

# 小惑星探査機「はやぶさ」 搭載サンプル採取機構

矢島 暁

小惑星探査機「はやぶさ」は、数々の苦難を乗り越え、2010年6月13日に無事地球への帰還を果たした。このニュースは各報道機関にて大きく取り上げられ多くの国民に感動を与えたが、このはやぶさには当社が開発に参画した小惑星サンプル採取機構が搭載されていた。小惑星サンプル採取機構に課せられたミッションは、(1) 小惑星に弾丸を打ち込み破碎された表層部（サンプル）を衛星内部に導き、(2) 衛星内部でサンプルを分離しキャッチャと呼ばれる容器に格納し、(3) キャッチャを回収カプセルに搬送し真空密封を行う、という非常に複雑かつ高度なものであったが、これらのすべての動作が成功し所定の機能を満足したことが確認されている。また、回収カプセル内には小惑星由来の微量の粒子が入っていたことも確認されており、現在（独）宇宙航空研究開発機構にて詳細な分析が行われている。

キーワード：小惑星探査機「はやぶさ」、サンプル採取機構、ホーン部、サンプリング部、打ち込み式サンプリング方式、接地柔軟性、NEA（非火工品アクチュエータ）、微粒子回収

## 1. まえがき

はやぶさは、（独）宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所（JAXA）が開発した工学実験衛星であり、太陽系小惑星イトカワに着陸し、表層部（サンプル）を採取し地球に持ち帰ることを目的として、2003年5月9日内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた。図-1にははやぶさの外観写真を図-2にははやぶさの構成および主仕様を示す。はやぶさは打上げ後にリアクションホイール故障、地球との通信断絶、イオンエンジン故障など種々のトラブルに見舞われたことから、地球帰還は当初予定の2007年より延期されたが、これらのトラブルを克服し2010年6月13日に無事地球帰還を果たした。

また、地球に帰還した回収カプセル内部からは微粒

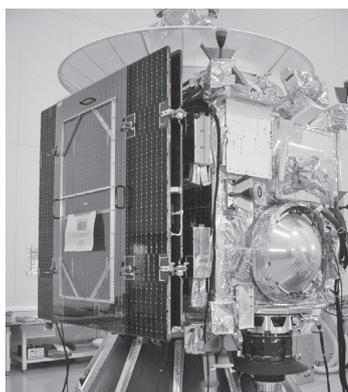
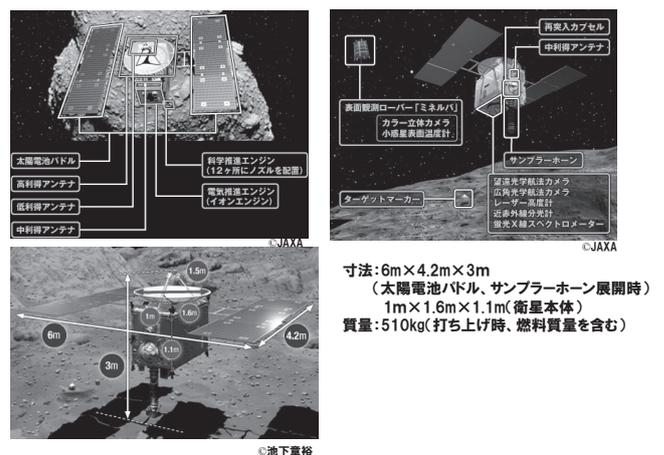


図-1 はやぶさ外観写真



子が発見され、これらはイトカワ由来のものと断定され、現在JAXAにて詳細な分析が行われている。表-1に、はやぶさの打上げから地球帰還までの主要イベントの履歴を示す。

はやぶさにおける工学的検証項目は以下の4点であり、当社はJAXAおよび日本電気(株)と共同で④のサンプル採取技術確立のためのサンプル採取機構の開発を行った。

- ①惑星間航行用のイオンエンジンの実証
- ②光学情報に基づく自動・自律的な位置制御システムの確立
- ③惑星間軌道からのカプセル再突入、回収技術の確立
- ④小惑星表面からのサンプル採取技術の確立

表一 1 はやぶさの打上げから地球帰還までの履歴

2003年5月	M-V-5号ロケットにより打上げ
2004年5月	地球スイングバイ 小惑星イトカワに向かう
2005年9月	小惑星イトカワまで20 kmの地点に到着
2005年11月	小惑星イトカワに降下, 世界初の小惑星軟着陸に成功 2回タッチダウン後離脱
2005年12月	地球との交信断絶
2006年1月	地球との交信復活
2007年1月	サンプル採取機構の回収カプセルへの搬送成功
2010年4月	地球帰還に向け軌道修正
2010年6月	地球帰還 サンプル回収
2010年11月	採取した微粒子が小惑星イトカワ由来のものと判明

本報では, このサンプル採取機構の詳細および軌道上での実績について報告する。

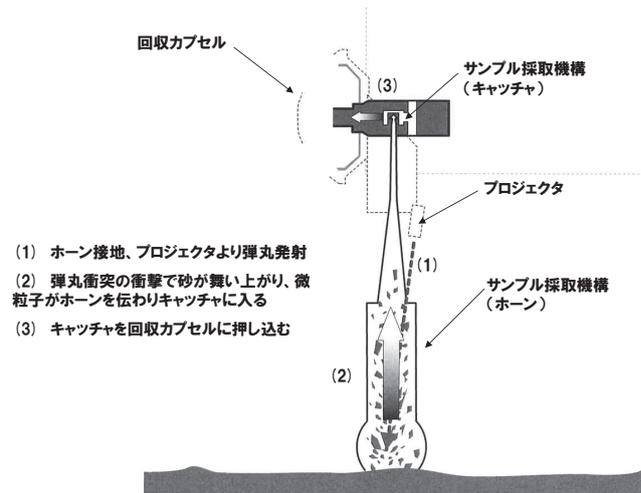
## 2. サンプル採取機構の詳細

### (1) 要求機能

開発に当たり, 小惑星サンプル採取機構に対して提示された要求機能を以下に示す。

- ①小銃（プロジェクタ）より発射されるプロジェクタイルにより小惑星表面を破碎すること
- ②破碎され飛散した小惑星表層の破片（サンプル）を筒状のホーンを介して衛星内部の捕集容器（キャッチャ）に導くこと
- ③サンプルを捕集容器（キャッチャ）内に2回に振り分け格納すること
- ④サンプルの格納されているキャッチャを回収カプセル内の真空コンテナに搬送し, コンテナ内に収容し固定すること
- ⑤真空コンテナをシールし, コンテナ内の気密を保つこと

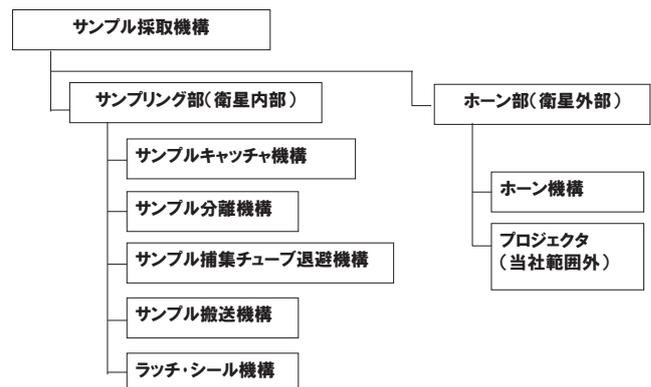
①の小惑星表面破碎のプロジェクタおよびプロジェクタイル開発はJAXAにて実施された。開発時は小惑星の表面状態は不明であったことから, いかなる表面状態にも対応可能であり, かつ微小重力環境下で成立する撃込み式サンプリング方式が開発された。図一3に, 撃込み式サンプリング方式を示す。本方法はプロジェクタイルをプロジェクタより撃ち出し小惑星表面を破碎させ舞い上がってくるサンプルを採取するという方法であり, 複数回にわたる無重力実験により十分な収集能力があることが確認された<sup>1)</sup>。その他②から⑤については当社にて開発を行った。



図一3 撃ちこみ式サンプリング方式

### (2) 構成および機能・性能

図一4に, (1)の要求機能を受け開発したサンプル採取機構の構成を, 表一2に機能および性能を, 図一5および図一6にサンプル採取機構外観図を示す<sup>2)</sup>。



図一4 サンプル採取機構の構成

サンプル採取機構は衛星内部に設置されるサンプリング部と衛星外部に設置されるホーン部により構成される。サンプル採取機構の主な特長を以下に示す。

- ①高い動作信頼性（NEA（Non-Explosive Actuator, 非火工品アクチュエータ）およびばねによる駆動機構）
- ②アルミ合金/マグネシウム合金採用による軽量構造（全体質量 約8.0 kg）
- ③サンプル通過部に不純物混入防止のため純アルミコーティングを施工
- ④ホーン部に高強度繊維および特殊バネを使用し, 小惑星接地時の柔軟性を実現

サンプリング部はサンプルキャッチャ機構, サンプル分離機構, サンプル捕集チューブ退避機構, サンプル搬送機構およびラッチ・シール機構から構成され,

表-2 サンプル採取機構の機能及び性能

機構	機能	性能 (注: 数値はノミナル値)
サンプリング部	サンプルの捕集, 格納, 回収カプセルまでの搬送, サンプルの真空シール	寸法: 290 mm (W) × 410 mm (H) × 280 mm (L) 質量: 3.1 kg
(1) サンプルキャッチャ機構	捕集したサンプルの格納	最大粒径: 10 mm のサンプル格納 サンプル収納容積: 70 cm <sup>3</sup>
(2) サンプル分離機構	捕集したサンプルのサンプルキャッチャ機構内での分離	サンプル分離室数: 2室 回転方式による採取室の切り替え
(3) サンプル捕集チューブ退避機構	サンプル捕集後の, サンプルキャッチャ機構からの回転チューブの退避	退避ストローク: 72 mm
(4) サンプル搬送機構	・ サンプルキャッチャ機構及びサンプルキャッチャ機構内に格納されたサンプルの, 回収カプセル内真空コンテナまでの搬送 ・ サンプルキャッチャ機構搬送後の搬送ばね力の解除 ・ ラッチ・シール機構のアクチュエータ駆動用電源ワイヤーの切断	搬送ストローク: 161 mm
(5) ラッチ・シール機構	・ 真空コンテナに対しての真空シール ・ 衛星からの回収カプセル分離後, 地上での回収/サンプル取出しまでの真空コンテナの気密保持	真空コンテナ内圧力レベルの保持: 1.33 Pa ( $1 \times 10^{-2}$ torr) 以下 (空気分圧レベル)
ホーン部	採取したサンプルをサンプリングまで導く	寸法: $\phi$ 350 mm × 1,000 mm (L) 質量: 4.9 kg
(1) ホーン機構	・ 衛星下面から 1,000 mm の位置において, 破碎した表層の破片 (サンプル) を捕集しキャッチャに導く	ホーン下部開口径: $\phi$ 150 mm 構体下面からの長さ: 1,000 mm



図-5 サンプル採取機構 (サンプリング部) 外観写真

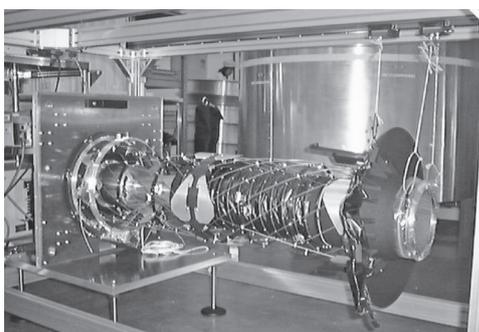


図-6 サンプル採取機構 (ホーン部) 外観写真

またホーン部はホーン機構およびプロジェクタ (当社範囲外) から構成される。各機構の詳細を次に示す。

#### ① サンプルキャッチャ機構

サンプルキャッチャ機構は, 捕集したサンプルを格納する機能を有する。サンプルキャッチャ機構はキャッチャ本体, カバー, 仕切板, サンプル漏洩防止

板, 回転筒およびコンタミネーションクーポンなどにより構成される。キャッチャ本体はアルミ合金製であり, カプセル内に設置される真空コンテナにできる限り多くのサンプルが格納可能なよう, 下部の一部がフラットな円筒構造となっている。内容積は約 70 cm<sup>3</sup> である。キャッチャ本体内部は 2 回の捕集のサンプルが混合しないよう, 仕切板により分離された 2 室に個別にサンプルを捕集できる構造となっている。図-7 に, サンプルキャッチャおよびサンプル分離動作概念図を示す。

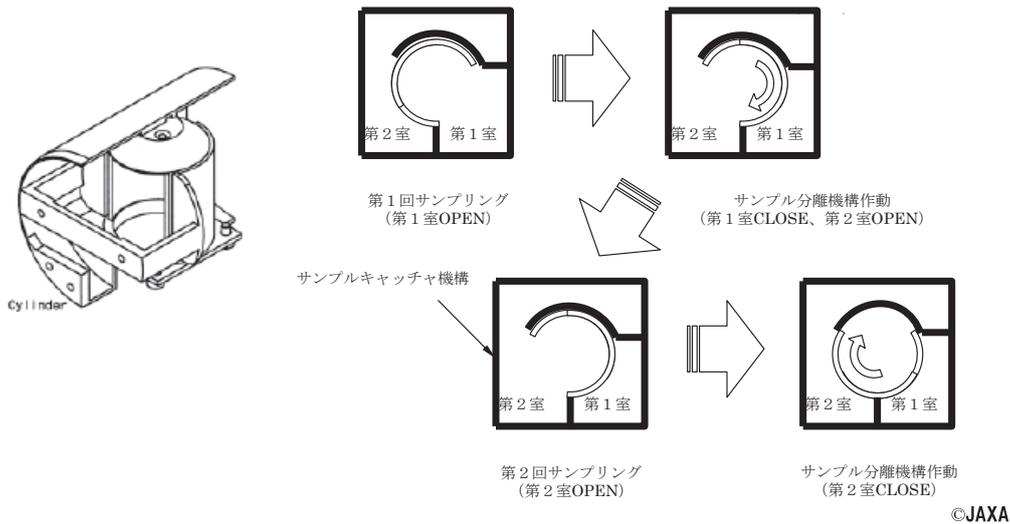
#### ② サンプル分離機構

サンプル分離機構は, 捕集したサンプルをサンプルキャッチャ機構内で 2 室に個別に捕集できる機能を有する。サンプル分離機構の主要部材はアルミ合金製であり, 回転チューブ, 回転部受台, NEA, 回転用ねじりばねなどで構成される。

図-7 に示す通り, 2 回のサンプリングにより捕集されるサンプルを個別に格納できるよう, 回転分離動作が 2 回行える構造となっている。回転角度は計 240° (120° × 2 回) である。

回転チューブは下部に回転台が取り付けられ, その内部に装着されたねじりばねにより回転駆動力が与えられ, 上部に取り付けられたキャッチャ回転筒を回転させる。

回転駆動力の保持/解放には NEA が使用され, 計 2 台搭載される。



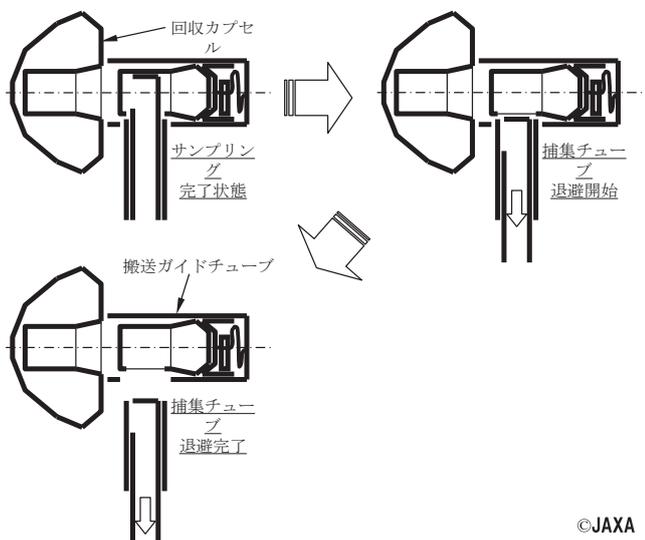
図一七 サンプルキャッチャ及びサンプル分離動作概念図

©JAXA

### ③ サンプル捕集チューブ退避機構

サンプル捕集チューブ退避機構は、サンプル捕集後カプセルへの搬送動作が可能となるよう、サンプルキャッチャ機構から回転チューブなどサンプル分離機構一式を退避させる機能を有する。サンプル捕集チューブ退避機構の主要部材はアルミ合金製であり、固定チューブ、回転チューブシャッタ、NEA、退避用圧縮コイルばね、ガイドロッドなどで構成される。

サンプリング時、サンプル分離機構一式は回転チューブがサンプルキャッチャ機構の所定位置にセットされるよう、NEAを介してサンプルラ本体に保持固定される。サンプリング終了後はNEAを作動させることにより、サンプル分離機構一式はガイドロッド外周に設置された圧縮コイルばねにてサンプルキャッチャ機構から離れ、下部に退避しガイドロッド下部のストッパに衝突し停止する。



図一八 サンプル捕集チューブ退避動作概念図

©JAXA

回転チューブ外周には、チューブ出口からのサンプル漏洩防止のシャッタ機構が取り付けられる。本機構は上記の退避動作に伴い、圧縮コイルばねにより回転チューブ出口を閉塞する構造となっている。図一八に、サンプル捕集チューブ退避動作概念図を示す。

### ④ サンプル搬送機構

サンプル搬送機構は、サンプリング後サンプルをサンプルキャッチャ機構とともに回収カプセル内に搬送し、かつ搬送後カプセル分離に影響をおよぼさないよう、搬送ばね力を解除できる機能を有する。サンプル搬送機構は構体取付フランジ、搬送ガイド、搬送押し板、NEA、圧縮コイルばね、ラッチ部保持機構、搬送ばね力解除機構などにより構成される。

主要部材はアルミ合金製であるが、構体取付フランジなど一部の部品については、軽量化の目的によりマグネシウム合金が使用される。

サンプリング時、サンプルキャッチャ機構およびラッチ・シール機構は、搬送ガイドにヒンジ結合されたトリガおよびワイヤロープによりサンプリング位置に保持される。サンプリング後、NEAを作動させワイヤロープの拘束を解除することにより、これら機構一式は圧縮コイルばねによりカプセルまで搬送され、カプセル内コンテナシール面で停止する。

搬送ばね力解除機構は、カプセルへの搬送後、カプセルに残留する搬送ばねによる押付け力を解除する機能を有し、NEA、ワイヤロープおよびブッシュロッドにより構成される。カプセルへの搬送終了後NEAを作動させ、ワイヤロープの拘束を解除することにより、搬送押し板を搬送ガイドカバーとともに構体内部側方向に押し出し、カプセルへの押し付け力を解除する。図一九に、サンプル搬送動作概念図を示す。

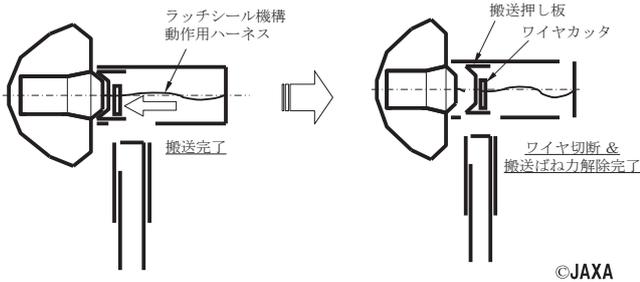


図-9 サンプル搬送動作概念図

⑤ラッチ・シール機構

ラッチ・シール機構は、カプセルへのサンプルキャッチャ機構搬送後、キャッチャ機構を真空コンテナに固定し、かつカプセルが地上で回収されるまでの期間、真空コンテナ内を必要真空度に保持する機能を有する。

ラッチ・シール機構は、ラッチ内蓋、ラッチ外蓋、圧縮コイルばね、サンプルアプレータ、NEA、NEAケーブル切断用ワイヤカッタ、Oリング、真空コンテナなどで構成され、主要部材はアルミ合金およびチタン合金が使用される。

ラッチ外蓋および内蓋は、サンプルキャッチャ機構を保持するとともに、カプセルの地球への再突入時において、真空コンテナの耐熱シールドとなる機能を有する。また、ラッチ外蓋背面にはサンプルアプレータが取り付けられ、再突入時のカプセル内部への熱流入が防止される。

ラッチ外蓋および内蓋は、NEAにより初期結合されておりさらに12個の圧縮コイルばねが外蓋と内蓋

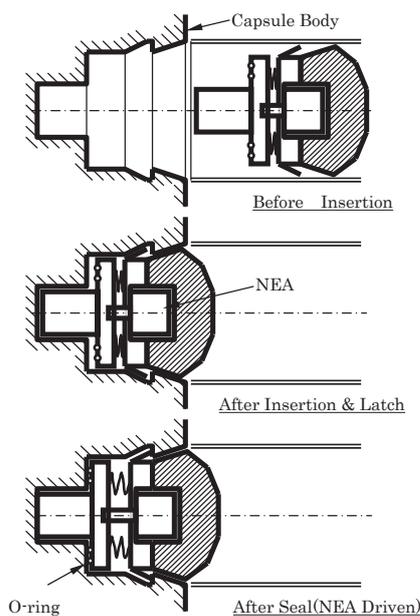


図-10 ラッチ・シール動作概念図

の間に設置される。カプセルへのサンプルキャッチャ機構搬送後、NEAに通電することにより両者間の拘束は解除され、外蓋および内蓋は圧縮コイルばねにより真空コンテナに押し付けられる。ラッチ動作終了後は、カプセルが衛星より分離可能となるようNEAから構体内部へのケーブルは搬送押し板に取り付けられたワイヤカッタにより切断される。

ラッチ機構と真空コンテナのシールは同心円状2重に配置されたOリングゴムにより行われる。Oリング間は、コンテナへの空気透過量を低減させるようポケット部が設置されており、地上での回収までの期間において所定の真空レベルが確保される。図-10に、ラッチ・シール動作概念図を示す。

⑥ホーン機構

ホーン機構は、プロジェクトにより小惑星表層から破碎されたサンプルをキャッチャ部へ導き、かつ小惑星タッチダウン時、縦横方向に柔軟に変形できる機能を有する。

ホーン機構は、打上げ時のロケット内設置領域の制約から打上げ時においては衛星下部パネルから全長400mmに収納され、打上げ後は宇宙空間にて全長1,000mmまで伸展する構造とした。ホーン伸展には伸展ストロークを考慮しDHS (Doublereverse Helical Spring) が使用され、同時にタッチダウン時の柔軟変形もDHSの伸縮および曲げにより行われる。

ホーン機構は構体下部パネル外面に設置され、固定ホーン、伸展ホーン、布ホーン、固定式ダストガード、展開式ダストガード、保持解放機構、ホーン伸展機構(DHS)、プロジェクトなどで構成される。主要部材はアルミ合金およびマグネシウム合金が使用される。布ホーン部は耐貫通強度確保のほかタッチダウン時に外力の加わった場合の伸縮性も確保するべく高強度繊維が使用される。図-11に、ホーン伸展動作概念図を示す。

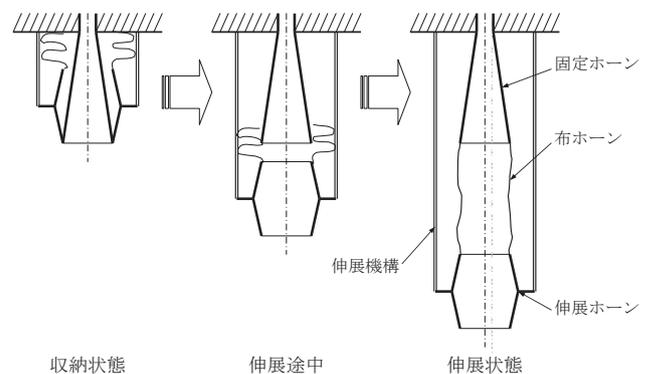


図-11 ホーン伸展動作概念図

表—3 サンプル採取機構の動作履歴

動作	動作年月	結果
①ホーン伸展	2003年5月9日 (打上げ直後)	正常に動作 (リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)
②サンプル分離	2005年11月26日 (小惑星タッチダウン直後)	正常に動作 (リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)
③サンプル捕集チューブ 退避	2007年1月18日	正常に動作 (リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)
④サンプル搬送	2007年1月18日	正常に動作 (リミットスイッチ信号及びカプセル温度変化をテレメトリにて確認)
⑤ラッチ・シール	2007年1月18日 2010年6月(地球帰還後)	正常に動作 (カプセル温度変化をテレメトリにて確認。また地球帰還後の状態にて確認)
⑥搬送ばね力解除	2007年1月18日	正常に動作 (リミットスイッチ信号をテレメトリにて確認)

### 3. 軌道上での作動実績

表—3に、打上げ後のサンプル採取装置の作動実績を示す。

いずれの動作もすべて正常に行われたことが確認され、サンプル採取機構としては100%の成功を収めた。また、地球帰還後に回収されたサンプルキャッチャから採取された約1,500個の微粒子については、2010年11月16日にイトカワ起源のものと正式に発表され、はやぶさは与えられたミッションを完遂した。これら微粒子の分析により、今後惑星形成と進化の解明が期待されている。

### 4. おわりに

- (1) 小惑星探査機はやぶさに搭載されたサンプル採取機構の開発を行った。
- (2) サンプル採取機構は、軌道上で所定の動作を正常

に行い、小惑星から微粒子を採取しカプセルに格納したことが確認された。

- (3) 本機構の高い動作信頼性が実証されたことにより、今後同種の小惑星探査ミッションへの適用が期待されている。

JCMA

#### 《参考文献》

- 1) 藤原他. 無重力環境下での試料採取の技術の開発. 宇宙環境利用に関する公募地上研究. 平成10年度 研究成果報告書.
- 2) 藤原顕, 矢野創. 「はやぶさ」に搭載された小惑星試料採取機構. 日本航空宇宙学会誌, 53 (620), 2005, P264-271.

#### 【筆者紹介】

矢島 暁 (やじま さとる)  
住友重機械工業(株)  
量子機器事業部 設計部 粒子線グループ  
課長

