

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03967

研究課題名(和文) 突風・豪雨などの極端現象に関わる乱流の実態・メカニズムとその役割の解明

研究課題名(英文) Turbulence accompanied by wind gusts and heavy precipitation in severe weather phenomena

研究代表者

伊藤 純至 (Ito, Junshi)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00726193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：様々な極端気象のラージ・エディ・シミュレーション(LES)の実施および解析を遂行した。

1)線状降水帯(バックビルディング型豪雨)の理想化実験を論文発表し、この実験設定を利用し多様なサウンディングの感度実験を実施した。2)2019年台風17号に伴い延岡付近に発生した竜巻のシミュレーション結果の解析を実施した。3)発生期から急発達・成熟まで発達全期間の台風全域LESを実施し、スーパー台風級まで発達した台風の計算結果を得た。風洞実験や露場観測のデータをもとにLESに適した接地層フラックスの新たなパラメタリゼーションが開発された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極端気象に伴う乱流は水平非一様、かつ自由大気中も活発であり、通常時の乱流とは異なる。極端現象時の気流構造や温度構造を3次的に把握できるLESとよばれる高解像度・大規模シミュレーションにより、線状降水帯・台風・竜巻などの極端気象を捉えた。この計算結果を活用し、乱流のメカニズムなどの実態・役割の解明や、適切なパラメタライズ手法を探った。観測や実験データを用い、このようなシミュレーションの検証や高精度化も行った。

研究成果の概要(英文)：We performed and analyzed Large Eddy Simulations (LES) of a variety of extreme weather events.

1) We presented idealized experiments of heavy rainfall by quasi-stationary quasi-linear convective system (back-building system) and conducted sensitivity experiments for various soundings using this setup. 2) We analyzed simulation results of tornadoes that occurred near Nobeoka in the Typhoon 1917. 3) We conducted LES for the entire tropical cyclone from onset to rapid development and matured stage. Based on wind tunnel experiments and field observations, a new parameterization of surface layer fluxes suitable for the LES has been developed.

研究分野：気象学

キーワード：極端気象 LES 気象モデル 線状降水帯 台風 竜巻 接地境界層 乱流

1. 研究開始当初の背景

天気予報などに利用される数値気象モデルでは、興味の対象である気象擾乱は流体力学に基づく運動方程式を解いて予測する一方、計算格子以下のスケールの運動を「乱流」とみなし、独立した鉛直1次元の過程として取り扱う。すなわち、細かいスケールの乱流についてはアンサンブル平均した統計量のみを予測する乱流のパラメタリゼーションが利用される。理論的な考察や、観測・数値シミュレーションから得られた経験則に基づき、「通常時」の乱流のパラメタリゼーションの開発と高度化が行われている。

台風による局地的な突風や、集中豪雨など、災害につながるような極端現象は複数の積乱雲が活発に発生・発達するシステムに伴い生ずる。そのシステムの水平スケールは、総観規模の気象擾乱より1~2桁小さいメソスケール、(数km~数10km)である。高解像度の数値気象モデルが普及し、今日ではそのようなシステム自体は解像されるようになった。しかし、解像される現象と、典型的には1km程度の乱流の空間スケールが近接するために、乱流は独立したプロセスとはみなせなくなってしまう。つまり、非定常かつ不均一の乱流運動がシステムの発達・維持に影響する一方、乱流の特性も「通常時」と異なり、水平非一様であり、積乱雲に伴い大気境界層より上空にも活発な乱流が生じる(図1右)。このような「通常時」とは全く異なる極端現象時の乱流の実態について十分に理解されていなかった。

極端気象の現実事例を、高い水平解像度(1km程度)をもって再現した場合、乱流パラメタリゼーションの選択が特に再現性に大きく影響する。より原始的なパラメタリゼーションが優れている報告もある。その原因の究明や、究極的には極端現象時の状況においても適切な乱流のパラメタリゼーションの実用化のために、まずは極端現象に伴う乱流の実態とより大スケールのシステムへ果たす役割を正しく把握する必要があった。

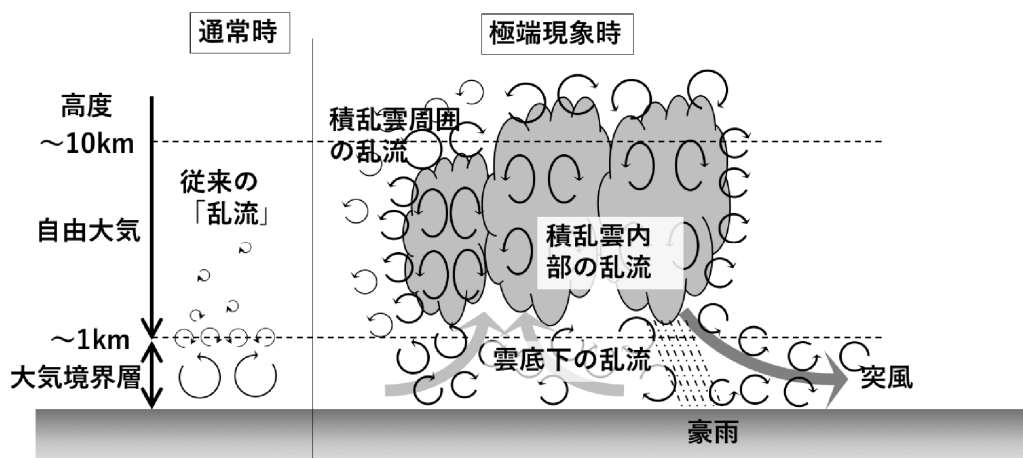


図1 通常時と極端現象時の乱流の比較

2. 研究の目的

「通常時」の乱流に関しては、様々なパラメタライズ手法が検討されているが、水平非一様かつ自由大気中も活発な極端現象時の乱流(図1右)を想定した研究はない。極端現象の高解像度の結果を活用して、乱流のメカニズムなどの実態とその役割の解明や、適切なパラメタライズ手法を探ることが、本研究の目的である。

乱流に関する情報が高時空間解像度で得られているシミュレーション結果の解析により、組織構造や周期性を生じるメカニズムを明らかにする。シミュレーション結果には多数の積乱雲のサンプルが含まれるため、積乱雲内部・雲底下・周囲の乱流に関し、高精度の統計的特性が得られる。高解像度シミュレーションの結果を低解像度にフィルタリングして、より大スケールのシステムにおける乱流による輸送の役割を明らかにするとともに、従来の乱流のパラメタリゼーションによる輸送量の診断と比較し、パラメタリゼーションの改良を提案する。

3. 研究の方法

極端現象時、気流構造や温度構造を3次的に観測することは容易ではない。これらのある程度信頼できる精度をもって把握する上で、現在最も最も有力な手段は、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)を利用することである。LESは格子サイズを比較的、乱流の特性の理解が進

んでいる慣性小領域と呼ばれるスケールにとり、格子スケール以下の乱流をパラメタライズする手法であり、これまでは主に空間スケールが小さい大気境界層の乱流の解明に利用されてきた。

台風全体や線状降水帯の LES の高分解能・高頻度データを利用した解析を行う。これらは単純な環境下での理想化実験であるため、汎く適用できる知見が得られる利点がある。台風全体の LES では、中心を取り囲む壁雲において、微細スケールの複雑な組織構造がみられ、さらに地上付近にも未知の組織構造が見つかった。線状降水帯の LES では、降水系自体が長時間停滞しながら、いわゆるバックビルディング構造により約 10 分周期で積乱雲が発生・発達する、といった特徴がみられている。

さらに、上述の LES にみられるような微細な空間構造や短時間変動が、観測においても確認されることを示す。本研究の枠組みにおいて、独自の観測は実施しないが、既存の観測のデータセットや定常状態を維持可能な風洞実験も活用する。

4. 研究成果

線状降水帯、竜巻、台風などメソスケールの極端気象の LES を実現し、それらの計算結果をもとにした解析を遂行した。また LES に関連した研究開発を実施した。以下に代表的な成果を示す。

線状降水帯の LES により、理想的なバックビルディング型のメソ対流系として永続的に積乱雲が発生する状況を再現した。積乱雲の表現や降雨の解像度依存性（図 2）とともに、環境場の鉛直シアの強度に依存し降雨量が増えることを感度実験により示した。このような成果の査読付き論文に成果発表している[1]。さらにこの線状降水帯の理想化実験のフレームワークは幅広い応用につながった。積雲対流に伴う輸送のパラメタリゼーションの開発や、線状降水帯事例のメカニズムの調査に利用した研究を行っている。

台風全域の LES について、新たな大規模計算を実施し、解析を開始した。スーパーコンピュータ「富岳」を活用し、初期渦から 100 時間超の計算を行っている。記録的な急発達をした 2019 年台風 19 号の環境場を再解析 JRA-55 から抽出し、初期渦から水平解像度 $dx=100\text{m}$ で長時間の時間積分を行った。解像度がより粗い $dx=2\text{km}$ の計算より急発達開始のタイミングは遅くなっているものの、スーパー台風級の強度まで発達する計算結果が得られている（図 3）。発達の間は外側レインバンドの生成や壁雲の非対称構造など興味深い構造変化がみられた（図 4）。

2019 年台風 17 号に伴う延岡竜巻のシミュレーション結果の調査を進めた。この計算では、台風的环境場に特徴的なミニスーパーセル構造に伴う竜巻の出現や、竜巻渦の世代交代がみられた。この研究成果は論文投稿中である。

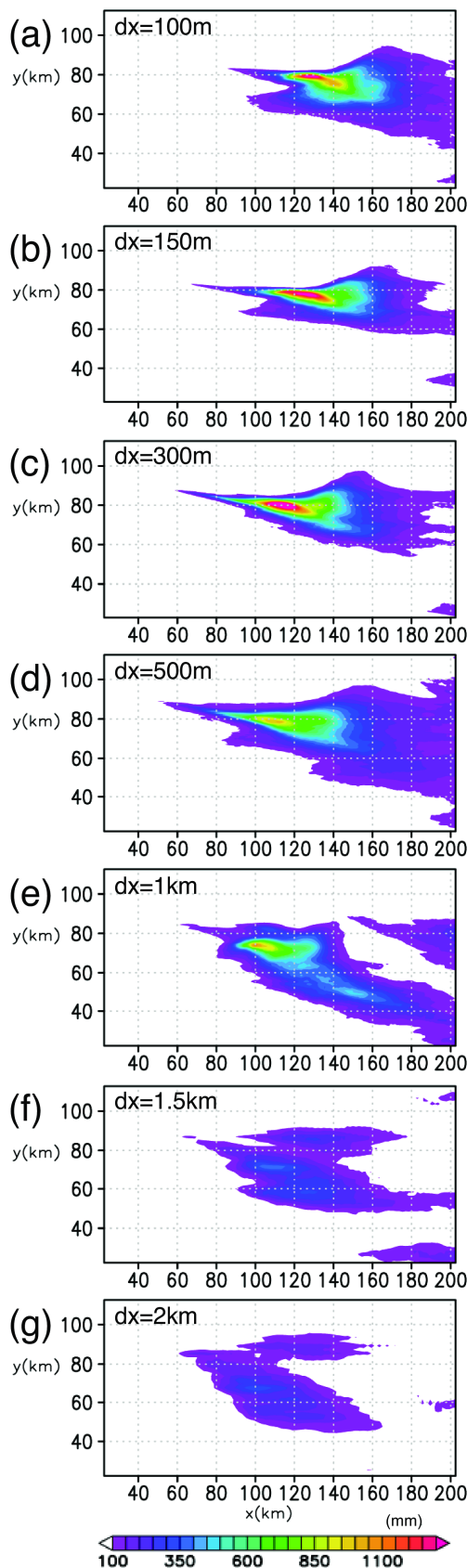


図 2 線状降水帯の LES。水平解像度 dx ごとの 12 時間積算雨量の水平分布[1]

地形とコールドプールの相互作用によって発達した、熱帯のメソ対流系の現実事例の LES を実施した。この結果では、観測と比較した場合、解像度が高い LES がより精度よく大雨を捉えていることが示された[2]。

このような LES にとって、接地境界層のパラメタリゼーションは重要な構成要素である。安定成層時の接地境界層が、Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino モデルで合理的に表現可能であることが示された[3]。定常状態の統計則として接地境界層のパラメタリゼーションは設計されてきたが、LES が解像する短時間変動は考慮されていない。風洞実験の結果をもとに、「attached eddy」と関連すると考えられる短時間成分を表現する手法が提案された[4,5] (図5)。この手法は接地境界層中の異なる高度の観測である露場データにも適用できるように拡張され、開発された手法を LES に実装したテストを行っている。

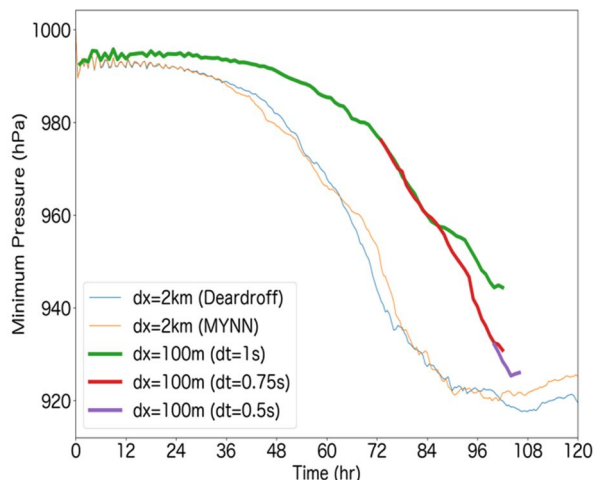


図3 発達全期間を通した台風全域 LES における最低気圧の時系列

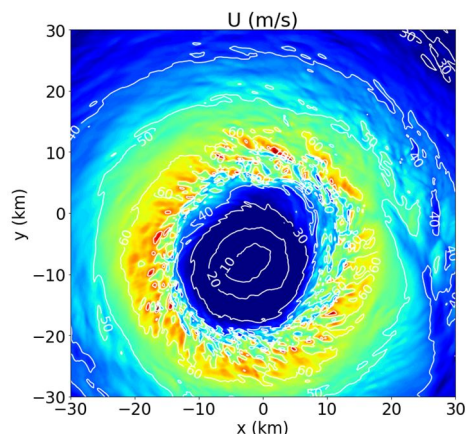


図4 台風全域 LES の計算開始 102 時間後の地上風速

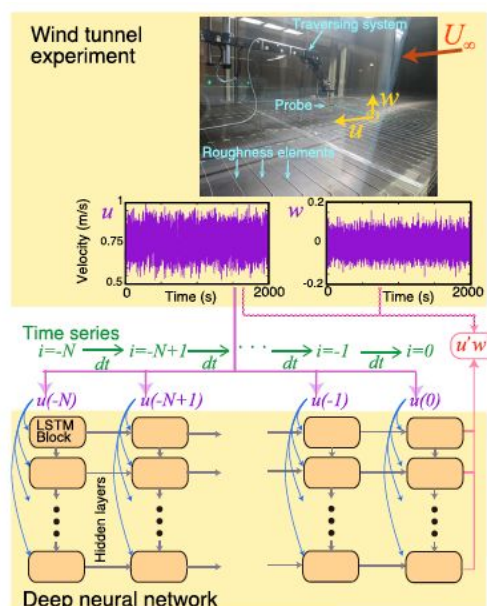


図5 接地境界層の運動量フラックスの深層学習による診断[4]

参考文献

- [1] Ito, J., Tsuguchi, H., Hayashi, S., & Niino, H. (2021). Idealized High-Resolution Simulations of a Back-Building Convective System that Causes Torrential Rain, *J. Atmos. Sci.*, 78, 117-132
- [2] Lagare, C., Yamazaki, T., & Ito, J. (2023). Numerical simulation of a heavy rainfall event over Mindanao, Philippines, on 03 May 2017: mesoscale convective systems under weak large-scale forcing. *Geosci. Lett.*, 10, 23.
- [3] Nakanishi, M., Niino, H., & Anzai, T. (2022). Stability functions in the stable surface layer derived from the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) scheme. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 100, 245-256.
- [4] Ito, J., & Mouri, H. (2021). Estimating instantaneous surface momentum fluxes in boundary layers using a deep neural network. *AIP Advances*, 11, 045021.
- [5] Mouri, H., & Ito, J. (2022). Momentum flux fluctuations in wall turbulence: A formula beyond the law of the wall. *Phys. Fluids*, 34, 035109.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Watanabe Shun ichi I., Niino Hiroshi, Spengler Thomas | 4. 巻 148 |
| 2. 論文標題 Formation of maritime convergence zones within cold air outbreaks due to the shape of the coastline or sea ice edge | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society | 6. 最初と最後の頁 2546 ~ 2562 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/qj.4324 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 NAKANISHI Mikio, NIINO Hiroshi, ANZAI Taro | 4. 巻 100 |
| 2. 論文標題 Stability Functions in the Stable Surface Layer Derived from the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) Scheme | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. | 6. 最初と最後の頁 245 ~ 256 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2022-013 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Mouri Hideaki, Ito Junshi | 4. 巻 34 |
| 2. 論文標題 Momentum flux fluctuations in wall turbulence: A formula beyond the law of the wall | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physics of Fluids | 6. 最初と最後の頁 035109 ~ 035109 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0074889 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ito Junshi, Mouri Hideaki | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Estimating instantaneous surface momentum fluxes in boundary layers using a deep neural network | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 AIP Advances | 6. 最初と最後の頁 45021 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0044624 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Honnert Rachel, Efstathiou Georgios A., Beare Robert J., Ito Junshi, Lock Adrian, Neggers Roel, Plant Robert S., Shin Hyeyum Hailey, Tomassini Lorenzo, Zhou Bowen | 4. 巻 125 |
| 2. 論文標題 The Atmospheric Boundary Layer and the “ Gray Zone ” of Turbulence: A Critical Review | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres | 6. 最初と最後の頁 e2019JD030317 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JD030317 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Ito Junshi, Tsuguchi Hiroshige, Hayashi Syugo, Niino Hiroshi | 4. 巻 78 |
| 2. 論文標題 Idealized High-Resolution Simulations of a Back-Building Convective System that Causes Torrential Rain | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences | 6. 最初と最後の頁 117 ~ 132 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-19-0150.1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Mouri Hideaki, Morinaga Takeshi, Yagi Toshimasa, Mori Kazuyasu | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Logarithmic and nonlogarithmic scaling laws of two-point statistics in wall turbulence | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review E | 6. 最初と最後の頁 53103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.053103 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|------------------|
| 1. 著者名 Lagare Cathrene, Yamazaki Takeshi, Ito Junshi | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Numerical simulation of a heavy rainfall event over Mindanao, Philippines, on 03 May 2017: mesoscale convective systems under weak large-scale forcing | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Geoscience Letters | 6. 最初と最後の頁 23 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40562-023-00277-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Junshi Ito and Ryoichi Yoshimura |
| 2. 発表標題 Large eddy simulation by use of mesoscale weather prediction model |
| 3. 学会等名 JpGU Meeting (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至、毛利英明 |
| 2. 発表標題 瞬時的な地表面フラックス診断を導入したLES |
| 3. 学会等名 非静力学ワークショップに関するワークショップ |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至、伊賀啓太、新野宏 |
| 2. 発表標題 台風全域LESでみられたロール構造の線形安定性解析 |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 台風全域全期間LES |
| 3. 学会等名 都市極端気象シンポジウム・台風研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 線状降水帯の理想化実験 |
| 3. 学会等名 気象学会春季大会シンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 伊藤純至：メソ気象モデルを利用した台風全域ラージ・エディ・シミュレーション |
| 3. 学会等名 「富岳」成果創出加速プログラム交流会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 線状降水帯の理想化実験 |
| 3. 学会等名 先端的ながれ研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 台風全域・発達全期間LES |
| 3. 学会等名 非静力学ワークショップに関するワークショップ |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至、津口裕茂、林修吾、新野宏 |
| 2. 発表標題 線状降水帯の高解像度理想実験 |
| 3. 学会等名 日本気象学会東北支部研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊藤純至、新野宏 |
| 2. 発表標題 2019年台風17号に伴う延岡竜巻のシミュレーション |
| 3. 学会等名 竜巻シンポジウム - 藤田哲也博士生誕100年を記念して - |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 高解像度気象モデルが再現する海上風 |
| 3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊藤純至、新野宏 |
| 2. 発表標題 2019年台風17号に伴う延岡付近に発生した竜巻のシミュレーション |
| 3. 学会等名 地球惑星科学連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Junshi Ito, Hiroshige Tsuguti, Syugo Hayashi, and Hiroshi Niino |
| 2. 発表標題 Idealized numerical experiments for a back-building convective system |
| 3. 学会等名 International Workshop Convection-Permitting Modeling for climate Research Current and Future Challenges (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Junshi Ito, Hiroshige Tsuguti, Syugo Hayashi, and Hiroshi Niino |
| 2. 発表標題 Idealized High Resolution Simulations of a Back-Building Convective System with an Extreme Precipitation |
| 3. 学会等名 AMS 18th Conference on Mesoscale Processes |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊藤純至、林修吾 |
| 2. 発表標題 肱川あらしのアンサンブル予報 |
| 3. 学会等名 2019年度第2回高解像度豪雨予測とアンサンブル同化摂動手法に関する研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 NHM-LETKFの試用 |
| 3. 学会等名 2019年度第1回高解像度豪雨予測とアンサンブル同化摂動手法に関する研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至・新野宏 |
| 2. 発表標題 エクマン層の不安定と台風境界層のロール渦 |
| 3. 学会等名 地球惑星科学連合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊藤純至・毛利英明 |
| 2. 発表標題 瞬時的な風速に適用可能な接地境界層モデルの深層学習による構築 |
| 3. 学会等名 地球惑星科学連合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 伊藤純至 |
| 2. 発表標題 マイクロスケールと気候スケールの研究の連携可能性 |
| 3. 学会等名 気象学会春季大会シンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| http://wind.gp.tohoku.ac.jp/~junshi/ |
|---|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 毛利 英明 (Mouri Hideaki) (10354490) | 気象庁気象研究所・気象予報研究部・室長 (82109) | |
| 研究分担者 | 新野 宏 (Niino Hiroshi) (90272525) | 東京大学・大気海洋研究所・名誉教授 (12601) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|--------------|--|--|--|
| フランス | Meteo France | | | |