

はやぶさ2 ONC/LIDAR開発報告

Development of Hayabusa-2 ONC/LIDAR

¹S. Sugita, ²H. Sawada, ³S. Kameda, ⁴H. Suzuki, ⁵M. Yamada, ⁶R. Honda, ⁷T. Morota, ⁸C. Honda, ²K. Ogawa, ²K. Shirai, ²Y. Iijima, and ONC Team
⁹N. Namiki, ²T. Mizuno, ⁸N. Hirata, ⁹H. Noda, ⁵H. Senshu, ⁹R. Yamada, and LIDAR Team

¹Univ. of Tokyo (sugita@eps.s.u-tokyo.ac.jp), ²JAXA/ISAS, ³Rikkyo Univ., ⁴Meiji Univ., ⁵Chiba Inst. Tech., ⁶Kochi Univ., ⁷Nagoya Univ. ⁸Aizu Univ.,
⁹National Astronomical Observatory of Japan (nori.namiki@nao.ac.jp)

1. LIDAR開発完了と初期データ取得

LIDAR(図1.1)は「はやぶさ2」に搭載され、バス機器として探査機から小惑星までの距離を約25 km~30 mまで計測し、接近運用の航法支援を担う。また、ホームポジション(HP)と呼ばれる約20 kmの距離から小惑星を測距し、小惑星の形状モデルを推定する。形状モデルは適切なタッチダウンポイントの決定に利用される。一方、LIDARは科学観測にも利用される。測距と同時に送受光エネルギーを測定し、小惑星表面のアルベド観測をおこなう。ダスト観測、光リンク通信実験という観測モードも有している。フィールド試験、単体試験、総合試験を通してそれぞれの機能は検証され、性能と校正データが測定されている。



図1.1 LIDAR外観写真

1.1. LIDARの測距機能

測距と形状モデル作成のために要求される機能は(1) HP(ノミナル高度20 km)から測距可能であること、(2) 小惑星の半径方向に10 m以下の精度で地形を測定すること、である。このための性能要求と検証結果は

(1.1) 距離 25 kmでの測距(FAR)可能なカウンター(17 bit) ⇒ 17 bitをPFM単体電気試験で確認

(1.2) 送信レーザーエネルギー値が10 mJ以上 ⇒ 想定される温度範囲で13-17 mJ (PFM単体熱真空試験)

(1.3) リターンパルスのエネルギー利用率21 %以上(出力3.1 mJ相当) ⇒ 35 %以上(システム総合試験)

(2.1) 測距精度 5.5 m以下(内バイアス誤差 1.7 m程度) ⇒ DR = 2.0 m (内バイアス誤差 1.8 m) @ 20 km (PFM単体電気試験)

(2.2) HPにおけるONCグローバルマッピング撮像ごとの測距実施(合計~500回) ⇒ HPグローバルマッピング中にLIDAR観測を実施する(ミッションシナリオ)

(2.3) 取り付け精度0.1 deg以内、軌道上変動0.05 deg以内 ⇒ 特徴地形を横切るプロファイルとONC画像を比較してアライメント精度を向上させる(データ解析による精度向上)

(2.4) レーザ発振寿命 ≥ 1000万ショット ⇒ ≥ 1636万ショット(LD寿命試験)

1.2. LIDARのアルベド測定機能

アルベド観測のために要求される機能は(3) 送光ピーク値から小惑星への送信エネルギー値を推定できること(誤差配分 16.4%)、(4) 受光ピーク値から小惑星で反射した受信エネルギーを推定できること(誤差配分 19.3 %)、(5) 運用時のエネルギー利用率を推定できること(/誤差配分 10 %)である。このための性能要求と検証結果は

(3.1) 送信レーザーエネルギー値が10 mJ以上 ⇒ (1.2)に同じ。

(3.2) 送光ピーク値が0-255の範囲内にある ⇒ 想定される温度範囲で115-135 (PFM単体熱真空試験)

(3.3) 送光ピーク値から送信エネルギーの変換 (図1.2) (誤差 < 6.9 %) ⇒ $1.172 \times 10^{-4} \pm 4.71 \times 10^{-6} (\text{J/DU})$

(4.1) HP及び低高度(2-5 km)で受光ピーク値が0-255の範囲内にある ⇒ HPではゲイン8, 低高度運用ではゲイン2,4を使用することで所定の距離で0-255の範囲で観測可能 (PFM単体熱真空試験)

(4.2) 遠距離系ゲイン2, 4, 8において受光ピーク値-受信エネルギーの変換(誤差 < 9.8 %) ⇒ ゲイン2に対するゲイン4,ゲイン8の相対感度を再測定する(EM再試験)

(4.3) 受光部感度の温度に対する変動(誤差 < 5 % + 4.5 %) ⇒ APDの温度補償の誤差 5 % (仕様値)

(5.1) 運用時のコンフィグレーションでのエネルギー利用率が推定でき、インターフェース温度に対するエネルギー利用率の変化が小さい ⇒ 温度による変動分を含む誤差 4.1 % (PFM単体熱真空試験)

1.3. LIDARのダストカウント機能

ダスト観測のために要求される機能は(6) 探査機から観測領域までの距離が可変であること、(7) 観測領域を複数の観測ビンに分割できること、(8) 観測領域からの反射光プロファイルの概形がわかること、(9) 距離方向に空間解像度を有すること、である。このための性能要求と検証結果は

(6.1) 0-19.5 kmの範囲からパラメタで設定できる ⇒ 500m単位で設定できる(PFM単体電気試験)

(7.1) 観測ビンの幅は20 m以下 ⇒ $\Delta t = 166.7 \text{ ns}$ (20 m相当) (PFM単体電気試験)

(7.2) 観測ビンは50 以上 ⇒ 50ビン(PFM単体電気試験)

(8.1) 送光ピーク値から送信エネルギーの変換値の導出 ⇒ (3.3)に同じ

(8.2) 遠距離系ゲイン8において受光ピーク値-受信エネルギーの変換値の導出 ⇒ (4.2)に同じ

(8.3) 閾値を30, 60mV以下にも2つ以上設定し、その組み合わせとして様々な閾値が設定できる ⇒ 閾値は64通り(PFM単体電気試験)

(9.1) ビンに正しくデータが入る ⇒ EMを使って再測定する(EM再試験)

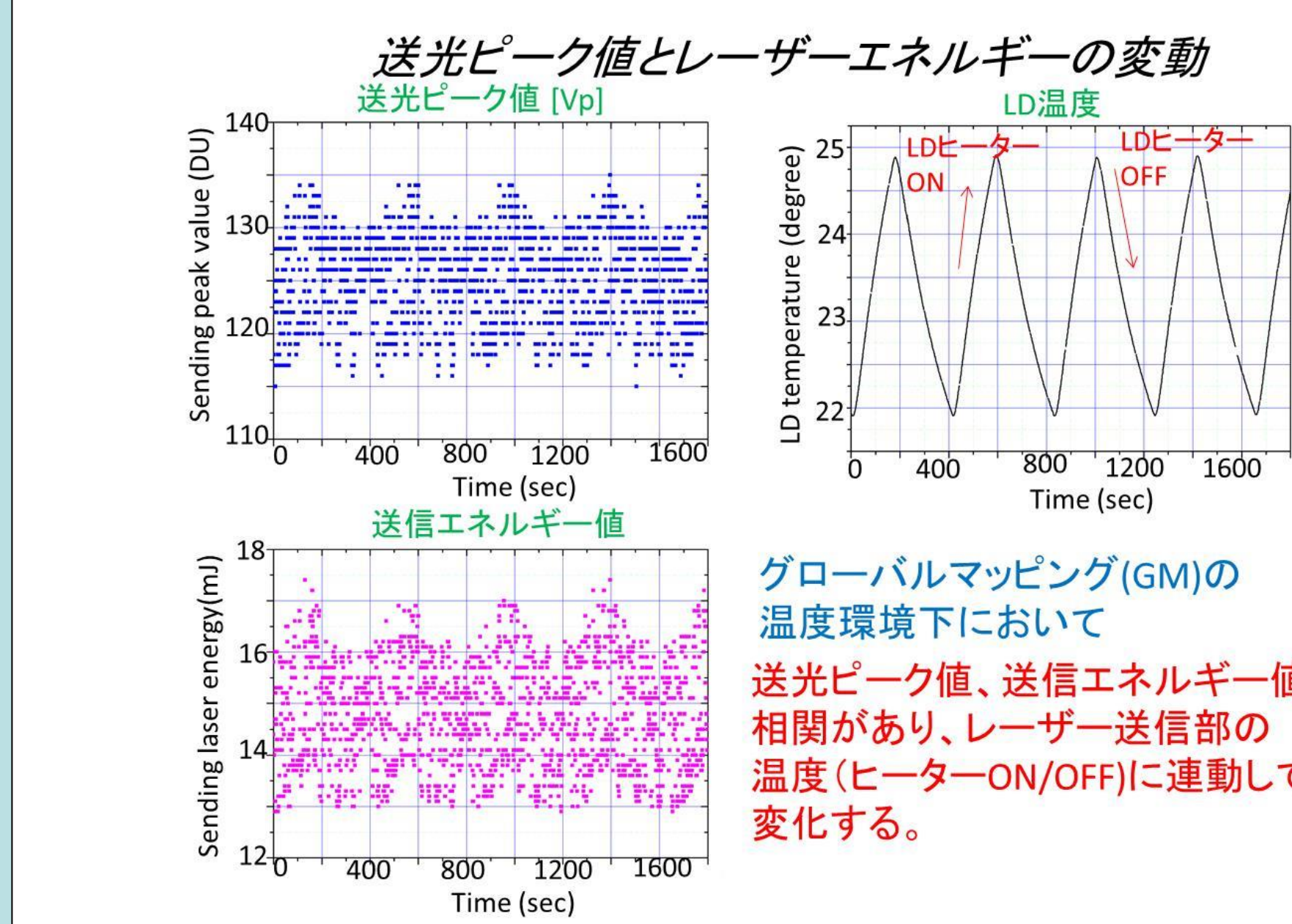


図1.2 アルベド測定の性能確認データの例

1.4. 光リンク実験

2015冬の地球スイングバイの時に、SLR地上局からLIDARに向けてレーザを打ち、LIDARのトラポン機能を利用してLIDARから地上局にレーザを折り返して光リンク実験を行う。LIDARのパフォーマンス(リンクバジェット、アライメント)を確認できる初めての機会となる。

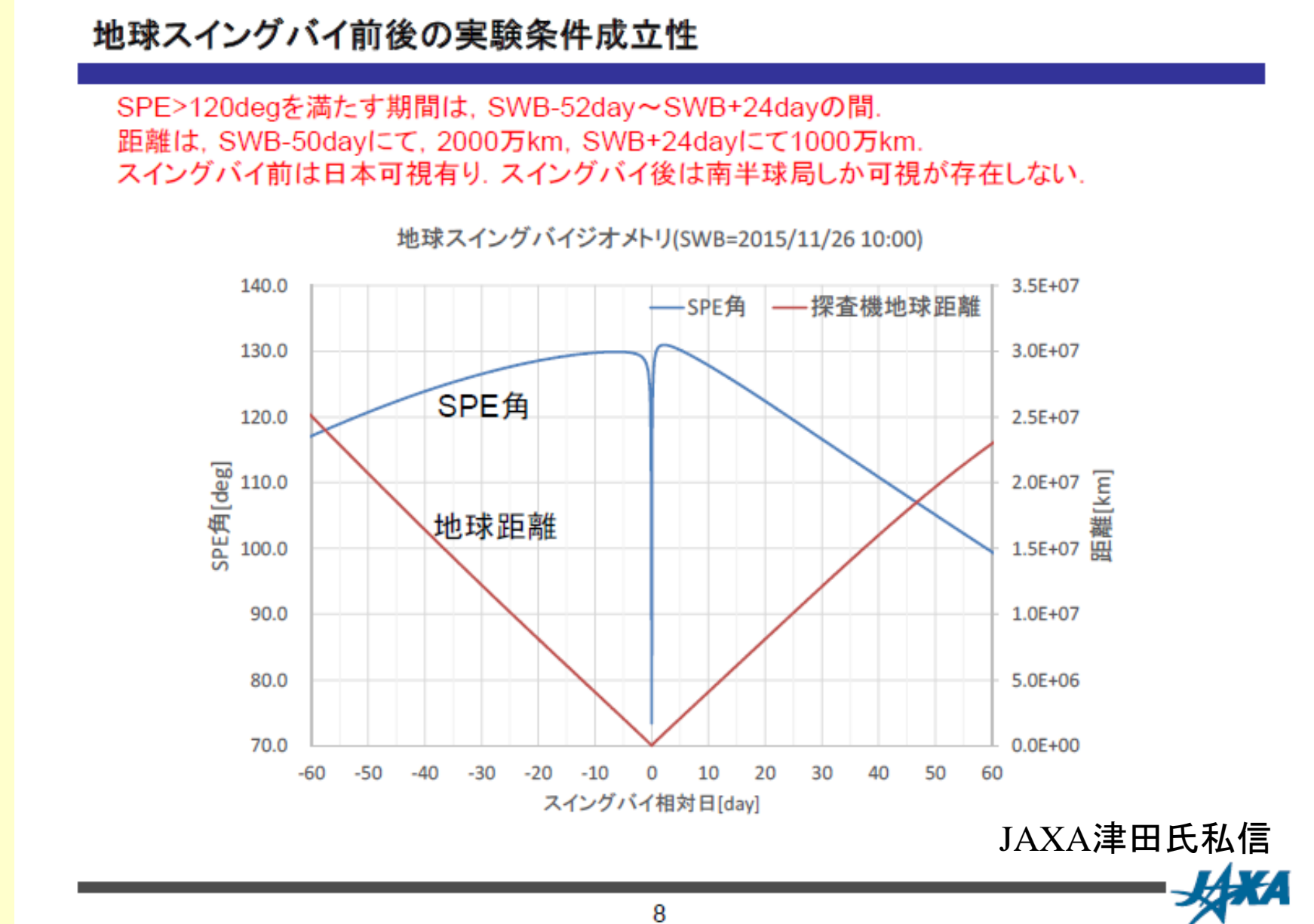


図1.3 光リンク実験の成立性確認。

2. ONC開発完了と初期データ取得

ONCは3台(T, W1, W2)の可視CCDカメラからなるシステムであり、探査機の光学航行と理学観測の両方を担う。特にONC-Tは、7枚の狭帯域フィルタを用いて分光撮像を行い、はやぶさ2搭載機器中で最も高い空間解像度で小惑星1999JU₃の全球観測する点で大変に重要な機器である。本ポスターでは、ONCの地上試験および初期運用中取得データについて簡単に解説する。特に、地上試験では、これまで行われたことがなかった隕石を用いたEnd-to-end試験を実施した。この手法は、はやぶさ2の他の機器および欧州から参加しているMASCOTのCAMおよびMicroOmegaでも採用されて、機器間のクロスキャリブレーションとしても役立つこととなった。なお、昨年に彗星に着陸を果たしたRosetta探査においてもFlight Spare品の校正試験に我々の隕石試料を利用したい旨の要請があり、こちらにも利用された。

2.1. ONCとは

ONCはOptical Navigation Cameraの略称で、探査機誘導と科学計測のために恒星と探査小惑星を撮像する可視カメラ。T,W1,W2の3つからなり、1024x1024の2次元CCDを持つ[1]。

- ONC-T(望遠の直下視): 視野角: 6.35° × 6.35°
フィルタ中心波長: 390, 480, 550, 700, 860, 950, 589.5nm, Wide
焦点距離: 100m~∞
空間分解能と視野:
2m/pixで 全球を撮像
1cm/pixで 10x10m領域を撮像
- ONC-W1(直下視), W2(側方視), 視野角: 65.24° × 65.24°
焦点距離: 1m~∞
空間分解能と視野:
1m/pixで 100x100mを撮像
1mm/pixで 1x1mを撮像

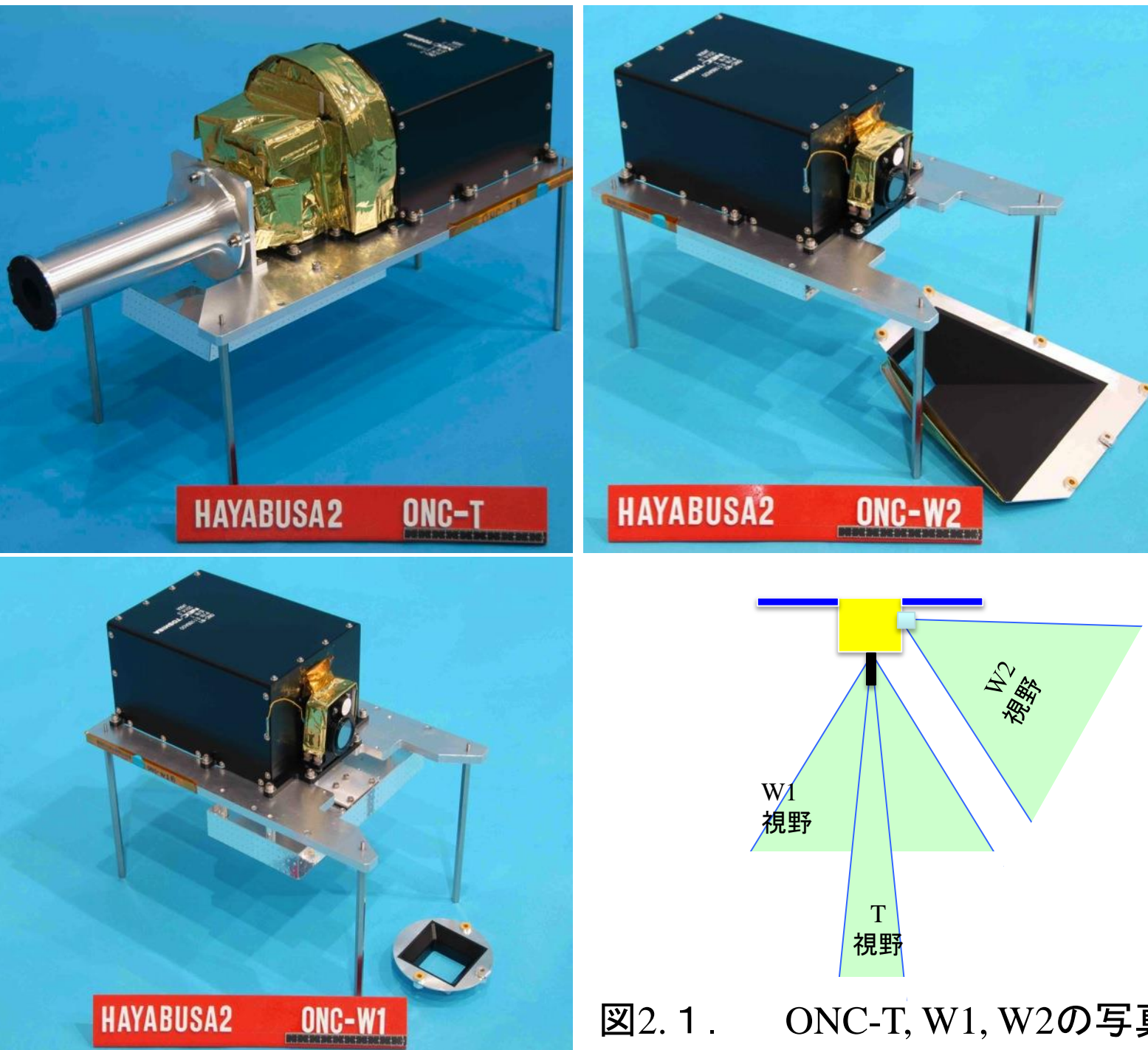


図2.1. ONC-T, W1, W2の写真

2.2. ONCの光学検証試験

- ONC-T
 - 線形性、感度、視野内迷光と散乱光、視野外迷光、歪曲、FFランプ、1 mターゲット撮像、狭帯域フィルタを使った回込み迷光の試験を実施し、校正に必要なデータを取得した。
 - End-to-end試験として、炭素質隕石を用いた分光撮像試験を実施(次項)。
- ONC-W1, W2
 - 線形性、感度、歪曲の試験を実施し、校正に必要なデータを取得した。
 - ターゲットマーカの視認性試験を実施。

2.3. 炭素質隕石を用いたONC-Tの分光撮像試験

カメラの性能は、積分球やコリメータを用いた標準的な光学検証試験によって定量され、それら個々の性能試験の結果の積み上げで総合性能を割り出すことは可能である。しかし、現実には往々にして見落とされし点や不測の不具合が起きるものである。これを防ぐためには、なるべく実際の観測に近い条件で、実際の観測対象に近い物体を撮像するEnd-to-end試験を行って計測性能の確認を行うことが有効である。はやぶさ2のONC-Tでは、相対吸収強度が3%ほどしかない0.7μm吸収帯の捕捉が非常に重要な要件となっている。そこで、光学検証試験において、炭素質コンドライトを被写体として計測を行った。

実験では、0.7μm吸収帯を持つCMコンドライト (Murchisonx3, Nogoya, Murray [2])のいずれでも0.7μm吸収は検出され、吸収帯のないCMコンドライト (Jbiilet Windelwan) では、検出されないことが確認された[3]。この結果は、1999JU3に0.7μm吸収帯があれば、ONC-Tで検出可能であることを示すものである。

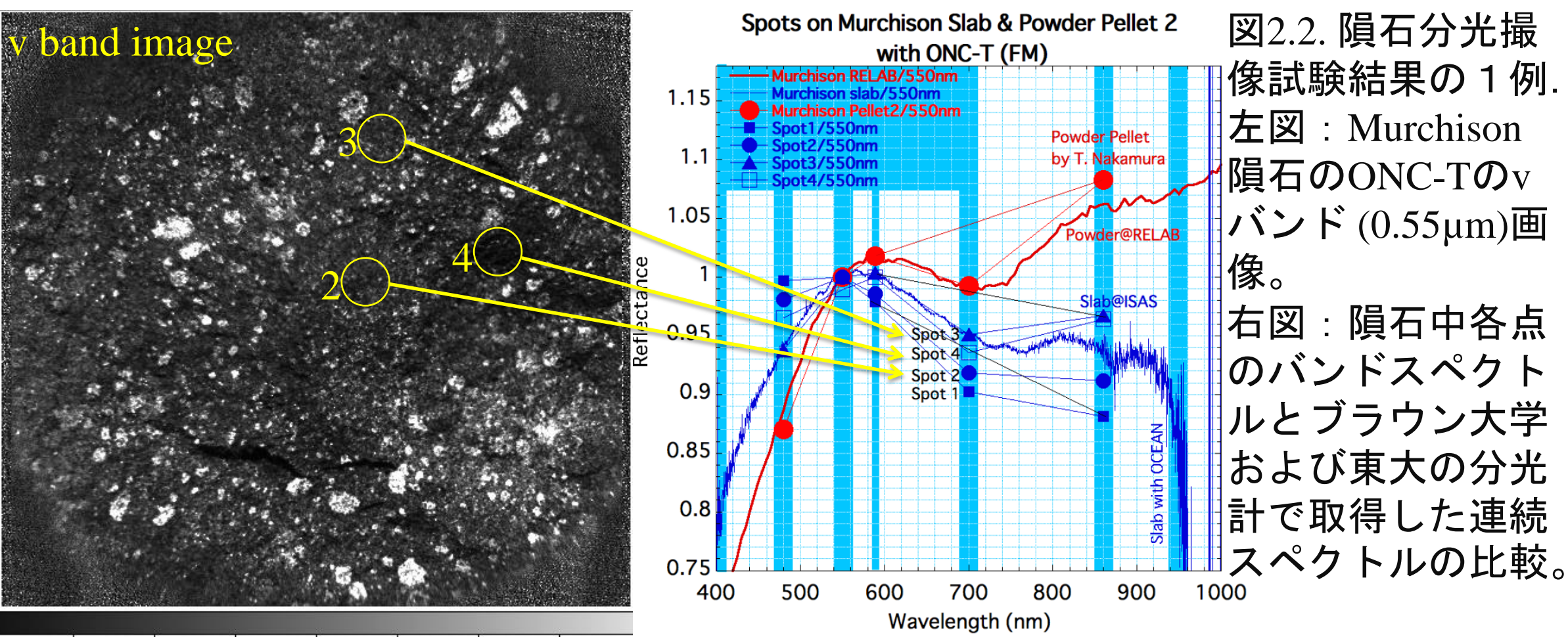


図2.2. 隕石分光撮像試験結果の1例。左図: Murchison隕石のONC-Tのvバンド(0.55μm)画像。右図: 隕石中各点のバンドスペクトルとブラウン大学および東大の分光計で取得した連続スペクトルの比較。

2.3. システム総合試験中取得データ

システム総合試験では、W1カメラ健全性確認撮像試験の際に被写体として炭素質コンドライトを用いた。W1は分光機能を持たないが、小惑星表面へのタッチダウンの際に地表面から1~3mの距離で撮像できる可能性がある。この際には数mmの極めて高い分解能が実現できる。しかし、実際の小惑星が持つ微妙な濃淡コントラストや組織が計測できるかは、実際の隕石で試験する必要がある。

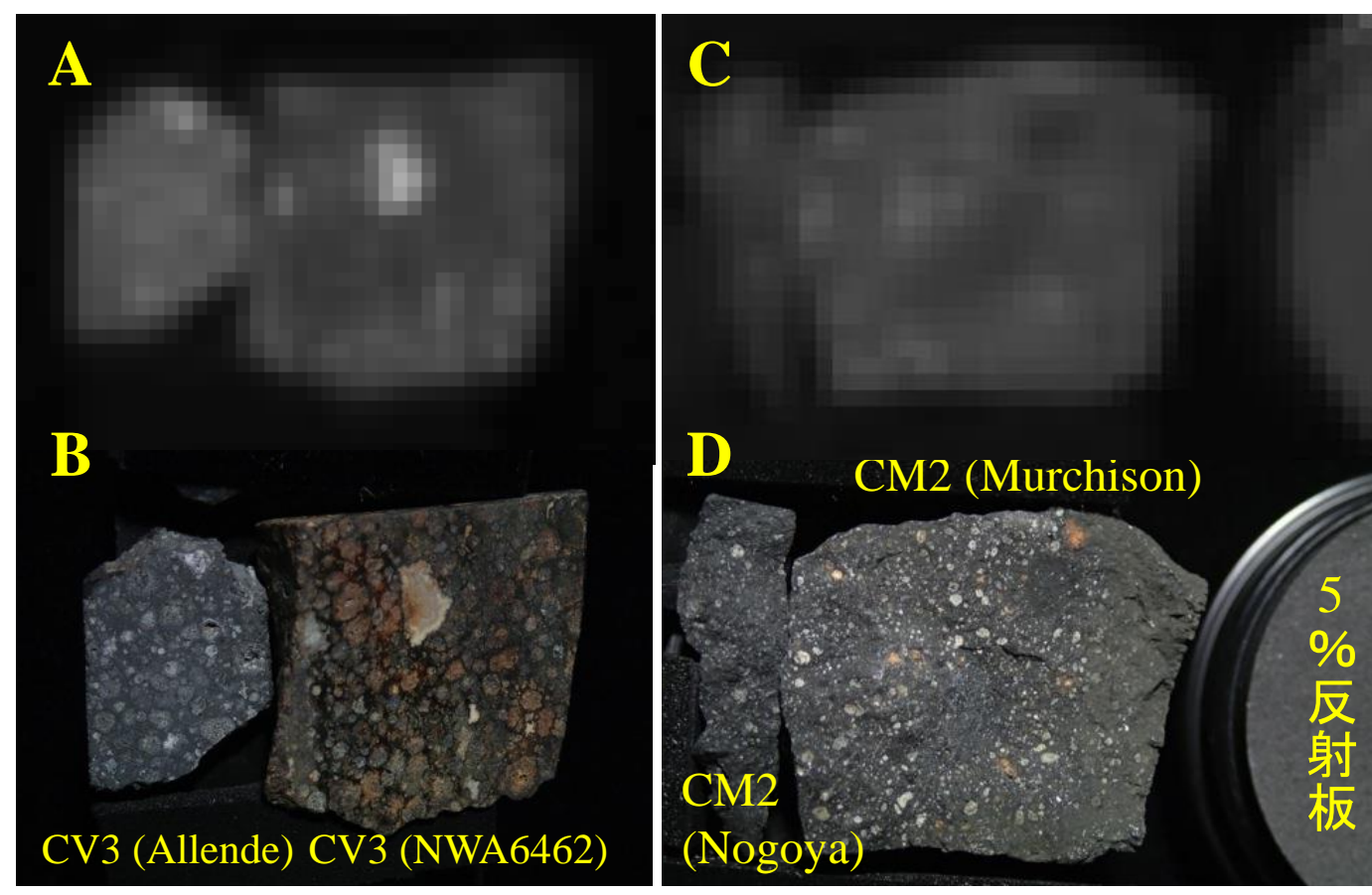


図2.3. W1による近接隕石撮像結果の例。A, B : 2種類のCV3隕石の画像。AはW1画像。Bは市販のデジタルカメラのマクロ機能を用いた画像。CV隕石に特徴的な大きなCAI組織が識別できる。

C, D: 2種類のCM2隕石と標準反射板の画像。CM2隕石内のコンドライト破片の濃淡がW1画像(C)中にも確認できる。

2.4. ONC初期運用中取得データ

2014年12月3日の打上後の第1可視中にW2による月撮像が行われ、ONCのファーストライトとなった。その後、T, W1, W2の撮像が実施され、恒星像およびFFランプ像が取得された。現在データの詳細解析中だが、小惑星観測の支障を与えるような大きな問題は見つかっていない。

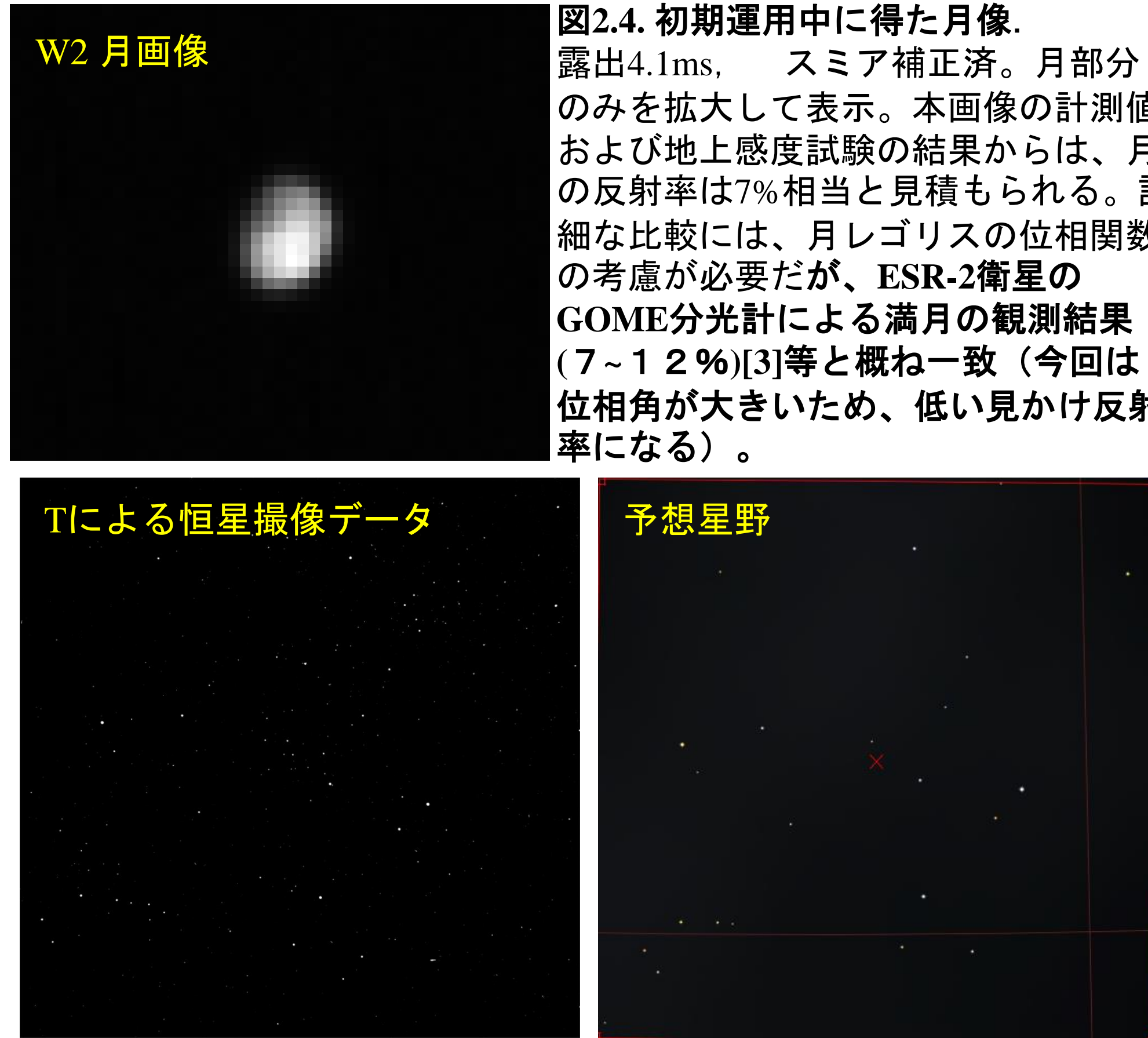


図2.4. 初期運用中に得た月像。露出4.1ms。スミア補正済。月部分のみを拡大して表示。本画像の計測値および地上感度試験の結果からは、月の反射率は7%相当と見積もられる。詳細な比較には、月レゴリスの位相関数の考慮が必要だが、ESR-2衛星のGOME分光計による満月の観測結果(7~12%)[3]等と概ね一致(今回は位相角が大きいため、低い見かけ反射率になる)。

図2.5. 初期チェックアウト時に撮像した星野。

左: ONC-T画像(wide filter, 露出11.14s), 右: ステラナビゲータの予想図

2.5. 小惑星撮像に向けて

小惑星近傍のホームポジション到着後には、数ヶ月で最初のタッチダウン地点選定が必要である。NASAのOSIRIS-RExも3~4ヶ月でB型小惑星Bennuに到着して競合データの取得を開始する。小惑星到着までの期間を有効に使ってONC画像データの迅速な処理と正確な解釈が行える体制を整えることが極めて重要である。

Reference: [1] Sugita, S. et al. (2013), *LPSC*, #3026. [2] Hiroi, T., et al. (1996), *MAPS*, 31, 321-327. [3] Kameda, S. et al. (2014) *COSPAR*, #B0.4-33-14. [4] Dobber, M.R. (1996), *Proc. SPIE* 2831, 154, doi:10.1117/12.257208.