

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02339

研究課題名（和文）非可逆圧縮ガスモデルによる数値ペネトレータ学の構築

研究課題名（英文）Development of Computational Penetrator Dynamics Based on Gas Model with Irreversible Compressibility

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） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：ペネトレータは高速で地表の土砂に衝突貫入し、地下の内部構造を知るプローブである。本研究では、ペネトレータ周りの砂の挙動を、非可逆的な圧縮過程と弾性的な除荷-再圧縮過程を組み合わせた状態方程式によりマクロに表現するモデルを開発した。ガラスビーズや珪砂、その混合など砂状物質に対し準静的圧縮試験を行い、本モデルが一般的に適用できることを確認した。流体力学と組み合わせた際の数学的性質を明らかにした上で、砂の流れをシミュレーションする計算手法を開発し、ペネトレータや地表面サンプラーの解析に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した「圧縮するが膨張しない流体モデル」により、圧縮された高密度領域が流動停止後も足跡として維持されるという砂状粉体の非可逆的性質を表現可能としたことは、圧縮性流体力学の可能性を広げた点で意義がある。また、ペネトレータ周りの砂の流動をシミュレーションすることが可能となり、従来、実験に頼っていた衝突プローブ開発を促進する点で宇宙工学上の意義がある。社会的には、ペネトレータを火山など危険地帯の探査に適用するだけでなく、山の崩壊など高速な爆発的現象の理解に本研究で開発した数値解析法を適用することで、生活の安全向上に貢献できると思われる。

研究成果の概要（英文）：The penetrator is an impact probe that penetrates a surface layer made from sand-like granular material and clarifies the interior structure under the ground. In the present study, a gas model to describe the macroscopic behavior of the sand around a penetrator with the equation of state combining the irreversible compression process with the elastic unloading-and-recompression process was proposed. The quasi compression experiment for the granular materials, such as, the glass beads, the silica sand, and their mixture demonstrated that the present model is appropriately applied to general sand-like granular material. After clarifying the mathematical features of the fluid dynamic equations with the present model, the numerical method to simulate granular flow after high-speed impact was developed and was successfully applied to the problems of a penetrator and a surface sampling corer.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 数値流体力学 ペネトレータ 衝突 粉体流 レゴリス 圧縮性流体 月惑星探査

1. 研究開始当初の背景

ペネトレータは高速で地表に衝突し、その運動エネルギーを利用して貫入することで地下の内部構造を観測する槍型のプローブである。観測地点に到着し、そこに止まってボーリングをしていく内部探査と異なり、直接地下内部に到達するため、月・惑星・小天体の探査では探査システムが小型化・簡略化され低コスト化が期待される。地球上では活火山や土砂災害場所など、観測地点への到達が困難な危険箇所でも、空中から落とすことで、地下にプローブが設置できるため、災害の現状把握や減災に有用なツールとしても期待できる。また、1機が小型なため、多数を展開して対象エリア全体を把握するネットワーク型探査を可能とする。ペネトレータは地球惑星科学、宇宙探査工学などの観点から有用性が期待され、1960年代より実機の開発が各国で行なわれているが、未だ実現に至っていない。日本では月ペネトレータ探査計画である LUNAR-A ミッションで機体の開発が行われたが、開発の大幅な遅れにより 2007 年にキャンセルとなっている。一方、2019 年に JAXA のはやぶさ 2 ミッションで実施された小惑星リュウグウへのインパクト衝突実験の成功は、天体内部構造の解明に衝突プローブが強力な道具となることを改めて認識させることになった。

開発が進まない原因は、貫入プロセスの理解を実験的データに頼っていること、実験ではターゲットとなる土砂(レゴリス)の条件管理が難しく不確実性が高いこと、実機サイズの大型貫入実験は準備が困難かつコストが高いため回数が限られること、などが挙げられる。衝突時の表面破壊と破砕物の噴き上げや、クレータの形成は外側からの観察によって理解することができる。また、貫入停止時の位置や姿勢については、実験終了後に機体を掘り出すことによって計測可能である。しかし、その中間の地下貫入過程については、地中を高速度で透視することができない限り、実験的解明は不可能である。

ペネトレータ貫入のダイナミクスは、現象としては惑星科学において盛んに研究されているクレータ形成問題と類似点が多い。しかし、クレータ学では、衝突条件と形成されたクレータ形態という、始まりと終わりの関係に重点が置かれており、非定常な形成過程に対する理解は十分ではない。ペネトレータが地中を貫入していく過程を解明するためには、ちょうど航空機の運動を理解するためにはその周りの空気の流れに対する理解が必須であるように、その周りのレゴリスの「流れ」を理解し、合理的にモデル化することが本質である。空気力学においては、実験と数値流体力学(CFD)の連携に成功しており、実験データとの比較による数値解析結果の信頼性確保や、実機飛行状態など実験的に再現が不可能な状況を数値解析で予測する技術が確立している。そこで、このような状況をペネトレータにおいても構築するためのペネトレータ数値解析法を確立することが必要であると考えた。

2. 研究の目的

ペネトレータは高速で地表の土砂(レゴリス)に衝突貫入し、地下の内部構造を知るプローブであり、月・惑星・小天体や、地球上の到達困難な危険地帯の探査において威力を発揮するものと期待されている。本研究では、砂の非可逆的圧縮を「圧縮するが膨張しない流体モデル」で記述し、粒子法より計算負荷が小さく、実験ベースの経験式にはない汎用性を有する「数値ペネトレータ」を完成させる。研究目的は、(1)圧縮に対する砂のような粉体のマクロな力学的特性を密度と圧力の状態方程式でモデル化し、実験データによりモデルをチューニングしていくこと、(2)ペネトレータ周りのレゴリス流れに適用できる数値流体力学コードを開発し、得られる解の特徴を明らかにすること、(3)実験室実験と実機の世界で起こりうる差異の解明や、ペネトレータ問題への適用など、月惑星探査用衝突プローブ開発での有用性を示すこと、である。

3. 研究の方法

(1) 圧縮するが膨張しない流体モデルの開発

砂浜を踏みしめた足跡が残るように、砂のような粉体は圧縮に対して本質的に非可逆の性質を有する。すなわち、粉体流では圧縮力がなくなっても、ガスのように膨張して初期密度に戻ることが起こらず、高い密度を保ったまま圧力を緩和させることができる。これをミクロに見れば、圧縮により粒子が破壊され、より小さな粒子が作られて空間充填率が上昇し、密度が高くなることであり、粒子の破壊を伴うことから、その非可逆性が説明できる。このことをマクロな流体现象としてみると、密度に対する圧力の変化率の平方根が音速であるから、砂は除荷時の音速が圧縮時の音速に対して高い流体であると解釈できる。すなわち、圧力を受けた時の密度上昇に比べ、除荷で圧力がゼロに下がった際の密度減少が小さいため、結果として圧縮で生成された高密度領域が残ることになる。これが、圧縮するが膨張しない(Compressible and Non-Expanding、以下 CNE)流体モデルの基本的考えである。変化の過程によって密度と圧力の関係が異なるため、通常の圧縮性流体用の数値流体力学手法を用いることはできない。

まず、実際の粉体が上記のような特性を持っているか確認する必要がある。ここでは、油圧プレスを用いた準静的粉体圧縮/除荷実験手法を開発した。図 1 に実験装置の概要を示す。実験に

は油圧プレスと内部が円筒形状をしたプレス型を用いた。ガラスビーズなどの対象となるサンプルをプレス型に入れ、手動ポンプで圧縮していく。圧力はプレス圧から、密度は投入したサンプル質量とプレス型内径、および各時点でのサンプル高さから計算することができる。除荷過程は油圧プレスの油圧リリース弁を開くことで実現できる。本研究では、サンプルとしてガラスビーズと珪砂およびそれらの混合を用いた。これは、工業材料のため性質のばらつきが少なく、特性が安定していると期待されるからである。なお、1回の圧縮では、プレス型内で均一な圧縮状態を得ることができず、設定した圧力まで圧縮したら油圧を抜いてプレス型を開け、内部を十分に攪拌したのち、再度、同じ圧力で圧縮を行う動作を密度の値が収束するまで繰り返すことが必要である。

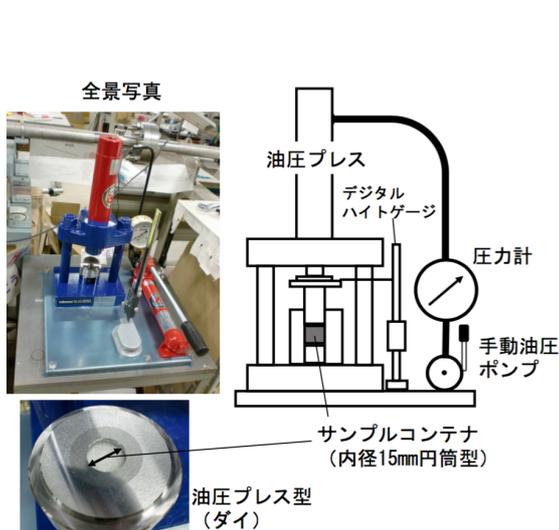


図1 CNE 流体モデル検証用の準静的圧縮実験装置の概要

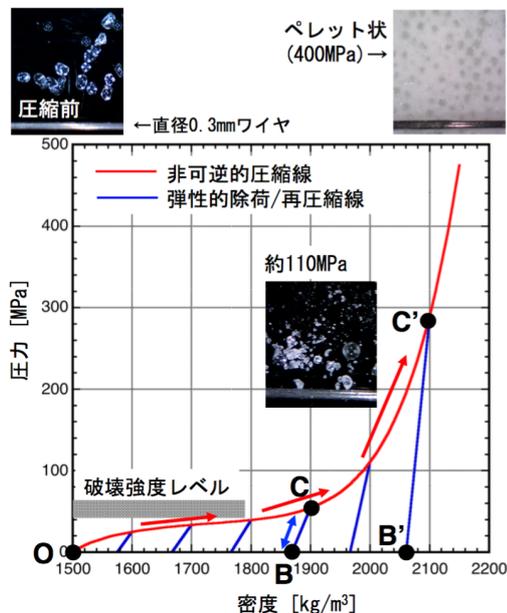


図2 ガラスビーズの圧縮実験結果

(2) CNE 流体モデルを用いた数値流体力学コードの開発と得られる解の特徴

ペネトレータの衝突速度は機体の強度から 300m/s 程度までと考えられ、この程度の運動エネルギーでは温度上昇による砂の融解などは起こらない。すなわち、CNE 流体モデルでは温度は T_{ref} で一定と考える。しかし、その運動を解析するためには内部エネルギー e が必要であり、ここで e は圧力のした仕事として定義される。エントロピー S は e/T_{ref} で定義される。内部エネルギーは弾性的除荷過程を除くと単調に増加する。このことは、CNE 流体がエントロピー極大の状態で流動を停止させることを意味し、熱力学の第2法則とも整合していることを意味している。

CNE 流体の流れの数値解析は、粘性の効果を無視すると通常の圧縮性流体と同様、オイラー方程式で表すことができ、その数値解法は、有限体積法、ゴドノフ法、リーマンソルバーの組み合わせで構築することができる。しかし、CNE 流体では圧縮と除荷で状態方程式が異なるため、新たにリーマンソルバーを開発する必要がある。CNE 流体におけるリーマンソルバーの基本解は、膨張波が発生しない、2段階の衝撃波が発生することがある、など、通常の圧縮性流体にはない特徴を有する。

(3) 月惑星探査用の衝突プローブ問題への適用

通常の圧縮性流体と同様、時間分割法を用いることで1次元のソルバーを多次元問題に拡張することができる。ペネトレータの衝突問題では、機体が砂から力を受けて減速する。そのことを考慮するため、ここでは機体に固定した運動座標系を用いた。衝突体は円筒形状であり、天体表面に垂直に衝突すると考えるとその周りの流れは軸対称となり、支配方程式は、加減速項と軸対称項を右辺に付加した2次元オイラー方程式で表すことができる。固体壁面での境界条件は、壁面の反対側に仮想的な鏡像を置くことで表現することができる。また、計算領域外への一方通行的流出は、境界の先に仮想的な真空セルを置くことで計算することができる。

4. 研究成果

(1) 圧縮するが膨張しない流体モデルの開発

図2に平均直径 0.4mm の研磨用のガラスビーズ（不二ガラスビーズ、粒度 40）を用いて得られた密度と圧力の結果を示す。圧力が 100MPa に達しない圧縮初期の状況では、ガラスビーズがプレス型中で破壊されて発生するパチパチという音が盛んに聞こえ、圧力上昇に対する密度上昇が大きい。これはソーダ石灰ガラスの破壊強度が約 50MPa であることを考えると妥当である。

400MPa 程度まで圧縮すると、ガラスビーズは円筒形状をしたペレットになる。顕微鏡写真を見ると、ペレットは均一に微細化されたガラス粉ではなく、それよりはるかに大きいガラス球とガラス粉が共存していることがわかる (図2 右上参照)。ガラス球の隙間を微粒子が埋めることで高い体積充填率、すなわち高い密度を実現していることがわかった。図の赤い線が実験データから求めた非可逆的圧縮線である。除荷過程では、非可逆的圧縮線上の状態から青線に乗って圧力がゼロとなる。この際の密度減少は小さく、例えば、図の $0 \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow C' \rightarrow B'$ のような圧縮と除荷の繰り返しでは、ほぼ単調な密度上昇が起こることになる。青線の勾配の平方根が各密度における弾性的音速となるが、この値は圧縮が進むにつれ増加し、ソーダ石灰ガラスの固体としての音速である約 5500m/s に近づく。このような結果は硅砂、硅砂とガラスビーズの混合、水分を含んだガラスビーズでも得ることができ、本研究で用いる CNE 流体モデルが、砂のような粉体の圧縮をマクロに表現できるモデルとして一般に適用できることが示された。

(2) CNE 流体モデルを用いた数値流体力学コードの開発と得られる解の特徴

2次元クレータ問題において、通常の圧縮性流体と CNE 流体モデルで結果にどのような差異が生じるか、同じ時間のスナップショットで比較した結果を図3に示す。衝突体はターゲットと同じ粉体とし、衝突速度は 300m/s である。クレータ形状、深さ、縁の高まり (リム) など定性的には同様であるが、通常の圧縮性流体では、最大密度領域が衝突で発生した衝撃波とともに深部に進行していく。また、最大密度の値は衝突からの時間の経過とともに下がっていく。これは、最大密度が常に衝撃波背後で形成され、かつ、衝撃波は伝播とともに広がり、かつ、弱くなるためである。一方、本研究で開発された CNE 流体モデルによる解析では、最大密度は衝突点直下、すなわちクレータの表面近くに保持されており、かつ、最大密度の時間による低下は起こらない。クレータ形成の性質から後者が妥当なものであるということが出来る。

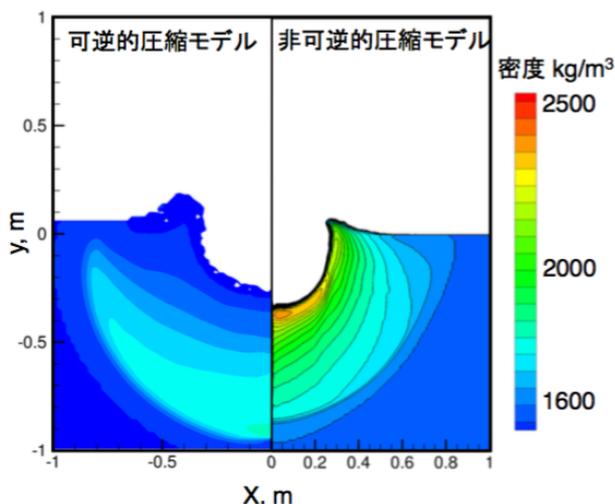


図3 2次元クレータ問題における通常の圧縮性流体モデルと CNE 流体モデルの比較

(3) 月惑星探査用の衝突プローブ問題への適用

実験室実験で衝突実験を行う際、ターゲットとなる砂箱は有限の大きさとなるため、機体の貫入深さや形成されるクレータのサイズなど、容器壁面が存在しない実際の状況と異なることが懸念される。本研究で開発した数値計算コードを用いて図3の2次元クレータ問題に対し、砂箱の大きさを変えて、その影響を検討した。その結果、クレータ直径には顕著な差がなかったものの、浅い砂箱ではクレータ深さも浅くなる傾向が見出された。これは砂箱底面で衝撃波の反射により高圧部ができることが原因であると思われる。このように、本手法は実験室実験と実際の衝突での差異を評価するツールとして有用である。

リムからの噴出物 (イジェクタ) は衝突クレータにおける特徴的な現象の一つである。本研究で開発した垂直型バリスティックレンジを用いて得られた衝突直後の高速ビデオ写真を図4に示す。衝突体はポリカーボネート製円筒型飛翔体 (直径 25.8mm、重さ 3.45g) で、速度は 218m/s、ターゲットはガラスビーズである。衝突直後に円筒殻状に垂直に立ち上がったイジェクタカーテンが時間とともに円錐状に広がっていく様子が見取れる。イジェクタカーテンは飛散したガラス粒子でできた薄い膜状の構造をしているため、マクロな流体としてみた時の粘性力が、その形状に影響するものと予想される。ここでは、粒子同士がこすれ合うことで発生する摩擦をマクロな Navier-Stokes 方程式型の粘性項として表現した解析を行った。図5は衝突速度 100m/s の2次元クレータ問題で非粘性計算と粘性計算での結果を比較したものである。設定条件が異なるため図4と5を比較することはできないが、粘性の有無によってリムとイジェクタカーテン形状が異なることがわかる。逆に、粘性応力項を入れ、粘性係数をチューニングすることにより、シミュレーションの実験再現性を高めることができると言える。

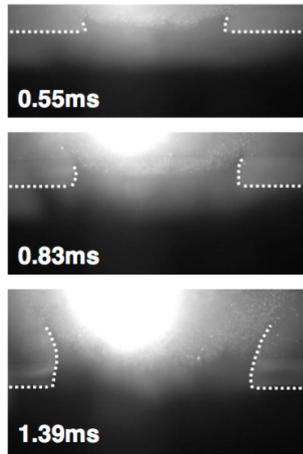


図4 実験で得られたイジェクタカーテン形成過程の高速ビデオ映像

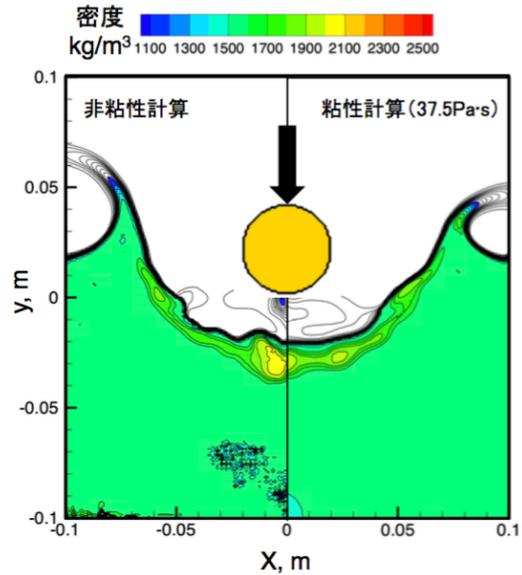


図5 2次元クレータ形成問題における粘性の効果

本研究ではペネトレータに加え、衝突プローブの一種としてサンプリングコアラーの解析を行った。サンプリングコアラーは、正面を開口した薄肉円筒であり、それを天体表面に高速で打ち込み、貫入時に自動的に開口部から内部に取り込まれたサンプルを円筒とともに回収するものである。機構の簡潔さから、適用性と小型軽量性の点で超小型探査ミッションにおけるサンプリングデバイスに適しているものと思われる。図6にサンプリングコアラー周りの砂の流れのシミュレーション結果を示す。機体固定座標系を用いているため、時間の経過とともにターゲットの表面が上昇していく図となっている。衝突直後(0.02ms)では圧縮はエッジ前方のみであり、流れはコアラーの貫入に伴ってほぼまっすぐに進んでいるのに対し、天井への衝突直後(0.12ms)ではコアラー内壁に向かってキャビティ内の流れが大きく曲がっている。結果として、キャビティ天井付近に加え、側面の内壁近傍でも圧縮が起こり、密度が上昇している。この密度上昇が、取り入れた粉体サンプルをペレット化し、サンプル回収を可能としている。このような知見は、実機の開発における問題解決や性能向上に有用である。

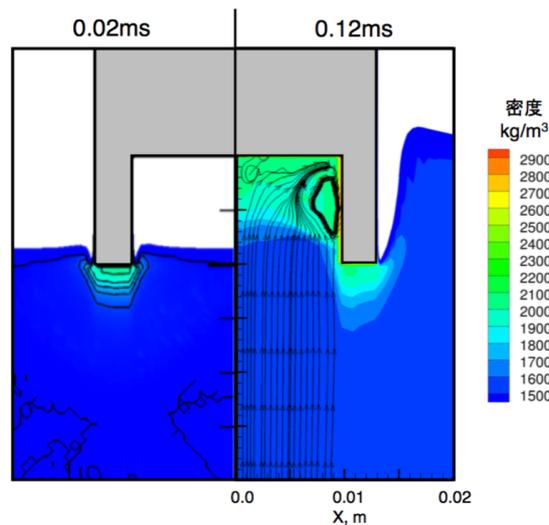


図6 サンプリングコアラー周りの砂の流れのシミュレーション例

以上のように、本研究において開発したCNE流体モデルは、圧縮時の密度を保持する点で本質的に非可逆であり、通常の流体にない特徴を有する。月・惑星探査における衝突プローブ開発という宇宙工学への貢献だけでなく、流体力学の新たな適用可能性を広げるものとしても意義付けることができる。粉体のクラスタ化のマクロな表現モデルなど、新たな展開が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 SUZUKI Kojiro	4. 巻 19
2. 論文標題 Numerical Simulation of Impact and Penetration in Regolith with Fluid Model Considering Irreversible Compression and Hardening	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 726 ~ 734
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.19.726	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 油圧プレスとガラスビーズを用いた圧縮性非膨張性ガスモデルの検証と衝撃波問題への適用
3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 ガラスビーズで模擬した天体表面への貫入に関する塑性ガスモデルを用いた数値解析
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 準静的圧縮実験による砂の塑性ガス状態方程式モデルと衝突現象への応用
3. 学会等名 2021年度衝突研究会研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kojiro Suzuki
2. 発表標題 Numerical Simulation of Regolith Sampling Corer by Irreversible Compression Fluid Model
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 非可逆的圧縮が起こる流体のリーマン問題における波動システムについて
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kojiro Suzuki
2. 発表標題 Numerical Simulation of Sand Flow around an Impactor on Dune Surface by Irreversible Compression Gas Model
3. 学会等名 2nd International Conference on Recent Advances in Fluids & Thermal Sciences (iCRAFT2020 Virtual Conference) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 圧縮性非膨張性塑性ガスモデルによる固体壁面反射を伴う粉体流れ数値解析
3. 学会等名 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2020オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 塑性ガスモデル数値流体力学によるハードランダーやサンプラーのシミュレーション
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会(オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 ガラスビーズを用いた粉体の準静的圧縮試験と衝突シミュレーションへの応用
3. 学会等名 天体衝突物理の解明(XVI)/第12回スペースガード研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kojiro Suzuki
2. 発表標題 Numerical Simulation of Impact and Penetration in Regolith with Fluid Model Considering Irreversible Compression and Hardening
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science, Fukui (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 膜面エアロシェル超小型オービタ・ランダー群による火星ネットワーク探査SPUR計画とその技術開発
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 塑性ガスモデル数値流体力学によるペネトレータ貫入シミュレーション
3. 学会等名 第15回衝突研究会研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木宏二郎
2. 発表標題 塑性ガスモデルによるレゴリス衝突シミュレーション
3. 学会等名 令和元年度航空宇宙空力シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------