

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04946

研究課題名（和文）都市キャノピー空間を対象とした低頻度高リスク環境の評価と予測

研究課題名（英文）Prediction and evaluation of high-risk low-probability phenomena in an urban canopy space

研究代表者

池谷 直樹 (Ikegaya, Naoki)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：70628213

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,100,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、ダイナミックフラックスシステムを用いた物質輸送係数計測システムの確立、屋外観測データの分析に基づく都市キャノピー乱流場解析、および高解像度数値流体計算による非定常室内高リスク環境データベースの構築を研究目標と設定し、風洞実験と数値流体解析、屋外観測を並列実施することで研究課題を遂行した。新規に実験手法を開発することによって今まで困難であった蒸発量の非接触計測が可能なシステムを構築した。また、風洞実験や数値流体解析による瞬間風速のデータベースを基に、風速場の確率性状を分析した。以上の実験系の構築と風速データの分析によって、都市乱流場の低頻度高リスク事象の評価に資する知見を取得できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非接触フラックスシステムの開発において、従来の方法では困難であった非接触計測を可能にしたことによって、今後の物質輸送係数取得実験の発展に資する新しいシステムを提案し、構築することができた。近赤外分光法を風洞実験に導入した例はこれまでになく、関連分野に新しい計測手法を導入することに成功した波及効果の大きな成果である。また、風洞実験や数値流体解析による瞬間風速のデータベースから得られた風速場の確率性状の分析によって、室内外を問わず、瞬間的に発生する強風や弱風を評価する上で重要となる風速の確率分布に関する知見を取得した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a new dynamic flux system to measure and estimate evaporation flux. Secondly, the field measurements were conducted to evaluate turbulent velocity fields within urban canopy layer in a field measurement site. Lastly, we conducted both numerical and experimental studies to build datasets to evaluate rare but high-risk events indoor and outdoor areas. By developing the system of the evaporation flux using infra-red spectroscopy, we successfully determined the mass transfer coefficient from a surface behind a building obstacles. This system help determining the transfer coefficient. In addition, we also proposed evaluating methods of rare but high-risk event within an urban area using both wind-tunnel experiment and field measurement for the turbulent flow fields within urban areas. The proposed method enables to determine the rate wind speed magnitude and frequency based on the probability density distribution.

研究分野：環境工学

キーワード：都市キャノピー 近赤外分光法 屋外実験 低頻度高リスク事象

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

都市における人々の居住空間は、多数の建物に囲まれた都市キャノピー層と呼ばれる空間であり、都市内建物に作用する抗力やそれによる速度差に起因する乱れ生成によって、複雑な非一様で非定常な気流場となっている。また、熱や汚染物質などのスカラーは、この気流場に併せて移流・拡散することで、同様に複雑なスカラー場を形成する。このような都市居住空間の快適性を目的とした環境評価においては、特に風環境評価の分野において、平均速度と都市建物群幾何形状を関係付けて説明する試みがなされてきた。また、歩行者空間温度が平均風速と逆相関になることも示されており、風の道と呼ばれる都市空間への空気の導入経路を確保することで、温熱快適性が向上することが指摘されている。加えて、申請者のグループにおいても、数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) により、歩行者高さにおける平均速度が都市建物密度 (建蔽率) の増加に対して減少することを明らかにしたことに加えて、新規に定義した有効幾何密度による歩行者高さ風速の推定モデルを提案した。以上のような都市空間内の風・温熱環境評価の一連の研究においては、時空間代表的な快適性の評価が目的であることから、平均風速や平均温度が評価指標として用いられ、それらと幾何形状の関係性を把握し、幾何形状によりモデル化するという試みがなされてきた。

しかしながら、都市居住空間での環境評価においては、発生頻度は低いものの、都市居住空間環境に対して高い危険性や大きな被害をもたらす可能性がある事象 (低頻度高リスク環境) が多く存在する。たとえば、突風による被害である歩行者の転倒や街路樹の倒木、構造物の一部破損は、非常に稀に発生する強風が引き起こす被害である。他にも、熱中症被害であれば、日最高気温が強く影響するであろう。また、排ガスやテロによる毒ガス等の汚染物質などの拡散であれば、ある許容値を超え得る高濃度が発生するかどうか重要になると考えられる。逆に、都市換気の視点では、著しく都市内換気が悪くなる低風速がどの程度発生するかといった低速側の累積度数やパーセントイル風速が重要になる場合もあろう。すなわち、どのような評価目的で都市空間内の速度場やスカラー場を評価するとしても、空間・時間代表的な平均風速や平均スカラー濃度だけではなく、図1に示すような影響力の大きな稀に発生する極大極小事象の程度とその発生確率、すなわち低頻度高リスク環境を確率的かつ定量的に把握し、評価することが極めて重要であると考えられる。

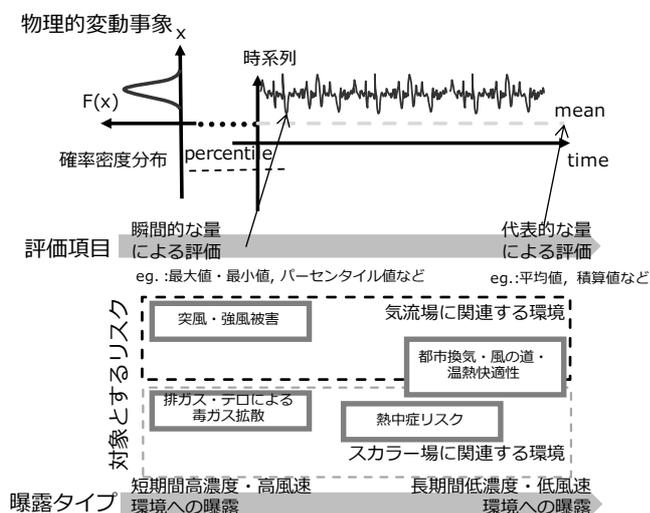


図1 本課題で対象とする低頻度高リスク事象

このような低頻度高リスク環境は、都市建物群の幾何形状に依存する空間的非一様で非定常な速度場やスカラー場の確率性状によって特徴付けられると考えられる。それは、都市キャノピー空間における乱流エネルギーが、建物高さ付近での大きな速度差に由来する乱流生成 (せん断乱流生成) と、建物に作用する抗力による建物スケールの乱流生成 (wake 乱流生成) の二つの建物スケールに依存したメカニズムによって生成されるからである。これらの都市キャノピー空間特有の乱流生成メカニズムについては、前者のせん断乱流生成が自由混合層的な特性を持つことや、後者の wake 乱流生成により通常の乱流エネルギーカスケードとは異なるエネルギースペクトルショートカット機構が観られることなど、定性的には都市キャノピー特有の乱流発生メカニズムとして説明されている。しかしながら、これらの乱流生成機構が定量的にどのように都市空間の速度場とスカラー場に影響を及ぼすかということは解明されていないため、当然、速度場とスカラー場の確率性状の都市建物群幾何形状依存性は解明されていない。従って、低頻度高リスク環境を精度良く予測するためには、速度場とそれに伴うスカラー場の確率性状が如何に都市建物群の幾何形状に依存しているかを解明することが要請されていた。

2. 研究の目的

都市キャノピー空間以上のような背景から、本課題では、都市空間における低頻度高リスク環境の評価を目的として、風洞実験や屋外観測、数値流体解析 CFD により、都市キャノピー空間における速度・スカラー場の確率性状幾何形状依存性の解明を試みることを研究目的として当初設定した。具体的には、複雑建物群からなる建物キャノピー層を対象として、複雑都市形状の乱流生成に由来する速度場及びスカラー濃度場の乱流確率性状について、非常に稀な発生でありながら大きな影響をもたらす可能性がある弱・強風事象や低・高濃度事象 (以下、低頻度高リスク環境) を評価するための実験データセットを構築する ((1)高時

問・空間分解能実験系の構築。) また、風洞実験、数値流体解析、および、準実大スケール屋外実験結果に基づき、都市空間の低頻度高リスク環境の予測手法を提案する ((2)都市内乱流場確率性状の把握と低頻度高リスク環境予測手法の提案)。上記二点を研究目標と設定した。

### 3. 研究の方法

研究方法として、数値流体解析、風洞模型実験、屋外観測、推定モデル構築の方法を用い、それぞれの手法を用いた研究目標について以下のように実施する。

#### (1) 風洞実験におけるダイナミックフラックス計測システムの構築

スカラー場を非接触に計測するダイナミックフラックス計測システムの開発を行う。ダイナミックフラックス計測システムは、スカラーソースからのスカラーフラックスの時間変化と空間内スカラーの時間変化を高精度に捉えるシステムである。同計測システムは、近赤外光の吸収エネルギー量から対象物や空気中の含水率を推定するもので、スカラーソースとして水の蒸発を想定し、蒸発対称面や対象領域に赤外光(波長 900~1700nm)を照射、反射光を近赤外カメラ(NIRカメラ)やフォトマルチプライヤーにより受光することで、その減衰率から含水率の時系列変化を推定する方法である。濃度計測については、赤外光として短波長の赤外高レーザーを用いることで、水蒸気による微弱な赤外光減衰の検出を可能とする。これらの近赤外光による水蒸気分子量の計測システムは、近赤外水分計や三次元スキャナーによる蒸発量推定などにすでに用いられているものの、同手法によりフラックスの時系列変化を推定した例はなく、全く新しい計測手法の構築を試みる。

#### (2) 数値流体解析による超高解像 Large-Eddy Simulation (LES)

風洞実験では困難な多数の群配列条件やスケールの異なる建物を対象とした解析を目的として、超高解像度 LES を実施する。床面からは、風洞実験と同様にスカラーソースを放出することで、速度場とスカラー場の高時間空間分解能データ取得を行う。本解析結果は、風洞実験により得られた検証用データベースにより十分な妥当性検証を行った後、複数の建物群配列条件における速度・スカラー場について、確率統計的な処理を行うことで、都市キャノピー空間の乱流場の確率性状の幾何形状依存性に関するデータの蓄積を試みる。

#### (3) 屋外観測による準実大スケール模型実験による都市キャノピー乱流場の計測

上述の風洞実験や数値流体解析における確率性状の把握においては、実験条件を複数で自由に制御できる一方で、風向や風速が長い時間スケールで変動するような実環境下における乱れの影響を考慮することが困難である。そこで、屋外に設置された準実大スケール模型観測サイト(COSMO)において、キャノピー空間における速度・温度計測を行う。計測では、超音波風速計をキャノピー空間内に複数設置し、速度三次元成分と温度を計測することに加えて、キャノピー表面温度を取得することで、中立条件における速度場と温度場の確率性状把握を試みる。

#### (4) 推定モデルの構築

以上の結果を基に、速度・スカラー場の確率密度分布と低・高パーセントイル風速、極大極小風速などの確率性状、さらには乱流スペクトル分布などを、都市建物群の幾何形状や、高次統計量、によりモデル化する。それに加えて、理想環境下で得られた風洞実験や数値流体解析の結果と準実大スケール実験における乱流場との際を吟味することで、実環境下における低

頻度高リスク環境予測モデルを構築することを試みる。

### 4. 研究成果

上記の目標について、以下の結果を得た。

#### (1) ダイナミックフラックス計測システムの構築

近赤外分光法を応用した非接触蒸発量推定およびバルク輸送係数推定システムを開発した。同システムは、

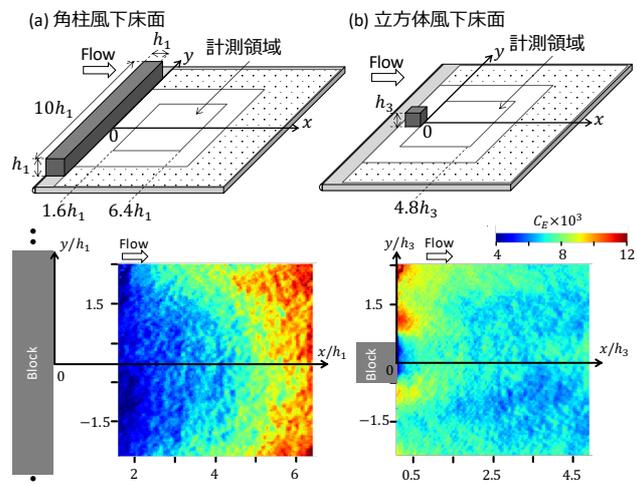


図2 近赤外分光法による2次元フラックス計測システムの結果の一例

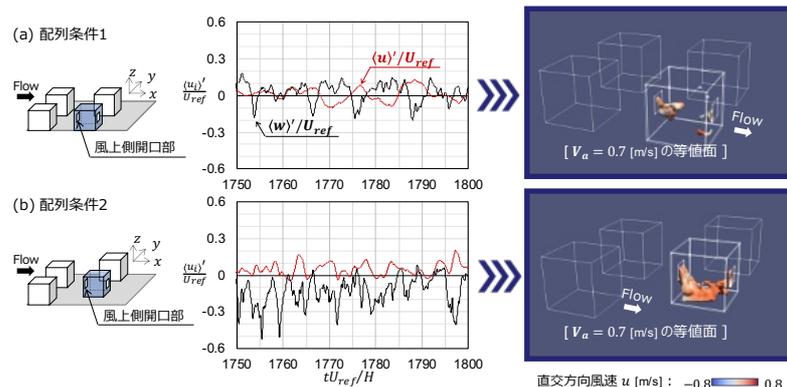


図3 高解像度LES実施例 (a) 配列条件1 (b) 配列条件2

水の近赤外光に対する吸収特性を応用したもので、以下の手順により蒸発量を推定するものである。水は波長 1450 nm と 1940 nm の近赤外波長の光を吸収する。そのため、含水紙に対して近赤外光を照射し、反射強度の変化をスペクトルカメラで捉えることで、ろ紙の含水量を推定できる。スペクトルカメラは、水の吸収・非吸収波長帯を含む全 6 波長の反射光撮影が可能である。背景条件の変化により、非吸収波長帯の反射強度も時間空間的に変化するため、非吸収波長帯と吸収波長帯の反射強度差をろ紙の重量含水率と関係付ける較正実験を事前に行い、較正式を決定した。

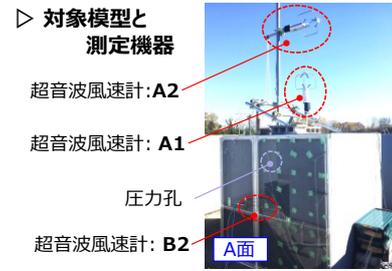


図4 準実大屋外観測実験

アクリルプレート上面にろ紙を貼付した平板、角柱後流域、立方体後流域を対象として、計測領域を上方から近赤外光を照射、スペクトルカメラで  $120 \times 120 \text{mm}^2$  の領域を  $128 \times 128 \text{ pixel}^2$  で撮影、較正曲線を基に、物質輸送効率指標であるバルク輸送係数を推定した。図 2 には、模型後流床面の輸送係数面内分布を示している。キャニオンでの flow regime 変化のチャートによれば、後流再付着位置は模型高さの 3 倍程度になる。図 2(a) では、Case 3 では、模型風下の 0.5 倍付近まで、輸送係数は小さいが、模型側方において、輸送係数が大きくなる領域が確認できる。以上計測事例を示すように、ダイナミックフラックスシステムにより非接触で輸送係数を計測することに成功した。これらの成果は、1 報の国際誌と数報の国内外会議にて報告した。

### (2) 高解像度 LES

建物内外を対象とした高精度 LES を実施した。換気模型を対象として、周囲が建物群に囲まれた条件における室内外の瞬時気流場を数値予測し、時系列解析により稀に発生する空気導入と放出の特性について分析した。図 3 には、異なる二つの配列条件における開口流入風速の時系列変化と、特徴的瞬間流入風速分布の等値図を示している。図 3 (a) の配列では、風上開口から直線的に流入が生じ、鉛直流が上昇とか交流を繰り返しているのに対して、図 3 (b) の配列では、下降流が支配的となり、床面に沿った空気導入が発生している。以上を通じて、高解像度 LES による瞬間風速分布の取得と分析を行った。これらの結果は、2 報の国際誌、1 報の国内誌に発表した。

### (3) 屋外観測

屋外観測サイトにおいて、建物周辺気流の計測と建物風圧の時系列計測を行った。計測は、2016 年春季および 2018 年の冬季に実施した。

春季の実験において、建物風圧と上空風風速を計測した。屋外観測における圧力計測システムを新規に開発し、風圧係数を算出することによって、計測手法の妥当性について検証した。また、建物群建物に対する屋外条件での風圧係数を算出し、上空風の変化に伴う平均風圧係数の変動について分析した。加えて、高時間分解能で計測した時系列風圧・風速データを基に、low pass filter による時間スケール分離法による風圧係数変化について分析し、短時間スケールにおける風圧係数の変動成分の寄与について考察した。

冬季実験においては、前年の春季実験の結果を基に、建物キャニオン内風速を計測するシステムを導入するとともに、圧力計測点を増やし、多点同時の圧力・風速同時計測システムを用いた

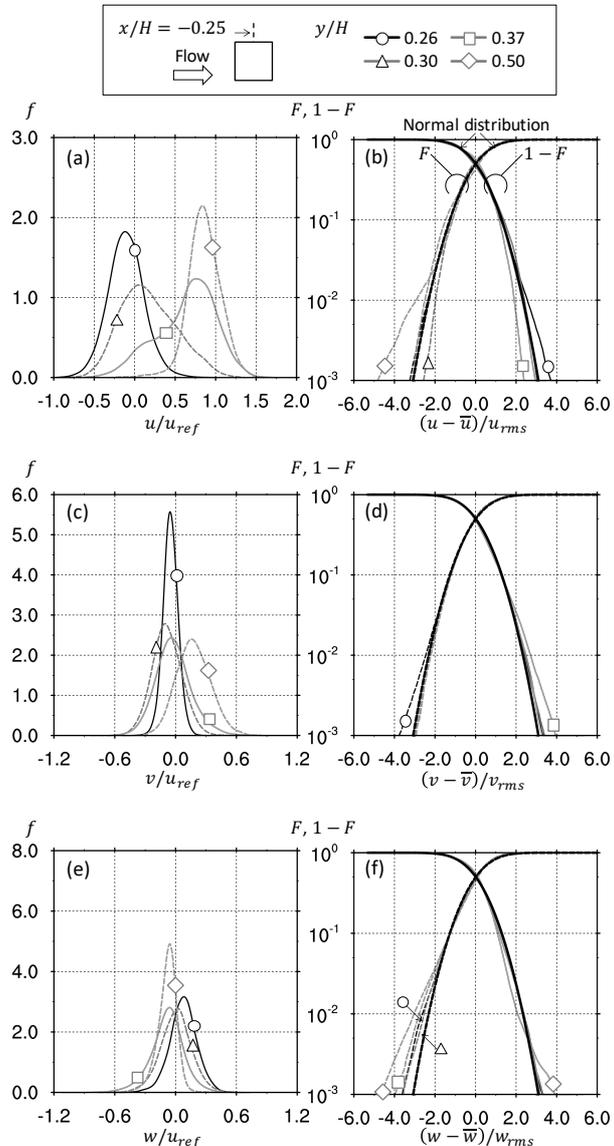


図5 建物周辺気流の確率正常の分析。f: 確率密度分布, F: 累積度数分布, u, v, wはそれぞれ主流, スパン, 鉛直方向風速

計測を行った。変動風圧係数とスペクトル特性を分析することにより、風速と圧力における建物に伴う風向変化とスペクトルの変化の連動性について分析した。加えて、キャニオン内風速と壁面風圧係数の関係を分析し、大局的な風向変化が壁面風圧係数とキャニオン内風速に与える影響について分析した。以上の結果は、2報の国際ジャーナルにて報告した。

#### (4) 低頻度事象の推定モデル

以上により得られた風速データベースを基に、低頻度高リスク事象の評価モデルの構築に向けて、確率性状の分析を行った。図5は、歩行者高さ模型側方における各速度成分の確率密度関数  $f$  と累積度数分布  $F$ 、および逆累積度数分布  $1-F$  を図示したものである。図5(b)の累積度数分布には、実線で正規分布による誤差関数を示している。超過確率が  $10^{-1}$  程度までは、いずれの場所においても、誤差関数とよく一致しているものの、希なイベントになるほど、乖離が大きくなることが分かる。すなわち、稀に発生する強風の予測程困難であることが示唆される。以上の観察結果をもとに、歩行者高さにおける全ての測定点について、ピークファクタの風速依存性について議論し、強風になるほどピークファクタがガウス分布により得られる推定値に近づくことを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5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 Salim Sheikh Ahmad Zaki Shaikh, Razali Mohamad Nor Hafidz Arif, Ikegaya Naoki, Mohammad Ahmad Faiz, Ali Mohamed Sukri Mat	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical simulation of the effects of secondary roughness in the form of extension to arrays of terraced houses on pedestrian wind	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science and Technology for the Built Environment	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/23744731.2020.1735860	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 Ikegaya N., Okaze T., Kikumoto H., Imano M., Ono H., Tominaga Y.	4. 巻 191
2. 論文標題 Effect of the numerical viscosity on reproduction of mean and turbulent flow fields in the case of a 1:1:2 single block model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 279~296
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jweia.2019.06.013	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 Hirose C., Ikegaya N., Hagishima A., Tanimoto J.	4. 巻 160
2. 論文標題 Outdoor measurement of wall pressure on cubical scale model affected by atmospheric turbulent flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 106170~106170
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2019.106170	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 OKAZE Tsubasa, KIKUMOTO Hideki, ONO Hiroki, IMANO Masashi, IKEGAYA Naoki, HASAMA Takamasa, NAKAO Keisuke, KISHIDA Takeshi, TABATA Yuichi, NAKAJIMA Keigo, YOSHIE Ryuichiro, TOMINAGA Yoshihide	4. 巻 26
2. 論文標題 BENCHMARK TEST OF FLOW FIELD AROUND A 1:1:2 SHAPED BUILDING MODEL USING LES:	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 179~184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijt.26.179	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 Ikegaya N., Hasegawa S., Hagishima A.	4. 巻 147
2. 論文標題 Time-resolved particle image velocimetry for cross-ventilation flow of generic block sheltered by urban-like block arrays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 132 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2018.10.015	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 Kawaminami T., Ikegaya N., Hagishima A., Tanimoto J.	4. 巻 182
2. 論文標題 Velocity and scalar concentrations with low occurrence frequencies within urban canopy regions in a neutrally stable shear flow over simplified urban arrays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 286 ~ 294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2018.09.024	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 Mohammad Ahmad Faiz, Zaki Sheikh Ahmad, Ikegaya Naoki, Hagishima Aya, Ali Mohamed Sukri Mat	4. 巻 180
2. 論文標題 A new semi-empirical model for estimating the drag coefficient of the vertical random staggered arrays using LES	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 191 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2018.08.003	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 Murakami Yuki, Ikegaya Naoki, Hagishima Aya, Tanimoto Jun	4. 巻 9
2. 論文標題 Coupled Simulations of Indoor-Outdoor Flow Fields for Cross-Ventilation of a Building in a Simplified Urban Array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 217 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atmos9060217	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 Naoki Ikegaya, Yasuaki Ikeda, Aya Hagishima, Jun Tanitomo	4. 巻 171
2. 論文標題 1.Evaluation of rare velocity at a pedestrian level due to turbulence in a neutrally stable shear flow over simplified urban arrays	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 137-147
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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Eshima H., Yasumasu T., Ikegaya N., Hagishima A., Tanimoto J.,
2. 発表標題 Development of estimation method for convective heat transfer coefficient distribution using near-infrared spectroscopy
3. 学会等名 The 11th International Meeting on Advances in ThermoFluids (IMAT2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Adachi Y., Satonaka H., Ikegaya N., Hagishima A., Tanimoto J.
2. 発表標題 Unsteady numerical simulation of indoor air of a building within an urban-like boundary layer
3. 学会等名 The 11th International Meeting on Advances in ThermoFluids (IMAT2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池谷直樹
2. 発表標題 LESによる市街地風環境予測のためのガイドライン策定に向けて、その6 LESによる1:1:2単体建物周辺流れの乱流スペクトル再現性に関する考察
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池谷直樹
2. 発表標題 都市キャノピー内の建物を対象とした通風換気時の室内流れ計測
3. 学会等名 日本流体学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Ikegaya
2. 発表標題 Effect of advection scheme for large-eddy simulation on turbulent flow fields around an isolated block model
3. 学会等名 Computation Wind Engineering
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Ikegaya, Yasuaki Ikeda, Aya Hagishima, Jun Tanimoto
2. 発表標題 Geometric dependency of exceedance wind speed at pedestrian level
3. 学会等名 International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池谷直樹, 大風翼, 菊本英紀, 富永禎秀
2. 発表標題 単体建物周辺速度の確率性状に対する移流項スキームの影響に関する検討
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------