

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2017

課題番号：26282107

研究課題名（和文）原子力災害リスク評価のための大気乱流・拡散マルチスケール予測モデルの確立

研究課題名（英文）Development of Multi-Scale Prediction Model for Atmospheric Turbulence and Dispersion for Assessing Risks of Nuclear Power Plant Disaster

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、大気乱流の高精度観測技術と高精度モデル技術とを融合し、様々な気象条件を想定した原子力災害リスク評価のための大気乱流・拡散のマルチスケール予測モデルを確立することを目的として実施した。京都市街地内で大気境界層の観測を実施して乱流データを取得し、また、米国市街地の乱流・拡散データも用い、LESモデルの高度化をした。気象モデル・LESモデルの結合化による大気乱流計算を行い、東日本大震災時の原発事故時を想定した数値シミュレーションを実施し、様々な気象条件を想定したシミュレーションを行い、原子力災害リスク評価のための定量的な大気乱流・拡散のマルチスケール予測手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop a multi-scale prediction model of atmospheric turbulence and dispersion for assessing risks of nuclear power plant disasters by merging field observations and high-resolution numerical modeling. The LES model was updated with the use of turbulence and dispersion data obtained in Kyoto City and Oklahoma City. By conducting turbulence simulations by coupling a mesoscale meteorological model and the updated LES model, we have developed a multi-scale prediction model for assessing risks of nuclear power plants under various meteorological conditions.

研究分野：自然災害科学

キーワード：自然災害 大気乱流 大気拡散 原子力災害 気象モデル LES 災害リスク評価 東日本大震災

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震は、地震・津波による激甚災害だけでなく、福島第一原子力発電所（福島原発）からの放射性物質の放出による広域の環境汚染という未曾有の災害をもたらした。福島原発からの放射性物質の環境中への拡散についての実態を把握するため解析が進められている。これら事後解析によると、放射性物質の地表面沈着量の広域空間分布は定性的には再現できることが明らかになってきた。しかし、定量的な評価はまだ困難である。さらに、市町村単位に相当する10 kmスケール、福島原発敷地に相当する1 kmスケールといった局所規模での放射性物質の拡散予測の精度向上も乗り越えるべき大きな課題である。

これら困難の原因は二つ考えられる。一つは、放射性物質であるかどうかに係らず汚染物質の大気拡散の予測には天気予報で用いられる数値気象予測モデル（気象モデル）が利用されているが、気象モデルの数 km メッシュという空間分解能が日本の複雑地形を表現するには十分でない点にある。複雑地形での気流の変動を計算するためには、数 km の分解能は必ずしも十分ではなく、数 100 m の分解能が必要である。二つ目は、気象モデルでは建物の存在を正確に表現できない点である。建物の存在により気流は局所的に変動（乱流）し、それが拡散にも影響を及ぼす。このため、複雑地形や複雑な建物分布といった複雑地表面での乱流・拡散予測は大変難しい。

これらの困難を解決し局所規模での乱流や拡散の予測精度を向上させるため、本研究代表者はこれまで、台風や低気圧など様々な気象条件下での複雑地形上の気流変動に関する気象モデルの高分解能化研究を進めてきた。また、乱流挙動の予測に優れた乱流計算（Large-eddy simulation; LES）モデルに建物効果を正確に組み込んで気象モデルと結合し、都市における乱流の定量的な予測手法の構築を進め、2009年台風18号を事例として東京都心で生じた最大瞬間風速値 30.2 m/s を再現することに成功した。

このような乱流・拡散予測モデルをさらなる発展させるためには、LESモデルに大気の大気温度構造（安定度）や浮力の効果を取り込み、それに合わせて気象モデルとの結合手法を改良する必要がある。これにより、現実的な気象条件下での予測計算が可能となる。

また、モデル計算結果の妥当性の検証には、これまで用いた地上観測による点データだけでは不十分であり、上空の大気観測も組み合わせた乱流の空間データも必要不可欠である。さらに、様々な気象条件下でのモデル検証を可能とする長期間の実測データが必要である。

そこで、LESモデルの高度化、気象モデルとLESモデルの結合手法の精緻化、検証に

必須の高精度観測を組み合わせることで、広域から建物規模までのマルチスケールでの大気乱流・拡散の予測モデルを確立し、様々な気象条件を想定した原子力災害のリスク評価に資すると考えられる。様々な気象条件を考慮すべきことは、福島原発事故では、原子炉建屋での水素爆発により放射性物質が大量放出した際、低気圧が通過することで風向きが海から陸向きに大きく変化したため甚大な環境汚染を陸域で引き起こした、という事実が物語っている。様々な気象状況を考慮することで、より精密な災害のリスク評価が可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、大気乱流の高精度観測技術と高精度モデル技術とを融合し、様々な気象条件を想定した原子力災害リスク評価のための大気乱流・拡散のマルチスケール予測モデルを確立することである。そのため、複雑地表面での大気乱流の高精度観測を行ってモデル検証のためのデータセットを作成し、LESモデルの高度化および気象モデルとの結合手法の高度化を行って観測データによりモデル計算結果を検証し、局地気象スケールから原子力発電所建物スケールに至るまでの大気乱流・拡散のマルチスケール予測モデルを確立する。本予測モデルを用いて東日本大震災時の福島原発からの放射性物質拡散や顕著気象条件のシナリオを想定した拡散シミュレーションを行い、原子力災害リスク評価に耐えうる定量的な予測手法を確立する。

本研究の概念図を図1に示す。

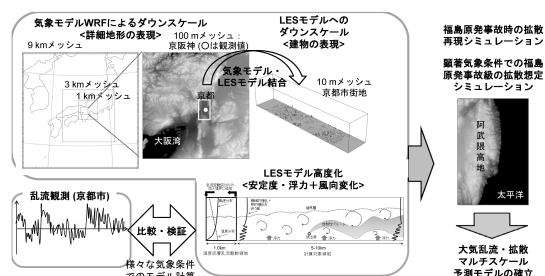


図1 本研究の概念

## 3. 研究の方法

本研究では、大気乱流の高精度観測技術と高精度モデル技術とを融合し、原子力災害リスク評価のための大気乱流・拡散のマルチスケール予測モデルを確立するため、以下の方法により研究を進めた。

(1) 複雑地表面での大気乱流の高精度観測を行い、大気乱流の観測データセットを作成する。

観測は、京都市伏見区宇治川沿いの京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー

で実施する。京都市は、周囲を山で囲まれており、盆地には市街地が広がっているため、観測地点では、周囲の地形と市街地の建物の双方の影響を受けた乱流が期待される。

観測では、鉛直上方の気流変動を計測できる鉛直1次元ドップラーライダーにより上空の乱流を把握し、宇治川オープンラボラトリーの気象観測鉄塔で地上近傍の乱流を超音波風速温度計により捉える。さらに、乱流は安定度の影響を受けて挙動が大きく変化するため、大気安定度の鉛直構造を観測する。このため、GPSゾンデによる上空大気観測を日中に高頻度で実施する。得られた乱流観測データをモデル検証に用いるため、乱流の統計解析を実施する。

(2) LESモデルの高度化および気象モデルとの結合手法の改良・精緻化を行い、観測データセットによって結合モデル計算結果の検証を実施する。

LESモデルに大気安定度の効果を組み込み、流れ場のみならず温度の状態も予測可能とし、さらに安定度の効果を加えた拡散の挙動も予測するようにLESモデルの高度化を行う。また、LESモデルと気象モデルとの結合手法を改良する。実際の気象場に見られる安定度および風の高さ変化をLESモデルに入力条件として入れる。

これにより、気象モデル・LESモデルの結合化による実際の気象条件での予測計算を行う。オクラホマシティおよび京都市街地を解析対象領域として、高分解能LESを実施する。計算結果の検証にはオクラホマシティの高層ビルが林立する街区内で実施された拡散の野外観測 Joint Urban 2003 の実測データ、および本研究で実施する京都市街地での乱流観測データを用いる。

(3) 局地気象スケールから建物スケールに至るまでの大気乱流・拡散のマルチスケール予測モデルを確立する。

開発したモデルを用いて、2011年3月の福島原発事故時の大気拡散の再現計算を行い、事故時の実測データと比較して再現性を検証する。さらに、様々な気象状況を想定した乱流・拡散シミュレーションを行う。様々な気象条件を想定したシミュレーションを行うことにより、原子力災害リスク評価に耐えうる定量的な大気乱流・拡散のマルチスケール予測手法を確立する

#### 4. 研究成果

観測および観測データの解析については、まず平成25年6~7月に京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーで実施済みの境界層の風観測データを用いて大気の流れの統計的な性状についての解析をした。

本研究課題期間中に大気乱流の観測を、京都市伏見区宇治川沿いの京都大学防災研究

所宇治川オープンラボラトリーで実施した。観測期間は、日本海側からの寒気吹き出し、京都盆地の北方の山地に起因する変動、京都市街の建物や構造物に起因する変動といった多様な乱流を捕捉することができる冬季とし、平成28年1月上旬から2月上旬の1ヶ月間に観測を実施した。この観測期間に鉛直1次元ドップラーライダーを設置し、下層大気の連続観測を実施した。気象観測鉄塔の2高度に設置された超音波風速温度計により大気乱流の連続観測を実施した。また、観測期間中の2月上旬には、ラジオゾンデによる上空大気の観測を実施した。大気の日変動を捉えるため、ラジオゾンデは9時・10時30分・12時・14時・16時と日中に1日5回という高頻度で放球した。得られた乱流観測データをモデル検証に用いるため、風速時系列から10分間平均風速、風速変動の標準偏差、瞬間的最大値・最小値などの風に関する統計量を求めた。観測期間中の出現した様々な気象状況のうち、北風が卓越し、中立に近い成層状態の場合を抽出し、風速変動や乱流特性の分析をした。また、平成25年6~7月に京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーで実施済みの境界層の観測データも併用し、大気乱流の統計的性状をまとめた。これにより、数値シミュレーションの検証用のデータセットを作成した。

数値モデル開発については、最初に、LESモデルに安定度の効果を組み込み、流れ場のみならず温度の状態も予測可能とし、さらに安定度の効果を加えた拡散の挙動も予測するようにLESモデルの高度化を行った。また、建物に加え地形効果を取り込むよう更新した。また、超高分解能での広域でのLES計算をするために必要不可欠な計算高速化を実施した。スーパーコンピュータでの大規模並列化MPIおよびグラフィックプロセッサGPUを利用した高速化をLESコードに実装した。

市街地を対象としたLESモデルの精緻化のため、京都市街地の建物高度データとして2mメッシュGISデータを用い、LESモデルに京都市街地の建物情報を組み込んだ。観測期間中に見られた北風かつ中立成層時を想定し、実際の京都市街地域の乱流のLESを実施した。図2に京都市街地でのある時刻の地上付近の風速場を示す。

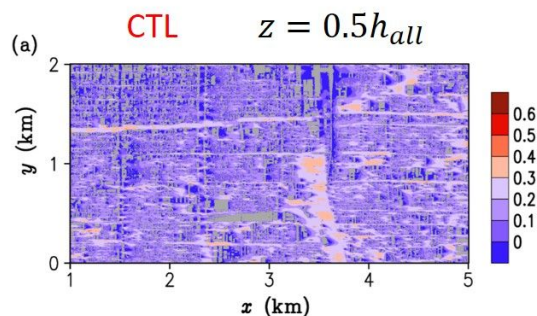


図2 LESによりシミュレートされた京都市街地でのある時刻の風速場

シミュレーション結果を観測データと比較し、計算の妥当性を検証した。その上で、LES の結果を解析し、境界層乱流の組織構造とそれによる乱流輸送過程の実態を明らかにした。本解析結果を平成 29 年 1 月に米国シアトルで開催された米国気象学会年次大会における都市環境会議においてポスター発表した。本ポスター発表は高く評価され、Best Poster Presentation 賞を受賞した。

また、様々な市街地を想定した粗度ブロックを下端境界として設置し LES を実施し、粗度の違いによる感度実験を行い、LES 乱流変動と組織構造、および乱流輸送過程を明らかにした。

LES モデルの高度化にあわせて、気象モデルとの結合手法について安定度と風向の高さ変化とを考慮した改良を行った。気象モデルとして WRF モデルを用い、ダウンスケール計算を実施した。気象モデル・LES モデルの結合化による実際の気象条件での予測計算を行った。具体的には、オクラホマシティの高層ビルが林立する街区内で実施された拡散の野外観測 Joint Urban 2003 における観測事例を対象とし、ダウンスケール計算を行い、計算結果を観測データと比較し、計算精度を検証した。市街地での拡散場の再現性を検討し、濃度の平均値やピーク値の出現特性が都市街区の形状に依存することを示し、LES モデルにより特にピーク値の再現が良好であることを明らかにした。

さらに、2011 年 3 月 11 日東日本大震災により発生した東京電力福島第 1 原子力発電所からの放射性物質の拡散シミュレーションを目標とし、福島原発の GIS データを導入し、福島原発の建屋および周辺地形の詳細の構造を LES モデルに組み込み、放出イベントのうち一事例を対象として気象モデル・LES モデルの結合による乱流・拡散シミュレーションをした。原子力発電所からの放射性物質の拡散事故など原子力災害リスクを評価するための乱流・拡散の LES モデルを構築した。

以上の通り、気象モデル・LES モデルの結合化による大気乱流計算を行い、乱流の組織構造とそれによる乱流輸送過程を明らかにした。東日本大震災後の放射性物質の放出イベントを対象とした数値シミュレーションを実施し、様々な気象条件を想定したシミュレーションを行い、原子力災害リスク評価のための定量的な大気乱流・拡散のマルチスケール予測手法を確立することができた。

## 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 15 件)

Yoshida, T., T. Takemi, M. Horiguchi, 2018: Large-eddy-simulation study of the effects of building height variability on turbulent flows over an

actual urban area. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 168, pp. 127-153, doi: 10.1007/s10546-018-0344-8. 査読有  
Poulidis, A.-P., T. Takemi, M. Iguchi, and I. A. Renfrew, 2017: Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash: A case study of Mt. Sakurajima, Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, Vol. 122, pp. 9332-9350, doi: 10.1002/2017JD026595. 査読有  
Vanderbauwhede, W., and T. Takemi, 2016: An analysis of the feasibility and benefits of GPU/multicore acceleration of the Weather Research and Forecasting model. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Vol. 28, pp. 2052-2072. doi: 10.1002/cpe.3522. 査読有

Nakayama, H., T. Takemi, H. Nagai, 2016: Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation. Part 5: Detailed simulation of turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area under real meteorological conditions. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 53, pp. 887-908, doi: 10.1080/00223131.2015.1078262.

査読有

Vanderbauwhede, W., and T. Takemi, 2015: Twinned buffering: A simple and highly effective scheme for parallelization of Successive Over-Relaxation on GPUs and other accelerators. *High Performance Computing and Simulation (HPCS)*, 2015 International Conference on, pp. 436-443, 20-24 July 2015, doi: 10.1109/HPCSim.2015.7237073 査読有

Nakayama, H., T. Takemi, H. Nagai, 2015: Large-eddy simulation of turbulent winds during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident by coupling with a meso-scale meteorological simulation model. *Advances in Science and Research*, Vol. 12, pp. 127-133, doi: 10.5194/asr-12-127-2015. 査読有  
Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2014: Large-eddy simulation of plume dispersion under various

thermally stratified boundary layers. *Advances in Science and Research*, Vol. 11, pp. 75-81, doi:10.5194/asr-11-75-2014 査読有

[学会発表](計30件)

Tetsuya Takemi, 2018: Coupling of meteorological and LES models to investigate turbulent flow and dispersion in urban districts. Mini-workshop on Urban Flow, Dispersion and Ventilation. University of Hong Kong, Run Run Shaw Tower -CPD-1.21, Hong Kong, 6 March 2018. (Invited)

Tetsuya Takemi, Toshiya Yoshida, 2017: Large-eddy simulation studies on turbulent flows over rough surfaces: Urban versus vegetated areas. International Workshop on Asian Dust, Bioaerosols and Environmental Regime Shift, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan, 3-5 November 2017.

Tetsuya Takemi, Mitsuaki Horiguchi, Toshiya Yoshida, 2017: Observational and numerical studies on turbulent airflows over an urban area. 5th International Symposium on Earth-Science Challenges 2017 (ISEC2017), Uji Campus, Kyoto University, Uji, Japan, 1-5 October 2017, O09.

Toshiya Yoshida, Tetsuya Takemi, 2017: Effects of geometrical features of surface roughness on turbulent flows over an actual urban area. 14th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Singapore, 6-11 August 2017, AS29-D4-PM1-308-005.

竹見哲也, 2017: 気象モデルとLESモデルを用いた局所スケールの大気乱流・拡散モデリング. 大気環境学会近畿支部気象拡散部会講演会, 大阪市浪速区大阪府立大学 I-site なんば, 2017年5月16日.(招待講演)

Toshiya Yoshida, Tetsuya Takemi, 2017: Influences of complex roughness over an actual urban area on turbulent flows as revealed by large-eddy simulations. 13th Symposium of the Urban Environment, 97th AMS Annual Meeting, Seattle, Washington, USA, 22-26 January 2017, #265.

Hiromasa Nakayama, and Tetsuya Takemi, 2016: Large-eddy simulation of a diurnal cycle of atmospheric turbulent boundary layer flows over an urban area by coupling with a meso-scale meteorological simulation model. The 4th International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, The Prince Hakone Lake Ashinoko, Hakone, Japan, 30 November-2 December 2016.

中山造成, 竹見哲也, 2016: リサイクリング技術を用いたLES温度成層乱流生成手法に関する研究. 日本気象学会2016年度秋季大会, 名古屋市千種区名古屋大学東山キャンパス, 2016年10月26日, C152.

Hiromasa Nakayama, Tetsuya Takemi, and Haruyasu Nagai, 2016: Large-eddy simulation of plume dispersion during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident by coupling with a meso-scale meteorological simulation model. 35th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Application, Minoa Palace Resort & Spa, Chania, Crete, Greece, 3-7 October 2016.

吉田敏哉, 竹見哲也, 2016: 実在都市における境界層乱流の時空間構造の解析. 日本気象学会2016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, 2016年5月21日, D457. Toshiya Yoshida, Tetsuya Takemi, 2015: Large-eddy simulation of turbulent flow structure over urban area. The 13th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ13). Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, 11-13 November 2015, #6-2.

吉田敏哉, 竹見哲也, 2015: 京都市街地における大気境界層乱流の組織構造についてのLES解析. 日本気象学会2015年度秋季大会, 京都市南区京都テルサ, 2015年10月30日, P308

竹見哲也, 中山造成, 2015: 現実気象条件での複雑地表面上の大気乱流・拡散LES解析. 日本気象学会2015年度秋季大会, 京都市南区京都テルサ, 2015年10月28日, A106

Tetsuya Takemi, Hiromasa Nakayama, 2015: Numerical simulations of turbulent flow and dispersion over urban and complex terrain by coupling WRF and LES models. Meteorology And Climate Modeling for Air Quality (MAC-MAQ), Sacramento, California,

The United States of America, 16-19 September 2015.

Hiromasa Nakayama, Tetsuya Takemi, and Haruyasu Nagai, 2014: Evaluation of the coupling approach between mesoscale-WRF and LES-based CFD models for simulating turbulent flows and plume dispersion in urban area. 6th International Workshop on Global Cloud Resolving Modeling/3rd International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, RIKEN/AICS, Kobe, Japan, 24-26 September 2014, P-01.

Hiromasa Nakayama, Tetsuya Takemi, Haruyasu Nagai, 2014: Evaluation of the coupling between NWP and LES-based CFD models for simulating urban boundary layer flows. 3rd International Lund Regional-Scale Climate Modelling Workshop, Lund, Sweden, 16-19 June 2014, p. 131-132.

〔図書〕(計 1件)

竹見 哲也, 2015: 異常気象災害. 「災害対策全書別冊「国難」となる巨大災害に備える～東日本大震災から得た教訓と知見～」, 公益財団法人ひょうご震災記念 21 世紀研究機構「国難」となる巨大災害に備える編集会議編, ぎょうせい, pp. 538-541, 645 pp., ISBN978-324-10007-3

〔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 浩成 (NAKAYAMA, Hiromasa)  
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹  
研究者番号: 50535903

堀口 光章 (HORIGUCHI, Mitsuaki)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号: 60190253