

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15213

研究課題名（和文）高機能小天体探査システムのための粉体-高速噴射ガス連成挙動の解明

研究課題名（英文）Study on powder-high-speed injection gas coupled behavior for high-performance small body exploration system

研究代表者

中条 俊大 (Chujo, Toshihiro)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：80808618

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：小天体表面における粉体-高速噴射ガス連成挙動の解明を目指し、DEM-CFD連成解析の構築と、シミュレーションと同等の環境を模擬した、真空中における圧縮ガスによるガラスビーズ吹き上げ実験を行った。DEM-CFD連成解析については、当初提案していた二次元モデルを三次元に拡張し、ある条件下では両者の結果が調和することを確認した。また、噴射実験については、噴射口とガラスビーズ層表面の距離および圧縮ガスの体積をパラメータとして様々に変化させたところ、前者が支配パラメータであることが分かった。さらに、その理解のもと、シミュレーションと合わせ込むために適切な条件を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空中で高速ガスの噴射により粉体が吹き上げられるという現象は非常に複雑な物理現象であり、本研究では数値シミュレーションおよび実験の両面からこの考察に取り組んでいる。特に実験では、真空環境下で高速噴射ガスによりクレーターが形成できること、およびその過程の様子が確認できており、非常に貴重なデータが得られたといえる。本現象の考察は、小天体探査における現象に限らず計算科学の分野にも貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：To understand powder-high-speed injection gas coupled behavior on small bodies, we established a DEM-CFD coupling analysis method, and performed experiments, where compressed gas is injected to the surface of glass beads to make a crater under vacuum environment. For DEM-CFD coupling analysis, we extended the 2-D model which we had developed to the 3-D model, and confirmed that the two models are consistent with each other under certain conditions. For the experiments, we varied two parameters, initial distance between the injection tip and the surface of the glass beads and the volume of the compressed gas, and found that the former one is dominant. We also found conditions suitable for calibration with the simulation.

研究分野：宇宙航行力学

キーワード：航空宇宙工学 小天体探査 計算科学 DEM-CFD 粉体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の小天体着陸探査においては、より自由に動き、より高度な科学成果が得られる探査システムが求められる。探査機の動力源として、また科学分析を目的とした試料採取のために小天体表面で高速噴射ガスを用いることが効果的だが、小天体表面は砂礫で覆われた未知の環境であるため、安全なシステム設計・運用のために粉体-噴射ガス連成挙動の理解が重要となる。

粉体の挙動は、主にDEM (Discrete Element Method) を用いたシミュレーションによって解析されてきており、小天体上での現象にも応用されている粉体-ガス連成挙動については、DEM-CFD (Computational Fluid Dynamics) 連成解析が用いられ、他研究者による既存の手法は、実験検証を伴い洗練されている。しかし小天体上での粉体へのガス噴射は、微小重力環境下での圧縮性、真空、希薄流、連続流を全て含む超音速流れの粉体への吹き付けとなり、非常に複雑な現象であるため解析例はなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小天体上での環境 (真空、微小重力) における、粉体-高速噴射ガス連成挙動を、実験、数值的に解析、包括的に解明することである。具体的には次の通りである。

1. 提案中の二次元モデルを用いたDEM-CFD連成解析手法を三次元に拡張、一般化する。
2. シミュレーションと同環境を模擬した実験を行い、両者を合わせ込み手法の検証を行う。
3. 粉体の吹き上げ軌道やガスの流れの構造を包括的にまとめ、スケール則を構築する。
4. 高機能小天体探査システムのキーパラメータを抽出し、設計・運用指針を考案する。

なお、微小重力環境は実験では再現が難しいがシミュレーションでは容易である。他研究者の既存のシミュレーション手法は、ガスの計算格子のサイズへの制約から、真空にガスを噴射し粉体を吹き上げる複雑現象には適さない。本研究では格子サイズを自由に決められる別の近似手法を提案しており、真空への高速ガス噴射にも対応できる手法として考えている。また、スケール則の構築により、直接実験、シミュレーションを行う対象の枠組みを超え、粉体-高速噴射ガス連成挙動を任意のスケールに対して包括的に理解することを目指す。

3. 研究の方法

本研究は、DEM-CFD連成解析手法の構築、すなわちシミュレーションと、シミュレーションを模擬した実験の2つに大別される。DEM-CFD連成解析に関しては、特に粉体粒子-ガス間の相互作用のモデルによって挙動が大きく変化するため、実験結果をよく模擬できるモデルを見出すことを目指す。本研究では特に、CFDで用いる計算格子とは独立した新たな計算格子 (図1) によってガスの局所体積占有率を計算し、「場」として定義することで、「粉体粒子の存在によってガスが存在できない効果」を模擬しているが、その効果をそれぞれの挙動に反映する方法を複数用意し、それぞれの計算結果の様子を理解する。

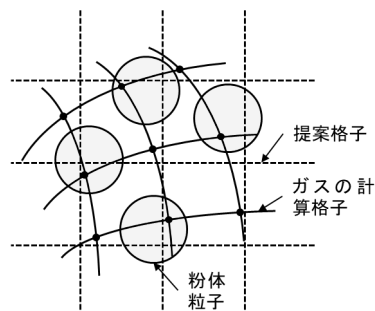


図1. ガスの計算格子と独立した新たな計算格子 (提案格子) のイメージ

一方、実験では、図2に示すように、薄いアクリル容器にガラスビーズを充填し、容器内を真空に引いた後、上方から圧縮ガスを噴射してガラスビーズを吹き上げる。その様子は容器の正面に設置した高速度カメラで撮影する (図3)。高圧管は大、中、小3種類の容積のものを用意する。噴射前、排気口は薄い隔壁フィルムによってアクリル容器と隔絶されており、高圧管内の撃針で瞬間的に破断することで、容器内に流入させる。また、噴射口とガラスビーズの初期状態における表面との距離を様々に変化させることで、吹き上げの様子の変化を観察する。

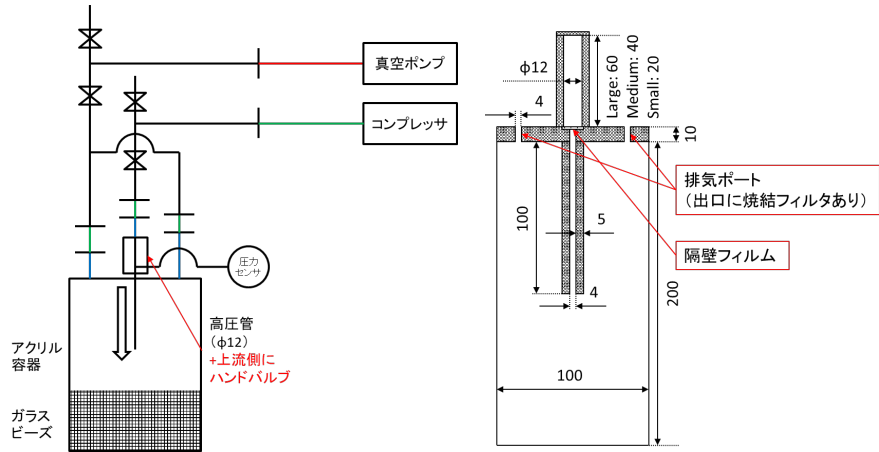


図 2. 実験系統図 (左) とアクリル容器の詳細イメージ (右)

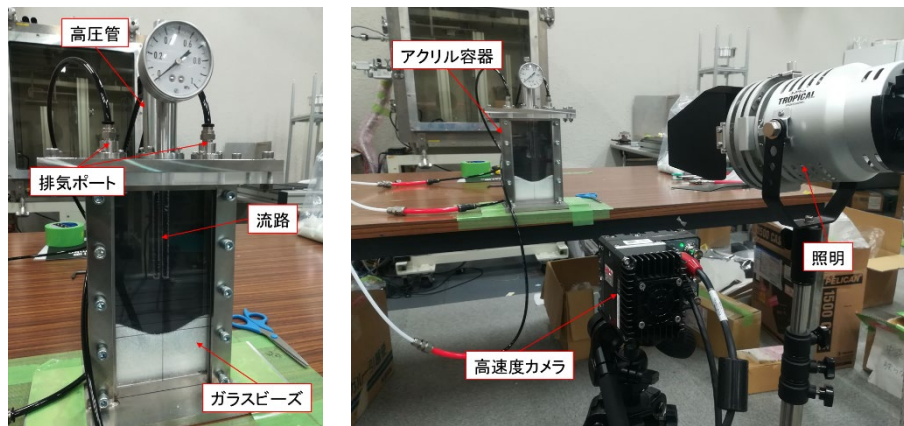


図 3. 実験供試体の概観 (左) と撮影の様子 (右)

4. 研究成果

まず、当初提案していた二次元の DEM-CFD 連成解析手法を三次元に拡張した。CFD, DEM とともに三次元空間で計算し、相互作用を計算する際に用いる計算格子も三次元空間に配置する。その試験的な計算として、図 4 左に示すような計算モデルを用いて、二次元モデル (紙面奥行方向の流れは無視) および三次元モデル (空間の紙面奥行方向の厚さは薄い、奥行方向の流れも計算する) それぞれで計算し、その結果を比較した。ここでは、計算量低減のため、 z 軸を軸に左右対称な空間を想定し、適切な境界条件を設定する。初期状態では中央 (計算空間としては左端) に設置された噴射管の中に圧縮ガスが充填されており、計算開始と同時に粒子層表面に向かって噴射され、粒子が吹き上げられてクレーターが形成される。

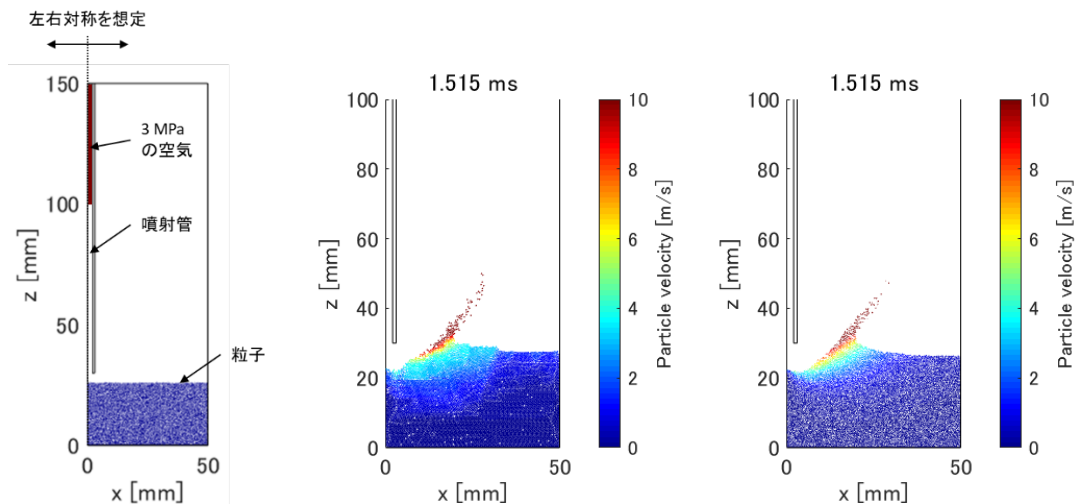


図 4. 計算モデル (左) と二次元モデル (中央) および三次元モデル (右) の結果例

図 4 の中央および右に示される例では、似た形状のクレーターが形成されることが確認されており、本計算例においては（本モデルにおける）三次元への拡張が妥当であるといえる。しかし、計算格子やその他パラメータの設定によっては両者が乖離することも確認されている。これは、超高速で流れ込んだ圧縮ガスの紙面奥行方向の境界面付近の速度が小さくなり、紙面奥行方向に流れの分布ができることによると考えられており、現在もなお検証中である。

一方、実験は当初予定していた通りに完了した。その一例を図 5 に示す。ミリ秒オーダーでクレーターが形成されることが確認できる。本実験においては、高圧管のサイズおよび初期状態における噴射口とガラスビーズ層表面の距離をパラメータとして様々に変化させたが、クレーター形成の様子を全時間において支配する主なパラメータは后者であり、高圧管のサイズは、内圧が減少してくる後期段階においては重要なパラメータであることが分かった。これらの理解のもと、シミュレーションと合わせ込むのに適切な対象は、クレーター形成の初期段階で、かつ高圧管のサイズがなるべく大きい場合であると考えられる。アクリル容器の内壁による影響がほとんどなく、また高圧管内部の流れを細かに考慮しなくても良いと考えられるためである。

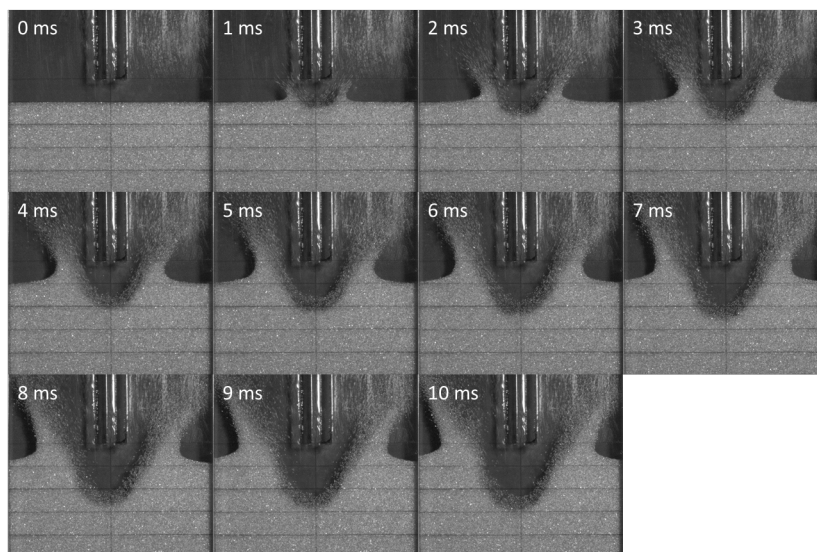


図 5. 実験結果の一例

この後、実験モデルを細かに模擬した計算モデルを構築し、シミュレーションと実験を合わせ込む準備を行った。図 4 の計算モデルとは異なり、(左右対称とせず) 空間全てを計算対象とし、また高圧管や排気ポートもモデル化した。粒子数は図 4 のモデルと比較して大幅に増える。しかし、二次元、三次元モデルいずれにおいても、それぞれモデルを様々に用いても、実験結果をよく模擬する結果は得られておらず、現在も引き続き検証を行っている。当初予定していた目的の 3 と 4 については、深く踏み込んで研究を実施することはできなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中条 俊大, 池田 峻太, 鈴木 宏二郎
2. 発表標題 レゴリス-ガス連成挙動解析に向けた簡易実験結果
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 中条 俊大, 鈴木 宏二郎
2. 発表標題 レゴリス-ガス連成挙動シミュレーション: 三次元への拡張と検証
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37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 2019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
---------	---------