

# 画像処理によるイジェクタカーテン形状の比較: 室内衝突実験 vs SPH 衝突シミュレーション

○岡本 尚也<sup>1</sup>, 黒澤 耕介<sup>1</sup>, 玄田 英典<sup>2</sup>, 松井 孝典<sup>1</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター,<sup>2</sup> 東京工業大学地球生命研究所

天体衝突によって放出された高速なイジェクタは天体間の物質輸送に寄与する可能性がある(e.g., Artemieva and Ivanov, 2004, Chappaz et al., Ramsley and Head, 2013, Kurosawa et al., 2018). 天体間で物質が輸送されるかどうかを知るにはまず放出される高速イジェクタの挙動やその速度分布についての理解が必要となる. これまで我々は弾丸・標的にポリカーボネイトを使用した衝突角度 45 度での高速衝突実験を行い, 衝突点近傍から放出される高速イジェクタをハイスピードカメラで撮像し, 弾丸貫入特徴時間(弾丸直径/衝突速度)以下での観察(0.2  $\mu\text{s}/\text{frame}$ )に成功した(岡本ほか, 衝突研究会 2015). 一方, 高速イジェクタの速度分布を室内衝突実験から得るのは難しく, これを知るには数値シミュレーションを行うのが有効な手段であるが, 室内実験との比較を通してシミュレーション結果の妥当性を検討された研究は少ない. 我々は弾丸粒子数,  $n_{\text{imp}}$  を  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $3 \times 10^6$  個とした極めて高い空間解像度での SPH(Smoothed particle hydrodynamics)衝突シミュレーションを行い, 室内衝突実験で得られたイジェクタカーテン形状との直接比較を通して信頼性のある空間解像度を調べてきた(岡本ほか, 日本惑星科学会秋季講演会 2016, 岡本ほか, 衝突研究会 2016). これによりシミュレーションの空間解像度が大きいほどイジェクタカーテンの形状は室内実験のそれと似ていることは定性的にわかったが, 定量的な比較は行えていなかった. そこでこれまでに行った室内実験と SPH シミュレーションの定量的な比較のため, 画像処理ライブラリ openCV を使い一連の画像処理を行ってイジェクタカーテンのエッジを抽出した. そして得られたエッジの位置とエッジの移動速度について室内実験と SPH シミュレーションで定量的な比較を行った.

画像処理として, 室内実験と数値シミュレーションで得られた画像の二値化をまず行い, その後イジェクタカーテンの輪郭抽出を行った. 二値化処理において, 二値化の閾値は室内実験で得られた画像には画素値を用いた一方, SPH シミュレーションの結果では SPH 粒子の数を閾値とした. すなわちセル内の画素値, または視線方向に含まれる SPH 粒子数が閾値より大きければ, そのセルは白画素に, 同じか小さければ黒画素にした. ここでセルとは室内実験で得られた画像空間を撮像した画像サイズ(400x250)で分割した領域のことを指す. 閾値の決定には画像の類似度を表す指標の一つである正規化相互相関係数を用いた(e.g. Bradski and Kaehler, 2008). 閾値を変化させてこの係数が大きな値をとるときの閾値を二値化の閾値として採用した. 次にこの二値化した画像を用いてイジェクタカーテンの輪郭を抽出した. 二値化処理後の画像をそのまま使って輪郭抽出をすると意図しないジグザグ形状やスパイク形状を抽出してしまう. そのため, モフォロジー処理を行うことで滑らかなイジェクタカーテンのエッジを得た後, その輪郭を抽出した. 得られたカーテンの輪郭を比較したところ, 弾丸粒子数が  $10^4$  個と  $10^5$  個の空間解像度での SPH シミュレーションでは明らかに実験結果を再現できてない一方, 弾丸粒子数が  $10^6$  個, 特に  $3 \times 10^6$  個の空間解像度でのシミュレーションでは, 標的表面を這って先行する成分(以下"Component 1")

と呼ぶ)とそれに続いて標的表面上向きに向かって放出される成分(以下”Component 2”と呼ぶ), そしてその境界部(以下”Kink”と呼ぶ)が観察され, 実験で得られたイジェクタカーテンの形状を再現できた. また定量的な比較のため, それぞれの時刻で標的表面から  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  方向にあるイジェクタカーテンのエッジと衝突点の距離を計測し, 最小二乗法を使ってエッジの移動速度を算出した. 室内実験と  $n_{\text{imp}} = 3 \times 10^6$  の解像度での SPH シミュレーションのエッジの移動速度は 15% 以内で一致した. 特に  $30^\circ$  以上の方向に進むエッジの移動速度は実験から得られたエッジの移動速度と良い一致を示した. これらの結果から弾丸粒子数を  $3 \times 10^6$  とした空間解像度での SPH シミュレーションによる高速イジェクタの空間分布と速度分布は室内実験によるそれと非常に近いことを示唆した. また,  $n_{\text{imp}} = 10^6$  のシミュレーション結果では,  $15^\circ, 30^\circ$  の角度では  $\pm 15\%$  以下で実験のエッジの移動速度と一致しており, Kink 周囲のカーテンエッジの空間・速度分布は  $n_{\text{imp}} = 10^6$  の解像度でも室内実験をよく再現していることを示唆した.

このように計算解像度が  $n_{\text{imp}} = 3 \times 10^6$  の SPH シミュレーションでは広い範囲で実験の高速イジェクタの空間・速度分布を良く再現できていると考えられる. そこで衝突後  $3\mu\text{s}$  における  $n_{\text{imp}} = 3 \times 10^6$  の計算解像度でのイジェクタカーテンのエッジを作る粒子の空間・速度分布を示した. これにより”Component 1”, ”Kink”部の物質は主に弾丸由来の物質である一方, ”Component 2”部は前方に弾丸由来の物質が占め, 後方に標的由来の物質が占めることがわかった. さらにこれらの粒子の放出角度分布を仰角,  $\theta$  と方位角,  $\phi$  を用いて示した. 標的由来の物質は主に  $30^\circ \leq \phi \leq 150^\circ$  方向に分布し, 方位角が大きいほど放出速度は遅くなる傾向があった. また, 弾丸由来の物質は主に  $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$  方向に分布し, ほぼ全て衝突の下流方向へ進むことがわかった. 特に衝突速度の 2 倍の速度を持つ弾丸由来の物質は  $\theta < 20^\circ, \phi < 60^\circ$  方向に分布することがわかった. これらの結果は, 衝突による天体間での物質輸送のその後の段階, すなわち大気通過や母天体脱出後の軌道進化などを考える上で必要となる高速イジェクタの速度や放出角度分布の初期条件として役に立つ.

※図についてはポスターの PDF ファイルをご参照下さい.