

1D07 微小重力実験と安息角評価実験を用いたPlume-Surface Interaction解析のためのDEMパラメータ推定とCFD-DEMの解析

○馬場満久（JAXA），大北晨平（Hexagon）

DEM Parameter Estimation and CFD-DEM Analysis for Plume-Surface Interaction using microgravity experiment and angle of repose estimation

Mitsuhiisa Baba (JAXA) and Shinpei Okita (Hexagon)

Key Words : CFD, DEM, CFD-DEM, Plume-Surface Interaction, Microgravity experiment

Abstract

Plume-Surface Interaction (PSI) during lunar landing ejects regolith at high velocities, which threatens both the vehicle and nearby assets. We calibrate the Discrete Element Method (DEM) parameters for two granular materials: FJS-1 lunar soil and low-adhesion Tohoku Silica Sand No. 5 using dynamic angle-of-repose tests at 1 g environment. The calibrated sets are then applied, without further tuning, to drop-tower microgravity experiments. Silica Sand No. 5 reproduces the observed ejection patterns, validating the ground-based calibration. However, FJS-1 does not, indicating that dominant forces shift with reduced gravity. Gravity-dependent verification is essential before scaling PSI analyses to full-scale landers.

1. 背景

月面着陸機などが重力天体に着陸や離陸を行う際にエンジンから噴き出すブルームで、地表のレゴリスが高速に飛散する。周辺の構造物や探査機自身に跳ね返り損傷するなど、甚大な被害が生じ得る。このブルームと地面との相互作用はPlume-Surface Interaction(PSI)と呼ばれ、全ての着陸機で生じる大きな課題である。「はやぶさ2」では、サンプルを取得するタッチダウン運用の離陸時に大きな飛散現象が確認された[1]。アルテミス計画では多くの国が月着陸船で月の南極を目指すことから、PSIで既に着陸済みの機体への損傷などが懸念される。過去にはアポロ宇宙船の着陸で生じたPSIにより、近くに着陸していたサーベイヤーの表面に細かな傷が生じたことが報告されている[2]。そのためアルテミス計画の推進において、PSIの現象理解から予測、防御、国際ルールの設定は重要技術課題と識別されている[3]。

PSIは高真空環境で噴射されるジェットが地面に近づきながら干渉する固気二相流であり、流れも複雑であることが知られている。着陸機のスロットリング操作や姿勢制御に伴って、エンジンからの噴射流速、質量流量が刻々と変化し、レゴリスの浸食パターンも変動する。また月面はレゴリスの粒径分布や圧密度も全く一様でないことも、問題設定を複雑にしている要因の一つである。

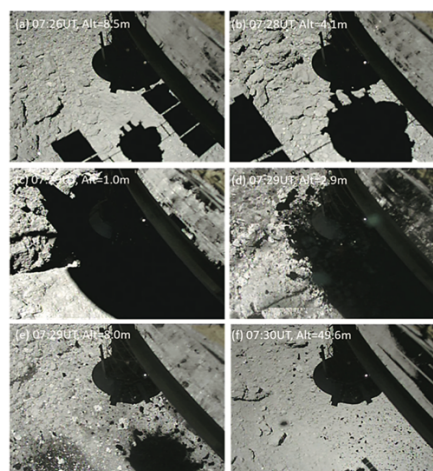


図 1 Plume-Surface Interaction(PSI)によるレゴリスの飛散現象(はやぶさ2タッチダウン運用時の例、図左下) [1]

PSIの研究には、これまで数値解析、地上試験[4, 5]、宇宙空間での実機観測[6]の3つのアプローチが取られてきた。数値解析では、流れはCFDやDSMC[7]等を用い、地面側は離散要素法(DEM)または連続体と扱った連成解析が広く用いられている。高真空中の希薄流体であるブルームと、微細なレゴリスの複雑な相互作用を精度良くモデル化することは依然として大きな課題である。地上実験では、真空チャンバー内でのジェット噴射実験が行われているが、重力や真空度、模擬砂の性状、スケールの制約により実際の宇宙環境を完全に再現することは困難である。そのため、実機での直接観測データは特

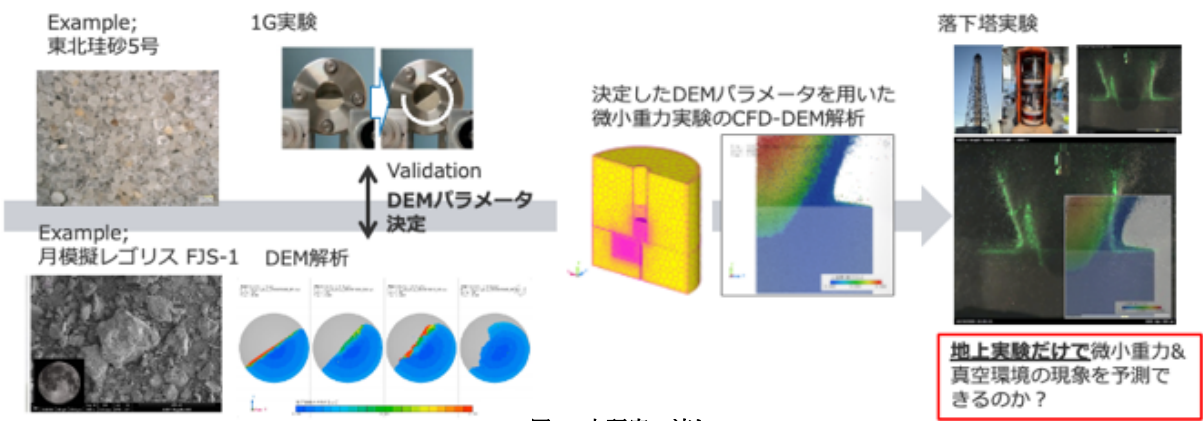


図 2 本研究の流れ

に重要であるが、観測機会は極めて限定的である。小惑星では「はやぶさ2」「OSIRIS-REx」、火星ではスカイクレーンや各種着陸機[8]、月面ではアポロ計画に基づく知見が中心である。2025年3月にはFire Fly Aerospaceの着陸船Blue Ghost Mission 1にPSI観測機器SCALPSSが搭載され、実際に観測データの取得に成功した。今後詳細なデータ解析が待たれる[6]。

2. 研究の目的

本研究では、地盤側の解析に地面を離散的な粒子が敷き詰められているとし、飛散後の運動を取り扱えるDiscrete Element Method(DEM)を採用した。一般にDEM解析は計算コストが高いことや、現実の粒子挙動に合わせる粒子間接触などの調整パラメータが多岐にわたり、それらの適切な値を決定するためには多くの試行錯誤が必要である。特にCFDと連成する本研究では、各種パラメータが最終的な結果に与える影響が複雑に絡み合うため、一度に全てを大規模に実施すると解析結果の解釈が困難になる恐れもある。そのため、結果の妥当性を確実に評価するためにも、小規模な実験から大規模な実験に向けて、段階的に検証していくことが妥当かつ効率的である。また素性が不明な小天体からのサンプルリターンミッションなどでは、天体が想定外のレゴリスやボルダーで覆われ、探査機の運用を検討し直さなければならない場面がある。この場合に落下塔などの比較的規模の大きい実験から検討し直すのは時間的猶予も限られるため、できるだけ簡便な地上実験からPSIの予測ができることが望ましい。

本研究では、月面のレゴリスの模擬砂FJS-1[9, 10]と、東北珪砂5号を対象にする(表 1)。FJS-1は天体を模擬するため、東北珪砂5号は付着性の小さい砂として選択した。まず地上試験でDEM部分のパラメータ推定を試みる。次にそのパラメータを別の解析=微小重力実験に適用し、このパラメータの適用可能性評価し、将来的な探査機スケールの大規模解

析への展望を考察する。

表 1 本研究で対象とする砂種		
	中心粒径	密度
東北珪砂5号	0.5mm	2610 kg/m ³
FJS-1	70 μ m	2800-3000 kg/m ³

3. DEM解析パラメータ推定

3.1. 動的安息角評価実験

DEMパラメータの推定実験には、安息角を動的に計測する方法を採用した。安息角とは砂を徐々に傾けていき、砂面が崩壊せずに保てる最大角度を指す。砂の特性を表すパラメータであり、一般に一意の値を取る。装置の外観を図 3に示す。ここでは回転するローラに合わせて、容器が回転する。ローラの回転には再現性があり、安息角の時系列データを計測することができるため、今回の実験で採用した。容器には半分だけ砂が入っており、側面から観察すると安息角がわかる。

図 4に東北珪砂5号で行った実験結果を示す。画像解析にはOpenCVを用い、定常状態での傾きは34.6degであった。図 5に月模擬レゴリスFJS-1での動的安息角計測結果を示す。一定の安息角を示さず、90度を越えようとしたときにせん断帯を伴って崩れる様子が確認された。FJS-1は粒径が小さく、月のレゴリスを模して角が立っており、粒子間が噛みやすい構造があり、マクロには付着性を伴う砂として振る舞う。ここでは一定の安息角を示さないことは受け入れ、粘着性に由来する急勾配や、せん断帯を伴う急激な崩れを示すことをDEM解析のコリレーションでは重視した。

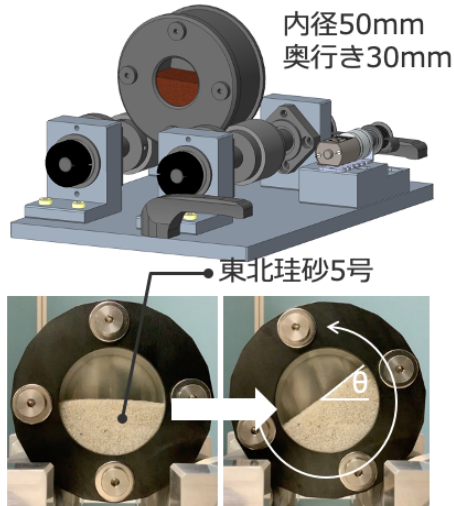


図 3 動的安息角評価試験装置の外観

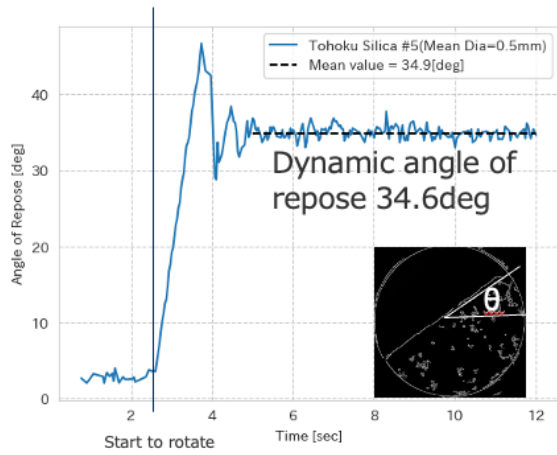


図 4 東北珪砂5号の動的安息角

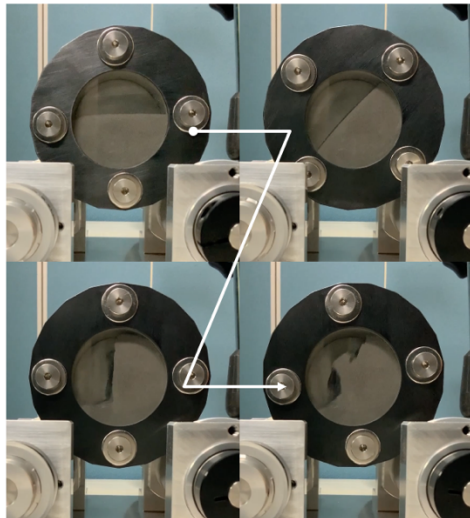


図 5 月模擬レゴリスFJS-1の動的安息角評価実験

3.2. 解析評価

解析モデルを図 6に示す．ここではCFDと連成させずDEMのみの解析としている．DEM粒子間の力は

The Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Model(EEPA)モデルに当てはめる．EEPAモデルはEdinburgh Universityで開発された粒子の塑性変形と付着力を考慮可能な汎用モデルである[11]．式(1)に概要を示す．湿潤土壌のモデル化に強みがあり，FJS-1のような粘着性を持つ砂には有効と考え，これを選択した．付着性に関するパラメータを小さくし，線形バネのようにすることもできることから，東北珪砂5号にも統一的に使用できることが期待できる．粒子間の衝突に伴うモーメントの損失は，式(2)-(3)に示す簡易線形モデル(Simplified Linear Model)を用いた．ソルバーはscFLOW v2024.2(Hexagon)を用いた．

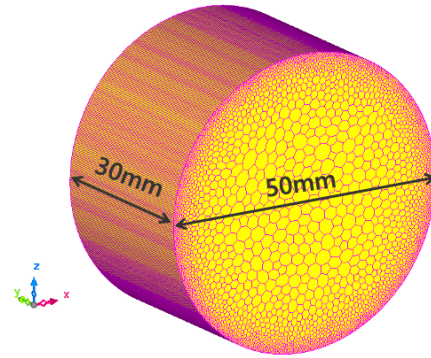


図 6 動的安息角評価のDEM解析モデル概要

$$F_{ns} = \begin{cases} -F_0 + k_1 \delta_n^m \\ -F_0 + k_2 (\delta_n^m - \delta_p^m) \\ -F_0 + k_a \delta_n^x \end{cases} \quad (1)$$

$$M_r = -\mu_r r^i |F_n^i| \hat{\omega}^i \quad (2)$$

$$\hat{\omega}^i = \frac{\omega^i}{|\omega^i|} \quad (3)$$

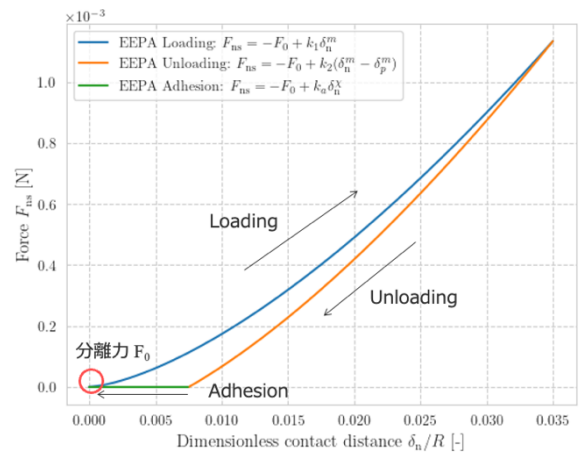


図 7 EEPAモデルによる粒子間弾性力
(東北珪砂5号)

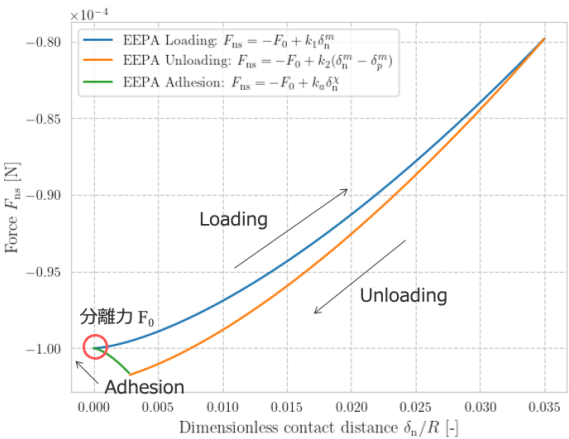


図 8 EEPAモデルによる粒子間弾性力
(月模擬レゴリスFJS-1)

表 2 東北珪砂5号に設定したモデルパラメータ			
パラメータ		値	備考
粒子特性	密度 [kg/m3]	2610	特性値
	直径 [mm]	0.525	同上
	ヤング率 [P]	1x10 ⁶	計算が発散しない範囲で設定
ポアソン比 [-]		0.25	同上
反発係数 [-]		0.5	同上
摩擦係数 [-]		0.7	特性値
表面エネルギー [J/m2]		0	計算が発散しない範囲で設定
塑性変形性 [-]		0.1	同上
回転抵抗 (簡易線形モデル)	回転抵抗係数		感度解析対象
接触力 (EEPAモデル)	分離力F0 [N]		感度解析対象
塑性変形性 λ p [-]		0.1	計算が発散しない範囲で設定
載荷・除荷時指数m [-]		1.5	同上
付着時指数 α [-]		1.5	同上

東北珪砂5号で回転抵抗係数をパラメータにした計算結果を図 9に示す。回転抵抗係数は最も実験と一致していた0.06を選択した。次に回転抵抗係数を0.06に固定した上で、分離力F0の感度も評価した。分離力F0は粒子間の付着や凝集を模擬する引力として働く項であり、接した粒子間が飛散開始時に必要となる最小の力を表す。実際の微小重力環境においては、重力の影響が小さいため、粒子間の分離力が飛散挙動に与える影響が相対的に大きくなる可能性を考慮し、図 10のように感度解析を行っている。ここで差異が生まれなかったことを踏まえ、分離力F0は次の過程へ2つとも残した。

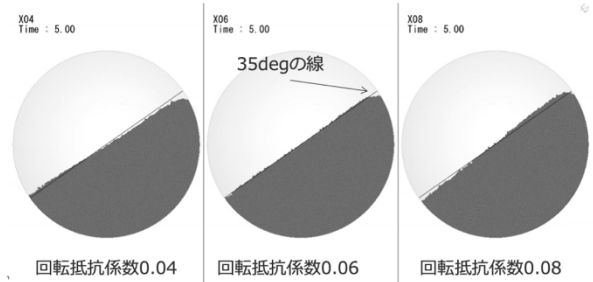


図 9 東北珪砂5号の回転抵抗係数に関するパラメータ感度比較

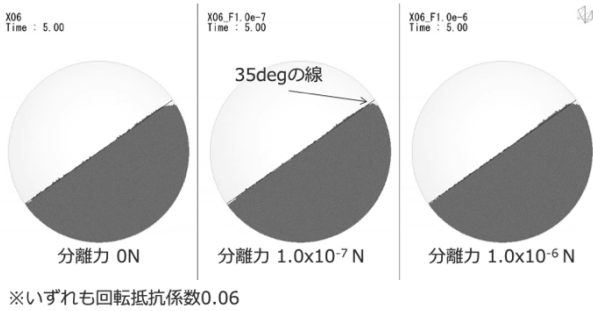


図 10 東北珪砂5号の分離力に関するパラメータ感度比較

粘着性の強い月模擬レゴリスFJS-1での感度解析について説明する。ここでも回転抵抗係数と分離力を感度解析の対象パラメータとした。前述の動的安息角評価実験では、一定の安息角を示さなかったため、定性的挙動の一致を目的として、図 11に示すパラメータの組み合わせで解析を行った。ここでの例でNo.5を図 12に、No.13を図 13に示す。No.1-3の結果は、東北珪砂5号の結果と類似であった。ここでは90度まで持ち上がって、せん断帯で崩れるような様子がみられたNo.13を採用し、次の過程に進んだ。

表 3 月模擬レゴリスFJS-1に設定したモデルパラメータ

パラメータ		値	備考
粒子特性	密度 [kg/m3]	2800	特性値
	直径 [mm]	0.07	同上
	ヤング率 [P]	1 x10 ⁶	計算が発散しない範囲で設定
ポアソン比 [-]		0.25	同上
反発係数 [-]		0.5	同上
摩擦係数 [-]		0.7	特性値
表面エネルギー [J/m2]		0	計算が発散しない範囲で設定
塑性変形性 [-]		0.1	同上
回転抵抗 (簡易線形モデル)	回転抵抗係数		感度解析対象
接触力 (EEPAモデル)	分離力F0 [N]		感度解析対象
塑性変形性 λ p [-]		0.1	計算が発散しない範囲で設定
載荷・除荷時指数m [-]		1.5	同上

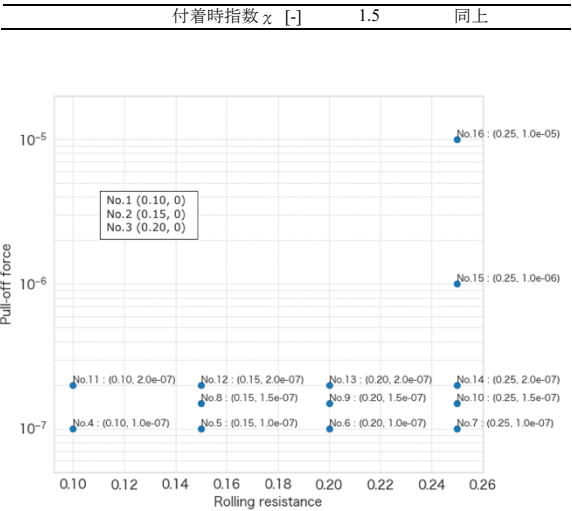


図 11 FJS-1の感度解析ケース一覧

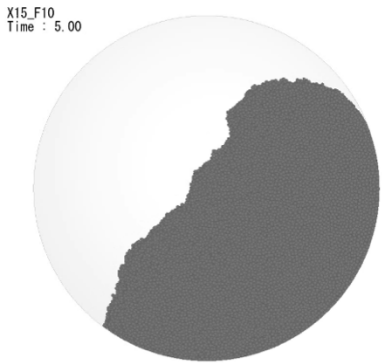


図 12 FJS-1解析ケース例(No. 5)

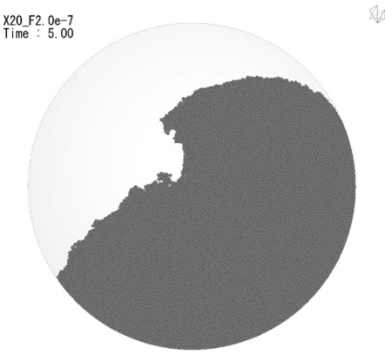


図 13 FJS-1解析ケース例(No. 13)

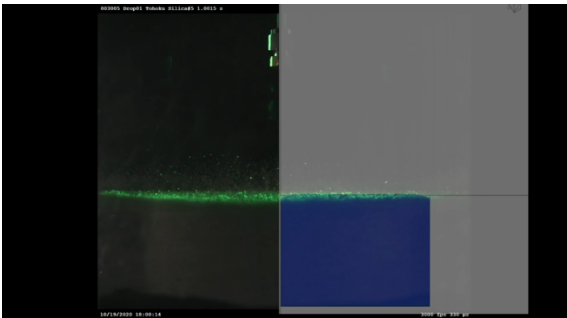
4. 微小重力実験によるDEMパラメータの検証

落下塔実験は植松電機敷地内のコスモトーレを利用した。実験装置外観を図 14に示す。円筒形状の亚克力製真空チャンバーを半分に区切り，うち半分に東北珪砂5号を敷き詰める。落下開始後1秒経って，圧縮空気を吹きつけ，砂が舞う様子を可視化する。可視化には緑色のシートレーザを差し込んだ。詳細は文献[12]を参照されたい。図 15に東北珪砂5

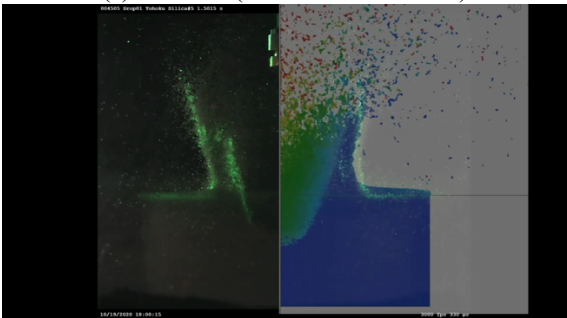
号を対象にしたCFD-DEM解析と，落下塔実験の比較を示す。クレータの成長から飛散していく砂の形態も含めて良い一致を示している。ここでは分離力 $F_0 1.0 \times 10^{-6} [N]$ を採用した。分離力 $F_0 1.0 \times 10^{-7} [N]$ にした場合の比較は図 16に示す。この分離力が一桁小さいとクレータの成長深さや飛散の形態は落下塔と比較して激しくなり，寄与度が大きいと分かる。これと同様の実験をFJS-1で行った結果を図 17，図 18に示す。噴射のパターンや全圧は東北珪砂5号の実験とほぼ同様である。ここでは初期の段階で薄くクレータが生成していくが，細かい粉塵が舞うため可視化が徐々に困難になっていった。これのCFD-DEM解析を行ったところ，飛散は観察されない状況であった。



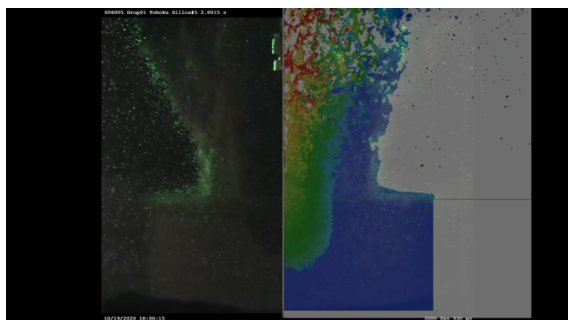
図 14 落下塔実験装置外観



(a) $t=2.00\text{sec}$ (噴射開始後1.0sec後)



(b) $t=1.50\text{sec}$ (噴射開始後1.0sec後)



(c) $t=2.00\text{sec}$ (噴射開始後1.0sec後)
図 15 東北珪砂5号の微小重力実験との比較
分離力 F_0 $1.0 \times 10^{-6}[\text{N}]$

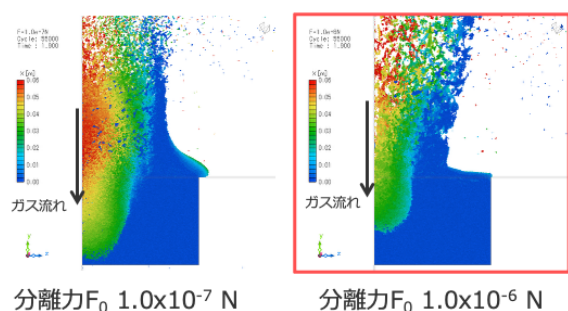
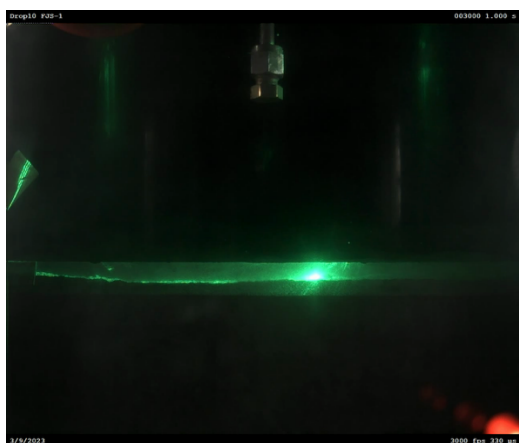
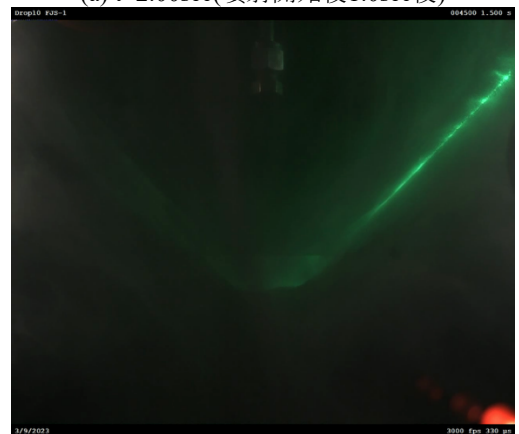


図 16 東北珪砂5号実験ケースにおける分離力の感度



(a) $t=2.00\text{sec}$ (噴射開始後1.0sec後)



(b) $t=1.50\text{sec}$ (噴射開始後1.0sec後)



(c) $t=2.00\text{sec}$ (噴射開始後1.0sec後)
図 17 FJS-1の微小重力実験結果

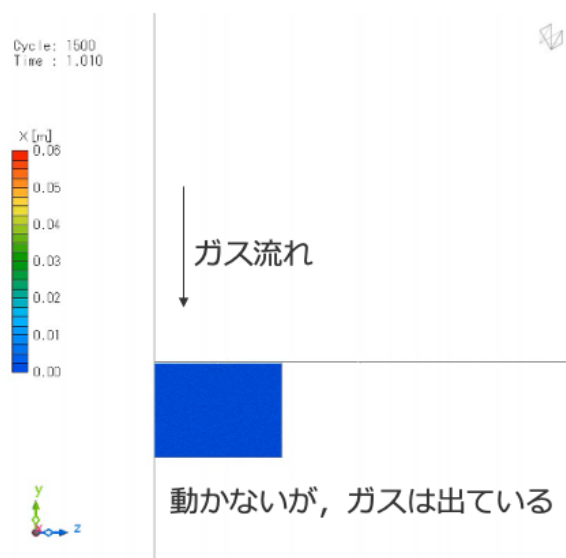


図 18 FJS-1での落下塔実験のCFD-DEM解析

5. 考察

東北珪砂5号での微小重力実験で感度があったEEPAモデルの分離力 F_0 は、 $10^{-6} \sim 10^{-7} [\text{N}]$ のオーダーの変更でマクロな飛散挙動に変化が生じた。このオーダーのミクロな粒子間力はファンデルワールス力と肉薄するため、ミクロな観点でも定量評価することが難しい。また現実の砂粒の形状ばらつきや分布を考慮すると、この計測から積み上げてマクロな解析につなげるのは効率的ではない。CFD-DEM解析での予測には、その程度のばらつきがあり、現時点では実現現象のコリレーションを必要とすると捉えるのが適切と考える。

図 19に粒子1粒に働く力（重力、ファンデルワールス力、遠心力）を整理して示す。地上での1G環境下における実験では、重力が他の力に比べて十分大きいいため、粒子の運動挙動はほぼ重力によって支配される。一方、落下塔実験による微小重力環境下では、珪砂5号は重力とファンデルワールス力が同程

度の大きさになり、粒子間の付着や凝集の影響が顕著となる。粘着性の高いFJS-1においては珪砂5号に比べ粒径が小さいため、ファンデルワールス力が重力を大きく上回り、粒子の飛散挙動が著しく異なることが明確に示される。他方で動的安息角評価における遠心力の影響を検討した結果、珪砂5号では 8.1×10^{-6} N、FJS-1では 6.0×10^{-10} Nと概算できる。これらの結果を踏まえると、1G環境下の動的安息角実験では粒子間の「付着力」が重力に隠れてしまい、正確なパラメータ推定が難しくなる。したがって、求めたい環境下での支配力を見極めることと、そのパラメータ調整を行う簡易実験との相関性が重要である。本研究では、粒子間付着力と重力の大小関係が重要であったことから、DEMパラメータ推定の小規模実験も微小重力で行うべきだっただろう。

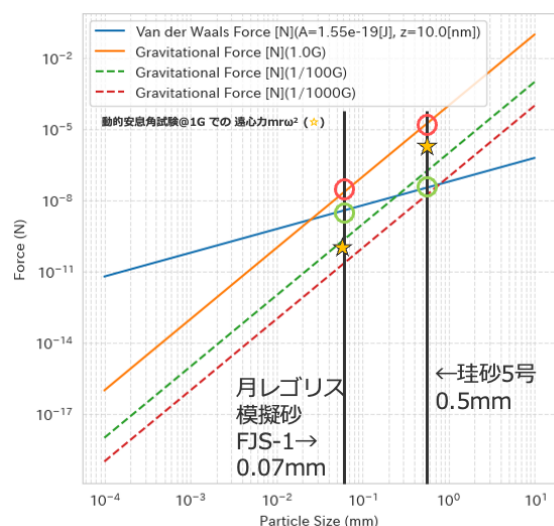


図 19 粒子一粒に働く力の整理(Ozaki et al 2023[13]を参考に作成)

6. まとめ

本研究ではCFD-DEM連成解析への前段階として簡易地上実験で安息角を評価し、それに合わせたDEM解析からパラメータを推定した。そのパラメータをもってCFD-DEM解析を行い、これでパラメータの有効性を評価した。割れ晴れは付着力をファンデルワールス力や粒子間の摩擦だけでなく、静電気や液架橋力も含めた総和としてマクロに現れる付着の「様態」として認識している。実際の宇宙空間でのミッションを想定し、支配力を見極めて実験し、数値計算をコリレーションすることが必要である。

参考文献

1. Tsuda, Y., et al., *Initial Achievements of Hayabusa2 in Asteroid Proximity Phase*. Transactions of the Japan Society for Aeronautical

and Space Sciences, 2020. **63**(4): p. 115-123.

2. Immer, C., et al., *Apollo 12 lunar module exhaust plume impingement on lunar Surveyor III*. Icarus, 2011. **211**(2): p. 1089-1102.
3. Gabriel Swiney, A.H., *Lunar Landing and Operations Policy Analysis*. 2022.
4. Jimenez Cuesta, C., et al., *Plume-surface interactions: A review of experimental work*. Acta Astronautica, 2025. **226**: p. 892-912.
5. Stubbs, D.C., et al., *Three-Dimensional Measurement of the Crater Formation During Plume-Surface Interactions Using Stereo-Photogrammetry*. AIAA Journal, 2022. **60**(3): p. 1316-1331.
6. Thompson, R.J., et al. *Stereo camera simulation for lunar surface photogrammetry*. in *AIAA SciTech 2021 Forum*. 2021.
7. Bajpai, A., A. Bhateja, and R. Kumar, *Plume-surface interaction during lunar landing using a two-way coupled DSMC-DEM approach*. Physical Review Fluids, 2024. **9**(2).
8. Xu, T., et al., *Phenomenology of plume-surface interactions and preliminary results from the Tianwen-1 landing crater on Mars*. Earth and Planetary Physics, 2023. **7**(3): p. 311-330.
9. 清水建設. 月土壌シミュラント「FJS-1」 「FJS-1g」. Available from: <https://www.shimz.co.jp/company/about/business/frontier/fjs.html>.
10. *Particle Grading Effect on Mechanical Properties of Lunar Soil Simulant FJS-1*.
11. Coetzee, C., *Edinburgh-Elasto-Plastic-Adhesion (EEPA) Contact Model*. 2020.
12. Baba, M., et al. *Microgravity experiment using drop tower and cfd-dem coupled simulation about plume-surface interaction*. in *AIAA SCITECH 2023 Forum*. 2023.
13. Ozaki, S., et al., *Granular flow experiment using artificial gravity generator at International Space Station*. NPJ Microgravity, 2023. **9**(1): p. 61.