

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 2 月 25 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04082

研究課題名(和文)高精度ミラー光学系顕微反射分光分析装置を用いたイトカワ試料の反射スペクトル分析

研究課題名(英文) Reflectance spectrum for Itokawa sample using a new mirror optical system

## 研究代表者

大澤 崇人(Osawa, Takahito)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究主幹

研究者番号：70414589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：これまでに開発した反射分光分析装置を高度化すべく、4Wの白色レーザー、分光器、近赤外光検出器、可視光検出器を導入し、さらにフィルターとフィルターホイール、ビームサンプラートとフォトダイオード等を導入し、これらをLabVIEWで統合制御するプログラムを開発した。楕円ミラーを用いた光学系は研磨の問題で困難となったため、新たに放物面ミラーを用いた光学系を開発し、楕円ミラー光学系とともに特許申請した。新たな光学系で測定条件を実験的に決定することで、不安定な白色レーザーを使用して可視から近赤外領域までの反射率が測定できるようになった。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系の進化の歴史を紐解くうえで始原的隕石の研究は欠かせないが、多くの隕石の起源は明確ではない。その理由は隕石の母天体である小惑星には多数の種類があり、その表面が宇宙風化の影響によって変化しているために、単純に隕石を粉末化したものの反射スペクトルと小惑星のスペクトルが正確には一致しないからである。小惑星探査機はやぶさが持ち帰ったイトカワの砂は、実際の宇宙風化の影響を評価できる唯一の試料だが、極めて小さいためにその表面の反射スペクトルの態様を明らかにすることは難しい。そこで本研究では独自のミラー光学系を持つ反射分光分析装置を開発することで、イトカワの砂の分析に挑んだ。

研究成果の概要(英文)：In order to enable ultra-high resolution reflection spectroscopy, a 4 W white laser, a spectroscope, a near-infrared light detector, a visible light detector, filters and a filter wheel, a beam sampler and a photo-diode were prepared. We have developed a program that integrates these with LabVIEW. Since the optical system using an elliptical mirror became difficult due to the problem of polishing, we developed a new optical system using 4 parabolic mirrors and applied for a patent together with the elliptical mirror optical system. By experimentally determining the measurement conditions with a new optical system, it has become possible to measure the reflectance from the visible to the near infrared using the unstable white laser.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：反射分光分析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

太陽系の起源と進化を解明するために始原的隕石の研究は欠かせない。多くの隕石は小惑星が母天体であると考えられているが、ほとんどの隕石種で母天体が確定しておらず、太陽系進化を紐解く上で大きな足枷となっている。この問題を解決する上で極めて大きな貢献をしたのが小惑星探査機はやぶさである。はやぶさが持ち帰ったイトカワの砂の研究によって、S 型小惑星が LL コンドライトの母天体であることが確定となった[1-3]。

しかし、そもそも小惑星の反射スペクトルと隕石の反射スペクトルが一致しないことが、母天体を正確に割り出せない理由であり、この不一致の原因と考えられるのが宇宙風化である。宇宙風化は天体表面に太陽風が照射されたり微隕石が衝突したりすることで進行し、これによって天体表面の反射スペクトルが変化すると考えられている。イトカワの砂の研究は宇宙風化が小惑星表面で実際に起きていることが明らかにした[4,5]。

これまでにレーザー照射等を用いた宇宙風化の模擬実験が行われ[6-9]、反射スペクトルの変化が観測されたが、宇宙風化が反射スペクトルに与える影響を解明するためには本物の宇宙風化試料の反射スペクトルを詳細に測定する必要がある。最近 Bonal らがイトカワ試料の反射スペクトルを報告したが[10]、スポットサイズが  $20\mu\text{m}$  と大きすぎ、また  $1\mu\text{m}$  より長波長のスペクトルも不明であるため宇宙風化の影響を定量的に議論できない。その理由は、1 粒子の中でも宇宙風化の態様は不均質であり[11]、宇宙風化のミクロな現象と反射スペクトルの変化を対応させるためには、鉱物種ごとの観察はもちろん、太陽風照射と微隕石衝突の影響を弁別し、かつ可能な限りの表面分析を行う必要があるからである。よって、回折限界に迫る空間分解能で砂の表面を観察できなければならない。しかし既存の装置でこの要求を満たすことは極めて難しい。その理由は、イトカワ試料が微小であり、しかも地球大気に曝せないためである。微小試料の分析にレンズ光学系を用いると、波長ごとに焦点がずれるため試料直径を遥かに上回る色収差が生じて使い物にならない。一方、近接場光を用いる場合にはプローブを試料とほぼ接触させるため、真空封入された試料を測定できない。真空封入された試料の測定には広いワーキングディスタンス(WD)が必要である。カセグレン鏡を用いた場合 WD は広いが、空間分解能は  $10\mu\text{m}$  程度が限界である。光学設計上回折リングの影響が大きくなり、空間分解能が上がらないのである。

一方、申請者らはこれまでにない新しい光学系を用いた反射分光分析装置の開発を行ってきた[JST A-STEP ハイリスク挑戦タイプ]。

本装置は独自のミラー光学系の採用によって色収差を完全にゼロにでき、 $50\text{mm}$  もの広大な WD を確保できる。また試料直上からカメラ観察でき、光学設計上回折リングの影響も小さい。基本原理を右図に示す。集光した光は直径  $10\mu\text{m}$  のアイリスによって点光源となる。この時点で色収差は削ぎ落とされる。光は表面粗さ  $10\text{nm}$  の超高精度楕円回転体ミラーによって直径  $1\mu\text{m}$  に集光される。試料から反射した光は同一形の楕円回転体ミラーによって検出器へと導かれる。この装置は現在、光学系が完成しているが、可視光用の光源と分光器しかない。そこで本研究では本装置を近赤外分光用に拡張し、イトカワ試料の反射スペクトルの観測を目指す。



開発した反射分光分析装置

References [1] Nakamura T. et al. (2011) Science 333, 1113-1116. [2] Yurimoto H. et al. (2011) Science 333, 1116-1119. [3] Ebihara M. et al. (2011) Science 333, 1119-1121. [4] Noguchi T. et al. (2011) Science 333, 1121-1125. [5] Nagao K. et al. (2011) Science 333, 1128-1131. [6] Sasaki S. et al. (2001) Nature 410, 555-557. [7] Hiroi T. and Sasaki S. (2001) MAPS 36, 1587-1596. [8] Kohout T. et al. (2014) Icarus 237, 75-83. [9] Okazaki M. et al. (2014) Asteroids, Comets, Meteors Helsinki 2014. [10] Bonal et al. (2015) MAPS 50, 1562-1576. [11] Thompson et al. (2014) EPS 66, 89.

## 2. 研究の目的

本研究では、開発した分光分析装置の波長範囲を近赤外領域( $1.7\mu\text{m}$ )まで拡張し、この装置を用いてイトカワの砂の表面の反射スペクトルをマッピング測定する。鉱物種ごと、宇宙風化の態様ごとに精密に弁別されたイトカワ試料の反射スペクトルから宇宙風化が反射スペクトルに与える真の影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

これまでに開発した反射分光分析装置を赤外領域まで拡張する大幅なバージョンアップを行った。新たに装置に組み込む機器として、赤外領域に対応した 4W 白色レーザー光源、分光器、検出器 2 台、各種バンドパスフィルターとフィルターホイール、フォトダイオード等である。組み上げる光学系も大幅な変更を行った。当初は楕円ミラーでの光学系を組もうとしたが、ミラーの研磨に多大な困難があり、実現が困難であると判断したため、放物面ミラーを組み合わせた新しい光学系を考案した。楕円ミラーと放物面ミラーの光学系は両方を含めた形での特許の申請を行っている。

光源として白色レーザーを選択する理由は幾つかある。まず、本装置は焦点を極小にするために光路が長く、アイリス径が極めて小さいため、光源からの光の広がり角をできるだけ小さくしないと十分な光量が得られない。よってレーザー光が最適であるが、波長可変 OPO レーザーでは十分な波長分解能と波長範囲の両方を得ることが現状では困難である。そのため、現在最高の光源として白色レーザーを選択した。ただしそれでも反射光は強くないため、検出器は光電子増倍管を用い、フォトンカウンティングによって検出することとした。検出器は可視光用と近赤外用の 2 台が必要で、測定は両者を切り替えながら行う。極小のアイリスを通過した光は別のアイリスで回折リングをカットされ、それを通過した光は楕円ミラーによって直径約 1  $\mu\text{m}$  に集光され、試料から反射した光はミラーで反射させたのちにバンドパスフィルターを通して分光器へと導かれ、分光器の下流の検出器で光を検出する。検出する反射光の空間的領域はミラーを調整することで精密に制御できる。

本研究では照射試料が小さいため、高倍率のズームレンズを導入し、このレンズを試料直上の CMOS カメラに接続することで試料と測定点を観察する。試料直上から試料を常に観察できる光学系はカセグレン鏡では実現できない大きな利点である。

装置の制御・測定プログラムは LabVIEW にて開発した。この測定プログラムは装置の全てを一元的に制御可能なものである。すなわち、白色レーザー光源、SOL 製の分光装置、フォトンカウンター、フィルタホイールなどを統合的に制御して分光スペクトルを測定できる。

### 4. 研究成果

これまでに開発した反射分光分析装置を大幅に高度化すべく、4W の白色レーザー光源、分光器、近赤外光検出器、可視光検出器、フォトンカウンターを導入した。まず、白色レーザーを使用するためにレーザー管理区域として遮光ボックスを設計・開発し、これを実験室に設置して機器を整備した。SOL 製の分光器とフォトンカウンティングを制御するプログラムを開発してスペクトルを取得できるようにした。分光器の制御は RS232C であるが、メーカーが提供している開発環境が Delphi で書かれた DLL のみであったためこれを利用しようとしたが、このライブラリを LabVIEW 上で読み込んで動作させることが不可能であったため、RS232C のコマンドをハードウェア的に解析してコマンドリストを作成し、コマンドを直接分光器に送ることで制御を可能にした。

フォトンカウンターはメーカー提供の DLL を利用し、これを LabVIEW に組み込んだ。これにより分光器とフォトンカウンティングの両者を LabVIEW 上で開発したプログラムによって連携させて動作させることが可能になり、スペクトルの取得ができるようになった。また白色レーザー光源は USB 経由で LabVIEW から制御可能とした。また光学フィルターとフィルターホイールを導入することで、2 次回折光を除去できるようにした。フィルターホイールは USB 経由で LabVIEW から制御可能とした。これにより、白色レーザー、分光器、フォトンカウンター、フィルターホイールなどの機器を LabVIEW から一元的に連動動作させることが可能となり、精密なスペクトルの取得が可能になった。

一方、装置に必要な非球面ミラーの研磨作業が難航し、当初の研究計画は大幅な修正を余儀なくされた。そこでまず特許を申請し、その後放物面ミラーを用いた新しい光学系に組みなおすこととした。放物面ミラー光学系と測定アルゴリズムについて説明する。白色レーザーは焦点距離の長い放物面ミラーによって集光され、直径 10  $\mu\text{m}$  のアイリスで点光源化し、この光を焦点距離の短い放物面ミラーでもう一度並行光とした。この光を 3 つ目の放物面ミラーで集光して試料に当て、反射した光を 4 つ目の放物面ミラーで平行光として反射型コリメータに集め、光ファイバーを通して分光器へ送る光学系とした。

使用している白色レーザーは出力の変動があってそれほど安定していないため、反射スペクトルの測定のためにはレーザー出力の変動をモニターしておく必要がある。そこでビームサンプラーを用いてサンプリングした光をフォトダイオードで出力をモニターすることとした。

最適な測定条件を決定することは容易ではなく、決定すべきパラメータは極めて多かった。まず、レーザーは出力によってスペクトルが変化すると同時に、出力と出力安定性は大まかに逆相関するため、必要な波長の光が出る最低限の出力を設定する必要がある。検出効率と波長分解能は分光器の 3 つのスリットの幅を調整することで最適化する。また測定する波長、検出器、グレーティングとバンドパスフィルターの種類、試料に当てる光を切るためのアイリスの大きさといったパラメータ間の関係を実験的に調査して測定アルゴリズムを導出した。可視光 SPAD 検出器の場合、フォトダイオードの検出波長を 1064nm に設定すればレーザーパワーと検出カウント数は基本的に一次相関となる。そこで測定する波長領域全域において 1 つの最適な



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：分光分析装置

発明者：大澤 崇人

権利者：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：2019-170361

出願年：2019 年

国内外の別：日本

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：岡崎 隆司

ローマ字氏名：Okazaki Ryuji

所属研究機関名：国立大学法人九州大学

部局名：理学研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁): 40372750

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。