

小惑星探査機はやぶさ2における小惑星模擬試料回収実験

○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、これらを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。

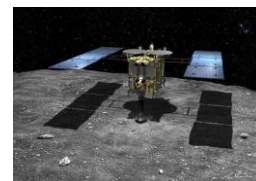


図1 はやぶさ2が小惑星1999JU3に到着する想像図

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。

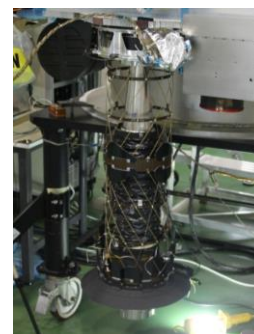


図2 サンプラーホーン

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

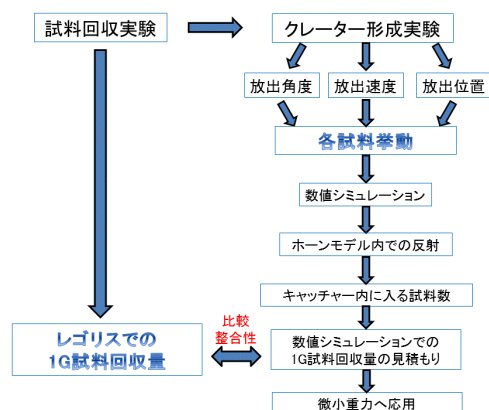


図3 研究フローチャート

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よう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。

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 レゴリス模擬試料回収実験

タンタル弾丸を用い小惑星表面模擬試料への衝突実験を地上において実施する。真空チャンバを用い、この中に探査機の FM 相当のサンプラーホーンを設置し実験を行った。サンプラーホーンは上部ホーン(A2024)、中部ホーン(バクトラン繊維)、下部ホーン(A2024)の3つのホーンから構成されている。また、上部ホーンの上にキャッチャー(試料収納容器)である FM 相当のキャッチャーを設置した。サンプラーホーン、プロジェクタ、ガラスビーズ容器を真空容器内に設置した(図4および図5)。ここで、プロジェクタは弾丸射出装置のことであり、火薬の量を調整することにより、弾丸射出速度を変化させている。サンプラーホーンの底面とガラスビーズ容器の表面は約数 mm 程度の隙間をあきらかにようにホーンを設置した。プロジェクタから弾丸が射出されターゲットに着弾すると、クレーターが形成し放出された破片はホーン内壁を反射しながらキャッチャーに導入され回収される。衝突後、回収粒子の個数および質量を計測した。また、破片がキャッチャー内に回収される様子を高速カメラによりその場観測を実施した(撮影速度: 3000fps)。エネルギーによる回収量の違いを調べるため、弾丸速度は 100~300(m/s)まで変化させて実験を行った。

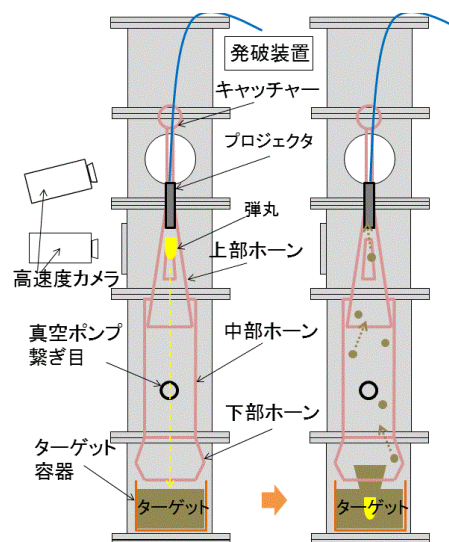


図5 試料回収実験の実験装置

2.3 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6)。クレーターリングの際、破片放出の振る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。

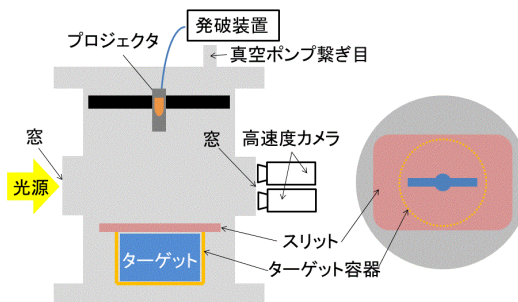


図6 クレーター形成実験の実験装置

2.4 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づつ追いプロットし、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7)。

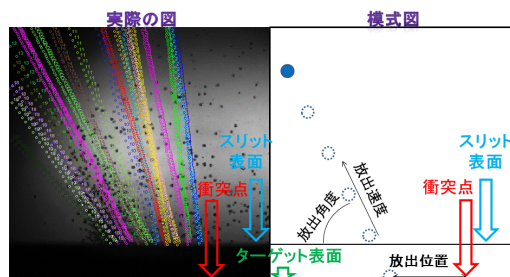


図7 撮像した画像とその模式図

3. 実験結果

3.1 試料回収実験

図8は、キャッチャーでの試料回収量と弾丸運動エネルギーの関係を示す。運動エネルギーが増加するにつれ試料回収量も増加し、運動エネルギーと試料回収量には正の相関があることが分かった。また、実際のはやぶさ2は弾丸射出速度が~300m/sなので、運動エネルギーは225[J]である。図8から、地球重力下でははやぶさ2の運動エネルギー以上において、目標値以上を回収できることが分かった。実際の小惑星上では地球重力よりも大幅に低い重力であるため、1G下で得られた試料回収量より多くの試料を採取できると予想される。

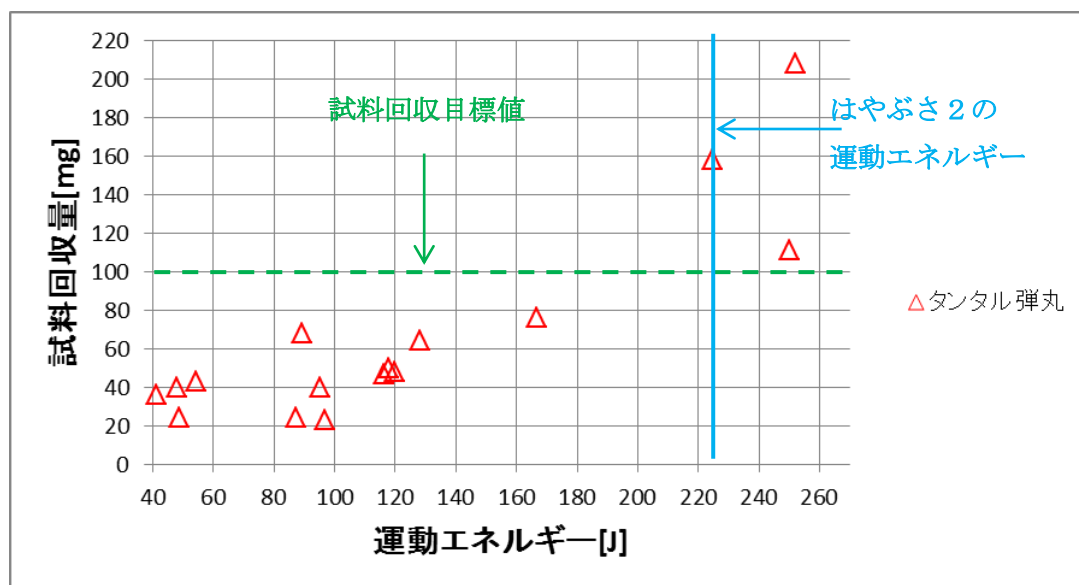


図8 タンタル弾丸における試料回収量と運動エネルギーの関係

試料回収量は、サンプラーホーン上部に設置したキャッチャーに収納された試料質量である。運動エネルギーは、計測した弾丸射出速度とタンタル弾丸の質量を用いて算出した。上記緑点線ははやぶさ2の試料回収目標値である100mgを示す。また、青実線ははやぶさ2の弾丸の運動エネルギーを示す。

3.2 クレーター形成実験

図9は、放出速度と規格化距離の関係を示す。規格化距離が増加するにつれ放出速度が減少し、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。最小二乗法によりフィッティングし実験式を求めた。また、図9右は、放出角度と規格化距離の関係を示す。速度の結果と比較して、ばらつきがおおきくなるものの、規格化距離が増加するにつれ放出角度が減少することが分かった。ここで、放出角度と規格化距離の関係図において、破片の持つ速度の違いに着目し、四つの速度域（～5m/s、5～10m/s、10～20m/s、20m/s～）に分類した。これらをそれぞれ最小二乗法によりフィッティングし、各速度領域を持つ破片に関して実験式を求めた。

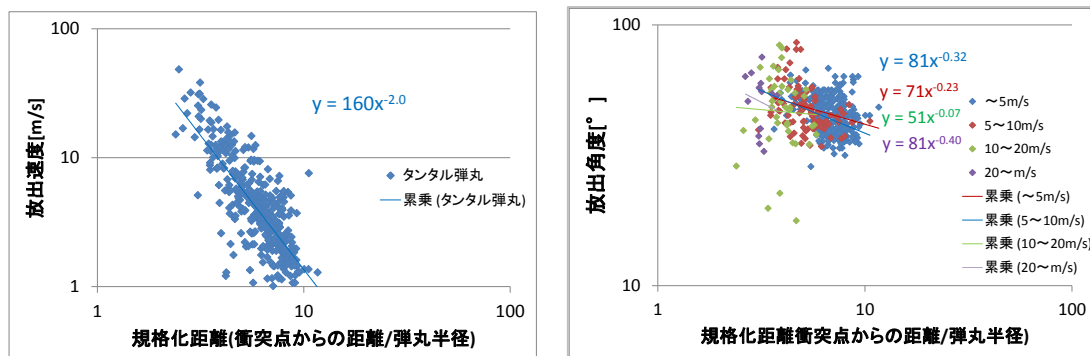


図9 タンタル弾丸における放出速度と規格化距離の関係、図9 タンタル弾丸における放出角度と規格化距離の関係
放出された試料全体の約80%を解析した結果で、一点一点のプロットは放出された個々の破片を示す。ここで規格化距離とは弾丸衝突点からの距離を弾丸半径で割った値であり、この値が大きいかほど弾丸衝突点から離れることを意味する。グラフは両対数表示である。グラフ内の実線は、最小二乗法によりフィッティングした結果である。

4. 考察

クレーター形成実験の放出速度、放出角度および規格化距離の関係から得られた実験式を用いて、キャッチャーに回収可能な放出破片の放出条件を見積もった。上記のように、四つの速度域における放出角度(Y)と規格化距離(X)の経験式を得た。この中で一例として、速度5～10m/sでの実験結果として得られた実験式 $Y = 71X^{-0.23}$ の実験式を用い、破片回収条件の見積もり結果を示す。速度5～10m/sの粒子は規格化距離3～10の範囲で存在する(図9参照)。この規格化距離の $X=3\sim 10$ を実験式に代入すると、その規格化距離における角度が求まる。この場合、角度Yは、 $35^\circ \sim 55^\circ$ の範囲に相当する。

規格化距離3～10の粒子に、それぞれ対応する放出角度をもつと仮定し、ホーン内壁との衝突し、上部ホーンまで到達する条件の計算を行った。計算の、上部ホーン、下部ホーンに衝突した破片は全反射すると仮定した。一方、中部ホーンはべく路端という布素材であるため、反発係数が非常に小さい。そこで、中部ホーンに衝突した破片はすべて落下すると仮定した。また、上部ホーンまで到達した破片は最終的に大部分がキャッチャーに收容されると仮定する。見積もりの結果、規格化距離4～5かつ角度の場合 $49^\circ \sim 52^\circ$ の粒子が上

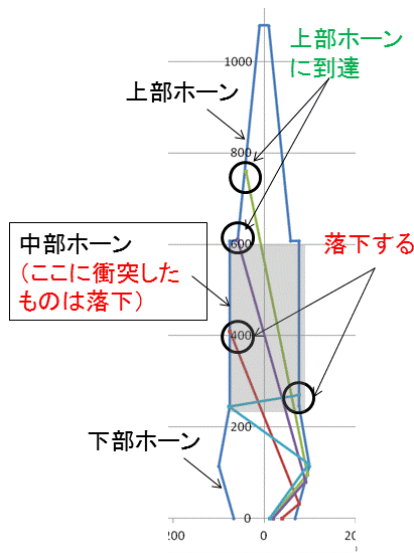


図10 放出粒子のサンプラーホーン内での挙動見積もり
速度5～10m/sの実験式の結果を用いた。図の実線と規格化距離(X)の関係について、青線：X=3、緑線：X=4、紫線：X=5、赤線：X=10を意味する。ここで、X=4.5の粒子は上部ホーンに到達することが分かった。

部ホーンに到達することが分かった。

一例として、速度 5~10m/s の放出粒子のサンプラーホーン内での挙動を見積もったが、他の三つの速度域でも同様に計算を行った。その結果を図 11 に示す。縦軸、横軸の黄色い領域が交差する点線で囲まれた部分に存在する角度・距離・速度条件を持つ破片のみが、上部ホーンまで到達できるという見積もり結果となった。図 11 から、放出角度が 50° ~55° , かつ放出速度 5~10m/s の粒子が上部ホーンに到達する可能性が高いことが分かった。

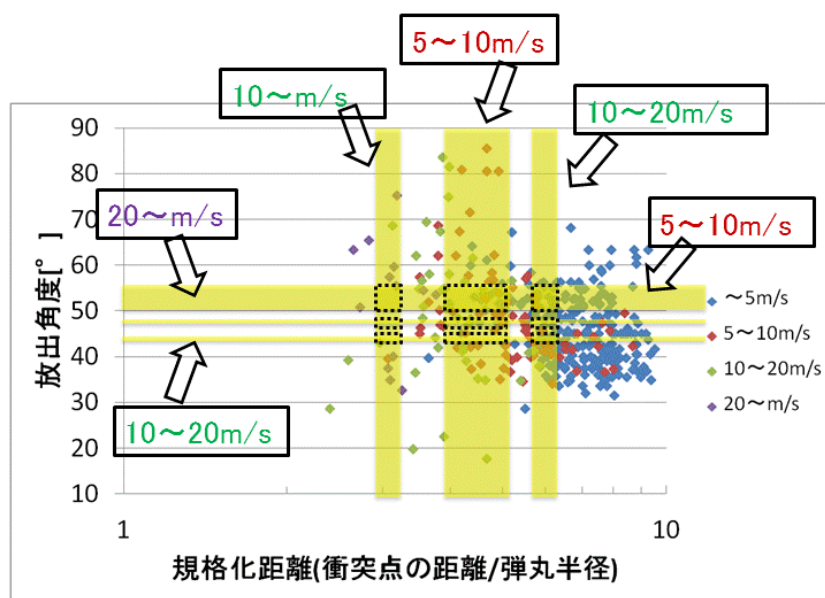


図 11 破片の上部ホーン到達条件

縦軸に平行な黄色領域は各放出速度領域の存在分布を、横軸に平行な黄色領域は各放出速度における放出角度領域の存在分布を示す。縦横の黄色領域が重なる部分の内、その放出速度を持つプロットの粒子が上部ホーンに到達することを示す。

5. 結論と今後の課題

試料回収実験において、はやぶさ 2 と同じ射出条件である 5g タンタル弾丸、弾丸速度 300m/s で 1G 下において 160mg 程度回収できることが分かった。実験結果と比較するため、数値シミュレーションで 1G での回収量を見積もる予定である。

またクレーター形成実験において、エジェクタブルーム断面内の個々の粒子を解析し、放出角度、放出速度、放出位置のパラメータを得た。これにより、規格化距離と放出角度・速度の経験式を得た。これらを初期値として、サンプル回収モデルを構築する予定である。

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