

小惑星探査機はやぶさ2における小惑星模擬試料回収推定

○兵頭 拓真(横国大院) 岡本 千里(JAXA) 澤田 宏崇(JAXA)
百武 徹(横国大院) 國中 均(JAXA)

1. 諸言

1.1 小惑星探査機はやぶさ2

小惑星探査機「はやぶさ2」(図1)はC型小惑星1999JU3を目指して、2014年に打ち上げを予定している。C型小惑星には、地球の海の水や生命の起源と考えられる有機物が存在する可能性があり、これら採取し分析することは、生命起源の解明に繋がり重要である。生命起源の有機物の由来を特定するなど、小惑星の詳細分析には少なくとも100mg程の岩石試料が必要とされる。

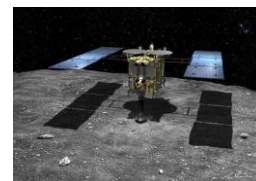


図1 はやぶさ2が小惑星1999JU3に到着する想像図

はやぶさ1と同様に、はやぶさ2ではどのような表面にも対応できるように、弾丸射出式を採用したサンプリング機構を搭載している。サンプリング機構^[1]は、主にサンプラーホーン、プロジェクタ、キャッチャーなどから構成される。サンプラーホーンは探査機の下に張り出した、長さ1m、直径~20cmの、円筒と円錐を組み合わせた形状をしている(図2)。ホーンの端が小惑星表面に接触すると、センサーが反応しプロジェクタに設置された金属製弾丸が発射されて表面を砕く仕組みとなっている。弾丸により砕かれ、飛散した衝突破片はホーンの中を反射しながら上昇し、試料回収容器であるキャッチャーに収容される仕組みである。キャッチャー内には、反射板と呼ばれる45°に傾いた金属板が取り付けられている。上昇した粒子は、この板を反射し、キャッチャー内に収容される。

1.2 1999JU3からのサンプリング

はやぶさ初号機サンプルを採取した小惑星イトカワは、直径約500mという小さな天体でありながら、その表面はレゴリス層(月面でも観察される細かな粉体層)で覆われていることが分かった。はやぶさ2が向かう小惑星1999JU3の表面も、小惑星イトカワと同様、レゴリス層が存在する可能性が高い。そこで、レゴリス層のはやぶさ初号機のサンプラーホーン開発時は、小惑星イトカワの表面模擬物質としてレンガなど一枚岩を用いて実験が行われており、レゴリスを用いた実験は主に行われていなかった。

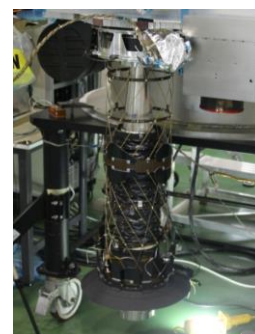


図2 サンプラーホーン

1.3 研究目的

レゴリスからの試料回収量や効率を明らかにするためには、小惑星表面に形成されるクレーターから放出される試料破片の放出角度、放出速度、放出位置を知ることが必要である。小惑星レゴリス層を模擬した粉体ターゲットへのクレーター形成実験を実施した専攻研究として、Cintala et al(1999)^[2]ら、Yamamoto et al(2009)^[3]らなど、多くの実験が実施されてきた。先行研究では、クレーターから放出されるイジェクタカーテン(放出破片の集合体)を観測している。実際は、このイジェクタカーテンは、個々の粒子の集まりである。個々の放出された破片の運動を見ると、それぞれの放出速度や放出角度は異なるため、小惑星からの試料回収量や効率を明らかにするためには、個々の破片の運動に対して、詳細な解析が要求される。

そこで、本研究は、小惑星微小重力下でのレゴリスから試料回収量・回収効率の推定を行うために、各粒子の挙動を調査し、それをもとに最終的には小惑星

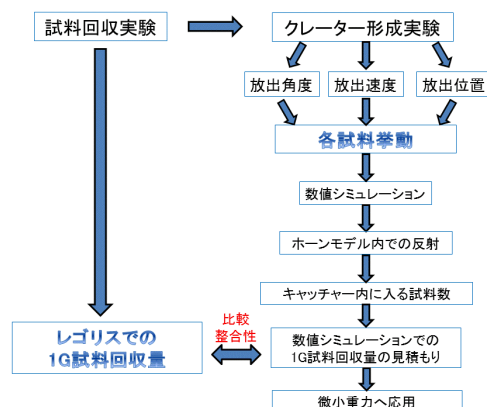


図3 研究フローチャート

微小重力下でのレゴリスから試料回収量の推定を行うことを研究目的とする。各粒子の挙動の調査は地上実験において、1G 下で実施し、そのデータをもとに、小惑星微小重力下でのレゴリスから試料回収の推定は数値シミュレーションによって行う。

具体的には、初期値として、地上実験より計測したクレーターの様々な位置から放出される破片の速度や放出角度を用い、その後の破片運動を数値シミュレーションにより計算することで、微小重力下でのサンプラーホーン内での破片の運動を見積もり、キャッチャー内に入る試料数を明らかにする（図 3）。実験により、1G 下でのレゴリスの試料回収量を把握し、数値シミュレーションでの試料回収量の見積もりと比較・整合性を合わせることにより、より高精度な数値シミュレーションを作成することが期待できる。将来的には、レゴリス試料回収モデルを応用し、様々な小惑星表面状態からの試料回収量の推定を行う。

2. 実験方法

小惑星レゴリスからの破片回収量・効率を推定するために、実験では、フライトモデル（FM）相当のサンプラーホーンを用いた 1G 下における小惑星模擬破片回収実験を実施する。さらに、クレーター形成過程を調べるために、クレーター形成実験を実施し、放出される粒子の観察を行う。今回は紙面上の関係から、クレーター形成実験のみ記載する。

2.1 実験条件

衝突実験は JAXA に設置された火薬銃を使用し、1G 真空下(<60Pa)で行った。弾丸は先端形状が球形で直径 8mm、5g のタンタル（FM 相当）を使用した。小惑星模擬試料として粒径 1mm のガラスビーズを約 15kg 分用いた。実験として、レゴリス模擬試料回収実験と模擬試料へのクレーター形成実験を行った。



図 4 ガラスビーズ容器

2.2 レゴリス模擬試料へのクレーター形成実験

プロジェクタから弾丸が射出されターゲットに着弾しクレーターが形成される。その現象観察を行い、個々の放出破片の挙動を詳細に調べるため、クレーター形成実験を行った（図 5）。クレーターリングの際、破片放出の振り舞いを分かり易くするために、試料表面に 5mm のスリットを空けられたアルミ板を付け、高速度カメラを用いて、破片運動を観察した（撮影速度：6000fps）。光源としてメタルハライドを背面から照らすシャドウグラフ法を用い、エジェクタブルームの断面を観察し、粒子挙動を二次元的に観察した。実験後、クレーター直径、深さを計測した。弾丸速度は 200(m/s)で行った。

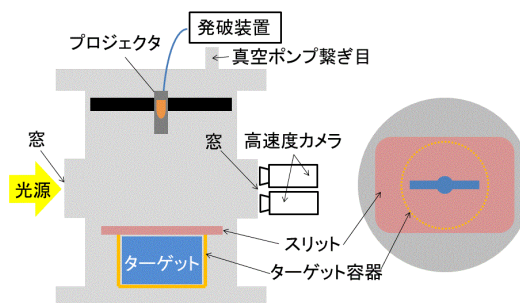


図 5 クレーター形成実験の実験装置

2.3 解析方法

クレーター形成実験で撮像した粒子の放出挙動を、衝突点からの距離に応じてターゲット粒子を時間ごとに一点ずつ追いプロットし、座標データを計測した。弾丸衝突点からの距離、放出速度、放出角度を解析した（図 6）。

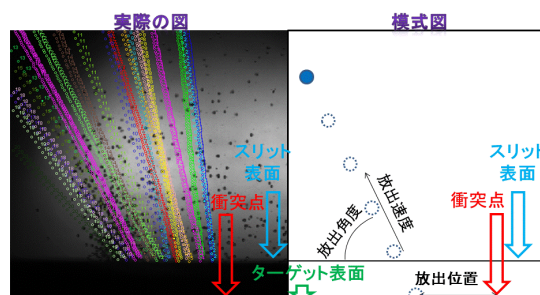


図 6 撮像した画像とその模式図

3. 実験結果

3.1 クレーター形成実験

図7は、規格化距離(r/a)と放出速度(Ve)の関係を示す。規格化距離は衝突点からの距離(r)を弾丸半径(a)で割ったものであり、放出粒子の初期位置を示す。規格化距離が増加するにつれ粒子の放出速度が減少し、放出速度と規格化距離には負の相関があることが分かった。実験結果を最小二乗法によりフィッティングし実験式を求めた。(実験式は図7中に記載)。本研究結果は、先行研究の実験結果をよく一致している。

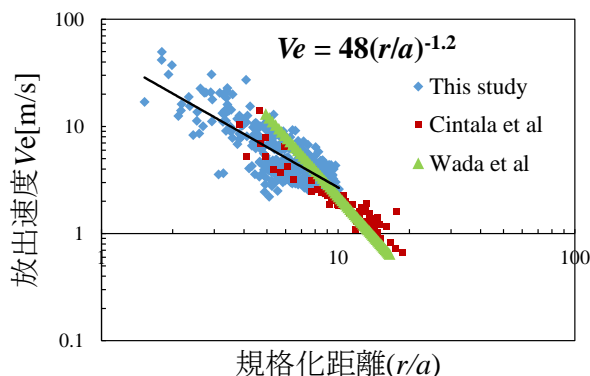


図7 規格化距離と放出速度

Wada et al は、数値シミュレーション結果 (Wada et al., Icarus 180 (2006)[4]). Cintala らは、実験結果である(Cintala et al., Meteoritics & Planetary Science.34(1999)[2]).

4. シミュレーション手法

次に、小惑星微小重力下でのサンプラーホーンでの破片回収量・効率を推定するために、剛体球モデルを用いた数値シミュレーションを作成した。初期条件として、実形状のサンプラーホーンの下部ホーン直下に衝突実験と同じサイズ、物性の直径 1mm のソーダ石灰球を 9000 個配置させ、これをターゲットとする。球の敷き詰め方はランダムである。粒子層は一層であり、計算では粒子を同時刻に放出させた。これは衝突点近傍の方が早い段階で放出されるが高速であるため、各距離における粒子放出時間差は無視できると仮定したためである。粒子間衝突は、剛体球モデルを用いている。剛体球モデルでは、粒子は剛体と考え、相互侵食されない。衝突事象は、その粒子速度が変化している間、瞬時に発生する。衝突時に粒子運動の変化が与えられた反発係数を有する 2 つの粒子の衝突の衝撃方程式を解くことにより計算される。粒子の放出速度は、クレーター形成実験により、図7で得られた実験式を数値シミュレーションの初期条件としてインプットし計算を行った。粒子放出角度・サンプラーホーン壁面条件の2点を変更しパラメトリックスタディ解析を行った。粒子の放出角度は 35~65° まで 5° 刻みに与えた。また、サンプラーホーン壁面との衝突は、跳ね返り係数が接線方向 1.0、法線方向 0.5~0.8 を与えた。重力は 0G, 1G で行い、粒子挙動・回収量を比較した。0G, 1G 下において、粒子の移動を計算し、粒子間衝突がある場合は、その計算処理を行う。この粒子の移動から粒子間衝突の間の繰り返し計算を行い、キャッチャーに到達した粒子をそれぞれカウントする。数値シミュレーション結果を図 8a,b に示す。今回、代表的なものとしてサンプラーホーン壁面の跳ね返り係数法線方向が 0.5 の結果を示す。図 8a から、重力 1G が、法線方向跳ね返り係数 0.5 の時、35~50 度の低・中角度の粒子は衝突点からの距離が 30mm 以内の粒子だけが回収されていることが分かった。図 8b から、重力 0G、法線方向跳ね返り係数 0.5 の時、低・高角度の粒子共に衝突点からの距離が 67mm までの粒子が回収されていることが分かる。同様の傾向が法線方向跳ね返り係数 0.8 の時も観察された。これより 1G 下では遠方にある粒子は回収されていないことが分かった。1G 下では、遠方の粒子は速度が遅いため、重力に負けてしまうので捕獲できなかったが、0G 下では、ホーン直下にあるほぼ全域の粒子が捕獲できることが示唆された。

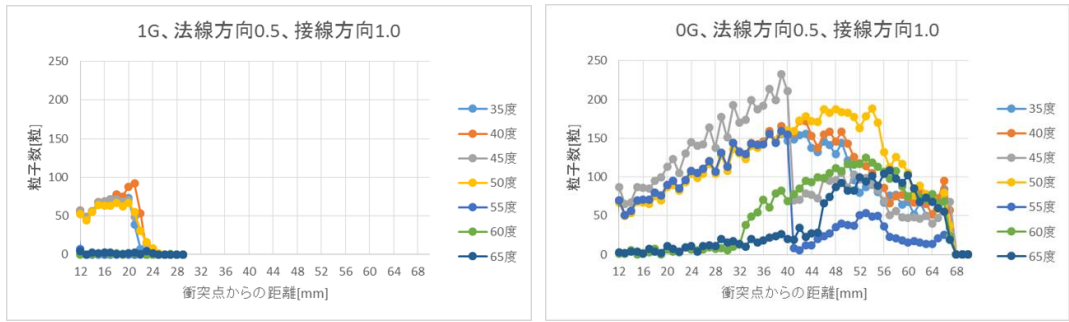


図 8a 1G, 法線方向 0.5, 接線方向 1.0 図 8b 0G, 法線方向 0.5, 接線方向 1.0
 数値シミュレーション結果(各放出角度における衝突点からの距離における捕獲粒子数)

5. 考察

放出角度と衝突点からの距離の関係を数値シミュレーション結果とクレーター形成実験で得られた結果を比較する。図 9 は、クレーター形成実験における規格化距離と放出角度の結果である。一つのプロットは衝突実験で得られた一つの粒子の実験データを表している。図の黄領域は数値シミュレーションより得られた 1G で捕獲される粒子の存在領域、緑領域は同じ数値シミュレーションより得られた 0G で捕獲される粒子の存在領域を示している。この図において、実験データは同じ規格化距離でも放出角度が異なっており、幅を持っていることが分かる。これは、同じ規格化距離から放出される粒子でも、高い放出角度の粒子は表面付近から放出し、低い放出角度の粒子はより深い場所から放出した粒子と推定された。このことから、図の 0G 下(緑領域)では、表面から深い領域の粒子まで、捕獲されると考えられる。小惑星において深い領域に存在する粒子は、宇宙風化の影響が少ない可能性があり、はやぶさ 2 の試料回収では宇宙風化の少ない粒子が捕獲できるかもしれない。

以上より衝突実験およびシミュレーションを実施し、サンプラーホーンによる、1G, 0G 下での試料回収量の見積を行った。本研究から、1999JU3 のような微小重力の天体下では、45~50 度の中角度粒子の回収量が最もよく、ホーン直下全域に存在する粒子が回収されることが分かった。また、表面に存在するレゴリス粒子だけでなく、深部の粒子も回収できる可能性があることが期待できる。総括として、小惑星レゴリスからの試料回収は微小重力で、充分可能であることが分かった。

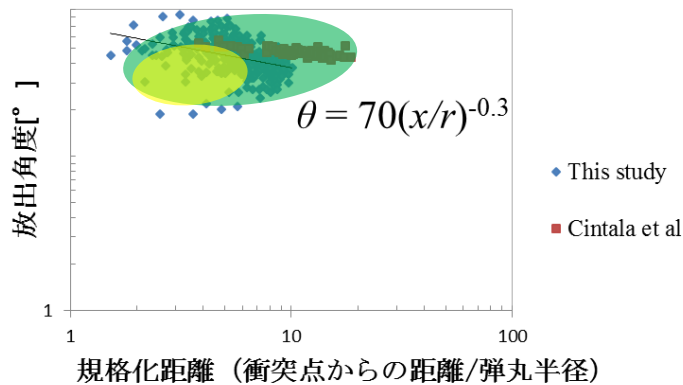


図 9 規格化距離 x/r (衝突点からの距離/弾丸半径)と放出速度[m/s]

参考文献

- [1] Yano et al., *Science*. 312 (2006), 1350-1353
- [2] Cintala et al., *Meteoritics & Planetary Science*. 34(1999), 605-623
- [3] Yamamoto et., *Icarus*. 203(2009), 310-319
- [4] Wada, K. et al., *Icarus*, Vol. 180, pp. 528-545, 2006.