

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540453

研究課題名（和文）気象モデルと LES 乱流計算モデルの融合による都市域での突風の定量予測手法の構築

研究課題名（英文）Development of quantitative prediction approach of wind gusts in urban areas by merging meteorological model and LES model

研究代表者

竹見 哲也（TAKEMI TETSUYA）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10314361

研究成果の概要（和文）：高分解能気象モデル計算による風速データを LES 乱流計算モデルに入力し、都市で生成される乱流の影響と気象場の影響の双方を考慮する新しい風速変動数値解析手法を考案した。本手法を台風や爆弾低気圧の事例に対して適用し、東京を対象地域として突風の再現シミュレーションを行った。気象モデルと LES モデルの融合により、実際に観測された突風を定量的に評価することが可能となった。本研究の成果は、都市における防災・環境・緊急対応の諸問題への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed a numerical approach of wind variation over urban areas by taking into account the effects of urban turbulence and meteorological fields. This approach uses the outputs of a high-resolution meteorological model as the inputs of a large-eddy simulation (LES) model. The proposed approach was applied to cases of typhoons and extra-tropical cyclones that spawned significant wind gusts over the Tokyo business district. It was demonstrated that the proposed approach of coupling a meteorological model and an LES model is able to quantitatively estimate the intensity of wind gusts over the urban area. This new approach will be used for applications to solve problems related to natural disasters, environments, and emergency responses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：大気境界層、大気乱流、突風、都市気象、LES、都市モデル、気象予報、風災害

## 1. 研究開始当初の背景

竜巻・ダウンバーストなど小規模気象擾乱に伴う瞬発性の局所的な突風災害が近年続発している。2004年台風期に伴う風災害、2005年12月山形県庄内平野で生じた特急脱

線事故などの突風災害、2006年9月の延岡平野での特急脱線事故などの竜巻災害、2006年11月佐呂間町での竜巻災害が顕著な事例であり、その他にも多数の風災害の報告がある（日本風工学会風災害研究会年次報告2005、2006、2007）。このような災害は比較的人口

密度の低い地域で発生しており、必ずしも被害の規模は大きくない。しかし、同程度の現象が仮に人口密集地域である大都市で生じた場合には、その被害の規模が甚大になることは想像に難くない。例えば1978年2月28日の東京における竜巻により生じた地下鉄東西線の橋梁上での脱線事故の事例は、竜巻であるか否かに関らず、突風が発生した場合に大都市では被害規模が極めて大きくなるポテンシャルが高いことを物語っている。

近年続発している風災害を契機として、気象庁では2008年3月より「竜巻注意情報」が発表されるようになった。これは竜巻を発生させる原因となる積乱雲活動に伴う強風・強雨の発生が高いことを1時間前にノウハウキャストするものであり、竜巻災害に対する市民の注意を喚起する上で重要な情報と言える。しかし、実際にどの程度の強風が生じるのかといった定量的な評価はまだ可能な段階ではなく、降雨の定量的予測がある程度実用化されていることと対照的である。これは、降雨に比べて風速の変動は、地形の起伏や人工建造物の影響をより強く受けるためであると考えられる。

さらに根本的な問題として、乱流過程のパラメタリゼーションの問題がある。研究代表者はこれまで、流体工学分野の研究者と共同で、気象モデルとLESモデルの融合による局所的な風速変動の解析を行ってきた (Tamura et al., 2006; Takemi et al., 2006; 竹見, 2007; 内田ら, 2008)。また、気象モデルの高解像度化による局所的な風速変動の解析を進めている (竹見ら, 2008)。これらの研究を進めていく中で、次のような着想を得ている。風速の変動は大気の流れ変動が重要となるが、そのためには気象予報モデルにおいて大気乱流変動を陽に表現するサブ格子スケール (SGS) の乱流モデルの導入が不可欠であり、現在の気象予報モデルではそのような乱流モデルはまだ実用化レベルにはない。気象予報モデルで現在主流のアンサンブル平均化のアプローチによる乱流モデルは風速の変動性に対して一定の評価を与えるものの、しかし複雑地形上や構造物周りの風の変動を陽に表現するためにはSGS乱流モデルを導入したラージ・エディ・シミュレーション (LES) の手法を用いることが必須である。風速変動さらには突風の定量的予測のためには、気象予報モデルにLESの技術をLESの思想に則って融合させることが大事である。気象モデルで行なわれている“LES”の多くは実際には層流の計算にしかなく、それが課題である。

## 2. 研究の目的

竜巻など小規模気象擾乱に伴う瞬発性の突風による顕著な風災害が2005年および2006年に続発し、突風に関する予測情報の必要性が認識されている。しかし、仮に竜巻など小規模擾乱の発生が診断されたとしても、それに伴い生じる突風の定量的な予測は極めて困難なのが現状である。特に、超高層ビルが林立する都市部における突風の発生は、気象擾乱の構造そのものに起因するのみならず、建築構造物の配置など都市の形態にも強く影響を受ける。都市域での突風による被害ポテンシャルは極めて高いため、突風災害の被害軽減の観点から、本研究では都市の形態に起因する突風の次世代の定量的予測手法を構築することを目的とする。そのために、流れの非定常な振る舞いを表現できるラージ・エディ・シミュレーション (LES) 乱流計算手法を用いて、東京都心部を解析対象に都市キャンピモデルを構築し、領域気象予報モデルに組み込む。これにより実際の気象状況において起こりうる突風の数値予測を行ない、超高層ビルが林立する大都市特有の突風の発生機構を明らかにする。

## 3. 研究の方法

地上風の分散スペクトル分布 (Van der Hoven, 1957) によると、 $0.5 \sim 5h^{-1}$  の周波数帯でスペクトルギャップ帯が存在し、それより低周波数側では気象擾乱に起因する周波数帯、高周波数側では粗度要素に起因する周波数帯となっている。そこで本研究では、両者のスペクトルギャップを接続するように、気象スケールから建築スケールに至るまでの広範囲な周波数成分を有する大気の運動を的確に捉えられる数理モデルを構築し、突風の定量的予測モデルの開発と突風の発生機構の解明を行う。

東京都心部を解析対象とし、建物高さの情報を含むGISデータから都市のモデル化を行い、超高解像度LES乱流計算を実施し、構造物による抗力係数の評価をすることで都市キャンピモデルを構築する。一方、気象予報モデルWRF (Weather Research and Forecasting) モデルを用い、ネスティング手法により国土地理院5mメッシュ標高データにより地形を作成し、高解像度気象シミュレーションを行い、広域の気象場を再現する。その上で、構造物を抗力係数として表現する都市モデルを導入した20mメッシュLES領域をWRFにはめ込み、気象場と粗度の双方に起因する変動を加味した初期条件・境界条件を与えてLES乱流計算を行なう。東京・大手町の気象データ (1分値・瞬間風速値) と比

較することにより本研究で提案する解析手法の妥当性を検証し、突風の定量予測手法を構築し、また突風の発生機構を解明する。

#### (1) 都市空間構造の定量的評価と都市キャノピーモデルの構築

数 km 四方の東京都心の GIS データから 1km 四方の領域の下で都市地表面形態(建物高さ平均・標準偏差、建物平面密度)を定量的に評価し、特に建物高さのばらつきを考慮して都市のモデル化を行う。ここで用いる GIS データは原子力研究開発機構において購入する。次に、都市モデルを対象とし、高解像度化された LES 乱流解析を行い、キャノピーモデルの構築にあたり重要なパラメータとなる抗力係数を評価し、都市形態と抗力係数との関連性について類型化を行う。

#### (2) 気象予報モデルによる高解像度シミュレーション環境の構築

国土地理院数値地図高分解能標高データを用いてモデル地形を作成し、本研究で用いる気象予報モデル WRF に取り込む。ネスティング機能を用いて、総観規模からマイクロスケールまでの計算領域を設定し、格子幅を徐々に細密化し、解析対象領域である東京都心部および周辺部を 60 m の分解能で解像する。このような罫線設定で、強風イベントのシミュレーションをする環境を構築する。

#### (3) 都市キャノピーモデルを組み込んだ LES 広域都市乱流解析モデルの構築

対象とする東京都市部における地表面形態から抗力係数をデータベース化し、計算モデルに組み込む。次に、気象予報モデルからの接続にあたり、気象場における微細構造・局所的性質ならびに大規模構造を極力維持されたまま LES モデルに反映させるために、対象都市の領域を数 km 四方と広域的に取り扱い、水平格子幅は 20m とし、広域都市の LES 乱流解析モデルの構築を行う。

#### (4) 気象予報モデルによる高解像度シミュレーションの実施

構築した高分解能気象シミュレーション環境を用いて、温帯低気圧および台風通過に伴う強風イベントに対して高解像度シミュレーションを実施する。それぞれの事例に対応した風速分布特性を調べる。

#### (5) 気象予報モデルから LES 広域都市乱流解析モデルへのインターフェースの作成

気象予報モデル WRF から 3次元風速場データを LES モデルに初期条件・境界条件として渡すためのインターフェースを作成する。初期時刻の 3次元風速場データを初期条件として、各時間ステップでの風速値を境界条件として LES 領域に渡すような処理体系を作成する。

#### (6) 気象予報モデルと LES モデルとの結合による局所的突風の予測モデルの構築とその発生機構の解明

気象モデルと LES モデルの融合解析手法を精緻化し、気象予報モデルによる気象シミュレーションを行い、細かい時間ステップで出力した 3次元風速変動データを LES モデルの入力条件として与える。高解像度気象数値シミュレーションから LES モデルへスケールダウンさせることで、風速変動性状や風速のピーク値(すなわち突風値)を局地的に評価することで、防災対策に資する強風災害予測モデルの開発を行う。多様な高度分布を持つ都市域において、構造物やそれらの配置によって生じる乱流変動と瞬発的な風速強化(突風)の関連性を調べることにより、都市域での突風の発生機構を解明する。

## 4. 研究成果

気象モデルによる高分解能数値シミュレーションで得られた風速データを LES 乱流計算モデルに入力するため手法を開発した。すなわち、LES モデルにおいて乱流を効率よくかつ流体力学的な整合性を持つ手法で生成し、気象モデルの出力値に乱れを重ね合わせることで、気象場の影響と都市での乱流生成の双方を考慮する新しい手法を考案した(図 1)。

本手法を爆弾低気圧や台風の事例に対して適用し、東京で発生した強風の再現シミュレーションを行った(図 2)。東京都心部は 2 m 分解能の建物データ(図 3)を用いることで、高精度かつ高分解能での都市を LES モデルにおいて表現した。さらに、LES モデル内でネスティング手法を構築し、LES モデル内で 20 m 解像度から 5 m 解像度への高分解能化も行った。

気象モデルと LES モデルの融合による計算結果を気象庁による東京都心での風観測データと比較し、実際に観測された瞬発的な風速の極値(瞬間風速値)や突風率(10 分平均風速値に対する瞬間風速値の倍率)が数値計算によって良好に再現することができた(図 4、図 5)。このように本研究では、気象モデルによる風速値に LES モデルで生成した乱流成分を重ね合わせることで、実際の気象条件に応じた風速の乱流的な変動を再現するこ

とを可能とする手法を構築することができた。

また、都市を模した粗度を配置した都市大気乱流解析モデルを構築し、複雑に建物が配置する大都市を対象として粗度長などのパラメータを推定する数式を提案した。提案された定式により東京都心の粗度長分布を算出した (図 6)。

得られた研究成果は、国内外での学会・会議で発表を行い、また査読付論文や解説記事として論文発表を行った。

都市をはじめとした複雑粗度上 (複雑地形を含む) での風速変動は、都市における防災や環境の問題に取って重要であるのみならず、原発事故時の放射性物質の拡散といった緊急対応が必要不可欠な場合に対しても、極めて大事な情報である。本研究で構築した手法は、緊急対応のような非定常な状況での数値解析手法として今後の発展が期待される。

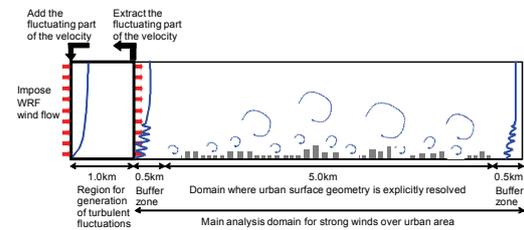


図 1 : 気象モデルから LES モデルに接続する際の乱流生成手法の概念図。

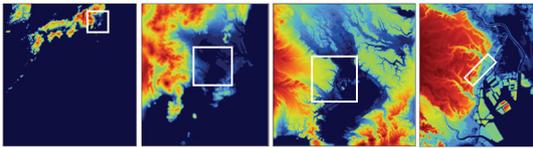


図 2 : 気象モデルの計算領域と高分解能化。

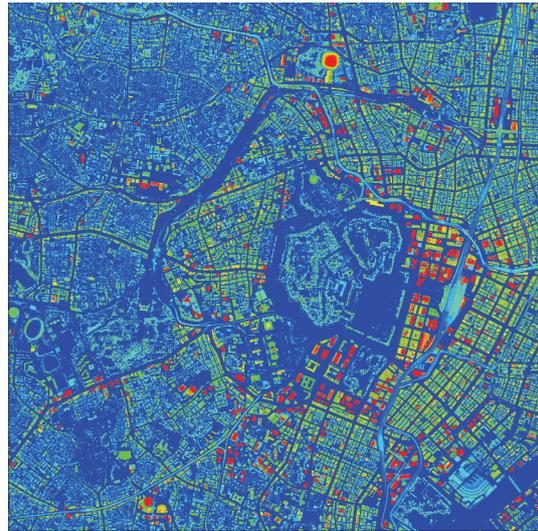


図 3 : 東京都心部の建物高さ分布。

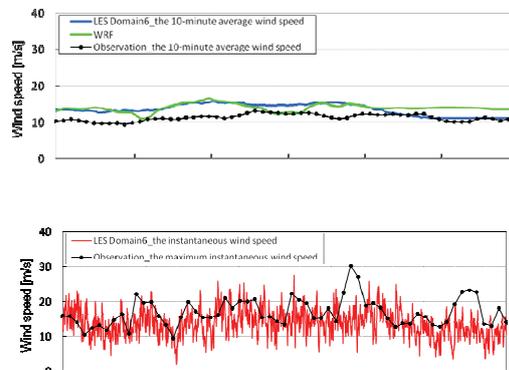


図 4 : 東京都心内の気象庁観測点における風速変動の観測値とモデル計算値の時系列。(上) 10 分平均風速値 (黒 : 観測、青 : LES 計算) および 1 分間隔 WRF 出力値 (緑)。(下) 観測風の 1 分間隔の最大瞬間風速値 (黒) および LES の瞬間風速変動 (赤)。

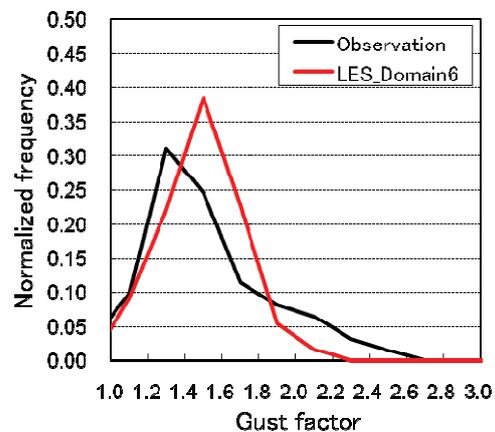


図 5 : 東京都心部での突風率の頻度分布。黒実線は観測風速、赤実線は LES 計算値。

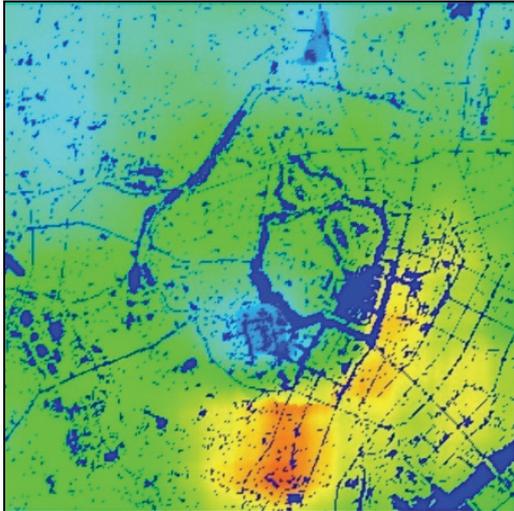


図6：本研究で提案した定式により算出した東京での粗度長の分布。

#### 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7件)

1. Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2012: Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations. *Atmospheric Science Letters*, in press, doi: 10.1002/asl.377, 査読有
2. Takemi, T., 2012: Importance of the numerical representation of shallow and deep convection for simulations of dust transport over a desert region. *Advances in Meteorology*, Vol. 2012, Article ID 413584, 13 pages, doi:10.1155/2012/413584, 査読有
3. 竹見哲也, 2012: 気象擾乱に伴う突風災害の数値シミュレーション. *計算工学*, Vol. 17, No. 1, pp. 16-19, 査読なし
4. Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2011: LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, pp. 1692-1712, doi: 10.1175/2011JAMC2567.1, 査読有
5. 竹見哲也, 辰己賢一, 石川裕彦, 2010: 高分解能領域気象モデルによる気象擾乱に伴う風速の極値の解析. *風工学シンポジウム論文集*, Vol. 21, pp. 19-24, 査読有
6. Ohno, H., and T. Takemi, 2010a: Mechanisms for intensification and maintenance of numerically simulated dust devils. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 11, pp. 27-32, doi: 10.1002/asl.249, 査読有
7. Takemi, T., K. Kusunoki, K. Araki, T. Imai, K. Bessho, S. Hoshino, and S. Hayashi, 2010: Representation and localization of gusty winds induced by mesocyclones with a high-resolution meteorological modeling. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 58, pp. 121-130, 査読有

[学会発表] (計16件)

1. 竹見哲也, 2012: 高分解能気象シミュレーションによる複雑地形上の局地規模風速場の解析: 2011年3月福島県東部地域を対象とした事例研究. 第61回理論応用力学講演会, 東京都目黒区東京大学生産技術研究所, 2012年3月9日, OS07-02
2. 竹見哲也, 2011: 複雑地形上における極端現象の100mメッシュ高解像度気象シミュレーション. 第25回数値流体力学シンポジウム, 大阪府吹田市 大阪大学コンベンションセンター, 2011年12月20日, B08-3
3. 竹見哲也, 2011: 都市のモデル化と都市大気乱流の数値シミュレーション. 日本気象学会 2011年度秋季大会シンポジウム「理学と工学の融合が切り開く新しい都市環境学」, 名古屋市千種区名古屋大学東山キャンパス, 2011年11月17日. (基調講演)
4. Takemi, T., 2011: High-resolution meteorological modeling of wind extremes associated with weather disturbances. The 6th Korea-Japan Joint Workshop on Wind Engineering, Kyoto University Obaku Plaza, Uji, Kyoto, Japan, 31 October 2011, 2011年10月31日
5. Takemi, T., and H. Nakayama, 2011: Large-eddy simulations of turbulent boundary-layer flow over urban areas with complex roughness elements by coupling mesoscale meteorological and CFD models. The Fifth Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, Busan, Korea, 24-26 October 2011, 2011年10月25日
6. Nakayama, H., T. Takemi, H. Nagai, 2011: Coupling of WRF and building-resolving urban CFD models for analysis of strong winds over an urban area. 14th Conf. on Mesoscale Processes, Los Angeles, California, 1-4 August 2011, American Meteorological Society, 1.6, 2011年8

- 月 1 日
7. 竹見哲也, 中山造成, 永井晴康, 2011 : 気象モデルと LES モデルの融合による都市域での強風変動の乱流解析. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 千葉市美浜区幕張メッセ国際会議場, 2011 年 5 月 25 日, AAS022-01
  8. 中山造成, 竹見哲也, 永井晴康, 2011 : 乱流流入生成手法を用いた LES モデルと気象モデルによる都市域強風変動の融合解析. 日本気象学会 2011 年度春季大会, 東京都渋谷区国立オリンピック記念青少年総合センター, 2011 年 5 月 19 日, C203
  9. Takemi, T., and H. Nakayama, 2010: An approach for quantitative forecasting of turbulent flow over an urban area by coupling numerical weather prediction and large-eddy simulation models. AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, California, 13-17 December 2010, Abstract A41F-0161, 2010 年 12 月 16 日
  10. Takemi, T., and H. Nakayama, 2010: High-resolution numerical analysis of turbulent flow in an urban area by merging numerical weather prediction model and large-eddy simulation model. First International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, Kyoto University, Kyoto, Japan, 29 September-1 October 2010, pp. 13-14, 2010 年 9 月 29 日
  11. 大野洋, 竹見哲也, 2010 : 塵旋風の構造と強化・維持過程に関する数値的研究. 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 千葉市美浜区幕張メッセ国際会議場, 2010 年 5 月 27 日, MIS004-06
  12. 竹見哲也, 中山造成, 2010 : 気象モデルと LES モデルの結合による都市域強風変動の融合解析: 突風の予測に向けて. 日本気象学会 2010 年度春季大会, 東京都渋谷区, 2010 年 5 月 26 日, C454
  13. 中山造成, 竹見哲也, 永井晴康, 2010 : 各種形状を有する建物配列群での空力的粗度特性に関する LES と実在都市への適用. 日本気象学会 2010 年度春季大会, 東京都渋谷区, 2010 年 5 月 26 日, C453
  14. 竹見哲也, 2010 : 高分解能気象モデルを用いた強風変動シミュレーションと突風予測の可能性. 第 56 回風に関するシンポジウム, 京都府宇治市京都大学宇治きはだホール, 2010 年 3 月 18 日
  15. Takemi, T., 2010: Representation of extreme weather events in convection-resolving simulations at 100-m resolution. The Third International Workshop on Prevention and Mitigation of Meteorological

Disasters in Southeast Asia, Beppu, Japan, 1-4 March 2010, pp. 38-40, 2010 年 3 月 2 日

16. 竹見哲也, 荒木啓司, 今井俊昭, 柴田徹, 楠研一, 別所康太郎, 中里真久, 益子涉, 林修吾, 星野俊介, 猪上華子, 保野聡裕, 2009 : メソ気象擾乱による強風変動の SGS モデルを用いた高解像度気象解析. 日本気象学会 2009 年度秋季大会, 福岡県福岡市, 2009 年 11 月 27 日, D305

[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://ssrs.dpri.kyoto-u.ac.jp/~takemi>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹見 哲也 (TAKEMI TETSUYA)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号 : 10314361

### (2) 研究分担者

中山 造成 (NAKAYAMA HIROMASA)

日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学

研究部門・研究員

研究者番号 : 50535903