

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K14380

研究課題名（和文）惑星探査用小型分離マルチバンドカメラの測定手法開発

研究課題名（英文）Development of multiband imaging for planetary exploration by small deployable camera

研究代表者

石橋 高 (Ishibashi, Ko)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員

研究者番号：30551593

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、惑星探査用的小型分離マルチバンドカメラ用の測定手法を確立した。ハイパースペクトル画像センサ（HSI）を用いれば、通常のカメラと同様の一つの光学系と一つの撮像素子から成る、小型のマルチバンドカメラを構成できる。HSIは、画素ごとに異なる分光透過率を持つフィルタが積層されているが、その透過率特性から、取得されるスペクトルは誤差を含む。本研究ではその誤差を除去するために、部分最小二乗法（PLS）に基づく手法を検討した。その結果、取得データから誤差を取り除き、正しいスペクトルに補正できることを示した。これにより、HSIを用いた惑星探査用的小型分離マルチバンドカメラ開発の目途が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、惑星探査機に搭載可能な小型分離マルチバンドカメラを開発するために必要な基礎技術の確立を行い、その結果開発の目途が立った。小型分離カメラは小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載されて、小惑星リュウグウ上で行われた衝突実験を観測し、小天体上での衝突現象の解明に貢献した。宇宙における衝突現象は、太陽系（惑星系）の形成と進化を理解する上で鍵となる現象である。本研究の結果から、小型分離カメラを複数の波長で撮像を行うことのできるマルチバンドカメラへと発展させることが可能となり、得られる情報が飛躍的に増加する。よって、将来の惑星探査、特に日本が世界をリードする小天体探査に大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：This study established a measurement method for a small deployable multi-band camera for planetary exploration. A hyperspectral imager (HSI) can be used to construct a compact multi-band camera with a single optical system and a single image sensor, similar to a conventional camera. The HSI has bandpass filters with different spectral transmittance for each pixel of a CMOS imager, but the acquired spectra contain significant errors due to their transmittance characteristics. In this study, a method based on the partial least squares (PLS) method was investigated to remove the error. As a result, it was shown that the error could be removed from the acquired data and corrected to the correct spectrum. This result provides a prospect for developing a compact, deployable multi-band camera for planetary exploration using the HSI.

研究分野：惑星科学（惑星探査）

キーワード：惑星探査 マルチバンドカメラ ハイパースペクトル画像センサ 部分最小二乗法（PLS）

1. 研究開始当初の背景

探査機月・惑星探査では、近年、「はやぶさ」や「はやぶさ2」など、天体上の試料を採集して地球に持ち帰り詳細に分析する「サンプルリターンミッション」も実施されるようになってきたが、天体の存在場所や軌道の関係上、そのように試料を持ち帰ることのできる天体は限られている。したがって、多くの天体の探査においては依然として、カメラやその他の観測機器を用いたリモートセンシング観測が重要である。また、サンプルリターンミッションにおいても、サンプル採集場所の決定などのために、事前のリモートセンシング観測は必須である。

天体上の物質情報を得る手段として、マルチバンド撮像がある。複数の波長帯で撮像を行うことで、画像上の各地点のスペクトルが得られる。天体上での太陽光の反射光の観測で得られる反射スペクトルと、実験室で取得した岩石・鉱物・隕石などの反射スペクトルとの比較により、天体上の物質についての情報を得ることができる。マルチバンド撮像では、天体表層の地形とスペクトルの対応関係がわかるため、天体表層の環境や進化を理解するための重要な情報がもたらされる。

しかし、マルチバンドカメラにはサイズや質量の問題がある。探査機に搭載する観測機器には、非常に限られた探査機リソースの観点から、常に小型軽量化が求められるが、マルチバンドカメラは複数の波長で撮像を行うための機構が必要であり、小型化は難しい。例えば、観測波長に対応する複数のバンドパスフィルタを搭載したフィルタホイールを回転することで観測波長を切り替える場合、フィルタホイールに加えてそれを回転させるための駆動機構も必要となり、大型化は避けられないし、複数の波長での同時観測も不可能である。複数の波長に対応する個別のカメラを並列に並べて同時撮像する方法もあるが、観測波長が増えるほど必要なカメラの個数が増え、やはり大型化してしまう。

そこで、本研究では「ハイパースペクトル画像センサ (HSI)」と呼ばれる、ベルギーの Imec 社が近年開発を進めている特殊な撮像素子に着目した。HSI は、一つの撮像素子で複数の波長の画像を同時撮像できる撮像素子であり、これを用いれば、フィルタホイールも複数のカメラも必要なく、小型軽量のマルチバンドカメラを開発することが可能であると考えられる。そして、この HSI を用いた小型のマルチバンドカメラであれば、「はやぶさ2」で、小惑星上への衝突実験の際に探査機から宇宙空間に放出されて、探査機の代わりに衝突実験の観測に成功した小型分離カメラ DCAM3 のような小型分離機への搭載も可能であり、探査において非常に重要な観測ツールになる。

2. 研究の目的

ハイパースペクトル画像センサ (HSI) を用いた、月・惑星探査における小型軽量のマルチバンドカメラ開発に向けた基礎技術を確認することが目的である。特に、HSI で取得した画像から、正確なスペクトルを構築する手法を確認し、探査における使用の実現性を検討する。

3. 研究の方法

(1) HSI を用いたマルチバンド画像測定環境の構築

HSI を入手し、駆動するための回路基板を準備し、光学系を取り付けてカメラを構築する。そして、このカメラを用いて、試料の反射分光撮像を行うための測定系を構築する。また、HSI による撮像と同時にその試料の連続反射スペクトルを取得できるように、分光計を用いた測定機構も準備する。

(2) 画像の取得とスペクトルの生成

構築した測定系で試料の撮像を行い、画像処理によりマルチバンド画像を生成する。マルチバンド画像の各波長の画像上の同一領域での観測値から、HSI スペクトル (各バンドに対応する波長での観測値をつなげた離散的なスペクトル) を生成する。

(3) マルチバンド画像から得られた HSI スペクトルの補正方法の確立

HSI から生成されたスペクトルは多くの誤差を含んでおり、そのままでは正確なスペクトルではないため、正確なスペクトルに変換 (補正) する必要がある。本研究では多変量回帰分析に基づく重回帰分析の一つである部分最小二乗法 (PLS) を用いて補正する手法を確認する。

(4) 撮像素子の放射線耐性評価

この HSI の宇宙での使用の可能性を評価するために、HSI のベースとなっている CMOS 撮像素子を用いた放射線試験を実施して、放射線耐性を評価する。

(5) HSI を用いた惑星探査用小型分離マルチバンドカメラ開発の実現性の検討

本研究で得られた成果に基づき、探査機に搭載して月・惑星探査を実施するためのマルチバンドカメラを開発することが実現可能かどうかの検討を行う。

4. 研究成果

(1) HSI を用いたマルチバンド画像測定環境の構築

Imec 社が製造する HSI は、CMOS 撮像素子の画素の上に直接ファブリペロー型のバンドパスフィルタを積層した撮像素子である。つまり、画素はその画素に積層されているバンドパスフィルタを通過した波長の光のみを受光して、光量に応じた信号に変換する。Imec 社はいくつかのタイプの HSI を製造しているが、本研究では「モザイク型」を使用する。モザイク型の HSI は、 $n \times n$ 画素で構成される画素のブロックに $n \times n$ 種類の異なるバンドパスフィルタが積層されており、その画素ブロックが並べられた構成になっている。この HSI で得られる画像は、画素ごとに異なる波長により撮像されるが、上記の $n \times n$ 画素のブロックを通常のカメラの 1 画素と見なすことで、一つの画素で複数の波長の情報を取得できると考えることができる。

Imec は積層するバンドパスフィルタの組み合わせを選択したカスタム品の製造にも対応しているが、カスタム品は高価であり、また本研究では測定手法の原理検証を主眼に置いているため、約 450–650 nm の間の 16 波長に対応するバンドパスフィルタが搭載された、既製品の HSI の一つを使用した。バンドパスフィルタの分光透過率にはセンサごとに個体差がある。本研究で入手したセンサの分光透過率を図 1 に示す。

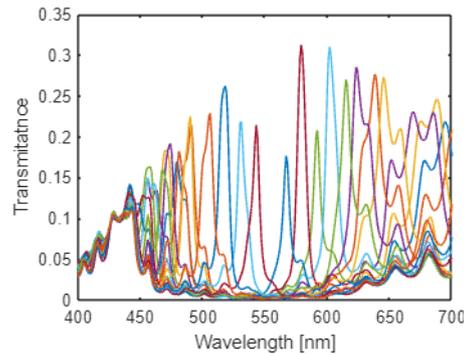


図 1. 入手した HSI のバンドパスフィルタの分光透過率 (16 フィルタを重ねて表示)。

この HSI を用いて試料の反射マルチバンド画像を取得するために構築した測定環境の模式図を図 2 に示す。HSI を駆動し、撮像を行い、画像を読み出す必要があるため、この HSI のベースとなっている CMOS 撮像素子のメーカーが販売している評価システムを使用した。また、撮像時の撮像素子温度を一定に保つために、撮像素子を載せた基板の裏側にペルチェ温調器を設置して温度調整を行った。レンズを設置してカメラとし、試料ステージ上にピントが合うように調整した。ただし、図 1 からわかるように、HSI のバンドパスフィルタは、該当の波長範囲外 (450 nm 以下と 650 nm 以上) に高い透過率を持っているため、その部分の光をカットする必要がある。

したがって、レンズの前面に、450 nm 以下の光をカットするロングパスフィルタと 650 nm 以上の光をカットするショートパスフィルタを設置した。試料ステージ上には斜め 30 度から光を照射し、その反射光をカメラで撮像する。また、試料ステージ上の試料の反射連続スペクトルを分光計により測定できるようにした。この測定環境により、HSI でマルチバンド画像を撮像すると同時に分光計でスペクトルを測定できるため、画像から求めた HSI スペクトルと、分光計により測定した真のスペクトルを比較することができる。

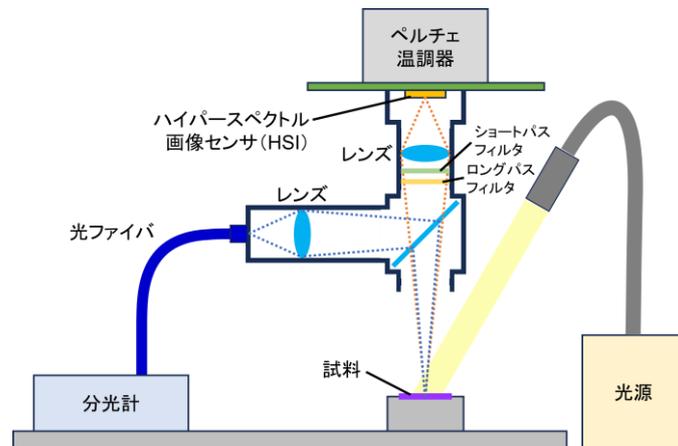


図 2. HSI 撮像測定環境の模式図。

(2) 画像の取得とスペクトルの生成

HSI 画像から正しくスペクトルを求められるかどうかを確認するために、HSI で試料の撮像を行い、その画像から HSI スペクトルを生成し、分光計で取得した真のスペクトルとの比較を行った。測定試料として、準備の容易さやコントロールのしやすさの観点から、カラーチャートを用いた。18 色のカラーチャートを準備し、インクジェットプリンタとレーザープリンタで印刷した。プリンタの種類を変えることで、同じ色のチャートでも質感が異なり、得られる反射スペクトルが異なる。カラーチャートを試料ステージに置き、HSI で撮像すると同時に分光計でスペクトルの測定も行った。HSI と分光計の双方で、光を入れずに行うダーク測定と、反射分光のリファレンスである準反射板 (スペクトラロン) の測定も行った。試料と標準反射板の画像からそれぞれダークを引き、それらの試料画像を標準反射板画像で割ることで、反射率画像になる。

HSI で取得される画像には 4×4 個の異なる波長の情報を含まれている。実際に取得した HSI 画像の画素の拡大図の例を図 3 に示す。この画像から同じバンドパスフィルタ

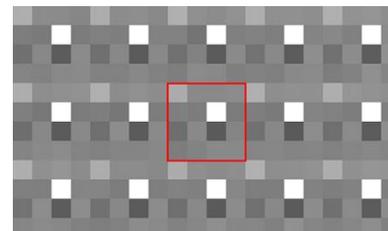


図 3. HSI 画像の拡大図の例。 4×4 画素のパターンが繰り返し並ぶ。

で取得した画素を抜き出して並べることで、そのバンドパスフィルタの波長に対応する画像を再構築した。全部で16枚(16バンド)の画像が再構築され、それぞれの画像サイズはx方向y方向共に元画像の1/4となる。図4に、分光計で取得したカラーチャートの反射スペクトルを示す。

分光計で観測しているスポットに対応する画像(反射率画像)上の領域の値を用いて、スペクトル(HSIスペクトル)を生成した。スペクトルの例を図5に示す。横軸は各バンドパスフィルタに対応する波長、縦軸は反射率である。図5には、分光計で取得した真のスペクトルも重ねて表示しているが、HSIスペクトルは真のスペクトルから逸脱しており、誤差を持っていることがわかる。この誤差の原因は、バンドパスフィルタの分光透過率にあると考えられる。図6に、450 nm以下と650 nm以上をそれぞれロングパスフィルタとショートパスフィルタでカットした後のHSIバンドの透過率の例を示す。仕様上そのフィルタで透過することになっている波長を中心とするメインの透過率ピーク以外の場所でも透過率を持つことがわかる。フィルタによっては、高い二次ピークを持つものもある。このような場合、本来観測したい波長以外の波長の光も拾ってしまい、誤差となる。よって、そのような「余分な」光の影響を排除して、正しいスペクトルに補正する必要があることがわかる。

(3) マルチバンド画像から得られたスペクトルの補正方法の確立

本来各フィルタで測定することを目的とする波長帯以外の波長の光の影響を排除して、正しいスペクトルに補正するために、本研究では多変量回帰分析に基づく重回帰分析の一つである部分最小二乗法(PLS)に基づく手法を検討した。PLSでは、説明変量と、目的変量の双方を直交分解し、両者の相関の高い成分のみを抽出して重回帰を行うため、データに含まれる誤差が排除され、精度の高い回帰が実現される。

通常、このようなスペクトルを説明変量として用いる重回帰で求めるのは(つまり目的変量は)試料の濃度などであるが、本研究では試料を「理想的な」で測定した場合の測定値自体を目的変量とすることで、誤差を含むスペクトルから注目する帯域の情報のみを抽出し、正しいHSIスペクトルを生成することを目指した。

まず、PLS回帰モデルを構築するために、インクジェットプリンタで印刷したカラーチャート(18個)のHSI測定データと分光計測定データを使用した。HSI測定画像から生成した誤差を含むHSIスペクトルを説明変量とし、分光計で測定した真のスペクトルに「理想的な」分光透過率を掛けて波長で積分することで求めた「正しい」HSIスペクトルの各波長の値を目的変量として、PLS回帰モデルを構築した。PLSでは、抽出した成分の使用数を増やすほど、モデル構築に用いた試料に関しては正しくスペクトルを再現することができるようになるが、成分数を増やすぎるとオーバーフィッティングになり、汎用性が失われてしまう。そこで、PLS回帰モデル構築に使用する最適な要素数を、交差検証法により決定した。すなわち、18個の試料のうち一つを未知試料として扱い、他の17個の試料の測定データで回帰モデルを構築し、未知試料のスペクトルを推定するという操作を、順にすべての試料で行い、その際に平均的に最も良くスペクトルを推定できる(誤差の小さく

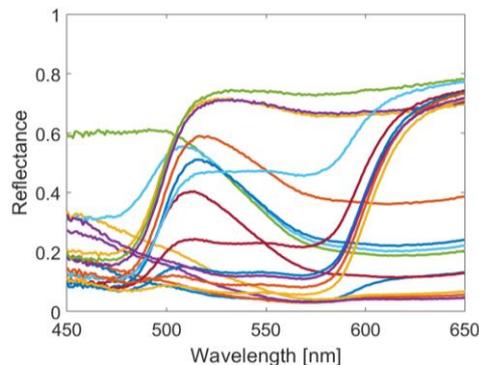


図4. 分光計で取得したカラーチャート(インクジェット印刷, 18色)の反射スペクトル。

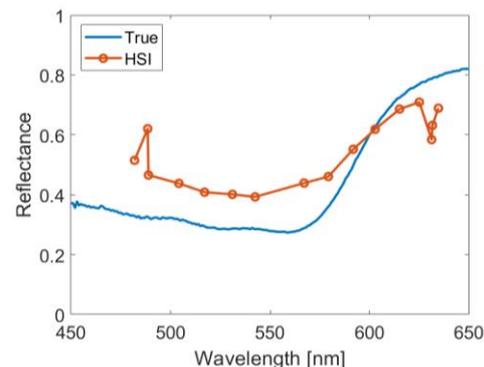


図5. HSIスペクトルの例(カラーチャート17)。

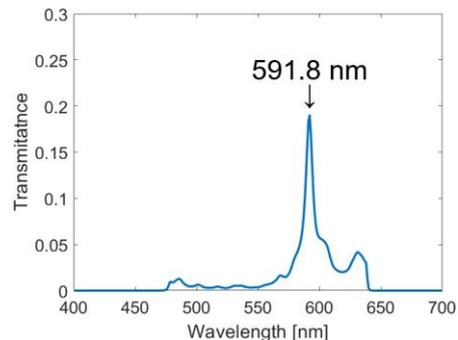


図6. HSIバンド透過率の例(バンド#5)。

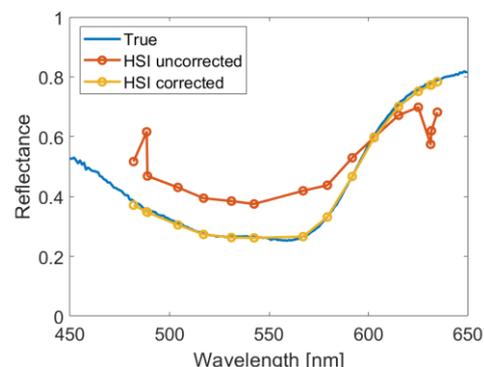


図7. 補正したHSIスペクトルの例(カラーチャート17)。

なる) 成分数を見つけた. このようにして構築した PLS 回帰モデルのアウトプットは, 成分数が行数でバンド数が列数の行列である. この行列を, 誤差を含む HSI スペクトルに掛けることで, 補正されたスペクトルが得られる.

まず, PLS モデル構築に用いたインクジェットプリンタで印刷したカラーチャートの HSI スペクトルを正しく補正できるかどうかを確認したところ, 図 7 の例に示すように, 正しく補正されて真のスペクトルと良く一致することが確認できた. 次に, PLS モデル構築には使用していない試料である, レーザプリンタで印刷したカラーチャートや, いくつかの岩石で取得した HSI スペクトルでも確認を行った. 図 8 に

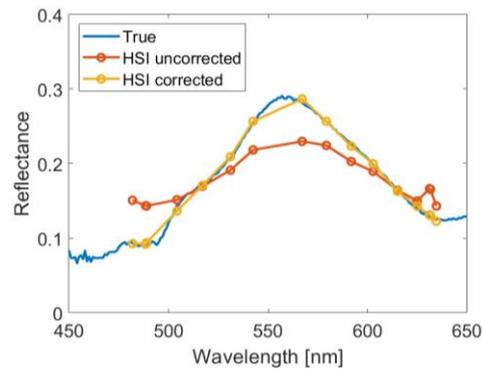


図 8. 補正したカンラン石の HSI スペクトル.

例としてカンラン石を測定した場合の結果を示すが, これらの試料の場合でも正しく補正されることが確認できた. よって, 検討した手法により, 汎用性の高い PLS 回帰モデルが構築され, 幅広い測定対象に適用できる HSI スペクトル補正行列を得ることができたと言える.

(4) 撮像素子の放射線耐性評価

HSI を探査機に搭載して使用するには, 地上とは大きく異なる宇宙環境においても正しく動作することを確認しなければならない. 特に, 宇宙での放射線環境は厳しく, 半導体である撮像素子は大きなダメージを受け, 場合によっては正常に動作しなくなる. もし HSI のベースとなっている撮像素子の放射線耐性が低い場合, 宇宙で使用することは難しくなる. そこで, この HSI のベースとなっている CMOS 撮像素子を別途準備して, 放射線試験 (ガンマ線照射試験, プロトン照射試験, 共に最大 40 krad) を実施した. その結果, 放射線照射により, 暗電流は増加するが, 感度はほとんど変化しないことが確認された. これらより, 一般的な宇宙探査環境において使用可能な範囲であることが確認できた.

(5) HSI を用いた惑星探査用小型分離マルチバンドカメラ開発の実現性の検討

HSI 画像から直接求められる HSI スペクトルは誤差を持つが, 本研究でそれを補正して, 正しいスペクトルを得る手法を確立した. スペクトルの補正に必要な変換行列は用いる HSI 個体に固有のものであり, HSI ごとに作成する必要がある. また, HSI のみではなく, 用いるロングパスフィルタとショートパスフィルタや, 光学系を構成するその他の光学素子の分光透過率特性にも依存するが, マルチバンドカメラ製造後に, 本研究で使用したカラーチャートのような参照試料の撮像と, 分光計によるスペクトル測定を行うことで, 補正行列を準備することが可能である.

打ち上げ前に地上で取得したスペクトル補正行列が打ち上げ後にも適用できるかどうかは, 打ち上げ後のカメラ全体としての分光特性の変化が生じるかどうか依存し, 変化が無ければ適用可能である. 撮像素子に関しては, 放射線試験の結果より, 放射線劣化で暗電流は増加したが, 感度にはほとんど変化が見られなかった. 光学系に関しては, 光学系を構成するレンズ材の放射線耐性による. 放射線耐性の高いレンズ材を用いて設計することで, 打ち上げ後の光学系の分光感度特性変化を抑えることが可能である.

もし打ち上げ後に分光特性の変化が見られた場合, 機上でスペクトル既知の対象を撮像して, それを用いて新たに変換行列を作成することも可能である. そのような, 機上でのスペクトル既知の対象の観測による校正データ取得は, 通常マルチバンドカメラにおいても用いられる手法であるが, HSI を用いたマルチバンドカメラで, 本研究で行ったように PLS を用いて補正を行う場合には, 複数の異なるスペクトル既知の対象の観測が必須である. 例えば, 月面のスペクトルは詳細にモデル化されているため, 月面の撮像で得た画像を用いることが可能である, また, スペクトル既知の恒星を利用することもできる.

これらより, Imec 社の HSI を用いて宇宙で使用可能な小型マルチバンドカメラの開発を行うことは十分に現実的であると言える. 重要な点は, 多波長の撮像を行うために, フィルタホイールの使用や複数のカメラの並列構成といった, 特別な構成を用いる必要がなく, 通常の 1 台のカメラと同様の構成, すなわち一つの光学系と一つの撮像素子 (HSI) で構成可能であるということである. さらに, 「はやぶさ 2」において通常の CMOS 撮像素子を用いたモノクロ撮像型の小型分離カメラは実用化されているため, 基本的にはその CMOS 撮像素子を本研究で用いた HSI に置き換えることで, マルチバンドカメラ化することが可能である. よって, 惑星探査用小型分離マルチバンドカメラ開発の目的が立ったと言える.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1 . 発表者名 K. Ishibashi, P. Hong, T. Okamoto, T. Ishimaru, M. Yamada, N. Ozaki, T. Hosonuma, S. Sato, O. Okudaira, T. Arai, F. Yoshida, M. Kagitani, S. Kameda, T. Miyabara, M. Ohta, and T. Takashima
2 . 発表標題 Development status of DESTINY+ onboard cameras TCAP and MCAP
3 . 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2021
4 . 発表年 2021年～2022年

1 . 発表者名 K. Ishibashi, P. Hong, T. Okamoto, M. Yamada, O. Okudaira, Y. Suzuki, T. Ishimaru, N. Ozaki, T. Hosonuma, S. Sato, T. Arai, F. Yoshida, M. Kagitani, S. Kameda, T. Miyabara, M. Ohta, and T. Takashima
2 . 発表標題 Development Status of DESTINY+ Onboard Cameras for Flyby Imaging of (3200) Phaethon
3 . 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年～2022年

1 . 発表者名 K. Ishibashi, P. Hong, T. Okamoto, T. Ishimaru, S. Sato, M. Yamada, O. Okudaira, T. Arai, F. Yoshida, S. Kameda, M. Kagitani, T. Iwata, T. Okada, T. Takashima
2 . 発表標題 Flyby Observation of Asteroid (3200) Phaethon to Be Conducted by Cameras onboard DESTINY+ Spacecraft
3 . 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4 . 発表年 2020年～2021年

1 . 発表者名 K. Ishibashi, P. Hong, T. Okamoto, T. Ishimaru, N. Ozaki, T. Hosonuma, S. Sato, M. Yamada, T. Arai, F. Yoshida, O. Okudaira, M. Kagitani, S. Kameda, T. Miyabara, M. Ohta, and T. Takashima
2 . 発表標題 Development of Cameras onboard DESTINY+ Spacecraft for Flyby Observation of (3200) Phaethon
3 . 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference
4 . 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------