はやぶさ2リモートセンシング観 測装置の目指すサイエンス

平田成(会津大学) 中村良介(産業技術総合研究所) はやぶさ2プリプロジェクト リモートセンシングサブチーム

その場リモートセンシングの目的

- ミッション全体目的に対応するリモートセンシングの科学目標
 1 隕石(=転石)とは異なる、素性のしれた新鮮なサンプルの取得を支援
 宇宙風化・鉱物分布・粒系(熱慣性)の表面マップを作成し、もっとも科学的

価値の高いサンプリング地点を選ぶための基礎情報を提供する

- 2内部構造と再集積過程の探査
- => 詳細な地形観測および重力測定から JU3 がイトカワ同様にラブルパイルか どうかを明らかにし、詳しい内部構造についても制約を与える
- => 衝突によって形成されるクレーターおよび放出物の観測から、小惑星 内部の構造/組成と再集積過程を調べる

検討の経緯

- 科学目標の達成に必要な基本情報(=小惑星の形状・スペクトル・密度など)は、
 はやぶさに搭載された観測機器で得られる
- ただし、はやぶさ2とはやぶさのターゲットの違いや、その後の小惑星研究の進展 を考慮すると、以下の項目についても検討を行う必要がある
 - ターゲット小惑星のスペクトルタイプの違い(S型→C型)に対応するため、多 バンド可視カメラおよび近赤外分光計の観測波長変更
 - 表面物質の粒径を反映する温度分布/熱慣性を計測するための熱赤外イメージャーの搭載
 - レーダーによる内部構造探査の可能性
- このためリモートセンシングサブチームでは、はやぶさに搭載された多バンド可視 カメラ・レーザー測距装置・近赤外分光計・蛍光X線分光計の詳細仕様の見直し に加えて、中間赤外線カメラ・レーダーの搭載検討を行った

搭載予定の観測機器

- サイエンス目的との関連や技術 的成熟度について、詳細な検討 を重ねた結果、はやぶさ2着陸帰 還機に搭載されるリモートセンシ ング観測機器は右の構成となっ た
- オプション機器の搭載可否は検討の進捗と期待される科学的成果,リソースを勘案してPDRまでに決定される

- ・ ノミナル機器
 - 多バンド可視カメラ
 - レーザー測距装置
 - 近赤外分光計
 - 中間赤外線カメラ
- オプション機器
 - ・ レーダー
 - 画像分光計(mini-M^3)
 - 蛍光X線分光計
 - 短波長側近赤外分光計

ターゲット: 1999JU3



- スペクトル型: C
- 自転周期: 7.6 [h]
- 平均直径: 0.9 [km]
 - Itokawaの約2倍
 - より球に近い

地上望遠鏡の可視多色測光に基づく 小惑星の分類



1. 多バンド可視カメラ 波長(1)



Figure 3. Relative reflectance spectra of C-class asteroid 407 Arachne (Vilas et al. 1998b), terrestrial phyllosilicate antigorite (King & Clark 1989), July spectrum of NEA 162173 1999 JU3 (this paper), and CM2 carbonaceous chondrite ALHA 81002 (Vilas et al. 1994), all showing the 0.7 μ m absorption feature. Spectra are offset by 0.3 for clarity. A linear continuum defined by a least-squares fit to the 0.5–0.9 μ m wavelength range has been removed from all spectra.

C型小惑星 Arachne および1999JU3 (はやぶさ2の ターゲット)の可視域でのスペクトル。

比較のために、C型小惑星から飛来したと考えられている炭素質隕石(ALHA 81002)と、代表的な含水鉱物であるAntigoriteのスペクトルも示されている。

どのスペクトルも含水鉱物中の鉄に由来する吸収を持 つことがわかる。可視カメラのフィルターは、この 700nm 付近を中心とする幅の広い吸収を捉えられる ように設計されている。

JU3 の吸収は10%程度だが、これは地上観測によっ て日照面を平均した時のデータであることに注意する 必要がある。実際の小惑星を空間分解した場合には、 より深い吸収を持つ水質変成を受けた部分と、水質変 成を受けていない(吸収を持たない)部分が共存してい る可能性も十分ある。

Vilas et al. 2008

1. 多バンド可視カメラ 波長(2)

Reflectance Fig. 3. heated spectra of Murchison powders (solid trace, <63 µm; dotted trace, 63 to 125 µm) and the average reflectance spectra of (A) the five C asteroids and (B) the five G asteroids in Fig. 1. All reflectance spectra are normalized to 1.0 at a wavelength of 0.55 µm and shifted by 0.5 from each other. The standard deviations, of reflectances of five asteroids are shown by vertical bars for the average C and G asteroid spectra.



炭素質のMurchison 隕石を加熱した時のスペクトル変化 青い枠で囲った可視から紫外にかけての形状が最高経験温度に よって顕著に変化することがわかる (Hiroi, et al. 1993)

現在のAMICA 2 のフィルターセット案

- 380 (or shorter), 415, 550, 700, 750, 860, 950 nm
 半値幅はTBD
- Wide, Diffuser (for flatfield)
- ND, 旧zs (1050 nm), polarizer は削除



EFPの衝突によって形成されるクレーターの観測



LRO/LROC/NAC (0.5m/pixel)で みたサターンロケット上段部衝突 サイト(Apollo 13) 画像解像度: 0.5m/pixel 覆域: 約350²m (=700² pixel) クレータ直径: 約30m (=60 pixel)

AMICA@高度1km 画像解像度: 0.1m/pixel 覆域: 約100x100m クレータ直径: 約5m (=50 pixel) もう少し小さくても十分クレーター の観察が可能



2. レーザー測距/重力場計測 密度・空隙率の推定と要求

く手法>

- 小惑星の形状モデルを構築して、 その体積を測定
- 重力計測によって質量を測定
- 二つの計測結果からバルク密度を 算出し、構成物質の密度から空隙 率を推定する

<目標精度>~7%

- はやぶさ/イトカワ実績値と同等
 - 体積計測目標精度:~5%
 - 重力計測目標精度:~3%

<体積計測に必要な仕様>

- 体積を5%の精度で計測するため、 サイズを1-2%の精度で計測
 - 半径約500mのJU3に対して5-10mの 精度

<実現性>

- カメラ画像とレーザー測距データから形状モデルを作成
 - 手法ははやぶさで実証されている
 - モデルの精度はレーザー測距精度 とカメラ解像度に依存
 - はやぶさでの実績値のレーザー測 距精度5m(@5km),カメラ解像度 0.5m(@5km)は上記の仕様を十分 満足する
 - Ref: Demura et al., 2006
- 自由落下計測による重力計測精 度も測距精度と形状モデルの精度 に依存する
 - 上記のカメラ解像度と測距精度数値 は重力計測の目標精度も十分満足 する(はやぶさ実績より)
 - Ref: Abe et al., 2006; Fujiwara et al., 2006

より詳細な内部構造への制約

- 全体平均密度だけでなく、小惑星内部の密度の偏りの有無を 計測し, より詳細な内部構造を明らかにすることで, ~1 kmサイ ズの<u>C型小惑星の特性,</u> そしてその起源に迫る
 - 意義:
 - イトカワのように詳細な観測が行われた例でもなお実際の内部構造には不確定性がある(右図参照)
 - ラブルパイル構造天体の場合,岩塊の集積状態の違い
 は,母天体の衝突破壊のモード,その後の再集積のモー
 ドを明らかにする上で非常に重要となる
 - この問題を解決するためには、小惑星内部の密度の偏り
 を計測する必要がある
 - 過去にこのような計測を行ったのは、小惑星エロスを周回した米国のNEAR-Shoemaker探査機のみである
 - はやぶさではアーク長が短いため、密度構造の偏りへの
 感度が悪く、限定的な情報しか得られていない
 - はやぶさ2ではJU3全体の密度だけでなく、その偏りを計 測してより詳細な内部構造を明らかにすることを目指す
 - 目標計測精度は密度変化10%の検出とする.これは、小惑星のローカルな構造がラブルパイル的なのか、破砕構造的なのかを識別可能な値である





中サイズ岩塊の集積 空隙はやや不均等に 分布



全空隙率40%, 巨視的空隙率30%を満たす イトカワの内部構造モデルの例

近赤外分光計。We have studied a 3-µm band spectrometer called "NIRS" on 中的。

- C型小惑星でも観測 されている、3um域 のの含水鉱物、水 の吸収帯を観測す る
- はやぶさの分光計 (NIRS)から観測波 長帯を変更
- 分解能
 - 35m (全球)
 - 2m (クレータ内部)



M^3による月表面のH2O吸収観測



Infrared Reflectance

Blue = water absorption strength on Infrared Reflectance

Chandrayaan-1 Moon Mineralogy Mapper

中間赤外線カメラ

〇科学目標(1) 温度、熱慣性のグローバル マッピング

全表層の物理状態(空隙率、粒径、岩塊存在 度、等)を10m分解能で探査

⇒サンプリングや超低高度観測なしでも表層の物性・物質情報が得られる。
 ⇒サンプリング地点の選択、サンプリング地点の産状把握にも重要な情報。





小惑星表面温度のモデル計算。熱慣性 の値が大きいと、昼夜間の温度差は小 さくなり、最高到達温度が低くなることが わかる。Itokawa やJU3 のような1km程 度の小惑星では平均的な I の値は 100~1000 と考えられているが、粒径や 空隙率によって桁で変動する(別資料)) よって、上記の仕様で科学目標を満たす ことができる Thermal inertia gives information about the presence (or absence), depth and thickness of regolith, and the presence of exposed rocks on the surface of atmosphere–less bodies (Γ in SI units: $Jm^{-2}s^{-0.5}K^{-1}$).

25143 Itokawa	433 Eros	The moon	1 Ceres
$\Gamma = 600$	$\Gamma = 150$	$\Gamma = 50$	$\Gamma = 10$
Release 051101-4 ISAS/JAXA			
Coarse regolith	Finer and thicker	Mature and	Very fine
and boulders	regolith	fine regolith	regolith ??

ヤーコフスキー効果 および YORP 効果





FIG. 1. Spin-up of an asymmetrical asteroid. The asteroid is modeled as a sphere with two wedges attached to its equator. The asteroid is a blackbody, so that it absorbs all the sunlight falling upon it. The solar energy is reemitted as thermal radiation, which causes a net torque on the asteroid.

ここ数年で、実際に小惑星の軌道や自転状態が非 等方的な熱放射の影響によって変化することが確 認されている→中間赤外線観測の重要性

イトカワの微粒子はどこから来たか?

空間分解能6-8mmの着陸地点最接近画像 史上最も詳しい小惑星表面の画像



50µm

fine regolithは存在しないように見えたの にも関わらず、サンプリングされた微粒子

h = 68 m

Yano, et al.

3 m (カメラの焦点距離ぎりぎり)まで降下中に捉えた「ミューゼス は、数cm大に大きさが揃った小石が、まるで平坦な舗装道路のように 空間分解能は、一画素当り6-8 mm。探査機によるにリモートセンシン 非上での岩石学調査と同レベルの情報量を持っている。

局所的にregolithの分布があれば、熱慣 性分布に現れるはず

観測計画

- はやぶさのそれを踏襲しつつ、より余裕をもった観 測を行う
 - 低高度, クローズアップでの観測の充実
 - 衝突実験痕の観測
- 全体シーケンス(案)
 - HP観測@20km:全体形状,極方向推定,全球物質分布
 低高度観測@1km前後:詳細地形,着陸地点選定
 クローズアップ観測@50-100m:微小地形,TD地点記載
 クレーター観測@1km前後:形状,放出物,内部物質