

小惑星探査機はやぶさ2搭載サンプラーホーン内の粒子挙動に関する研究

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

1. 緒論

始原天体であるC型小惑星を調べることは、宇宙空間での生命材料物質の探求、及び初期地球での生命材料物質の進化の解明につながるものであり重要である。「はやぶさ2」計画ではC型小惑星1999JU3からのサンプリングを目指している。サンプリング手法として、様々な小惑星表面状態に対応できるよう、弾丸射出による試料の放出・回収方法が考案された。1999JU3の表面状態は未知であるため、予測される様々な小惑星表面からのサンプリング効率を調べる必要がある。特に、イトカワの表面で見られた様なレゴリス層は小惑星表面で広く存在する可能性があるためレゴリス層からの試料採取効率を調べるのは重要である。そこで本研究では、小惑星微小重力下でのレゴリスからの試料回収量・回収効率の推定を行うために、実験的・数値的にサンプリング時に放出される各粒子の挙動を調査し、小惑星微小重力下でのレゴリスからの試料回収量の推定を行うことを目的とする。各粒子の挙動の調査として、はやぶさ2と同じ環境を模擬したサンプラーホーンを用いた弾丸射出実験を1G下において実施し、その得られた実験データをもとに、小惑星微小重力下でのレゴリスからの試料回収量の推定を数値シミュレーションによって行う。

2. 弾丸射出実験

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下における弾丸射出実験を実施する。ここでは、クレーター形成過程を調べるために、放出される粒子の観察を高速度ビデオカメラを用いてその場観測を実施した。弾丸射出実験は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。小惑星レゴリス模擬試料として粒径1mmのガラスビーズを約15kg分用いた。はやぶさ2と同等形状のプロジェクタからタンタル弾丸が射出され、レゴリス模擬ターゲットに着弾し、クレーターが形成される。クレーターリングの際、ejecta flowを詳細に解析するために、試料表面に5mmのスリット幅が空けられたアルミ板を付け、高速度カメラ二台(IDT, E2)を用いて、flow断面における各粒子の運動を観察した(撮影速度:6000fps)。撮像では、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、個々の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。弾丸速度ははやぶさ2のサンプリング時と近い200~300(m/s)で行った。

図1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1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。

3. 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1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ー解析を行った。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

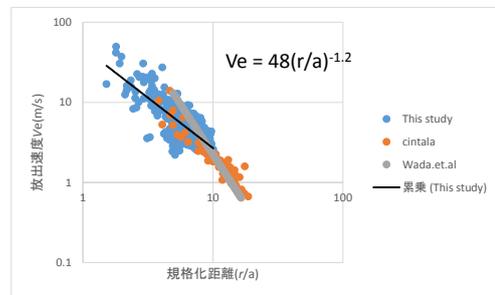


図1 規格化距離と放出速度

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

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 2a,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 2a 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 2b 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。

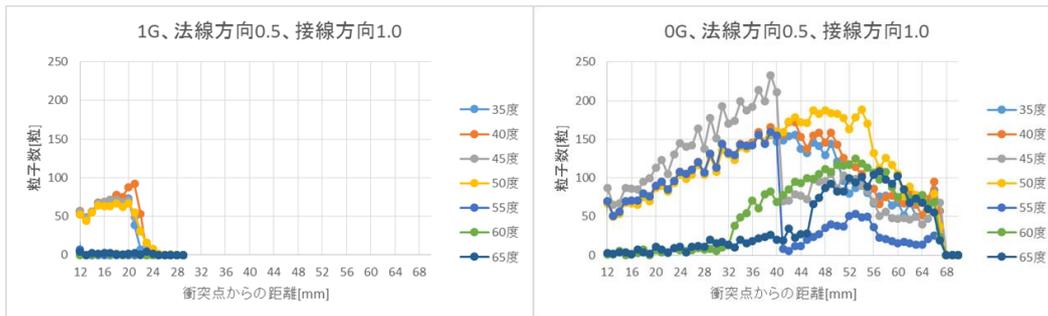


図 2a 1G, 法線方向 0.5, 接線方向 1.0 図 2b 0G, 法線方向 0.5, 接線方向 1.0
数値シミュレーション結果(各放出角度における衝突点からの距離における捕獲粒子数)

4 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 3 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。

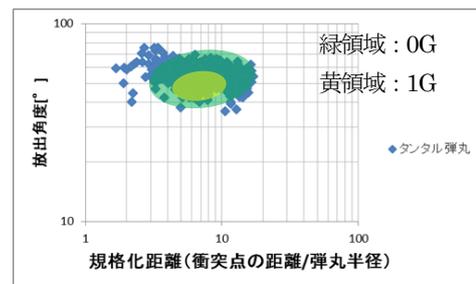


図 3 規格化距離と放出角度 (実験値)

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。

参考文献:

Cintala et al., *Meteoritics & Planetary Science*. 34(1999),605-623
Wada et al., *Icarus* 180(2006), 528-545