様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９　(共通)

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　 ５ 月 ２５ 日現在

機関番号：１２６０１
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2017～2019
課題番号：１７H０４９４５

研究課題名（和文）ベイズ統計による環境汚染物質の確率的濃度解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of probabilistic concentration analysis method for environmental pollutants by Bayesian statistics

研究代表者
菊本　英紀（Kikumoto, Hideki）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：８０７０８０８２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　18,400,000円

研究成果の概要（和文）：都市や建築空間中に存在する未知の汚染物質発生源に起因する空気汚染に関して、センサーによる濃度計測値とコンピュータによる気流および濃度予測値をベイズ統計と呼ばれる確率論的方法論で融合し、より高い精度かつ高い空間解像度で環境中の濃度分布推定を行う方法を開発した。この方法の構築に必要とされる各要素技術の拡張や高精度化、高効率化を行うとともに、実験データなどをもとにした実証解析により提案した各手法の有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
都市や建築といった環境中の空気汚染の解析においては、計測またはコンピュータによる解析のどちらかを選択するというのが従来の基本的な考え方であった。しかし、両者にはそれぞれに長所および短所が存在する。本研究の成果は、両者を有機的に接合することで、互いの短所を補いつつ長所を強め、従来の方法論ではなし得なかった高い精度および高い空間解像度での空気汚染物質濃度の評価を実現するものである。本研究では、このような考え方に基づく濃度解析において、学術的にも新たな知見を多く提供するとともに、最終的には人々の居住空間の空気の質を高め、その健康や快適性の向上に資することを目指した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method to estimate the concentration distribution in the environment with higher accuracy and spatial resolution for air pollution caused by unknown pollutant sources in urban and architectural spaces. For this purpose, we used a probabilistic methodology called Bayesian statistics to integrate sensor measurements of concentration with computer predictions of airflow and concentration. To build this method, we extended each elemental technology required for the method, and made it more accurate and efficient. In addition, the effectiveness of each proposed method was clarified by empirical analysis based on experimental data.

研究分野：都市・建築環境

キーワード：建築環境・設備　確率論　流体工学　シミュレーション工学

※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。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

都市・建築空間中の空気環境は、日々我々が呼吸する空気の質を決定する。国内でも都市への人口集中によって、主に自動車排気ガスに起因する都市・生活型大気汚染の改善が未だ十分に達成されていない。また、日々新たな建築材料などが開発され、我々の生活空間は未知の環境汚染源に溢れている。これらの物質による健康リスクをより明らかにするためには、人々の生活空間における汚染物質濃度を精緻に評価しなくてはならない。そのためには、汚染物質濃度情報の高空間解像度化とともに、濃度値の不確かさを評価し、環境情報の信頼性を向上させる必要がある。

最も一般的な汚染物質濃度の評価手法は、実地計測である。計測的手法は、現地での最も信頼性の高い濃度情報を与える。しかし、設置・運用コストの制約からその空間解像度は必ずしも高くない。他方、都市・建築環境工学分野では主に CFD (computational fluid dynamics, 数値流体解析)を用いた汚染物質濃度の予測モデルの開発が進んできた。CFD 解析モデルでは、計測よりも極めて高い空間解像度で濃度分布の情報が得られる。しかし、同解析モデルでは、最も重要な解析条件として汚染物質の発生位置および発生量を与える必要がある。それらの量が未知、あるいは時空間的に大きく変動する場合、発生源パラメータの設定に最大の誤差要因が含まれる。

一方、ある物質濃度の計測値からその発生位置・強度を逆解析する問題は、発生源同定と呼ばれ、環境工学において広く研究されてきた。中でも時間・移流方向を反転した場での仮想的トレーサーの拡散解析を利用した随伴濃度法は、発生源パラメータへの計測濃度応答を効率的に解析する手法として注目され、屋内外の空間での発生源同定で利用されている。したがって、計測データをもとに発生源同定を行い、その推定された発生源パラメータを入力値として拡散解析を実施すれば、汚染物質の空間濃度分布が得られる。

しかし、計測・数値解析ともに様々な誤差が混入し、特に逆解析としての発生源同定の解はこれらの誤差に極めて鋭敏に反応してしまう。したがって、決定論的に発生源パラメータを推定することは実際上不可能であり、ある確率分布をもった変数として発生源は同定される必要がある。その結果、最終的に得られる空間的な各点の汚染物質濃度も確率的に評価されることになる。

近年、ベイズ統計に従ったパラメータ推定手法が注目されている。これは、推定パラメータの事前確率分布を実際に得られた計測データの尤度関数によって更新し、より確からしい推定パラメータの事後確率分布を求める一連の手続きである。計算機能力の向上と数値的な確率分布評価手法の発展によって、いわゆる計算ベイズ統計は数値的なパラメータ推定手法として理工学分野全般で大きな注目を集めている。

２．研究の目的

本研究は、汚染物質濃度の離散的かつ低い空間解像度の計測データを出発点として、連続的かつ高い解像度の空間濃度分布を数値的に解析し、同時にその解析データの信頼性を診断する一連のシステム構築を行うものである。まず、汚染物質濃度の計測データを一次情報として、数値流体解析を用い汚染物質の発生源パラメータの逆推定を行う。さらにその推定された発生源情報から汚染物質濃度の拡散予測を実施する。しかし、各計測・予測段階では様々な誤差が混入する。本研究では、これら一連の解析プロセスをベイズ統計の枠組みで統合することにより、汚染物質濃度の空間分布を確率的に解析し、汚染物質濃度情報の高空間解像度化とその不確かさ評価を実現する。

３．研究の方法

本研究では、主に下記の３つの段階において研究を行った。

（１）発生源同定の確率的推定手法の構築と拡張

ベイズ統計を中核として、CFD 解析による随伴濃度解析と汚染物質濃度の計測を組み合わせ、汚染物質の発生位置とその強度を確率的に推定する基本モデルを構築した。また、汚染物質の発生位置とその強度以外にも必要とされるパラメータや発生源形状に関して、基本手法を拡張するような検討を行った。

（２）濃度予測手法の高精度化

CFD 解析による汚染物質濃度および随伴濃度の予測精度を向上させるため、解析モデルの改良やその精度検証、不確かさ評価などを行った。

（３）濃度計測・予測手法の高効率化

解析効率を向上させるため大量の気流分布データを効率的に保存するデータ圧縮手法に関する検討を行った。また、質の高い計測データを効率的に取得するため、計測センサーを効率的に配置するための方法論とアルゴリズムを開発した。

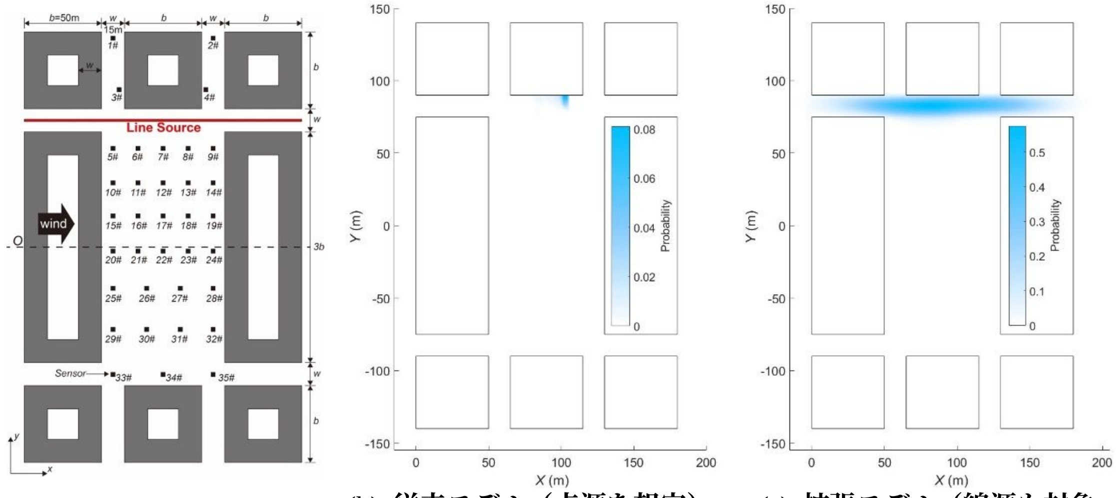
４．研究成果

（１）発生源同定の確率的推定手法の構築と拡張

まず、CFD 解析による随伴濃度解析およびベイズ統計を利用し、汚染物質の発生位置とその強度を確率的に推定する基本モデル、およびそのモデルを数値的に評価する解析システムを構

築した。また、随伴濃度解析を時間平均型乱流モデルで解析する際には、乱流シュミット数と呼ばれるものに代表されるようないくつかの経験的パラメータを与える必要がある。しかし、それらのパラメータ入力値に不確かさが存在すると、それらの不確かさが伝搬し最終的な解析不確かさも増大してしまう。そこで、解析上必要となる経験的パラメータ等も未知量として同時に推定するように基本モデルを拡張した。

さらに、既往研究の多くにおいては、未知汚染物質発生源には理想的な点形状を仮定することがほとんどであった。しかし、現実においては、発生源は線や面あるいは一定の体積を持つものである。したがって、点源の仮定は推定に大きな誤差を引き起こす可能性がある。また、都市や建築環境においては、交通大気汚染や室内の空調送風口を介した空気汚染においては、線形状の発生源も基本的な形状として多く見られる。そこで、上記の発生源推定モデルを線源の幾何情報（長さ、幅と偏角）についても推定できるように拡張した。そして、数値実験や実験データベースを対象とした実証解析を行ない、拡張したモデルにより従来モデルよりも高精度に未知発生源を推定できることを示した（図 1）。



(a) 市街地空間モデル　(b) 従来モデル（点源を想定）による推定結果　(c) 拡張モデル（線源も対象に）による推定結果

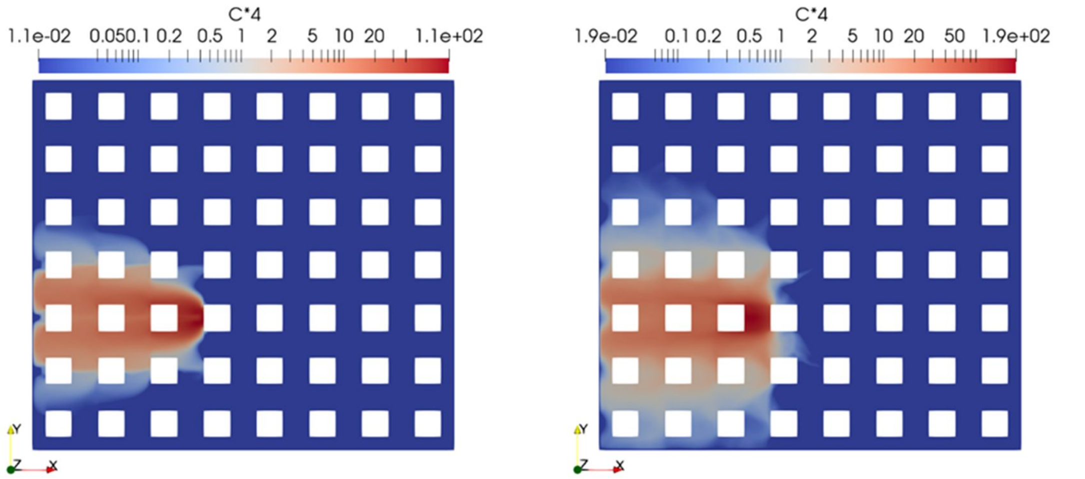
図 1. 未知発生源の幾何形状も取り扱えるようにしたモデルによる推定結果（市街地空間モデルにおける線源からの汚染物質発生を想定）. 拡張モデルによりより真の発生源形状に近づいた推定が実現できた.

（2）濃度予測手法の高精度化

濃度予測手法としては、現在も時間平均型乱流モデルでの解析が主流である。しかし、このモデルでの解析精度の限界については古くから指摘されており、近年ではより精度の高い非定常型乱流モデルを用いた解析も多く使われるようになってきている。しかし、このような非定常型乱流モデルは、一般にコンピュータによる計算負荷が大きく時間平均型乱流モデルよりも多大な計算時間がかかる課題がある。また、発生源同定においては、時間を反転した随伴濃度解析を実施する必要があり、そのためには多量な気流データの保存が必要となり、非定常型乱流モデルを用いた発生源同定は実現が困難であった。

そこで本研究では、非定常型乱流モデルから得た気流データを時間平均型乱流モデルの考えを応用した随伴濃度解析に導入する方法を提案した。また、後述のデータ圧縮手法と組み合わせ、非定常型乱流モデルの気流データを準直接的に利用し、非定常な随伴濃度解析を実現する方法を提案した。これらの方法により、従来手法よりも高い精度で随伴濃度解析が可能になり、また、その結果としての発生源同定の推定不確かさも小さくなることを、単体の高層建物周辺や立方体によって模擬した市街地空間内での汚染物質拡散を対象とした実証解析により明らかにした（図 2）。

この他にも今後の更なる解析モデルの拡張に対応するため、都市空間中における風速や汚染物質濃度の分布を検討する風洞実験を実施し、実験データベースの充実を行った。また、計算コストの低さから時間平均型乱流モデルも多くの場面で用いられることが予想される。そこで、特に点源発生源近傍での同モデルの拡散予測精度向上のための方法論の提案と精度検証などを行った。



(a) 定常気流における随伴濃度の解析結果　(b) 非定常気流における随伴濃度の解析結果

図 2. 立方体建物群モデルにおいて定常および非定常な気流データを用いた随伴濃度解析の結果の例. 本研究で提案した非定常な随伴濃度の準直接解析により，市街地空間で発生する流れ直交方向への大きな拡散を再現できるようになった.

（3）濃度計測・予測手法の高効率化

前節で説明した非定常な随伴濃度解析に加え、汚染物質濃度の様々な解析モデルの提案や検証のためには、市街地空間における精度の高い瞬時気流分布データが欠かせない。しかし、そのようなデータベースは極めてデータサイズが大きく、実現が困難であった。そこで本研究では、ウェーブレット変換に基づくデータ圧縮手法を応用し、非定常型乱流モデルにより解析した立方体建物群モデル内の瞬時気流データベースを構築した。それにより、元データの 1%程度へのデータサイズの圧縮を実現するとともに、この圧縮されたデータを用いても十分な精度で市街地内の気流や汚染物質拡散を再現または予測できることを示した。

また、都市・建築環境中の汚染物質濃度の効率的な監視と発生源同定に基づく濃度分布解析においては、高品質な計測データが必要不可欠である。そこで、有限個の濃度センサーを最大限効率的に配置するため、情報エントロピーの概念に基づくセンサー配置の最適化に関する理論・アルゴリズムの開発を行った。そして、この方法を応用し、市街地空間や室内空間のモデルを対象に、最適な濃度センサー配置を検討した（図 3）。

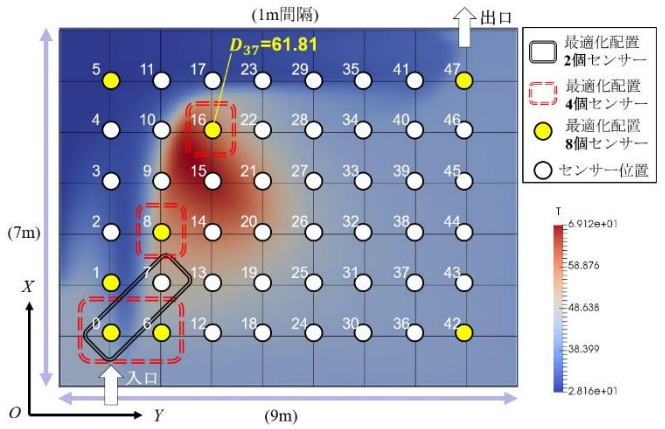


図 3. 室内空間モデルを対象に天井面付近における最適なセンサー配置を検討した例. 室内空間における発生源同定においてはこれらのセンサー配置を用いることで最も不確かさの小さい推定が期待できる.

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計11件（うち査読付論文　9件／うち国際共著　2件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名	４．巻
Kikumoto Hideki、Choi Wonjun、Ooka Ryozo	187
２．論文標題	５．発行年
Development of probabilistic assessment framework for pedestrian wind environment using Bayesian technique	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
Building and Environment	107419～107419
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1016/j.buildenv.2020.107419	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

１．著者名	４．巻
Jia Hongyuan、Kikumoto Hideki	208
２．論文標題	５．発行年
Construction of urban turbulent flow database with wavelet-based compression: A study with large-eddy simulation of flow and dispersion in block-arrayed building group model	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	104433～104433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1016/j.jweia.2020.104433	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

１．著者名	４．巻
Kikumoto Hideki	26
２．論文標題	５．発行年
Turbulent diffusivity limiter with travel time for CFD-Eulerian analysis of point-source pollutant dispersion	2020年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
風工学研究論文集	148-156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
なし	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

１．著者名	４．巻
Jia Hongyuan、Kikumoto Hideki	194
２．論文標題	５．発行年
Line source estimation of environmental pollutants using super-Gaussian geometry model and bayesian inference	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
Environmental Research	110706～110706
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1016/j.envres.2020.110706	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

1．著者名	4．巻
Jia Hongyuan、Kikumoto Hideki	193
2．論文標題	5．発行年
Source term estimation in complex urban environments based on Bayesian inference and unsteady adjoint equations simulated via large eddy simulation	2021年
3．雑誌名	6．最初と最後の頁
Building and Environment	107669～107669
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1016/j.buildenv.2021.107669	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

1．著者名	4．巻
賈 鴻源、菊本 英紀	72
2．論文標題	5．発行年
スーパーガウス関数とベイズ推定を用いた環境汚染物質線形発生源の同定	2020年
3．雑誌名	6．最初と最後の頁
生産研究	49～55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.11188/seisankenkyu.72.49	無
オープンアクセス	国際共著
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	－

1．著者名	4．巻
賈 鴻源、菊本 英紀	73
2．論文標題	5．発行年
LESによる随伴濃度解析を用いた都市環境汚染物質発生源のベイズ推定	2021年
3．雑誌名	6．最初と最後の頁
生産研究	71～76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.11188/seisankenkyu.73.71	無
オープンアクセス	国際共著
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	－

1．著者名	4．巻
Xue Fei、Kikumoto Hideki、Li Xiaofeng、Ooka Ryozo	349
2．論文標題	5．発行年
Bayesian source term estimation of atmospheric releases in urban areas using LES approach	2018年
3．雑誌名	6．最初と最後の頁
Journal of Hazardous Materials	68～78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1016/j.jhazmat.2018.01.050	有
オープンアクセス	国際共著
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	該当する

1．著者名 菊本英紀、崔元準、大岡龍三	4．巻 82
2．論文標題 ベイズ統計アプローチを用いた自然換気パラメータの推定	5．発行年 2017年
3．雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6．最初と最後の頁 357～365
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.82.357	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 Xue Fei、Li Xiaofeng、Ooka Ryozo、Kikumoto Hideki、Zhang Weirong	4．巻 125
2．論文標題 Turbulent Schmidt number for source term estimation using Bayesian inference	5．発行年 2017年
3．雑誌名 Building and Environment	6．最初と最後の頁 414～422
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2017.09.012	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 該当する

1．著者名 Kikumoto Hideki、Ooka Ryozo、Han Mengtao、Nakajima Keigo	4．巻 173
2．論文標題 Consistency of mean wind speed in pedestrian wind environment analyses: Mathematical consideration and a case study using large-eddy simulation	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 91～99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jweia.2017.11.021	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14件（うち招待講演　0件／うち国際学会　4件）

1．発表者名 崔 元準，菊本 英紀，大岡 龍三
2．発表標題 風環境評価におけるベイジアンモデリングの実装　(第1報) 日最大平均風速と風向の確率論的モデリング
3．学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4．発表年 2019年

１．発表者名
菊本 英紀，崔 元準，大岡 龍三

２．発表標題
風環境評価におけるベイジアンモデリングの実装 （第2報）風環境指標の確率的評価

３．学会等名
空気調和・衛生工学会大会

４．発表年
2019年

１．発表者名
賈 鴻源，菊本 英紀

２．発表標題
スーパーガウス幾何モデルを用いた環境汚染物質線形発生源のベイズ推定

３．学会等名
第33回数値流体力学シンポジウム

４．発表年
2019年

１．発表者名
賈 鴻源，菊本 英紀

２．発表標題
CFDを用いた市街地気流解析におけるデータ圧縮に関する研究 （その１）ウェーブレット変換に基づいた圧縮手法の概要

３．学会等名
日本建築学会大会

４．発表年
2020年

１．発表者名
胡 書媛，賈 鴻源，菊本 英紀

２．発表標題
CFDを用いた市街地気流解析におけるデータ圧縮に関する研究 （その２）圧縮したLES流れ場データを用いた汚染物質拡散の再解析

３．学会等名
日本建築学会大会

４．発表年
2020年

1．発表者名 賈 鴻源，菊本 英紀
2．発表標題 ウェーブレット変換に基づく圧縮手法を用いた市街地気流のLESデータベースの構築
3．学会等名 日本流体力学会年会
4．発表年 2020年

1．発表者名 Hongyuan Jia, Hideki Kikumoto
2．発表標題 Line source estimation of environmental pollutants using Bayesian inference coupled with Super-Gaussian geometry model
3．学会等名 ROOMVENT2020 Conference（国際学会）
4．発表年 2021年

1．発表者名 Hideki Kikumoto, Tsubasa Okaze, Yoshihide Tominaga
2．発表標題 Statistical uncertainty in results of large-eddy simulation of flow around an isolated building model
3．学会等名 Computational Wind Engineering 2018（国際学会）
4．発表年 2018年

1．発表者名 菊本英紀，大岡龍三
2．発表標題 都市境界層流におけるピーク風速の確率的予測に関する風洞実験
3．学会等名 日本流体力学会年会2018
4．発表年 2018年

１．発表者名 菊本英紀，大風翼，池谷直樹，富永禎秀
２．発表標題 LESを用いた単体建物モデル周辺気流におけるピーク風速の予測と不確かさ解析に関して
３．学会等名 第34回生研TSFDシンポジウム
４．発表年 2019年

１．発表者名 菊本英紀，大岡龍三，韓夢濤，中島慶悟
２．発表標題 風環境評価における「平均風速」の一致性に関する検討 その1　複数の平均風速の定義とそれらの関係
３．学会等名 日本建築学会大会（中国）
４．発表年 2017年

１．発表者名 韓夢濤，大岡龍三，菊本英紀，中島慶悟
２．発表標題 風環境評価における「平均風速」の一致性に関する検討 その2　単体建物モデル周りの流れにおける平均風速の比較
３．学会等名 日本建築学会大会（中国）
４．発表年 2017年

１．発表者名 Hideki Kikumoto, Ryozo Ooka, Mengtao Han, Keigo Nakajima
２．発表標題 Study on multiple definitions of mean wind speed in pedestrian wind environment analyses using LES
３．学会等名 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering（国際学会）
４．発表年 2017年

１．発表者名 Fei Xue, Xiaofeng Li, Hideki Kikumoto, Ryozo Ooka, Ying Wang
２．発表標題 Bayesian inference for the location and strength of atmospheric releases using LES data
３．学会等名 International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation（国際学会）
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