

# 破碎性粉体ターゲットにおける非破碎粉体衝突時の応力伝播と内部解析

北 和真<sup>1</sup>, 坂田 大典<sup>1</sup>, 高田 智史<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>東京農工大学工学府, <sup>2</sup>東京農工大学大学院工学研究院

## 1. 緒言

宇宙空間における衝突現象では、被衝突物の衝突後における内部応力伝播とその伝播速度の解析が重要であり、内部挙動の理解を深めることで衝突前後における衝突天体の軌道予測を行うことができる。昨今では、地球に接近する天体に対し人工的な衝突を起こすことで軌道を修正、地球衝突を防ぐ研究が行われており、実際に、NASAによるDART試験に代表されるように、天体に対する人為的な衝突で天体軌道を変更する試験の成功例も確認されている。衝突前後の標的天体に対する運動量輸送・天体の軌道予測の重要性は増してきており、これらの衝突前後の各パラメータについては、標的天体全体の挙動の理解とパラメータに関わる要素の解明が重要である。

本研究の目的は、標的天体モデルと衝突物モデルを作成し、標的天体の応力伝播と内部解析を行うことで運動量輸送、天体軌道変更に関わる要素とその影響力を解明することである。本研究は離散要素法のシミュレーションであるLAMMPSを用いて行い、標的天体と衝突物をそれぞれ破碎性粉体と非破碎性粉体と仮定することで、粒子の集合体である粉粒体による衝突シミュレーションを行った。各構成粒子に対して運動方程式を逐次的に解くことで系の時間発展を計算する。粒子間接触には弾性力、摩擦力を考慮するHertz-Mindlinモデルに対して、表面エネルギーによる凝着力を加えたJKR(Johnson-Kendall-Roberts)モデルを相互作用として用いた。このモデルにより、後述する構成粒子の接触・剥離挙動の再現を行った。今回のシミュレーションでは、標的天体の衝突前後における内部応力伝播と構成する粒子の剥離に対して、標的天体の空隙率と衝突物の衝突角度を中心に解析を行った。

## 2. 結果

破碎性粉体モデルの各パラメータについて、粒子数は約30000個、直径80mとして球体全体としては岩石相当を仮定した。粒子については、ヤング率1.0GPa、減衰係数0.22Ns/m、ポアソン比0.25、表面エネルギー密度30~60J/m<sup>2</sup>に設定した。非破碎性粉体衝突モデルは粒子数1個による球体モデルであり、直径10m、物性値は金属相当と仮定した。シミュレーション条件は各モデルについて条件を変更して行った。破碎性粉体モデルでは空隙率を68%, 55%, 48%と3条件を設定した。非破碎性粉体モデルでは衝突速度は100m/sを固定値とし、破碎性粉体モデルの球体接線に対する衝突角度を0°, 15°, 30°, 45°, 60°の4条件を設定した。ここで衝突角度を変更するシミュレーションでは、破碎性粉体モデルの空隙率を0.55ですべての条件において固定値とした。各空隙率に対する粒子損失割合は68%では0.223%, 55%では0.103%, 48%では0.046%だった。標的天体の空隙率の減少に伴い損失粒子数は減少傾向にあり、応力伝播速度は増加傾向であった。応力伝播の速度が増加することで応力散逸が促進され、標的天体がやわらかい性質を示したと考えられる。衝突角度変化

による応力伝播の変化については、突入角に対する進行方向や演習近傍の応力が上昇、応力散逸も少なく局所的な応力集中が発生していることを確認した。各衝突角度による破碎性粉体モデルの粒子損失については、角度の増加に伴い損失粒子数は増加傾向にあるが、特定の角度を超えた段階で増減が変化した。前述した円周近傍における局所的な応力集中や、角度の増加に伴う摩擦力の増加により粒子損失は増加しており、衝突角度が大きくなるにつれ衝突物の破碎性粉体モデルとの接触面積が減少し、粒子損失も減少したと考えられる。

<参考文献>

- (1) 高橋 典嗣, 吉川 真, チェリヤビンスク隕石の現地調査報告, 日本惑星科学会誌, Vol.22, No.4, pp.~228-233~(2013).
- (2) 西尾 峻人, 大槻 圭史, 杉浦 圭祐, 破壊を伴う衝突による小惑星速度変化, 日本惑星科学会誌, Vol.33, No.3, pp.~254-261~(2024).
- (3) Douglas D. Carvalho, Nicolao C. Lima, and Erick M. Franklin, Impact craters formed by spinning granular projectiles, Accepted manuscript for Physical Review E, 108, 054904, (2023)
- (4) 黒澤 耕介, 千秋 博紀, 和田 浩二, 三上 峻, 平田 成, 鎌田 俊一, 石原 吉明, 玄田 英典, 中村 昭子, 高田 淑子, iSALE shock physics code による数値衝突計算, 日本惑星科学会誌, Vol.23, No.2, pp.~103-110~(2014).