

はやぶさ2衝突実験によるイジェクタスケーリング則の検証

菊地翔太¹, 和田浩二², 白井慶³, 石橋高², 門野敏彦⁴, 本田理恵⁵, 横田康弘⁶,
寫生有理⁶, 坂谷尚哉⁶, 小川和律⁶, 澤田弘崇⁶, 荒川政彦³

¹国立天文台, ²千葉工業大学, ³神戸大学, ⁴産業医科大学, ⁵愛媛大学, ⁶JAXA

背景

多くの地上実験および数値計算により, 衝突によって生じた放出物(衝突イジェクタ)の力学的進化が特徴づけられている一方で, それらの宇宙実証は限られている. 数少ない例の一つが, はやぶさ2が2019年に小惑星リュウグウで行った衝突実験である. この実験では, 探査機から分離された衝突装置(SCI)により, 重力支配領域における形成過程として理解される直径14.5mの人工クレーターが形成された(Arakawa et al., 2020). 衝突イジェクタの時間変化は, 小型の分離カメラ(DCAM3)で観測されている. 本研究の目的は, DCAM3画像からSCI衝突イジェクタの時間発展を復元し, イジェクタ速度スケーリング則などの数理モデルを検証することである.

手法

衝突イジェクタの画像解析の前処理として, 探査機-小惑星間の幾何関係を正確に復元するために, DCAM3の画像幾何補正および位置・姿勢推定を同時に行った. 次に, DCAM3で観測された衝突イジェクタの3次元的な時間変化を以下2つのアプローチで解析した. 第一に, イジェクタカーテンに着目し, イジェクタ速度スケール則を用いて, 観測されたカーテンのエッジに整合する尤もらしいイジェクタ粒子分布の時間変化を求めた. この際, スケーリング則のパラメータ μ, C_2 (Housen & Holsapple, 2011)とイジェクタ放出角 θ (衝突点における元の地表面レベルから計測した角度)を推定変数とした. 第二に, 独立した輝点として識別できる比較的大きい4つの放出ボルダー(直径0.3–1.0 m程度; Kadono et al., 2021)については, 運動の非線形性を利用して, 2次元画像情報から放出初期条件を推定して3次元軌道を復元した.

結果

1. イジェクタカーテン形状推定

時刻の異なる10枚のDCAM3画像を用いて非線形フィッティングした結果, 各時刻において残差1–3 pix程度で理論モデルに基づくイジェクタカーテン形状の復元に成功した. 推定された速度スケーリング則のパラメータは, 推定誤差の範囲内で, Housen & Holsapple (2011)におけるsand targetの値 $\mu = 0.41, C_2 = 0.64$ に一致した. 得られたイジェクタ速度分布を踏まえると, SCI衝突点から約2 m以内で放出された粒子はリュウグウの脱出速度を超えたと推定される. また, イジェクタ粒子の放出角度は35–48 degであり, 衝突点か

らの距離に応じて増加している。放出角の距離依存性は、多くの地上実験 (Cintala et al., 1999 など) とは逆の相関関係を示したが、この差異は表面地形または斜め衝突の効果で説明しうる。特に前者の表面地形の効果については、はやぶさ 2 観測に基づく SCI 衝突前の地形モデルと、Z モデルとを組み合わせることで、SCI 放出角の分布が再現できることを明らかにした。

2. 放出ボルダー軌道推定

5~10 枚の DCAM3 画像から、力学モデルに基づいて放出ボルダーの 3 次元軌道を数値計算した。4 つのボルダーいずれについても、画像上における輝点位置の残差 (観測値と推定値の差) は約 2 pix 以下であった。これらのボルダーは、全て北東から南東の方向に放出された。小惑星表面相対での放出速度は約 20-30 cm/s であり、リュウグウの表面に再衝突したと推定される。ボルダーの放出角度は 35-55 deg の範囲であり、イジェクタカーテンを構成する粒子の放出角に近い結果であった。