「はやぶさ2」での遠隔赤外観測

TIR・NIRS3による軌道上性能評価と小惑星Ryugu観測計画

○岡田達明, 岩田隆浩(JAXA), 北里宏平(会津大), 福原哲哉(NICT), 荒井武彦, 田中智, 安部正真(JAXA), はやぶさ2TIR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）とNIRS3（3μm帯分光）の2台の赤外観測装置によって，小惑星表層の熱物性と水・含水鉱物の調査を行う．小惑星(162173)Ryugu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，および軌道上での性能評価と地球・月観測の結果について速報する。.

TIR

★「はやぶさ2」での熱撮像

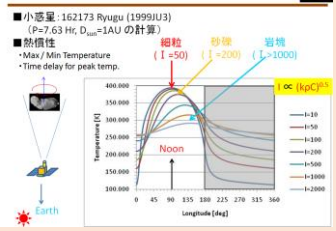
■目的: 小惑星表層の熱物性観測⇒表層物理状態
・科学: 表層物理状態の把握 ⇒ 小惑星の形成・進化過程
地上観測による小惑星モデルの検証
・運用: サンプル採取点選定(最適な粒度)
低高度への降下に安全な熱環境

■観測: 熱撮像(サーモグラフ)
・TIR: 熱放射量の2D撮像
小惑星の1自転分で連続撮像(温度履歴)

熱慣性:Γ [J m⁻²s^0.5 K⁻¹]	Γ = (kρC)^0.5	表層物理状態
~10		超高空隙率の微細粒(~80%)?, セレス, 火星の砂
~50		微細粒: 月レゴリス (粒径 50 ~ 100 μm)
100 ~ 200		砂(d ~mm): 433Eros
200 ~ 400		砂利 (d ~cm): 25143Itokawa's Museo-Sea Regio
400 ~ 1000		岩片, 岩石破片 (d < m): Itokawa's rough terrain
1000 ~ 2000		多孔質岩石
2000 ~		稠密な岩石

★熱慣性と温度プロファイル

■小惑星: 162173 Ryugu (1999JU3)
(P=7.63 Hr, D_{eff}=1AU の計算)
■熱慣性
・Max / Min Temperature
・Time delay for peak temp.



★TIR 仕様

■非冷却ボロメータ搭載:
冷凍機不要、小型軽量

Table. TIR Specifications

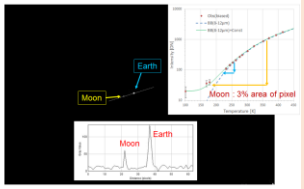
Items	Specifications
Total Mass	3.28[kg]
Total power	20 [W]
Detector	NEC 320 UMBA (AR coating)
Pixel Numbers	328 x 248 (effective)
Pixel Size	37 [μm]
FOV	16.7 x 12.6 [deg]
IFOV	0.051 [deg]
Wavelength	8 – 12 [μm]
Temp Range	150 to 440 [K]
NETD	<0.3 [K] for 230-400K
Absolute ΔT	<2 [K] for 230-400K
Ge Lens F-value	1.4
MTF	>0.5 (at Nyquist freq)
ADC	12 [bit]
Summation	2^N (N=0, 1, ..., 7)

★TIR観測フェーズ

観測フェーズ	距離 [km]	解像度 [m]	備 考
MP 回電則	2000 ~20	2000 ~20	小惑星中心フライバイ観測 ・地上観測 ・ダスト観測
MP GlobalO 特定	20 ~10	20 ~10	・毎周自転分, 数日毎観測 ・太陽高度45~90° ・太陽距離: 0.96~1.42AU
光学測定 三軸&高解像度	7k	7k	・月回転, 1日転分, 数日毎観測 ・TD降下前に実施, 太陽角: 0~40deg
地表面 詳細観測	7k	7k	・TD降下, サンプリング地点観測, 1日間 ・各地点を280m ~ 210m, 50m間隔撮像
TD 地形・超高解像度	<0.05	<0.05	・クリーン・サンプル・ポイント, 数回実施 ・各回標高ずらし詳細撮像
高度 高度計&レーザ観測	20 ~10	20 ~10	・高度20地点(5箇所)を45deg ・東西南北から

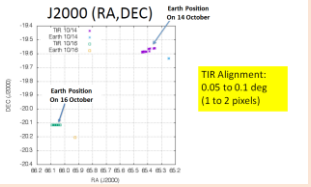
★TIRによる地球・月の検出

■TIR observed Earth-Moon (2x10⁶km, 2015/10/14 15:00 UT)
⇒ to check the alignment of TIR from the Images



★TIRのアラインメント(-Z 軸)

■Earth brightest pixel positions estimated using SPICE
⇒ to check the alignment of TIR from the Images

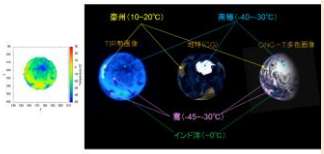


★TIRによる地球・月系の観測

■2015/11/10-13 @9x10⁶ km ■2015/11/26 @3x10⁶ km

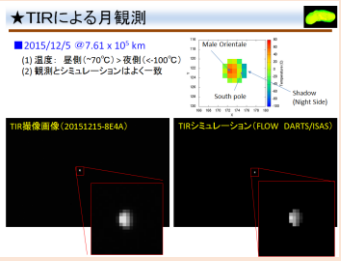
★TIRによる地球観測

■2015/12/4 @3.57 x 10⁵ km
(1) 夜側も観測可能で、地球大気の渦列が観測された
(2) 温度: 豪州(太陽・昼) > インド洋(海洋) > 南極(氷床・高緯度) > 雲(上層)



★TIRによる月観測

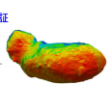
■2015/12/5 @7.61 x 10⁵ km
(1) 温度: 昼側(~70℃) > 夜側(<-100℃)
(2) 観測とシミュレーションはよく一致



★TIRのまとめ

・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
・サンプル採取点の選定情報の提供
・タッチダウン運用の熱環境的安全性の保証

・TIRは地球・月の観測の結果,
撮像性能・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(150~420K)をカバー
・1画素の3%の面積の月でも検知できた
・-z方向のアラインメント精度は0.05~0.10°
・地球および月の温度分布を撮像し、想定内の値

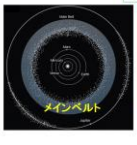


NIRS3

NIRS3 の目的

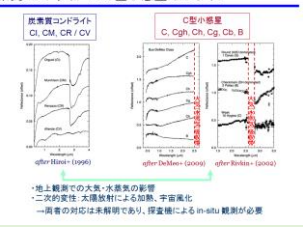
1.8~3.2 μm帯の近赤外線の分光観測により、C型小惑星Ryugu表面の水・含水鉱物の検出を行う。

2.7 μm; 水酸基(-OH)の伸縮振動
2.9~3.0 μm; 水分子(H_2O)の変角振動



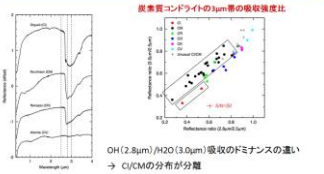
Ryugu :C型小惑星:
・Snow line(雪線)近傍で生成
→ 軌道進化によりNEOに
・水質変成が起きている
鉱物 – 水 – 有機物質の
相互作用による共進化
⇒海・生命物質の起源？

炭素質コンドライト vs C型小惑星 サブタイプ



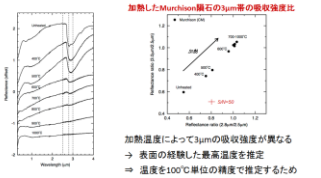
・地上観測での大気・水蒸気の影響
・二次的変性: 太陽放射による加熱、宇宙風化
→両者の対応は未解明であり、探査機による in-situ 観測が必要

S/N要求:隕石サブタイプとの対応



OH(2.8μm)/H2O(3.0μm)吸収のドミナンスの違い
→ CI/CMの分布が分離
⇒ 判別のため、$S_{Hydro}/N > 50$

S/N要求:熱変成度の推定



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℃単位の精度で推定するため
$S_{Hydro}/N > 50$

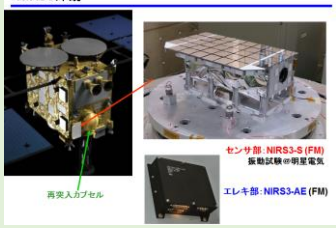
設計の特徴と結果

観測要求の実現:
・「はやぶさ」のNIRS(波長: 0.7~2μm帯)をベースに、
観測波長を1.8~3.2 μm帯に長波長化

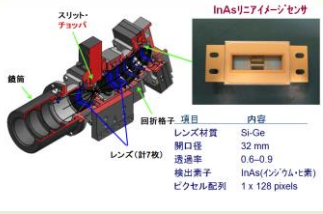
・検出器: リニアイメージセンサにInAs(インジウム砒素)フォトダイオード素子を採択
・冷却方式: ラジエータとペルチェ素子により、検出器を-80℃(193 K)に冷却
→ペルチェ素子による充分な冷却性能が得られなかったため、
ペルチェ方式をやめてラジエータ面積を拡大

項目	内容
観測波長	1.8-3.2 mm
波長分数	18 nm / 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



NIRS3 の光学系

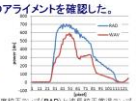


項目	内容
レンズ材質	Si-Ge
開口径	32 mm
透過率	0.6–0.9
検出素子	InAs(インジウム・ヒ素)
ピクセル配列	1 x 128 pixels

軌道上での特性

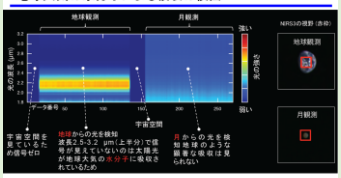
➢ 軌道上の主要イベント
・2015年2月～現在 定期チェック観測
→ 内部光源(感度校正ランプ, 波長校正ランプ)の観測により、機器の性能に変動・異常がないことをモニタしている。
・2015年11月～12月 スイングバイ前後の地球・月の観測
→ 地球と月のスペクトルを取得し、特に、地球大気の水による吸収が観測できていることを確認した。
→ NIRS3の光軸と探査機構体との間のアライメントを確認した。

➢ Ryugu到着までの予定
・内部光源の定期チェック。
・火星・木星・αBoo (Arcturus) の観測。



感度校正ランプ(RAD)と波長校正常温ランプ(WAVI)の出力スペクトル。積分時間1ms。

地球大気の水分子による吸収の検出



宇宙空間を見ているため信号ゼロ
地球からの光を検知 波長2.5-3.2 μm(上半分)で信号が見えていないのは太陽光が地球大気の水分子に吸収されているため
月からの光を検知 地球のような顕著な吸収は見られない

2015/11/26に取得した、地球と月のスペクトルデータの一部。
詳細解析中

まとめ

・NIRS3は定期チェックにより、打ち上げ後の機能・性能の健全性を確認できている。
・NIRS3は地球スイングバイ前後に実施した地球・月観測により、
1) 地球大気の水による吸収
2) –z方向のアラインメント
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・類似する隕石種の同定に対して、NIRS3が十分な性能を持つことを示した。

HAYABUSA 2 TIR Imager & NIRS3 Spectrometer

This document is provided by JAXA.