

宇宙地球フロンティア実地研修 報告書

Report for Onsite Training in Earth-Space Frontier Science

氏名/Name	湯本 航生 Koki Yumoto		
所属部局/ Affiliation	理学系研究科 地球惑星科学専攻 Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science		
研究機関・企業名 /Hosting Institution	米ブラウン大学 (RELAB) NASA Reflectance Experiment Laboratory, Brown University		
期間/Period	2023年2月1日 2/1/2023	~	2023年9月8日 9/8/2023 *西暦で記入 mm/dd/yyyy

1. 背景

惑星探査機や地上望遠鏡によってこれまで様々な天体の反射分光スペクトルが観測されてきた。このようなスペクトルデータの解釈には、地球上にあるアナログ物質のスペクトルを測定し、観測データと比較することがしばしば必須である。例えば、小惑星に見られる $0.7 \mu\text{m}$ 帯の吸収は水質変性の証拠であることが、CM コンドライトの分析データとの比較から示唆された (Fornasier et al., 2014)。このようなアナログ物質の分析を世界的にリードしてきたのが、NASA 反射分光研究所 (RELAB) である。RELAB では、これまで 50 年間隕石や月面帰還試料の反射分光分析が行われてきており (Pieters, 1983)、今もなお世界的に分析を依頼されている。2023 年 9 月に回収された小惑星 Benu の帰還試料も RELAB で分析される予定である。

これまで RELAB では、波長分解能は高いが、空間分解能がない装置を用いたスペクトル測定が主流であった。このような装置が採用されてきた理由は、これまで得られた観測データは主に数メートルよりも悪い空間解像度であったからである。しかし、今後惑星への着陸探査が進むにあたり、惑星表面の高空間解像度 (cm~mm 以下) のスペクトルデータが得られるようになることが予想される。このような将来探査データを解釈するため、隕石・帰還試料のスペクトルを高空間解像度で迅速に分析できる手法の開発が急務である。

2. 共同研究の目的

そこで、本共同研究では RELAB を訪問し、高空間解像度でスペクトル分析を行える多色分光顕微カメラを新たに開発した。本装置はこれまで JAXA キュレーション室で開発してきた分光装置 (Yumoto et al., 2022; Cho et al., 2022) の設計をベースにしたものである。開発した装置を用いて反射標準板や隕石試料の測定を行い、精度検証と試験分析を行った。

3. 開発した装置と精度検証結果

RELAB で新しく開発した装置 (Fig. 1) の空間解像度は各波長で $\sim 5 \mu\text{m}$ 、視野サイズは 2 mm から 24 mm (可変) であり、4 波長 (450, 525, 650, 850 nm) の反射分光画像を計測可能である。また、斜め 60 度から試料を観察するカメラを併設し、電動ステージを用いて試料を回転させながら撮像することで、3 次元形状モデルの作成も可能になっている。本装置では反射分光計測を 1 視野あたり 70 秒、形状を 1 試料あたり 5 分で計測可能である。

本装置を用いて、月隕石 (NWA11444)・炭素質コンドライト (Yamato 980115)・ダイオジェナイト・月帰還試料 (Apollo 17, 71055)・10% 標準反射板の計測を行った。これらの平均反射スペクトル (Fig. 2) は、RELAB の他装置の測定結果と整合的であり、本研究で開発した新しい装置でも高精度のスペクトル分析が可能であることを示す。例えば、本装置で計測した Yamato 980115 のスペクトルは、RELAB 現有の双方向反射率分光装置 (Bi-directional Reflectance Spectrometer; BDR) の計測結果と 5% 以内で整合的であった。

さらに、本装置の特徴である高空間解像度を実証するため、隕石試料の反射画像 (Fig. 3a) から擬

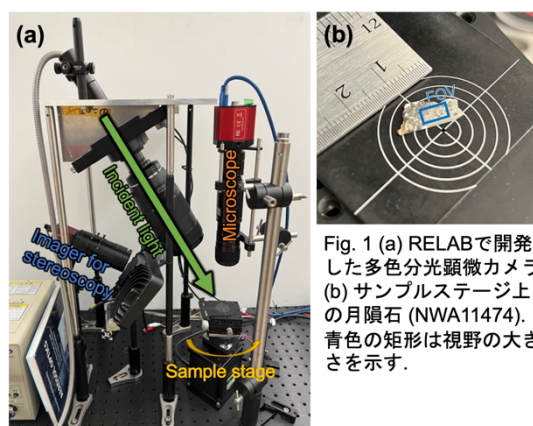


Fig. 1 (a) RELAB で開発した多色分光顕微カメラ。(b) サンプルステージ上の月隕石 (NWA11474)。青色の矩形は視野の大きさを示す。

似カラーマップ(Fig. 3b)を作成した。鉱物や岩片ごとに擬似カラーの違いが見られ、これらの物質のスペクトルを空間的に解像できていることを示している。例えば、月隕石 NWA11444 では 100 μm の幅の岩脈が特徴的な黄色の擬似カラーを持っており、少なくとも 100 μm よりも高い空間解像度でスペクトル分析ができていていることを示す。

本装置の応用可能性を検証・拡張していくため、以下の二点について帰国後も共同研究を進めている。

- ① 本装置で測定したスペクトルマップと電子顕微鏡を用いて測定した元素マップを比較
- ② 本装置の光源と検出器を交換することで、測定波長域を近赤外域まで拡張

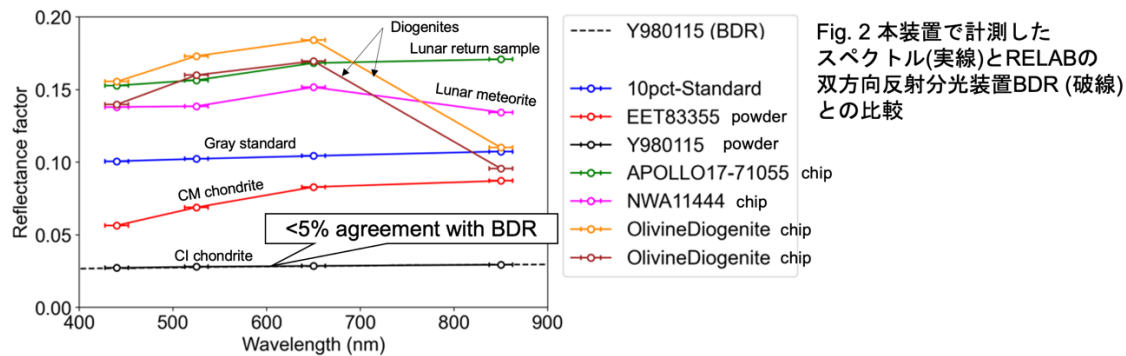


Fig. 2 本装置で計測したスペクトル(実線)とRELABの双方向反射分光装置BDR(破線)との比較

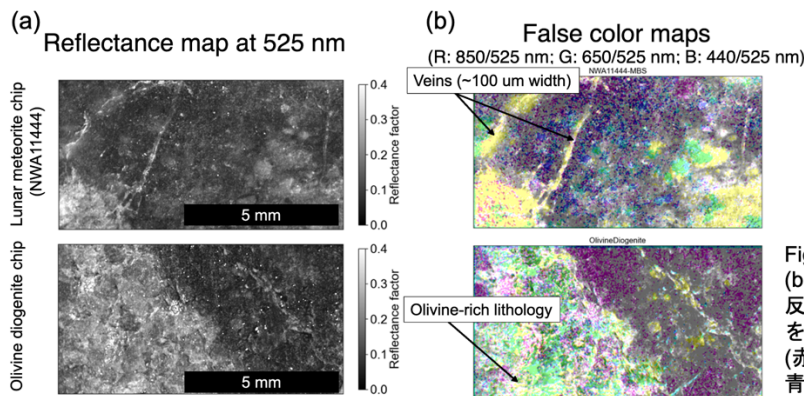


Fig. 3 (a) 525 nmでの反射画像。(b) 擬似カラー画像。各波長の反射画像の比を用いて着色を行っている。(赤: 850/525 nm; 緑: 650/525 nm; 青: 440/525 nm)

Reflectance spectroscopy has been a powerful technique for understanding the physical and chemical condition of planetary surfaces by ground-based telescopes and planetary missions. Comparing the observed spectra with those of analogue materials (e.g., meteorites and simulants) is crucial for such interpretation. NASA's Reflectance Experiment Laboratory (RELAB) has long led the spectroscopic analysis of analog materials.

The primary focus of RELAB was to conduct spot-by-spot analysis of the spectra. However, planetary landing missions planned in the near future will likely provide spectral data with high spatial resolution (cm to mm scale). To interpret such data, it is imperative to develop imaging instruments that can rapidly map the spectra with high spatial resolutions.

In this research, we visited RELAB and developed a new multi-color microscope for rapid spectral imaging (Fig. 1a). The spatial resolution of the new instrument is approximately 5 μm at each of the four wavelengths (450, 525, 650, 850 nm), with a variable field of view ranging from 2 mm to 24 mm. Using this instrument, we measured lunar meteorites (NWA11444), carbonaceous chondrites (Yamato 980115), diogenites, lunar return samples (Apollo 17, 71055), and a 10% reflectance standard. The average spectra of these samples (Fig. 2) were consistent with those measured by existing instruments at RELAB, demonstrating the high accuracy (<5% error) of our new instrument. We also show the false color map (Fig. 3b) to demonstrate the high spatial resolution of the spectra (better than 100 μm). We are continuing the research to verify and expand the applicability of this instrument as follows: 1) compare the spectral maps with elemental maps measured by electron microscopes. 2) extend the wavelength coverage to the near infrared.

References

- Cho, Y., Yumoto, K., Yabe, Y., Mori, S., Ogura, J. A., Yada, T., ... & Sugita, S. (2022). Development of a multispectral stereo-camera system comparable to Hayabusa2 Optical Navigation Camera (ONC-T) for observing samples returned from asteroid (162173) Ryugu. *Planetary and Space Science*, 221, 105549.
- Fornasier, S., Lantz, C., Barucci, M. A., & Lazzarin, M. (2014). Aqueous alteration on main belt primitive asteroids: Results from visible spectroscopy. *Icarus*, 233, 163-178.

- Pieters, C. M. (1983). Strength of mineral absorption features in the transmitted component of near-infrared reflected light: First results from RELAB. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B11), 9534-9544.
- Yumoto, K., Cho, Y., Yabe, Y., Mori, S., Ogura, A., Miyazaki, A., ... & Sugita, S. (2022, March). Visible multi-band spectra and specular reflectivity of Ryugu returned samples. In *53rd Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 2678, p. 1326).