

粉体層への衝突による粒子巻き上げと採集過程のシミュレーション

坂田 大典¹, 北 和真², 高田 智史¹

¹東京農工大学 機械システム工学専攻 ²東京農工大学 産業技術専攻

1. 緒言

地球外の日体から採集されたサンプル（粒子）は貴重であり、未知の多い宇宙を解明するにあたって大きな手掛かりとなる．はやぶさ・はやぶさ2を始めとする小惑星探査機は地球外の日体からサンプルを採集するサンプルリターンミッションを実施しており、サンプルはサンプラーホーンと呼ばれる機構によって採集される⁽¹⁾．この採集機構は弾丸の発射で粒子を飛散させるため、幅広い条件の地表に対して使用することができる．一方で、サンプル採集量の点では NASA の最新の小惑星探査 OSIRIS-REx の5%未満であり、採集量の少なさが課題である^(2,3)．

2. 研究目的

本研究の目的は、はやぶさ2で用いられた採集機構である筒形サンプラーを簡易的に再現し、粒子の巻き上げによる採集をシミュレーションで実行することである．また、ホーン形状の違いによる粒子の挙動変化を観察し、採集可否に関係のある要素を明らかにすることも目的とする．

3. シミュレーション方法

本研究では、離散要素法(Discrete Element Method)を用いてシミュレーションを実施した．この手法では個々の粒子および物体間の接触力を求め、運動方程式を解くことで系全体の時間発展を計算する．粒子同士の接触ではJKR接着接触モデルを用い、粒子同士の付着効果を考慮して計算を行う．また、実装においてはLAMMPSを使用した．

4. セットアップ

本研究では重力加速度 $g = 0.01 \text{ m/s}^2$ の微小重力環境下でシミュレーションを実施した．まず、円錐台部分(ホーン下部)と、徐々に内径を小さくしてサンプルを格納するキャッチャに誘導する部分(ホーン上部)で構成されたサンプラーホーンを、 $0.20 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \times 0.90 \text{ m}$ の直方体領域の上部に設置した．次に、密度 $2,200 \text{ kg/m}^3$ の粒子を直方体領域に敷き詰めた．使用する粒子は直径の異なる5種類で構成され、粒子径はそれぞれ $0.92, 0.96, 1.00, 1.04, 1.08 \text{ mm}$ とした．これらの粒子をランダムに直方体領域に敷き詰めてできた粒子の層をサンプル層とする．粒子を敷き詰めた後、サンプラーホーン内上部からサンプル層に向かって直径 0.008 m で密度 $16,650 \text{ kg/m}^3$ のプロジェタイル(弾丸)を 300 m/s で発射した．この一連のシミュレーションを $0.08 \sim 0.16 \text{ m}$ の範囲で下部口径の大きさを変えながら繰り返し、さらに、初期粒子配置を変更した3種類のケースについて同様の条件でシミュレーションを実行した．

5. 結果考察

本研究のシミュレーションにおいて、プロジェタイルの発射から1秒後までにキャッチャに到達した粒子を採集粒子とみなし、採集粒子の合計質量に実際の採集条件と同条件になるように係数を掛けた値を採集粒子量として評価した．結果として、下部口径が小さいほど採集粒子量が多くなり、反対に下部口径が大きいほど採集粒子量が少なくなる傾向が見られた．このことから、巻き上がった粒子がホーン下部と衝突する際に、ホーン下部の傾斜角度によって衝突後の粒子の挙動が変化すると考えられる．

具体的な粒子挙動の変化を調べるために、ホーン衝突前後での粒子の巻き上げ角の変化について確認した。結果として、ホーン下部口径が小さい、すなわち傾斜大きな条件で、半数以上の粒子の巻き上げ角がホーン下部との衝突によって増加した。特に、衝突前の巻き上げ角が小さな粒子ほど、衝突後に巻き上げ角が増加する傾向が顕著であった。一方、ホーン下部口径が大きく、傾斜角が小さな条件では、大半の粒子の巻き上げ角がホーン下部との衝突によって減少した。このことから、ホーン下部の形状変化によって巻き上げ角の大きな粒子が増加し、その結果として粒子の採集量が増大すると考えられる。

次に、粒子の巻き上げ角の変化によってなぜ採集されやすさが変化するのかについて、ホーン上部の粒子の軌跡を観察して確認した。ホーン上部壁面と粒子の衝突に着目すると、ホーンと衝突した粒子の巻き上げ角は減少する傾向が見られた。また、衝突によって粒子の z 方向速度成分に対する x 方向速度成分が増大しており、ホーンとの衝突頻度が高くなることが明らかとなった。このことから、ホーン上部へ進入する際の巻き上げ角が小さい場合、粒子はホーンと衝突しやすい状態となる。その結果、衝突が複数回生じ、衝突のたびに巻き上げ角が減少する。最終的には z 方向速度成分が負となり、粒子は落下すると考えられる。一方、ホーン上部へ進入する際の巻き上げ角が大きい場合には、ホーンとの衝突頻度が低くなる。そのため巻き上げ角の減少も抑えられ、最終的にキャッチャーへ到達可能になると考えられる。これらのホーン下部衝突時の傾向は、複数の粒子が結合して構成されたサンプルについても基本的に同様であり、粒子同士の付着効果が働いた状態でもホーンとの衝突および採集が確認できた。しかし、一部例外として、ホーン上部壁面と衝突後に巻き上げ角の減少が生じない衝突パターンが確認された。

6. 結言

本研究では、離散要素法シミュレータ LAMMPS を用いて、天体地表を模した粒子層への弾丸衝突および粒子採集のシミュレーションを実行し、採集の可否に関する要素を確認した。また、ホーン上部、下部における粒子挙動の観察から粒子採集・落下のメカニズムを明らかにした。今後の展望として、巻き上げ角が大きい状態でホーン上部に進入したにも関わらず採集が確認できなかったサンプルや、複数の粒子が結合して構成されたサンプルについて、本研究では精査していない条件についても検討を行い、採集の可否に影響を及ぼす要因を明らかにしていく。

参考文献

- (1) 岡本 千里, 兵頭 拓真, 百武 徹, 澤田 弘崇, 國中 均, 橘 省吾, はやぶさ 2 による小惑星レゴリス試料採取を模擬した衝突実験, 日本惑星科学会誌「遊・星・人」, 第 24 巻, 3 号 (2023), pp. 249-256.
- (2) 吉川 真, 小惑星探査機「はやぶさ 2」の挑戦と今後の展開, 銅と銅合金, 第 62 巻, 第 1 号 (2023), pp. 1-5.
- (3) D. S. Lauretta, *et al.*, Asteroid(101955) Bennu in the laboratory: Properties of the sample collected by OSIRISREx, Meteoritics & Planetary Science, Vol. 59, No.9 (2024), pp. 2453-2486.