

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249066

研究課題名(和文) 高分解能広域モニタリング・モデリングによる都市上空の3次元乱流構造の解明

研究課題名(英文) Three Dimensional Turbulent Structure over Cities using Advanced Monitoring and Simulation Technology

研究代表者

神田 学 (Kanda, Manabu)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：90234161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、(a) 高い時空間分解能の広域乱流モニタリング、(b) 建物を解像し街区を包含する広域乱流モデリングを併用し、都市上空の3次元乱流構造の解明と、予測手法の確立を目的として、以下の成果を得た。(1) 接地境界層の乱流構造パターンが6つに分類できた。(2) ストリーク(筋状)構造のストリーク間隔について、流体力学的な無次元物理法則に基づいて、実験室スケールから実大気スケールまで統一的に説明し得る指標を提案した。(3) 建物構造と地表面近くの突風率の物理的対応関係を明らかにした。(4) 多様な都市境界層ではあるが、大局的には、乱流境界層の自己相似的な特徴が明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：For deep understanding and precise prediction of the turbulent structures over cities, using advanced monitoring technology (3D scanning Rider) and huge numerical simulations, this project obtained the following results: (1) Rider observation revealed that the major turbulent structure over cities can be classified into six patterns, (2) a proposed theory on the basis of non-dimensional physical analysis to describe the span width of streaky structures can successfully explain the laboratory scale to Atmospheric scale phenomenon comprehensively, (3) large eddy simulation for the atmosphere over cities quantified the relationship between the urban geometry and resulting gust index near pedestrian level, and (4) the turbulent structure over cities, regardless of the nature of their highly-inhomogeneous and very rough surface, have self-similar feature as are many turbulent boundary layers over rough surfaces.

研究分野：水工学

キーワード：乱流構造 都市気象 ライダー Large Eddy Simulation 水工学 水文学

1. 研究開始当初の背景

ゲリラ豪雨・突風災害・ヒートラインランド・汚染物質拡散など、大都市の防災・環境・気象の正確な予測と対策は、喫緊の課題である。都市上空（地表から1~2kmまで大気境界層と呼ばれる）に発生する乱流は、その中核をなす最も本質的かつ重要な物理過程である。大気境界層中の3次元乱流構造は、水蒸気・熱・物質輸送の主たる担い手であり、防災・環境予報および対策の鍵を握る。しかしながら、3次元乱流構造そのものの実測・解析例は、技術的制約により、きわめて少なく、その機構の解明と予測手法の確立が、関連する学問分野の垣根を越えた急務の課題となっている（神田他, 2012; 神田・稲垣, 2008; 神田・稲垣, 2007; Kanda, 2007; Kanda, 2006、以上全て招待論文）。

大気乱流の観測研究は、気象学分野と、土木・建築・風工学分野で、それぞれ大きく異なるスケールを対象に相互補完的に推進され、地表から大気境界層までの鉛直1次元的な乱流統計量に関する知見と物理相似則の学問体系は、ほぼ確立された（神田編, 2012）。しかし、非定常性の強い3次元乱流構造は、ウインドプロファイラー（気象分野）や、フラックスタワー（土木・建築分野）などの鉛直1次元モニタリングでは原理的に捉えられない。3次元走査型コヒーレントドップラーライダーは、高い時空間解像度で広域に3次元乱流構造をモニタリングできる唯一の最先端技術である。藤吉は、札幌市街上空や海上に適用し、大気境界層中に存在する多様な乱流構造（ストリーク・網目状構造・ダストデビル・コールドサーマルなど）を見出した（藤吉・藤原, 2012; Fujiwara et al., 2011; Fujiyoshi et al., 2006; 藤吉他, 2005, 招待講演参照）。

大気乱流のシミュレーション技術も、気象学分野と、土木・建築分野で、それぞれ大きく異なるスケールを対象に相互補完的に推進されてきた。2000年以降、超並列スーパーコンピュータの性能向上を背景に、個々の建物を解像しつつ（土木・建築スケール）、街区全体を包含する（メソ気象学スケール）シミュレーション技術が登場してきた。神田・稲垣は、単純化された都市上の大気境界層を対象として、建物を解像した超並列ラージ・エディター・シミュレーションを適用して、3次元乱流構造と熱・物質・運動量の輸送の機構を明らかにしてきた（Inagaki et al., 2012; Castillo et al., 2011; 神田, 2008; Kanda, 2006; Kanda et al., 2004a,b）。さらにこの技術を、東京・名古屋の1 km²の街区120箇所適用して新しい都市の空気力学的陸面モデルを提案した（Kanda et al., 2012）。

2. 研究の目的

高い時空間分解能の広域大気モニタリング

と、建物を解像し街区を包含する広域大気モデリング、の最先端技術を軸に、それぞれの利点と欠点を相互補完させて相乗的に利用し、都市上空の3次元乱流構造の解明と予測手法の確立を目的とする。単なる事例解析ではなく、広範な環境条件で出現する多様な3次元乱流構造の分類・定量・予測の体系化を行う。

(1) 高分解能広域モニタリング

3次元走査型コヒーレントドップラーライダーを中心に、各種のリモートセンシング・地上乱流観測を同期させた多重的大気モニタリングを長期連続的に実施する。地上の同期観測点については、広域シミュレーション結果を参照し、上空の乱流構造と関連の強いホットスポットを選定する。多様な3次元乱流構造の発生条件を把握した上で、それらを分類・定量化し、発生・維持・消滅機構を解明する。

(2) 高分解能広域モデリング

超並列ラージ・エディター・シミュレーション(LES)を用いて、建物解像広域モデリングによって、ライダーから得られる3次元乱流構造の再現シミュレーションを実施する。風上側流入条件は、LESの最大の弱点であったが、モニタリングで得られる乱流プロファイルと同化する。それにより、観測との定量的比較が可能となり、広範な大気環境に適用できるよう乱流モデリングと物理境界条件の改良を行い、その予測手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 3次元走査型コヒーレントドップラーライダーの連続通年観測

3次元走査型コヒーレントドップラーライダー（北大現有）を東工大西8号館展望台屋上（地上77m高度）に設置する。設置高度は鉛直1次元物理相似側が適用できる都市の接地境界層に存在する。半径8kmで水平360°の水平断面観測（所要時間2分）と主風向に向けた半径8km鉛直180°の鉛直断面（所要時間1分）を1年間交互に繰り返す。担当者（藤吉）は、同装置を駆使して、多くの実績・業績があり適任である（藤吉・藤原, 2012; Fujiwara et al., 2011; Fujiyoshi et al., 2006; 藤吉他, 2005, 招待講演参照）。

(2) 多重的大気モニタリングその1 ~ 鉛直1次元リモートセンシング

リモートセンサーを用いて、大気境界層内（地上90m~数km）の各種物理量の鉛直1次元分布をライダーと同期（同一場所）観測する。具体的には、マイクロ波放射計（北大現有）で気温・水蒸気分布を、小型コヒーレントドップラーライダー（千葉工大現有）により乱流統計量分布を、それぞれ計測する。担当者（小田）は、ライダーによる連続鉛直1次元乱流プロファイリングについての実績があり適任である（小田ら2011, Oda et al. 2012）。

(3) 多重的大気モニタリングその2 ~ 多点地上乱流観測

超音波風速温度計5台(東工大現有)をライダー観測域内の電柱に分散配置し、地上レベルでの乱流の連続同期観測を行う。配置場所は、ライダー初動1か月の観測値およびオフライン・シミュレーション結果を参照し、上空の乱流構造と関連の強いホットスポットを選定する。担当者(稲垣)は、屋外都市模型実験で30台の超音波風速温度計の多点同時観測を行った実績・業績があり適任である(Inagaki and Kanda, 2008; 2010)。

(4) 超並列ラージ・エディー・シミュレーションによる建物解像広域モデリング

超並列ラージ・エディー・シミュレーション(東工大開発)により、ライダー観測領域に対応する8km×8km(水平)×2km(鉛直)の大規模並列計算(東工大TSUBAME2.0)を行う。具体的には、詳細な建物GIS情報MAPCUBE(一部新規購入)を利用して空間分解能2mで建物まで解像する。当該年度は、鉛直1次元プロファイルから初期データを生成するが、流入境界条件として同化せずに、計算が安定なオフラインのシミュレーションを行う。担当者(神田)は、超並列ラージ・エディー・シミュレーションに関する実績・業績があり(Kanda et al., 2012; 神田, 2008; Kanda, 2006; Kanda et al., 2004a, b) 適任である。

(5) 統合データアーカイブの作成

ライダーの全観測データについて3次元乱流構造の分類を行う。まず目視より定性的分類(網目状・ストリーク・フロントなど)を行い、次に、VAD法の3つの風速成分(一様成分・収束成分・変形成分)を指標として系統的に分類する。同分類の乱流構造別に、オフライン・シミュレーションの結果、多重モニタリングの結果、ルーチン気象観測値(アメダスなど)を統合して、データアーカイブの作成を行う。

(6) 分担研究間の連携と研究全体統括

モニタリング・モデリング・データアーカイブは、それぞれに相互依存しながら同時並行的に進められるため、一元的に管理・総括されることが望ましい。上記の基本作業は全て東工大大岡山キャンパスで行われ(ライダーは北大からも遠隔操作可能である)、データアーカイブはリアルタイムで研究分担者の機関に共有され、2次解析に供される。研究統括者(神田)は、都市気象学における観測・屋外実験・計算など全般にわたって多くの業績があり適任である(神田他, 2012; 神田, 2009; 神田・稲垣, 2008; 神田・稲垣, 2007; Kanda, 2007; Kanda, 2006、以上全て招待解説論文)

4. 研究成果

(1) 都市大気乱流構造の普遍性

ドップラーライダー及び大規模数値計算結果

に基づき都市大気乱流構造の相似性について検討を行った。数値計算に関して、ドップラーライダーによる観測地点周囲の19.6km×4.8km×1kmの領域を2mで分解した中立大気安定度での計算を実施した。本計算には格子ボルツマン法に基づくLESモデルを用い、TSUBAME2.5における900GPUコアを使用した。

図1aはドップラーライダーの水平スキャンで得られた視線方向風速分布、図1bは大規模数値計算により得られた瞬間主流風速の水平分布を示したものであり、流れ方向に引き伸ばされた筋状の構造が共に見て取れる。この構造の幅をスペクトル解析及び空間相関解析により定量化し、両者比較を行った。

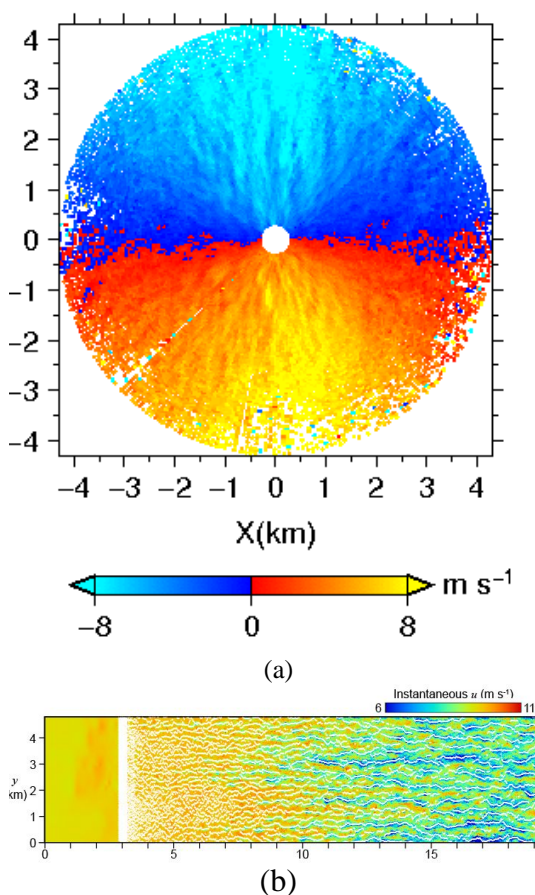


図1 ドップラーライダー観測及び数値計算で確認された都市上空で発達する筋状乱流構造

(a) 屋外大気観測における視線方向風速分布、(b) 大規模数値計算で得られた主流風向水平風速分布

図2aは筋状乱流組織構造の幅及び測定高度を境界層高度で無次元化した値の関係を示した図であり、それぞれ観測と数値計算毎にはまとまりを見せたものの、観測と数値計算の間で大きな違いが見られた。しかし、縦軸の無次元測定高度を局所的な水平風速シアを考慮した変数を掛けることで、両者が一致することを示した(図2b)。これはつまり、筋状構造の幅は高度変化するがそれは境界層高度高度に対する相対的な測定高度で決まり、

また局所的な水平シアの強さによって筋状構造が引き伸ばされることで幅が変化することを意味している。両者を考慮した無次元高度を導入することで、大気安定度、大気境界層高度、地表面性状などに依らない、大気境界層の筋状乱流組織構造の幅に関する普遍的な関係が得られた。

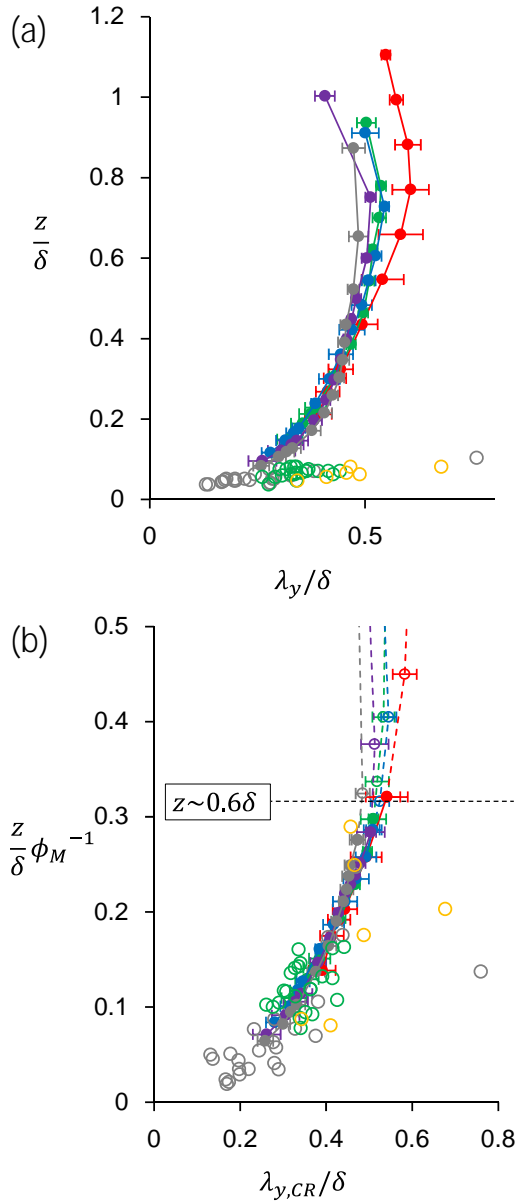


図2 筋状乱流構造の幅の鉛直分布
塗りつぶした点は数値計算結果、中抜きはドップラーライダーによる観測値
(a)縦軸を境界層高度で無次元化したもの、
(b)縦軸を境界層高度及び局所的な無次元速度勾配で無次元化したもの

またこの他に、長期間観測されたドップラー速度の水平分布データを用いて、大気境界層に見られる乱流的な流れの構造を目視分類し、それらの発生頻度が大気環境場から得られる指標で説明できることを示した。

(2)屋外観測による慣性低層の観測
大気境界層の観測において、これまでの研究

では慣性低層は大気境界層高度の下層約 10% と考えられてきたが、その高度を陽的に定量化した指標が存在しなかった。これに対し、水平圧力勾配と地表面摩擦がつり合う定常な場を想定することでレイノルズ応力が直線分布になると仮定し、それを上方に外挿してレイノルズ応力がゼロになる高さ（レイノルズ応力が仮想的に失われる高さ）を完成低層の潜在的な上端と定義した。この指標の特性についてドップラーライダーを用いたレイノルズ応力の鉛直分布の実測により検討した。図3 は都内沿岸部の夏季における大気境界層及び慣性低層高度の1週間の変動を示しており、日中に慣性低層高度が大気境界層高度の下層約 15%程度となること、夜間は両高度が概ね一致することを示し、定性的にこの指標の妥当性を示した。

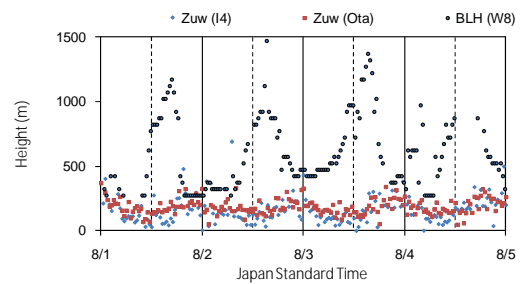


図3 大気境界層及び慣性低層高度の時間変化
夏季都内における5日間の変化を表わしている。黒点は大気境界層高度、茶点及び青点はそれぞれ慣性低層の高さを示し、点線は正午を示す

(3)突風率マップの作成

上記で用いた都市の大規模大気乱流計算結果を用いて、都市街区内（高度2m）の突風率マップを作製した。既往の研究において突風の評価指標はある観測点における瞬間最大風速（あるいは3秒平均最大風速）を同地点における局所的な10分程度の平均風速で無次元

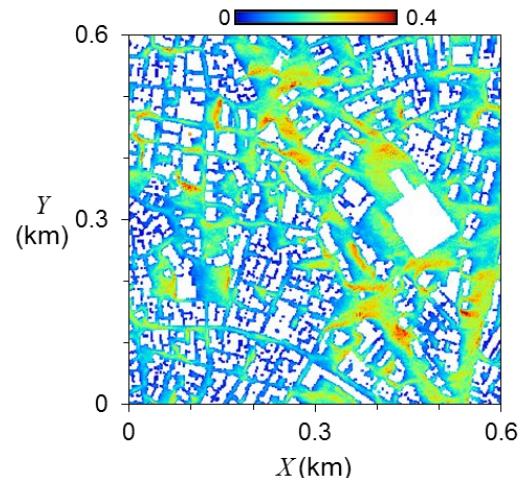


図4 高度2mにおける都市街区内の突風率マップ

化した指標が使われていたが、この指標では必ずしも最大風速が大きい所で大きな値にはならず（例えば平均風速が小さくなる場合など）観測地点による違いを議論することが難しかった。これに対し、本研究では数値解析の利点を活かし、空間一様な境界層外層風速で最大風速を無次元化した指標を新たに定義し、街区の突風の特性について調べた。これにより街区構造の違いによる影響や、突風率マップの作成が可能となった。図4は計算領域のある一区画における突風率の分布を示したものである。

次に突風率と街区構造の関係を調べるため、計算領域を水平500m四方程度の小区画に分割し、それぞれの中で建蔽率を計算し、小区画内の平均的な突風率並びに平均風速率（局所的な時間平均風速を外層風速で無次元化したもの）との関係について検討した。図5は突風率と建蔽率の関係を示した図であり、平均的な突風率の大きさは建蔽率が大きくなるほど小さくなる傾向が見られるが、建蔽率が30%を境に突風率の減少傾向がより大きくなること分かった。これは建物間の距離がある程度より小さくなると上空の風が街区区内に入り込みにくくなるような流れの形態（Skimming flow regime）に遷移するためである。このような特異点は都市気象面からの都市計画への提言、あるいは現在の都市形態の評価基準として使えることを意味する。

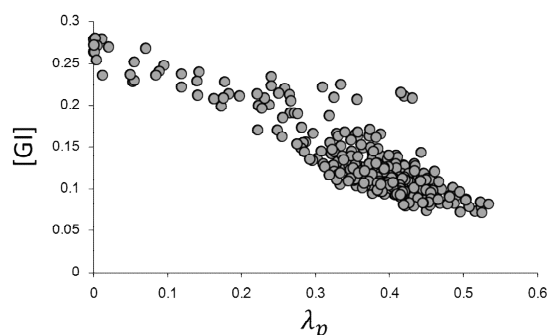


図5 都市街区内の高度2mにおける突風率[GI]と建蔽率[λ_p]の関係

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計22件)

Huda, A., N., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N. and Aoki, T. : Large Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area using the Lattice Boltzmann Method, 査読有, Boundary-Layer Meteorology, 2017, DOI10.1007/s10546-017-0233-6

Inagaki, A., Kanda, M., Huda, A., N., Yagi, A., Onodera, N. and Aoki, T. : A numerical study of turbulence statistics and the structure of a spatially developing boundary layer

over a realistic urban geometry, 査読有, Boundary-Layer Meteorology, 2016, DOI 10.1007/s10546-017-0233-6

Yagi, A., Inagaki, A., Kanda, M., Fujiwara, C. and Fujiyoshi, Y. : Nature of Streaky Structures observed by a Doppler Lidar, 査読有, Boundary-Layer Meteorology, 2016, DOI 10.1007/s10546-017-0233-6

小田僚子、稲垣厚至、八木綾子、神田 学、藤吉康志、設置境界層高度推定手法の提案、土木学会論文集 B1 (水工学)、査読有、72巻、2016年、pp.1_79-1_84

Huda, A., N., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N. and Aoki, T. : Large Eddy Simulation of the gust factor using Lattice Boltzmann Method within a huge and high resolution urban area of Tokyo, Journal of Japan Society of Civil Engineers, 査読有, Vol.71, 2015, pp. I_37-I_42

Gronemeier, T., Inagaki, A., Gryscha, M. and Kanda, M. : Large Eddy Simulation of an urban canopy using Synthetic turbulence inflow generation method, Journal of Japan Society of Civil Engineers, 査読有, Vol.71, 2015, pp. I_37-I_42

Bakkali, M., Inagaki, A., Ashie, Y., Yoshida, Y., Kanda, M. and Raasch, S. : Thermal Large Eddy Simulation with sensible heat flux distribution from various 3D building geometries, Journal of Japan Society of Civil Engineers, 査読有, Vol.71, 2015, pp. schI_433-I_438

Roth, M., Inagaki, A., Sugawara, H. and Kanda, M. : Small-scale spatial variability of turbulence statistics, (co)spectra and turbulent kinetic energy measured over a regular array of cube roughness, Environmental Fluid Mechanics, 査読有, 2013, DOI10.1007/s10652-013-9322-3

Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, H., Gryscha, M. and Raasch, S. : A New aerodynamic parameterization for real urban surfaces, Boundary-Layer Meteorology, 査読有, 148(2), 2013, pp.357-377

Takimoto, H., Inagaki, A., Kanda, M., Sato, A. and Michioka, T. : Length-scale similarity of turbulent organized structures over surfaces with different roughness types, Boundary-Layer Meteorology, 査読有, 147(2), 2013, pp.217-236

Inagaki, A., Kanda, M., Onomura, S. and Kumemura, H. : Thermal image velocimetry, Boundary-Layer

Meteorology, 査読有, 149(1), 2013, pp.1-18

〔学会発表〕(計 34 件)

稲垣厚至、Meral Yucel、神田 学、Misha Gryschka、不安定都市大気境界層の乱気流組織構造、日本流体力学会年会、2016年9月、名古屋工業大学

Inagaki, A. and Kanda, M.: An application of the thermal image velocimetry to detect the dust-devil like vortex, 22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Jun. 2016, Salt Lake City, Utah, USA

Inagaki, A. Huda, A.,N., Yagi, A., Kanda, M., Onodera, N. and Aoki, T.: Evaluation of the outer-layer scaling in a developing urban boundary layer using lattice Boltzmann method, 22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Jun. 2016, Salt Lake City, Utah, USA

Oda, R., Inagaki, A., Yagi, A., Kanda, M. and Fujiyoshi, Y. : The Height of Surface Layer Observed by Doppler Lidar in a Coastal Area of Tokyo, 22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Jun. 2016, Salt Lake City, Utah, USA

Yucel, M., Inagaki, A. and Kanda, M.: Boundary-Layer Development with Buoyancy-Driven Flows over a Built-Up area in Istanbul, 22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Jun. 2016, Salt Lake City, Utah, USA

稲垣厚至、Nurul Huda Ahmad、小野寺直行、神田 学、青木尊之、八木綾子、LBMを用いた中立都市大気境界層の相似性の検討、日本流体力学会年会、2015年9月、東京

Kanda, M., Inagaki, A., Huda, N., Aoki, T. and Yagi, A. : Large eddy simulation of internal boundary developments over a huge urban area with 2m resolution, 9th International Conference of Urban Climate, July, 2015, Toulouse, France

Inagaki, A., Kotthaus, S. and Kanda, M. : Characterising internal boundary layers forming over an idealized urban surface based on air temperature observations with high spatio-temporal resolution, 9th International Conference of Urban Climate, July, 2015, Toulouse, France

Oda, R., Inagaki, A., Yagi, A., Kanda, M. and Fujiyoshi, Y. : Multi-point Doppler Lidar observation in urban area, 9th International

Conference of Urban Climate, July, 2015, Toulouse, France

〔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

<http://www.ide.titech.ac.jp/~kandalab/ja/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 学 (KANDA, Manabu)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：90234161

(2) 研究分担者

足永 靖信 (ASHIE, Yasunobu)

国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長

研究者番号：20360464

藤吉 康志 (FUJIYOSHI, Yasushi)

北海道大学・低温科学研究所・特任教授

研究者番号：40142749

小田 僚子 (ODA, Ryoko)

千葉工業大学・創造工学部・准教授

研究者番号：50553195

鈴木 真一 (SUZUKI, Shinichi)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域・主任研究員

研究者番号：60462503

稲垣 厚至 (INAGAKI, Atsushi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：80515180

仲吉 信人 (NAKAYOSHI, Makoto)

東京理科大学・理工学部・講師

研究者番号：90706475