

令和元年9月6日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K12231

研究課題名（和文）微細構造を付加した散乱性媒体による環境表面の反射指向・波長特性の制御

研究課題名（英文）Control of directional reflection and spectral characteristics on environmental surfaces by scattering medium adding microstructure

研究代表者

吉田 篤正（Yoshida, Atsumasa）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：60174918

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：一般に環境を構成する表面材料は散乱性媒体であるが、この表面に規則的な微細構造を付加する、または塗膜層内に特殊な材料および形状を持つ粒子を分散させることにより、波長特性ならびに反射指向性を制御することが期待される。本研究では、周期的微細構造を付加した表面の日射反射特性に及ぼす構造パラメータならびに入射角の影響、ならびに塗膜の日射反射特性に及ぼす顔料粒子の材料および粒径の影響について、それぞれ数値解析により評価した。また、光の入射方向に強く反射する再帰性反射材料が施工された壁面近傍のふく射環境を数値的に評価し、屋外にいる人体への熱負荷について壁面の反射指向性制御による軽減効果を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主題である種々の散乱性媒体表面に対するふく射特性制御は、地球温暖化対策の観点では、太陽エネルギー利用の高度化による化石燃料消費抑制につながることで、また大都市における夏季のヒートアイランド対策の観点では、人工被覆面の日射吸収抑制に寄与する高日射反射率化と、それに伴う屋外空間のふく射環境変化に対する人体への影響抑制の相反する要求を解決できることから、重要な技術であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The surface materials constituting environment are generally scattering medium. It is expected that wavelength characteristic and reflection directivity can be controlled by adding regular microstructure on the surface or by dispersing particles with special material and shape in painted layer. In this study, the effect of structural parameter and incident angle on solar reflection characteristics of the surface with periodic microstructure and the effect of the kind and the particle diameter of pigment included in painted layer on its solar reflectance are numerically evaluated respectively. In addition, in the case of a retroreflective material such that strongly reflects towards an incident direction constructed on wall surface, the radiative environment near the wall is numerically evaluated, and reduction effect on human thermal load in outdoor space by the reflection directivity control of the wall is investigated.

研究分野：熱工学

キーワード：ふく射伝熱 表面微細構造 散乱性媒体 反射指向性 波長特性 数値解析 塗膜 再帰性反射

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年ヒートアイランド現象に由来する都市域の夏季の高温化は、屋外環境の快適性の悪化、熱中症に代表される健康被害、空調負荷の増大を招いている。その原因の一つは、都市表面のほとんどがアスファルトなどの日射吸収率が高く蓄熱しやすい材料で覆われているためである。その対策として塗膜や防水シートなどの高日射反射率素材を用いて表面を被覆することにより、人工被覆の熱吸収を抑えることが考えられている。すでに主に建物屋上で施工されているが、こうした材料表面はほぼ半球方向に様な拡散反射面であり、反射日射が通常の建物表面や屋外の歩行者に及ぼす環境適応障害に配慮して鉛直壁面ならびに街路表面での施工は敬遠されるため、そうした面では入射した光をほぼ同じ方向に反射するような再起反射性を有することが望まれる。また、色彩を残しつつ反射性能を向上させるためには、目で知覚されず日射エネルギーのおよそ半分を占める赤外域での反射率を選択的に高くすることが望まれる。

申請者らのこれまでの研究において、球形粒子の非等方散乱特性を考慮した塗膜の日射反射率の数値予測を行っている。高日射反射率素材がより広い都市空間で採用されるためには、その日射反射の指向選択性および波長選択性を自由に設計・制御できる手法の開発が望まれる。

2. 研究の目的

球形とは異なる形状で微細構造を有する光散乱媒体を用いて表面被覆材料を構成することを考え、その日射反射の波長特性ならびに指向特性に及ぼす諸因子の影響を明らかにすることにより、高日射反射率素材の高性能化につながる反射特性の制御手法を確立することを目的とする。非球形微粒子および微細構造体近傍の電磁気学的解析、これらを含む材料内部のふく射輸送解析、さらに材料特性を制御するための最適化解析を連携した材料の性能制御方法の開発を行い、高日射反射率材料の開発コストの削減とそれによる低価格化、施工範囲の拡大を図り、都市の高温化(ヒートアイランド)抑制につなげていく。

3. 研究の方法

本研究では、非球形微粒子および微細構造体を含む高日射反射率材料を具体的な研究対象として、その波長特性ならびに反射指向性に及ぼす諸因子の影響を明らかにし、その高性能化・高機能化につながる制御手法を確立する。そのためにMaxwell方程式に基づく散乱特性解析、ならびにその散乱媒体を含む材料のふく射輸送解析手法について、分光測定等の実験結果と比較しつつ、確立する。個々の具体的方法は次の通りである。

- 材料表面に微細構造を与えることによる日射反射特性の制御と関連して、表面の周期的微細構造が日射に対する分光散乱特性に及ぼす影響を、FDTD法に基づく数値解析により評価した。特にその構造パラメータと分光反射率との関係、ならびに日射の入射角の違いによる日射反射率への影響を評価した。
- 高日射反射率塗膜の性能向上に関連して、塗膜内部に含まれる顔料の種類、粒径および塗膜の厚さが日射反射特性に与える影響について、ふく射要素法に基づく数値解析により評価した。また、解析条件と同様の塗膜を対象に分光反射率を測定し、解析モデルの妥当性ならびに塗膜の性能の確認を行った。
- ヒートアイランド緩和策に関して、高日射反射率材料被覆対象を壁面への適応が考えられているが、壁面から大気への熱負荷を抑えつつ反射日射の街路空間への影響を緩和するには、再帰反射性材料の導入が必要であり、この材料の施工による屋外空間の温熱環境ならびに人への影響の予測は重要である。壁面に対して再帰反射性壁材が施工された状況を想定し、外壁材の日射反射特性、特に反射指向性が壁面近傍に滞在する人体に対して及ぼす熱的影響について数値解析により評価した。

4. 研究成果

集熱面に施す表面微細構造の日射反射特性に関する研究

1. はじめに

再生可能エネルギーの一つである太陽熱発電において、集熱面での日射吸収率を上げる一方、高温(1100~1200°C)になった表面からの放射損失を下げることで集熱効率を向上させる必要がある。具体的には日射の波長域である0.3~2.5 μm において低い反射率、波長2.0 μm 以上で低い放射率を持つ集熱面が最適であると考えられる。固体の分光ふく射特性の制御は、表面に微細構造を施すことによって可能であることが知られている^[3]。ここでは、FDTD法により日射反射特性に対して表面周期微細構造が及ぼす影響について評価する。

2. 数値解析

電磁場解析にはFDTD法を用いた。離散化および解析手順はYeeアルゴリズムに基づく。ここではTM波について解析を行う。

日射のスペクトルは可視域及び近赤外域に分布しているため、波長0.3 μm ~2.5 μm までの波長に対して制御することを目標とし、表面の微細構造が分光反射率に及ぼす影響について調べる。

解析領域を図1に示す。周期的な微細構造を持つ誘電体に対して、左から平面波を与える。解析対象は簡単のため真空、誘電体とする。表面微細構造は溝の深さ L_x 、開口長さ L_y 、ピッチ長さ Λ をパラメータとした。また解析領域の xy 平面および xz 平面と

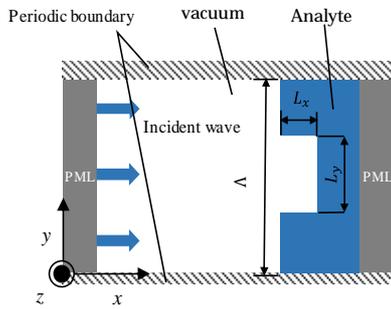


Fig.1 Computational domain.

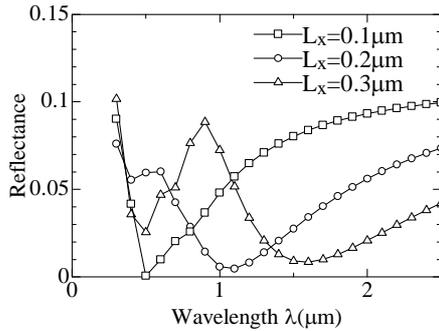


Fig.2 Effect of groove depth on spectral hemispherical reflectance.

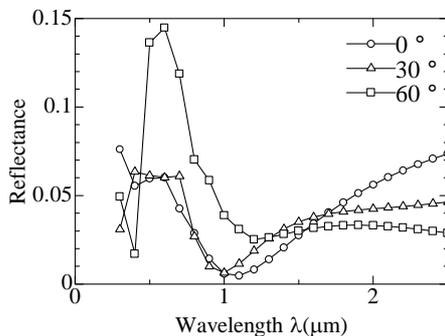


Fig.3 Effect of incident angle on spectral hemispherical reflectance for surface microstructure.

平行な面を周期境界, yz 平面に平行な面を PML 吸収境界とする。入射波源には平面波電場を与え, 入射位置は解析物から十分離れた断面に設定した。反射率の評価は 解析物から十分離れた断面において, そこを通過する 1 周期分の入射波と散乱波のそれぞれのエネルギー流束の積算値の比により求める。

3. 垂直入射解析の結果及び考察

溝の深さによる反射特性の変化を評価するため, 開口長さ $L_y = 0.2\mu\text{m}$, ピッチ長さ $\Lambda = 0.4\mu\text{m}$ を固定し,

高日射反射率塗膜の性能設計に関わる数値予測に関する研究

1. はじめに

近年, 都市部における気温がその周辺地域に比べて高くなるヒートアイランド現象に対する緩和策の一つとして「高日射反射率塗膜」を建築物外装等の都市表面に塗装することにより, 日中の日射エネルギーの吸収を抑制することが挙げられる。この塗料の調査前に実際に使用する環境条件をより精密に考慮でき

溝の深さ L_x を変化させた時の評価を行った。結果を図 2 に示す。結果より溝の深さによって反射率が最小となる波長に差がみられ, 反射特性の波長制御には溝の深さが影響することがわかる。

開口長さによる反射特性の変化を評価するため, 深さ $L_x = 0.2\mu\text{m}$, ピッチ長さ $\Lambda = 0.4\mu\text{m}$ を一定とし, 開口長さ L_y を変化させた時の評価を行い, 分光反射率が最小となる波長は溝の深さを変化させたときほどは変化しないこと, また開口長さが大きくなるにつれて反射率が増加する結果を得た。この原因として溝部の影響が小さくなり, 平板での反射に近づいているからと考えられる。

4. 斜入射解析の結果および考察

入射角による分光反射特性への影響を評価した。斜入射条件における周期境界条件で生じる位相差の影響を取り除くため sine-cosine 法^[2]を用いた。平板に対する入射角ごとの TM 波の反射特性に関する数値解がフレネル則と一致することを確認している。

平板に対して微細構造を設けた際の反射特性の影響を評価するため, 深さ $L_x = 0.2\mu\text{m}$, 開口長さ $L_y = 0.2\mu\text{m}$, ピッチ長さ $\Lambda = 0.4\mu\text{m}$ とした表面に対して入射角を変化させた解析を行い, 入射角の違いが分光反射特性に及ぼす影響を評価した。結果を図 3 に示す。入射角が大きくなると最大になる反射率が大きくなり, 長波長側では平板と同様に反射率が低くなる傾向が表れている。短波長域で溝構造の影響を強く受け, 長波長域では平板の特性が支配的であることがわかる。

5. 日射反射率

分光反射率の結果から JIS K5602 : 2008^[3]に基づいて全日射反射率の解析を行い, 凹部と凸部の割合が 1 : 1 の場合にその他の割合の時よりも日射反射率が低くなる結果を得た。

参考文献

- [1] Hirashima, D., Kameya, Y. and Hanamura, K., Netsu Bussei, 22-3, 167-171, 2008.
- [2] Taflove, A. and Hagness, S.C., Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method. Artech house, 2005.
- [3] Japanese Industrial Standard Committee, JIS K5602-2008.

る数値解析を行うことができれば, 高日射反射率塗膜の性能向上や普及に繋がる。本研究では, 塗膜に含まれる顔料の粒径および塗膜の厚さが反射特性に与える影響について, ふく射要素法^[1]を用いて数値解析により評価した。

2. 数値解析

基礎方程式はふく射輸送方程式である。単分散球

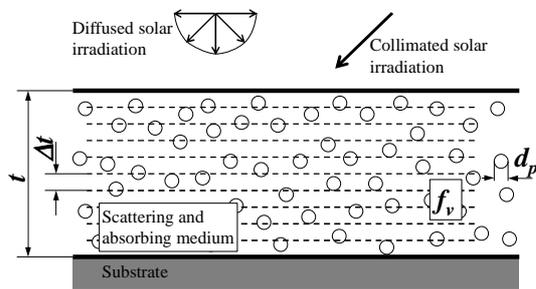


Fig.4 Schematic drawing of numerical model

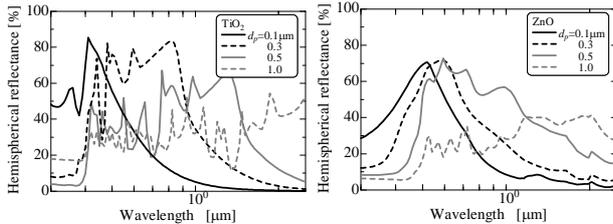


Fig. 5 Effect of pigment size to spectral hemispherical reflectance of TiO₂ and ZnO evaluated with radiation element method.

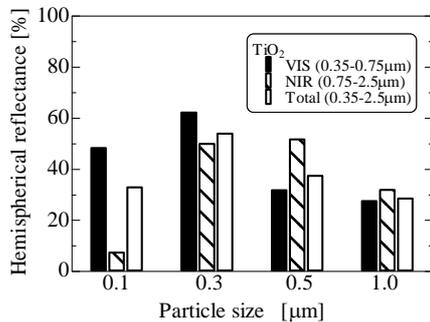


Fig. 6 Effect of particle size of pigment to solar reflectance.

形粒子の散乱特性は Mie 散乱に従って解析できる。Mie 散乱の解析には ratio method^[2]を適用する。また塗膜を構成する散乱媒体の非等方性は文献^[3]に従い解析する。塗膜層の顔料として単分散球形粒子の TiO₂ および ZnO を採用し、そのふく射特性について解析する。

3. 塗膜の日射反射特性評価に関する解析条件

顔料を含む塗膜層の解析モデルとして、1次元平行平面系を考える。図4に解析モデルの概要を示す。塗膜層は任意の数の要素に深さ方向に分割される。方位の分割には Discrete Ordinate 法における S12 近似モデル^[4]を用いる。塗膜上面からは直達および散乱日射が入射する。分光日射の算出には Bird モデル^[5]を用いる。上面における鏡面反射は空気の屈折率(1.0)とアルキド樹脂の屈折率(1.5)の違いにより生じ、その反射率は Fresnel 則により求められる。底部の基板表面は黒体と仮定する。各媒質および基板の温度は 293.15K で一定とする。媒質中には顔料として TiO₂ または ZnO の球形粒子を含むアルキド樹脂とする。

4. 結果

塗膜層に含まれる顔料粒子のサイズを変化させ、

その半球分光反射率についてふく射要素法に基づき解析を行う。顔料は TiO₂ 粒径 d_p は 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 μm の4条件について評価する。体積分率 f_v は 0.001 に、膜厚 t は 1000 μm に固定する。その結果を図5(左)に示す。粒径を大きくしていくにつれて、反射率の高い波長域が短い方から長い方へ変化していることがわかる。また顔料の種類の違いによる影響を評価するために、粒径の異なる ZnO ($d_p=0.1, 0.3, 0.5, 1.0 \mu\text{m}$) を含む塗膜について同様に解析した結果を図5(右)に示す。体積分率および膜厚は TiO₂ のときと同じとする。分光反射率に対する粒子サイズの影響は、ZnO に比べて TiO₂ の方が強く表れていることがわかる。

TiO₂ 顔料の各粒径条件について、可視域(0.35~0.75 μm)、近赤外域(0.75~2.5 μm) およびそれらを含めた全日射波長領域に対する日射反射率を評価する。日射スペクトルは北緯34度30分、東経135度30分(大阪府立大学中百舌鳥キャンパス)における夏至正午晴天での値とし Bird モデルにより算出した。図6に結果を示す。可視域と近赤外域の両方で反射率の高い粒径 0.3 μm の塗膜が全日射波長域についても高い値となっている。また、粒径の小さい 0.1 μm の条件では、分光反射率の値と対応して、可視域では高い値を示すものの、近赤外域については高くなく、全日射反射率にも影響する。また、1.0 μm での結果に見られるように、粒径が大きくなると顔料による散乱の影響が小さくなり、日射反射率も全体的に低くなる。

5. まとめ

TiO₂ または ZnO を顔料とし含む塗膜層の半球分光反射率について非等方性を考慮したふく射要素法により解析した。本解析手法は顔料粒径および体積分率、膜厚を変化させた塗膜の反射率の解析が可能であり、複合顔料または多層構造により特別な反射特性を有する塗膜の設計への応用が期待できる。

参考文献

- [1] B. Mehdi, S. Maruyama, A. Komiya, J. Thermal Sci. Tech., Vol.4, No.1, (2009) 131-145.
- [2] R. T. Wang, H. C. Hulst, Applied Optics, Vol.30, No.1, (1991) 106-117.
- [3] S. Maruyama, Int'l J. Heat and Mass Transfer, Vol.41, (1998) 2847-2856.
- [4] F. M. Michael, "Radiative Heat Transfer 2nd Ed.", Academic Press, (2003) 503.
- [5] Bird, R.E., Solar Energy, Vol.32, No.4, (1984) 461-471.

再帰反射性材料の施工によるヒートアイランド抑制効果の数値予測

1. はじめに

近年顕著になってきているヒートアイランド現象の緩和策の一つとして、屋上面等の水平面を高日射反射率材料により被覆することが挙げられる。一方、これを壁面に適応する場合、街路空間の熱的快適性の悪化、他の建物壁面への熱負荷の増大の懸念から、控えられてきた。壁面から大気への熱負荷を抑えるとともに反射日射の街路空間への影響を緩和するには、再帰反射性を有する材料の導入が必要となる。本研究では、壁面に対して再帰反射性壁材が施工された状況を想定し、外壁材の日射反射特性、特に反射指向性が壁面近傍に滞在する人体に対して及ぼす熱的影響について数値解析により評価する。

2. 解析モデル

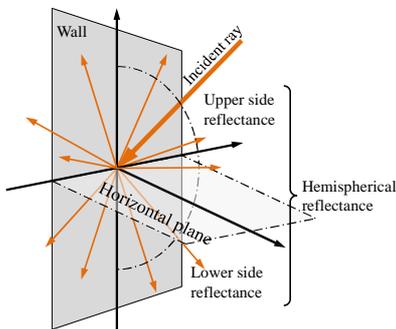


Fig. 7 Definition of upper and lower side reflectance.

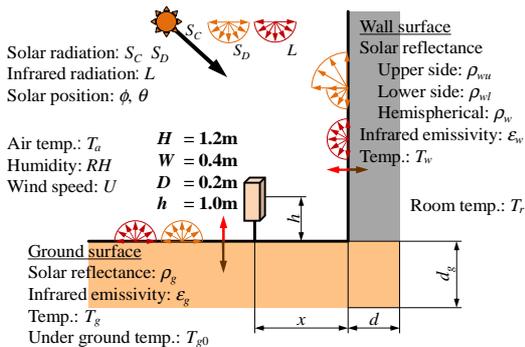


Fig. 8 Schematic of analytical model for net radiation of human body.

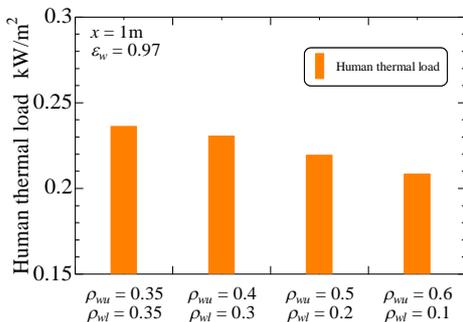


Fig. 4 Effect of upper side reflectance in the constant condition of hemispherical reflectance.

通常の外壁材や塗膜における反射特性は拡散的であり、鉛直壁面での反射日射は、不透明な壁材の場合ほぼその半分が下方に向かう。この対策として、入射方向への反射がより多くなる再帰反射性材料が考えられている。指向性反射率は、入射光の波長のほか、入射方向と反射方向の双方向の関数であるが、ヒートアイランド対策技術として評価するうえでは、より単純なパラメータで性能を表現できることが望ましい。そこで図7のように、上空から鉛直面に入射する日射エネルギーに対して、水平面より上方へ反射するエネルギーの割合を上方日射反射率 ρ_{wu} 、下方への割合を下方日射反射率 ρ_{wl} として定義する。これら2つの反射率を合わせた値は半球日射反射率 ρ_w に相当する。

壁面の日射反射特性の違いが、建物・地表面での熱収支ならびに人体周りの熱収支について簡易的に評価することを目的として、図8の解析モデルを考える。建物表面および地表面は紙面奥行き方向に一樣な一次元的構造を有し、壁面は高さ方向、地表面は広さ方向に無限遠まで伸びているとする。壁面から x [m]離れた位置に、直方体モデル(高さ1.2m、幅0.4m、厚さ0.2m、重心高さ1.0m)で表現した人体モデルを置く。気象要素として、太陽位置、法線面直達日射、散乱日射、大気放射、風速、気温を与える。壁面では上方・下方日射反射率、赤外放射率、熱伝導率、壁面厚さ、外壁および内壁熱伝達率、室温を、地表面では日射反射率、赤外放射率、熱伝導率、地面厚さ、地表面熱伝達率、地中温度を条件として与える。外壁および地表面熱伝達率は風速の関数とし Jurges の式で与える。外壁温度および地表面温度はそれぞれの面での熱収支が満足されるよう算出する。上空からのふく射環境と外壁、地表面の温度、日射反射率、赤外放射率から各構成面からの日射および赤外放射を算出できる。人体の正味ふく射の算出は、衣服の日射反射率、赤外放射率および体表面温度を考慮して評価する。

3. 壁面からの距離および壁面日射反射率の影響

太陽は大阪8月8日南中時を想定し、鉛直壁面は真南を向いているものとし、人体モデルは壁から1m、5m、10mに位置に配置した。壁面の半球日射反射率は0.2、0.4、0.7、また半球日射反射率が0.7の条件で上方・下方日射反射率の内訳を変化させる。人体熱負荷は人体の正味ふく射で表現する。

壁面からの距離に対する人体熱負荷は、距離が大きくなるに従い、大きくなる傾向があるが、大きな

変化はないことを解析により確認した。図9は半球日射反射率を一定に保ち、上方日射反射率を変化させた場合の結果である。上方への反射日射の割合が大きくなるにつれ、人体熱負荷が下がることがわかる。人体熱負荷の大きな部分は上空からの直達日射で、この条件では天頂面と背面への負荷が大きくな

ることは確認している。一方、壁面での反射を含めた拡散日射に関する人体モデル各面への取得エネルギーについて、背面、下面以外の4面について、負荷が軽減されており、特に正面への影響が軽減されていることを解析結果から確認している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Shinichi Kinoshita, Atsumasa Yoshida, Investigating performance prediction and optimization of spectral solar reflectance of cool painted layers, Energy and Buildings, Vol.114, pp.214-220, (2016).

〔学会発表〕(計 7 件)

1. 木下進一, 吉田篤正, 再帰反射性材料の施工によるヒートアイランド抑制効果の数値予測, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016 講演論文集, 2016, G213, USB-Flash (2pages).
2. 木下進一, 吉田篤正, 播磨龍哉, 大村太郎, 長浜勉, 竹林英樹, 西岡真稔, 再帰反射性材料の指向反射特性評価 測定手法の開発とヒートアイランド緩和技術認証について, 第 37 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 2016, pp.135-137.
3. Atsumasa Yoshida, Shinichi Kinoshita, Numerical Simulation On Mitigation And Adaptation Effects To Urban Heat Island Countermeasure Using Retro Reflection Material As Building Exterior Wall, The 4th International Congress on Technology-Engineering & Science (ICONTEs), ICONTEs-4-2110918, (2017).
4. 木下進一, 吉田篤正, 再帰反射壁によるヒートアイランド抑制効果に関する数値解析, 日本ヒートアイランド学会第 12 回全国大会, 2017, 予稿集, pp.160-161.
5. 蔭山匡平, 吉田篤正, 木下進一, 表面微細構造の分光反射特性に関する数値解析, 第 39 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 2018, pp.337-339.
6. Shinichi Kinoshita, Atsumasa Yoshida, Numerical Evaluation on Thermal Effect for Human Body in Street Space by Retro-reflective Walls, The 10th International Conference on Urban Climate (ICUC10), 10A.7, (2018).
7. 蔭山匡平, 吉田篤正, 木下進一, 太陽光集熱面のための表面微細構造の分光特性に関する研究, 日本機械学会関西支部第 94 期定時総会講演会論文集, 2019, 611, DVD-ROM 4 pages.

〔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 該当なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 木下進一

ローマ字氏名: Kinoshita Shinichi

所属研究機関名: 大阪府立大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 70263209

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 該当なし