

はやぶさカプセル大気再突入の地上観測*

- 光学軌道決定と流星研究 -

藤田和央¹⁾, はやぶさ地上観測チーム

Ground Observation of Hayabusa Reentry Capsule

Fujita, Kazuhisa and HAYABUSA Ground Observation Team

ABSTRACT

Hayabusa finally returned to the earth on June 13rd 2010 and the sample return capsule (SRC) experienced a super-orbital atmospheric reentry. To meet the SRC, JAXA organized a ground observation team and conducted optical tracking of the SRC, spectroscopy of the fireball as well as the fireball trail, and measurement of infrasounds and shock waves generated by the SRC. In this article, an overview of the ground observation is presented. The preliminary results are reported, and the future results expected from the obtained data are forecasted.

Keywords: Hayabusa Reentry Capsule, Optical Tracking, Meteoric research

1. はじめに

はやぶさ探査機 (MUSES-C) は世界初の小惑星サンプルリターン実証機として2003年5月9日に内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられ、2005年11月に小惑星イトカワに着陸した。多くの困難を乗り越え、探査機は2010年6月13日に地球へ帰還し、カプセルは天翔る光の矢となって地上へ降り立った。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では15名からなる地上観測チームを編成し、光学的な手法によるカプセルの軌道決定を行うとともに、流星研究の立場から分光計測、衝撃波およびインフラサウンド等の音波計測を行った。本公演では地上観測プロジェクトの概要を紹介するとともに、これまでに得られた成果と今後得られると期待される成果について紹介する。

2. 地上観測の目的

はやぶさ SRC の回収のノミナル運用においては、パラシュート開傘後 SRC より発信されるビーコンを複数の地上局より受信して着陸点を探索し、ヘリコプターで回収する¹⁾。しかし SRC が正常に機能せず、パラシュートが開傘しないで硬着陸する場合や、電気系故障などでビーコンが発信しない場合も想定され、このような場合、電波探索が不能となる。一方、SRC 大気再突入において、SRC 表面は空力加熱により高温となり、強い発光を伴って飛行する。地上観測の第一の目的は、この発光を地上より計測し、SRC 火球の光学トラッキング (複数の観測点における火

球のアジマス/エレベーション角に基づいた三角測量法) により飛行軌道を決定し、着地点の推算を行い、SRC 着地点予測の冗長化を図ることである。

第二の目的は、SRC のアブレータ熱防御システム (TPS) 表面の発光分光を行うことで軌道に沿った TPS 表面温度履歴を取得し、また SRC ウェーク部ガスの発光分光によって軌道に沿った TPS 熱分解ガスの熱化学状態の履歴を取得することである。これらのデータは、ポストフライト解析において、飛行環境推定ならびに TPS 性能評価や、飛行環境予測ツールおよび TPS 解析ツールの検証に用いられる。

第三の目的は、流星研究の立場から、流星の規模や物性を推定するための重要なリファレンスデータを取得し、流星の発光過程や大気との相互作用に関する貴重なデータを取得することである。流星研究においては、通常、観測される発光強度、スペクトル、音波などを用いて流星の物理特性や熱化学過程が推定されているが、流星の出現は予想が困難であるため十分なデータを得ることが難しく、また大部分の流星は大気中で燃え尽きるため、これらの推定を検証するのが困難である。しかし SRC という物理特性が既知の人工物体を既知の軌道で飛行させることにより、地上からの観測量と流星規模・化学特性・軌道 (速度) の相関を得ることができる。地上観測ではこの目的のもと、分光観測、衝撃波 (地震波) 計測、インフラサウンド計測などを行う。

第四の目的は、はやぶさ SRC 帰還という歴史的イベントの映像記録である。SRC 回収はオーストラリアのウーメラ制限区域 (WPA) 内で行われるため、一般の観測者は SRC 再突入軌道からの観測距離に制約が生じる。ま

1) 宇宙航空研究開発機構 (〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1, E-mail: fujita.kazuhisa@jaxa.jp)

た現地は荒涼としたサバンナ地帯であり、保安上のリスクも高い。そこでオーソライズされた観測チームに専門家を招聘し、できるだけ良い条件での撮影を実現することを狙う。

3. 地上観測の構成

地上観測局の構成を表 1 に、地上観測局の展開を図 1 に示す。地上観測チームは JAXA 職員 5 名と大学研究者やアマチュア天文家 10 名より構成された。JAXA 職員 5 名は主として光学トラッキングに従事し、山本(高知工大)、石原(国立天文台)、平松(金沢大)、古本(名古屋大)の 4 名が SRC および探査機の発する衝撃波によって励起される地震波、インフラサウンドの計測を担当した。阿部(台湾中央大)、柿並(台湾成功大)、飯山(大阪市立科学館)は分光や映像記録を担当した。また光学トラッキングの専門家として、JAXA の光学トラッキングと冗長系を構成するように、日本流星研究会の上田と司馬、九州大学の M. Shoemaker が参加した。流星研究会は、流星の自動観測・軌道決定ネットワークを国内に構築するなど、流星の観測においては高い実績を有している²⁾。九州大学の M. Shoemaker はカルマンフィルタを用いた動的解析により軌道決定を行うという、JAXA や流星研の手法と異なる手法を採用している。なお、各メンバーの担当は概ね上記の通りであるが、個々に補助的な観測機器を導入することで、より多くの光学観測や映像記録が可能となっている。

図 1 に示すように、現地では 4 つの地上観測システム (GOS; ground observation system) を SRC 再突入軌道周りに展開した。SRC 再突入と回収作業は WPA 内で行われたため、観測局の位置には制約がある。GOS1, GOS2 は WPA 内に位置し、一方 GOS3, GOS4 は WPA 外縁の町 Tarcoola, Coober Pedy にそれぞれ位置する。GOS1 は主局であり、ここにすべての軌道情報が集約され、本部へ通知される。GOS1 局の様子を図 2 に、光跡決定に用いた CCD カメラシステムを図 3 に示す。GOS1 はほぼ軌道の正面に位置することを利用して、ここではカプセルの自動追尾による望遠撮像と高分散分光を試みた。

GOS2 では光学トラッキングに加え、インフラサウンド・地震波の計測を主として行う。GOS2 は 2 つのサテライト局である GOS2A と GOS2B を有する。これらのサテライト局は無人局であり、事前に地震計とインフラサウンドセンサーを設置してデータロガーにより記録を行う。図 4a にインフラサウンドセンサーの設置状況を示す。インフラサウンドセンサーは GOS2, GOS2A, GOS2B にそれぞれ 1 台ずつ設置された。一方地震計は図 1 の拡大図に示すように、GOS2B においてはカプセル軌道方向にほぼ 5km 間隔で 5 点、GOS2A と GOS2 に 1 点ずつ観測点を設けた。地震計の設置状況を図 4b に示す。

GOS3 と GOS4 では光学トラッキングに加え、分光や映像記録など多彩な計測を行う。ここでは全天カメラ、高感度の望遠ビデオカメラ、ハイビジョンカメラ、可視・紫外分光器など多くの機器を用いる。流星研および九大の光学トラッキングシステムは GOS3 を主局とし、GOS2 と GOS4 と連携して軌道決定を行う。得られた軌道情報は GOS1 に通知され、GOS1 で検証後に本部へと伝達される。現地での通信は、衛星電話(音声)と衛星回線を利用したインターネット(データ転送)を中心に、GOS3 や GOS4 など現地の携帯電話/NextG 通信が可能な場合はこれらを併用して行った。各観測局の位置情報は GPS により決定し、光学トラッキング用の CCD カメラは星を用いて正確に画角の校正を行い、GPS の PPS 信号を用いて 1 ms 精度の時間同期を行った。

4. 観測結果の概要

な地上観測チームは 6 月頭に現地入りして準備を進め 6 月 13 日のハヤブサ帰還を待った。前日まで 3 日間重い雲が立ちこめていたが、雷神さまも散りゆくはやぶさを哀れに思ったか、当夜は 4 局すべてで晴れ上がり、光の矢となって天空を翔るはやぶさを見守ることができた(ただし 6 月はオーストラリアは冬季であり、メンバは外作業の寒さと戦うことになった)。ハヤブサ SRC は本体とともに大気突入し、本体は激しい発光を示した(図 5)。

光学軌道決定は、ほぼ予定通り実行され、現地での軌道速報値を再突入 30 分後、1 時間後、3 時間後に精度を改善しながら本部へ伝達したが、SRC がほぼ完璧に動作し、電波探索も見事な精度で着地点を決定したお陰で、直接の出番はなかった。現地での軌道決定精度は高度 40 km で ± 1 km 程度であったが、帰国後の後解析では ± 300 m 程度まで改善されている。流星研、九大のシステムも良好に機能し、結果は概ね一致している³⁾。GOS1 で試みた自動追尾システムによる望遠映像撮影、高分散分光は、追尾用 CCD がカプセル本体の激しい発光によりハレーションを起こしてしまい、追尾に失敗した。

GOS2 では 3 地点でインフラサウンド、6 地点で地震波の計測に成功し、可聴音として N 波の到来が録音された。これに加え、補助光学機器(カラービデオ、分光、広視野モノクロビデオ、フィルタ付ビデオ、HD ビデオ、高速シャッター撮影)による撮像にも成功し、流星痕の撮影にも成功した。図 6 にその一例を示す。GOS3 および GOS4 では、図 7 に示すような分光スペクトル、高感度 CCD による望遠映像(図 4 など)の他、HD ビデオ、全天カメラ画像など、貴重な映像記録が得られた。個々の成果については、今後計画されている各担当者からの詳細な報告を参照されたい³⁻⁵⁾。

地上観測で得られたカプセル表面・後部ガスの発光スペ

クトル, 超低周波音波や地震波データは, 今後のポストフライト解析を通じて SRC の飛行環境評価, TPS 性能評価に利用される。これらの成果は, 今後の大気突入ミッションの開発や流星研究に大いに貢献すると期待されている。

参 考 文 献

- 1) 川原康介, 他: はやぶさカプセル回収用電波方向探査システムにおける地上局開発と運用, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 3S06, 静岡市, 2010.
- 2) 日本流星研究ホームページ:

<http://meteor.chicappa.jp/2010NMS/nmsindex.html>

- 3) Shoemaker, M., van der Ha, J.C., and Fujita, K.: Trajectory Reconstruction of Hayabusa's Atmospheric Reentry, IAC-10.C1.6.1, 61th International Astronautical Congress, 2010.
- 4) 石原吉明, 他: 「はやぶさ」リエントリーの地上観測 ~インフラサウンド・地震計測~, 惑星科学会 2010 年秋期講演会, 2010.
- 5) 山本真行, 他: はやぶさりエンリ観測: 惑星間空間からの史上 3 例目の人工火球イベント, 第 128 回 SGEPS 総会および講演会, 2010.

表 1 地上観測の構成

局名	場所	機能	メンバ
GOS1	Mt. Vivian	<ul style="list-style-type: none"> ● SRC 火球軌跡の観測 (AZ/EL 記録), 軌道決定 (光学軌道決定主局) ● RCC とのインタフェース (軌道・映像データ送受信) ● 自動追尾システムによる高分散 TPS 分光観測 	藤田和央 (JAXA) 高柳大樹 (JAXA)
GOS2	Ingomar Homestead	<ul style="list-style-type: none"> ● SRC 火球軌跡の観測 (AZ/EL 記録) ● 可聴音・地震波・インフラサウンド計測 ● SRC 火球の分光計測 ● ステルカメラ・ビデオカメラによる映像記録 ● EM 波の前方散乱計測 	柳沢俊史 (JAXA) 山本真行 (高知工大) 石原吉明 (天文台) 平松良浩 (金沢大) 古本宗充 (名古屋大)
GOS2A	McDonall Peak Homestead	● 自動機器による地震波・インフラサウンド計測	
GOS2B	Bulgunnia Homestead	● 自動機器による地震波・インフラサウンド計測	
GOS3	Tarcoola	<ul style="list-style-type: none"> ● SRC 火球軌跡の観測 (AZ/EL 記録) ● 流星観測システムを用いた軌道決定 (流星研・冗長系) ● 画像処理を用いた軌道決定 (九大・冗長系) ● SRC 火球の分光計測 (VIS, UV) ● 魚眼 CCD による全天撮像 ● 高感度ビデオカメラ, ハンディカムによる映像記録 	阿部新勲 (台湾中央大) 黒崎裕久 (JAXA) 飯山育海 (大阪市立科学館) Michael Shoemaker (九大) 上田昌良 (流星研)
GOS4	Cooper Pedy	<ul style="list-style-type: none"> ● SRC 火球軌跡の観測 (AZ/EL 記録) ● SRC 火球の分光計測 ● 衛星回線 + 地上 LAN 使用 	鈴木俊之 (JAXA) 司馬康生 (流星研) 柿並義宏 (台湾中央大)

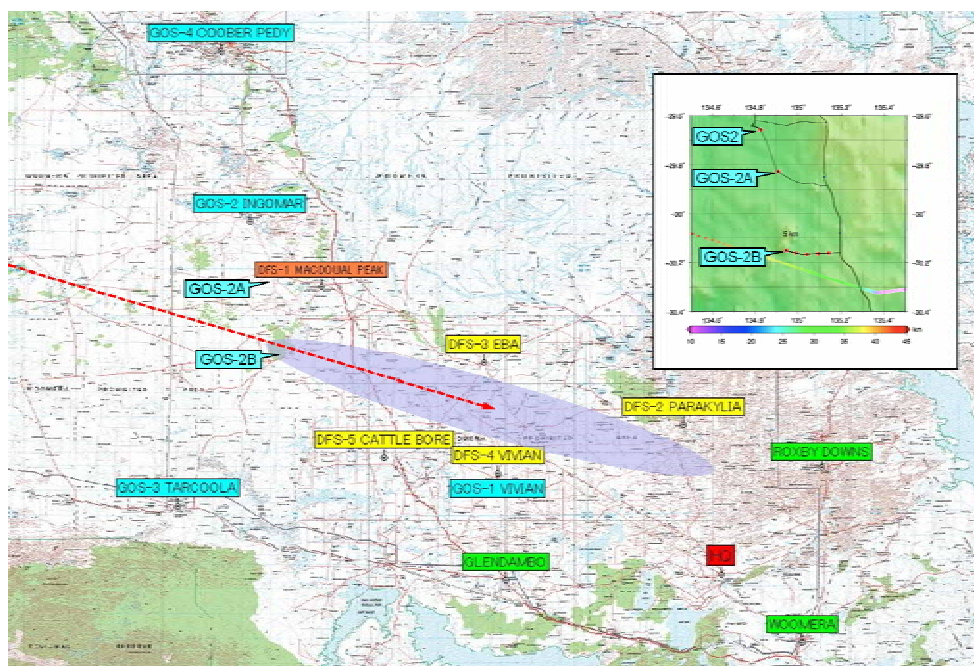


図 1 地上観測局の展開



図2 GOS1の機器設置状況 (Mt. Vivian)



図3 光跡決定用カメラ



a) インフラサウンドセンサー



b) 地震計

図4 GOS2の機器設置状況



図5 高感度 CCD によるハヤブサ本体と SRC の高感度カメラ映像 (GOS3 にて飯山撮影)



図6 全天カメラによる本体と SRC の軌跡画像 (GOS2 にて石原撮影)

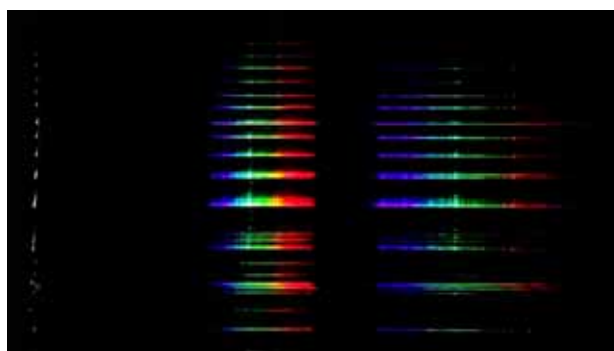


図7 ハヤブサ本体と SRC の分光スペクトル (GOS4 にて柿沼撮影, 阿部により解析)