

**第20号科学衛星「はやぶさ」の着陸
成功とサンプル採取の実施について
(速報)**

平成17年11月30日
宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究本部
教授 川口 淳一郎

小惑星探査機「はやぶさ」

目的

将来の本格的なサンプルリターン科学探査に必須となる世界最先端工学技術を開発・実証する。

電気推進エンジンによる惑星間航行 **(達成)**

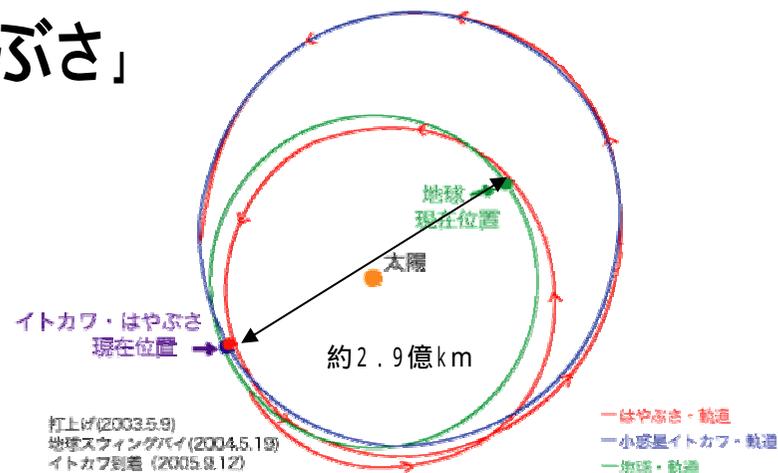
電気推進エンジンを用いた地球スウィングバイ **(達成)**

光学情報を用いた小惑星接近 **(達成)**

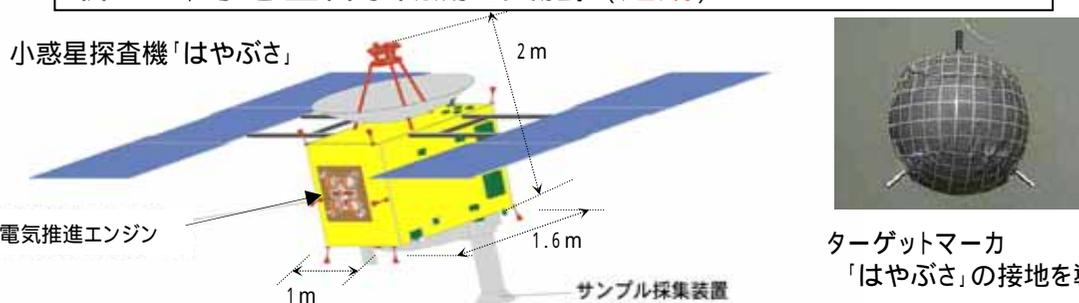
自律航法・誘導による小惑星着地、試料採取、離陸 **(達成)**

カプセルによる試料回収 **(2007年6月地球帰還時)**

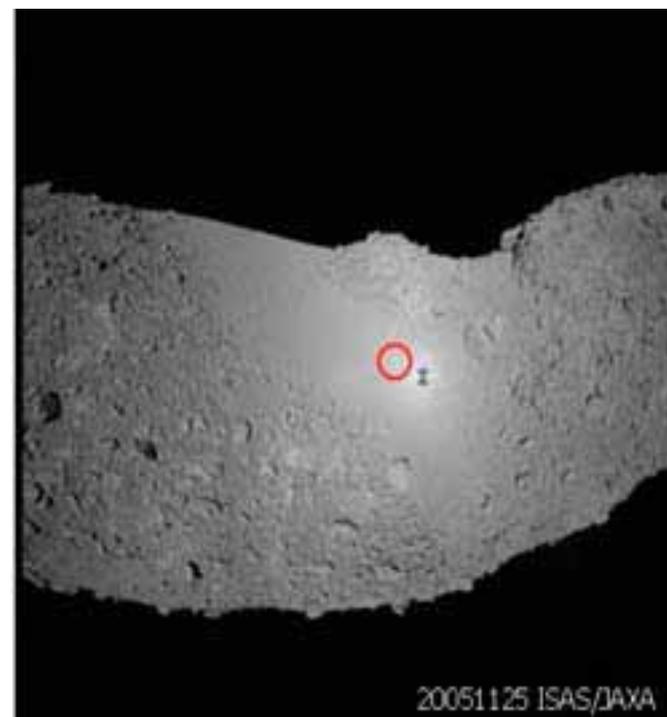
併せて、小惑星科学観測を実施。 **(達成)**



はやぶさ・イトカワ・地球の軌道図と現在位置



- 平成15年5月9日 M - V - 5号機にて打上げ。
- 平成15年7月22日 **電気推進エンジン稼働開始。**
- 平成16年5月19日 **地球スウィングバイ成功。**
- 平成17年9月12日 **小惑星「イトカワ」から約20キロの位置に到着。**
- 平成17年9月中旬 小惑星の各種データ取得・科学観測開始。
- 平成17年11月4日 試験降下を実施。高度約700メートルまで降下。
- 平成17年11月9日 試験降下を実施。高度約70メートルまで降下。
- 平成17年11月12日 試験降下を実施。高度約55メートルまで降下。
探査ロボット「ミネルバ」を分離したが、表面には達せず。
- 平成17年11月20日 着陸・試料採取を試行。
ターゲットマーカ(世界149カ国88万人の署名入り)投下成功。
- 着地・離陸成功。試料採取は実施せず。
- 平成17年11月26日 **自律航法による着陸・試料採取・離陸に成功。**



小惑星「イトカワ」に写る「はやぶさ」の影と、表面にある88万人の署名入りターゲットマーカ(赤枠内)
(11月26日午前6時24分、高度約250mから撮影)2

第2回降下の概要

- 「はやぶさ」は、平成17年11月26日に、イトカワ上のミュージエスの海付近への着陸および試料採取を目的とした第2回目の緩降下を試みた。
- 「はやぶさ」は、日本時間平成17年11月25日の午後10時頃にイトカワから高度約1kmの地点で降下を開始した。降下経路は、第1回の着陸・試料採取飛行とほぼ同様で、ミュージエスの海の西方を目標して、画像にもとづく航法と誘導が順調に行われた。今回の降下点は、現在までに判明している状況によれば、ミュージエスの海のやや西方であったものと推定される。
- 「はやぶさ」は、日本時間平成17年11月26日の午前7時7分頃に、ホバリングから下方に若干の加速を行った後、着地および2本のプロジェクタイトルの発射による試料の採取に成功し、その後離陸した。

第1回降下からの反映事項

(1) ターゲットマーカを使用しないこと

第1回目のマーカがすでに展開されており、2個のマーカを識別してしまう可能性が高く、また投下済みのマーカの抽出・識別を保証することは難しく、今回は投下しないこととした。

(2) 障害物検出機能を用いないこと

第1回の飛行では、最低感度に設定したが、反射光が検出され、中断指令が出された。飛翔後解析でも、障害物は確認できなかったため、今回は機能させないこととした。

(3) アライメント姿勢目標への収束性判定基準の緩和

一定の収束待ち時間を経過するか、あるいは収束判定を抜けた場合に、必ず次のシーケンスに進むこととし、シーケンスの中断がおきないように設定した。

(4) レーザ高度計(LIDAR)からレーザ距離計(LRF)への切り替えの条件緩和

第1回目の飛行では、レーザ距離計のビームは切り替え点で、1本が表面をはずしていた。今回は、切り替え高度を下げて、シーケンスの継続性を高めた。

(5) 地形アライメント制御終了後の降下速度付与

第1回目でも、中断がなければ 2cm/sec の降下速度の印加が予定されていたが、第2回目では、付与する速度を 4cm/sec とし、5分程度で表面に降下できるよう対応した。

上記により、非常離陸に移行する条件を

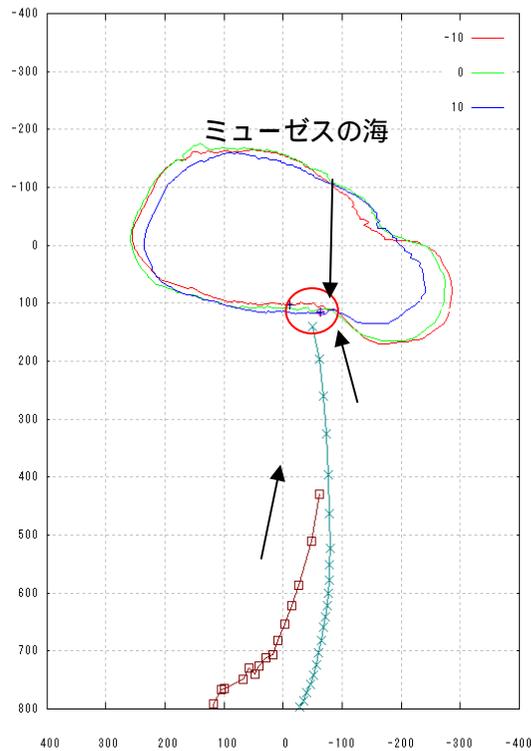
垂直降下中にレーザ距離計スポットがイトカワ表面をはずした場合、

LRF への切り替え高度時点で、3本未満のビームしか表面を向いてない場合、

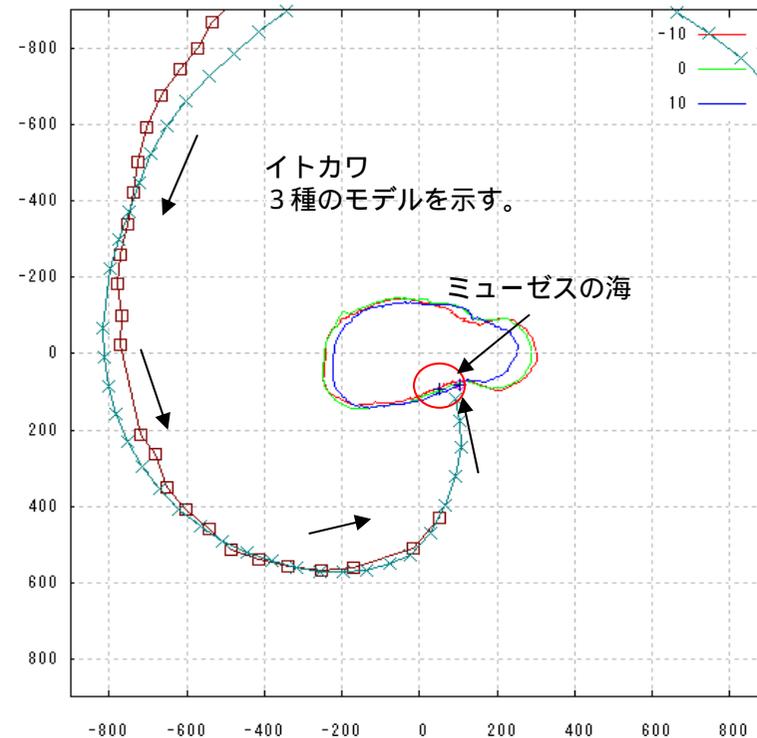
姿勢アライメント規準が、地球方向から 60度以上大きく逸脱している場合

だけとし、一旦 (3) を通過すると、サンプル採取し離陸する以外のシーケンスが発生しないように設定した。4

イトカワへの接近、降下軌道(第2回)



予定降下軌道と実際の降下軌道
(準慣性座標系)

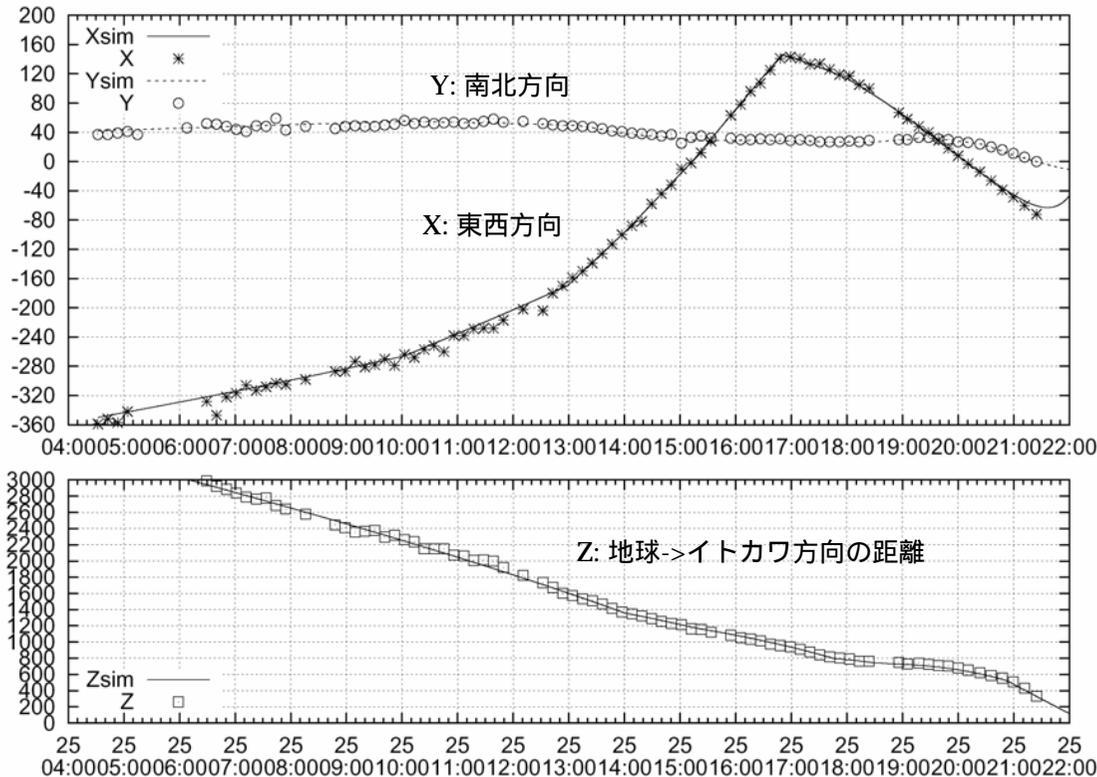


予定降下軌道と実際の降下軌道
(イトカワ座標系)

第2回の降下着陸飛行における、接近軌道を示す。

第1回と同様に、左図は、軌道をほぼ慣性系に近い座標上で描いたもので、Z軸方向(図上の下方方向)が地球の方向である。右図は、軌道をイトカワ固定座標系で描いたものである。(運用中に軌道計画は逐次更新されている。)

軌道計画と実際の経路



第2回飛行における誘導航法のあらまし
(準慣性系)

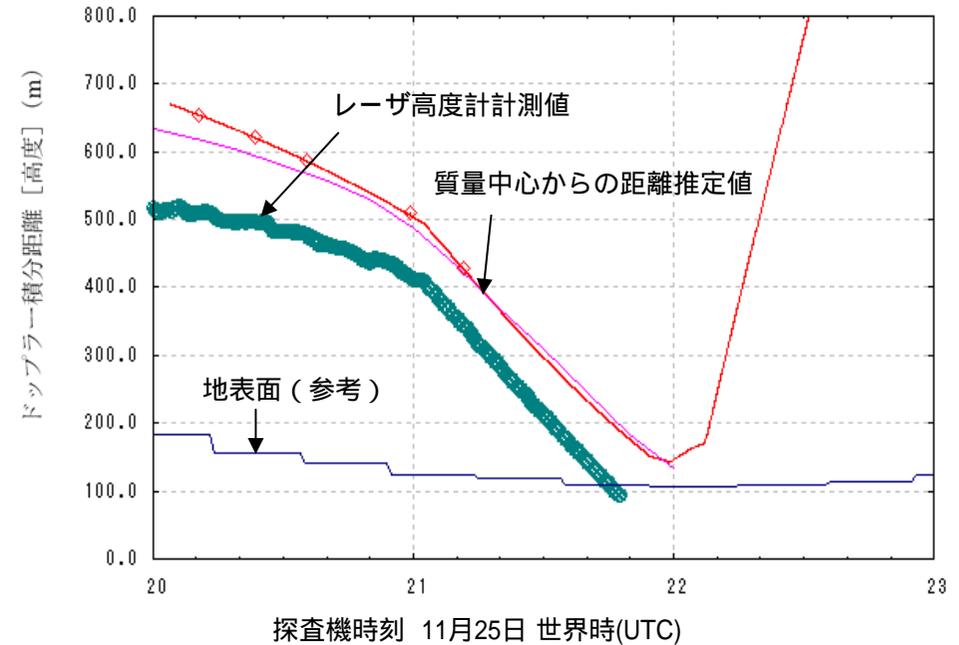
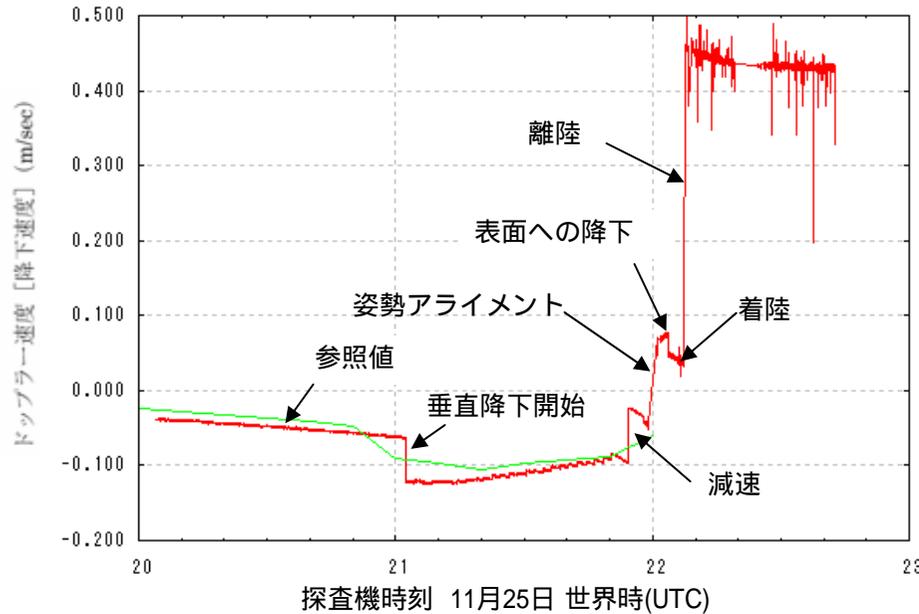
図は時々刻々の状況に適応して逐次更新された軌道計画に対して、実際に採られた軌道を重ねて表示したもので、各点の情報は、時々刻々圧縮されて送られてくる画像をもとに、表面地形から地上で推定した探査機位置を示している。ほぼ完全に軌道計画に沿って、誘導が達成され、降下と接近が行われたことがわかる。

今回も、この図から、逐次更新された軌道計画に沿って、正確に誘導されたことがわかる。

降下から着陸・試料採取にいたるシーケンス

- (1) 着陸にいたる垂直降下開始時の速度は毎秒12cm であった。
- (2) 高度 40m に到達した地点で、探査機自身が毎秒約 6 cm の減速を行い
(午前6時54分、)、
- (3) 高度30m地点でレーザ高度計を近距離レーザ距離計(Laser Range Finder: LRF) に切り替え、
- (4) 高度7 m 付近で地表面にならう姿勢制御のモードに移行した。(午前7時00分頃)
- (5) この時点で、探査機は自律シーケンスにより、地上へのテレメトリの送信を停止し、ドプラ速度の計測に有利なビーコンのみの送信に切り替えるとともに、送信アンテナを覆域の広い低利得アンテナに切り替えた。
- (6) 着陸検知のために試料採取ホーンとの距離計測モードに移行し、
- (7) 下向きに毎秒約 4 cmの速度を加えて着陸降下をさせた。
- (8) 試料採取ホーンの変形により着陸を検知して、
- (9) 2本のプロジェクタから弾丸(プロジェクティル)を発射して、
- (10) ただちに地表面に鉛直上方に秒速 50 cm にて離陸を行った。

高度と降下速度の履歴



ドップラー計測値 (降下率)

高度履歴 (または質量中心からの距離履歴)

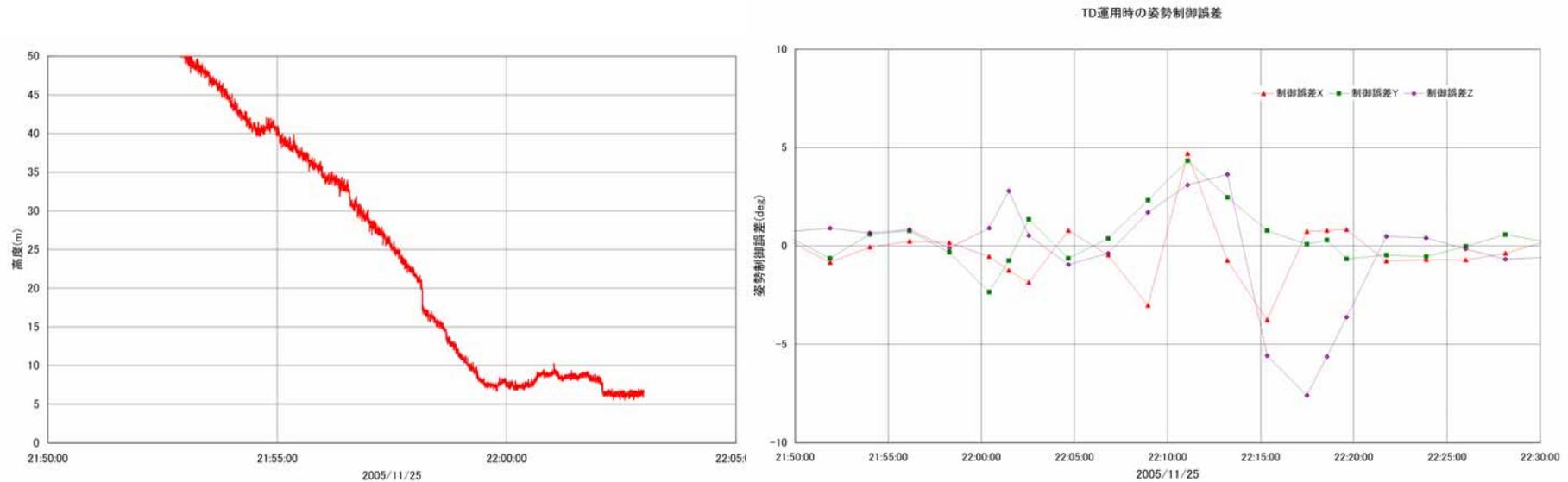
左図は、DSN局で計測されたドップラー速度履歴で、おおむね「はやぶさ」のイトカワへの降下速度を示している。右図は、ドップラー速度情報を積分して得られた高度を更新して表示している。

高度が十分に低い地点でホバリングに移行し、地形にならう制御が行われた。同制御後、表面にむけて増速を行い、ほどなくして、地表面から離陸する増速が行われている。

着陸と試料採取

- (1) 「はやぶさ」が着陸を行った時点では、近距離レーザー距離計ビーム3本による距離は平均で約7 mに維持された。
- (2) 「はやぶさ」は、その姿勢にてホーンの軸方向に、毎秒約4cmの加速を行って、より確実なホーンの接地をはかった。
- (3) 接地速度は、毎秒約10cmと推定されている。
- (4) 「はやぶさ」が地表面から離陸した姿勢は、その高利得アンテナの指向方向が太陽方向から、約7度であり、着地点の局所鉛直方向がほぼ反太陽方向向いて、ほとんど計画通りであったことが確認されている。
- (5) 離陸後の姿勢と探査機上の各機器の動作はほぼ完全な状態に維持された。
- (6) 近距離レーザー距離計は、地表面にならう制御を実施後、試料採取ホーンとの距離と反射受光量を計測するモードに切り替えられ、その受光量出力が所定の変化量を超えたこと、およびそれによりプロジェクティル(弾丸)発射の指令が出された。
- (7) これらの結果、「はやぶさ」探査機は、試料採取装置が機能して試料採取を実施したことが確認できたと判断される。

地表面へのホバリングと接地前後の姿勢履歴



近距離レーザー距離計の計測値履歴（単位：m） 姿勢制御誤差の履歴（単位：度）

距離計の情報により、高度約 7 m 付近で地形にならう制御への移行が行われたことが確認できる。

姿勢変化の変動幅は、接地時刻の日本時間 07:07 (世界時 22:07) 付近まで安定しており、探査機の機体が地表面と事前に接触することなく、ホーン部が着地したことがわかる。

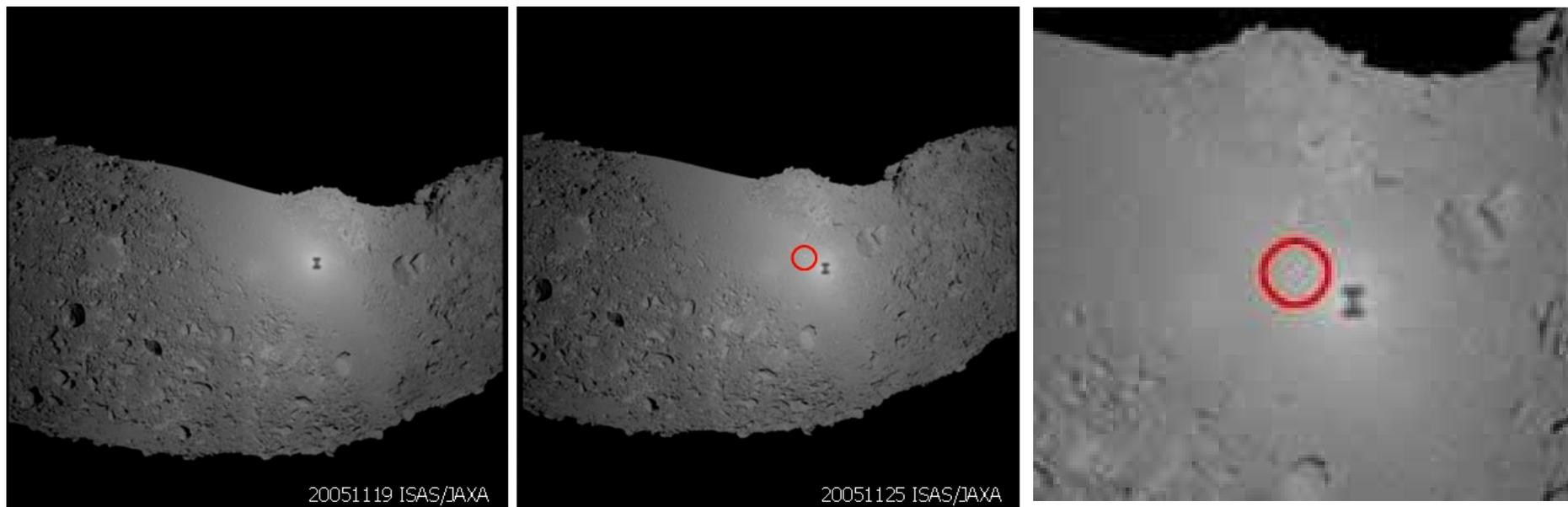
「はやぶさ」の着陸と試料採取の意義

- 「はやぶさ」は、今回の飛行により、地球圏内の月以外の天体において、着陸と試料採取に成功した。とくに無人のロボット探査という点において、自律的な航法と誘導による画期的に新しい惑星探査の我が国独自の手法を実証できたといえ、深宇宙探査技術面で世界の第1線にたつことができたと考えている。
- 今後の国内外の深宇宙探査および宇宙開発全体に、少なからず貢献できたと考えている。

現在の状況

- 「はやぶさ」は、11月26日に着陸と試料採取を実施し離陸後、上昇速度をとめる軌道制御を実施し、これに成功した。
- その後の姿勢制御中において、化学エンジンの1系統から燃料のリークが発生した。これを止める運用が11月26日中に有効に実施された。
- 11月27日までNASA 局および臼田局からの運用は、ともに正常に行われた。
- 11月27日の運用において化学エンジンの推力が低下していることが判明し、回復と機能維持にむけた姿勢・軌道制御を指令した。
- しかし、11月28日には探査機との通信が確保されない状態にいたった。
- 11月29日午前10時過ぎに、ビーコン回線は回復し、現在、復旧にむけた運用を継続している。
- 現状から判断すると、探査機の運用再開には、一定の期間を要する見込みである。「はやぶさ」搭載の推進系を除く各機器の状態は、健全に保たれており、時間をかけて復旧を試みる予定である。詳細は、現在解析・検討中である。

(参考 - 1) 88万人の署名入りターゲットマーカ



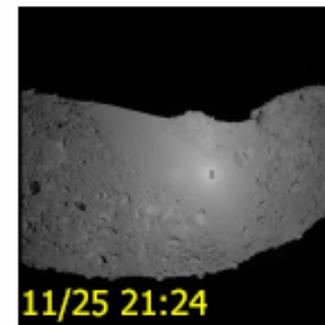
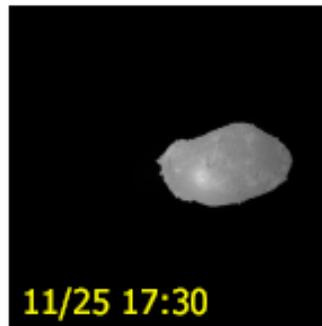
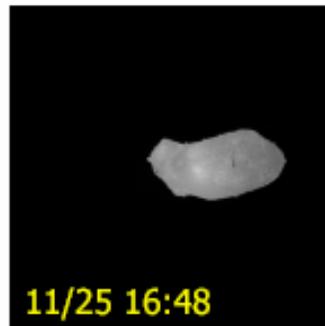
11月20日午前4時58分撮像 11月26日午前6時24分撮像 ターゲットマーカ(拡大画像)

「はやぶさ」は、11月20日に投下したターゲットマーカを11月26日のタッチダウン降下中に撮像した画像で、確認することができた。このターゲットマーカには、149カ国88万人の名前が刻まれており、イトカワ表面に無事着地していた。左側の画像が11月20日午前4時58分に投下前に撮像した「ミューゼスの海」で、右側の画像が11月26日午前6時24分に撮像した画像である。赤丸の中で白く光っているのが、88万人の署名入りターゲットマーカである。

(参考 - 2)

降下中の航法用カメラ画像 (第2回タッチダウン: 11月25日)

時刻は世界時



21:03に垂直降下開始