

令和 2 年 5 月 1 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14353

研究課題名(和文) 固気混相流における粒子の乱流輸送と地形パターンが示す時空間構造の理論的解明

研究課題名(英文) Theoretical elucidation for spatiotemporal structures of turbulent particle transports and landform patterns in solid-gas multiphase flow

研究代表者

新屋 啓文(Niiya, Hirofumi)

新潟大学・研究推進機構・特任助教

研究者番号：80794982

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)：本研究課題では、複雑な時空間構造を示す飛砂・飛雪現象を解明するため、Large-eddy simulation coupled with Lagrangian snow transport modelと名付けた新たな固体粒子の乱流輸送モデルを構築した。その数値計算の結果、弱風において粒子輸送の発生と停止を繰り返す間欠的輸送が形成され、一方、強風においてスパン方向に粗密を示す連続的輸送が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果である固体粒子の乱流輸送モデルは、粒子運動力学と流体力学で培われた手法を相互に組み合わせており、既存の観測・実験的表式を理論的に裏付けするとともに、これまで計測が困難であった地表面近傍の輸送特性や跳躍・浮遊層に及ぶ輸送構造の変動性を解明する新たな手法となり得る。また、本成果は、砂嵐や吹雪など固気混相流の自然現象の高精度予測、例えば、発生条件やその強度の推定に繋がり、自然災害の防災・減災に資することが期待される。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to investigate the mechanism of blown sand and drifting snow with complex spatio-temporal structures. I developed a new model for turbulent transports of solid particles named as "Large-eddy simulation coupled with Lagrangian snow transport model." Numerical simulations showed the following result. The intermittent transport is formed in the low-wind condition because of the stop-start saltation movement, whereas the continuous transport exhibiting the streak pattern in the streamwise direction is formed in the relatively high-wind condition.

研究分野：非線形動力学

キーワード：固気混相流 飛砂 飛雪 数値モデリング Large-eddy simulation スプラッシュ過程

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 砂嵐や吹雪など粒子の空気輸送は、風による堆積粒子の取り込み、大気中での跳躍・浮遊粒子の運動、跳躍粒子の地表面への衝突（スプラッシュ過程）、粒子との運動量交換に伴う風速の変化、これら4つの物理素過程を介して発達する（図1）。これまで、粒子の空気輸送の時空間構造は砂や雪を用いた風洞実験や野外観測によって計測されてきたが[1]、跳躍層（高さ10 cm以下）における高い粒子数密度のため、地表面近傍の乱流変動やスプラッシュ過程の測定はほぼ不可能であった。一方、理論的取り組みとして、個々の粒子運動を解くラグランジュ的手法と粒子空間密度の変化を解くオイラー的手法が主であり、それぞれ粒子輸送を跳躍層と浮遊層（高さ10 cm以上）に二分して解析が行われてきた[2]。

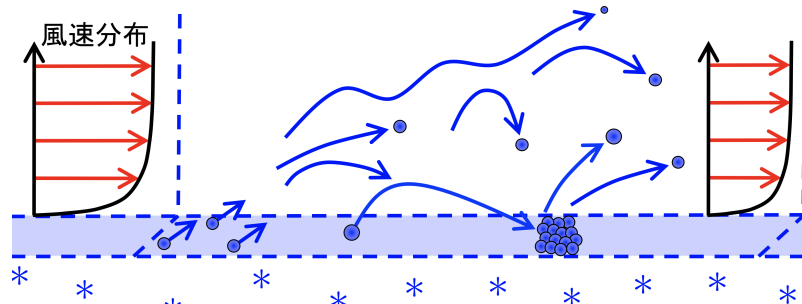


図1 粒子の空気輸送における物理素過程

(2) 粒子の空気輸送は複数の物理素過程の相互作用により形成される複雑な系であるため、既存モデルはいずれも多数の観測・実験的表式やパラメータを採用している。その中でも、跳躍・浮遊粒子に影響するスプラッシュ過程と乱流変動の定式化は、限られた気象条件下の測定に基づいて行われており、空気輸送現象の普遍的法則を見出すには適していない。加えて、平坦な地形上の輸送形態に焦点を当て議論されてきたが、地形変化が輸送形態に及ぼす影響は未だ明らかでない。上記問題点を打開するため、粒子運動力学・流体力学的知見に基づいてスプラッシュ過程と乱流変動を普遍的に記述することが、粒子の空気輸送および地形のパターン形成に潜む普遍的法則を捉える上で重要と認識し、本研究課題の構想に至った。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、固体的要素間の近接相互作用や流体を介した非近接相互作用が引き起こす固体-流体混合系の現象として、砂嵐や吹雪に代表される固体粒子の空気輸送及び、それら輸送の侵食・堆積過程による地表面形状の変化に着目する。そして、本研究の目的は、固気混相流において複雑な時空間構造を示す飛砂・飛雪現象と砂床・雪面上に周期的または典型的な構造を形成する地形現象に対し、物理学に基づく計算手法の導入および数理科学に基づく理論解析手法の適用を行うことで、風による粒子輸送の平衡・非平衡特性と地形のパターン形成を関連付け両者の普遍的法則及び機構を解明することである。

(2) 本研究課題で明らかにする当初の内容は、次の3つであった。

① 砂嵐や吹雪に代表される乱流輸送の時空間構造に関して、粒径や風速に応じた粒子の運動形態（転がり、跳躍、浮遊）の移行メカニズム、乱流変動による粒子の跳躍層から浮遊層への詳細な遷移過程、跳躍・浮遊粒子の有無による乱流構造の変化を明らかにする。

② 風紋や雪紋など微視的地形の周期構造の形成に関して、平坦な地表面形状から起伏に富んだ地形へ達するまでの時空間変動、粒子の運動形態（転がり、跳躍、浮遊）の違いによる地形構造の変化を明らかにする。

③ 地表面形状に応じた輸送形態の変化に関して、地形変化による乱流構造の特性、その乱流変動に伴う粒子運動の変化、さらに、粒子と地表面衝突（スプラッシュ過程）による地形の再形成、これらを関連付けた統一的議論を行う。

3. 研究の方法

(1) 上記目的を達成するため、粒子運動力学に基づく粉体計算手法と数値流体力学に基づく乱流計算手法を連成させた新たな理論模型を構築する。そして、構築した輸送モデルにより、地表面近傍の跳躍層から浮遊層に及ぶまでフルスケールの乱流輸送特性（平衡・非平衡）を明らかにするとともに、乱流輸送に伴う地表面形状の変化と輸送構造の関係性について系統的な議論を行う。

(2) 本研究期間で防災科学技術研究所 新庄雪氷環境実験所にて行われた風洞実験に参加する機会があった。そこで、飛雪粒子の雪面への衝突（スプラッシュ過程）に関する実験を実施するとともに、撮影された画像群から個々の飛雪粒子軌道を解析する

4. 研究成果

(1) 固体粒子の乱流輸送モデルの構築：これまでの飛砂・飛雪現象の数値モデルとして、流体の支配方程式に時間平均を施したレイノルズ平均モデルと変動成分を記述するラグランジアン確率モデル、スプラッシュ過程を考慮した粒子の運動方程式を連成する手法が主であった[3, 4]。しかし、これらのモデルでは、詳細な乱流構造を十分に再現していないため、非定常ダイナミクスの理解に適していない。そこで、ナビエ・ストークス方程式と連続の式に空間平均を施した支配方程式群を解く Large-eddy simulation (LES) によって乱流境界層の流れ場を解析するとともに、スプラッシュ過程において入射粒子の跳ね返り (rebound) と衝突により新たに飛散する粒子 (splash) を区分した粒子軌道計算を組み合わせた (図 2)。本モデルは、従来の定常流モデルから脱却した新たな数値解析手法であり、Large-eddy simulation coupled with Lagrangian snow transport model (LLAST) と名付けられた [5]。

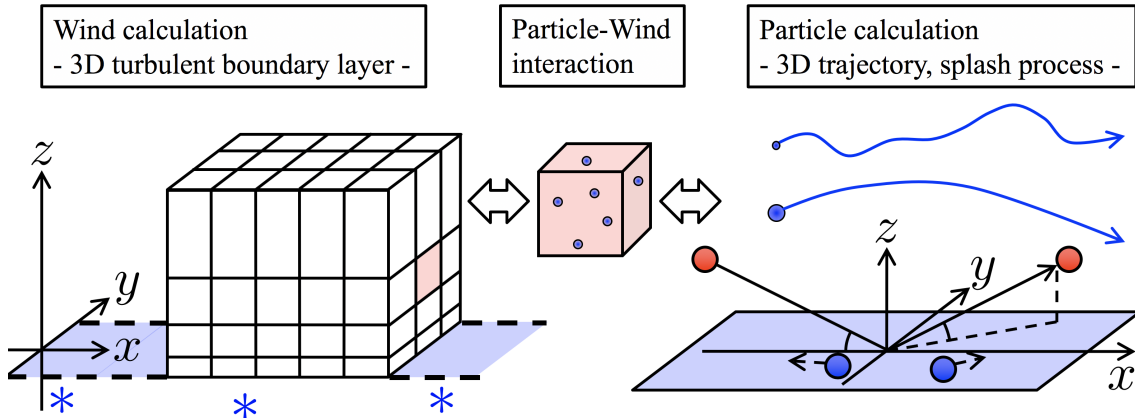


図 2 固体粒子の乱流輸送モデルの概念図

(2) 平坦地形上の粒子輸送形態：固体粒子の乱流輸送の非定常性を解明するため、LLAST モデルの数値計算を異なる風速条件で実施した。具体的には、風速 5, 6, ..., 10 m/s の 6 条件の計算結果から粒子輸送形態の風速依存性について解析した。図 3 は、平衡状態に達した粒子輸送における粒子体積率の水平分布を示している。図中の粒子体積率は、高さ 0-0.5 m に含まれる全粒子を用いて計算されている。風速 5 m/s の弱風条件では、高速流体の下降である sweep によって輸送が局所的に発生するが、その輸送は長時間維持されずに停止した (図 3 の上図)。従って、輸送の発生と停止を繰り返す間欠的な輸送が再現された。一方、風速 10 m/s の強風条件では、輸送は流れ方向に途切れることなく発生しており、スパン方向に粒子体積率の粗密が顕著に見られる筋状構造を示した (図 3 の下図)。つまり、風から粒子への運動量伝達が十分に作用した連続的な輸送が確認された。これらの輸送形態は、風洞や野外で観察される砂嵐・吹雪の輸送形態と類似しており、LLAST モデルが固体粒子の乱流輸送の本質を捉えることに成功したと言える。

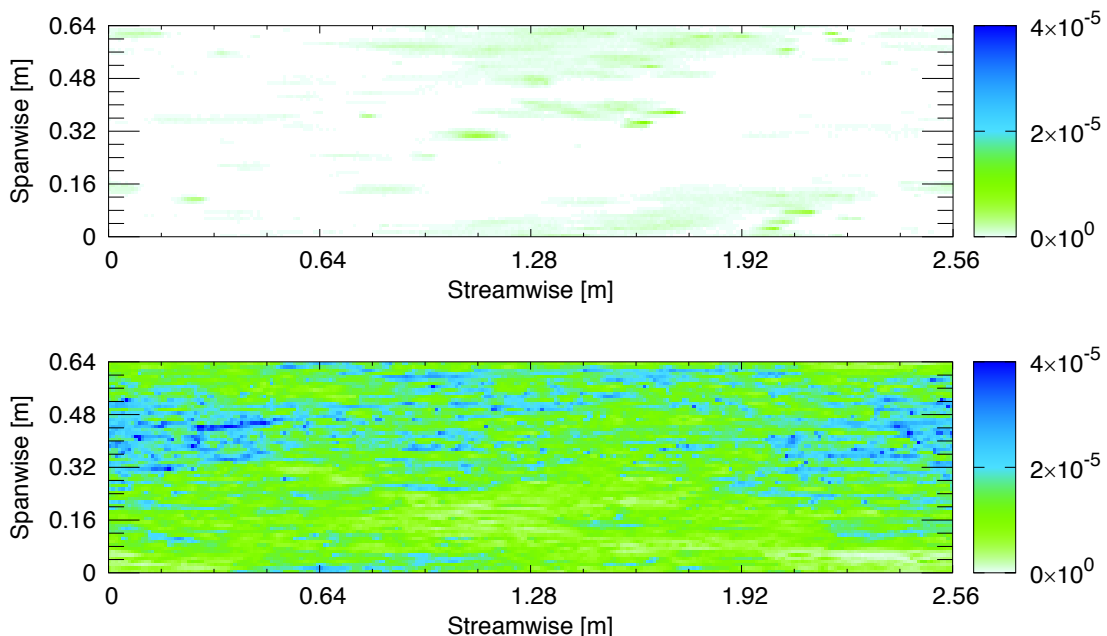


図 3 平衡状態における粒子体積率の水平分布 (上：風速 5 m/s, 下：風速 10 m/s)

(3) スプラッシュ過程に関する風洞実験：LLAST モデルに導入したスプラッシュ過程の実験的表式は、単分散粒子の衝突実験に基づいている[6]。そのため、LLAST モデルは、同一粒径の輸送計算のみに対応しており、自然界に見られる広範な粒度分布に対応していない。また、砂や雪を用いて輸送の卓越する強風下でスプラッシュ過程を捉えた実験に成功した例が無いため、固体粒子の乱流輸送モデルの高精度化の支障となっている。この問題点を克服するため、雪を用いた風洞実験からスプラッシュ過程を新たに精査する試みを行った。実験では、高速度カメラ2台とレーザー光を用いて、飛雪粒子を可視化するとともにスプラッシュ過程の撮影を実施した。フレームレート 1,000 fps、画像解像度 0.3 mm/pix の高時空間分解能で撮影した画像群に対して、ImageJ による動画画像解析から飛雪粒子の粒径と重心座標を自動抽出するアルゴリズムの確立に成功した (図 4)。

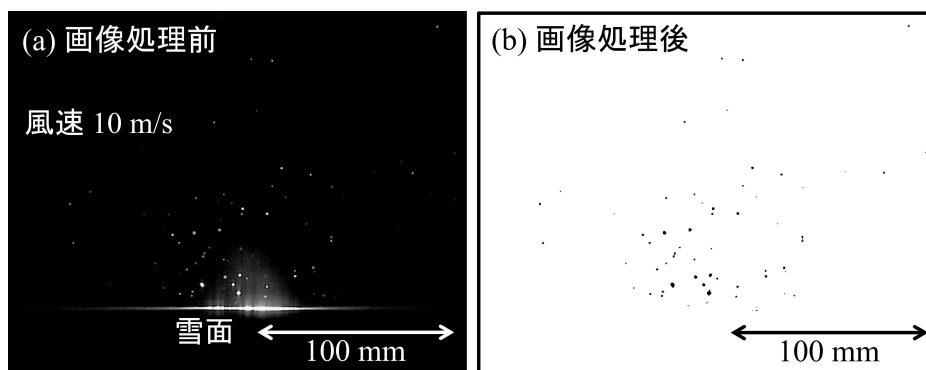


図 4 高速度カメラで撮影された雪面近傍の飛雪粒子

(4) まとめと今後の展望：本研究では、飛砂・飛雪現象と地形形成を関連付けた統一的理解を目標とし、その基盤となる固体粒子の乱流輸送モデルを構築した。その数値計算から、砂嵐や吹雪に見られる風向に伸びた筋状構造の間欠・連続的輸送の再現に成功した。さらに、スプラッシュ過程の精密化するため、雪を用いた風洞実験を実施し、飛雪粒子の衝突過程を個別に解析可能な実験系の構築および画像解析手法の確立に成功した。しかし、本研究期間において、固体粒子の輸送に伴う地形変化を表現可能な数値モデルを構築できなかった。具体的には、埋め込み境界法による固体境界面の更新とそれを流体計算へ動的にフィードバックする方法論の確立に至れなかった。今後、適切な数値解析手法を導入することで、粒子輸送と地形変化を両立した数値解析手法の構築に取り組むことが重要であると考えられる。

<引用文献>

- [1] Nishimura, K. et al., Snow particle speeds in drifting snow, *J. Geophys. Res.*, 119, 2014, 9901.
- [2] Kok, J. F. et al., The physics of wind-blown sand and dust, *Rep. Prog. Phys.*, 75, 2012, 106901.
- [3] Nemoto, M. and Nishimura, K., Numerical simulation of snow saltation and suspension in a turbulent boundary layer, *J. Geophys. Res.*, 109, 2004, D18206.
- [4] Niiya, H. and Nishimura, K., Spatiotemporal Structure of Aeolian Particle Transport on Flat Surface, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 86, 2017, 054402.
- [5] Okaze, T., Niiya, H., and Nishimura, K., Development of a large-eddy simulation coupled with Lagrangian snow transport model, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 183, 2018, 35-43.
- [6] Ammi, M. et al., Three-dimensional analysis of the collision process of a bead on a granular packing, *Phys. Rev. E*, 79, 2009, 021305.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Niiya Hirofumi, Awazu Akinori, Nishimori Hiraku	4. 巻 10
2. 論文標題 Simple Particle Model for Low-Density Granular Flow Interacting with Ambient Fluid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 69 ~ 69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences10020069	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 Okaze Tsubasa, Niiya Hirofumi, Nishimura Kouichi	4. 巻 183
2. 論文標題 Development of a large-eddy simulation coupled with Lagrangian snow transport model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 35 ~ 43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jweia.2018.09.027	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 Tsubasa Okaze, Hirofumi Niiya, and Kouichi Nishimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a large-eddy simulation coupled Lagrangian snow transport model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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25件（うち招待講演 1件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 K. Nishimura, M. Nemoto, T. Okaze, H. Niiya
2. 発表標題 Investigation of the spatio-temporal variability of blowing snow
3. 学会等名 The 27th IUGG General Assembly（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Niiya, T. Okaze, M. Nemoto, K. Nishimura
2. 発表標題 Transition of Snow-Transport Patterns from Intermittency to Continuity
3. 学会等名 The 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新屋啓文
2. 発表標題 スプラッシュ過程に関する風洞実験：高速度カメラによる雪粒子の飛跡
3. 学会等名 雪氷圏変動把握にむけた積雪表面近傍の現象理解に関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新屋啓文, 大風翼, 根本征樹, 西村浩一
2. 発表標題 接地層における粒子輸送形態の変化：間欠性から連続性へ
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増澤諭香, 新屋啓文, 大宮哲, 大風翼
2. 発表標題 2018年冬期の北海道川上郡弟子屈町における吹雪の長期観測
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大風翼, 新屋啓文, 大宮哲, 砂子宗次郎, 西村浩一
2. 発表標題 1つの吹雪イベントを対象とした2次元フェンス周辺の吹きだまり観測
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新屋啓文, 大風翼, 根本征樹, 西村浩一
2. 発表標題 雪粒子の空気輸送モデルによる地吹雪メカニズムの解明 -その5 間欠性から連続性への輸送形態の変化-
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新屋啓文, 大宮哲, 根本征樹, 大風翼
2. 発表標題 低温風洞におけるスプラッシュ過程の測定
3. 学会等名 日本雪氷学会 北信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根本征樹, 西村浩一, 大宮哲, 櫻井俊光, 下山宏, 新屋啓文, 羽賀秀樹, 伊藤陽一
2. 発表標題 高密度集中観測による吹雪の時空間構造の解明
3. 学会等名 雪氷研究大会(2018・札幌)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新屋啓文, 大風翼, 西村浩一
2. 発表標題 雪粒子の空気輸送モデルによる地吹雪メカニズムの解明 -その3 風速増加に伴う輸送形態の変化-
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2018・札幌)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大風翼, 新屋啓文, 大宮哲, 根本征樹
2. 発表標題 雪粒子の空気輸送モデルによる地吹雪メカニズムの解明 -その4 ハイスピードカメラによるスプラッシュ過程の把握-
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2018・札幌)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Niiya, S. Omiya, M. Nemoto, T. Okaze
2. 発表標題 Wind-tunnel experiments on splash process: three-dimensional particle track with high-speed cameras
3. 学会等名 International symposium on snow and avalanche in Niseko (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tanabe, H. Niiya, A. Awazu, H. Nishimori
2. 発表標題 Splash process due to a grain impact on granular bed
3. 学会等名 International symposium on snow and avalanche in Niseko (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Okaze, H. Niiya, K. Nishimura
2. 発表標題 Development of a large-eddy simulation coupled with Lagrangian snow transport model
3. 学会等名 International symposium on snow and avalanche in Niseko (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nemoto, K. Nishimura, S. Omiya, T. Sakurai, K. Shimoyama, H. Niiya, H. Haga, Y. Ito
2. 発表標題 Observation of the spatio-temporal variability of blowing snow
3. 学会等名 International symposium on snow and avalanche in Niseko (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新屋啓文, 大風翼, 西村浩一
2. 発表標題 風速強度に応じた粒子輸送形態の遷移: 間欠性から持続性へ
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubasa Okaze, Hirofumi Niiya, and Kouichi Nishimura
2. 発表標題 Development of a large-eddy simulation coupled Lagrangian snow transport model
3. 学会等名 International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新屋啓文, 大風翼, 西村浩一
2. 発表標題 乱流境界層における固体粒子の非定常輸送
3. 学会等名 日本流体力学会 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大風翼, 新屋啓文, 西村浩一
2. 発表標題 雪粒子の空気輸送モデルによる地吹雪メカニズムの解明 -その2 数値計算による境界層中の非定常な地吹雪の再現-
3. 学会等名 雪氷研究大会(2017・十日町)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新屋啓文, 大風翼, 西村浩一
2. 発表標題 雪粒子の空気輸送モデルによる地吹雪メカニズムの解明 -その1 ラージ・エディ・シミュレーションに基づくラグランジュ型雪粒子輸送モデルの構築-
3. 学会等名 雪氷研究大会(2017・十日町)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新屋啓文, 西村浩一, 大風翼
2. 発表標題 粒子の空気輸送モデルにおける時空間パターンの定量的解析
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田邊章洋, 新屋啓文, 粟津暁紀, 西森拓
2. 発表標題 粒度分布による粉体ブラッシュへの影響
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新屋啓文, 西村浩一, 大風翼
2. 発表標題 乱流境界層における固体粒子の集団輸送モデリング
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大風翼, 新屋啓文, 西村浩一
2. 発表標題 ラージ・エディ・シミュレーションに基づくラグランジュ型飛雪モデルの開発
3. 学会等名 日本風工学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Tanabe, H. Niiya, A. Awazu, H. Nishimori
2. 発表標題 Numerical Study of Splash Detail Due to Grain Impact on Granular Bed
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

新屋啓文のホームページ
<http://hniiya.sakura.ne.jp/>

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
研究協力者	大風 翼 (Okaze Tsubasa) (40709739)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授 (12608)	流体計算手法への技術提供