

jh130020-NA12

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

本研究では、詳細な都市の 3 次元構造を考慮した都市気流の大規模数値計算を実施し、都市の突風率の評価や、数 km スケールの巨大な乱流組織構造が街区の流れ場に及ぼす影響について検討する。まず、本計算で実施する格子ボルツマン法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) と比較することでモデルの精度検証を行った。次に突風率の定義について検討し、外層風速や摩擦速度で無次元化することで、外力の強さに依存しない突風率が定義できることを明らかにした。最後に、格子ボルツマン法を用いて東京都区部の大規模計算を実施し、突風率マップを作製した。計算領域の大きさは水平 19.2km×4.8km、鉛直 1km で格子解像度は 2m である。突風率は外層風速で無次元化したものを用いた。

1. 研究の目的と意義

都市における詳細な風・乱流場は、防災・環境の両面における重要な基盤物理情報となる。例えば、都市温暖化(ヒートアイランド)、ゲリラ豪雨、ビル風、汚染物質拡散、などが喫緊の課題となっているが、人口が過度に集中する都市域において安全・安心な生活を確保するには、都市域の物理現象・自然現象を解明した上で、工学的にこれらの多様な問題に対して対策を講じていく必要がある。

従来、これらの課題は、気象学・地理学・土木工学・建築学・都市計画学、などの分野でそれぞれに研究が進められてきたが、とりわけ 2000 年以降、「都市気象」をキーワードに、多様な学問分野の横断的協力体制が進み、観測・モデル実験・数値計算、などにおける最先端ツールを相互補完的に使用することによって、複合環境問題としてアプローチの難しかった「都市気象学」において、めざましい進展が見られている。

そのような状況の中で、地表面と上空大気間の運動量(風)・熱・水・物質の輸送において、乱流場は決定的に重要な意味を持つ。そもそも乱流研究は、都市気象学というよりは、抵抗低減や、拡散促進の観点から、様々な工学・理学分野における共通の大テーマである。近年、実験室レベルで、単なる平均的な風速や乱れなどの乱流統計量だけ

でなく、「組織的乱流構造」と呼ばれる特別な瞬間的な乱流場に着目した研究が進んでいる。「組織的乱流構造」は、時間的な出現率は少ないにも関わらず、運動量や物質輸送量の大部分を担っているため、様々な抵抗・拡散現象の機構解明の鍵を握っていると考えられている。機械工学などのマイクロスケールでは、詳細な室内実験や、乱流モデルを用いない直接数値計算(Direct Numerical Simulation: DNS)が可能のため、その構造が次第に明らかにされてきた。一方、都市を対象とするスケールでは、詳細な実験や DNS が不可能なため、どのような乱流構造が都市街区内や上空に存在しているのか不明な点が多く、都市域における「組織的乱流構造」の実態はよくわかっていない。

そこで本研究により、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(20×5km)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、10×10km 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。

本研究意義としては以下の 3 点である。

(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。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

本研究は、都市気象を専門とする研究代表者の神田および稲垣と、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。

- ・拠点名： 東京工業大学 学術国際センター
- ・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 : 計算およびデータ解析

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

研究代表者の神田がこれまで研究してきた都市大気乱流研究の観点に基づき、副代表である青木を中心として開発された高精度大規模計算を可能にする GPU 流体計算モデルを応用することで、我々が実際に体感しているような、実都市街区の風の詳細な時空間分布構造について検討することが可能となった。また数値計算モデルのパフォーマンスを最大限に活用するための潤沢な計算資源が使えることも、本プロジェクトならではの利点である。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

中間報告では気象 LES と LBM に基づく LES の比較と、突風率の定義の検討結果について述べた。本最終報告ではこれらに加え、突風率の定義についてより包括的な検討を行った。さらに、格子ボルツマン法を用いた大規模な都市数値計算を実施し、上記で検討した突風率の定義に基づく、突風率マップを作製した。以下に詳細を記す。

(1) 既往の気象 LES モデルと格子ボルツマン法に基づく LES モデルの比較

都市大気の大規模計算を行う前段階として、LES を用いた都市気流解析のための空間解像度の妥当性を検証するため、立方体周りの流れについて風洞実験との比較検討を行った。図 1 に示すような孤立した立方体周辺の気流解析を実施し、風洞実験と比較した。使用したモデルは PALM(parallelized

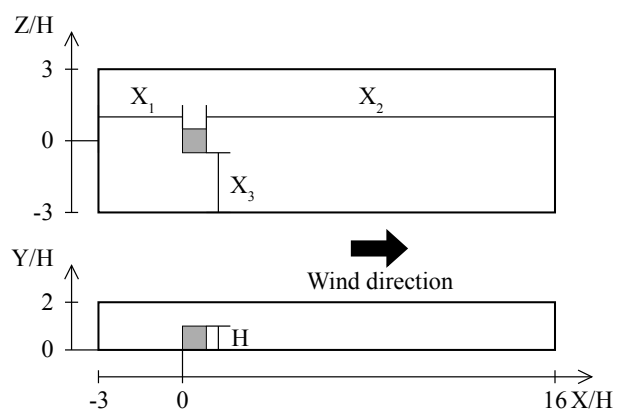


図 1 モデル計算評価の計算設定要

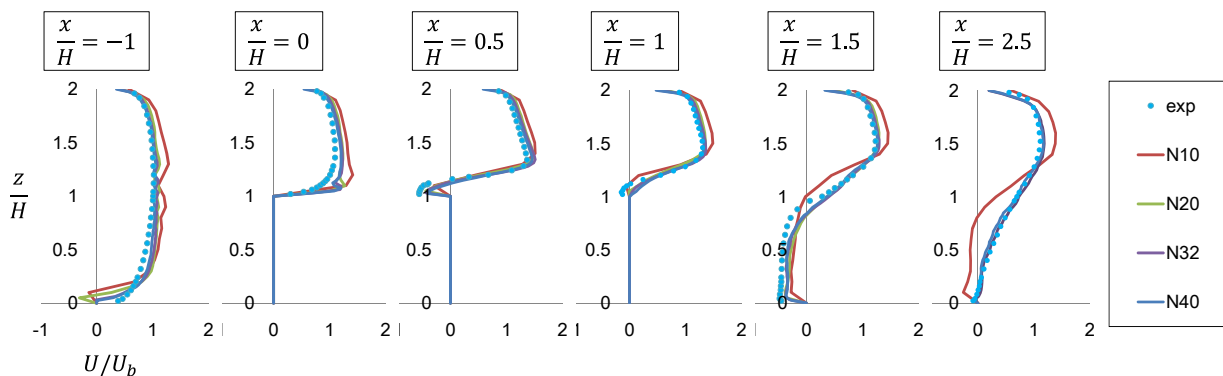


図 2 主流風向平均風速の鉛直分布

x は主流方向の位置であり、 $x=0$ は立方体前面の位置である。 H は立方体の高さ。 U_b は流入断面平均風速。

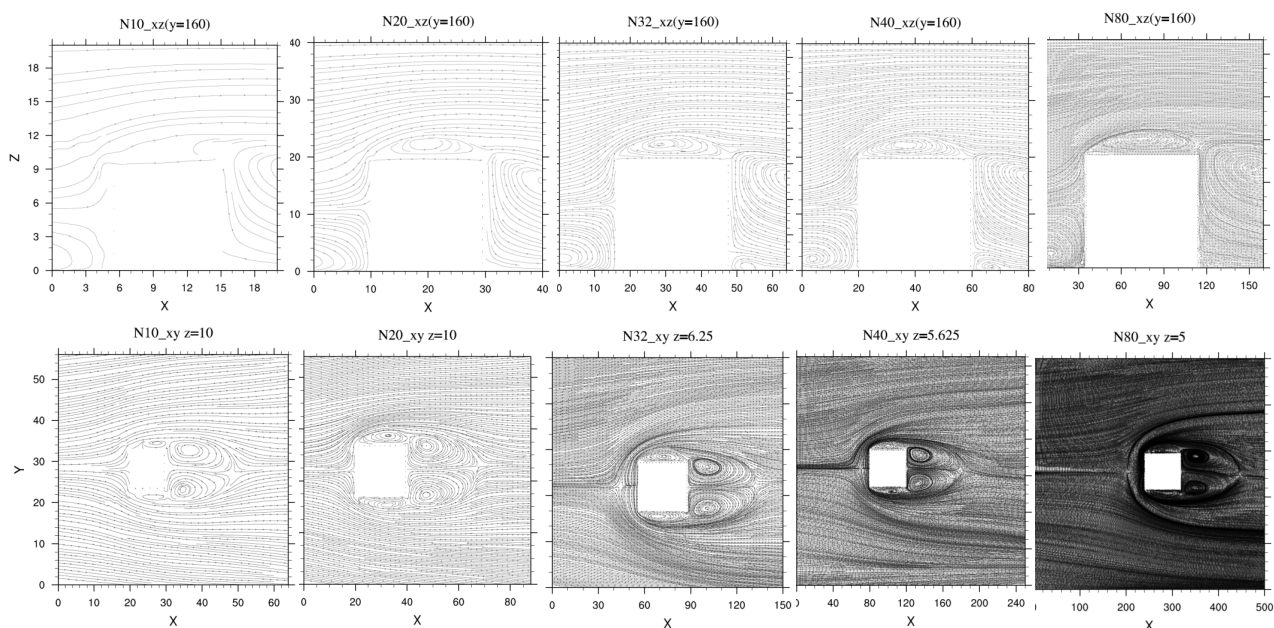


図 3 立方体周りの流線の鉛直・水平断面分布

鉛直断面は立方体中心を通る主流風向一鉛直断面、水平断面はモデル最下層の断面。 N は立方体一片を解像する格子数。

large eddy simulation model) であり、これまでに実都市及び平地での大気境界層研究において多く用いられている実績がある。

図 2 は計算結果より得られた立方体前後の平均主流風速の鉛直分布を示している。立方体 1 辺を 32 分割 ($N=32$, N は立方体 1 辺あたりの格子分割数) できる格子解像度を用いると、主流風向平均風速分布に関して実験結果 (Martinuzzi and Tropea, 1993) と良い一致が見られた。

図 3 は時間平均した流線の水平断面 (モデル最下層の高度) 及び鉛直断面 (立方体中心断面) 図

である。鉛直断面図に着目すると、 $N=32$ のケースでは立方体風下側の底面付近に渦巻く流線が確認できるが、それより粗い空間解像度ではそのような流れが再現されていない。しかしながら、立方体の上半分の領域の流線については、解像度の違いによる本質的な違いは見られなかった。

次にモデルの違いについて検討する。本計算で使用する、格子ボルツマン法に基づいた流体計算モデルと、上記で用いた PALM の結果 ($N=32$) を比較した。格子ボルツマン法に基づいたモデルの格子解像度を $N=16\sim 64$ まで変えて計算結果を比

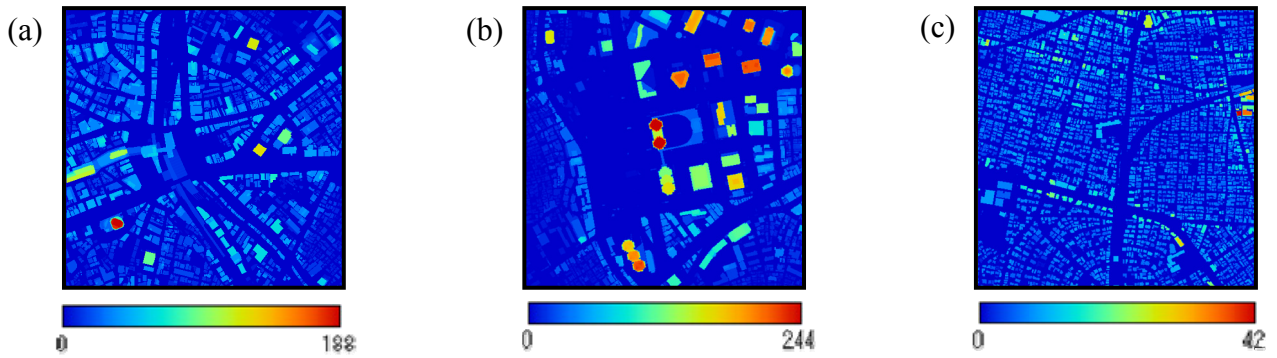


図 4 計算領域の建物高さ分布 (a) 商業地 (b) 高層ビル街 (c) 住宅街

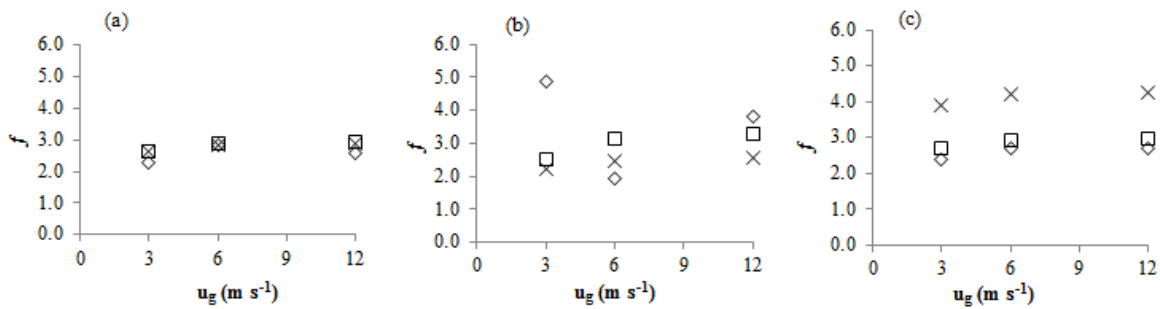


図 5 突風率の外層風速依存性 (a) 商業地 (b) 高層ビル街 (c) 住宅街

◇ $U_{\max}/U_{\text{local}}$, □ $U_{\max}/[U]$, × U_{\max}/u^*

較したところ、 $N=64$ の時に PALM の結果と良い一致が見られた (図 4)。

(2) 突風率の定義の検討

突風率の算出方法について検討を行った。突風率は基本として以下の式のように定義される。

$$G = \frac{u_{\max}}{U} \quad (1)$$

G は突風率、 u_{\max} はある時間内の最大風速 (m s^{-1})、 U は平均風速 (m s^{-1}) である。分母の平均風速として、ローカルな時間平均風速 U_{local} が主に使われているが、これは水平空間平均値 $[U]$ や高い高度の平均風速などの空間代表性を有する指標を実測で得ることが困難なためである。そこで本研究では、数値計算で得られる水平断面平均風速及び摩擦速度 u^* を式 (1) の代表風速として用いることを検討した。これらの値は実測で得ることは困難であるが、数値計算結果より突風率マップを作成するという本課題目的に対しては有意である。

計算条件として、図 4 に示す実際の都市建物分布 (商業地、高層ビル街、住宅地) を地表面幾何条件に用いた。計算領域は水平 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 、鉛直 600m とし、空間解像度は 2m とした。水平方向には周期境界条件、上端はスリップ条件を用いた。各地表面条件に対して流量の異なる 4 ケース ($3, 6, 9, 12 \text{ m s}^{-1}$) の計算を実施した。摩擦速度の算出には計算領域内の運動量保存から計算した。ローカルな時間平均風速として、高度 2m の建物のない開けた地点の値を用いた。

図 5 は高度 2m における突風率を外層風速の強さに対してプロットしたものである。水平断面平均風速と摩擦速度で無次元化したものは外層風速の強さに対してほぼ一定値を保っているが、ローカルな風速を用いた場合は値がばらつく結果が得られた。

図 6 は商業地の計算例を対象とした、高度 2m の水平断面における最大風速及び突風率の頻度分布である。最大風速を水平断面平均風速や摩擦速

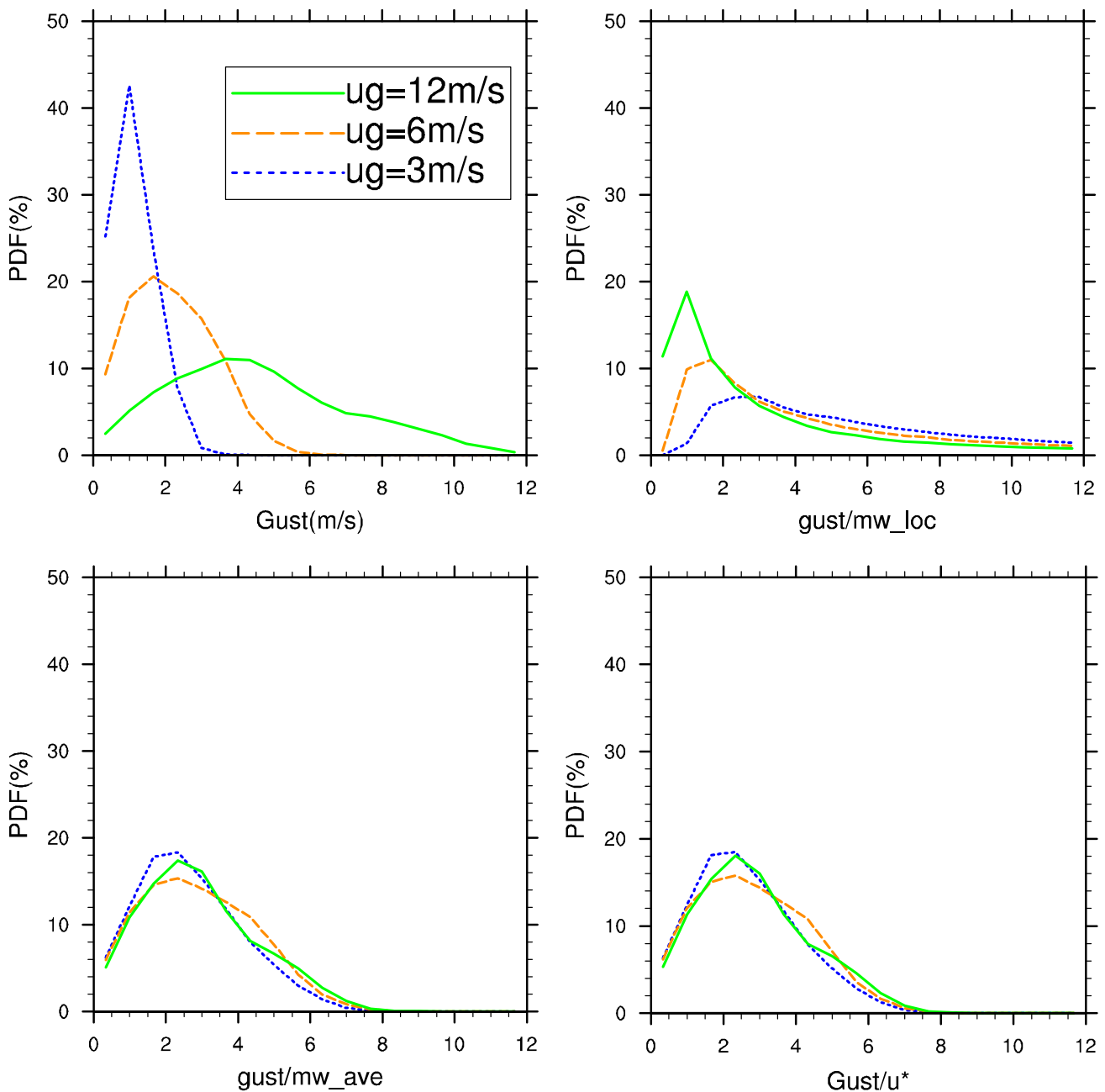


図6 商業地の高度 2m における突風率の確率密度分布

(a) U_{max} (b) U_{max}/U_{local} (c) $U_{max}/[U]$ (d) U_{max}/u^*

度で無次元化すると、図 6 (a)に示される最大風速の分布は図 6 (c)や図 6 (d)のように概ね一定の分布に収束することが分かった。一方、局所的な水平風速で無次元化すると図 6 (b)に示すように、外層風速の強さによって分布に大きなばらつきが出ることが分かった。

以上より、突風率マップを作成する際には水平断面平均風速や摩擦速度を用いることで、外層風

速に依存しない突風率を算定することが可能であることを示した。

(3) 大規模計算に基づく突風率マップの作成

格子ボルツマン法を用いた都市の大規模計算を実施した。東京都区部の東京湾を含む臨海部から内陸に 19.2km、幅 4.6km、高さ 1km の領域を格子解像度 2m で計算した。図 7 (a)はその建物高さ分

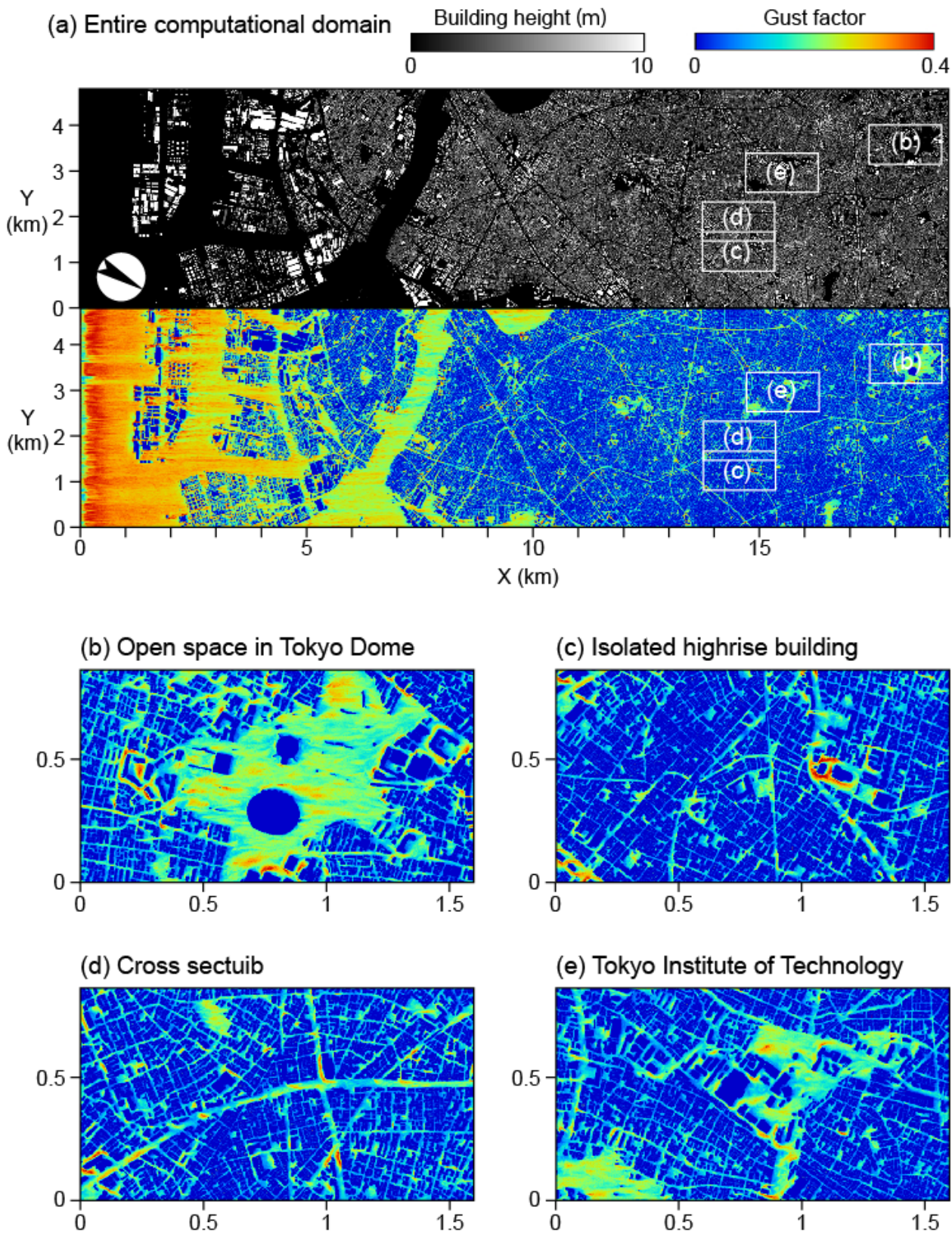


図7 高度 2m における突風率マップ

- (a) 計算領域全体の建物高さ と 突風率 (b) 大構造物周りの突風率
 (c) 孤立した高層建物周りの突風率 (d) 交差点周りの突風率 (e) 東京工業大学周辺の突風率

布を示している。断面平均流速を 6 m s^{-1} で一定とし、11,000 秒間の積分を実施した。突風率は、計算終了間際の 10 分間の中の最大風速を外層風速 (6.2 m s^{-1}) で無次元化することで定義した。

図 7 (b) は全計算領域の突風率マップを示している。図 7 (c), (d), (e) は特徴的な都市幾何を持った地点を拡大したものであり、高層建物の周り、開けた土地や幅の広い道路などで比較的大きな突風率が観測されることが分かる。

(4) 当初計画の達成状況について

当初計画の通り、(1) 格子ボルツマン法を用いた広域都市の大規模計算を実施し、(2) 突風率マップを作成した (国際会議発表 1 参照)。広域都市の計算について、当初予定では $10 \times 10 \text{ km}$ の大きさであったが、面積は変えずに $20 \times 5 \text{ km}$ とした方がより効果的な結果が得られると判断したため変更した。突風率マップに関しては、高層ビル周りや開けた場所で大きな突風率が観測されるなど妥当な結果が得られている。

4. 今後の展望

今後の展望としては以下の 2 点を実施する。

(1) 土地の起伏を考慮した計算

計算領域として、海から内陸都市までを含めた大領域を設定していることは本研究の特色の一つであるが、これまでに実施した解析では建物形状のみが考慮されており、海岸線からの標高差が考慮されていない。これを含めた計算を実施することで、土地起伏と建物凹凸が都市街区の突風現象に及ぼす影響について検討する。

(2) 現地観測結果との比較

東京工業大学敷地内に設置されたドップラーライダーによる観測から得られる半径 20 km 圏内の水平風速分布と数値計算の結果を比較し、本研究で得られる大規模計算のバリデーションを実施する。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

1. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 小林宏充, “格子ボルツマン法による 1 m 格子を用いた都市部 10 km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション”, HPCS2013, 東京, 2013 年 1 月

(2) 国際会議プロシーディングス

1. Ahmad H, Inagaki A, Kanda M, Onodera N, 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.
2. 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), 2013/12/11

(3) 国際会議発表

1. Ahmad H, Inagaki A, Kanda M, Onodera N, 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.
2. 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), 2013/12/11

(4) 国内会議発表

1. 小野寺直幸, TSUBAME2.0 の全ノードを用いた東京都心部 10km×10km の 1m 解像度による気流シミュレーション, GTC (GPU Technology Conference) Japan 2013, 2013/7/30 【招待講演】
2. 小野寺直幸, TSUBAME 2.0 の全ノードを用いた格子ボルツマン法による東京都心部 10km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション, 電子情報通信学会主催 第 5 回アクセラレーション技術発表討論会, 2013 年 9 月 【招待講演】
3. 小野寺直幸, TSUBAME の GPU を用いた格子ボルツマン法による流体構造連成のラージエディ・シミュレーション, 日本学術会議 第 3 回計算力学シンポジウム, 2013 年 12 月 【招待講演】
4. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 小林宏充, “格子ボルツマン法による 1m 格子を用いた都市部 10km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション”, HPCS2013, 東京, 2013 年 1 月
5. 小野寺直幸, “コヒーレント構造スマゴリンスキー・モデルを用いた格子ボルツマン法による東京都心部の超大規模シミュレーション”, 第 28 回生研 TSFD シンポジウム, 東京, 2013 年 3 月
6. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 小林宏充, 宮下達治, “TSUBAME 2.0 の 4032 台の GPU を用いた格子ボルツマン法による都市部 10km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション”, 日本計算工学講演会, 東京, 2013 年 6 月
7. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 宮下達治, TSUBAME の GPU を用いた格子ボルツマン法による東京都心部の大規模気流シミュレーション, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2013 年 12 月

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

1. 青木尊之, 小野寺直幸 都心の気流 高精度予測, スパコンで 1m 単位解析 日刊工業新聞 24 面 2012/10/11
2. 青木尊之, 小野寺直幸 東工大、スパコンの GPU を使い都心部の気流を 1m 解像度で計算 インプレス PC Watch 2012/10/11
3. 青木尊之, 小野寺直幸 都心部特有の風予測精度高める, 東工大 日経新聞・朝刊 14 面 2012/10/16
4. 青木尊之, 小野寺直幸 都心部の風の動き再現 — 東工大、スパコン上で — 読売新聞・朝刊 23 面 2012/10/28
5. 青木尊之, 都心の風、スパコンで予測 朝日新聞・朝刊 25 面 2012/11/15
6. 青木尊之, 小野寺直幸 報道特集「N スタ」 TBS テレビ 2012/11/10