

ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査： 表面サンプリング実験

○大木優介，松本純（東京大学），青木順（大阪大学），岡本千里（神戸大学），
矢野創，森治（宇宙航空研究開発機構）

Trojan Asteroid Exploration Mission by Solar Power Sail: Experiment of Sampling for the Surface of the Asteroid

Key Words: Sampler Horn, Projectile

Abstract

This paper contributes to Trojan asteroid exploration mission using 50m wide solar power sail which is being planned by Japan Aerospace Exploration Agency. This spacecraft is equipped with a 100kg-weight-class lander which will land on an asteroid and perform in-situ analysis. To analyze volatile matter included by the sample is the most important science mission of asteroid using mass spectrometer. In order to accomplish this science mission it is required to induce the sample of asteroid to very small sample box that is only 4mm square. This paper is a report the experiment which verifies the feasibility that satisfies this science requirement.

1. 背景

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、50m級のソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査計画を検討している(図1)¹⁾。ソーラーセイルは、一面、薄膜太陽電池で覆われており、これによって発電される電力で、太陽光が弱い木星圏でイオンエンジンを駆動し、惑星間を航行する。燃料効率の良いイオンエンジンを利用することで、外惑星領域である木星トロヤ群小惑星からの往復航行を実現する。

ソーラーセイルの膜面は50m程度と大きく、直接小惑星に着地することが困難なので、本ミッションでは、100kg程度の小型着陸機を本体に搭載し、着陸機が小惑星表面へ軟着陸後、小惑星サンプルの採取、そしてその場分析を行う。もっとも重要な理学ミッションは、小惑星サンプルに含まれていると期待される、氷などの揮発性物質を質量分析器で分析することである。これを達成するため、着陸機は、小惑星表面サンプルと地下サンプルを採取し、採取したサンプルを質量分析器まで搬送する。はやぶさ、はやぶさ2ミッションと異なる点は、レゴリスを掘削し地下サンプルを採取する点と、サンプルを質量分析器へ搬送する点であり、これらは新規技術となるため、地上実験が必要である。本論文は、後者の表面サンプルを採取し質量分析器へ搬送できることを実証する実験報告である。

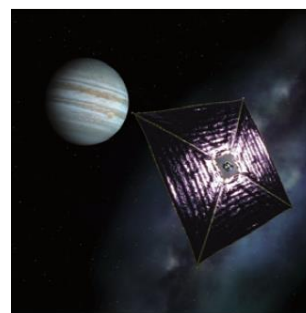


図1 ソーラー電力セイル

2. 実験目的

2.1. サンプリングデバイス

着陸機に搭載したサンプリング用デバイスについて述べる。先述のように本ミッションでは表面サンプルと地下サンプルの両方を採取する。図2は、サンプリングデバイスを表した着陸機の概略図であり、5つの要素から成り立つ。

- (a) サンプラーホーン(表面サンプリング用)
- (b) 弾丸発射機構
- (c) ニューマチックドリル(地下サンプリング用)
- (d) サンプル搬送機構(リボルバー)
- (e) 質量分析器

デバイス(a)、(b)は、はやぶさミッションでも用いられており、本実験でも、はやぶさミッションの実験で用いられたミニチュアサンプラーホーンと弾丸発射機構を用いた。デバイス(c)は新規デバイスであり、目下開発、実験が行われ、これまでに試作品の開発、

それによる砂の 1m 掘削することに成功している²⁾。(a)~(c)のデバイスにより採取された表面および地下サンプルは、両方ともサンプル搬送機構である「リボルバー」装置に導入され、これが質量分析器へサンプルを搬送する。リボルバーについては次セクションで述べる。

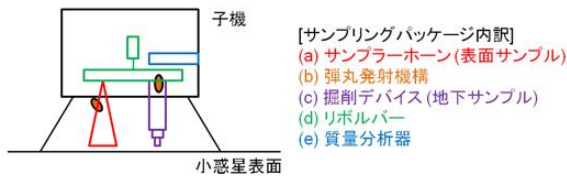


図2 サンプルングデバイス

2.2. サンプル搬送機構

サンプルを搬送するため、新規デバイスである「リボルバー」装置の開発が行われている。図3にリボルバーのBBMを示す。リボルバーは、円筒構造の内部に、複数のサンプルボックスおよびヒーターが備えられ、また円筒全体を回転させるモーターが取り付けられている。弾丸によって巻き上げられたサンプルは、リボルバーのそれぞれのサンプルボックスに収集される。採取したサンプルを取りこぼさないように、サンプルボックスの中は、金属メッシュが充填されている(図4左)。サンプリングごとにモーターによりサンプルボックスを含む円筒は回転し、採取されるサンプルは別々のボックスに分けられ、その後質量分析のためにそれぞれのボックスはヒーターによって加熱される。

図5に示すように、各サンプルボックスの直径は4mm程で、サンプルの取りこぼし防止のため円筒を介したボックスの入り口はわずか2mmとなっている。ボックスを200~300°C程度に熱するため、着陸機の限られた電力ではボックスの体積を大きくすることは難しく、この大きさが最少の要求値となっている。本実験の目的は、弾丸射出によって採取した表面サンプルを、確実に2mm程度の入り口へ導入し、1mg程度収集することである。1mg程度というのは質量分析に必要な要求値である。サンプルの質量分析器への搬送実証において、極めて小さなスケールの入り口に確実にサンプルを誘導することが最大の難関であるので、この成立性を示すことが重要である。

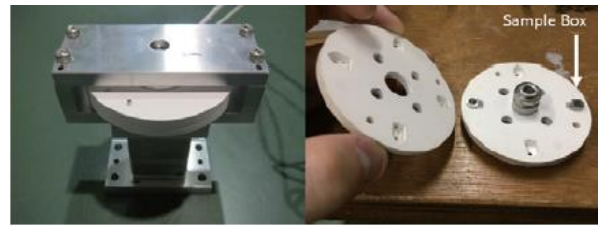


図3 リボルバーBBM

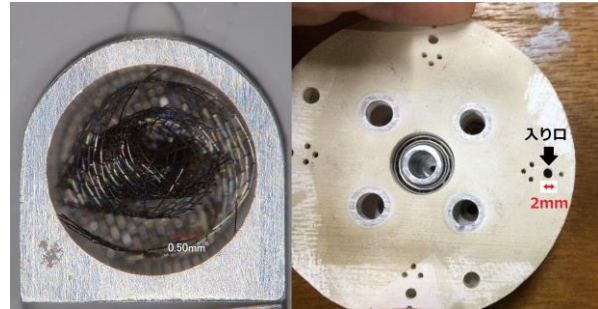


図4 サンプルボックスとその入り口

3. 実験コンフィギュレーション

図5に実験コンフィギュレーションと全体図を示す。サンプラーホーンはははやぶさの4/10スケールのミニチュアモデルを用い、小惑星表面を模擬した対象サンプル、弾丸射出機構、リボルバーとサンプル誘導管を真空チャンバ内に、図のように設置する。対象サンプルは表1に示す4種類のものを用いた。レンガは岩盤を、ガラスビーズはレゴリスを模擬している。また、リボルバーは図3に示したBBMを用いた。サンプル誘導管は、サンプラーホーンの上部和リボルバー入り口のインターフェイスで、先端で7mm系から3mm系に絞るようなテーパ構造になっている。

また、実験はPart1, Part2の二度にわたって行っており、Part1ではサンプルの収率が悪かったことから、Part1,2間でデバイスの改善を行った。変更点は以下の2点である(図6)。

- (1) サンプルボックスの中身を、1種類の金属メッシュから、網目の粗いものと細かいものの2種類の金属メッシュにしたことで、一度入ったサンプルを落としてしまうことを防いだ。
- (2) サンプル誘導管の先のテーパを緩やかにしたことで、先端でサンプルがつかまってしまいうチョークの効果を緩和した。

これらの変更後に行ったPart2では、サンプルの収率は70%に向上した。次章に実験結果を示す。

表 1 対象サンプルの種類

サンプル番号	対象サンプル
A	レンガ
B	355-500 μm 径ガラスビーズ
C	180-250 μm 径ガラスビーズ
D	75-90 μm 径ガラスビーズ

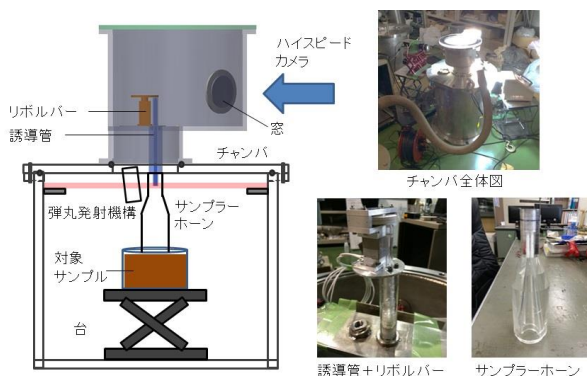


図 5 実験コンフィギュレーション

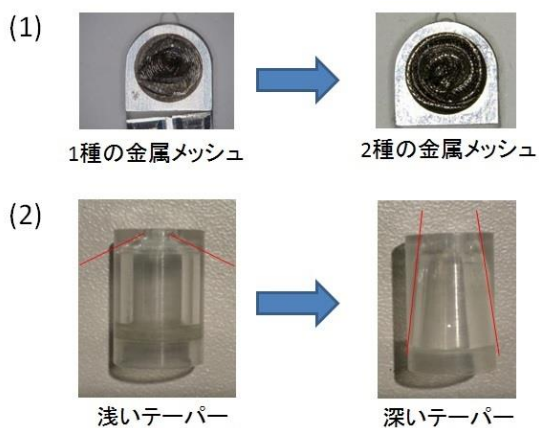


図 6 実験 Part1 から Part2 での変更点

4. 実験結果

4.1. 実験 Part1

表 2 に実験 Part1 の結果を示す。弾丸は 8 回発射した。捕獲サンプルの有無は顕微鏡によって目視で行い、またサンプルボックスの質量変化は収量の指標となる。サンプル捕獲成功は 8 回中 4 回であった。図 7 にサンプル誘導管からリボルバーへサンプルを受け渡している様子の一例を示す。また図 8 に実験後のサンプルボックス中身の写真を示す。図 8 を見ると、1-A-1 では、粉末状に砕かれたレンガが金属メッシュにびっしりと附着していることがわかる。金属メッシュがサンプルを捕獲する効力を有している。しかし、1-B-1 では逆に金属メッシュがサンプル捕獲の障壁となり、まったくサンプルを捕獲できていな

い。また、1-B-2 では細かく砕かれたガラスビーズの捕獲に、1-C-1 ではガラスビーズそのものの捕獲に成功している。サンプル A と C、つまり岩盤を模擬したレンガと 180-250 μm 径ガラスビーズでは十分量のサンプル捕獲に成功したが、サンプル B と D、355-500 μm 径ガラスビーズと 75-90 μm 径ガラスビーズではサンプル捕獲率は 30%と低かった。これらの原因は先述のように、サンプルボックス内の金属メッシュ構造と、サンプル誘導管の先端構造にあると考え、各々図 7 のように変更し、実験 Part2 を行った。

表 2 サンプル収集率(実験 Part1)

実験番号	サンプル番号	捕獲サンプルの有無	質量変化 (mg)
1-A-1	A	○	+3.59
1-B-1	B	×	—
1-B-2		○	+0.15
1-B-3		×	-0.30
1-C-1	C	○	—
1-D-1	D	×	+0.17
1-D-2		×	+0.03
1-D-3		○	+0.27



図 7 サンプル誘導管からリボルバーへサンプルを受け渡す図

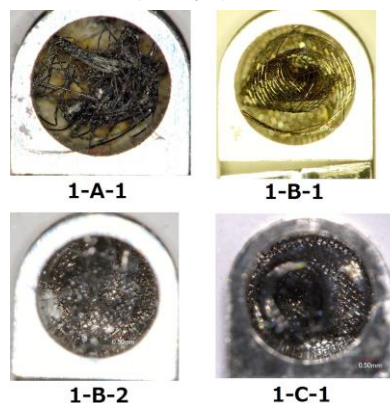


図 8 実験後のサンプルボックスの中身(実験 Part1)

4.2. 実験 Part2

表 3 に実験 Part2 の結果を示す。サンプル捕獲成功は全 7 回の弾丸射出中、5 回であった。図 10 に実験後のサンプルボックスの中身の様子を示す。2-A-1 で、実験 Part1 で十分量採取に成功したレンガで、失敗したのがわかる。これは砕けたレンガの大きな破片がリボルバー入り口につまってしまったせいである。これはサンプル誘導管の出口とリボルバー入り口との間隔に依存するが、本実験ではこの間隔を管理していなかった。2-BCD-1 は、サンプル B,C,D を質量比 1:1:1 に混ぜたものを対象としており、これは様々なサイズの粒子が混ざっている小惑星レゴリスを模擬したもので、4.22mg の十分量の捕獲に成功した。図 10 から、このケースにおいて 75-90 μm 径ガラスビーズとともに、もっとも大きい 355-500 μm 径ガラスビーズも捕獲できていることがわかる。一方、サンプル B、355-500 μm 径ガラスビーズのみでは、1 回成功、1 回失敗という結果となっている。この結果から、4mm 角の小さなサンプルボックスには 355-500 μm 径の大きなサンプル捕獲の成功率は高くないが、実際のレゴリスのように、小さな粒子に混ざった状態であれば、小さな粒子が溶媒となり、大きな粒子の捕獲もされやすくなることが示唆される。また、実際のレゴリスはより細かい粒子で構成される可能性が高いので、サンプル D、75-90 μm 径ガラスビーズが十分量の捕獲を達成したことは大きな成果である。

先述の実験デバイスの変更点を踏まえ、実験 Part2 では Part1 より、サンプル捕獲率が上がっており、成功したときの捕獲量は、サイエンス要求である、1mg に到達する結果となった。

表 3 サンプル収集率(実験 Part2)

実験番号	サンプル番号	捕獲サンプルの有無	質量変化 (mg)
2-A-1	A	×	+0.15
2-BCD-1	B,C,D 質量比 1:1:1	○	+4.22
2-B-1	B	○	+0.74
2-B-2		×	+0.03
2-C-1	C	○	+2.46
2-D-1	D	○	+5.07
2-D-2		○	+2.17

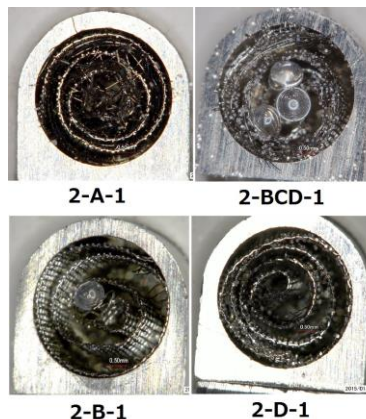


図 9 実験後のサンプルボックスの中身(実験 Part2)

5. 結論

本実験では、小惑星表面を模擬した 4 種類の異なるサンプルに対し、はやぶさサンプリングと同様に弾丸射出によってサンプリングを行い、入り口径がわずか 2mm のサンプルボックス内へのサンプル誘導を行った。途中、デバイスの改良をし、弾丸射出 7 回中 5 回の高い成功率を収め、250 μm 径以下のサンプルにおいては 100%採取できることが実証された。また採取に成功したいずれの場合も、サンプル採取量がサイエンス要求である 1mg に到達する結果となった。岩盤を模擬したレンガにおいては、大きな破片がサンプリングの障壁になることがあるが、これを避ける改善策は、サンプル誘導管からリボルバー入り口の距離を管理し、破片を横に逃がし、かつ十分量のサンプルを捕獲できる最適な距離を実験から導くことや、サンプラーホーンの中に金属網を設け、大きな破片は上昇できないようにするなどが考えられる。

本実験により、ソーラー電力セイルミッションのサイエンス要求を満たす、弾丸によるサンプリングが実証された。

参考文献

- 1) Osamu Mori, et.al, “Jovian Trojan Asteroid Exploration by Solar Power Sail-Craft”, 30th ISTS, 2015-k-14, Kobe, July 2015
- 2) Jun Matsumoto, Yusuke Oki, Jun Aoki, Hajime Yano, Yoji Shirasawa and Osamu Mori, “Development of Sampling Package for Trojan Asteroid Exploration Mission”, 30th ISTS, 2015-k-15, Kobe, July 2015