

課題番号 jh140014-MD01

## 首都圏における大気乱流の超高解像度・広域数値計算

神田学（東京工業大学）

### 概要

本研究は超高解像度（2m）でありながら大規模な組織的乱流構造をカバーできるような広域場（20km x5km）の乱流計算を行い、都市上空で発達する乱流組織構造の性質について検討することに加え、計算結果を用いて地表面近傍の突風率マップを作製し、突風率と建物形状の関係性について検討を行うことを目的とする。本年度は以下の成果が得られた。（1）無次元乱流統計量について、既往の粗面乱流境界層に関する室内実験結果とほぼ一致する結果が得られ、上空の流れについては地表面形状やスケールに依らずにほぼ相似であることを確認した。（2）筋状の乱流組織構造が建物から発達しており、それが数 km から数十 km 下流へ持続することを確認した。同様の構造を観測でも確認した。また、その幅が地表面から離れるにつれて太くなること、境界層高度の発達に伴い太くなることなどを示し、実験式を提案した。（3）突風率マップを作成し、高層建物の周辺で大きな突風率となることを確認した。（4）流れの可視化を行い、大規模構造と、その内部の複雑な動きを同時に確認した。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学 学術国際情報センター

#### (2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

本研究は、都市気象を専門とする研究代表者の神田及び稲垣、Huda と、計算機科学および大規模 GPU 計算を専門とする副代表の青木を中心とした共同研究体制になっている。さらに、乱流解析手法を専門とする小野寺は平成 24 年度秋期の TSUBAME グランドチャレンジ制度にて 4032 台の GPU を用いて東京都心 1 m 解像度の 10km 四方計算に成功した計算コードの開発者であり、大規模計算の実施に対するコード側からのサポートを行う。

- ・神田 学 計算およびデータ解析
- ・青木 尊之 計算コード修正・効率化
- ・小野寺 直幸 計算コード修正・効率化
- ・稲垣 厚至 計算及びデータ解析
- ・Nurul Huda Ahmad 計算及びデータ解析

### 2. 研究の目的と意義

本研究により、超高解像度（2m）でありながら大規模な組織的乱流構造をカバーできるような広域場（20km×5km）の乱流計算を行う。都市の乱流は様々なスケールの乱流を内包している。建物などの人工構造物は、数 10m のスケールであり、それが作り出す剥離渦など解像するには、1 オーダー小さい 1~2m の空間解像度が必要となる。一方、申請者がここ 10 年以上に亘って行ってきた都市域でのタワー観測や、屋外都市模型実験施設におけるデータから見積もられる大規模な乱流組織構造は、建物の 100 倍程度、すなわち数 km に及ぶため、10km×10km 程度の広域場の解析が必要となる。このような超高解像度・広域計算例は、本申請課題で使用する予定の数値解析モデルによる実績しかなく、今回、これと同程度の大規模計算を行い、その乱流データを詳細に検討することにより、都市域の乱流の階層的構造を把握し、都市気象学における広範な環境問題解決のための重要な基礎情報を与えることを目的とする。昨年度、本研究課題で 1 ケースの試験的計算に成功しているが、本年度はその計算結果の解析を進める。また、さらに複数の気象条件下で同様の大規模・高解像度計算を行う。

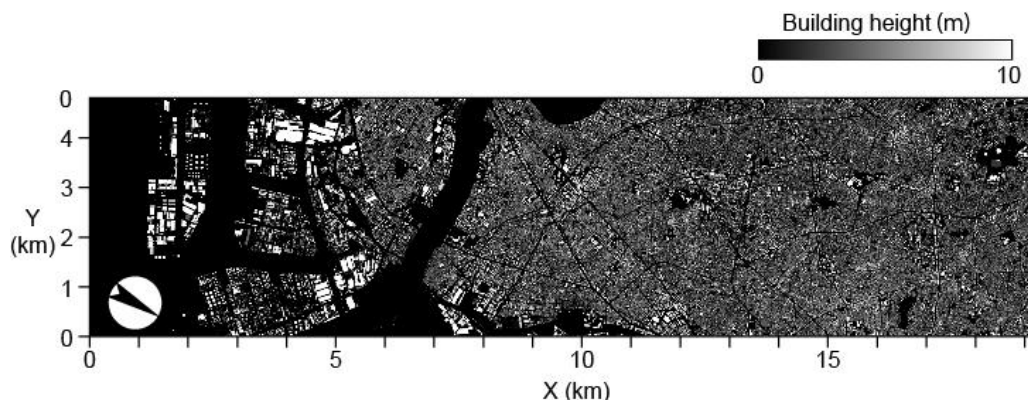


図 1 計算領域の建物高さ分布

### 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究申請は、以下の点できわめて意義深いものと思われる。

(1) 関心の高い研究テーマでありながら、同様のチャレンジは世界的に存在していない。

(2) 代表者は、都市気象学において多くの世界的成果・実績を上げてきており、かつ、現在、東工大キャンパス内でコヒーレント・ドップラーライダーによる都市上空における長期連続乱流観測を行っており、部分的な比較検証が可能である。

(3) 副代表者は、各種大規模数値計算コードの開発において多くの世界的成果・実績をあげてきており、計算コードおよび東工大大規模計算機の効率的使用のスペシャリストである。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度に得られた主な研究成果は、(1) 本計算で使用する格子ボルツマン法 LES モデルと風洞実験結果及び、これまで多くの大気境界層研究に用いられてきた数値計算モデルである PALM (parallelized large eddy simulation model) と比較を行ったこと、(2) 上記モデルを使用した大規模計算を実施したこと、(3) 突風率マップの作成を行ったこと、の 3 点である。

(1) については立方体周りの流れについて風洞実験、PALM を用いた数値実験と、格子ボルツマン法 LES の結果を比較し、両計算モデルは概ね同程度の再現性を持つことを示し、従来用いられている都市気象場の計算設定 (格子解像度等) が本モデルにも適用できることを示した。

(2) については、東工大所有のスーパーコンピュータ TSUBAME2.5 の GPU900 コアを用いた大規模並列 GPU 計算により、東京都臨海部の水平  $19.2\text{km} \times 4.8\text{km}$ 、鉛直  $1\text{km}$  の 3 次元空間を  $2\text{m}$  の空間解像度で解像した流体計算を実施した。格子数は  $9600 \times 2400 \times 500$  点 (約 120 億点) となる。地表面幾何には航空機観測に基づき得られた実際の建物分布を与え、 $2\text{m}$  格子で解像されている。図 1 に計算に用いた地表面建物高さ分布を示す。流入条件としては海から入る比較的乱れの少ない流れを想定し、一様流として与えた。この結果、境界層高度が流入端から  $15\text{km}$  程度の奥に進んだところで  $300\text{m}$  程度まで達した。

(3) については、まず PALM を用いて突風率の定義について検討し、外部風速に依存せず、局所的な風速場の影響を受けないような定義を考案した。これは本研究目的が都市街区のような流れ場の空間非一様性が強い場所での突風率の空間分布について検討するためである。この定義を採用して、(2) の計算結果に基づき、高度  $2\text{m}$  における 10 分間最大風速を外層風速で除した値として定義された「突風率」の空間分布マップを作成した (図 1)。地表面が一様な場では突風率は統計的に一定になるが、本研究対象である都市街区内では建物による流れの遮蔽効果及び収束効果により突風率が地点によって大きく変わる。この突風率の空間分布と建物幾何形状の定性的な関係を明らかにすることが本研究の目的であるが、これについては今後の検討項目である。

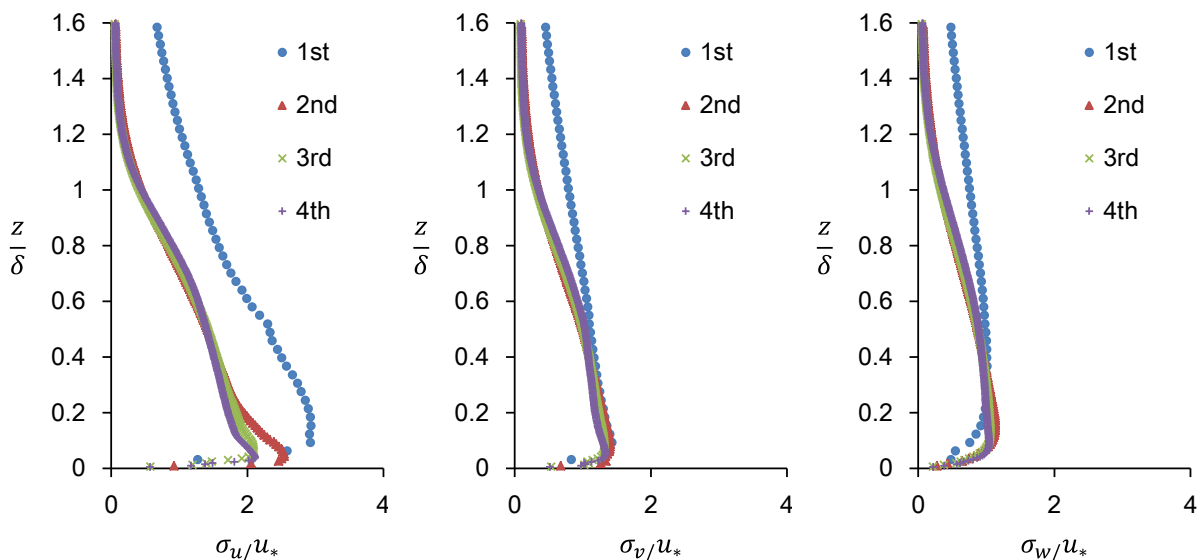


図 2 無次元速度変動の標準偏差の鉛直分布 (1st~4th は x 方向に 4 分割された各計算領域)

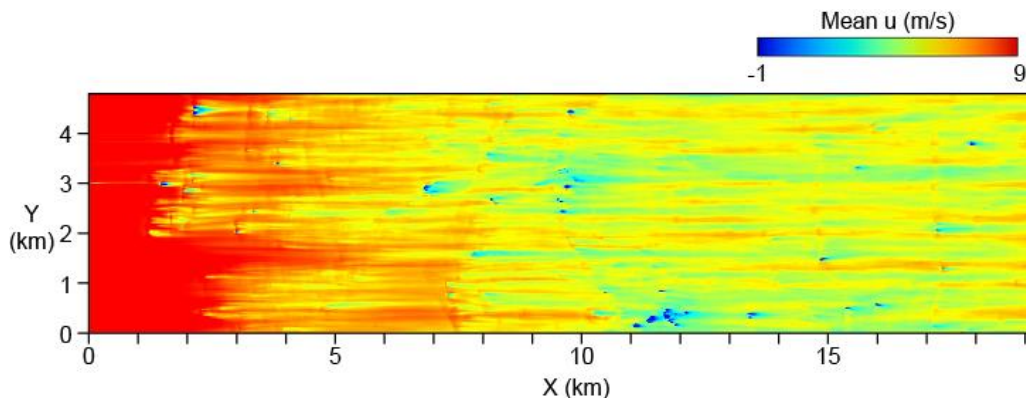


図 3 10 分平均した主流方向風速の水平断面分布 (高度 54m)

### 5. 今年度の研究成果の詳細

今年度の主な成果は、乱流統計量の相似性の検証、乱流構造の空間スケールの検討、地上観測との比較、突風率と建物形状の関係の検討、流れの可視化、の 5 点であり、そのうち地上観測との比較については中間報告で述べた通りであるため、その後進捗のあった他 4 点について述べる。

#### (1) 乱流統計量の相似性の検証

まず昨年度より風速が大きな計算を実施し、さらにより長い計算を行うことでより安定した時間平均統計量が得られた。図 2 は各 3 次元速度成分に対する風速変動の標準偏差を摩擦速度で無次元化し、それを境界層高度で無次元化した鉛直座標についてプロットした図である。摩擦速度はレイノルズ応力の鉛直直線分布を地表面まで外層した

値から推定し、境界層高度は外層風速の 99% の風速と一致する高度として定義した。得られた結果を粗面乱流境界層の統計量 (例えば Raupach 1981 による風洞実験) と比べると概ね値の一致が確認でき、都市のように流れのスケールが数オーダー大きく、かつ複雑な地表面幾何形状を有する場合でも、室内実験で見られる乱流境界層が発達することを確認した。

#### (2) 乱流構造の空間スケール

次に風速の水平断面分布に着目し、乱流構造の大きさについて検討を行った。図 3 は高度 54m における 10 分間の時間平均した主流風速の水平分布である。この図より、高層建物の背後から筋状の低速領域が出ていることが確認でき、またその影響は大きいもので数 km 持続していることが分

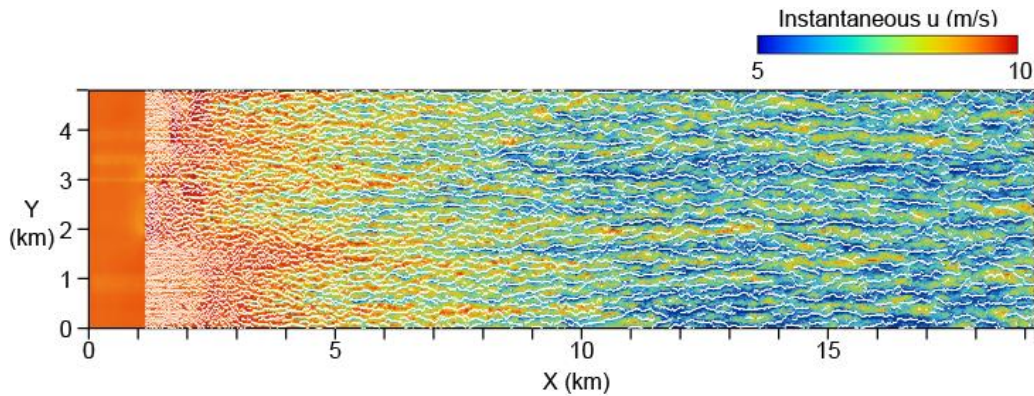


図 4 主流風速の水平断面分布（コンター）と低速域のピーク（白線）（高度 54m）

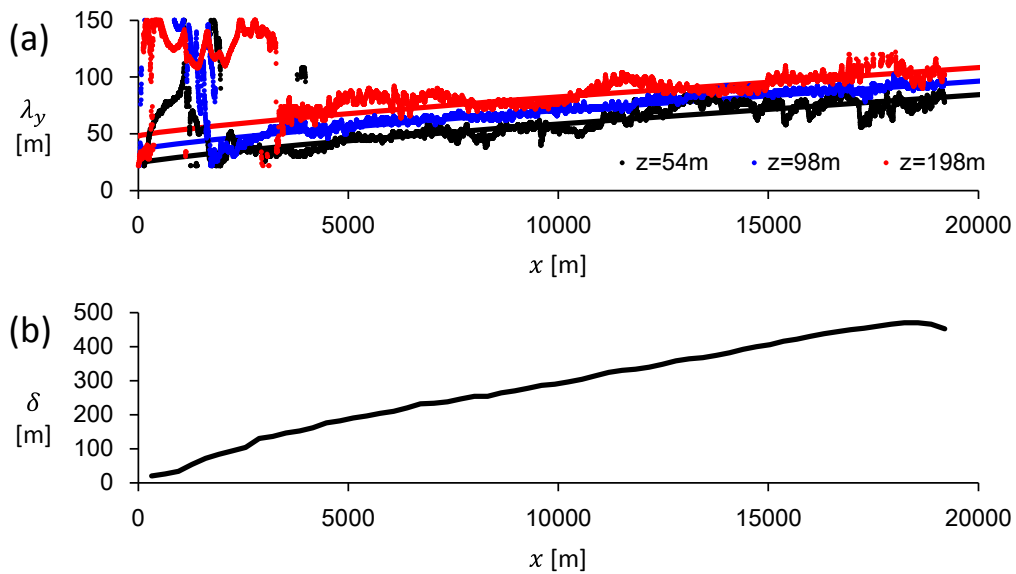


図 5 (a)筋状構造の幅（高度：黒 54m, 青 100m, 赤 200m）と(b)境界層高度の流下方向変化

かる。特に $(x,y)=(9\text{km},3\text{km})$ 付近から延びる低速領域は計算領域の下流端まで少なくとも 10km 以上に渡ることが確認できる。乱流境界層の下層約 10%の高度かつ、建物のような巨大な粗度が配置された環境においても高層建物は下流に大きな影響を及ぼしていることを示唆している。なお、前年度行った風速の異なる計算においても同じ場所から発生する巨大な筋状低速構造を確認している。

次に筋状構造の大きさを定量的に解析するため、ウェーブレットを用いて構造の幅を定量化した。図 4 は高度 54m の瞬間主流風速分布である。このスパン方向のウェーブレットスペクトル強度を計算し、卓越波長に相当する波形の負のピーク（低速領域）を、同図の白線としてプロットした。概ね白線と低速領域が一致していることが確認できる。

図 5 は上記の手法で抽出したスパン方向卓越波長を流れ方向距離に対してプロットしたものである。境界層の発達に伴い構造の幅が大きくなっていることが確認できる。中立の乱流境界層における筋状構造の幅は境界層高度に依存することが指摘されている（例えば Marusic and Hutchins, 2008）。また、Garratt (1980)乱流境界層の高さは吹送距離 $x$ の 0.8 乗に比例することを実験的に示している。これらに基づき乱流構造の幅を以下の式計でフィッティングした。

$$\lambda_y = a + bx^{0.8} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda_y$ は筋状構造の代表幅、 $a, b$ は定数である。

図 5a はその結果であり、3つの高度についてプロットした。高度が高くなるほど構造の幅が大きくなるが、流下方向への変化量はあまり変わらない。式(1)へのフィッティングの結果として、 $a$ の

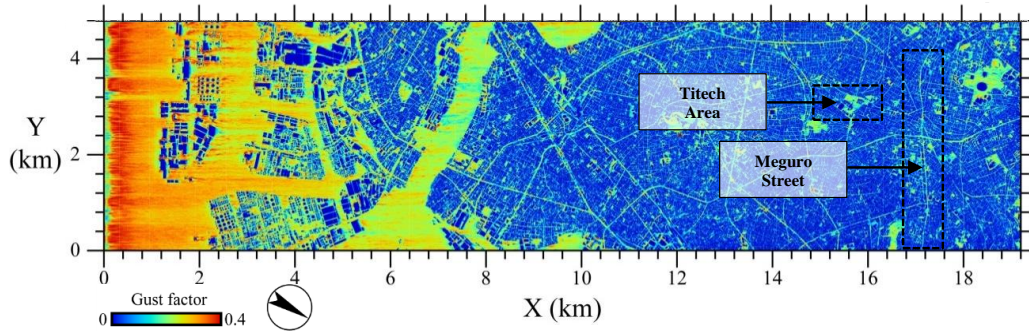


図 6 高度 2m における突風率の空間分布

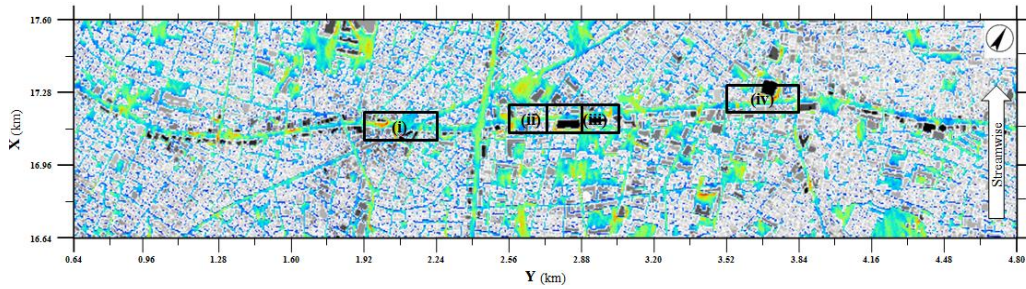


図 7 目黒通り周辺の突風率分布 (高度 2m)

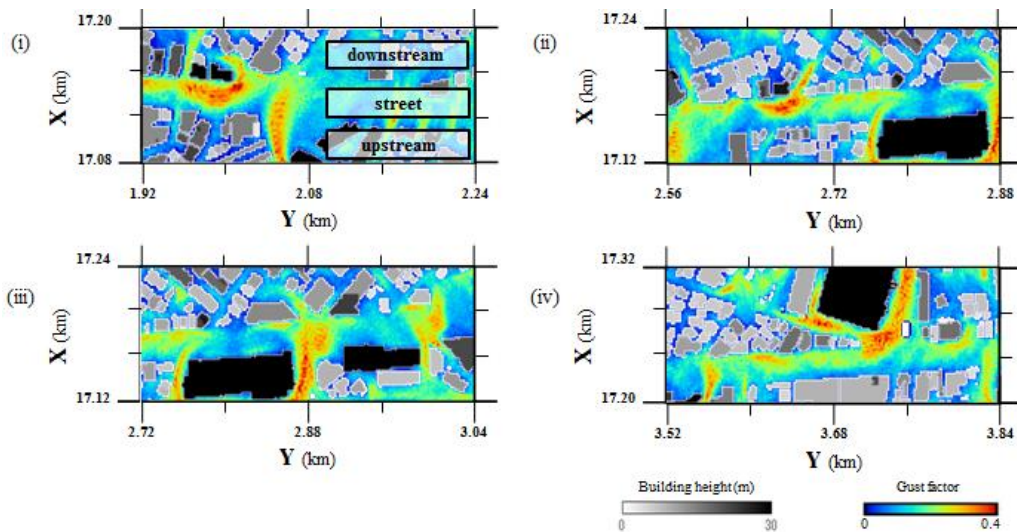


図 8 目黒通り沿いで大きな突風率を観測した地点の突風率 (カラー) と建物高さ (白黒) 分布

値は地面から離れるほど大きくなり、 $b$ の値は地面との距離にあまり依存しないことが分かった。

### (3) 突風率と建物形状の関係

図 6 は高度 2m の突風率の空間分布である。突風率は以下の式で定義される。

$$G = \frac{U_{max}}{U_{rep}} \quad (2)$$

ここで $U_{max}$ はある地点における 10 分間の最大風速、 $U_{rep}$ は代表風速であり、本研究では外層風速を用いた。これによって外層風速の大きさに依存

しない値が得られること確認している (平成 25 年度最終報告書参照)。

図 6 より、流入側で突風率が大きくなっているが、これは境界層高度が低いため容易に外層の空気塊が下層へ侵入してくるためと考えられる。つまり下流へいくに従いその影響が小さくなり、建物幾何の影響がより顕著になってくると考えられる。そこで建物幾何と突風率の関係について調べるため、境界層が 500m 程度まで発達した $x = 17\text{km}$ 付近にある目黒通り沿いの突風率について

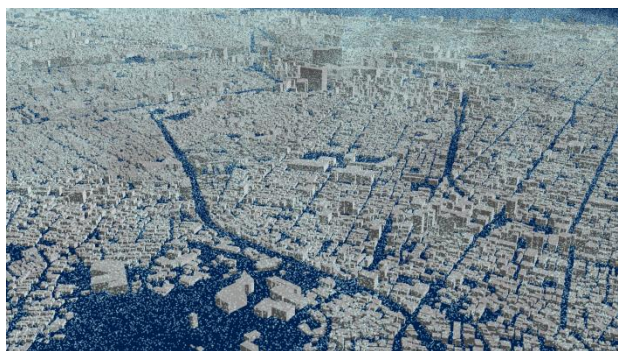


図 9 大規模都市気流計算結果の可視化 (建物形状とパッシブトレーサーを可視化した)

詳しく見ていく。目黒通りは本計算領域内においてスパン方向に伸びていることから、通り沿いの全地点で吹送距離が同じであり、風上の条件が全地点でほぼ独立であるなどの利点がある。

図 7 は目黒通り周辺の突風率分布を拡大したものである。ほぼスパン方向に一様に伸びているにも関わらず場所に依る大きな偏差が存在するのは建物の影響に他ならない。これについてさらに詳しく見るため、突風率が極めて大きな値をとった 4 つの地点についてさらに拡大してみると(図 8)、これらは高層建物を迂回してくる流れに相当することが分かった。

#### (4) 流れの可視化

高度 10m からパッシブトレーサーを散布して流れの可視化を行った(図 9)。これにより視覚的に流れの様子を理解することができた。個々の建物後流に巻き込まれて複雑に動く粒子の挙動に加え、先に示したような大規模な筋状の流れもこのトレーサーによって可視化することができた。大規模構造の中で、個々の粒子は非常に乱れた動きをする一方で、それらが群をなして形成される大規模な筋状構造についてはよりゆっくりとした変形速度を持って流れていることなどを同時に確認できた。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

これまでは中立大気安定度、平坦な地面の仮定の下で計算を行ったが、今後の課題としてはより実際に近い大気環境での計算が望まれる。その一

要素として地形の起伏の効果を取り込んだ解析を行うことが挙げられる。地形の効果として、例えば都内における東京湾からの海風が都市の建物粗度の影響に加え、地形(海岸線及び起伏)のため、場所によって進入速度が変わることなどが指摘されている。海風は都市集中豪雨のトリガーとなりうる現象であることからその予測及び基礎的な発達メカニズムを検証することは重要であり、本プログラムのような大規模計算が最も貢献できる分野の一つである。

## 7. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

- [1] Ahmad, H., 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, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.71, No.4, I\_37-I\_42, 2015

### (2) 国際会議プロシーディングス

- [1] Ahmad, H., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N. and Aoki, T.: A Huge and High Resolution Large Eddy Simulation Domain of Tokyo Urban Area by using Lattice Boltzmann Method, Proceedings of the Academy for Co-creative Education of Environment and Energy Science, December 13-16, 2014
- [2] Ahmad, H., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N. and Aoki, T.: Simulation of the Gust Factor in Highly Dense Urban Area in Tokyo, 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMSAFE 2014), Sendai International Center, Sendai, Japan, April 13-16, 2014.
- [3] Onodera N., Aoki T.: Peta-scale large-eddy

- simulation using lattice Boltzmann method on the TSUBAME supercomputer. KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014 at JEJU, Korea, 2014.
- [4] Onodera N, Aoki T, Shimokawabe T, Miyashita T, Kobayashi H, Large-Eddy Simulation of Fluid-Structure Interaction using Lattice Boltzmann Method on Multi-GPU clusters, 5TH ASIA PACIFIC CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS & 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL MECHANICS (SINGAPORE), 2013.
- [5] Onodera N., Aoki T.: Large-eddy simulation of turbulent flow around a car body using lattice Boltzmann method on the TSUBAME supercomputer. 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain, 2014.
- (3) 国際会議発表
- [1] Ahmad, H., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N. and Aoki, T.: A Huge and High Resolution Large Eddy Simulation Domain of Tokyo Urban Area by using Lattice Boltzmann Method, Proceedings of the Academy for Co-creative Education of Environment and Energy Science, December 13-16, 2014
- [2] Ahmad, H., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N. and Aoki, T.: Simulation of the Gust Factor in Highly Dense Urban Area in Tokyo, 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMSAFE 2014), Sendai International Center, Sendai, Japan, April 13-16, 2014.
- [3] Onodera N., Aoki T.: Peta-scale large-eddy simulation using lattice Boltzmann method on the TSUBAME supercomputer. KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014 at JEJU, Korea, 2014.
- [4] Onodera N, Aoki T, Shimokawabe T, Miyashita T, Kobayashi H, Large-Eddy Simulation of Fluid-Structure Interaction using Lattice Boltzmann Method on Multi-GPU clusters, 5TH ASIA PACIFIC CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS & 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL MECHANICS (SINGAPORE), 2013.
- [5] Onodera N., Aoki T.: Large-eddy simulation of turbulent flow around a car body using lattice Boltzmann method on the TSUBAME supercomputer. 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain, 2014.
- (4) 国内会議発表
- [1] 稲垣厚至, Ahmad Nurul Huda, 神田 学, 小野寺直幸, 青木尊之: 格子ボルツマン法 LES を用いた都市気流の大規模計算, 日本流体力学会年会 2014, 東北大学, 15-17 Sep 2014
- [2] 小野寺直幸、青木尊之、泉田康太, ピンポン玉の運動のスパコンによる大規模流体構造連成解析, 第 92 期 日本機械学会流体工学部門, 富山 2014/10/26
- [3] 小野寺直幸、青木尊之、下川辺隆史、杉原健太、宮下達治、泉田康太, GPU を用いた大規模アプリケーションの最適化および可視化, 日本原子力学会「2014 年秋の大会」、計算科学技術部門企画セッション「解析結果可視化の最前線」, 京都 2014/9/8【原子力学会計算科学技術部会 CG 賞】
- [4] 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺: 複数 GPU を用いた格子ボルツマン法による卓球競技のピンポン玉のシミュレーション. 計算工学講演会, 広島, 2014.
- [5] 小野寺直幸: TSUBAME の GPU を用いた格子ボルツマン法による大規模ラージエディ・

- シミュレーション. 日本機械学会 流体工学部門 格子ボルツマン法の基礎と応用に関する研究会, 京都, 2014.
- [6] 小野寺直幸、青木尊之、下川辺隆史、小林宏充: 複数 GPU を用いた格子ボルツマン法による大規模流体・構造連成解析—卓球競技におけるピンポン玉の軌道の解析—. 学術大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第 6 回シンポジウム, 東京, 2014.
- [7] 小野寺直幸、青木尊之、泉田康太: 格子ボルツマン法を用いたピンポン玉の運動の大規模ラージエディ・シミュレーション. 日本流体力学会年会 2014, 仙台, 2014.
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)  
なし