

# 探査機が天体接触時に飛散する砂の飛散挙動評価手法の構築

馬場満久 †

Ballouz Ronald ‡

大槻真嗣 †

†JAXA ‡アリゾナ大学

E-mail: †baba.mitsuhi@jaxa.jp, ‡rballouz@orex.lpl.arizona.edu, †otsuki.masatsugu@jaxa.jp

## 1 背景

国内外で探査機を微小重力天体に着陸させサンプルを地球に持ち帰る計画 [1] や、天体表面に長期間滞在する有人探査が計画されている。こうしたミッションにおいて、天体と着陸機が接触することにより表面を覆う細かい粒子（レゴリス）が舞い上がるが、挙動は地球重力環境で目にする挙動よりも大きく舞い上がる（図 1）。この様子は、はやぶさ 2 の Ryugu タッチダウン時の挙動からも明らかである。巻き上がったレゴリスは小さな重力環境では探査機へ容易に到達しうる。飛散したレゴリスは探査機に付着することで、様々な性能劣化を引き起こす。例えば、放熱面や MLI へ付着することによる熱制御性能の劣化、カメラレンズに付着することによるカメラ性能への影響、摺動部への噛み込みによる機能減である。天体表面で着陸後に活動を行うミッションでは、着陸時に巻き上げられたレゴリスが次に続く動作を控えるミッション機器へ影響を与えてしまうため、まず着陸時の飛散挙動評価が必要である。



図 1: 地球重力環境と微小重力環境における砂の飛散挙動の違い

砂面に対して衝突する物体と飛散する砂の動的挙動に関する研究は、特に天文学の室内実験において多くの例がある。Debouef [2] らは、密に敷き詰められた粉体に対して比較的小さいエネルギー [J] を持つ衝突球が作り出す飛散現象において、飛散角度とエネルギーの関係を示している。また Marston [3] らは飛散角度と巻き上がる砂の飛散速度と飛散角度との間で依存性が小さいことを実験的に明らかにしている。一方でいずれの検討も衝突物の形状が球であり、探査機の着陸脚のような平板形状ではないため、注意が必要である。また着陸時の探査機が持つ大きなエネルギーと衝突直前における小さい速度の組み合わせでの室内実験例は少ないため、別途評価の必要がある。また飛散する飛散角度や飛散初速度の分布を実験的に示した検討は少なく、探査機への

リスク評価のためには、この 2 つのパラメータを取得する手法の構築が必須である。

## 2 目的

巻き上げられた砂粒が二次元の放物線を描くと仮定すれば、到達最大高さ  $h$  [m] は、式 1 で表すことができる。ここで初速度ベクトルの大きさ  $v_0$  [m/s]、飛散角度  $\theta$  [deg]、天体重力  $g$  [m<sup>2</sup>/s] である。

$$h = \frac{v_z^2}{2g} = \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g} \quad (1)$$

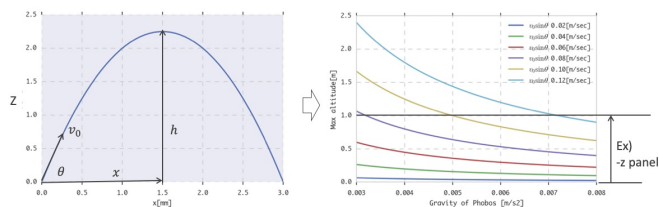


図 2: 飛散角度と飛散初速度を元にした最大到達高度の検出例

到達高度および飛散角度がわかることで、飛散した粒子が探査機に到達しうるかのリスク評価ができるようになる。本研究では脚先端を模擬した平板形状を対象とし、そこを起点とした飛散方向角度 [deg]、飛散初速度 [m/sec] を見積もる実験手法および評価方法の構築を目的とする。

## 3 真空チャンバー内での砂飛散試験

### 3.1 実験装置構成

図 3 に実験系の外観図を示す。角型の真空チャンバー内に壁面がアクリルで作られた砂桶を用意し、おもりを落下させて飛散する砂の挙動を高速度カメラで撮影する。実験における砂は珪砂 5 号を用いている。落下時は、真空チャンバーの天井部からおもり上面および砂表面にむけてシートレーザーを照射する。このレーザーによって作られる厚さ 3mm ほどの仮想断面を通過する砂粒は、高速度カメラの撮影動画内では周囲と比べ輝度が高くなる。砂桶内の珪砂 5 号の配置にランダムさはあるが、落下するおもりの形状が対称であるため、輝度の高さで識別された砂粒は全周にわたってほぼ同一であることが期待できる。落下させるおもりの質量は 5.5、20.5 [kg]、初期高さは 0.765 [m] (5.5 [kg] の場

合) または 0.575, 0.730[m](20.5[kg] の場合) である。チャンパー内圧力は 100[Pa] とした。

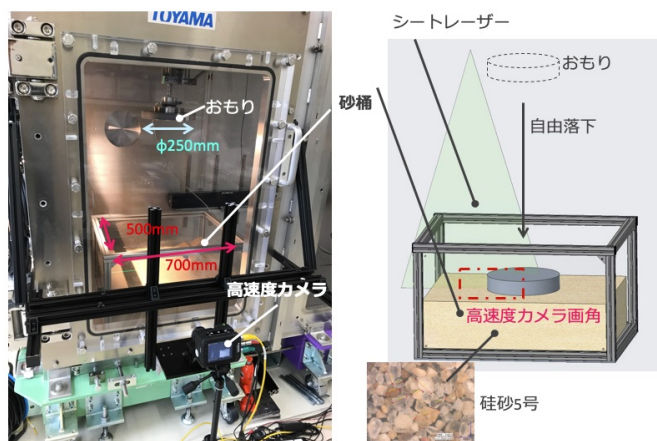


図 3: 真空チャンパー内部の試験コンフィギュレーション

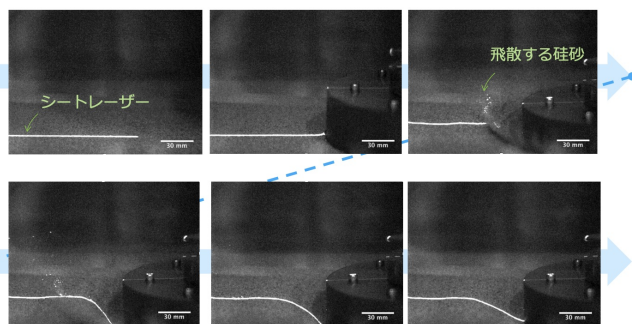


図 4: おもりによって飛散する砂の可視化

### 3.2 落下物エネルギーに対する飛散角度の依存性評価

飛散する砂の軌道と飛散角度は、ImageJ/Fiji の Z projection 機能を用いて抽出した。ここでその抽出方法の考え方を述べる。高速度カメラによって取得できる動画は連続した画像の集合である。落下するおもりが砂表面に接する瞬間から砂が飛び終わるまでの時間において、各ピクセルの最も高い輝度値を選び出して重ね合わせる。すなわち、時間方向に渡って 1 枚の画像に圧縮する。その後、背景の輝度値をもって圧縮された画像を 2 値化する。そして砂粒の軌道から集合したことにより”集団”とみなせる範囲の最大値を  $\theta_{cluster}$  と定義する。更に、 $\theta_{cluster}$  から外れているが、明確に存在している砂粒の軌道から最大角度として  $\theta_{max}$  とする。この処理によって得られた落下物のエネルギーと飛散する砂の飛散角度の関係を図 6 に示す。青い点が  $\theta_{cluster}$ 、オレンジの点が  $\theta_{max}$  である。これより、飛散角度は落下物のエネルギーに対して弱い依存性を示すことが示唆される。

### 3.3 画像解析による飛散初速度評価

3.2 章で示した解析では、複数の砂の飛散放物線が重なってしまい個別の飛散挙動分離できない。そこで高速度カメ

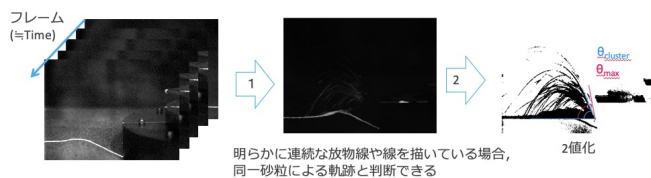


図 5: 高速度カメラ動画から砂粒の飛散軌道を抽出するアルゴリズム

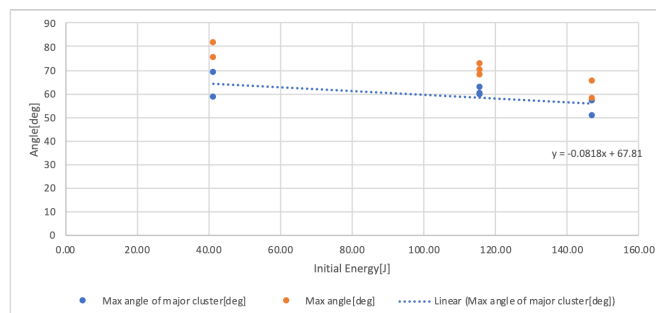


図 6: 落下物のエネルギー [J] と飛散する砂の飛散角度 [deg] の関係

らにより捉えた動画を ImageJ/Fiji の Particle Tracker[4] を用いて個別に分離した上で、飛散初速度を同定する。

砂粒の抽出前後比較を図 7 に示す。ここでは砂粒の全候補から、最小二乗法による当てはめにおいて決定係数 0.9 以上であることと、クレーターの縁を乗り越えない条件から砂粒の軌道を抽出した。一例として、図 7 では全 1034 候補のうち、砂粒が描いた軌跡として 363 個を抽出できる。

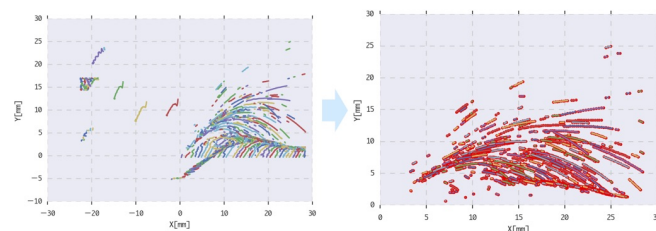


図 7: Particle Tracker[4] による砂粒の抽出工程前後の比較

一般に放物線運動の軌跡は式 2 のように表される。この係数より、放物線の軌跡から初速度と飛散角度は式 3 によって一意に決定される。

$$y = ax^2 + bx = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} x^2 + \tan \theta x \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan(b) \\ v_0 &= \sqrt{-\frac{g}{2a \cos^2 \theta}} \end{aligned} \quad (3)$$

得られた軌跡から、式 2 により求めた飛散する砂粒の初速度と飛散角度の関係を図 10, 11 に示す。また初速度の平均値と中央値、確認された最大値と落下物のエネルギーの関係を図 8 に示す。この結果より、飛散初速度は飛散角度に

大きく依存せず、いずれの場合も 1000[mm/sec] 付近に分布することがわかる。一方で、平均値に比べて非常に大きな初速度を持つ砂粒も確認された。ここで落下物のエネルギー 147[J] における初速度の分布を、図 9 に示す。大きな初速度を持つ砂粒は飛散する砂粒全体の初速度分布に正規分布を仮定した際に、 $3\sigma$  よりも大きく外れていることがわかる。

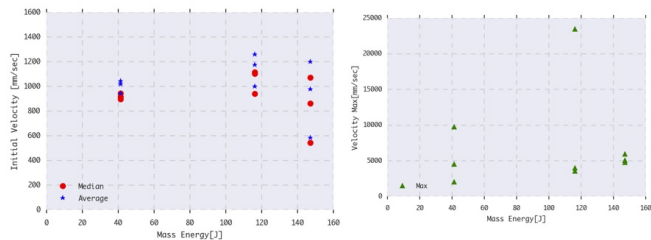


図 8: 落下物のエネルギーと飛散する砂粒の初速度平均値・中央値，最大値の関係

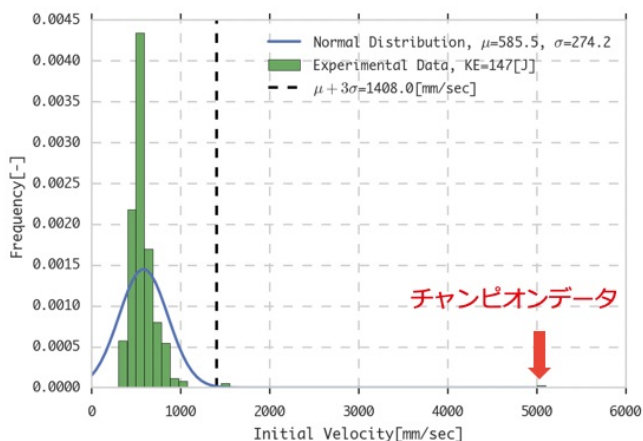


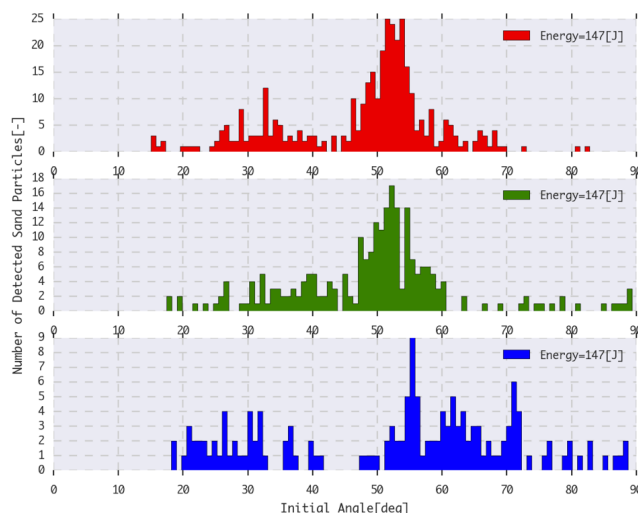
図 9: 落下物のエネルギー 147J における飛散初速度の分布

#### 4 結言

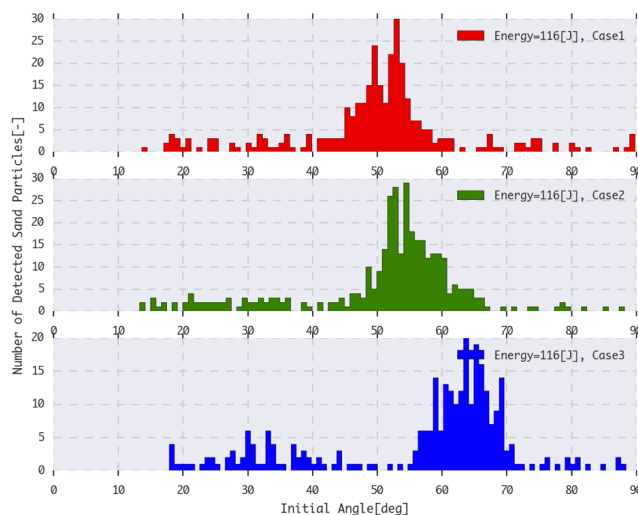
本研究では真空チャンバー内の珪砂 5 号が、衝突する丸平板によって飛散される際の飛散角度および飛散初速度の実験的評価手法を構築した。珪砂 5 号では落下物のエネルギーに対する飛散角度の依存性は弱く、飛散初速度も同様の結果であった。本手法はシートレーザーを用いる簡便な方法ではあるが、他の種類の砂や円盤以外の落下物形状にも対応が可能である。今後、本手法をもって他の砂種類に対する検討を進めていく。

#### 参考文献

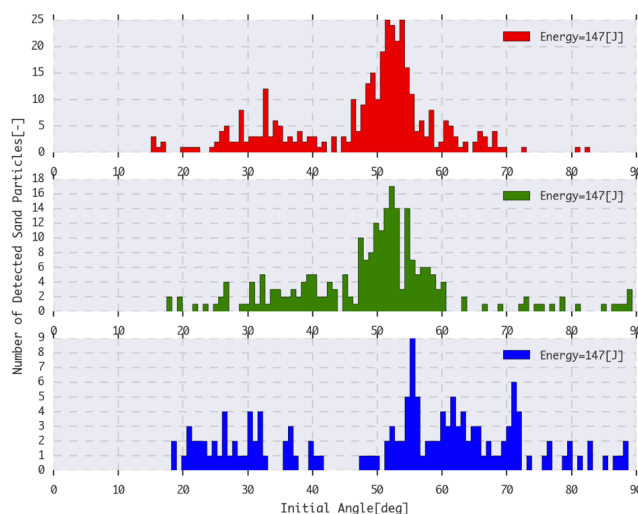
[1] Y. Kawakatsu, K. Kuramoto, N. Ogawa, I. Hitoshi, Y. Mimasu, G. Ono, H. Sawada, T. Yoshikawa, Kent and Imada, H. Otake, H. Kusano, K. Yamada, M. Otsuki, and M. Baba, “Mission Concept of martian moons ex-



(a) 落下物のエネルギー 47[J] の場合



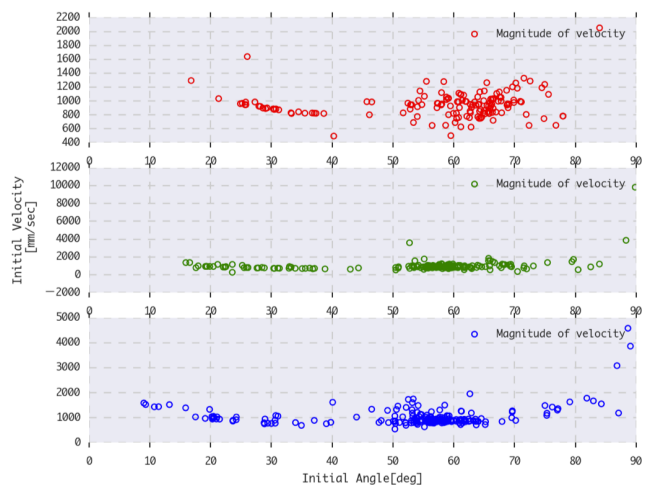
(b) 落下物のエネルギー 116[J] の場合



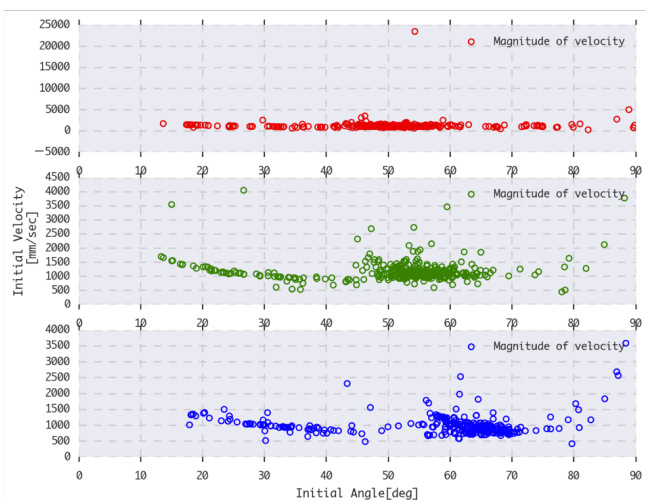
(c) 落下物のエネルギー 147[J] の場合

図 10: 落下物のエネルギーと飛散角度の関係

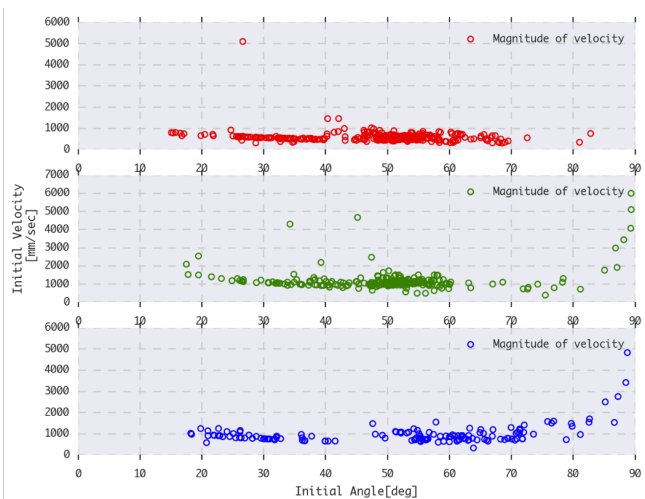




(a) 落下物のエネルギー 47[J] の場合



(b) 落下物のエネルギー 116[J] の場合



(c) 落下物のエネルギー 147[J] の場合

図 11: 落下物のエネルギーごとの飛散初速度-飛散角度の関係

ploration(MMX),” *International Astronautical Congress*, 2018.

- [2] S. Deboeuf, P. Gondret, and M. Rabaud, “Dynamics of grain ejection by sphere impact on a granular bed,” *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, vol. 79, no. 4, pp. 1–9, 2009.
- [3] J. O. Marston, E. Q. Li, and S. T. Thoroddsen, “Evolution of fluid-like granular ejecta generated by sphere impact,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 704, pp. 5–36, 2012.
- [4] I. Sbalzarini and P. Koumoutsakos, “Feature point tracking and trajectory analysis for video imaging in cell biology,” *Journal of Structural Biology*, vol. 151, no. 2, pp. 182–195, aug 2005. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16043363> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1047847705001267>