、正四面体フラクタル図形より水平方向に近い入射と、立方体フラクタル図形は光を鉛直下に採り込む性質が強いことが分かった。

4.3. フラクタル次元の変化と拡散性の検討

FDと拡散性の関係の検討を行った。FD2次元の基本図形として立方体フラクタル図形の2回繰り返しを用い、その図形から立方体を増減させ、それを2回繰り返すことでFD1.25から2.75まで0.25ずつ変化させた図形を作成した(図12参照)。各FD図形を用いた場合の輝度分布を図13に示す。さらに各分布から平均輝度を算出し、その値を平均することで総合平均輝度として比較を行った(図14参照)。

この結果、FD2次元以上では、密になった部分に拡散光が入射し、内側から外側に向かう光がなく、拡散しない。FDが2次元以下では相互反射を繰り返さずに1次反射のみで完結している。空間的にFD2次元のフラクタル図形では、相互反射が効率よく行われ、光が空間全体に広がることが分かった。

4.4. ランダム配置とフラクタル配置の違いの検討

フラクタル図形の自己相似の立方体配置についてラ

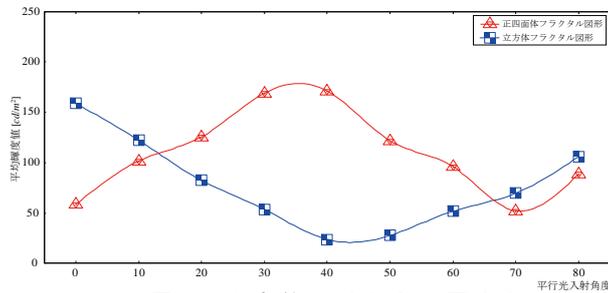


図11 立方体フラクタル図形と正四面体フラクタル図形の平均輝度の比較

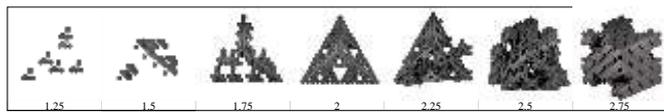


図12 FD変化フラクタル図形

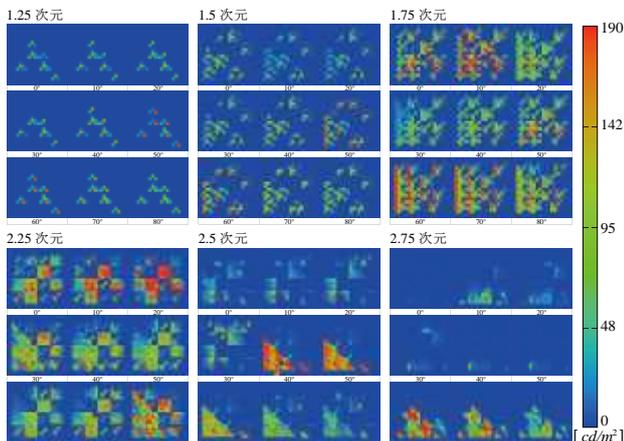


図13 各FD平行光入射角別の輝度分布

ンダム図形の場合と比較して検討した。ランダム図形の配置は、図15に示す3種の手法で検討を行った。

階層ランダム

縦方向の大きさを維持しながら各水平レベルの256スペースを16個ずつの立方体で埋め、16層で256個の立方体の配置方法である。

ハーフランダムフラクタル

4分割された立方体(64スペース)に立方体を16個ずつランダムに配置し、その図形を2回自己相似させることでフラクタル図形と同じ立方体数を持つ図形とした。ランダムとフラクタルを半分ずつ混合した図形である。

フルランダム

16分割された立方体(4096スペース)のうちランダムに256個の立方体を配置した。完全なランダムなため、x, y, z方向に大きさが維持されない可能性がある。

それぞれの輝度分布を算出し、総合平均輝度による分析を行った(図16参照)。

総合平均の結果から、全角度において拡散性が高いものは、階層ランダムのように厚みが確保されているものが最重要であり、次に拡散反射効率がよい規則性、面と面で反射が繰り返され外側に拡散しない面同士が重ならないことが重要となった。フルランダムでは1部では、総合平均が高いものが存在するが、厚みと規則性がないので総合平均は最も値が小さい。厚みを確保しつつ、面の重なりを作らないような配置を考えると、フラクタル図形の自己相似を用いる必要がある。

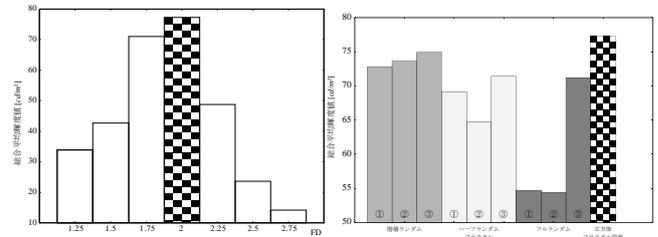


図14 FD別の総合平均

図16 ランダム総合平均

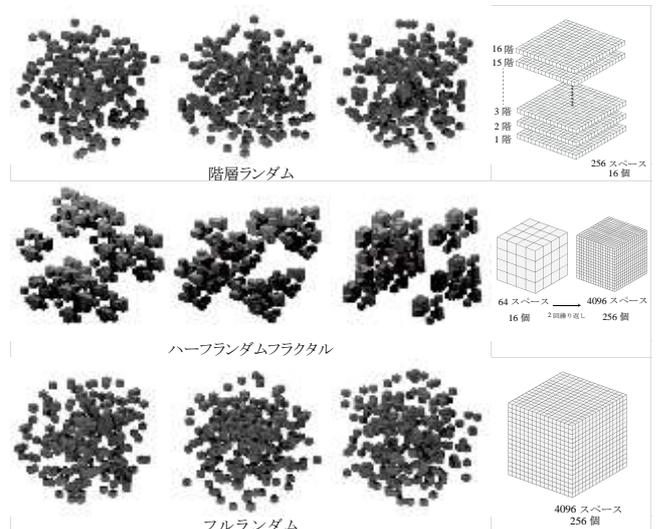


図15 各ランダム図形の作成方法

5. 拡散反射光の配光分布の検討

5.1. 配光分布の算出方法

FD2次元のフラクタル図形は空間的に広がるため、空間的な光の流れを把握する必要がある。そこで、照明器具などに用いられる配光曲線のようにフラクタル図形の拡散光の分布について検討を行い、フラクタル図形の拡散性による有効性を検討した。

半径1m球面上に離散的に設定した照度算出点(等立体角分割で4097点)を用い、中心に0.5m立方の評価図形を置いた場合と置かない場合の照度分布の差分を求めた。フラクタル図形に入射させる平行光の角度は0~90度の10度刻みで変化させた(図17参照)。理想の拡散状態においては、全ての算出点の照度値が等しく、すべての角度を通して偏差のない均等な分布となるが、実際にはそのようにはならず、光の入射角度に応じて方向別の反射光の強度は異なる。そのため拡散透過面の立方体を理想的な拡散性を持つ比較対象として検討を行うこととし、正四面体フラクタル図形、立方体フラクタル図形の拡散反射光配光分布と比較を行った。それぞれのケースの配光分布(対称性を考慮して半球面のみ記載)を図18に示す。

5.2. 配光分布の分析

配光分布は差分値のため、平行光が十分届く算出点においてはマイナス照度となる算出点も存在する。そのため、フラクタル図形なしで光が届かない場所へ光が到達している部分のみを考慮した。差分が0lx以上の算出点のみを対象とし、それらの算出点の値の平均値と標準偏差で評価を行った。図19に求められた平均値と標準偏差(ひげの大きさ)を示す。両フラクタル図形とも拡散反射の分布に近い結果となった。標準偏差は正四面体フラクタル図形より立方体フラクタル図形の方が小さいことから、立方体フラクタル図形の方が拡散性は高いことが分かった。拡散透過立方体より標準偏差が小さく、立方体フラクタル図形の拡散性が極めて均等であることが分かった。

5.3. 方位変化による配光分布の検討

直射日光は変動するため、フラクタル図形の方位変

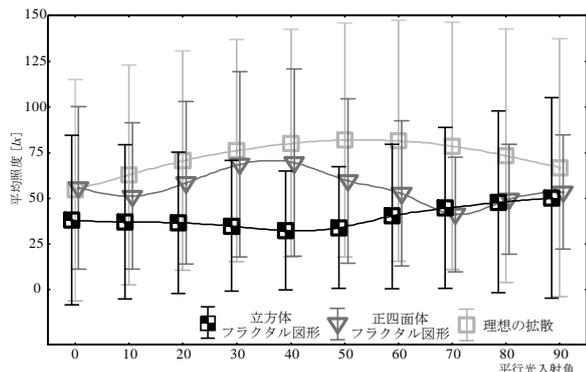


図19 各入射角別の拡散反射光配光分布の分析値(ひげの大きさ標準偏差に相当)

化についても同様の分析を行い均等拡散する角度と不得意な角度について検証を行った。図17に示す各フラクタル図形に対して図の奥向きに30度、45度、60度の3方位を設定し、平行光の角度は0~90度の10度刻みで変化させて検討した。ここで得られた特徴的なものを図20に示す。

正四面体フラクタル図形の入射高度が低角度の場合は、方位による変動が大きかった。方位角60度で入射角0度の場合は平均値が高いが、1次反射面からの光が主で標準偏差が大きいため拡散性能は低い結果となった。方位角度0度で入射角度30度の場合に最も平均値が高く標準偏差も小さくなった。この条件が最も拡散性が高いことがわかった。一方で、立方体フラクタル図形では方位によっての変動が少ない結果となった。

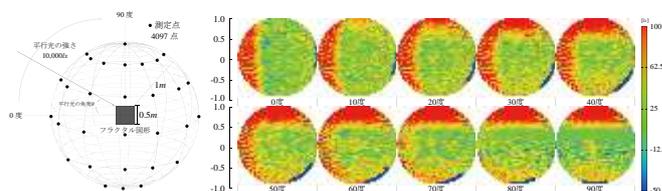


図17 照度の算出方法と理想の拡散状態

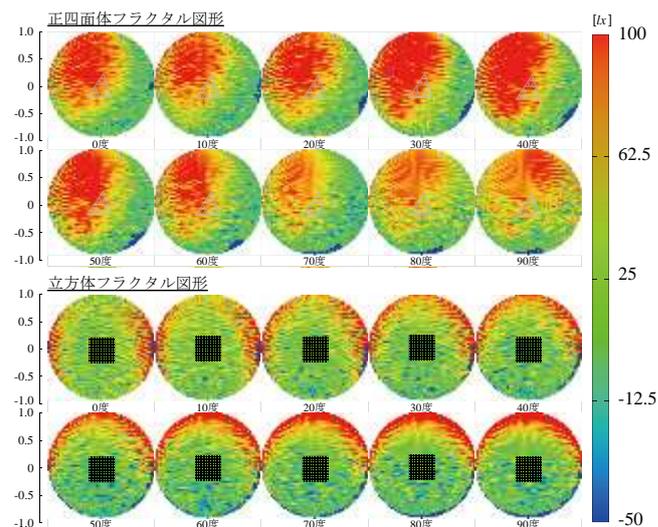


図18 正四面体フラクタル図形と立方体フラクタル図形の拡散反射光配光分布

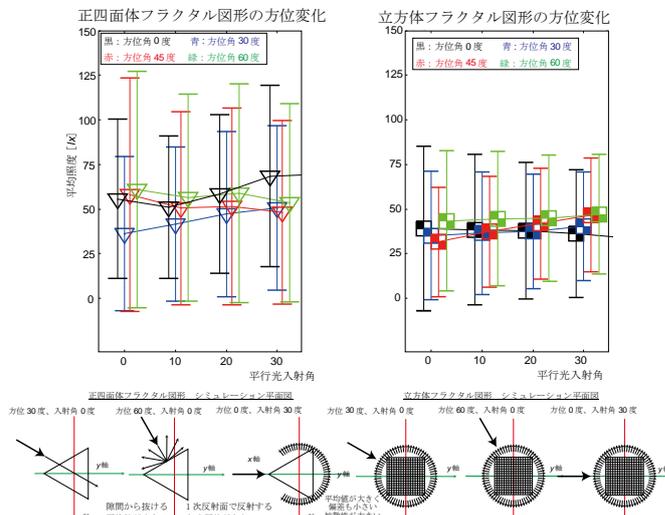


図20 特徴的な方位変化の配光分布の分析値

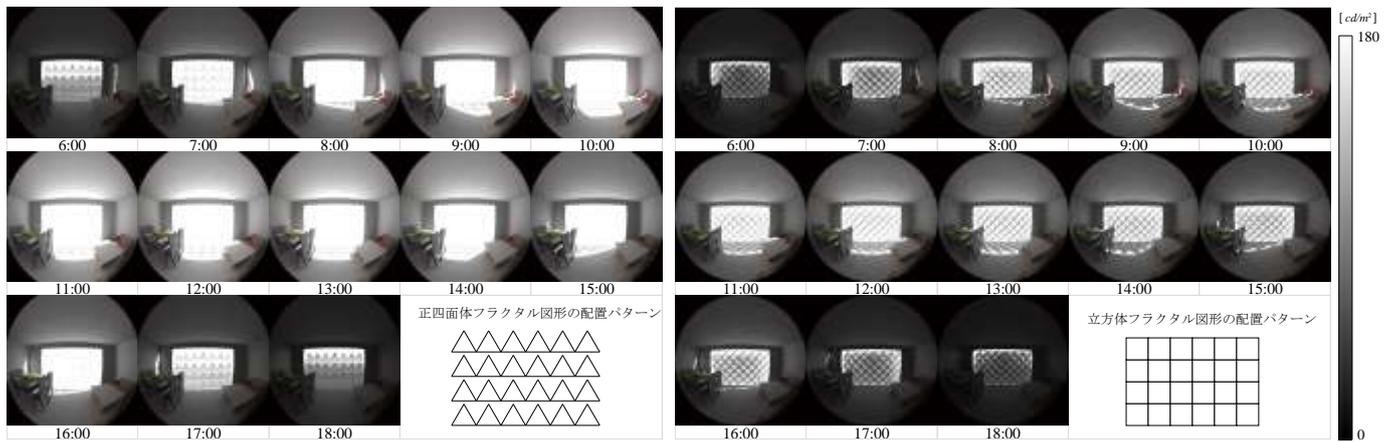


図 22 春分の実空間モデルにおけるシミュレーション結果(左:正四面体フラクタル図形,右:立方体フラクタル図形)

6. 実空間におけるフラクタル型日除け設置の検討

6.1. 実空間モデルの設定

実空間にフラクタル型日除けを設置する場合の検討を行った。前章の検討から正四面体フラクタル図形は方位角0度高度30度で南中時の直射日光を拡散させるために東西軸に約48度回転を加えて配置した。立方体フラクタル図形は回転させない。これらをフラクタル日除けとし実空間における拡散性を検討した。実空間モデルとして国土交通省が提案している自立循環型モデルから居間部分のみ選択した^[5]。南側窓に日除けを

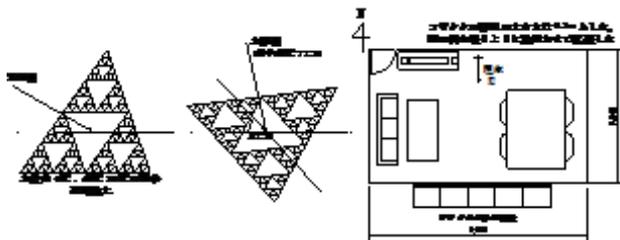


図 21 モデル平面図とフラクタル図形の角度の決定

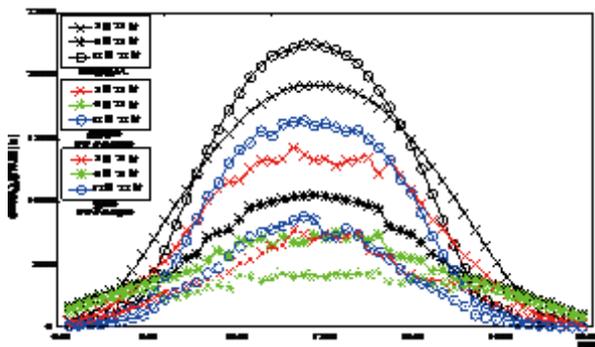


図 23 季節時間ごとの平均机上面照度
(左:正四面体フラクタル, 右:立方体フラクタル)

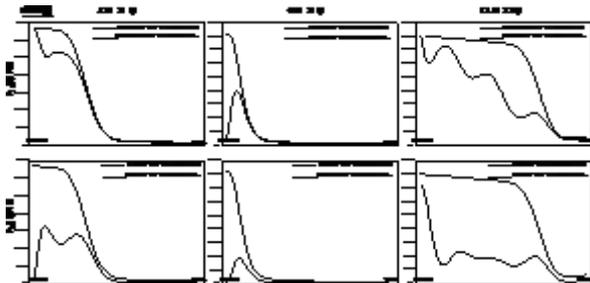


図 24 フラクタル図形の室内南北机上面照度

配置して検討した(図 21 参照)。春秋分, 夏至, 冬至の3日間の6時から18時までCIE晴天時を用いて1時間ごとにシミュレーションを行った。結果のうち, 春分の結果を図 22 に示す。また, 机上面照度についても15分毎に同季節同時間で算出した(図 23 参照)。

6.2. 実空間モデルの分析結果

南中時の太陽高度である12時を採用し, その時の平均机上面照度の季節ごとの変化を検討した。机上面照度は, 1681点の算出点の中から室中央南北に相当する41点を抽出して計算を行った(図 24 参照)。図のように, 直射日光によって拡散される光やフラクタル図形の隙間から漏れがあるため, 照度のピークが複数存在する結果となった。既存の拡散装置と比較して, 机上面照度のピークが室内側に移動することが分かった。

7. まとめ

検討を行ったFD2次元のフラクタル図形は拡散性に優れ, 拡散材として効率よく相互反射をすることが分かった。平均輝度一定となることから拡散装置だけではなく, 昼光照明が望めない時間帯の光として室内に取り入れる採光装置としても利用可能であると考えられる。また, 拡散反射光配光分布を求めることで, 正四面体フラクタル図形と立方体フラクタル図形の性能の違いを検討し, 正四面体フラクタル図形では構成上30度や60度といった角度には拡散能力の強弱が現れたのに対して, 立方体フラクタル図形では方位の影響が小さく, 拡散性が高かった。実空間におけるフラクタル型日除け設置の検討では, すべての拡散材において選択的に天空光だけを採光することはできず, 直射日光のみが多く採り込まれるため, 直射日光と天空光の適正なバランスを保った光量が確保できる拡散材となることが分かった。

参考文献

- [1] 酒井敏 中村美紀著 (2011)『フラクタル日除けによる放射環境改善効果』日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.6
- [2] 「RADIANCE」<<http://radsite.lbl.gov/radiance/>> (2013年12月1日 閲覧)
- [3] Kenneth Falconer 著 服部久美子・村井淨信訳 (2006)『フラクタル幾何学』共立出版
- [4] 平手小太郎著 (2011)『建築光環境・視環境(新・建築学)』数理工学社
- [5] 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修(2005)『自立循環型住宅への設計ガイドライン』財団法人 建築環境・省エネルギー機構発行

フラクタル図形を用いた平行光の拡散に関する研究

A study on the efficiency of fractal sunshade as sunlight diffuser

環境図形科学研究室
M12TD036
春田 昌也

研究背景①

建築物の開口部の巨大化 対策

既存の拡散装置

酒井らによる正四面体フラクタル図形を用いたフラクタル日除け

熱を遮蔽に特化すると開口部からの眺望がなくなる

正四面体フラクタル図形

大阪市立大学高原記念館

研究背景②

フラクタル図形とは

「部分」と「全体」が自己相似形を繰り返して作成される図形
海岸線や樹木の枝分かれの形状などに見られる複雑な図形を数学的に表現したもの
例) シェルピンスキーのギャスケット、カーペット

1 1回繰り返し 2 2回繰り返し 3 3回繰り返し 4 4回繰り返し

フラクタル次元(FD)

より細かなスケールへと拡大するにつれ、あるフラクタルがどれだけ完全に空間を満たしているかを示す統計的な量

$N = l^{FD}$

$FD = \log_l N$

ギャスケットの1回繰り返し(基本図形)

$FD = \lim_{n \rightarrow \infty} \log_3 3^n = \log_3 3 = 1.58$

研究の目的①

フラクタル日除けとなる正四面体フラクタル図形では

$FD = \lim_{n \rightarrow \infty} \log_4 4^4 = \log_2 4 = 2$

立体であるが空間的に2次元(平面)

隙間構造をなすため見通しを確保でき風通しが良い

森林にいるような木漏れ日

酒井中村らによりフラクタル図形を用いることで、地表面温度10度低下することが、知られている^[1]

しかし、これらのフラクタル図形の平行光の拡散については知られていない

フラクタル図形の拡散材の有効性 ← 光環境 → 実空間への提案

[1] 酒井敏 中村英紀著 (2011)『フラクタル日除けによる放射環境改善効果』日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.6

正四面体フラクタル図形

シミュレーション方法

拡張可能な準モンテカルロレイトレーシング照明シミュレーションプログラムであるRADIANCEを用いた

1方向から見た時の輝度による分析

①10度刻みずつ0から80度まで平行光を変化
②評価図形を真下から見上げる画像をレンダリング(平行投影)
③その輝度分布と平均輝度を算出

既存拡散装置(ブラインド、障子紙)

比較対象

正四面体フラクタル図形

正四面体フラクタル図形の輝度分布

入射角度別の評価図形の平均輝度

高角度

低角度

既存の拡散装置 → 平均輝度値は平行光の入射角に依存(障子紙では余弦則に従う)一方で正四面体フラクタル図形の平均輝度値は既存の拡散装置と比べて「平行光の角度によらず一定の値」
⇒ 平行光入射角が低角度の場合既存の拡散装置より輝度の値が高い
昼光照明が望めない(太陽高度0から10度)時間帯
採光装置としても機能する

正四面体フラクタル図形

方位変化に伴う輝度変化の検討

方位角30度

方位角45度

方位角60度

空間的に平面と考えられている正四面体フラクタル図形では図形内で内部から外部へ拡散しようとする相互反射を繰り返すため既存にはない拡散性をもつ

方位変化に伴う平均輝度

設計等にフラクタル日除けを用いる場合
拡散性を期待できない方向に留意
平行光を鉛直下に落とす日除け方位角0度
の入射光の場合が理想的

立方体フラクタル図形

正四面体からさらなるFD2次元のフラクタル図形を発見することが難しい
均等拡散面のため相互反射を繰り返し拡散性に影響
立方体フラクタル図形として**立方体の面を最大限利用**するための軸方向から平行投影した時にも平面に圧縮されるフラクタル図形を発見

基本図形 (1回繰り返し)

面を重ねるとそこで相互反射が繰り返されてしまう

フラクタル日除けである正四面体フラクタル図形と同じボリューム
立方体を互い違いに配置する方法1回繰り返し(基本図形)

4回繰り返し

立方体フラクタル図形

見上げ面輝度を算出

反射率は0.6

正四面体と同じく平行光に依存しないフラクタル図形の低角度の平均輝度が高いことに注目すると立方体フラクタルの方がより相互反射を繰り返して行っているためである。

立方体フラクタル図形

FDの変化と拡散性の検討 $FD = \log_2 N$

FD2次元を基本図形
この図形から立方体を増減
1.25~2.75まで0.25ずつFDを変化させた図形を作成

線分 → 立方体

それぞれの平均輝度から平均値をさらに算出してこれを**総合平均輝度**とした

FD2次元以上では密になった部分
拡散光が入射し**内側から外側**に向かう光がない
FDが2次元以下では相互反射を繰り返さずに1次反射のみで完結
空間的にFD2次元のフラクタル図形では**相互反射が効率よく行われ、光が空間全体に広がる**

立方体フラクタル図形

ランダム図形とフラクタル図形の違いの検討

立方体フラクタル図形と同じ最小構成数の立方体の個数256個と同様のスケールを持つ図形をランダム図形として3種9パターンを作成した。

階層ランダム
縦方向の大きさを維持

ハーフランダム
ランダムとフラクタルの半ずつの機能をもつ

フルフラクタル
完全なランダムなためx, y, z方向に大きさが維持されない

立方体フラクタル図形

ランダム図形とフラクタル図形の違い

階層ランダムの輝度分布

フルランダムの輝度分布

拡散性が高い図形とは、厚みを確保しつつ、面の重なりを作らないような配置を考えると、フラクタル図形の自己相似を用いる必要

ものは

1. 階層ランダムのように厚み
2. 次に拡散反射効率がよい規則性、面と面で反射が繰り返され外側に拡散しない面同士が重ならないこと

