

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2020

課題番号：17KK0117

研究課題名（和文）都市空間の低頻度風速発生機構解明のための理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study on identifying occurrence mechanisms of rare wind events within urban canopy layer

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） 11,700,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：本課題は、都市域における低頻度高リスク環境の発生機構の解明および都市乱流境界層における統計量普遍則の追求を試みるというものである。2つの海外共同研究機関において、国際共同研究を実施した。オーストラリア連邦科学産業機構では、先行研究として進んでいる植生キャノピー乱流場の知見を共にして、申請者が提案する都市キャノピー上の乱流統計値に対する収支式の理論的定式の導出と、最適な数値解析手法に向けた理論的解釈を提案するに至った。アメリカ大気研究センターでは、運動量・物質輸送係数の文献・データ調査のもと、物質輸送係数のスケール依存性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、都市乱流境界層を対象として、都市域における低頻度高リスク環境の発生機構の解明および都市乱流境界層における統計量普遍則の追求を試みたものである。応用的かつ実学的な研究が先行する日本のアカデミアに対して、本課題による国際共同研究を実施したことによって、先行研究として進んでいる植生キャノピーの知見や屋外実験における物質輸送係数推定の結果から、理論的論考によるモデリングに資する基礎的知見を得ることができた。特に人々や建物などが関連する建築環境の分野のよう応用研究が重要視されつつある分野に対して、流体力学的な基礎的知見を導入できたことの分野に対する波及効果は極めて大きなものであると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we clarify the fundamental factors determining low frequency but high-risk wind gust phenomena occurring within an urban boundary layer. Based on the base theme for this study, we had opportunities to work with two international researchers dealing with turbulent phenomena within atmospheric boundary layers. In commonwealth Scientific Industrial Research Organisation, we theoretically derived an integral equation explaining the momentum budget mechanics which help understand the key reason of gust events within an urban boundary layer. In National Center for Atmospheric Research, we thoroughly reviewed previous transfer model and our results to summarize the relationship between the transfer coefficient of momentum and scalar quantities and considering length scale. We concluded that our study contributes for establishing the models for gust predictions and transfer coefficients.

研究分野：環境工学

キーワード：境界層 都市キャノピー 運動量フラックス 乱流構造 輸送係数

1. 研究開始当初の背景

都市域における人々が居住する多数の建物に囲まれた空間は都市キャノピー層と呼ばれている。この都市キャノピー層の速度分布や汚染物質などの濃度分布は、人々の都市居住快適性に大きく影響を与えるため、都市建物群が都市キャノピー層の非正常気流場や濃度場に及ぼす影響を定量的に理解する必要がある。如上の背景のもと、風環境評価の分野においては、都市キャノピー層の歩行者空間における平均速度や平均温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おり、風の道と呼ばれる都市空間への空気の導入経路を適切に確保するためには、どのような都市設計にするべきかということがこの数十年の間で活潑に議論されてきた。しかしながら、都市居住空間での環境評価においては、平均風速や平均温度のような時空間代表的な現象ではなく、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、突風による歩行者の転倒や街路樹の倒木、構造物の一部破損、夏季の熱中症リスク、テロによる毒ガス拡散による汚染物質リスク、もしくは、高層過密都市における超弱風による汚染物質濃度増加などが一例である。言い換えれば、人々への影響力という観点では、都市空間内の速度場や濃度場を評価する場合に、空間・時間代表的な平均風速や平均物質濃度だけではなく、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ことが容易に想像される。

以上のような背景から、基課題として設定した若手研究 A「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」では、風洞実験や屋外観測、数値流体解析などの種々の研究アプローチにより、都市キャノピー層における速度・濃度場の確率性状の建物群幾何形状依存性を解明し、都市域で発生し得る高リスク事象の環境評価を行うことを目的とし、風速場の確立密度分布から突風と建物群幾何形状の関係性の把握、高濃度場発生メカニズムの解明のための時空間高解像計測手法の構築、屋外観測による自然突風と建物換気量の把握など、都市域居住空間における風環境をいかに評価するかという応用性が高く実用的な研究課題を設定した。これは、人間スケールの現象を対象としている環境工学の分野においては、本質的な現象解明よりも、人々に対して大きな影響力を持つ現象の評価や実用性の高い応用的研究に対して社会的な要請がある、という考えから着想に至ったからである。その一方で、非正常気流場において稀に発生する突風やそれに伴う高濃度事象は、単なるランダム事象ではなく、流体力学的な乱流現象として発生機構を説明できるはずであるということや、こうした現象解明や普遍則の追求こそが工学分野の飛躍のためには必要であるということに対する認識を持っていた。しかしながら、基課題にはこうした基礎研究の研究課題を含めることができず、加えて、当該分野においても、都市域を流体力学的に捉え、現象を理解するという基礎研究が不足しているという現状にあった。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本申請課題では、基課題の応用研究の発展に寄与する理論的手法による現象解明を目的として、都市域における低頻度高リスク環境の発生機構の解明および都市乱流境界層における統計量普遍則の追求を試みる研究目標に設定した。具体的には、先行研究として進んでいる植生および都市キャノピーに関する知見を生かし、(1)上空の乱流統計値の観測事実の整理から、乱流統計値の普遍則と都市大気間の物質輸送量モデルを提案する、(2)都市キャノピー上の乱流統計値に対する収支式を理論的に定式化し、種々の観測事実から観られる普遍則を演繹により証明する、(3)都市キャノピー上空の乱流構造を運動量収支の観点から理論的に説明し、乱流構造と突風発生メカニズムを説明する、という三点を国際共同研究として実施することを研究達成目標として設定した。

3. 研究の方法

都市域周辺の風環境や乱流性状に関する研究に先行して、森林や農作物が形成する特徴的な乱流境界層（植生キャノピー流れ）の研究が古くから進められてきた。当該分野では、植生キャノピー上の物質拡散の評価のような応用的な研究課題のみならず、植生キャノピー上に発生する乱流構造の発生機構、乱流統計量の普遍則など、応用研究を物理的に説明する多くの基礎的知見が得られている。それに対し、都市キャノピー流れに関する研究分野では、都市の風通しや歩行者空間の風環境、排ガス拡散など環境影響力を評価する応用的研究が多く行われている一方で、それらの現象の理論的な説明はほとんどされていない。こうした背景から、先行研究の進んでいる植生キャノピー上の乱流構造の現象解明に関する知見を生かし、申請者の主たる研究分野である都市キャノピーに関する研究分野において、理論的研究を進展させる必要があると考えている。また、森林キャノピーを対象とした多くの屋外観測実績のある共同研究者 2 の元で、物質輸送量モデルの提案を試みる。図 1 には、研究代表者と国際共同研究課題の相関図を示している。これらの二名の共同研究者の元で国際共同研究を実施し、如上の三点

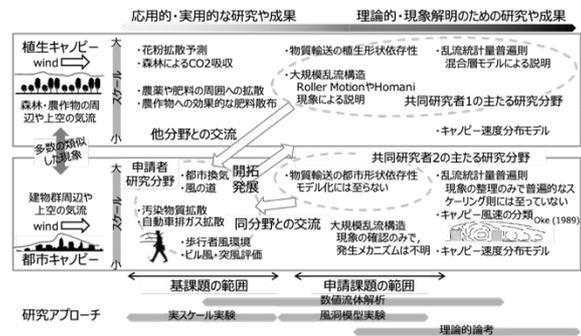


図1 本研究課題と既往研究分野との相互関係の模式図

の研究目標の達成を目指した。

4. 研究成果

(1) オーストラリア連邦科学産業研究機構での Prof. J.J. Finnigan との共同研究

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (科学産業研究機構)に所属する Prof. Finnigan の元で、都市乱流境界層の数値解析におけるスケージング則と植生キャノピーにおける乱流統計量に関する相似性に関する研究を実施した。図2には、対象とした理論モデル体系の模式図を示している。一般化した植生及び都市乱流境界層を対象として、境界層内で発生する運動量収支式をもとに、運動量とエネルギーに関する積分方程式を導出し、最適なスケージング則を導くための理論的考察を行った。その結果、植生・都市キャノピーの違いによらず、同じ積分方程式から得られるスケージング速度を定義することで、運動量及びエネルギー収支式が定式化されることをしめた。

以上の理論的論考をもとに、具体的な応用例として、数値流体解析を対象とした最適な境界条件を課すための理論的論考を進めた。通常の周期境界条件における駆動力には、一般的には、高さによらない流れ方向の圧力勾配を課す方法と、上端境界に一定速度を与える方法が用いられているが、これらの方法は、古典的な円管流れとクエット流れに相当し、境界層内の乱流統計量は運動量収支式から唯一に決定されてしまう。その一方で、屋外観測や風洞実験などの自然な条件で発達する境界層では、乱流統計量はこのどちらの駆動力によるものとも異なることから知られていた。この点を、前述の積分方程式をもとに、周期境界条件を課した数値流体解析と発達する境界層との違いを理論的に明らかにした。加えて、周期境界条件を課した数値解析結果の統計分析を行い、理論式の妥当性を検証した。

以上により、目標に掲げていた、乱流統計値に対する収支式の定式化、及び乱流構造と突風発生メカニズムの解明に資する基礎的知見を得ることができた。以上の結果は、国内会議及び論部誌に成果報告している。

(2) アメリカ大気研究センターでの Dr. N.E. Patton との共同研究

アメリカ大気研究センター Mesoscale and Microscale Meteorology 研究室は、植生キャノピーを対象とした多くの屋外観測事例を公開している。このデータベース調査を行うことで、粗面乱流境界層における物質拡散に関する分析を行った。加えて、研究代表者が既往研究により取得した建物群を対象にした物質輸送係数のデータベースを統合することで、運動量・物質輸送係数のモデル化に資するスケージング則に関する文献調査をまとめた。図3には、物質輸送係数 Da と運動量輸送係数 Cd の長さスケール依存性に関するレビューの結果を整理したものである。加えて、競う研究により得られた実験結果を併せて表示している。運動量輸送係数は長さスケールに対して独立になるのに対して、物質輸送係数は極めて大きな長さスケールにおいても、その依存性が残ることを明確に示している。これらの調査を通じて、物質輸送係数のモデル化に資する基礎的知見を取得することができ、研究目標(1)を達成することができた。

なお、当初予定では、研究目標(1)の実施先として、別の海外研究機関を設定し、事前に渡航調整なども行っていたが、先方の都合によりこの研究期間内での受け入れが困難になったため、当該研究機関への渡航は断念し、当該分野における研究業績が豊富な Dr. Patton の所属するアメリカ大気研究センターへでの国際共同研究に切り替えた。国際共同研究機関は当初予定と変更になったが、目標として掲げていた(1)-(3)の課題については、いずれも達成できたと考えている。

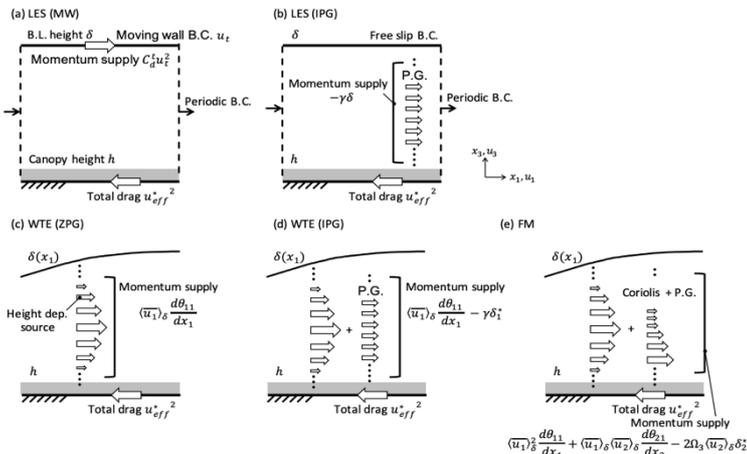


図2 積分方程式から考えられる運動量供給方法の模式図 (a) 数値解析-駆動方法1 (b) 数値解析-駆動方法2 (c) 風洞実験1 (d) 風洞実験2 (e) 大気境界層

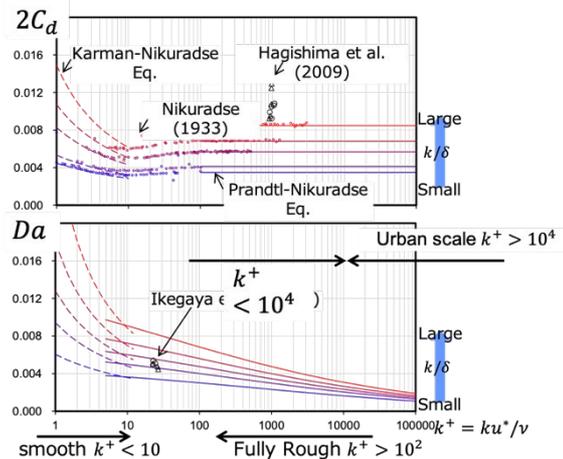


図3 運動量・物質輸送係数のスケール依存性と競う研究の結果の比較 (a) Cd 運動量 (b) Da 物質輸送係数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 0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 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 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 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 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 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 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 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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0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 Kikumoto H., Okaze T., Ikegaya N., Tominaga Y.
2. 発表標題 Investigating statistics of peak wind speed around an isolated building model via large-eddy simulation
3. 学会等名 The 15th International conference on wind engineering
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okaze T., Kikumoto H., Ono H., Ikegaya N., Natao K., Kishida T., Imano M., Hasama T., Tabata Y., Nagajima K., Tominaga Y.
2. 発表標題 Framework of AIJ guidelines of pedestrian wind environment for practical applications of large-eddy simulations
3. 学会等名 The 15th International conference on wind engineering
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 日本流体力学会年会
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 Computational Wind Engineering
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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	フィニガン ジョン (Finnigan John)	オーストラリア連邦科学産業研究機構・Oceans and Atmosphere・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	パットン ネッド (Patton Ned)	アメリカ大気研究センター・MMM・Scientist	

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			
オーストラリア	CSIRO			
米国	National Center for Atmospheric Research			