

はやぶさ2における小惑星模擬試料回収実験

○岡本 千里(JAXA), 兵頭 拓真(横国大), 澤田 弘崇(JAXA), 矢野 創(JAXA), 國中 均(JAXA), 百武 徹(横国大), 橘 省吾(北大)

はじめに

小惑星探査機「はやぶさ2」は小惑星 1999JU3 からのサンプルリターンを行うため、2014 年に HII-A ロケットで深宇宙への打ち上げを予定している。C 型小惑星である 1999JU3 には、その小惑星由来と考えられる隕石の分析から、地球の海や生命の起源と考えられる有機物が多数存在する可能性が示唆されている。よって、その試料を採取し分析することは、生命起源の解明に繋がるような大変重要な情報をもたらすことが期待される。

はやぶさ2 では、はやぶさ1 号機[1]と同様に、どのような小惑星表面状態にも対応できるように、弾丸射出方式を用いたサンブラホーンという試料回収装置を搭載している(図1)。サンブラホーンは、探査機本体の下部に設置されており、ホーン先端が小惑星表面に接触した信号により、ホーン上部に設置された火薬銃(プロジェクタ)から金属製のプロジェクトイルが発射され、小惑星表面を破碎・飛散させ、放出した破片を試料回収容器(キャッチャー)に収納する仕様(弾丸射出方式)となっている。

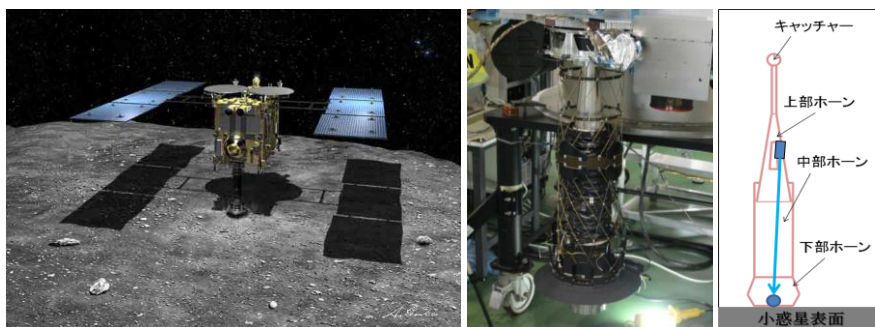


図1 はやぶさ2探査機とサンブラホーン

左図は、はやぶさ2が小惑星に着陸したイメージ図。中央図はサンブラホーン写真で右図はその模式図。ホーンは左図のように探査機の下に張り出した、長さ1m、直径20cm程の円筒状の構造で、下部、中部、上部ホーンおよびキャッチャーを組み合わせた形状をしている。下部および上部はアルミからなる円筒で中部ホーンはベクトランからなる。

試料採取量や採取効率は、探査機が設置する小惑星表面状態に大きく依存する。はやぶさ1号機が探査を行った小惑星イトカワの表面状態は、岩石が砕かれた細かな粉体層(レゴリス層)に覆われていることが分かった。レゴリス層は、小天体が天体間衝突を繰り返すことにより形成されるとされ、はやぶさ2が向かう小惑星1999JU3の表面も、レゴリス層で覆われている可能性が高い。先行研究では、小惑星レゴリス層へのクレータ形成過程を解明するため、ガラスビーズなどの粉体ターゲットへの様々な実験、数値シミュレーションが行われてきた[e.g., 2, 3]。

はやぶさ2の試料採取機構は、弾丸により小惑星表面にクレータを形成し、放出される粒子をキャッチャーにて回収する仕組みであるため、小惑星表面から放出される粒子の放出条件や放出後の挙動を知ることが、非常に重要となる。また、これら放出粒子は、キャッチャーに到達するまでに、ホーン内壁を複数回反射し、上昇するため、サンブラホーン構造と放出粒子の挙動を知ることによって、試料回収量を推定できる。そこで、本研究では、小惑星レゴリスから試料回収量を推定するために、各放出粒子の放出角度や速度などの挙動を明らかにし、ホーン内を粒子がどのように移動するのか定量的に明らかにする。研究手順として、小惑星模擬試料への衝突実験を実施し、粒子運動を実験的に計測した。さらに試料回収量を調べるため、探査機に搭載されるフライトモデル(FM)相当のサンブラホーンを用い、小惑星模擬試料の回収実験を実施した。今後、これらの実験より得られた結果を、小惑星微小重力下で得られる結果に拡張するため、数値シミュレ

ーションを行い、微小重力下での試料回収量推定の数値モデルを構築する予定である。

実験方法

本研究では、試料回収量を推定するために、FM 相当のサンプルホーン・プロジェクタ・プロジェクタイトルを使用し、レゴリス模擬試料回収実験を行った。衝突実験は 1G・真空下 (60Pa 以下) で実施した。実験で使用したプロジェクタイトルは探査機搭載のプロジェクタイトルと同様、先端が球形のタンタル (直径 8mm, 質量 5g) を使用した。小惑星レゴリス模擬試料として直径 1mm のガラスビーズを直径、深さともおよそ 300mm の試料容器に ~15kg 充填し、容器中央付近に着弾するように設置した。サンプルホーンは上部ホーン、中部ホーン、下部ホーンから構成されている。下部ホーンが、試料表面に近接するようにホーン一式を固定した (図 2 参照)。下部ホーンおよび上部ホーンはアルミ製であり、中部ホーンはベクトラン製である。放出粒子は下部、上部ホーンに当たるとその高反発係数によって反射し上昇する一方、中部ホーンに当たると反発係数が低いために、粒子が上昇せず、落下する (サンプルホーンは、探査機打ち上げ時に中部ホーンを折りたたんで打ち上げ、打ち上げ後、宇宙で中部ホーンを伸展する仕組みとなっている)。プロジェクタイトルの射出速度は 100~300m/s で行われた。高速度カメラ (E2) を用いてプロジェクタイトルのその場観測を実施し、射出速度を計測した (撮影速度: 10000f.p.s.)。実験後、回収粒子質量を計測した。粒子がキャッチャーに回収される様子についても高速度カメラで撮像を実施した (撮影速度: 3000f.p.s.)。

さらに、放出粒子の挙動 (放出速度、角度など) を明らかにするために、図 3 のようなクレータ形成実験を実施した。レゴリス模擬試料回収実験と同様の試料・プロジェクタ・プロジェクタイトルを使用し、形成されるクレータ、放出される粒子のその場観察を行った。観察には、高速度カメラ (IDT NR-4) を使用した (撮影速度: 6000f.p.s.)。ここで、クレータ形成時のイジェクタプルーム断面を 2 次元的に解析するため、試料表面の直上に 5mm のスリット幅を開けた金属板を設置した。金属板は、放出される粒子運動に影響が出ないように、試料表面からおよそ 10mm 上に設置された。クレータリングの様子は、光源としてメタルハライドランプを背面から照らすシャドウグラフ法を用いてその場観察が実施された。イジェクタプルームの断面を詳細に解析し、粒子の個々の運動を二次元的に明らかにした。実験後は、クレータ直径、深さを計測した。クレータ形成実験では、弾丸射出速度を 200m/s で行った。図 4 は、クレータ形成実験で撮像した放出粒子のその場観測動画のスナップショット (左) およびその模式図 (右) を示す。右図は粒子位置の時間進化を模式図で表わしたもので、図 4 左で同色のプロットは、同じ粒子が時間 (時間 $\Delta t = 0.17\text{ms}$ ごと) とともに位置が変化している様子を示す。得られた粒子画像から、様々な初期放出位置 (放出される粒子の試料表面に存在していた位置と弾丸衝突点間の距離) の

各粒子を時間ごとにそれらの位置を解析することで、粒子放出速度、放出角度を明らかにした。

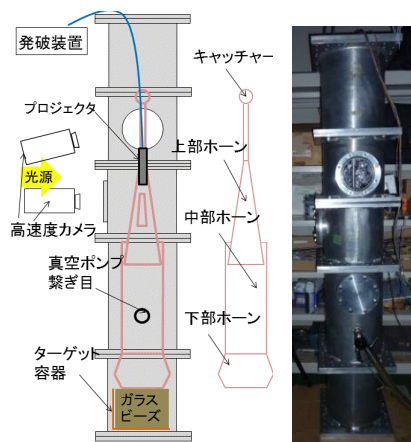


図 2 レゴリス回収実験装

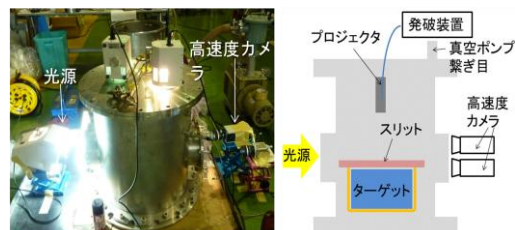
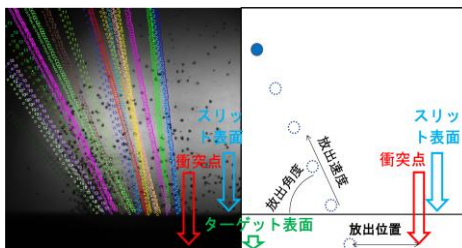


図 3 クレータ形成実験装置



実験結果および考察

図 4 撮像した画像とその模式図

プロジェクトイル質量一定で、射出速度を 100~300m/s に変化させ、レゴリス模擬試料回収実験を行った。図 5 は、試料回収量とプロジェクトイルの運動エネルギーの関係を表している。運動エネルギーの増加とともに試料回収量も増加する関係が見てとれる。ここで、はやぶさ 2 における弾丸射出速度は~300m/s なので、運動エネルギーは 225J となる。225J において、回収量 100mg 以上を達成している。はやぶさ 2 の回収試料の化学分析に必要な量は 100mg (試料回収目標値)とされ、1 G 下においても、分析に必要な質量以上が採取できた。小惑星微重力下では、1 G 下の数倍以上の回収量が見込めると考えられ、数 100mg 以上の回収量が期待される。

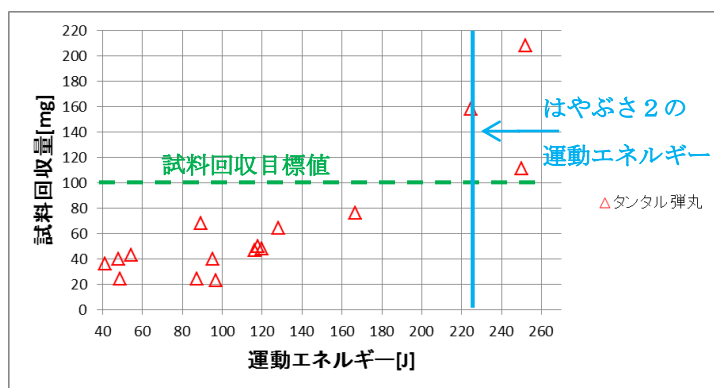


図 5 試料回収量と運動エネルギーの関係

試料回収量とは、キャッチャーに回収された 1mm ガラスビーズ試料の総質量のこと。図中の点線ははやぶさ 2 の試料回収目標値を示している。また、実線ははやぶさ 2 におけるプロジェクトイル運動エネルギーを示す。

図 6 は、放出速度と規格化距離 (プロジェクトイル半径で割った衝突点からの距離) の関係を示している。規格化距離が増加する (衝突点からの距離が遠くなる) につれ、放出速度が減少することが分かる。図 6 から、放出速度と規格化距離の関係を最小二乗法によりフィッティングし、実験的に明らかにした。得られた実験式は以下のようなものである。

$$v_i = a (x/r)^{-b} \quad (1)$$

v_i : 粒子放出速度, x/r : 規格化距離, a, b : 係数

直径 1mm のレゴリス模擬試料において、 $a=160$, $b=2.0$ であった。放出速度は距離の 2 乗に反比例することが分かった。

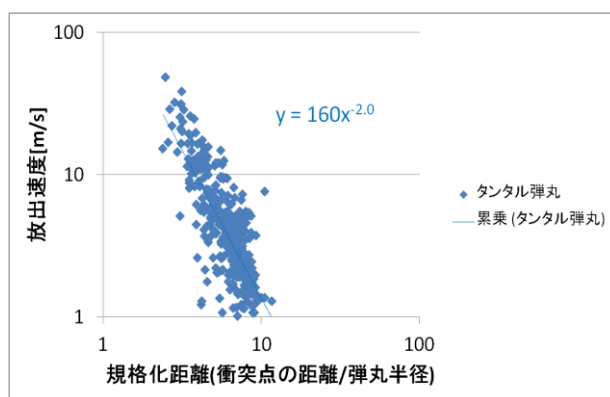


図 6 放出速度と規格化距離の関係

次に放出角度と規格化距離の関係を示す (図 7)。規格化距離が増加するにつれ放出角度が減少するという結果が得られ、放出角度と規格化距離には負の相関があることが分かった。速度と比較してデータのばらつきが大きい結果となったが、粒子放出角度は、粒子間相互作用の影響が出やすく、粒子間衝突による反射などによって、放出粒子角度が変化した可能性が示唆される。ここで、粒子の放出速度と角度の関係を詳細化するために、放出速度~5m/s, 5~10m/s, 10~20m/s, 20m/s~の速度を持つ粒子ごとの放出角度と規格化距離の関係について調べた。それぞれの速度域を持つデータについて、最小二乗法によりフィッティングし、実験式を求めた。

$$\theta = c (x/r)^{-d} \quad (2)$$

θ : 粒子放出角度, x/r : 規格化距離, c, d : 係数

c, d の値は, 放出速度 $\sim 5\text{m/s}$, $5\sim 10\text{m/s}$, $10\sim 20\text{m/s}$, $20\text{m/s}\sim$ についてそれぞれ $c=81, 71, 51, 81$, $d=0.32, 0.23, 0.07, 0.04$ である. 速度が大きくなるにつれ, 傾きが急勾配であることが分かる. ばらつきが大きいものの, それぞれの速度領域において, 放出角度と規格化距離の間には, 相関関係が認められた.

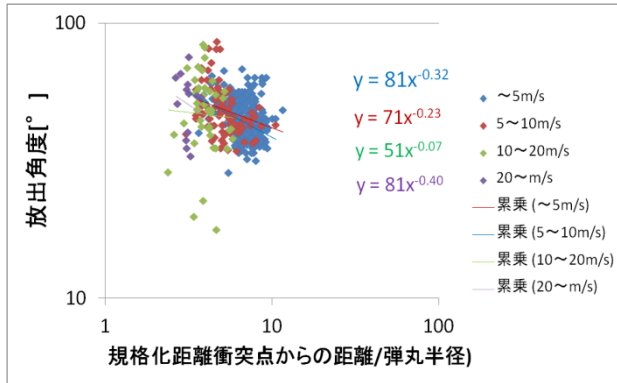


図7 放出角度と規格化距離の関係

ここで, どのような放出条件を持つ粒子がキャッチャーに回収できるのかを知るために, 各速度の粒子に対して, 放出後のホーン内壁との反射から, 上部ホーン到達条件を計算した. 放出速度 $5\sim 10\text{m/s}$ の放出粒子では, 規格化距離 $3\sim 10$ の粒子の多くがこの速度を持つが, 見積もりの結果, そのうち, 規格化距離 $4\sim 5$ から放出され, かつ放出角度 $49^\circ\sim 52^\circ$ の粒子が上部ホーンに到達することが分かった. 上部ホーンまで上昇した粒子の多くは一部を除き, 最終的にキャッチャーまで導入される. 計算する際, 上部ホーン (アルミ), 下部ホーン (アルミ) に衝突した粒子は全反射し, 中部ホーン (ベクトラン) に衝突した粒子は反発係数が低いいため, 上部まで到達せず落下すると仮定した.

まとめ

本研究結果より, はやぶさ2探査機のプロジェクトイル射出条件で小惑星試料を回収した場合, 1G 下であっても, $\sim 100\text{mg}$ 以上の回収量が見込めることが分かった. 一方, 小惑星表面状態は未知であり, 様々な条件における試料回収量の見積もりが必要となる. そこで本研究結果から得られた放出粒子の角度・速度の実験結果を初期値として, サンプル回収数値モデルを構築する予定であり, 様々な試料条件にて, 微小重力下での試料破片の回収条件を調べることを予定している.

参考文献

- [1] Yano et al. (2006) *Science* 312, 1350-1353
- [2] Cintala et al. (1999) *MAPS* 34, 605-623
- [3] Wada et al. (2006) *Icarus* 180, 528-545