

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18758

研究課題名（和文）ドローンを活用した熱放射モジュール作成とこれに基づく熱環境設計プロセスの变革

研究課題名（英文）Development of thermal radiation modules utilizing a drone and change of a system on design of thermal environment

研究代表者

石田 泰之（Ishida, Yasuyuki）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：20789515

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：可視画像と熱画像を同時撮影可能なデュアルカメラを搭載したドローンとフォトグラメトリ技術を併用し、都市構成要素（建物・樹木）の長波長熱放射モジュールの作成、及び、モジュールを用いて、都市空間内の長波長放射環境を高速推定（Rapid-estimation）する理論を確立した。なお長波長熱放射モジュールとは各方向へ発する長波長放射量情報を有する各種都市構成要素の3D形状モデルであり、その定量値の精度は、宮城県仙台市東北大学構内にある小規模の建築物及び樹木を対象とする表面温度の面分布計測の結果と比較することで検証され、平均で5%未満の誤差で長波長放射強度の推定が可能であることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

猛暑環境下では、高温の地面や建物等からの長波放射が人間の温熱快適性に与える影響は非常に大きく、これを制御する空間設計が求められる。しかし、長波放射の予測には一般的に高い計算コストを要し、設計最終案のアセスメント段階で初めてその熱的影響が評価されるのが現状である。本研究が提案した都市空間内の長波長放射環境の高速推定（Rapid-estimation）理論を熱環境設計プロセスに組み込むことで、設計の初期段階から長波長放射の影響の検討が可能となる点で、本研究の意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Using a drone equipped with a dual camera that can capture visible and thermal images simultaneously in combination with photogrammetric technology, a long-wave radiation module, which is a 3D model of buildings and trees with long-wave radiation intensity information, was generated. Moreover, the theory of rapid-estimation of the long-wave radiation environment in urban area using these modules was established. The accuracy of the quantitative values of the modules was validated by comparing them with the measuremental results of surface temperature distribution of a small building and a single tree on the campus of Tohoku University in Sendai, Japan. It was confirmed that the estimation of long-wave radiation intensity was possible with an average error of less than 5%.

研究分野：都市環境工学

キーワード：ドローン 熱画像 3Dモデリング 可視画像 長波長放射 表面温度 温熱環境設計

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

気候変化に伴う猛暑の激化により屋外熱環境設計を最適化する重要性が増している。人間の温熱快適性に最も影響する物理環境要素は放射であり、放射は短波放射(日射)と長波放射(地面や建物からの赤外線放射)から成る。特に、夏日の正午には長波による人体の受熱量は短波より強く、長波放射が人間の温熱快適性に与える影響は非常に大きい。現状、設計プロセスでの温熱環境検討において、太陽位置で決まる日照・日影形成に基づく日射熱の影響と、高速化に特化した汎用ソフトで解析される温度・風環境は、素案の段階から簡易に評価される一方、長波放射の予測には、市街地内の多重反射を考慮した放射連成非定常熱収支解析に時間を要するため、最終案のアセスメント段階で初めて長波放射の熱的影響が評価される。その結果、長波放射の熱的影響の観点から、必ずしも最適でない提案が実プロジェクト等においても散見され、設計プロセス内で長波放射量を簡易的に把握できない点が、温熱環境設計を行う上での大きな制約条件となっている実態が指摘できる。これらのことから、設計の初期段階で使用可能な長波放射環境の高速推定(Rapid-estimation)ツールが求められる。

なお、これまで長波放射環境の高速推定技術が確立されなかった要因の1つに、建築物等の巨大対象物の長波放射量計測が容易でないことが挙げられる。これに対し、近年、ドローン技術の発達に伴い、これまでアクセスが困難であった上空・空中からの計測が比較的容易になってきており、これらの技術・知見を組み合わせることによって、長波長放射環境の Rapid-estimation 手法の確立は実現可能と考えられる。

## 2. 研究の目的

- (1) 長波長放射モジュール(表面温度・長波長放射輝度情報を有する都市構成要素の3Dモデル及び長波長放射強度分布)を用いた都市空間における長波長放射環境の Rapid-estimation のため、その基礎理論を確立し、評価手法として提案する。
- (2) 提案手法に用いるモジュールについて、ドローンを用いた長波長放射量の測定及びフォトグラメトリ技術による撮影画像の結合といったモジュール生成のノウハウを確立する。
- (3) 長波長放射モジュールの精度を検証し、提案した理論の実現可能性について整理する。

## 3. 研究の方法

- (1) 光環境分野における照明設計では、光源となる各照明器具の放射特性(配光特性)を基に、机上照度分布を即座に推定可能である。この手法を長波長放射の推定に応用し、建築物等の都市構成要素を、長波放射を放つ熱源(赤外線を放つ光源)として捉えることで、長波放射環境の高速推定(Rapid-estimation)を行うための基礎理論を確立する。
- (2) 可視画像と熱画像を同時撮影可能なデュアルカメラを搭載したドローンを用いて、都市構成要素が発する長波長放射の方向特性を分析する。計測対象は、東北大学の川内キャンパス内の単木樹木及び青葉山キャンパス内の小規模建物とする。
- (3) 撮影した画像を用いたフォトグラメトリにより撮影画像を結合し、長波長放射量情報を有する3Dモデルを作成し、これを用いて長波長放射強度の方向特性を示す長波長放射強度分布図を作成する。さらに、作成した長波長放射強度分布図の推定精度を検証する。

## 4. 研究成果

- (1) 長波長放射環境の Rapid-estimation のための基礎理論の確立

### ① 用語の定義

- ・ 長波長放射：波長が  $3\mu\text{m}$  以上の電磁波。数百℃までの温度を有する物体が、その温度の4乗に比例する量として放射する。
- ・ 長波長放射強度  $I_{LW}$  [W/sr]：ある点熱源からある立体角方向に発される単位時間[s]、単位立体角[sr]当たりの長波長放射量[J]。
- ・ 長波長放射輝度  $L_{LW}$  [W/sr·m<sup>2</sup>]：ある面熱源から発される単位面積[m<sup>2</sup>]あたりの長波長放射強度[W/sr]。
- ・ 長波長放射照度  $E_{LW}$  [W/m<sup>2</sup>]：ある受熱面における単位面積[m<sup>2</sup>]、単位時間[s]当たりの長波長放射受熱量[J]。
- ・ 長波長放射強度分布：熱源から各方向へ発される  $I_{LW}(\theta, \varphi)$  [W/sr] をレーダーチャート上にプロットした図。

長波長放射照度の空間分布は、都市空間内に存在する複数の都市構成要素が発する長波長放射による熱的影響の空間内の強弱を可視化するものである。

### ② 長波長放射強度分布の作成

ある熱源(都市構成要素)のある仰俯角 $\theta$ 、方位角 $\varphi$ 方向の垂直投影面( $S_a(\theta, \varphi)$  [m<sup>2</sup>])において、微小面積 $dS_a(\theta, \varphi)$  [m<sup>2</sup>]の長波長放射輝度が $L_{LW}$  [W/sr·m<sup>2</sup>]であるとき(図1)、熱源からある $\theta$ 、 $\varphi$ 方向へ発されるトータルの長波長放射量 $I_{LW}(\theta, \varphi)$ は(1)式で表すことができる。

$$I_{LW}(\theta, \varphi) = \int_{S_a(\theta, \varphi)} L_{LW} \cdot dS_a(\theta, \varphi) \quad (1)$$

ここで、長波長放射がランベルト則に従うとすれば、 $L_{LW}$ は熱源の長波放射率 $\epsilon[-]$ 、シュテファン-ボルツマン定数 $\sigma$ 、 $dS_a(\theta, \varphi)$ の表面温度 $T_a$ [K]を用いて(2)式のように表される。

$$L_{LW} = \frac{\epsilon \sigma T_a^4}{\pi} \quad (2)$$

以上から、 $L_{LW}$ もしくは $T_a$ を色情報に持つ3Dモデルを作成することで長波長放射強度分布を求めることができる。

### ③ 長波長放射照度の空間分布の推定法

都市屋外空間における長波長放射環境を推定するために、歩行者高さのある受熱点(評価点)が受ける長波長放射照度を求める際には、例えば、地表面からは、受熱点の下方の様々な方向からの長波長放射があるものと想定される。このことから、長波長放射環境推定のために長波長放射照度の空間分布を算出する上では、都市構成要素を点熱源として取り扱うことは適当でない。以上のことを踏まえて、長波長放射照度の空間分布を得る方法について述べる。

まず図2のように、熱源が1つだけ存在している仮想の条件で、地表面上の受熱点Pを中心とする半径 $r$ [m]の半球を考える。半球面上の熱源の投影面 $S_s$ [m<sup>2</sup>]内の、微小面積 $dS_s$ [m<sup>2</sup>]の長波長放射輝度を $L_{LW}$ [W/sr·m<sup>2</sup>]、また点Pの $dS_s$ に対する長波長放射の入射角を $\beta$ とすると、長波長放射輝度が $L_{LW}$ である微小面 $dS_s$ からの長波長放射による点P周りの微小面 $dS_p$ [m<sup>2</sup>]における長波長放射照度 $dE_{LW}$ [W/m<sup>2</sup>]は、 $L_{LW}$ [W/sr·m<sup>2</sup>]と立体角 $\omega$ [sr] ( $\omega = dS_p/r^2$ )の積から次式となる。

$$dE_{LW} = L_{LW} \cos \beta \cdot \frac{dS_s}{r^2} \quad (3)$$

従って、受熱点Pにおける長波長放射照度 $E_{LW}$ [W/m<sup>2</sup>]は、(3)式を熱源の投影面で積分することで算出される。

$$E_{LW} = \int_{S_s} L_{LW} \cdot \frac{\cos \beta dS_s}{r^2} \quad (4)$$

ここで(4)式を、円周率 $\pi$ を用いて次のように書き換える。

$$E_{LW} = \int_{S_s} \pi L_{LW} \cdot \frac{\cos \beta dS_s}{\pi r^2} \quad (5)$$

(5)式の $\cos \beta dS_s / \pi r^2$ は受熱面Pに対する立体角投射率であり、受熱面Pに対する $dS_s$ の立体角投射率を $U$ とすると、最終的に、受熱点Pにおける熱源からの長波長放射照度 $E_{LW}$ [W/m<sup>2</sup>]は次式で表される。

$$E_{LW} = \int_{S_s} \pi L_{LW} \cdot U \quad (6)$$

なお、立体角投射率 $U$ は、半球面上の $dS_s$ の地表面への垂直投影面積を $dS'_s$ 、立体角投射率の法則より次式で算出される。

$$U = \frac{dS'_s}{\pi} \quad (7)$$

以上の計算を地表面上の各点において行うことにより、長波長放射照度の水平面内空間分布を得ることができる。

## (2) ドローンによる長波放射特性の計測及び3Dモデル作成

ここでは、2021年11月4日、5日の2日間に小規模建築物(建築面2.0m×1.7m、建物高さ約1.7m)を対象とする計測成果を報告する。

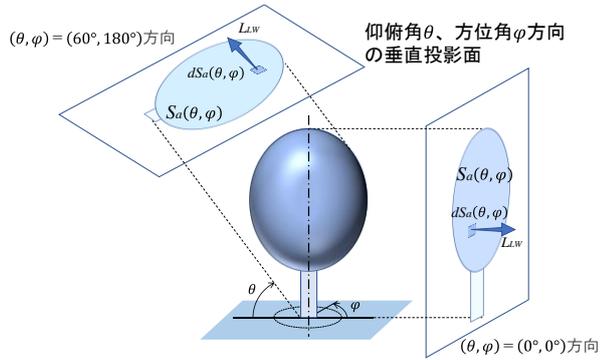


図1 熱源をある方向から見たときの垂直投影面

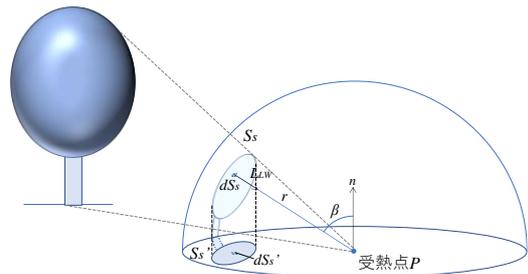


図2 受熱点における長波長放射照度

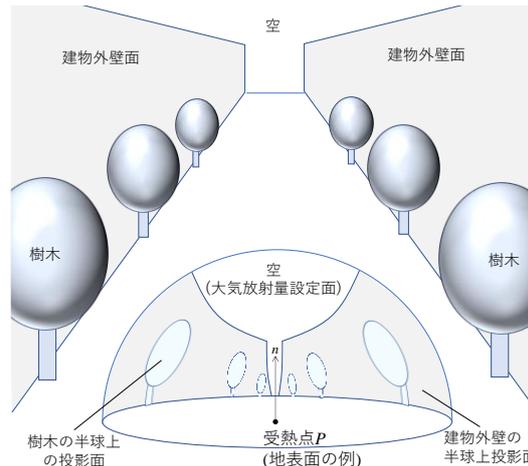


図3 ある受熱点の熱放射照度算出のための半球面上の投影情報

宮城県の東北大学青葉山キャンパス内の小規模建築物(図4、北壁面の方位角が北から-8度)を対象に、可視画像・熱画像同時撮影カメラ搭載ドローン(Parrot, ANAFI thermal)を用いて可視画像及び熱画像(センサ分解能160×120)を取得した。カメラを俯角45度で建物の中心から半径10mの円周上を飛行させ、画像間のオーバーラップ率90%以上を確保して撮影を行った。撮影は9時から16時まで1時間おきで実施し、撮影時間はそれぞれ約15分間とした。



図4 実測対象周辺環境及び対象の小規模建築物

まず可視画像を基にフォトグラメトリ(Pix4D mapper を使用)を行い、3次元点群モデルを構築した。次に、可視画像の点群を結ぶ三角形パネル(メッシュ)群を形成し、メッシュ上に熱画像を投影することで、表面温度が色情報として表現された3Dモデルを作成した。図5(1)に11月4日13時における小規模建物の可視画像及び熱画像を基に作成した3Dモデルである。併せて図5(2)に、東北大学川内キャンパス内の単木樹木を対象とする可視画像及び熱画像を基に作成した3Dモデルを示す。なお、形状寸法の再現精度は誤差4%未満であった。



① 可視画像 ② 3Dモデル ① 可視画像 ② 3Dモデル  
(1) 小規模建物 (2) 単木樹木

図5 熱画像を用いて作成した3次元モデルの例

### (3) 長波長放射強度分布の作成

図6に水平方向(仰俯角 $\theta=0$ 度)の方位角15度ごとからみた投影図を示す。なお、太陽高度 $h=31.5$ 度、方位角 $\phi=208.5$ 度である。

日の当たる南面の表面温度が高く、北面において値が低いことがわかる。南中を過ぎた時刻であるため、東面よりも西面の表面温度の方が高く表れている様子も確認できる。定性的な表面温度の形成傾向が再現されている。

図7に建物の重心を点熱源位置とする、南北を通る仰俯角15度ごとの長波長放射強度をプロットした長波長放射強度分布(図7(1))、東西を通る同分布(図7(2))、水平方向の同分布(図7(3))をそれぞれ示す。なお図7(3)は、図6に示した各図を使用して、(1)、(2)式に基づいて算出した長波長放射強度をプロットした図である。

各図とも太陽位置に面する方向の値が高い。図7(3)を見ると北側の値が最も低く、東方向へはその約1.1倍、西方向へは約1.3倍、南方向へは約1.4倍、最も値の高い南南西方向へは約1.6倍の長波長放射を放つ。また、これら3断面で最も高い長波長放射を放つ方向は南側の仰角 $\theta=30\sim60$ 度(図7(1))であった。

### (4) 長波長放射強度分布の精度検証

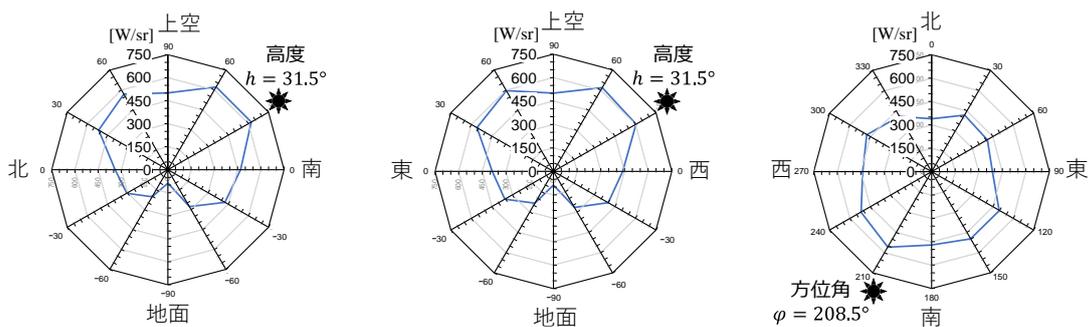
本研究で提案し、作成した3Dモデル(図6に示した各図)から求めた長波長放射強度の値と、建物の熱画像から直接計算した長波長放射強度の値を比較することで、3Dモデルを用いて得られる長波長放射強度の値の推定精度を検証した。

検証に用いた熱画像と3Dモデルの平行投影画像の一例を図8に、長波長放射強度の数値を表1に示す。全体的に3Dモデルの水平投影画像の方が表面温度が高い値を示している。平均的に $2^{\circ}\text{C}$ ほど高い結果であった。表1を見ると、長波長放射強度の誤差は最大で5.7%であり、全比較天の平均では4%未満の誤差であった。

なおこの誤差は手法による誤差ではなく、撮影枚数の不足(画像間の重複率の不足)及びフォトグラメトリソフトの3Dモデル生成時に採用する熱画像の採用アルゴリズム及び複数画像の数値(色情報)の平均化処理の精度によるものと考えられる。4%という誤差はRapid-estimationという目的において実用上問題の無いものと考えられるが、より精緻な撮影とフォトグラメトリ技術の発達によって、この誤差をさらに縮小することが可能であると考えられる。



図6 水平の各方向から見た3Dモデルの平行投影画像  
(13時の例、15  50°C)



(1) 南北を通る仰俯角方向 (2) 東西を通る仰俯角方向 (3) 水平面の方角方向  
図7 建物の重心を点熱源位置とする長波長放射強度分布

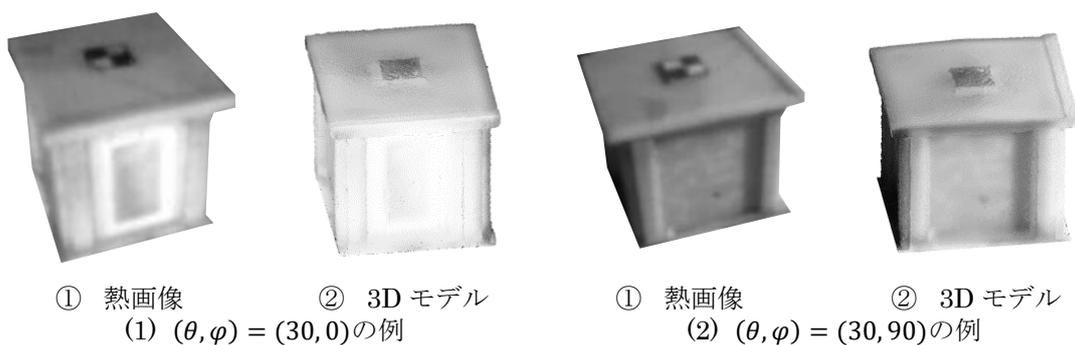


図8 長波長放射の精度検証に用いた画像の一例  
(13時の例、15  50°C)

表1 提案する3Dモデルによる長波長放射強度の推定精度

	$(\theta, \varphi) = (30, 0)$	$(\theta, \varphi) = (30, 180)$	$(\theta, \varphi) = (30, 90)$	$(\theta, \varphi) = (30, -90)$
熱画像	596.8 W/sr	496.4 W/sr	581.2 W/sr	529.5 W/sr
3Dモデル	621.7 W/sr	516.7 W/sr	604.2 W/sr	559.9 W/sr
誤差	4.2 %	4.1 %	4.0 %	5.7 %

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 古澤志帆, 石田泰之, 藤山真美子, 持田灯	4. 巻 -
2. 論文標題 ドローンを利用した都市構成要素が発する長波放射量推定法の開発(その1)長波放射量推定法の提案及びドローンで取得した可視・赤外線画像に基づく小規模建築物の3D モデリング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022年度日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 2163 - 2164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 出牛すずか, 橋本悠実, 石田泰之, 持田灯	4. 巻 -
2. 論文標題 実大樹木を対象とする葉温の空間分布の予測に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023年度日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 40975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 石田泰之, 藤山真美子, 小林光, 持田灯	4. 巻 -
2. 論文標題 ドローンを利用した都市構成要素が発する長波放射量推定法の開発(その2)ドローンを利用した小規模建築物の3D モデリング及び長波長放射強度の算出	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023年度日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 40974
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 石田泰之, 小林光, 藤山真美子, 持田灯	4. 巻 29
2. 論文標題 都市空間内における長波長放射環境のRapid-Estimation手法の提案	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 898 - 903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.29.898	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuka Deushi, Yasuyuki Ishida, Yumi Hashimoto, Akashi Mochida	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on the stomatal conductance model for the prediction of transpiration rate and leaf surface temperature distribution of a single tree on typical summer days based on the result of field measurement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Poster in 11th International Conference on Urban Climate	6. 最初と最後の頁 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasuyuki Ishida, Hikaru Kobayashi, Mamiko Fujiyama, Akashi Mochida	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of long-wave radiation emitted in each direction using a 3D small building model by drone-based photogrammetry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Poster in 11th International Conference on Urban Climate	6. 最初と最後の頁 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 石田泰之
2. 発表標題 ドローンを利用した都市構成要素が発する長波放射量推定法の開発(その1)長波放射量推定法の提案及びドローンで取得した可視・赤外線画像に基づく小規模建築物の3Dモデリング
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会(北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田泰之
2. 発表標題 ドローンを利用した都市構成要素が発する長波放射量推定法の開発(その2)ドローンを利用した小規模建築物の3Dモデリング及び長波長放射強度の算出
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 出牛すずか
2. 発表標題 実大樹木を対象とする葉温の空間分布の予測に関する研究
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuyuki Ishida
2. 発表標題 Study on the stomatal conductance model for the prediction of transpiration rate and leaf surface temperature distribution of a single tree on typical summer days based on the result of field measurement
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuyuki Ishida
2. 発表標題 Estimation of long-wave radiation emitted in each direction using a 3D small building model by drone-based photogrammetry
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	持田 灯  (Mochida Akashi)  (00183658)	東北大学・工学研究科・教授    (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	藤山 真美子  (Fujiyama Mamiko)  (40638425)	お茶の水女子大学・文理融合 AI・データサイエンスセン ター・准教授     (12611)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関