

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420492

研究課題名(和文) 都市高層建物が作る大規模乱流構造に関する数値解析的研究

研究課題名(英文) Large scale turbulent structure behind an isolated high-rise building

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではLarge Eddy Simulation を用いて高層建物がトリガーとなって生じる大規模乱流構造の性質について検討した。実都市幾何形状に対する中立及び不安定の計算を実施した。高層建物が筋状の大規模組織構造を作り出す傾向があることを一連の数値実験及び観測結果より示されたが、その大きさは地表面条件、大気安定度、室内外実験などを問わず、境界層高度、水平風速シア、摩擦速度で概ね規定されることを明らかにした。また、不安定大気安定度の結果より、地表面条件がトリガーとなるためには境界層高度に対する地物の空間スケールが重要であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the role of the building obstacles to trigger the evolution of streaky structure within turbulent boundary layer over urban roughness. This was evaluated using large eddy simulation models.

We confirmed that very large streaky structures of turbulence are triggered by isolated tall buildings although their characteristics are not special among those seen in homogeneous surface conditions. Under unstable thermal stratification, obstacle sizes relative to the boundary-layer height is important to contribute to the deformation of the turbulent structures.

研究分野：都市気象

キーワード：都市大気境界層 乱流構造 LES 筋状構造 大気安定度

1. 研究開始当初の背景

ヒートアイランド、都市集中豪雨、大気汚染などの各種都市大気環境問題は、都市特有の地表面幾何形状や人間活動が大きな要因となり引き起こされている。今後予想される都市への更なる人口集中や、それに伴う都市形態の変化、地球温暖化の影響等により、上記のような問題がどのように変化するか予測することは極めて重要な課題である。そのためには都市大気環境を形成する物理メカニズムを正しく理解することが必要不可欠である。

近年に見られる都市化の問題として、急激な開発を遂げた高層建物群が都市大気環境に及ぼす影響について検討されている。例えば、都市湾岸に建設された高層建物群が海風の侵入を妨げ、内陸の気温上昇を引き起こす可能性があるとして指摘されている。しかし一方で、高層建物の抵抗が生み出す大気の攪拌作用が上空の冷涼な空気を下層へ引き込み、都市を冷やしているとも考えられている。結果として、都市の気温がどちら側に変化するか、明確な答えが得られていない。

高層建物が都市大気環境に及ぼす影響について、乱流組織構造に着目した別な角度からの検討がなされている。これまでの研究では、都市域においてドップラーライダーによる大気境界層乱流の実測が行われ、高層建物の背後から筋状の低速領域が発達することが観測されている。その長さは数 km に渡ることから単純な建物後流のみの影響ではないと考えられるが、その物理過程についてはよく分かっていない。この構造の全長は 1 km 以上あり、それに沿って大規模な上下方向の運動量輸送が生じることが確認されている。しかしながら、高層建物が必ずしも大規模乱流構造を生み出すとは限らず、実際、より高層かつ大きな建物からは大規模構造が生じない結果が同解析中で得られているなど、高層建物の大きさのみに依存した単純な現象ではないと考えられる。

都市建物群が作り出す乱流組織構造の性質について、屋外大気観測実験による検討が行われ、建物及び建物模型の数十倍もの大きさを持った、平板乱流境界層に見られるものと同様の低速ストリーク構造が発達することが確認されている。また、それらの構造が約 7 割の運動量及び顕熱輸送を担っている観測結果が得られている。この構造は上記で述べた、建物背後の筋状構造と形状、性質共に良く似ており、力学的な相似性が示唆される。

LES を用いた都市大気乱流の数値解析では、大気境界層スケールの流れ (~1 km) から街区スケールの流れ (~1 m) を陽的に解像する大規模な数値計算を実施し、大気境界層、接地境界層及び都市キャノピー層 (建物高さ以下の層) の流れの関係性について検討している。その結果、上空を低速ストリーク構造が通過する時に、都市キャノピーにおいて運動量や熱のベンチレーションが促進さ

れることが明らかにされている。

以上より、高層建物は大きな流体抵抗を生み出し、背後に大規模乱流構造を形成することがあり、その大規模乱流構造は広域に渡った運動量輸送を引き起こすことが分かっている。しかしながら、高層建物を作る乱流組織構造の特性に関する知見はほとんど得られていない。そこで本研究では、高層建物が作り出す乱流組織構造の力学特性及び、それが都市大気環境へ及ぼす影響について、LES に基づいた数値解析により検討することを目的とする。

2. 研究の目的

本研究目的は次の 2 点である。(1) 乱流構造のトリガーとなるような建物配置を調べる、(2) 建物から作られた乱流組織構造の物理特性を明らかにする。(1) については、建蔽率や建物高さ等のパラメータで制御された都市幾何形状に対して LES を用いた流体計算を実施し、高層建物幾何と乱流組織構造の発生の関係性について検討する。(2) については (1) にて再現された、高層建物から発する乱流組織構造の性質について検討する。具体的には、接地境界層で観測される乱流構造との相似性、大規模乱流構造の持続メカニズム、都市キャノピー層の流れ場への影響や運動量・物質・熱のベンチレーションに対する働きなどについて検討する。

3. 研究の方法

数値実験により、大規模乱流構造発達トリガーとなる高層建物及び周囲の建物群の幾何配列の条件について検討する。都市幾何パラメータを変えた数値解析を実施し、どのような時に大規模構造が発達するのか・しないのかについて検討する。その結果を基に、高層建物がトリガーとなって生じる乱流組織構造の性質について検討する。

4. 研究成果

まず、格子ボルツマン法 LES を用い、東京都臨海部の建物形状を陽的に解像した格子解像度 2m、計算領域 19.2km×4.8km×1km の大規模計算を実施し、中立都市大気境界層について検討した。流入風を一様にする一方で、流入条件に依存しない渦の発生地点について検討することができる。

図 1 は数値実験の結果であり、高度 48m における主流方向風速を表わしている。同図にドップラーライダーによる視線風速分布の観測結果を示している。この計算領域は住宅地が大半を占めており、その平均建物高さは 10m 弱であるが、領域の中央付近に 80m の高い建物が存在する。図より、その背後から比較的強い筋状の低速領域が発達していることが確認できる。計算とほぼ同じ風向の時に観測されたドップラーライダーの観測値が同図に示されているが、計算とほぼ同じ線上に筋状低速領域が確認できる。ドップラー

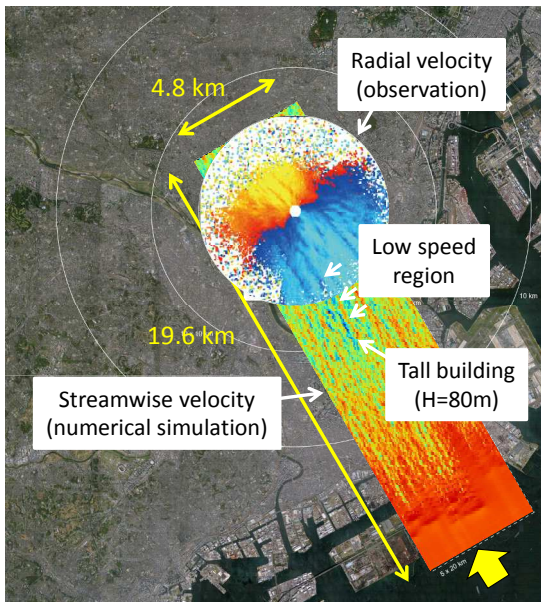


図1 数値実験及びドップラーライダー観測により得られた高度 48m の水平風速分布

ライダーによる長期間の観測から、このような低速筋状構造が昼夜を問わずに発達していることを確認している。

この計算で再現された筋状乱流構造の幅を相関解析により定量化し、その鉛直分布について調べた。図2の縦軸は高度を平均風速勾配と摩擦速度及び境界層高度で無次元化したもの、横軸は構造の幅を境界層高度で無次元化したものとなっている。この図から、大気安定度、室内外実験条件、地表面幾何形状に依らず、全ての値が一つの線に乗っており、その幾何形状に関する普遍性が示されている。つまり筋状構造の発生場所は地物に大きく影響を受けるものの、その幅などの性質は環境場（風速分布等）で規定されることが明らかとなった。

図3はイスタンブールの沿岸域のシミュレーション結果であり、この計算は地表面と屋根面から一様な熱フラックスが供給された、不安定大気安定度の計算となっている。図3aは高度 40m におけるスパン方向の風速分布を示しており、青が図上向き、赤が下向きの風速域を示しており、赤と青のペアで収束発散箇所が示されている。過去の研究から、これらは熱対流ロール渦構造を表現していることが分かっている。

図3はそのロール渦（水平収束域）を風上方向に溯ってその発生個所を調べたものである（図3b中の矢印）。地点1は最も風上で建物が無く水平一様な地表面であり、熱及び地表面抵抗の働きによって自律的に渦が組織化して発達したものであるが、それが下流端まで連続している。

地点2は比較的大きな広場と建物が存在し、それが流れの淀みを作り、ロールを発生したものであると考えられる。地点3、4は大きな広場であり、建物の集合としてスケールの大

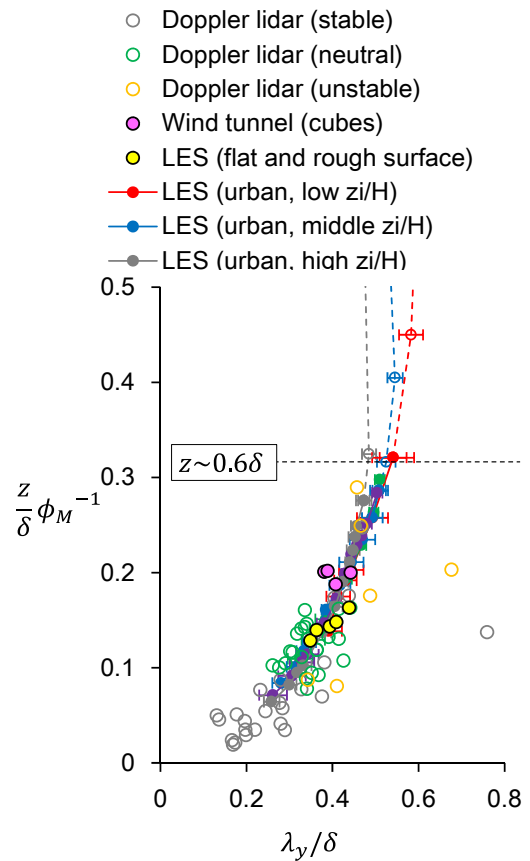


図2 相関解析により得られた筋状乱流構造の幅の鉛直分布。縦軸は平均風速勾配と境界層高度及び摩擦速度、横軸は境界層高度で無次元化されている

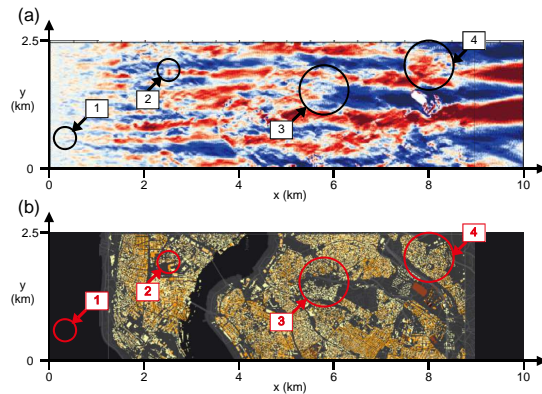


図3 イスタンブール臨海部を対象とした日中の都市大気境界層の数値解析結果 (a)高度 40m におけるスパン方向風速分布, (b)建物高さ分布

きな空間不均一性を作り出し、それが発達したロール渦の変調（向きの変化）に寄与したものであると考えられる。ところで、地点4の図下方に大建造物があるが、地点2のようにロール渦に直接的な影響を及ぼしている様子は見られない。両者の違いとして、建物高さは同程度であるが境界層高度が2倍ほど異なり、境界層内の支配的な流れの構造に対する

地物のスケールが重要であると考えられる。

以上から筋状構造の特性及び、トリガーとなる地物の特性について知見が得られたが、その定式化までは至らず、今後の課題である。

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 8 件)

- ① Inagaki A, Kanda M, Huda AN, Yagi A, Onodera N, Aoki T: A numerical study of turbulence statistics and the structure of a spatially developing boundary layer over a realistic urban geometry, *Boundary-Layer Meteorol*, 2017, 10.1007/s10546-017-0249-y. 査読有
- ② Huda AN, Inagaki A, Kanda M, Onodera N, Aoki T: Large Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area using the Lattice Boltzmann Method, *Boundary-Layer Meteorol*, 163(3), 447-467, 2017, DOI: 10.1007/s10546-017-0233-6. 査読有
- ③ Yagi A, Inagaki A, Kanda M, Fujiwara C, Fujiyoshi Y: Nature of Streaky Structures Observed by a Doppler Lidar, *Boundary-Layer Meteorol*, 163(1), 19-40, 2016, DOI: 10.1007/s10546-017-0233-6. 査読有
- ④ 小田僚子, 稲垣厚至, 八木綾子, 神田学, 藤吉康志: 接地境界層高度推定手法の提案, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 72, pp.I_79-I_84, 2016. 査読有
- ⑤ Ahmad H, Inagaki A, Kanda M, Onodera N, 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, Ser.B1(Hydraulic Engineering)*, 71(4), I_37-I_42, 2015. 査読有
- ⑥ Gronemeier T, Inagaki A, Gryschka M, Kanda M: Large-eddy simulation of an urban canopy using synthetic turbulence inflow generation method, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering)*, 71(4), I_43-I_48, 2015. 査読有
- ⑦ 八木綾子, 稲垣厚至, 神田学, 藤原忠誠, 藤吉康志: ドップラーライダーを用いた筋状乱流構造の間隔に関する研究, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 71(4), I_415-I_420, 2015. 査読有
- ⑧ Bakkali M, Inagaki A, Ashie Y, Yoshida Y, Kanda M, Raasch S: Thermal large eddy simulation with sensible heat flux distribution from various 3d building geometries, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering)*, 71(4), I_433-I_438, 2015. 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- ① 稲垣厚至, Meral Yücel, 神田学, Micha Gryschka: 不安定都市大気境界層の乱流組織構造, *日本流体力学会年会 2016, 名古屋工業大学*, 26-28 Sep, 2016
- ② Inagaki A, Huda AN, Yagi A, Kanda M, Onodera N, 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, 14A.2, 20-24 June 2016, Salt Lake City, Utah, USA*
- ③ Yucel M, Inagaki A, Kanda M: Boundary-Layer Development with Buoyancy-Driven Flows over a Built-Up Area in Istanbul. *22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, 14A.3, 20-24 June 2016, Salt Lake City, Utah, USA*
- ④ Inagaki A, Kotthaus S, Kanda M: Characterising internal boundary layers forming over an idealised urban surface based on air temperature observations with high spatio-temporal resolution., *9th International Conference on Urban Climate, July 20-24, 2015, Toulouse, France.*

(他 11 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

神田学 (KANDA, Manabu)
東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

Micha Gryschka
Leibniz University of Hannover, Lecturer