

令和元年5月22日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01341

研究課題名(和文) 原子力緊急時において即時対応が可能な局所域詳細大気拡散予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of a quick atmospheric dispersion calculation method in emergency responses to nuclear accidents

研究代表者

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 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹

研究者番号：50535903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、計算流体力学モデルを用いることで、地形起伏・建築物などの影響を受ける複雑乱流場の中でも正確かつ迅速に大気拡散計算ができる原子力緊急時局所域大気拡散予測手法の開発を行った。まず、仮想気象条件下での大気拡散の事前計算を行って平均濃度分布を各平均風向でデータベース化した。平均風向が変化する気象状況下での大気拡散の計算も行い、平均風向の出現頻度に応じてデータベース化された濃度分布を重ね合わせて両者の濃度分布の対応性を調べた。その結果、平均風向間隔が 10° 以下であれば、濃度分布の重ね合わせにより良好に予測できることが示された。これにより、正確かつ迅速に拡散計算が行えることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気拡散予測手法として、主に、正規分布型ブルームモデルと計算流体力学モデルの2つの手法が挙げられる。前者は、簡易拡散方程式に基づく手法であるため、迅速かつ低コストで予測できるが、局所地形や建物の影響を厳密に考慮できないため、正確さに問題がある。一方、後者は地表面起伏や建物の影響を考慮して拡散予測を行えるが、計算負荷は高い。そのため、計算精度を追及すれば計算時間も増大するというトレードオフ問題が生じていた。本研究で開発した手法は、迅速かつ高い精度で拡散予測を行うことができ、従来のトレードオフ問題の概念を覆した画期的な緊急時対応が可能となる。

研究成果の概要(英文)：We propose, in emergency response to nuclear accidents, a practical and quick local-scale atmospheric dispersion calculation method using an overlapping technique. First, we pre-calculated plume dispersion around an actual nuclear facility under idealized atmospheric conditions with 36 wind-direction cases and made a dataset of mean concentrations for each wind direction case. Then, we conducted LESs of plume dispersion under realistic atmospheric conditions using the meteorological data and estimated the spatial distributions of the 1-hour averaged concentrations by overlapping the precalculated concentration data depending on the frequency of the mean wind directions. It is shown that the concentration distribution patterns are well reproduced in comparison to those under the realistic conditions. It is concluded that the atmospheric dispersion calculation method using the overlapping technique has potentially a high performance in emergency responses to nuclear accidents.

研究分野：大気拡散

キーワード：大気拡散 大気乱流 原子力緊急時 数値シミュレーション 局所域 重合法 即時評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災により引き起こされた福島第一原子力発電所事故により大量の放射性物質が大気中に放出され、東日本各地で放射性ヨウ素・セシウムなどが検出された。この震災時において発生した地震や津波などにより電源喪失が引き起こされ、放射線測定のための環境モニタリングポストなどが作動せず、事故初期においては放出率情報が不明であったため、事故の規模や公衆の被ばく線量予測のために放出量を算定することが喫緊の課題となっていた。そのため、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、ダストサンプリングにより測定された空気中の放射性物質の核種ごとの濃度や環境モニタリングでの空間線量率を用い、単位放出率を仮定した大気拡散シミュレーションの計算結果を組み合わせ、暫定的に放出率を推定した。この原子力事故をうけ、より予測精度の高い大気拡散モデルの開発も求められている。これまで原子力機構では、世界版 SPEEDI (Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) を用いて 100km-数 1000km 四方の領域を対象に放射性物質の大気拡散計算を行っていた。このモデルは、気象場の再現には領域気象モデルが用いられ、国内に加え国外の原子力事故にも対応できるように、局地スケールから半球スケールまで汚染評価が可能となっている。しかしながら、気象モデルの空間解像度で個々の建物を陽的に表現することができず、局所地形や個々の建物の影響を考慮した拡散予測はできない。したがって、世界版 SPEEDI では、局所域スケールでの建物影響を受けた拡散状況を詳細に把握することはできないという問題があった。

原子力機構では、近年、乱流挙動予測に優れた計算流体力学(Computational Fluid Dynamics)モデルを用いて局所域スケールの大気拡散現象を詳細に評価できる数値モデルの開発を行っている。CFD モデルは、主に乱流場の時間平均構造の数値予測を目的とした Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)モデルと、乱流の非定常現象の数値予測を目的とした Large-Eddy Simulation(LES)モデルがある。RANS モデルは、計算負荷が小さく実用的といった利点があるものの、時間平均の概念に基づいた乱流モデルであるため、局所地形や建物周辺に形成される複雑乱流挙動の予測精度は十分ではない。一方で、LES モデルは、衝突・剥離・循環といった複雑乱流挙動を的確に捉えることができ、極めてポテンシャルの高いモデルである。申請者は、局所域拡散状況を厳密に再現する目的で、LES 流体計算モデルを基本とする局所域高分解能大気拡散モデルの開発を行っている。これまで、平地上、丘陵地上、単独建物、建物配列群、および、実在都市市街地を対象にした LES 拡散計算を行い、室内実験との比較検証によりモデルの妥当性を実証してきた。しかしながら、LES モデルは膨大な計算格子数が要求されるために計算時間が1週間以上もかかることもあり、迅速な計算結果の提供が要求される原子力緊急時には使えないという致命的な問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、LES モデルを用いることで局所地形・建物の影響を受ける複雑乱流場の中でも正確に大気拡散計算ができ、かつ、詳細データの提供が迅速に行える原子力緊急時のための大気拡散予測手法の開発を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

これまでの研究経過を踏まえ、予測精度は高いものの計算負荷が非常に高い LES を基本とする局所域高分解能大気拡散モデルを、正確かつ短時間で計算結果のデータ提供が要求される原子力緊急時に適用可能な詳細大気拡散予測手法を確立することにある。このため、以下の研究テーマを掲げ、ステップバイステップに進めていった。

(1) 各種気象条件を考慮した大気乱流場再現手法の高度化

これまで風工学・境界層気象の分野で開発されてきた大気乱流再現手法では、十分に発達した大気の状態を作り出すために、流れ方向に長い計算空間を設けていた。この手法は、長い吹走距離により物理的に妥当な大気乱流構造を再現することはできるものの、計算負荷が大きく実用的ではないという課題があった。そのため、既存の乱流生成技術を改良することで、短い吹走距離でも効率よくターゲットとする気象状況を作り出せる手法を提案した。

(2) 風向出現頻度に応じた重合平均による大気拡散予測手法の開発

(1)で開発された大気乱流場再現手法を用いて、代表的な風速・温度分布データを入力条件として与えた仮想気象条件下での原子力施設から点源放出されたプルームの大気拡散計算を風向 10° 毎に行い、濃度分布をデータベース化した。次に、観測データを入力条件として与えた実気象条件下での大気拡散計算を行い、仮想気象条件下でデータベース化された濃度分布を風向変動の出現頻度に応じて重ね合わせて評価された濃度分布と比較検証した。

(3) 実在する原子力発電所を対象にした局所域大気拡散計算とそのデータベース化による即時対応可能な詳細大気拡散予測手法の開発

(2)で開発した予測手法を用いて、実在する原子力発電所を対象に各種気象条件下において点源放出されたプルームの大気拡散計算を行い、それぞれのケースの濃度分布をデータベース化した。原子力緊急時における気象状況(風向変動の出現頻度)に応じて濃度分布を重ね合わせることで、迅速に大気拡散予測が行える手法を確立した。

4. 研究成果

最初に、短い吹走距離で任意の気象状況の再現を可能にする大気乱流の生成手法を開発した。中立条件での風速分布は一般に 1/7 べき指数の分布により近似できるため、流入境界にべき指数分布の平均風速分布を簡易に与えることができる。しかしながら、熱的效果を伴う場合、安定度によってそのべき指数は変わるため、前もって平均風速分布を規定するのは困難である。そのため、本研究では、変動成分に加え、平均成分をもリサイクリングさせることにした。本手法の概念を図 1 に示す。方程式は以下の通りである。

$$u_{inlt}(z,t) = U_{recy}(z,t) + \phi \{u_{recy}(z,t) - [u](z)\} \omega(z) \quad (1)$$

$$v_{inlt}(z,t) = \phi \{v_{recy}(z,t) - [v](z)\} \omega(z) \quad (2)$$

$$w_{inlt}(z,t) = \phi \{w_{recy}(z,t) - [w](z)\} \omega(z) \quad (3)$$

ここで、 U_{recy} 、 u_{recy} 、 $[u]$ は、リサイクル地点での平均風速および瞬間風速、流入境界からリサイクル地点までの時空間平均風速をそれぞれ表す。なお、 ω は境界層の発達を抑制するための減衰関数、 ϕ は調整係数を意味する。

温度場に対しても、recycling 手法を用いた。

$$\theta_{inlt}(z,t) = \bar{\theta}_{recy}(z,t) + \{\theta_{recy}(z,t) - [\theta](z)\} \omega(z) \quad (4)$$

$\bar{\theta}_{recy}$ 、 θ_{recy} 、 $[\theta]$ は、それぞれリサイクル地点での平均温度および瞬間温度、流入境界からリサイクル地点までの時空間平均温度をそれぞれ表す。ただし、計算初期条件として、弱安定条件に対してはべき指数 1/5、弱不安定条件に対してはべき指数 1/7 の風速分布を与え、温度場に対しては、ターゲットに近い温度分布を与えた。

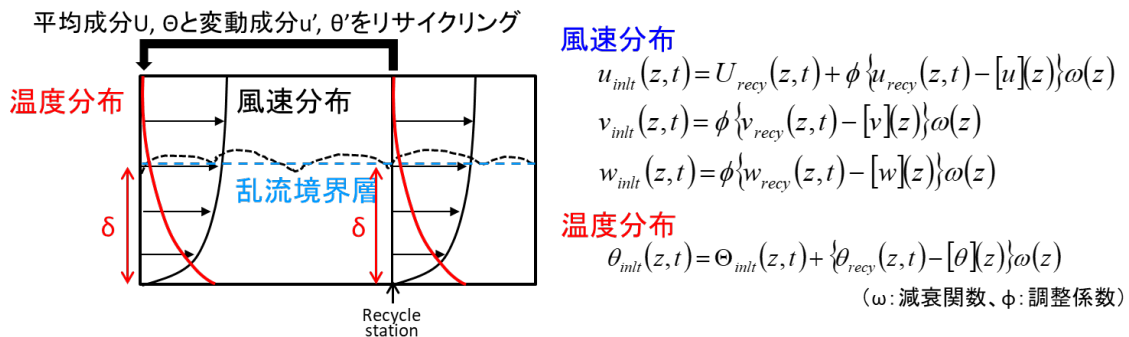
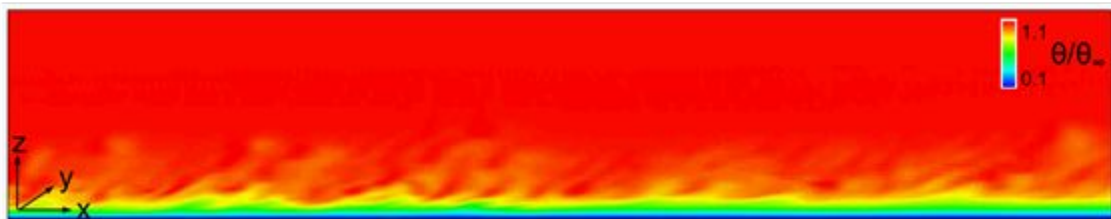


図 1 温度成層大気乱流の作成方法の概念

(a) 安定成層条件



(b) 逆転層を伴う不安定性条件

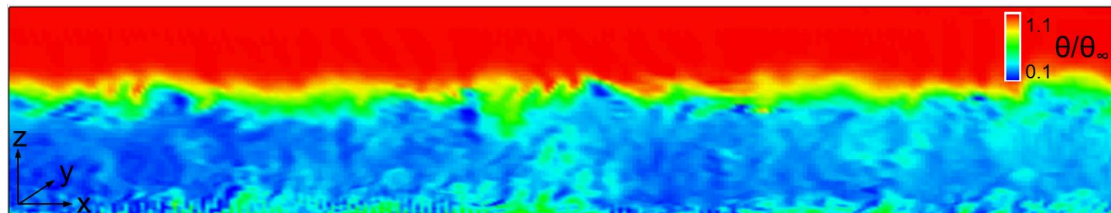


図 2 瞬間温度場

図 2 は、(a) 安定成層における瞬間温度場、(b) 逆転層を伴う不安定成層における瞬間温度場を示している。安定成層時では、境界層下部において若干、波状運動が見えるのが分かる。不安定成層時では、混合層内では所々にサーマルプルームが発生し、逆転層高さ付近ではサーマルプルームの衝突や貫入などの影響により、激しく空間的に変動している様子もうかがえる。

この計算手法を用いて、実在する原子力施設を対象に仮想気象条件下での大気拡散の事前計算を行って平均濃度分布を各平均風向でデータベース化した。さらに、気象データを入力条件として与え、平均風向が変化する実気象状況下での大気拡散の計算を行った。図3は、(A)平均風向が大きく変化する場合、(B)平均風向がやや変化する場合、(C)平均風向がほぼ一定の場合における原子力施設屋根面より放出されたブルーム濃度分布を表している。平均風向が大きく変化する場合、濃度分布は煙源から離れるにしたがい急速に拡がっていく様子が分かる。平均風向がやや変化する場合も、煙源から離れるにしたがい大きくなる様子が分かる。平均風向がほぼ一定の場合、濃度の拡がり幅は徐々に大きくなるものの、平均風向が変化する気象条件時に比べると拡がり幅は小さい。

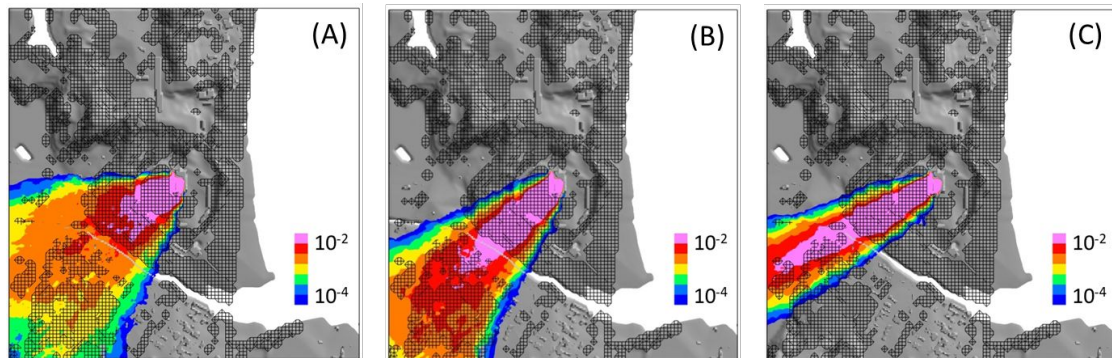


図3 各気象条件において原子力施設から放出されたトレーサガスの平均濃度分布
(単位放出量計算による仮想計算であるため、実際の汚染状況を示すものではない。)

次に、平均風向の出現頻度に応じてデータベース化された濃度分布を重ね合わせて両者の濃度分布の対応性を調べた。濃度分布の重ね合わせにおいては、以下の(5)式を用いた。

$$C = \int F(\varphi)c(\varphi)d\varphi \quad (5)$$

ここで、 C は1時間平均濃度、 F は平均風向の出現頻度、 c は平均風向に対する3分間平均濃度を表す。図4のA-10°、A-20°、A-30°は、(A)平均風向が大きく変化する場合での10°、20°、30°毎に重ね合わせて算出した濃度分布をそれぞれ表している。B-10°、B-20°、B-30°およびC-10°、C-20°、C-30°は、(B)平均風向がやや変化する場合、(C)平均風向がほぼ一定の場合をそれぞれ示している。(A)、(B)の平均風向が変化する条件において、風向間隔10°で濃度分布を重ね合わせた場合、平均風向が変化する気象状況下での濃度分布(図4-A、B)と類似した分布を示しているのが分かる。ただし、風向間隔20°以上になると、もはや重ね合っていない場所が見られ、平均風向が変化する気象状況下での濃度分布と大きく異なる。(C)平均風向がほぼ一定の場合では、一風向のみでの濃度分布の重ね合わせであるため、風向間隔の大きさに寄らず同じ濃度分布を示し、また、仮想気象条件下での濃度分布(図4-C)とかなり類似した濃度分布を示しているのが分かる。

図5は、重ね合わせにより予測された平均濃度の誤差評価を示している。図中の点線は、平均風向が変化する気象状況下での濃度値と重ね合わせによる濃度値の比(FAC2)が0.5および2.0をそれぞれ示している。平均風向がほぼ一定の条件では、FAC2のバラツキは小さく、また、各風向間隔による値の差異もない。平均風向が変化する条件では、低濃度側では非常にバラツキが大きいものの、高濃度ほどFAC2の点線の範囲内に収まっていく様子が分かる。表2は、各気象条件での重ね合わせにより予測された平均濃度の誤差評価を示している。(A)平均風向がほぼ一定の条件では、FAC2は風向間隔幅によらず一定であり、また、0.61程度の値を示している。(B)平均風向がやや変化する条件では、10°間隔での重ね合わせによるFAC2は0.60程度と高いパフォーマンスを示しているが、風向間隔が大きくなるにしたがい、FAC2の値は急速に小さくなっていくのが分かる。(C)平均風向が急激に変化する条件では、10°間隔での重ね合わせによるFAC2は0.54程度と比較的良好な値を示している。しかしながら、風向間隔が大きくなるとFAC2は小さくなる。

これらの結果から、重ね合わせのための風向間隔を小さくしていくといずれの気象条件下でもFAC2の値は大きくなっていくが、風向間隔10°ではFAC2の0.6程度を示しており、頭打ちの傾向もみられる。これは、風向間隔10°以下で濃度分布を重ね合わせれば、良好に予測できると言える。以上により、重合法を用いた局所域大気拡散計算手法は即時対応が可能であると結論付けられる。

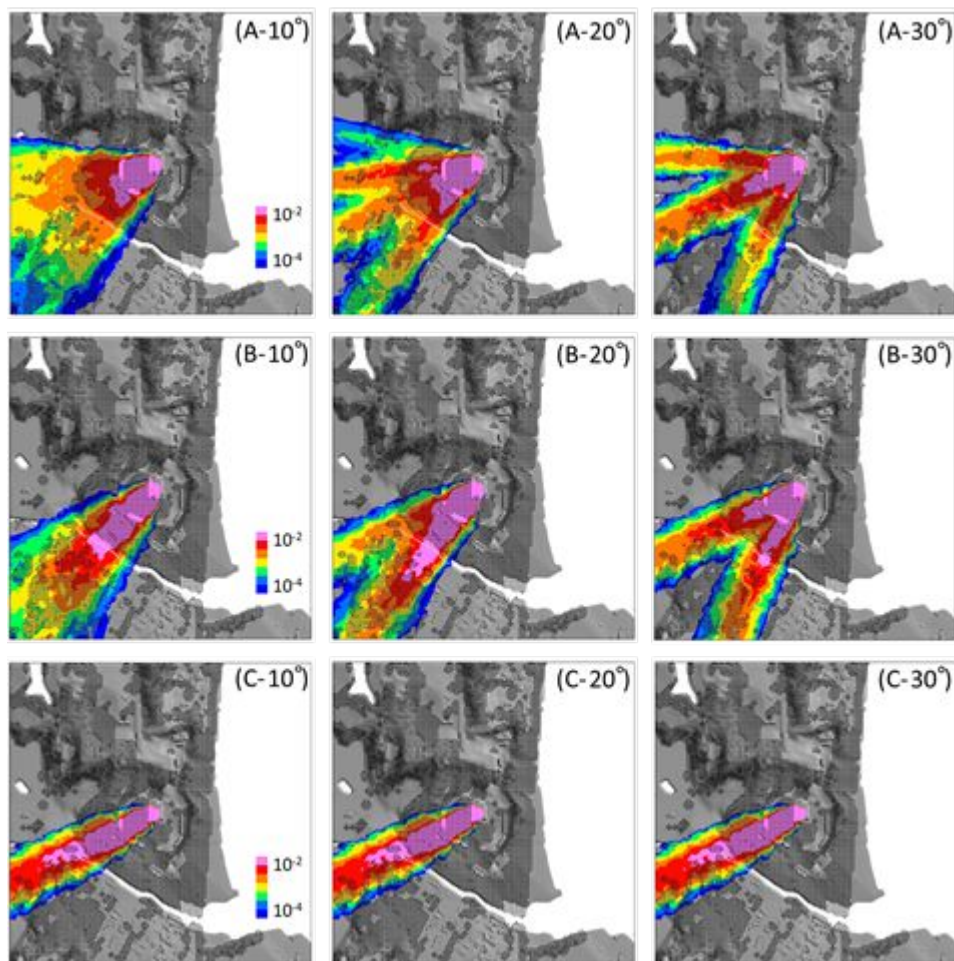


図4 平均風向出現頻度に応じて重ね合わせたトレーサガスの平均濃度分布
(単位放出量計算による仮想計算であるため、実際の汚染状況を示すものではない。)

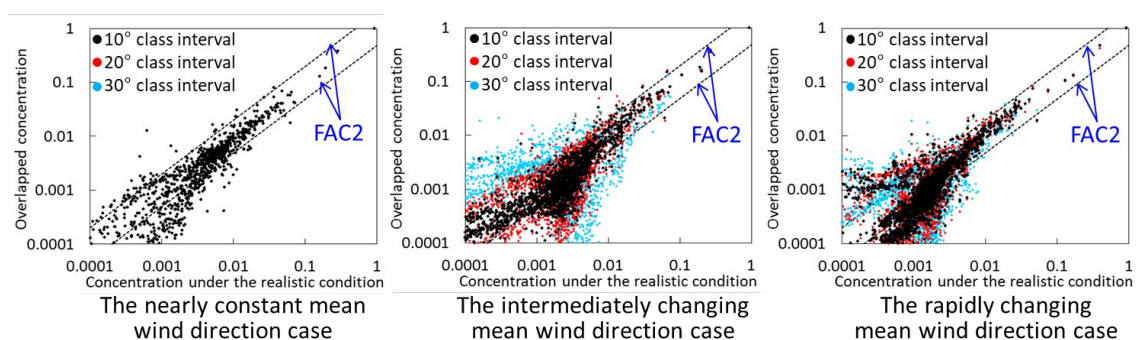


図5 重ね合わせにより予測された平均濃度の誤差評価

表2 重ね合わせによる拡散予測手法の性能評価

Case	FAC2		
	10° class interval	20° class interval	30° class interval
(A) Rapidly changing mean wind directions	0.54	0.51	0.38
(B) Intermediately changing mean wind directions	0.60	0.48	0.20
(C) Nearly constant mean wind directions	0.61	0.61	0.61

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

Nakayama, H. and T. Takemi: Large-eddy simulation studies for predicting plume concentrations around nuclear facilities using an overlapping technique、 Int. J. Environment and Pollution、 Vol. 64、 Nos. 1/3、 査読有、 2018、
DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEP.2018.099153>

Nakayama, H. and T. Takemi: LES studies for predicting plume concentrations around nuclear facilities using an overlapping technique、 Proceedings of 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes、 9-12 October 2017、 Bologna、 Italy ; 843-847、 査読無、 2017、
https://www.harmo.org/Conferences/Proceedings/_Bologna/publishedSections/H18-139-Nakayama.pdf

[学会発表] (計 4 件)

Nakayama, H. and T. Takemi: LES analysis of the effect of source height on the longitudinal distribution of plume concentration in the convective boundary layer capped by a temperature inversion、 The 5th International Workshop on Nonhydrostatic Models、 2018.

Nakayama, H. and G. Katata: High-resolution numerical simulation of turbulent flows and dry deposition in mountainous forest、 2017 Symposium on Atmospheric Chemistry and Physics at Mountain Sites、 2017.

Nakayama, H. and T. Takemi: Large-eddy simulation studies for predicting plume concentrations around nuclear facilities using an overlapping technique、 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory、 2017.

中山 浩成、 竹見 哲也: リサイクル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、 2016.

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 竹見 哲也

ローマ字氏名 : Takemi Tetsuya

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。