

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420613

研究課題名(和文) 屋外空間の積極的な活用のためのフラクタル日除けによる快適空間創出手法の確立

研究課題名(英文) Study on creation thermal comfortable environment by fractal sunshade for actively use of outdoor space in urban area

研究代表者

三坂 育正 (MISAKA, Ikusei)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：30416622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フラクタル日除けを用いて快適な温熱環境の屋外空間を創出することために、フラクタル日除けの熱的特性を実験により把握し、パラメータ化することで空間のシミュレーションに活用することを目的とした。実験は日本工業大学内にある都市スケールモデルサイトで行い、フラクタル日除け下空間での暑熱環境緩和効果の確認や、表面温度上昇抑制のメカニズムとしての表面熱伝達率の算出を行った。さらに、得られた熱的特性をパラメータ化することで温熱快適空間の創出検討方法の構築を試み、汎用の屋内外総合熱環境シミュレーションソフトによるフラクタル形状日除け下空間の温熱快適性の評価の可能性について検証した。

研究成果の概要(英文)：In order to establish design technique for thermal comfortable environment with the fractal sunshade in urban area, the experiments to confirm the mitigation effects of thermal environment and to the thermal characteristic of the sunshade were carried out at comprehensive outdoor scale model site (COSMO) at Nippon Institute of Technology. As a result of experiments, increasing the division number of fractal, convective heat transfer coefficient is increased. The fractal sunshade has the characteristic to keep the surface temperature from rising by high convective heat transfer. Furthermore, the experiments with fractal sunshade products composed by AES resin. With the value of thermal characteristics, it will be possible to evaluate the effects of thermal environment improvement. Finally, the design technique of thermal comfort space under the fractal sunshade at every conditions, using the outdoor thermal environment simulation software of general-purpose is considered.

研究分野：建築環境工学

キーワード：ヒートアイランド 適応策 フラクタル日除け 対流熱伝達率 実験 数値解析

1. 研究開始当初の背景

近年、ヒートアイランド現象や地球温暖化による影響で、夏季における都市の気温上昇が顕著となっている。ヒートアイランド緩和に向けて、都市・建物の緑化や保水性舗装・建材、日射の高反射化などの対策技術が推進されているが、これらの技術は、日射反射や表面伝達特性、蒸発特性等の熱的な特性により効果の大きさが変化するため、効果の定量的な評価には、個別技術の熱的な特性を明らかにする必要がある。これらの対策技術の熱的な特性を屋外実験で評価し、得られた特性をパラメータ化することで、対策技術適用による効果を数値計算で事前に検討を行い、より効果的な対策を取り入れる設計手法はほぼ確立され、実践されている。

一方で、ヒートアイランド現象の進行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軽減していく対策としての適応策の推進が必要となっている。適応策では人の熱ストレスの軽減に着目しているが、都市の屋外空間を人がより活用するためには、夏季日中でも快適な空間を創出することが重要と考える。屋外空間のより積極的な活用を推進するには、利用目的に応じた温熱環境を想定した上で、日射遮蔽・表面被覆対策、ミスト噴霧などの暑熱環境緩和技術を組み合わせ、最適な空間を設計する手法を確立することが重要な課題である。

これまでの調査から、屋外環境では日射遮蔽による快適性の向上効果が大きく、アメニティ空間の樹木下における温熱快適性が向上し、空間利用の促進が確認できている。都市に樹木を増やすことでは理想的であるが、実際には生育環境・維持管理などの問題があり、樹木に代わる人工的な材料の適用も必要である。その中で、実験的な屋外オフィスの調査では、フラクタル日除けと呼ばれる特殊形状の日射遮蔽装置下の温熱快適性が高いことが明らかとなった。

フラクタル日除けは、フラクタル次元が2のチェルピンスキー四面体型の形状を持つ日除けで、大きさや形状の特徴から、表面温度の上昇抑制の特性を持つ、とされている。今後、屋外を積極的に活用する空間を創出する場合、フラクタル日除け等の効果的な技術の適用が想定されるが、空間の温熱環境の設計を行う上では、これらの技術の熱的な特性が必要である。フラクタル日除けには、コンクリートと比較して表面温度の上昇抑制効果があることを確認している。しかしながら、表面温度が上昇しない原理も含め、実験的な検証、モデル化が十分とは言えない。そこで、フラクタル日除けの表面温度上昇抑制効果を、実験により熱的な特性を得ることで評価し、そのメカニズムから最適な温熱環境となる空間設計への展開が課題であった。

2. 研究の目的

研究開始当初の背景から、暑熱環境対策技術の1つとしてフラクタル日除けに着目し、この日除けを用いて快適な温熱環境となる空間を設計していく手法を確立することを研究の目的とする。具体的には、フラクタル日除けを対象とした熱的特性の実験による評価とパラメータ化を行い、日除けのもたらす暑熱環境改善効果のメカニズムを明らかにする。ここで、日射の反射・透過特性、表面の対流伝熱特性と風の関係などの特性は、これまでに確立してきた様々な評価手法を用いることによって、形状や大きさ、日射反射特性などの条件を変化させた場合の表面温度や熱収支の違いを比較することで、特性を明らかにすることが可能と考える。フラクタル日除けの放熱・放射特性を実験により得るにすることにより、表面温度上昇抑制のメカニズムを明らかにすることができるものとする。

さらに、フラクタル日除けの熱的な特性の評価と平行して、空間の温熱環境を評価するために必要な熱的特性を整理し、数値解析による空間評価に必要なフラクタル日除けのパラメータの整理を行う。具体的には、実験で得られた熱的な特性について、数値解析によって空間を評価するために必要な境界条件としてのパラメータ化を行う。特性のパラメータ化では、気象条件（上空風速や太陽高度等）による関数化することを試みる。フラクタル日除けの熱的な特性のパラメータ化を行うことで、温熱環境改善効果の空間設計段階での予測・評価の可能性を確認する。

これらの研究成果を取りまとめ、都市や建築空間の計画・設計段階で、暑熱環境緩和に対してフラクタル日除けを対策の1つとして適用する場合に、フラクタル日除けの熱的な特性を用いて、空間の温熱環境を予め評価することで、より快適な空間創出を可能とする設計・計画手法を提案する。

3. 研究の方法

本研究は、大きく3つの内容から構成される。それぞれの研究方法について述べる。

(1) フラクタル日除けによる暑熱環境緩和効果の定量化

フラクタル日除けによる暑熱環境緩和効果を定量化するために、フラクタル日除けした空間の温熱環境について、フラクタル形状の違いによる効果を明らかにするための試験体実験を行った。暑熱環境緩和効果に関する実験は、日本工業大学内にある都市スケールモデルサイト(COSMO)において実施した。1.5×1.5×1.5mのコンクリート立方体4つで構成された交差点部分の上部にフラクタル日除け試験体を設置し、その下部空間を対象として温熱環境を測定する実験を行った。その際、フラクタル日除けの形状として分割数と色の異なる7種類の条件を設定した。試験体の種類と仕様について図-1に示す。

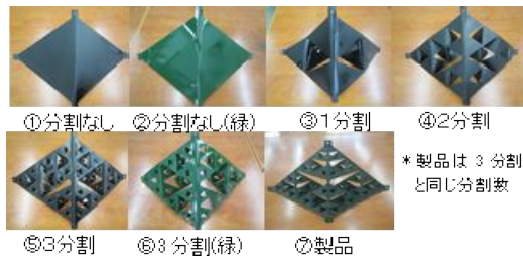


図-1 試験体の概要

実験はフラクタル日除け試験体を設置するフラクタル街区とコンクリート街区を設け、図-2 に示す通りに測定機器を設置して2013年8～9月に実験を行った。

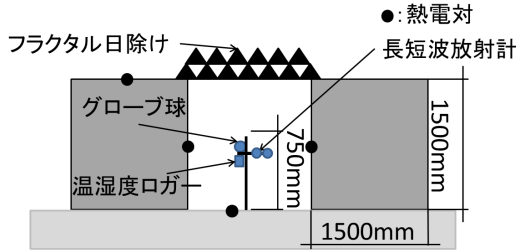


図-2 温熱環境の実験・測定概要

なお、暑熱環境緩和効果の評価に当たっては、温熱4要素(気温、湿度、グローブ温度、風速)と日射量の測定値から、平均放射温度(MRT)と温熱快適性指標である標準新有効温度(SET*)を算出して評価を行った。

(2) フラクタル日除けの放熱・放射特性の評価とパラメータ化

フラクタル日除けの熱的な特性や表面温度が上昇しないメカニズムを明らかにし、数値計算に必要なパラメータ化を行うため、フラクタル日除けを対象とした放射・熱収支測定による評価を行った。

日射透過・反射特性を含めた放射特性は、対象材料の上下に長短波放射計を設置した測定を行うことで評価を行った。フラクタル日除けは日射透過を抑制し、表面温度が上昇しにくいことに効果の特徴を持っており、表面からの長波放射(赤外放射)が少なくなるとされるため、日射遮蔽効果と合わせて、日除け下の温熱環境・放射環境の評価を行った。

熱的な特性の一つである表面熱伝達率については、ろ紙面水分蒸発量秤量法(ろ紙法)、熱収支連立法、熱収支残差法等複数の手法を用いた実験・解析による算出を行った。また、試験体についても、アルミニウム製の自作フラクタル形状日除けの単体と96個を接続した連結ユニット、さらにAES樹脂製品の3条件での実験を行った。

放熱・放射特性評価実験は、暑熱環境緩和効果実験と同様に、日本工業大学内にある都市スケールモデルサイトで、コンクリート立方体4つで構成された交差点部分の上部にフラクタル日除け試験体を設置して実験・測定を行った。実験期間は2013年8～9月および2014年7～9月で、温熱環境に加えて、熱・放射収支に関する測定を中心に行った。なお、

ろ紙法による実験は、連結ユニットの1つの表面にろ紙を貼り付けて行った。連結ユニット試験体を用いた実験と測定の概要を図-3に、実験状況の写真を図-4に示す。

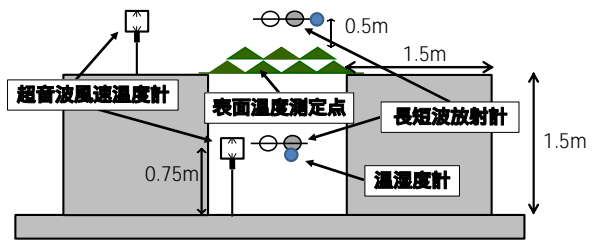


図-3 放熱・放射特性の実験・測定概要

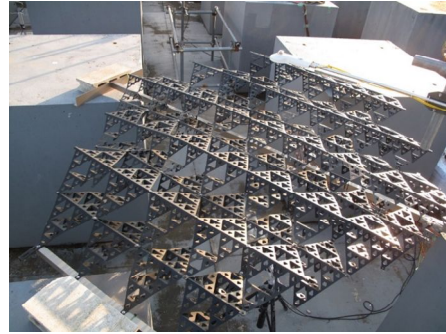


図-4 連結ユニットによる実験状況写真

実験で得られた放熱・放射特性に関しては、数値シミュレーションで活用するために、気象条件の関数としてパラメータ化することを試みた。

(3) フラクタル日除けを用いた空間の温熱環境設計手法の検討

放熱・放射特性の実験結果から得られた熱・放射特性について、フラクタル日除け下空間の温熱環境を数値計算により評価するために必要なパラメータ化を行い、温熱環境シミュレーションによる評価を試みた。ここでは、フラクタル形状日除けを活用した空間に関して、温熱環境を設計段階での検討を幅広く展開していく目的で、汎用ソフトによる評価を試みた。計算には、汎用の屋内外総合熱環境シミュレーションソフト「Thermo Render 4 Pro」(以下、サーモレンダー)を使用した。サーモレンダーでは建物や地表面における熱収支計算を行い、表面温度を算出する。基本仕様では、日射遮蔽材料の下部空間の解析は不可能な状態となっているため、入力気象条件を修正することによる解析を試みた。通常の解析において、気象条件を任意に設定することが可能である点に着目し、空間下の気象条件として、日射量や大気放射量をフラクタル形状日除け下空間の放射条件として与えることで、解析を可能とした。具体的には、空間全体がフラクタル形状日除けの下に存在するものと仮定し、日射量に透過日射量、大気放射量にはフラクタル形状日除けからの赤外放射量を与えた。なお、日射透過率については実験による測定値、大気放射量はフラクタル形状日除けの表面温度を1次元熱収支解析より算出した値を用いて算出することとした。

4. 研究成果

(1) フラクタル日除けによる暑熱環境緩和効果の定量化

暑熱環境緩和効果の実験結果として、街路空間における各フラクタル形状試験体の平均放射温度 MRT、温熱快適性指標 SET* の測定結果と、コンクリート街区との差について表-1 に示す。すべての試験体でコンクリート街区に比べて MRT、SET* が小さくなり、暑熱環境が緩和されていた。また、多くの試験体で SET* が屋外での活動が許容できなくなるとされる 35 を超えているのに対し、フラクタル形状日除け試験体の分割が多くなるにつれて、SET* は低くなり、温熱快適性が向上する傾向を確認することができる。また、SET* 差の傾向と MRT 差の傾向が類似していることから、放射環境の影響が大きいものと推察できる。

表-1 MRT、SET* の測定結果

MRT	49.14	39.62	49.81	51.15	50.36	53.39	44.98
MRT差	-17.81	-19.28	-25.07	-22.22	-16.38	-23.38	-19.71
SET*	36.49	33.53	28.31	35.95	35.83	35.55	29.34
SET*差	-4.28	-4.45	-5.74	-5.61	-3.42	-5.22	-4.70

そこで、放射環境に着目して詳細な解析を行った。フラクタル形状日除けでは、分割が多くなるにつれてすきまから侵入する日射量が多くなる傾向が見られたが、フラクタル日除けは太陽高度を考慮して設置することから、フラクタル日除け下で直達日射を除いた 200W/m²以下の条件を抽出して解析を行った。図-5 に日射量 200W/m²以下の条件下での放射の内訳を示す。分割数が多い日除けほど赤外放射が軽減されていることがわかる。これは、日射遮蔽により地表面温度の低く維持されることに加えて、フラクタル日除けの分割数が多くなるにつれてフラクタル日除けの温度上昇が抑制されていることで、上下方向からの赤外放射量が低減されているためである。

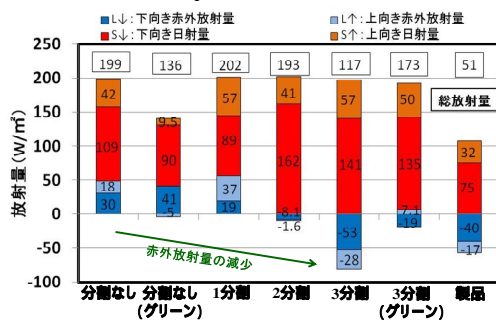


図-5 放射の内訳(日射量 200W/m²以下)

以上の結果から、フラクタル形状日除けでは、分割数が少ないと日除け下に侵入する日射量が少なく、分割数の多いものでは赤外放射が少なくなることがわかった。フラクタル日除けは、空間に侵入する日射量と赤外放射を軽減することで、日除け下空間の温熱環境がより快適となり、日射量、赤外放射量を低減することが温熱快適性に対して重要であることが確認できた。

(2) フラクタル日除けの放熱・放射特性の評価とパラメータ化

放射特性

フラクタル日除けの放射特性として、フラクタル街区の日除け上下に設置した長短波放射計により得られた測定値より、放射特性として日射反射率・透過率・吸収率を算出した。黒色のアルミニウム試験体について、太陽高度の高い 11 時から 13 時までの平均値を、フラクタルの分割数毎に図-6 に示す。フラクタルの分割数が多くなるにつれ日射透過率が大きくなり、吸収率が少なくなる傾向が確認できる。分割数が多くなるにつれ、フラクタル形状日除けの分割された隙間を透過してくる日射量が多くなることで、日射透過率が大きくなるものと推察できる。

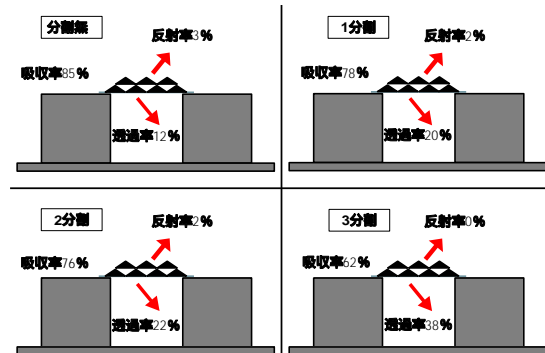


図-6 形状による放射特性の違い(黒色)

さらに、フラクタル形状日除けの日射透過率等の特性は、すきまから進入する日射量が季節や時刻によっても変化するため、製品仕様について日射透過率と太陽高度の関係を確認した結果を図-7 に示す。太陽高度が高くなると日射透過率が小さくなり、太陽高度の高い夏季や正午近くで日射者遮蔽の効果が大きくなっており、日射透過率は太陽高度から算出することが可能となった。

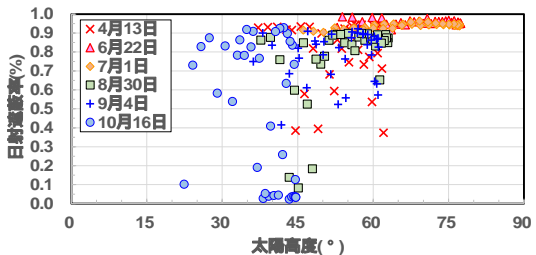


図-7 太陽高度と日射遮蔽率の関係

放熱特性

放熱特性に関しては、対流熱伝達率を指標として評価を行った。フラクタル日除けは形状が複雑であるが、単体および実際の使用状況に近い連結ユニットでの試験体を対象として、ろ紙法、熱収支連立法、熱収支残差法の3つの手法を用いて算出を試みた。それぞれの算出結果の値には違いが見られたものの、概ね傾向は一致していた。試験体の両面を考慮している点等から最も精度良く算出できたと想定される、熱収支残差法により得られた連結ユニット試験体の対流熱伝達率と風速の関係を図-8 に示す。対流熱伝達率はフラクタルの分割数が増えるにつれ、大きく

なっており、分割数が増えことで放熱特性が大きくなるのがわかる。この高い放熱特性が、フラクタル形状日除けの表面温度上昇を抑制する要因であると確認できた。

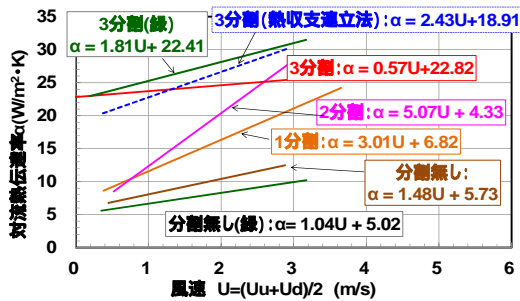


図-8 試験体の対流熱伝達率と風速の関係
そこで、熱収支残差法を用いて AES 樹脂製品フラクタル日除けについても、対流熱伝達率の算出を行った。AES 樹脂製品では、アルミニウム試験体と異なり、蓄熱量を考慮する必要があるので、製品の密度・比熱から熱容量を算出することで、熱収支残差法による評価を可能とした。AES 樹脂製品の対流熱伝達率と風速との関係を図-9 に示す。AES 樹脂製品の対流熱伝達率は、同じ分割数のアルミニウム試験体と類似した結果となっていたことから、対流熱伝達率を精度良く得ることができたものと判断する。

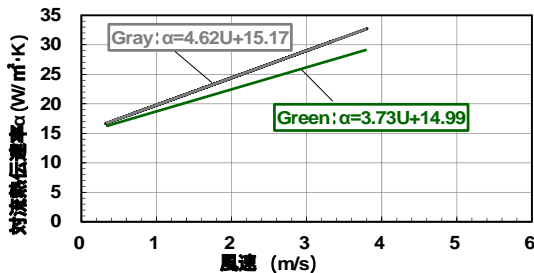


図-9 AES 樹脂製品の対流熱伝達率

(3) フラクタル日除けを用いた空間の温熱環境設計手法の検討

シミュレーションへの入力条件の検討

計算には、汎用のシミュレーションソフトであるサーモレンダーを使用した。本ソフトの基本仕様では、日射遮蔽材料の下部空間の解析は不可能であるため、フラクタル下空間に入る放射量を日射や大気放射量などの気象条件と置き換えることで解析を試みた。具体的には、空間全体がフラクタル形状日除けの下に存在するものと仮定し、日射量に透過日射量、大気放射量にはフラクタル形状日除けからの赤外放射量を与えた。日射透過率は測定値、大気放射量はフラクタル形状日除けの表面温度より算出した。

フラクタル日除けから赤外放射量は、フラクタル日除けの表面温度を算出することで得られる。フラクタル日除けの熱収支・放射収支式により、表面温度に関する式を導出し、逆解析により算出した。ここで、算出に必要な日射吸収率や対流熱伝達率に関しては、実験からパラメータ化した手法を活用し、太陽

高度や風速より求めることとした。実測日を対照として、表面温度を予測値と実測結果の比較を行った結果、日中の予測値は実測値に比べ 5 程度高い値となったが、温度の変化はほぼ一致していた。また、夜間においては予測値が実測値をやや下回る値となっているが、傾向は類似していることを確認した。この表面温度から赤外放射量を算出し、解析条件の大気放射量と設定することとした。

数値シミュレーション解析結果の評価

検討した入力条件の修正手法を用いて、汎用ソフトサーモレンダーによって、COSMO における実験結果の再現を試みた。数値シミュレーションでは、コンクリート街区とフラクタル街区を対象として、2013 年 9 月 14 日 11 時における実験条件・結果について温熱環境のシミュレーションを行った。解析結果として表面温度分布と MRT を図-10 に示す。コンクリート街区では床面温度が 45 以上になっているが、フラクタル街区では 35 程度で、気温の 32 と殆ど差がなかった。また、フラクタル街区の平均放射温度 MRT は 63.4 と計算され、実測値 62.6 と合致していた。しかしながら、計算結果ではコンクリート街区での誤差と夜間の値に誤差が大きい等の課題が見られ、今後の改善が必要である。

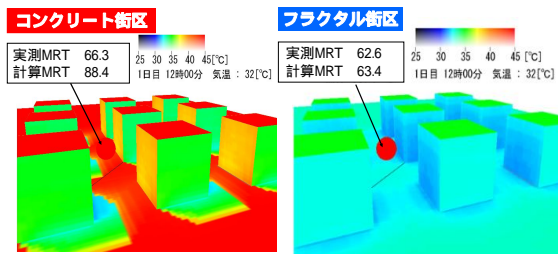


図-10 表面温度の解析結果

以上から、汎用ソフトを活用することにより、実験で得られた放射・放熱特性を用いることで、設計段階でフラクタル日除けを用いて温熱環境的に快適な空間を創出するための検討が可能になるものと考えられる。

(4) 研究成果のまとめ

3 つの内容で構成される本研究から得られた成果をまとめると、以下の通りとなる。

フラクタル日除けを用いた暑熱環境緩和効果は、日射遮蔽に加えて赤外放射量を低減することで放射環境が大幅に間然されることで、温熱環境的に快適となることがわかった。赤外放射量の低減は、日射遮蔽による地表面の温度上昇抑制に加え、フラクタル日除けの温度が上昇しないことに伴う効果によることが確認できた。

フラクタル日除けの放射・放熱特性を実験により明らかにした。フラクタル日除けの日射透過率は、すきまから透過する日射量の割合が季節や時間によって変化しており、太陽高度との関係でパラメータ化することができた。また、放熱特性については、対流熱伝達率を複数の実験手法から算出し、フラクタルの分割数が大きくなるにつれて対流熱伝

達率が大きくなり、放熱性が向上していた。この放熱特性に優れている特性を有していることが、フラクタル日除けの表面温度が上昇しないメカニズムであることが解明できた。また、AES樹脂製品についても対流熱伝達率を実験より導出し、風速の関数としてパラメータ化を行った。

汎用ソフト「サーモレンダー」を用いて、実験から得られた熱的特性を活用することで気象条件を修正する手法から、フラクタル日除け下空間の温熱環境シミュレーションを可能とした。今手法により、フラクタル日除けを用いて温熱環境的に快適な空間を創出するための検討が可能となった。

以上の成果は、フラクタル日除けの熱的な特性を明らかにして、空間設計時の予測を可能にするとともに、複雑形状の材料の対流熱伝達率などの熱的特性を明らかにする実験手法を確立した点でも、ヒートアイランド対策分野において、今後対策技術を推進していく上で貴重な成果であると考えられる。

また、本研究で残された課題を挙げると以下となる。

一つ目は、今回明らかとなった熱的特性から、さらに効果的な日除けの仕様（例えば日射反射性能を高める、蒸発冷却機能を付加する等）を検討する必要がある。また、フラクタル日除け下空間をより快適するために、空間の地表面や壁面等の表面構成等で適した仕様（反射特性・蒸発特性）の検討をすることも必要である。

二つ目は、汎用ソフトを用いた温熱環境シミュレーションでは、一部に大きな誤差が生じた部分があり、今後の精度を高めるための改善が望まれる。また、汎用ソフト側の課題となるが、日除け下空間の温熱環境を直接シミュレーションできるような仕様の検討、サブルーチンの開発を進めていく必要もある。

以上の課題を解決することにより、都市において、フラクタル日除けを活用した温熱環境的に快適な空間の創出が推進されていくことが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計3件)

三坂育正、成田健一、酒井敏、吉田京平、フラクタル形状日除けの放熱特性に関する実験研究、日本ヒートアイランド学会、2015年8月29日、日本工業大学(埼玉県宮代町)

鍛冶裕太、三坂育正、成田健一、フラクタル形状日除けの放熱特性に関する研究 その1 単体試験体による放熱特性評価実験、日本建築学会、2014年9月12日、神戸大学(兵庫県神戸市)

三坂育正、成田健一、鍛冶裕太、フラクタル形状日除けの放熱特性に関する研究 その2 連結ユニット型試験体による放熱特性

評価実験、日本建築学会、2014年9月12日、神戸大学(兵庫県神戸市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三坂 育正 (MISAKA, Ikusei)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：30416622

(2) 研究分担者

成田 健一 (NARITA, Ken-ichi)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：20189210

酒井 敏 (SAKAI, Satoshi)
京都大学・人間・環境学研究科・教授
研究者番号：30144299

(3) 連携研究者