

「はやぶさ2」での遠隔赤外観測 NIRS3・TIRによる小惑星1999JU3探査計画

岡田達明, 岩田隆浩 (JAXA), 北里宏平 (会津大), 福原哲哉 (北大), 田中智, 安部正真 (JAXA), はやぶさ2 TIRチーム & NIRS3チーム

- ・C型小惑星は揮発性成分を多く含み、地球の水の供給源と考えられる炭素質コンドライト隕石と関連付けられている。しかしその素性はよく分かっていない。例えばC型小惑星が非常に低密度である理由と現在の物理状態、水質変成や熱変成がいつどこでどのように生じたか、等である。
- ・小惑星探査機「はやぶさ2」ではTIR(サーモグラフィ)とNIRS3(3μm帯分光)の2台の赤外観測装置によって、小惑星表面の熱物性と水・含水鉱物の調査を行う。小惑星(162173)1999JU3の素性に迫るとともに、サンプル採取地点の選定に必須な情報を提供する。
- ・「はやぶさ2」に搭載されたTIRとNIRS3の目標、機器仕様、開発および校正試験の結果について報告する。

TIR

★「はやぶさ2」でTIRによる熱物性観測

- はやぶさ2
 - 目的: 小惑星探査機「サンプルリターン」
 - 天体: 1999JU3(C型、 $<1\text{km}$, NEA)
 - 予定: 打上 2014.12
 - 到着 2018.07 (~2019.12)
 - 帰還 2020.12
- 「はやぶさ2」での熱物性観測
 - 目的: C型小惑星の熱物性(温度、熱慣性)観測
 - 熱物の物理特性(温度、熱慣性)の決定
 - (1) 科学: 小天体(微惑星)の形成・進化
 - ・低密度なC型小惑星の物理性がどうなっているか?
 - ・地上観測で得た小惑星モデルとどう一致するか?
 - (2) 探査: サンプルに最適な程度の地球遠征
 - ・降下運用にとって安全な熱環境
- ・手法: 遠隔 TIR(赤外カメラ)
 - 表面: MASCOT(MARA: 熱放射計), MINERVA-III(温度センサ)

★熱画像⇒表面状態推定: Hartley-2, Tempel-1

熱画像の取得はデモコト、スラスカ? ⇒ できる(小惑星は?)

★熱慣性 vs. 表層物理状態

熱慣性 $[K\sqrt{m^2/s}]$ 表層物理状態

< 10	超空疎な塵埃(粒径 $< 10\mu\text{m}$)、セシ、火星の砂
100 ~ 300	細粒(粒径 $10\sim 100\mu\text{m}$)
300 ~ 400	粗粒(粒径 $100\sim 200\mu\text{m}$)
400 ~ 2000	塊状、多孔質(粒径 $100\sim 1000\mu\text{m}$)
2000 ~ 3000	多孔質凝結石
> 3000	凝結石

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 (in 1.5 unit, $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1/2}\text{K}^{-1}$)

★天体自転に伴う温度変化と熱慣性

1999JU3 (P=7.6 hr, D=1AU)

- ・Max / Min 温度
- ・最高到達温度の時間遅れ (1 ± 50) (1 ± 300) (1 > 1000)

電線粒 砂粒 岩石

★小惑星熱観測⇒表面熱慣性から何が分かる?

- ★表層物理状態の定量化(粒径)
- ★TIRの熱慣性
- ★最高到達温度推定
- ★むつむつとむつむつ
- ★熱化推定
- ★スペクトル影響
- ★地形
- ★観測ポイント
- ★観測回数
- ★タックタック運用への制約

★TIR観測フェーズ

観測フェーズ	観測時間	観測地点	観測内容
Approach	00:00 ~ 01:00	1999JU3	熱画像取得
Low Altitude	01:00 ~ 02:00	1999JU3	熱画像取得
Mid Altitude	02:00 ~ 03:00	1999JU3	熱画像取得
High Altitude	03:00 ~ 04:00	1999JU3	熱画像取得

★TIRの仕様緒言

開発コンセプト

- ・小惑星サーモグラフィ(広い温度範囲)
- ・非冷却型カメラ(使用小惑星)
- ・「あかつき」IRと開発設計(長期開発)
- ・積算: M=16ビット(2¹⁶色、M=0~7) N=2¹²画素(4096画素)

Table: Specifications of TIR (at JAXA)

Wavelength	8 ~ 14 μm
Resolution	8.1 μm
FOV	1.0°
Integration time	200 ~ 4000 μs
Pixel size	15.5 μm
Temperature range	-133.5 K (80K) ~ 515.15 K (242K)
Dynamic range	1.5
Gain	1.0
ADC conversion	1.2 bit

★TIR校正試験

- 輝度(温度)校正: 低温側: -120 to +50°C 熱真空チャンセル
- 線形校正: 高温側: 25 to 150°C 平面黒体/オイルバス
- 指向校正: コリメータ
- MARAと相互校正: Chamber for cooling, System Vacuum Test

★解像度=画素解像度で決まる

- ★点光源
- ★正方形(15mm)
- ★4バー

★相対温度精度 (NETD)

- ★空間領域で平均 (E_s)
 - ・低温(-30°C) < 0.6 (m=32, n≥4)
 - ・常温(+35°C) < 0.25 (m≥16, n≥1)
 - ・高温(+100°C) < 0.35 (m≥16, n≥1)
- ★画素毎の時間平均(下)
 - ・低温(-30°C) < 0.3 (m=128, n=1)
 - ・常温(+35°C) < 0.3 (m=128, n=1)
 - ・高温(+100°C) < 0.2 (m=128, n=1)

★TIR温度・輝度・NETD

温度範囲: 233~414K(校正試験) + >163K(熱真空試験)

輝度は熱放射計0.8-12μm成分とほぼ比例関係

NETD < 0.3K(≅250~400K) (画像中心付近)

NETDはエラーBDNとほぼ同等

★TIRまとめ

- ・TIRは小惑星サーモグラフィ用リモート観測機器
- ・科学観測&ミッション運用で使用
- ・熱物性からみた小惑星の特徴を取得
- ・サンプル採取地点の選定情報の提供
- ・タックタック運用の地球環境的安全性の保証
- ・TIRは校正試験の結果、観測性能・温度精度ともに要求を満足
- ・当初予定の観測計画に適用
 - ・広い温度域(170~420K)をカバー
 - ・1画素毎のNETD(画像積算後)は ≤ 0.3K
 - ・視野角16° × 12°、画素毎はほぼ無し
 - ・解像度は画素解像度で決まる

NIRS3

NIRS3の目的

1.8~3.2 μm帯の近赤外線分光観測により、C型小惑星1999JU3表面の水・含水鉱物の検出を行う。

2.7 μm: 水酸基(-OH)の伸縮振動
2.9~3.0 μm: 水分子(H₂O)の変角振動

1999JU3: C型小惑星

- ・Snow line(雪線)近傍で生成
- ・軌道進化によりNEOに
- ・水質変成が起きている
- ・鉱物-水-有機物質の相互作用による共進化
- ⇒ 海・生命物質の起源?

炭素質コンドライト vs C型小惑星 サブタイプ

地上観測での大気・水蒸気の影響
二次的酸化・水質変成による酸化、宇宙風化
→両者の対応は未解明であり、深達によるin-situ観測が必要

S/N要求: 隕石サブタイプとの対応

炭素質コンドライトの3μm帯の吸収強度比

OH(2.8μm)/H₂O(3.0μm)吸収のドメインの違い
⇒ CH₄の分布が分岐
⇒ 判別のため、 $S_{OH}/S_{H2O} > 50$

S/N要求: 熱変成度の推定

加熱したMarshall隕石の3μm帯の吸収強度比

加熱温度によって3μmの吸収強度が異なる
⇒ 表面の経験した最高温度を推定
⇒ 温度を100°C単位で推定するため $S_{OH}/S_{H2O} > 50$

設計の特徴と結果

観測要求の实现

- ・「はやぶさ2」のNIRS(波長0.7~2.0μm帯)をベースに、観測波長を1.8~3.2μm帯に長波化
- ・検出器: フライイングカミオン(InAs(インジウム砒素)フォトダイオード素子を選択)
- ・冷却剤: ラジエータとペリチェ素子により、検出器を-80°C(193K)に冷却
- ・ペリチェ素子による充分な冷却性能が得られなかったため、ペリチェ方式をやめてラジエータ冷却を拡大

項目	内容
観測波長	1.8~3.2 μm
画素数	18 mm / pixel
質量	4.5 kg (sensor unit + electronics)
消費電力	30 W (max.)
データレート	500 bps (nominal), 500 kbps (max.)

NIRS3外観

センサ部: NIRS3(主) 観測鏡・冷却装置
エレクトロニクス部: NIRS3-AE (FM)

NIRS3の光学系

スリット・チャップ
InAsリアイメージンサ

項目	内容
材料	SiGe
口径径	32 mm
透過率	0.6~0.9
検出素子	InAs(インジウム砒素)
ピクセル配列	1 × 128 pixels

NIRS3性能試験のコンフィギュレーション

vacuum dewar, gold mirrors, black body source, NIRS3-AE, Space Cube, PC, NIRS3-AE

検出器 EM / FM の特性比較(暗出力)

InAs素子の epitaxial wafer 製造技術の向上に伴いノイズレベル、ピクセル間バラツキが低下
⇒ 積分時間: 400 μs → 2.5 msに拡張が可能(検出器温度: -85°C)
⇒ 大幅なS/N改善が実現した。

観測期間OS/N履歴(検出器 FM)

太陽観測
太陽方位角
HP運用(高度20 km): S/N > 300
SCI運用(高度1 km): S/N > 60
小惑星観測高度

NIRS3による鉱物・隕石の反射光スペクトル

① 観測データの品質向上が確認された。
② ①の成果を踏まえ、観測計画に活用された。

まとめ

- ・NIRS3観測システムのFM性能を地上試験により明らかにした。軌道と環境において基本要件仕様を満たすことを確認するとともに、校正用のデータを取得した。
- ・検出器性能の改善により、EMに対して満足する観測高度向上(50 ~ 500)が実現した。
- ・銅尾(Murchison, Murray, Jiblet Winselwan)、並物向土(olivine, serpentine)の反射光測定を実施し、FT-IR(フーリエ変換赤外分光光度計)の結果と整合していることを確認した。
- ・以上により、含水鉱物の分布、熱変成の程度、表面露出時間の異なる地域での宇宙風化の差異、対応・期待する隕石種の両方に対して、NIRS3が十分な性能を持つことを示した。