

「はやぶさ2」衝突の科学

高木靖彦（愛知東邦大学）

はやぶさ2プリプロジェクトチーム（JAXA）

探査機「はやぶさ」は、本年6月にカプセルが地球に帰還し、その中から小惑星「イトカワ」の物質が回収されるという成功裏にプロジェクトが終了しようとしている。一方、その後継機「はやぶさ2」は、2014年の打ち上げに向けて検討が佳境を迎えている。「はやぶさ2」では衝突によりクレーターを形成することにより、表面の熱的影響等を行っていない物質のサンプリングが検討されている。昨年の研究会においては、姿勢制御系、電源系、通信系などを持った重量300 kg程度

の独立した宇宙機が衝突する計画の検討が行われていることを紹介したが、現在は、母船搭載型の小型衝突装置が検討されている。これは、衝突装置は母船に搭載されて探査小惑星の近傍まで行った後に切り離され、母船が小惑星の陰に退避した後に、爆薬の燃焼により衝突体を発射するという方式である。この方式変更には、予算的な側面も大きかったが、科学的なトレードオフ(表1)の検討結果も反映されている。

表1. 独立型衝突機と搭載型衝突装置のトレードオフ

	独立型衝突機	搭載型衝突装置
衝突エネルギー	大きい (1.4×10^9 Joule)	小さい (4×10^6 Joule)
衝突場所	△ 小惑星半球のどこかには衝突する程度の精度	○ 100 m 程度で選定可能
衝突時期	× 衝突機の太陽周回軌道で決まる (2019年8月)	○ 着陸帰還機の小惑星近傍滞在中の任意時期
衝突物質	× 様々な物質が含まれる。特に推進残薬 (ヒドラジン)がサンプル分析に悪影響	○ 任意に決められる (銅)。爆薬の影響は微小

このトレードオフにおいて、衝突エネルギーを除いた部分に関しては、搭載型衝突装置の方が科学的に優位であることが示されている。したがって、問題になるのは衝突エネルギーが小さいということだけである。質量約2 kgの衝突体が約2000 m/secで衝突した場合に、内部物質のサンプリングを行うのに十分な大きさのクレーターを形成することが可能ならば、搭載型衝突装置で問題なく、むしろ優れていることになる。ここでは、どの位の大きさのクレーターが作られるかに関して、衝突研究会等でも紹介されている既存のデ

ータから推定した結果をまとめる。

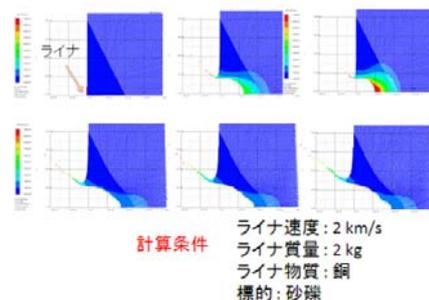


図1. dutodyneによるシミュレーション

(1) 数値シミュレーションからの推測

図 1 は、2 kg の銅のライナを 2 km/s で砂礫層に衝突させた時の様子を autodyne を用いて計算したものである。このような計算から、搭載型衝突装置により、直径 2 m、深さ 50 cm のクレーターが形成されることが推定される。

(2) スケーリング則からの推測

Holsapple & Housen による経験式から、形成されるクレーターの直径 R_c は以下のように表される：

$$\frac{R_c}{r} = 1.03 \left(\frac{g r}{v_i^2} \right)^{-0.17} \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{0.332}$$

ここで r はインパクタ半径、 g が表面重力、 v_i が衝突速度、 δ がインパクタ密度、 ρ が標的密度である。1999 JU3 (直径：922 m) の場合は、 $g = 2.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ であるから、形成されるクレーターの直径は 7.4 m となる。Holsapple & Housen による経験式は深さを導出していないので、直径の 1/5 を仮定すると 1.5 m となる。

(3) 微小重力実験からの推測

MGLAB で行った落下中のカプセル(図 2)内でのクレーター形成実験(図 3)の結果(図 4)からは、形成されるクレーターの直径が

$$D = 0.058E^{1/4}$$

となる。ここで、 D がクレーター直径 (m)、 E が衝突エネルギー (Joule) である。したがって、搭載型衝突装置により形成されるクレーターの直径は、2.6 m と予測される。

これらの結果から推定されるクレーター直径にはかなりの幅があるが、少なくとも 2 m のクレーターができる事を示している。現在検討が進められている母船の

着陸精度は 3 m 程度であり、この大きさのクレーターでも内部物質サンプリングの可能性を示している。また、近地球での熱変性の影響を受けていない深さまで到達していることを示している。したがって、「はやぶさ2」ミッションに必要な性能を有していると考えられる。

一方、衝突の科学の面からは、これらの推定のどれが正しいかを検証する実験としても意義が大きいものと捉えることができる。



図 2. MGLAB の落下カプセル



図 3. 微小重力下でのクレーター形成実験

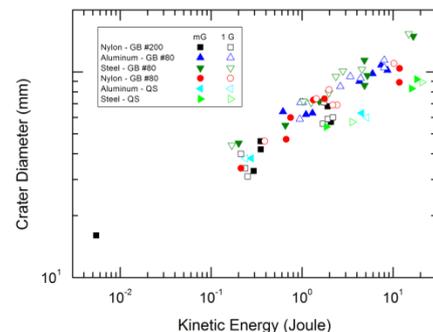


図 4. 微小重力下でのクレーター形成実験結果