

## 改良 Z model を用いた DART 衝突後の Dimorphos 表面の堆積厚みの見積もり

黒澤耕介<sup>1,2</sup>, 高田智史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>神戸大学,<sup>2</sup>千葉工業大学,<sup>3</sup>東京農工大学

**はじめに:**2013年2月15日にロシア チェリヤビンスク州の上空で起こった天体の大気突入事件は多大な被害を及ぼした。この規模の天体の大気突入は数10年に1度の頻度で起こると考えられている。同様の事件が大都市圏の上空で起これば大惨事になることは想像に難くない。小天体の衝突の脅威に対してどのように対応していくべきか、地球防衛問題(Planetary defense)として検討されている。

**高速度衝突による運動量輸送:**高速度衝突は小天体の軌道を変え、地球への衝突を避ける有効な手段であると考えられている。これは衝突方向と反対側に飛び出す放出物の反跳によって被衝突天体が加速されるからである。この輸送効率率は $\beta$  = 衝突後の運動量の総和/衝突体の運動量と定義されている。 $\beta > 2$  のとき放出物の反跳が主要な役割を果たす。

**AIDA 計画:**高速度衝突が実際の小惑星の軌道をどの程度変えるのか?は小惑星の内部構造、物性に依存するため、確度の高い予測は困難である。そこで世界初の小惑星軌道変更実験 Asteroid Impact and Deflection Assessment(AIDA)計画が実施されている。これは NASA の Double Asteroid Redirection Test (DART), ESA の Hera という2つの探査計画から構成されている。標的は連星小惑星の Didymos (主星, 直径 780 m)と Dimorphos (伴星, 直径~150 m)である。DART は 2022 年 10 月に  $6.1 \text{ km s}^{-1}$  で Dimorphos に衝突した。DART から切り離された小型衛星, Hubble, JWST などの宇宙望遠鏡, 多数の地上望遠鏡による観測が行われた。連星なので、衝突による Dimorphos の公転周期の変化が詳細に計測され、実際の小惑星での $\beta$ は2.5-4.5と大きい値であることが確かめられた。2024年10月に打ち上げ予定の Hera は現地に出向き、衝突によって連星小惑星がどのように変化したのかを詳細に調べる計画となっている。

**DART 衝突結果の解釈:**DART 衝突が成功を

納め、データが大量にもたらされた。現在世界中の衝突関係者がそのデータの解析と解釈を行っている。衝突物理の観点からは構成方程式を実装し、岩石の弾塑性挙動を表現することができる数値衝突計算コードを用いた検討が主に進められている。ところが、空間解像度の制約から計算時間が長くなってしまったため、パラメータ空間を広く調べる事ができていない状況にある。

**改良 Z model の利用:**我々は以前 Z model の掘削流線に運動エネルギーを与える方法を提案した。Z model では掘削流線形状が与えられているので、DART 衝突のような標的の曲率が無視できない系での Impact ejecta とクレータ形成を扱うことができる。今回は Z model の掘削流線と Dimorphos 表面を表す曲線の交点を表す角度を導入し、掘削流線の諸量の計算をその角度で打ち切ることで標的曲率の効果を簡易的に導入した。1次元の数値積分が必要にはなってしまうが、短時間で放出物の質量-速度分布をクレータ形成が終了するまで計算することができる。

**計算結果:**まず標的天体が著しく大きく曲率が無視できる場合の計算を行い、頻用されている $\pi$ -group scaling laws の $\pi_2$  vs  $\pi_0$ 結果と比較した。DART 衝突の規模に対応する $\pi_2 \sim 10^{-12}$ ではよく使われる2つの曲線の間の中間の値になり、本手法によるクレータ形成の計算がある程度信頼できるものであることを確かめた。

本モデルで計算される放出速度-質量分布は DART 衝突後に観測された「Slow ejecta」の速度と質量を説明できそうであるが、測光観測で衝突後~30分程度での急激な増光をもたらした「Fast ejecta」は説明できないことがわかった。Fast ejecta はいわゆる Normal excavation ではなく、Jetting や Spallation と呼ばれる過程で加速されていると推測される。我々のモデルの重要な特徴の1つは特別な仮定を置くことなく、放出速度-質量分布が低

速で冪乗からずれていく挙動を再現できることである。この領域はいわゆる *Scaling laws* では扱うことができない。また数値計算ではクレータ形成の終盤で、物質の音速に対して数桁遅い物質の運動を解く必要があり、計算コストが特に高く扱いづらい。

標的天体半径を著しく大きく ( $75 \times 10^6 \text{ m}$ ) とした標的曲率を無視できる場合と Dimorphos 半径 ( $75 \text{ m}$ ) に合わせた場合の両方で運動量輸送効率  $\beta$  を計算した。その結果、標的曲率なしの場合はあるの場合に比べて  $\beta$  が高くなることがわかった。これは先行研究と調和的な結果である。また観測で求められた  $\beta > 2.5$  を再現するには Dimorphos 質量の  $\sim 1\%$  が放出されなければならない、そのうちの  $\sim 1/5$  は Didymos-Dimorphos 系からも脱出してしまうことがわかった。Dimorphos からは脱出するが、Didymos-Dimorphos 系からは脱出しない物質は系内で Dust trail を形成すると思われる。仮にこれらの物質が全て Didymos 表面に一律に堆積したならば、その厚みは  $\sim 1.2 \text{ cm}$  になる。実際には太陽光圧によって加速され宇宙空間に失われてしまう成分もあるので、この見積もりは上限値である。

本モデルでは放出速度 - 質量分布とその放出位置、Dimorphos 表面から測った放出角度も計算できる。弾道飛行を仮定すると、Dimorphos 表面での放出物の堆積厚分布を求めることができる。その結果  $\beta > 2.5$  の条件では一番薄い領域でも  $\sim 20 \text{ cm}$  は堆積していることがわかった。

**議論とまとめ:** DART に搭載されていた DRACO カメラによる Dimorphos 表面の近傍観測では最小で  $\sim 30 \text{ cm}$  の岩塊が確認されている。DART 衝突の結果、これらの岩塊は半分以上埋没しているだろう、というのが本モデルからの予測である。衝突地点からの距離に応じて岩塊の埋没量が変化していると予想される。今後は岩塊による地形の凹凸も考慮して、Dimorphos 表面の何割が埋没したのかを推定していく予定である。

ファイルをご参照下さい。

※図や参考文献についてはスライドの PDF フ