

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24540493

研究課題名(和文) 隕石表面の可視 - 赤外反射スペクトルの測定による鉱物組成導出の研究

研究課題名(英文) Study on Deriving the Mineral Composition by Measuring the Visible-Infrared Reflectance Spectra of Meteorite Surfaces

研究代表者

廣井 孝弘 (Hiroi, Takahiro)

国立極地研究所・研究教育系・外来研究員

研究者番号：80593970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：国立極地研究所が南極から回収してきた隕石試料片を、そのまま非破壊の状態で見可視から赤外領域の反射光の分光をすることで、それらの鉱物組成を推定する試みをした。貴重な火星や月からの隕石、そして大部分が小惑星ベスタから来ていると考えられるHED隕石、そして水や有機物を含む炭素質コンドライト隕石の合計130個余りの試料について、反射スペクトルの測定を各試料片に1点以上行った。それらのスペクトルに線形外挿・修正ガウス関数分解・主成分解析などを施すことにより、各隕石の岩石種や鉱物・化学組成などを理解することができ、はやぶさ2などの探査ミッションへの応用方法も提案できた。

研究成果の概要(英文)：Visible-infrared reflectance spectra of meteorites recovered from Antarctica by the National Institute of Polar Research were measured for estimating their mineral assemblages and mineral chemical compositions. Reflectance spectra of one or more spots on each chip of more than 130 meteorite chip samples of precious meteorites from Mars and the Moon, HED meteorites which mostly came from the asteroid Vesta, and carbonaceous chondrites containing water and organics were measured. By applying linear extrapolation, modified Gaussian model deconvolution, principal component analysis, etc. on those spectra, the rock types and mineral/chemical compositions could be understood, and the scheme for applying this technique to planetary missions such as Hayabusa2 has been proposed.

研究分野：固体惑星物質分光学

キーワード：隕石 可視近赤外分光 反射スペクトル 月 火星 小惑星 惑星探査 炭素質コンドライト

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球にこれまで降り注いできた隕石は、それらの天体や既に破壊されてしまった天体の一部を代表しており、それらを調べることで、初期太陽系の様々な進化過程での物質の分布と、母天体内での水質変成・熱変成・分化の程度とを知ることができる。

(2) それまで、隕石を電子顕微鏡や質量分析器などで鉱物化学的に調べる研究は多くなされてきたが、遠くの天体を望遠鏡で調べたり、探査機を送ったり、ローバーをその表面に降ろしたりした際に適用できる手法で研究した例は比較的少なかった。

(3) 特に有用な手法である可視-赤外反射分光であり、小惑星試料回収探査機「はやぶさ」、月周回衛星「かぐや」、そして天文衛星「あかり」が成功裏に運用されていた。それらを有効利用し、将来の探査計画に役立てるためには、月隕石などに多い角礫岩の各岩相の測定や、様々な炭素質コンドライトの3ミクロン吸収帯を測定する必要がある。

(4) しかしながら、国立極地研究所（極地研）の豊富な南極隕石試料を惑星探査の目的でそのまま可視・近赤外分光測定をした例はほぼ皆無で、それら試料の有効活用がされていなかった。研究代表者が2010年夏に特任教授として赴任して初めてそのような活動が始まり、科研費申請に至り、最終的には2度目の応募で2012年に研究費取得をし、この科研費研究企画として継続された。

### 2. 研究の目的

(1) 極地研が管理する豊富な隕石の各岩相について、近紫外から赤外領域までの反射スペクトルを測定することにより、隕石試料の鉱物組成を非破壊で導く方法を確立し、月・火星・小惑星などの表面の岩石組成を遠隔探査で推定するための分光データベースを作成する。

(2) その成果を惑星探査機やローバー、そして望遠鏡観測によるデータに適用することにより、対象天体の組成を推定し、初期太陽系の物質進化の仕組の理解と、太陽系生成論の精密化に役立てる。特に、日本で成功裏に達成された惑星探査衛星「かぐや」および天文衛星「あかり」のデータの有効活用をし、「はやぶさ2」や「セレーネ2」などの将来の探査の計画およびデータ解析に貢献する。

### 3. 研究の方法

(1) 試料選定：国立極地研究所（極地研）に所蔵されている422個の月・火星・HED・炭素質コンドライト隕石のうち、大きさと新鮮度に基づいて測定に適するものを227個選定し、それら試料のうち128個が実際に借用・配分されて研究に採用された（表1）。

表1：研究対象の隕石試料数。

隕石試料分類	候補数	採用数
HED		
ダイオジェナイト	34	18
ユークライト	53	35
ハワルダイト	13	8
メルト	1	1
火星	9	7
月	8	8
炭素質コンドライト		
CI	5	3
CM	70	25
CR	2	2
CO	7	7
CV	10	5
CH	2	2
CK	13	7
合計	227	128

(2) 反射スペクトル測定：採用されたそれら隕石試料表面のカラー写真を撮影し、各岩相の双方向紫外-近赤外反射スペクトル（入射角30度、出射角0度、波長範囲0.25-2.5 $\mu\text{m}$ 、測定間隔5nm）を国立天文台水沢観測所または大阪大学で、また炭素質コンドライト試料については、フーリエ変換型赤外反射スペクトル（1.4-25 $\mu\text{m}$ 、分解能4 $\text{cm}^{-1}$ ）を東北大学またはブラウン大学で測定した。測定点の大きさは2-3mm程度が大部分だが、小さな岩相については必要に応じて1-2mmに絞られた。

(3) スペクトルデータ解析：測定された反射スペクトルが、複数の岩相または鉱物の面的な混合を反映する場合は、線形外挿によって端成分スペクトルに還元した。端成分スペクトルが得られた場合は、各スペクトルを修正ガウス関数モデル（MGM）で分解して、構成鉱物の化学組成を推定した。炭素質コンドライトの含水鉱物に起因する3ミクロン吸収帯については、主成分解析（PCA）を用いて隕石分類との相関を調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) 火星隕石

①表1及び図1に示したように、7種類の火星隕石について、合計9点で可視・近赤外反射スペクトルを測定した。全ての試料について、ケイ酸塩鉱物に特徴的な $\text{Fe}^{2+}$ の3d軌道電子による吸収帯が0.9-1.0 $\mu\text{m}$ および1.8-2.4 $\mu\text{m}$ の波長範囲を中心として見られる。これらの中心波長から、含有される輝石のMg/Fe/Ca比を推定したところ、既知の値と整合的な結果となった。

②これら火星隕石は多様な岩相に乏しく、一点以上で測定されたのは2種類の隕石のみであったが、図2のように2点測定された場合、線形外挿によって端成分鉱物のスペクトルを推定することができた（図3）。

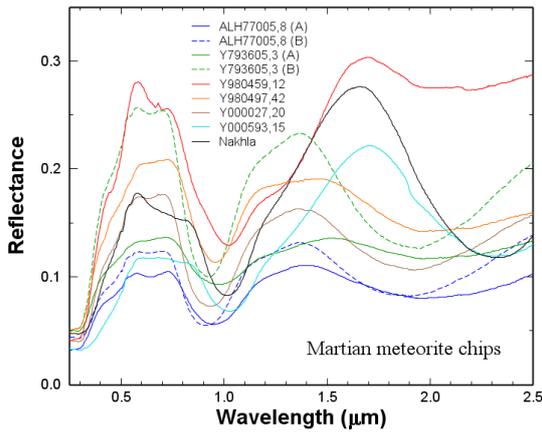


図 1：火星隕石片で測定された全ての可視・近赤外反射スペクトル。

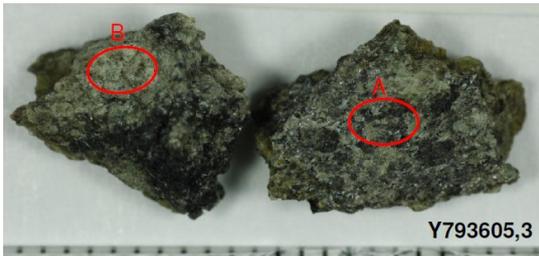


図 2：火星隕石 Y-793605 の破片と測定点。一目盛りは 1mm で、測定点は 2x3mm の大きさ。

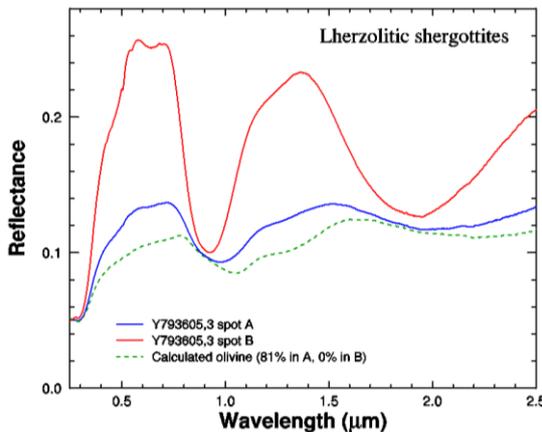


図 3：火星隕石 Y-793605 の 2 点 (図 1) の反射スペクトルとそれらの線形外挿で求めたカンラン石に似たスペクトル。

## (2) 月隕石

①表 1 および図 4 にあるように、8 種類の月隕石の破片について、20 点で反射スペクトルが測定された。火星隕石と同様に、ケイ酸塩鉱物の特徴的な吸収帯が見られたが、地球での風化による水の吸収が、波長 1.9 $\mu\text{m}$  および 2.2 $\mu\text{m}$  付近の狭い吸収帯として主に表れた。

②月隕石の場合、多様な岩相を含む試料が多く、Y-86032 (図 5) においては純粋な斜長岩相が測定可能な大きさで存在し、複数の点のスペクトルデータから、火星隕石の場合と同様に、線形外挿によって端成分鉱物のスペクトルを推定することができた (図 6)。

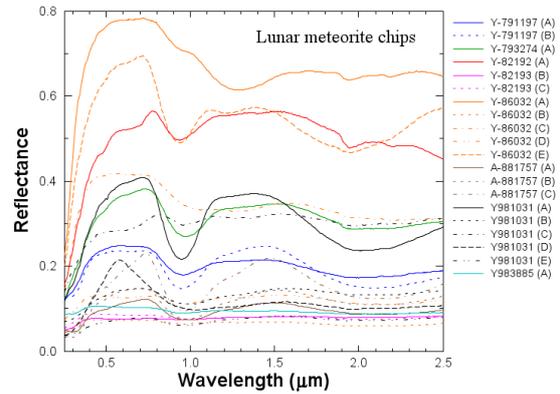


図 4：月隕石片で測定された全ての可視・近赤外反射スペクトル。

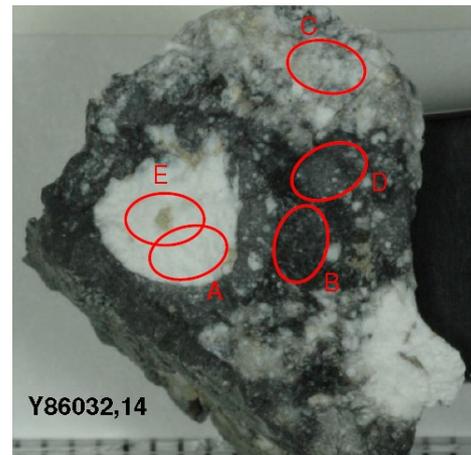


図 5：月隕石 Y-86032 の破片と測定点。一目盛りは 1mm で、測定点は 2x3mm の大きさ。

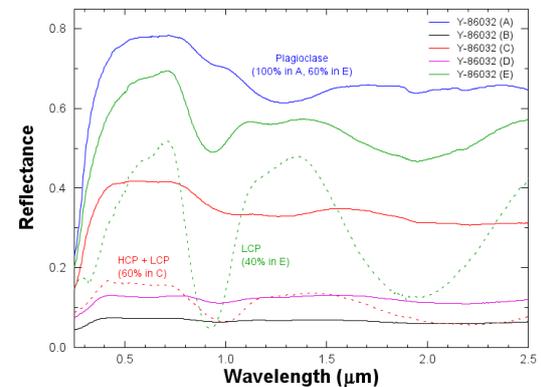


図 6：月隕石 Y-86032 の各岩相の反射スペクトルと、それらの線形外挿で求めた端成分スペクトル。

③月隕石 Y-981031 では、緑色の岩相 (図 7 の D 点) が、その反射スペクトルはアポロ 15 号試料中のグリーンガラスと類似しており、火山性の緑ガラスであると同定された (図 8)。また、火星隕石の場合と同様に、A 点と B 点のスペクトルから線形外挿によって、カンラン石的な端成分鉱物のスペクトルを導出した。このように貴重な月隕石の破片を非破壊で反射分光により表面鉱物の同定ができるようになったことは大きな進歩である。

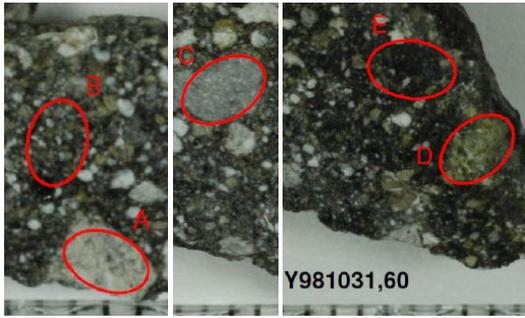


図7：月隕石 Y 981031 の破片と測定点。一目盛りは1mmで、測定点は2x3mmの大きさ。

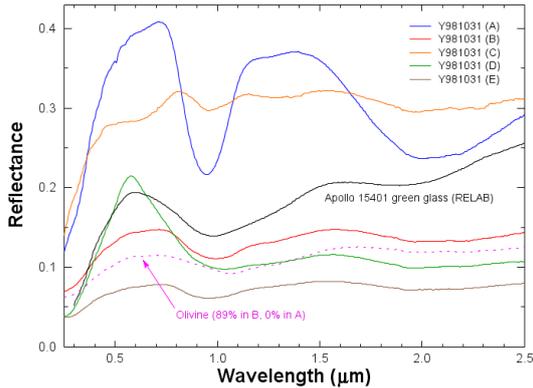


図8：月隕石 Y-981031 の各岩相のスペクトルおよび、それらの線形外挿で求めたカンラン石に似たスペクトル。アポロ 15 号のグリーンガラスのスペクトルも参考を含めてある。

④図4のスペクトルに見られる吸収帯を定量的に解析するために、修正ガウス関数モデル (Modified Gaussian Model: MGM) 分解が用いられた。図8に示した Y-981031 の各岩相のスペクトルを MGM 分解した例を図9および10に示す。この解析により、ケイ酸塩鉱物中の Fe や Ca の量比を示すと考えられる主要吸収帯の中心波長位置が求まり、また図10には示していないが吸収強度によってその鉱物の存在量が推定できる。同時に、前述の地球風化による 1.9μm および 2.2μm 付近の水の吸収帯を分解できる。

⑤全ての月隕石測定点の MGM 分解によって求められた 1μm および 2μm 付近の主に輝石による最も強い吸収帯の中心波長位置を図11に示した。Klima et al. (2007, 2011) による純粋輝石の波長中心と Fe 量 (□ および △ の上下) と Ca 量 (△ の右) との相関も同時に示してある。これを見ると、月隕石の点は大半は輝石の傾向に乗り、それによって Fe や Ca の量比が推定できるが、緑ガラスの Y 981031 (D) は当然輝石の傾向から大きく外れ、カンラン石に富む岩相や、長波長限界である 2.5μm より先にある水の吸収や背景吸収の傾きの影響で輝石の傾向からずれてしまっている場合がみられる。ここでは、特に粉末でなく岩石破片試料の反射スペクトルデータに対する MGM 分解の手法としての限界を示している可能性もあり、今後の課題である。

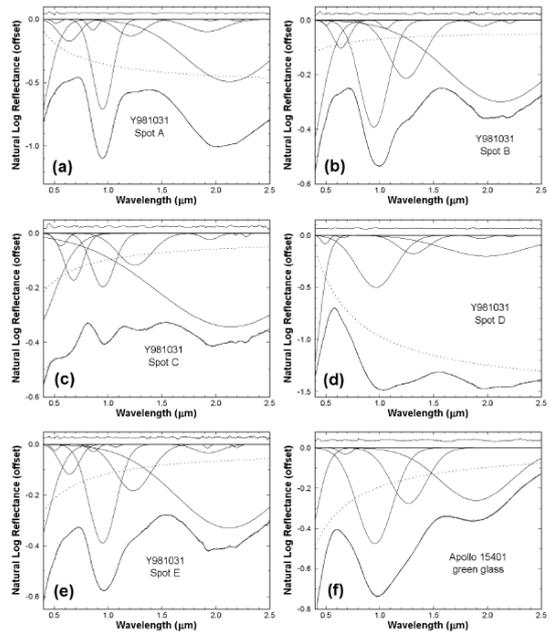


図9：Y-981031 のスペクトル (図8) に対する修正ガウス関数モデル (MGM) 分解の例。

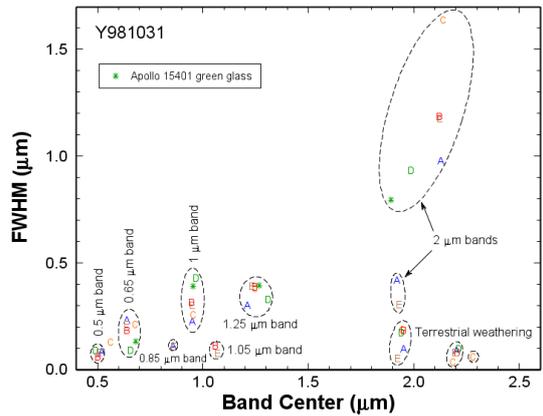


図10：Y-981031 のスペクトルの MGM 分解 (図9) で求めた吸収帯の中心波長と半値幅。

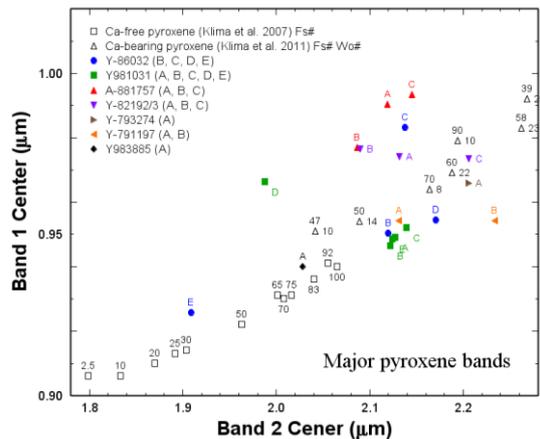


図11：月隕石試料全てのスペクトルの MGM 分解から得られた最強の 1μm と 2μm 吸収帯の中心波長と、純粋輝石の中心波長。

### (3) HED 隕石

HED 隕石についても月隕石と同様に多様な岩相のスペクトルから、純粋な斜長岩相や稀

なスピネル鉱物がこのような破片での分光測定としては初めて同定された。それらのMGM分解や論文出版は現在準備中である。

#### (4) 炭素質コンドライト隕石

①表1の51種類の炭素質コンドライト隕石の破片について、71点で反射スペクトルが測定された。上記の火成岩的隕石とは違い、炭素質コンドライトは含水鉱物や有機物に富み、暗く、2.7-4 $\mu$ mの領域に主にOH基の吸収を示す。測定されたスペクトルのうち、新鮮な測定点を反映するものと解釈された35のデータを図12に示す。波長範囲は25 $\mu$ mまで測定されたが、図13に示したように、はやぶさ2探査機に積まれた望遠多色カメラ(ONC-T)と近赤外分光計(NIRS3)の波長範囲に対応する3.2 $\mu$ mまでに注目して示してある。

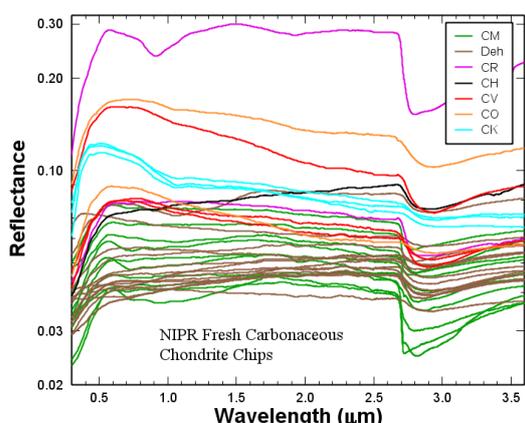


図12: 炭素質コンドライトの測定点のうち比較的新鮮な状態を示す35の反射スペクトル。

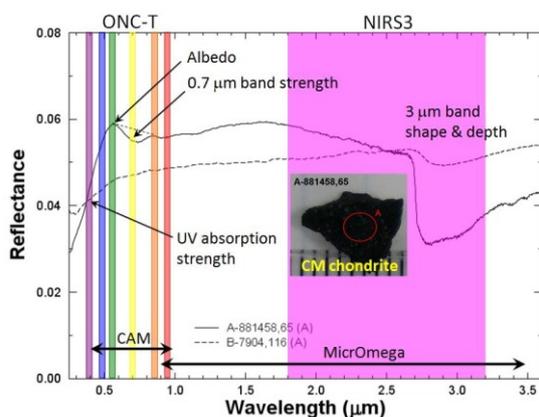


図13: 炭素質コンドライトの反射スペクトルの例と、はやぶさ2探査機搭載機器ONC-TとNIRS3、そしてMASCOTランダー搭載機器CAMとMicrOmegaの波長バンドとの関係。

②図12のスペクトルと、ブラウン大学のRELABデータベースにある新鮮な炭素質コンドライト粉末のスペクトルデータと、NASA所蔵の南極からの炭素質コンドライト破片のスペクトルを、図13のONC-TおよびNIRS3のデータに変換したものに、主成分解析(PCA)を行った。これらの結果から、ONC-Tによって数種類の炭素質コンドライトを見分けることができ、NIRS3によって更に構造水と吸着水

の量比も推定できることが分かった。はやぶさ2ミッションに大きく貢献できるであろう。

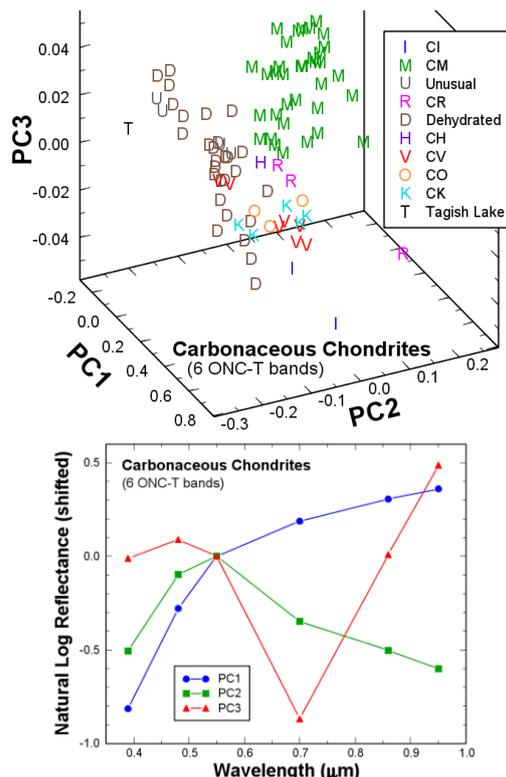


図14: 新鮮な炭素質コンドライト粉末と破片の模擬ONC-Tデータの主成分解析の結果。

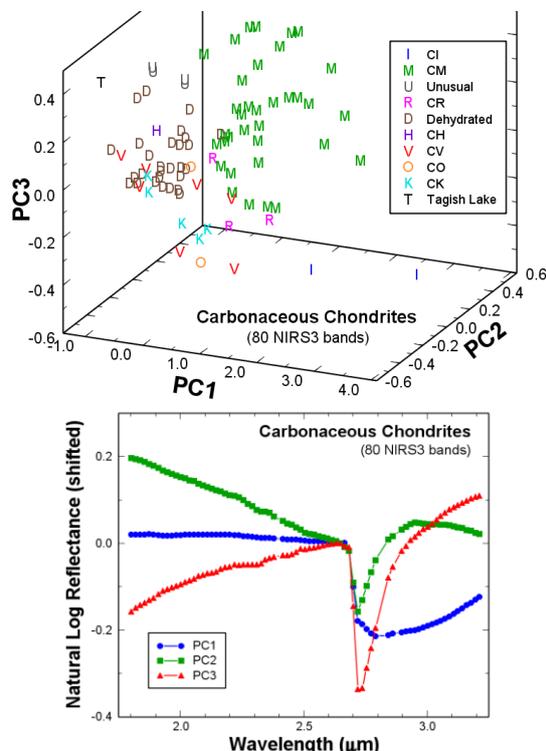


図15: 新鮮な炭素質コンドライト粉末と破片の模擬NIRS3データの主成分解析の結果。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① T. Hiroi, H. Kaiden, A. Yamaguchi, H. Kojima, K. Uemoto, M. Ohtake, T. Arai,

- S. Sasaki (2016) Visible and near-infrared spectral survey of lunar meteorites stored at the National Institute of Polar Research. Polar Sci. 10, 476-496. (査読有)  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1873965216300469>
- ② T. Hiroi, H. Kaiden, K. Misawa, T. Niihara, H. Kojima, S. Sasaki (2011) Visible and near-infrared spectral survey of Martian meteorites stored at the National Institute of Polar Research. Polar Sci. 5, 337-344. (査読有) (科研費研究期間前だが、最初の申請後で当研究の一環として継続された。)  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1873965211000387>
- [学会発表] (計12件)
- ① 廣井 孝弘、Visible and near-infrared spectral survey of carbonaceous chondrites and its application to Hayabusa2、第48回月惑星科学会議、2017.3.23、ウッドランド (アメリカ)。
- ② 海田 博司、Visible and near-infrared spectral survey of carbonaceous chondrites and its application to Hayabusa2、第39回南極隕石シンポジウム、2016.12.1、国語研究所 (東京)。
- ③ 廣井 孝弘、Estimating the carbon contents and distinguishing the types of carbonaceous chondrites by spectral instruments onboard Hayabusa2 spacecraft、第47回月惑星科学会議、2016.3.24、ウッドランド (アメリカ)。
- ④ 廣井 孝弘、Principal component analysis of visible-near-infrared reflectance spectra of select carbonaceous chondrites for Hayabusa2 mission、はやぶさ2015シンポジウム、2015.11.18、宇宙科学研究所 (神奈川)。
- ⑤ 廣井 孝弘、Summary of visible to infrared spectral survey of NIPR carbonaceous chondrite chips and its application to Hayabusa2 mission、第38回南極隕石シンポジウム、2015.11.16、国語研究所 (東京)。
- ⑥ 廣井 孝弘、Discovery of unusual 3 micron absorption bands on some CM chondrite chips of NIPR and possible link to asteroidal surface minerals、第46回月惑星科学会議、2015.3.19、ウッドランド (アメリカ)。
- ⑦ 廣井 孝弘、Visible and near-infrared spectral survey of meteorite chips and its application to planetary exploration、はやぶさ2014シンポジウム、2014.12.4、宇宙科学研究所 (神奈川)。
- ⑧ 廣井 孝弘、Discovery of unusual 3 μm bands on some CM chondrite chips of NIPR and possible link to asteroidal surface

- minerals、第37回南極隕石シンポジウム、2014.12.3、国語研究所 (東京)。
- ⑨ 廣井 孝弘、Visible and near-infrared spectral survey of CM chondrite samples of National Institute of Polar Research and possible discovery of unusual 3 micron absorption bands、第45回月惑星科学会議、2014.3.20、ウッドランド (アメリカ)。
- ⑩ 廣井 孝弘、炭素質コンドライトの可視・近赤外反射分光特性のはやぶさ2ミッションへの応用、日本惑星科学会秋季講演会、2013.11.22、石垣市民会館 (沖縄)。
- ⑪ 廣井 孝弘、Visible and near-infrared spectral survey of select carbonaceous chondrite samples of the National Institute of Polar Research: Results of CI/CM chondrites、第36回南極隕石シンポジウム、2013.11.14、国語研究所 (東京)。
- ⑫ 廣井 孝弘、Keys to detect space weathering on Vesta: Changes of visible and near-infrared reflectance spectra of HEDs and carbonaceous chondrites、第44回月惑星科学会議、2014.3.22、ウッドランド (アメリカ)。

[その他]

火星隕石および月隕石に関する出版論文2つに使われたデータを広く公開して利用できるようにするために、以下のWebページに隕石試料の写真・データ・グラフを掲載した。  
[http://www.planetary.brown.edu/research/associate/Hiroi/VNIR\\_SpecSurvey\\_NIPR\\_Mars2.htm](http://www.planetary.brown.edu/research/associate/Hiroi/VNIR_SpecSurvey_NIPR_Mars2.htm) (火星隕石)  
[http://www.planetary.brown.edu/research/associate/Hiroi/VNIR\\_SpecSurvey\\_NIPR\\_Lunar.htm](http://www.planetary.brown.edu/research/associate/Hiroi/VNIR_SpecSurvey_NIPR_Lunar.htm) (月隕石)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣井 孝弘 (HIROI, Takahiro)  
 Brown大学・地球環境惑星科学科・研究員  
 研究者番号：80593970

(2) 研究分担者

海田 博司 (KAIDEN, Hiroshi)  
 国立極地研究所・地圏研究グループ・助教  
 研究者番号：10302811

小島 秀康 (KOJIMA, Hideyasu)  
 国立極地研究所・地圏研究グループ・教授  
 研究者番号：10113896

(3) 連携研究者

佐々木 晶 (SASAKI, Sho)  
 大阪大学・大学院理学研究科・教授  
 研究者番号：10183823

(4) 研究協力者

中村 智樹 (NAKAMURA, Tomoki)  
 東北大学・大学院理学研究科・教授