

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04585

研究課題名(和文) 圧縮するが膨張しない流体力学の創成と高速高濃度ダスト流への応用に関する研究

研究課題名(英文) Formulation of Compressible and Not Expanding Fluid Dynamics and Study on Its Application to High-Speed Dense Dusty Flow

研究代表者

鈴木 宏二郎 (SUZUKI, Kojiro)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：10226508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：ダスト粒子が高濃度に存在する空間を物体が高速で移動すると、粒子は高速衝突により破碎され微粒子化の後、凝集してより高密度のダスト雲を形成する。この不可逆過程をマクロに表現するため、圧縮するが膨張しない流体モデルを構築し、その数値シミュレーション手法を開発した。また、粒子をシート状に落下させ、面内に飛行体を発射することで、上記の現象を観察する実験装置を開発した。物体前方では衝撃波構造が形成され、背面では粒子のない航跡が残るなど、本モデルは実験結果をよく再現した。実験装置は折りたたみ可能な布製耐ダストシールドの開発、数値モデルは天体形成シミュレーションなど、様々な応用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

衝突して粉碎、微粒子化して、さらにそれらが合体、凝集していく高濃度の高速粉体流れをマクロに表現するために圧縮するが膨張しない流体という、通常の流体にはない性質を持つ新しいモデルを構築し、流体力学の適用可能性を広げたことが学術的意義である。小惑星探査機はやぶさ2に代表されるように宇宙探査に対する科学的興味は天体表面の観察に留まらず、その内部構造へと広がりつつある。一方、地上では、火山の噴火などにおいて高濃度ダスト流の現象が安全に直接関わってくる。それらを理解し、身を守るシールド開発などへとつなげていくことが大切である。本研究成果はそれらの要望に応えるための基礎となっている。

研究成果の概要(英文)：When an object moves at a high speed in a space filled with dense dust particles, the fine grains are formed by destructive collision and are aggregated into dusty clouds with higher density. To macroscopically describe such irreversible process, the "Compressible and Not Expanding" fluid model and the computational method to solve its flow were proposed. To observe granular flow around a high-speed object, the experimental technique to launch a projectile on a two-dimensional sheet of free-falling particles was developed. The characteristic features observed in the experiment, that is, the formation of the shock-wave-like structure in front of the body and the void in the wake region, were successfully simulated by the present model. Based on those techniques, various applications, for example, an umbrella-like membrane shield against the impact of dusty clouds, a numerical simulation of the planetary system formation from a disk of grains and so on, are expected.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：航空宇宙工学 粉体流 数値流体力学 圧縮性流体力学 衝突現象 パリスティックレンジ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

小惑星探査機はやぶさ2は、搭載しているインパクトを放出し、小惑星リュウグウ表面に人工クレータを生成することに成功した（2019年4月）。月・惑星・小天体探査において、表面の観察から内部探査へと対象が広がっていく中、粉体の衝突現象に対する理解は重要である。これまで、射出装置を用いた衝突実験や、DEM法などの粒子法による数値解析が行われてきたが、前者ではターゲット内部の非定常流動現象の理解までは至らず、後者では仮想粒子間干渉のモデル化に力点が置かれ、全体を「場」として捉え、理解する視点が欠けていた。高速衝突における粉体の挙動は、マクロには圧縮性流体とのアナロジーで理解することが行われているが、粉体は気体分子とは異なり、粒子のランダムな熱運動がなく、自由膨張が起こらないなど、本質的な差異も存在する。従って、高濃度粉体のマクロな流動を、圧縮性流体力学の流用ではなく、「圧縮するが膨張はしない流体」として、力学モデルを構築し直す必要がある。

一方、2014年に発生した御嶽山の噴火とそれによる被害は、高濃度ダスト流れの流体力学とその破壊力に対する我々の理解不足をあらためて認識させた。火山噴火で見られる高濃度ダスト流れの場合、粒子同士は衝突で破壊されて微粒子化し、やがてそれらは合体し、凝集していく。このような現象をマクロな流体スケールで理解し、モデル化することは、高速高濃度ダスト流から守るシールドを考える際にも必要である。すなわち、「圧縮するが膨張はしない流体」力学を確立し、その数値解析法を開発することは、流体力学の新たな展開のみならず、インパクト開発など宇宙探査工学への貢献、火山の噴火などの災害から人や物を守る防御法への応用、の観点からも意義があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、衝突によって凝集していく高濃度ダスト粒子の流動を「圧縮するが膨張はしない（CNE=Compressible and Not Expanding）流体」とであるとモデル化し、新しい流体力学を創成することを核としている。モデルは、矛盾なく解を求めることができるよう、自己完結的なものとして構築される必要がある。CNE流体モデルの数学的特性を適切に反映しつつ、通常の圧縮性流体数値流体力学（CFD）と同様にシミュレーションができるよう、数値解析法を開発していく。一方、ダスト雲における高速衝突現象を模擬できる装置を開発して実験を行い、実験と数値計算の比較によりCNE流体モデルをチューニングして実用性を高めていく。CNE流体モデルは、高濃度ダスト流れに対するシールド開発のようなエンジニアだけでなく、ダスト円盤から天体系への進化過程のシミュレーションなどのサイエンスにおいても応用が期待される。それらに関してCNE流体を適用し、有用性を示すことも研究目的である。

3. 研究の方法

(1) CNE流体モデルの構築と数値解析法の開発（雑誌論文③、学会発表③、⑧、⑭等）

簡単のため、温度の影響を無視し、流体に発生する圧力（非可逆的圧縮線）は密度の関数として、例えば、式(1)のように2次関数で与えられるものとする。

$$p = c_0^2(\rho - \rho_0) + a_2(\rho - \rho_0)^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ_0 は圧縮前の初期密度、 c_0 はその時の音速となっている。係数 a_2 は正の値であり、密度 ρ とともに圧力 p の上昇率 $\partial p / \partial \rho$ および音速 $c = (\partial p / \partial \rho)^{0.5}$ が増えること、すなわち、圧縮とともにダスト雲が硬くなっていく硬化を表現している。

図1に式(1)によるCNE流体モデルの状態方程式を示す。圧縮過程#1では、密度、圧力ともに初期状態から非可逆的圧縮線上を増加する。点 C_1 で一旦圧縮が終わり、除荷過程#1に入ると可逆的除荷過程 C_1B_1 に乗って、圧力が下がっていく。このとき、圧力の減少は密度減少に対して線形を仮定する。その傾きは式(2)に示すように音速 c_s の自乗である。

$$p = c_s^2(\rho - \rho_B) \quad (2)$$

$c_s \gg c$ に設定しているため、圧力がゼロとなっても（図の点 B_1 ）、密度の低下は小さく、初期の無負荷時より高い密度が保持される。ここでは c_s を定数とし、その値は、粒子が固体物質として持つ音速のオーダーであると考えられる。粒子が集団として示す音速 c はこれより小さな値である。再度、圧縮が発生する（圧縮過程#2）と、密度増大がほとんどないまま圧力が点 C_1 まで回復し、さらに非可逆的圧縮線上を点 C_2 まで進む。点 C_2 で除荷#2が起こると、圧力ゼロの点 B_2 に移動する。再び、圧縮が起こると（圧縮過程#3）、 $B_2 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3$ へと圧縮が進む。除荷過程#3で点 B_3 へと変化し、再度の圧縮があれば、 $B_3 \rightarrow C_3 \rightarrow \dots$ と進む。ここで、 $B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3$ と圧力がゼロのまま密度上昇が実現されている。この不可逆圧縮線と可逆線の組合せで、膨張の起こらない非可逆的圧縮が表現される。このような非可逆的圧縮は、ミクロなイメージでは図1に挿入されたイラストにあるようにレゴリス構成粒子が衝突で破壊、微粒子化され、より密度が高い状態に圧縮されるようになったことに相当する。

CNE流体モデルでは温度の影響は考えておらず、また、系内での熱のやり取りも存在しない。図1のように圧力は密度の関数として表現されるが、非可逆的圧縮と除荷で異なる過程をとるため、密度のみから圧力を一意に決めることはできない。そこで、熱力学の第1法則に従って、単位質量あたりの内部エネルギー e を圧力のした仕事として、式(3)のように定義する。

$$e = \int_{\rho_0}^{\rho} -pd\left(\frac{1}{\rho}\right) = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{p}{\rho^2} d\rho \quad (3)$$

ここで、単位質量あたりの体積は密度の逆数である。CNE 流体に対して内部エネルギーを適切に導入したことによって、その流動がオイラー方程式（非粘性の場合）など、通常の圧縮性流体と同じ形の支配方程式で自己完結的に表現できるようになった。

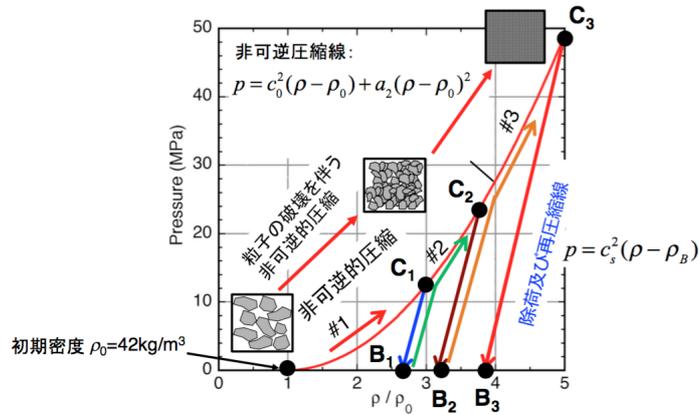


図1 CNE 流体モデルの状態方程式と非可逆的圧縮の概念図

CNE 流体モデルに対する流れのシミュレーションは、通常の圧縮性流体と同様に有限体積法とゴドノフ法、リーマン解法を用いて行う。多次元や、外力（重力）などによるソース項がある場合への拡張は、時間分割法を用いる。リーマン問題の基本解を図2に示す。基本解は、可逆的除荷/圧縮線（式(2)）上に解を持つ先行衝撃波（図の S_e ）、非可逆的圧縮線（式(1)）上に解を持つ衝撃波（ S_i ）、接触面（ C^* ）、真空（ $p=0$ ）との境界となる流体境界面（ C_{vac} ）で構成される。非可逆的衝撃圧縮は、先行波 S_e により状態が図1のC点に達した後、非可逆的圧縮が進む衝撃波 S_i が形成される2段階構成となる。圧縮が弱い場合は、 S_e のみの波となる。また、物体の界面では、真空と接触するため、その前に除荷波 S_e ができて圧力を $p=0$ に解放する。

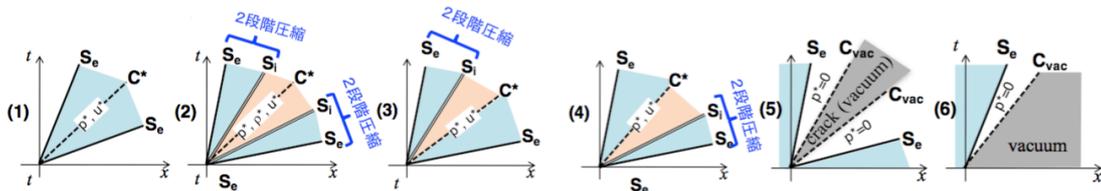


図2 CNE 流体モデルに対するリーマン問題基本解

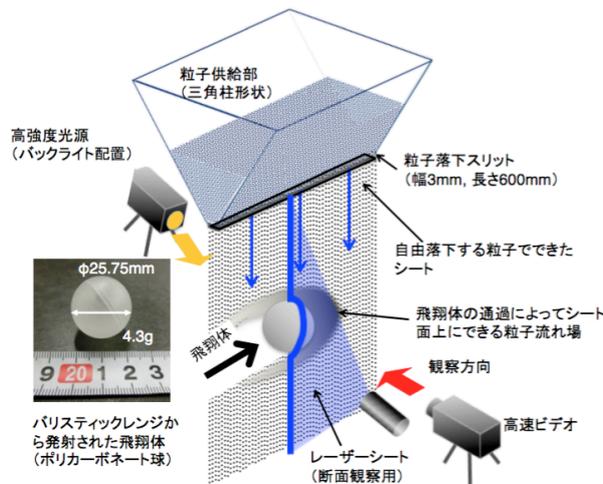


図3 ダスト雲の高速衝突現象を模擬する実験装置の概要（雑誌論文①、学会発表③より作成）

(2) ダスト雲の高速衝突現象を模擬する実験装置の開発（雑誌論文①,②等）

雰囲気圧の影響をできるだけ排除し、ダスト雲における粒子衝突の影響を観察するため、図3に示す実験装置を開発した。飛翔体が突入する粒子カーテンは、測定室内に設置された二次元漏斗状の粒子落下装置により生成される。漏斗の底部には幅 2mm、全長 600mm のスリットがあり、測定室外に設置したスイッチをオンして蓋が開くと、漏斗内の粒子がシート状に落

下していく。ダスト粒子として、研磨用のガラスビーズ（直径 0.2～0.4mm）を用いた。スリットは発射管の中心線と一致するように設置されており、飛翔体は粒子カーテンを切り裂くように進むことになる。本研究で用いた飛翔体は直径 25.75mm の球または円筒形状をしており、質量はポリカーボネート製の場合、約 5g であり、バリスティックレンジにより発射される最大速度は約 500m/s となる。粒子及び飛翔体の挙動は、測定部の観測窓を通して光をバックライトで投入し、高速ビデオカメラ（撮影速度 20,000fps、露光時間 1 μ s）で観察している。飛行方向に対して垂直断面を観察する場合は、図に示すレーザーシートを用いている。本装置により、高濃度ダスト流れの挙動を詳細に観察できるようになった。この方式は、気流に粉体を混合させて供試体に衝突させるダスト風洞方式に比べ、気流の影響を分離し、粒子の衝突のみによる現象を観察することができる点で優れている。さらに、ダスト粒子をあらかじめ炉で加熱しておくことにより、高温のダスト雲における衝突現象を模擬することも可能である。

4. 研究成果

(1) ダスト雲中を高速で飛行する物体周りの粉体流れ場の解明（雑誌論文①、学会発表⑤、⑦等）

図3の実験装置を用いることにより、ダスト雲中を高速で飛行する物体周りの粉体流れ場の特性を明らかにすることができた。ダスト粒子の材質や直径、飛翔体形状や材料などのパラメータを変えて実験が行われたが、ここでは典型的な写真を図4に示す。ポリカーボネート球飛翔体の速度は、バックライト撮影での実験時に約 470m/s、レーザーシート光撮影時に約 400m/s である。バックライト画像から飛翔体前方に衝撃層に似た構造が出来ているのがわかる。その前方では、粒子カーテンに擾乱が見られないことから、圧縮性流体における超音速流中の離脱衝撃波のような現象であると解釈できる。また、散乱光の様子からガラスビーズは飛翔体壁面との衝突によって細かい粉体に破碎されていることがわかる。一方、飛翔体背面側では粒子が疎らにしか観測されず、ちょうど、飛翔体が雪かきのように粒子を押しつけていったと考えられる。衝撃波の後ろで暗い部分が見られるが、これは粒子が存在しないのではなく、破碎された粒子が濃い雲を形成し、バックライト光をカメラ側に届きにくくしているためと思われる。実際、レーザーライトシートでの画像では、同じ部分に強い散乱光が観察されている。さらに、レーザーライトシートの画像で飛翔体側面の表面にレーザー光が当たった様子が観測されている。このことは、飛翔体によって粒子カーテン面外に散乱される粒子は少なく、図3の装置で得られる粉体流れの現象は面内に2次元であることを示している。ここで、気体の影響をできるだけ排除するため、測定室はあらかじめ 35Pa 程度まで減圧されているが、より高い雰囲気圧で実験を行うと、飛行体背面に流れ込む気流が発生し、破碎でできた微粒子はそれに乗って回り込むため、図4の後流部でも微粒子ダストの存在が見られるようになる。

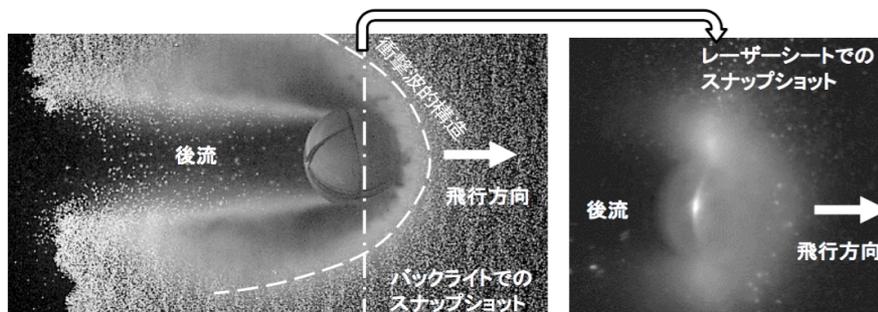


図4 ダスト雲中を進行する飛翔体周り粉体流れ場の可視化写真の例（雑誌論文①より作成）



図5 布材料がダスト雲を通過する際のダメージに関する実験結果の例（左：布面飛翔体（射出前）、右：回収後の布部分の拡大写真）

(2) シールド用布材料に関する基礎実験

布材でダスト流れに対するシールドを作ることができれば、普段は折りたんで収納し、必要な時に展開して使えるため、有用であると考えられる。ここでは、図5左に示すような円筒状の飛翔体の正面に布材を接着と縫い付けによって固定して試験した。布サンプルとして、耐熱高強度のザイロン®を用いた。飛翔体は、クッション材の積層で衝撃を緩和するキャッチャーによって回収された。布材の拡大写真を図5右に示す。図4に示した衝撃層で生成された衝突破壊による微粒子がパウダー状になって繊維の奥まで貫入している様子が見られる。この結果は、

ダスト粒子が直接衝突するだけでなく、粒子同士の衝突粉砕でできた微粒子が繊維の隙間に堆積し、それが布状シールドへのダメージを高めることを示している。布状ダストシールドを開発するには、このことに注意すべきである。

(3) CNE 流体モデルによるダスト衝突実験結果の再現 (学会発表③,④等)

本研究で開発した CNE 流体モデルとその数値計算法が、粒子カーテンと飛翔体の衝突実験を再現できるか検証した。図 6 にその結果を示す。図の上方が数値解析結果、下方が実験画像のスナップショットである。数値解析では、飛翔体を表現するため、飛翔体に固定した座標系を用い、粒子カーテンが飛翔方向とは逆に -426m/s の一様な初期速度を持つとした。飛翔体は円形領域内の流体の流速を 0m/s に固定することで表現している。粒子雲は、 ρ_0 が 42kg/m^3 、 c_0 が 75m/s 、 c_s が 1000m/s の CNE 流体で表現する。式 (1) の a_2 は $1700\text{m}^5/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$ とした。 c_0 と a_2 は実験の画像と定性的に似た結果が得られるようにチューニングして決めている。図では衝突後 0.1ms と 0.2ms での比較が示されている。飛翔体前方の衝撃層の構造と背面の粒子のない後流が CNE 流体モデルで表現できていることがわかる。ここで、硬化を表す式 (1) の非線形項 a_2 の存在が重要な役割を持つことがわかった。 $a_2=0$ の線形の圧縮モデルでは、飛翔体表面で衝突によりダスト粒子の密度が上昇しても音速 c_0 に対する流入マッハ数は約 5.7 で変わらず、超音速状態であり続けるため、その影響が飛翔体前方に遡らない。従って、有限厚さの衝撃層は形成されず、実験で得られたパターンを再現することはできない。

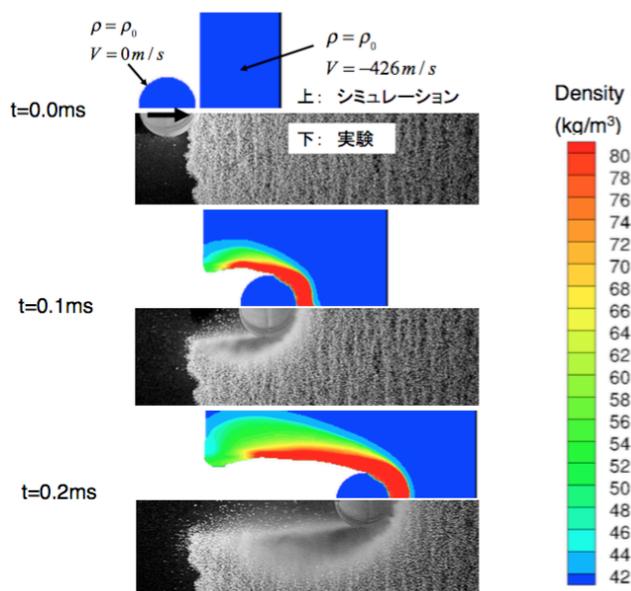


図 6 CNE 流体モデルによる粒子シート実験結果の再現 (学会発表③より作成)

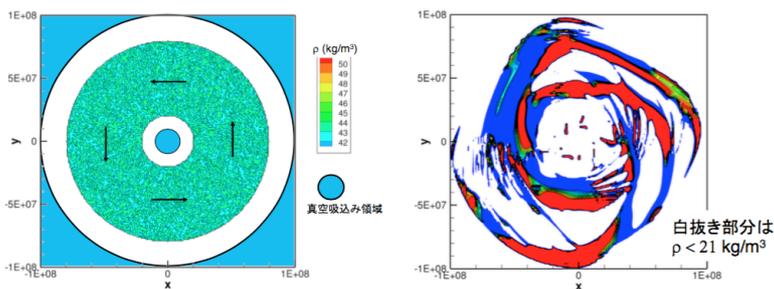


図 7 ダスト円盤進化問題への CNEF モデルの適用計算例 (学会発表①,②より作成)
(左: 初期条件、 右: 進化後の密度分布)

(4) 天体形成シミュレーションへの応用の可能性 (学会発表①,②等)

太陽系やそれを構成する天体は、ダスト円盤の粒子が衝突合体して形成されたと言われているが、そのような状況は、非可逆的の圧縮現象として CNE 流体モデルで表現できると思われる。その可能性を検討するためのトライアルとして 2 次元の回転運動する CNEF 流れの様子を数値解析した。この場合、万有引力の影響がソース項として付加される。図 7 にその計算結果例を示す。ここでは簡単のため、計算空間中央に巨大質点があり、各点における引力は中央質点からの重力のみで近似できるとした。初期条件に揺らぎとして、初期密度に対して $0\sim 5\%$ 、初期速度に $-5\sim +5\%$ のランダムな擾乱を付加した。ランダムな密度揺らぎが、衝突による非可逆的の圧縮により、有限個の高密度領域に分離成長していく様子が見てとれる。図から、この系が最終的には高密度の流体塊群へと成長し、平衡状態に至ることが予想される。この結果は、CNE 流

体モデルが、太陽系や惑星系の形成といった問題のツールとしても適用可能であることを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① Chihiro Masaki, Kojiro Suzuki, Yasumasa Watanabe, Visualization of High-Speed Impact of Projectile in Granular Sheet with Destructive Collision of Particles, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 査読有, Vol. 6, No. 3, 2018, pp. 136-151
DOI: 10.4236/jfcmv.2018.63012
- ② Chihiro Masaki, Yasumasa Watanabe, Kojiro Suzuki, Ballistic Range Experiment of Spherical Body in Particle-laden Environment, Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 16, No. 5, 2018, pp. 420-426
DOI: <https://doi.org/10.2322/tastj.16.420>
- ③ Kojiro Suzuki, Numerical Simulation of High-Speed Impact on Regolith Using Compressible and Non-Expanding Fluid Model, Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 16, No. 3, 2018, pp. 210-217
DOI: <https://doi.org/10.2322/tastj.16.210>

〔学会発表〕(計14件)

- ① 鈴木宏二郎, 非可逆的圧縮性流体モデルによる粉体衝突シミュレーション, 平成30年度航空宇宙空力シンポジウム, 山口県湯田温泉, 2019
- ② 鈴木宏二郎, 非可逆的圧縮性ガスモデルによるレゴリス衝突シミュレーション, 第14回衝突研究会研究集会, 神戸大学, 2018
- ③ Kojiro Suzuki, Granular Flow Induced by High-Speed In-plane Impact on Particle Sheet and Its Fluid Dynamic Description, 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Glasgow, 2018
- ④ 鈴木宏二郎, 圧縮するが膨張しない流体モデルによる粒子群の高速衝突現象の再現について, 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 宮崎, 2018
- ⑤ 鈴木宏二郎, 正木千尋, 渡邊 保真, バリステックレンジを用いた衝突粉体流れ実験と流体力学的なモデル化について, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 幕張メッセ, 2018
- ⑥ 鈴木宏二郎, ダストカーテンを横切る飛翔体まわりの現象に関する実験, 第13回衝突研究会研究集会, 神戸大学, 2017
- ⑦ Chihiro Masaki, Yasumasa Watanabe, Kojiro Suzuki, Visualization of Projectile Flying at High Speed in Dusty Atmosphere, 14th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (FLUCOME 2017), Notre Dame, 2017
- ⑧ Kojiro Suzuki, Application of Riemann Solver for Compressible and Non-Expanding Fluid to Impact on Regolith, 31st International Symposium on Shock Waves (ISSW31), Nagoya, 2017
- ⑨ 正木千尋, 渡邊保真, 鈴木宏二郎, 低雰囲気圧高濃度ダスト雲中を飛行する物体まわりに生じる粉体流れに関する実験的研究, 第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2017
- ⑩ 鈴木宏二郎, 圧縮するが膨張しない流体モデルが作り出す物体周りの流れについて, 第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2017
- ⑪ Kojiro Suzuki, Numerical Simulation of High-Speed Impact on Regolith Using Compressible and Non-Expanding Fluid Model, 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama-Ehime, 2017
- ⑫ 鈴木宏二郎, 濃いダストとレゴリスの高速流動ダイナミクスに関する研究, 平成28年度航空宇宙空力シンポジウム, 鳥羽, 2017
- ⑬ 正木千尋, 渡邊保真, 鈴木宏二郎, 高濃度ダスト雰囲気中を飛行する物体周りの粉体流れ場に関するバリステックレンジ実験, 平成28年度宇宙航行の力学シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 2016
- ⑭ Kojiro Suzuki, Compressible and Non-Expanding Fluid Model for Simulation of Impact Phenomena, 46th AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA AVIATION 2016, Washington, D. C., 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

※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。