

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05644

研究課題名（和文）小惑星ベスタの進化史解明に向けた全球地質マッピング

研究課題名（英文）Global geologic mapping for elucidation of origin and evolution of asteroid Vesta

研究代表者

石原 吉明 (Ishihara, Yoshiaki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・国際宇宙探査センター・主任研究開発員

研究者番号：80400232

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）：米国航空宇宙局により実施されたDawn探査機により得られた各種の探査データに対し、機械学習手法を用いた統合解析を適用することで、最新の観測データに基づくベスタ全球の分光特徴分類を作成し、地形情報や元素分布とあわせてベスタの地質分布及び内部構造に関する情報を得た。本手法はこれまでの研究者による判読では不可能であった研究者の目視でのデータ確認・判読による全球地質図の作成に対して、機械学習手法によるアプローチが有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年めざましく発展している機械学習手法を用いて米国Dawn探査機の観測データにクラスタリング解析を行い、研究者の手作業では実現困難な全球地質図の作成が可能であること、またクラスタリング結果は鉱物特徴の違いを捉えたものであることを示した。同手法はVesta以外の探査データにも適用出来、既存の探査データに適用し他天体での全球地質図の作成やその結果に基づいて詳細解析計画を立案し、さらには将来探査のターゲット領域の決定等に役立てることが可能である。巨額を投じる探査計画のより効率的な推進にも貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：By applying integrated analysis using machine learning methods to various exploration data obtained by the Dawn spacecraft, which was conducted by the National Aeronautics and Space Administration (NASA), a global reflectance spectral feature classification of Vesta based on the latest observation data was created. Using a resulting classification map together with topographical information and elemental distribution., information on the geological distribution and internal structure of Vesta was obtained. This method demonstrated the effectiveness of the machine learning approach in creating a global geological map based on the visual inspection and interpretation of data by researchers, which has been impossible with conventional interpretation by researchers.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：小天体 地質図 機械学習 ベスタ

1. 研究開始当初の背景

2007年9月に打ち上げられた米国の Dawn 探査機は、2011年7月16日にベスタの周回軌道に投入され、2012年9月5日に周回軌道を離脱するまで、およそ14ヶ月に渡り Framing Camera (FC)、Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIR)、Gamma Ray and Neutron Detector (GRaND)の3機器を用い、ベスタ全球をくまなく探査した。これら3機器による観測により、鉱物分布・元素分布・詳細な形状に関するデータが取得され、さらに軌道追跡データを用いて球面調和関数で20次までの重力ポテンシャル分布データが得られ、分化小惑星(おそらく分化微惑星の生残り)であるベスタに関する新情報が次々得られていた。例えば、マントルまで衝突掘削されたと推定されていた Veneneia および Rheasilvia 衝突盆地領域は、VIRによる連続分光データの解析から輝石に富み、カンラン石には富んでいないという報告がなされており、従来の想定よりも地殻が厚いのではないかと結論づけられている。一方、高空間分解能(最高20 m/pix)を誇る FC の多色撮像画像データからは、小規模なクレータに伴ってカンラン石に富む領域などが見出され、大多数はベスタ固有のカンラン石ではなく、(隕石)衝突により持込まれた外部起源のカンラン石であると解釈されている。さらには、水に枯渇したと考えられてきたベスタ上に、水の介在により形成されたと思われる地形が発見され、地下に保存された水氷を含む物質から衝突加熱により放出された一時的な流水により形成されたと解釈されている。このように、Dawn 探査によりもたらされた高精度・高空間分解能のデータは、地上および宇宙望遠鏡による観測と、HED 隕石の分析で構築されていた従来のベスタ像とは必ずしも整合せず、Dawn 探査データに基づく新たなベスタ像の構築が急務であり、ベスタの全球地質図の作成が望まれていた。しかし、ベスタにおける全球地質図は米国の研究者により進められていたが、領域分けされた担当領域を研究者(もしくはチーム)が各々の基準によって行う旧来の手法が用いられており、研究者の担当領域をまたぐと統一的に解釈が出来ないという問題を抱えていた。

2. 研究の目的

本研究では NASA/PDS より公開されている Dawn 探査機により取得されたベスタ表面データを用いて、ベスタ全球について統一的な基準を用いて解釈可能な地質図の構築を行い、さらに、この地質図を用いて各地質区分および地質区分間の形成過程を推定する事により、ベスタの地殻進化過程の全容、すなわち初期分化により形作られた地殻内部構造の推定、その後の Veneneia や Rheasilvia 盆地形成等の衝突による進化過程の解釈を行うことが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、全球を統一的に扱った地質図の作成のため、機械学習手法を用いて Dawn 探査機により取得された FC による可視マルチバンド分光データを、機械学習手法を用いたクラスタリング手法により分類し、分光特徴量による基礎マップを作成し、その他の地形情報や GRaND による元素分布データ、ベスタ起源と考えられている HED 隕石の情報を併せ、地殻構造等の解釈を行う。

4. 研究成果

本研究では、基礎的な(地質)ユニット分類には、Dawn に搭載された FC によるマルチバンド分光データを用い、不適合データを取り除いたのちに機会学習手法による分類を行うという戦略をとった。なお、機械学習手法については複数手法を試行したが、混合ガウスモデル(GMM)に変分ベイズ法を組み合わせた変分混合ガウスモデル(VGMM)によるクラスタリングを最終的に採用した。VGMM モデルは、一般によく使われる k-means や GMM と違い、部類すべきクラスタ数の設定を必要とせず、入力データからクラスタ数も含めて推定する。このため、より客観的な分類が可能となる。また、FC データについては、VGMM にかける前に前処理として不適合データの排除と主成分分析を適用した。

Fig. 1 に FC データによる擬似カラーモザイク画像、Fig. 2 に FC の波長 749 nm の反射率画像を

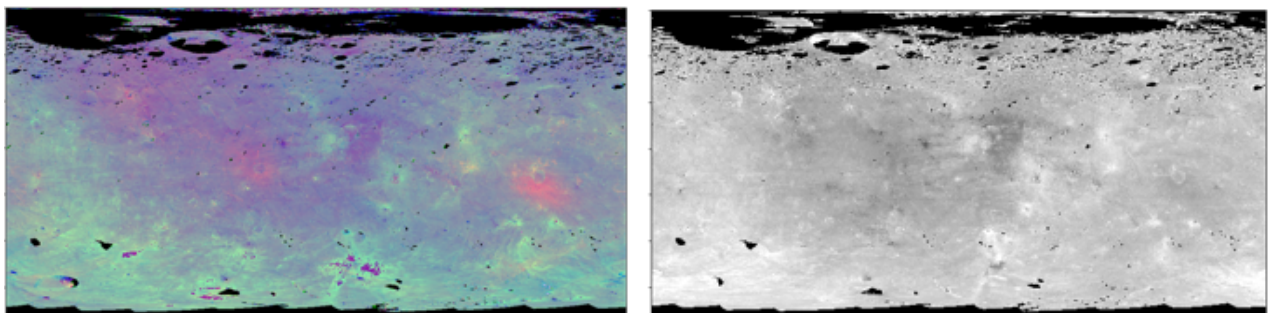


Fig. 2 FC global color mosaic of the 4 Vesta (R = 749/438 nm, G = 749/917 nm, and B = 438/749 nm). Fig. 1 FC 749 nm band reflectance map of the 4 Vesta

示す。擬似カラーモザイク画像や 749 nm バンドの画像において、Vesta 上に反射率特性の異なる複数の領域が存在していることがわかる。FC の 7 バンドデータに対し、前述の通り前処理として主成分分析を行ったのち、主成分画像を入力として VGMM によるクラスタリングを行った。VGMM に入力した主成分画像のうち、第 7 主成分マップを Fig. 3 として例示する。擬似カラーモザイク画像や、単バンドの反射率画像と比較すると、主成分に分解することでより地域的に異なる分布を持つことが明確になっている。

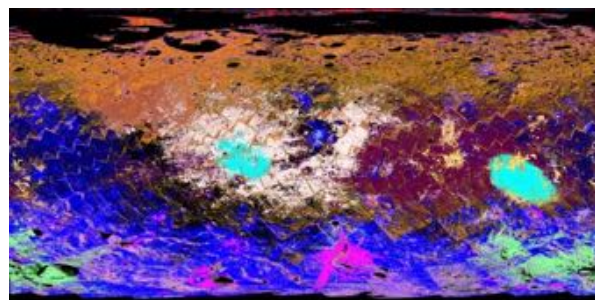
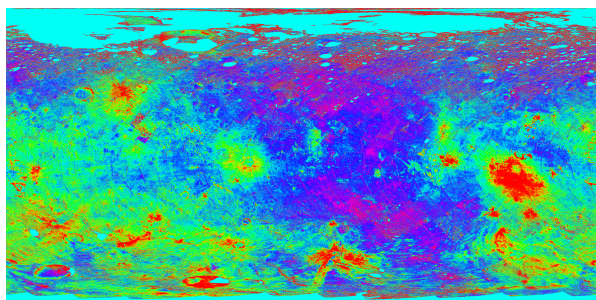


Fig. 3 Principal Component 7 Map for FC HAMO color mosaic data Fig. 4 Classification results of VGMM (n_class = 20)

VGMM によるクラスタリング結果を Fig. 4 に示す。FC の観測データの繋ぎ目に起因するアーティファクトは残るものの、Vesta 全球について 20 の区分に分類された。各クラスの平均反射スペクトルを Fig. 5 に示す。また、Vesta の地形を Fig. 6 に示す。Fig. 5 から、各クラスの平均スペクトルは基本的によく似ているものの、分類は反射率の差だけではなく、1 ミクロン帯の吸収の差異や 600 nm の吸収の有無などによるものであることが分かる。これは Vesta 表面に分布する鉱物（特に苦鉄質鉱物）の種類や量の差をとらえていると解釈できる。また、地形との対応や、GRaND による水素量分布との対応により、Veneneia や Rheasilvia 盆地で大きく地殻が衝突により掘削された領域で特に明瞭な違いがあることが分かった。これは、Vesta の地殻形成に伴う初期分化により、深さ方向で違った鉱物種からなるという内部構造を反映していると解釈出来る。また、特に南半球の中規模クレータにおいて、クレータ内及び周辺において、周囲と異なったクラスに分類されている。これは、盆地ほど掘削しない範囲でも、地殻内部には異なる鉱物種を持つ構造があり、クレータ形成の衝突により掘削され表層にもたらされていることを示唆し得ている。

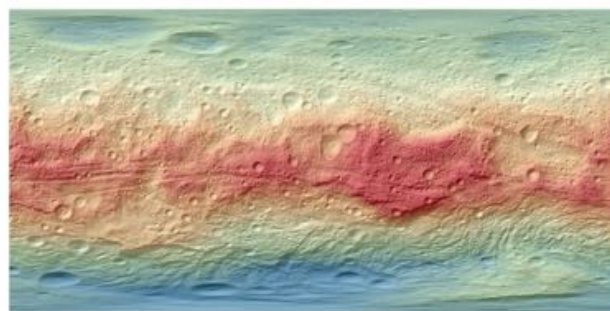
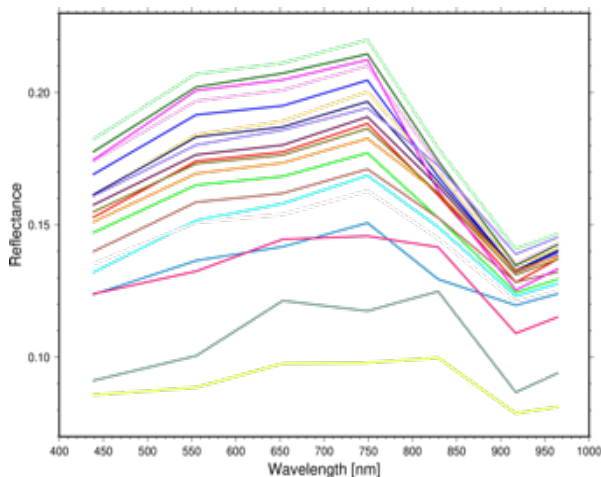


Fig. 6 Shaded Topography

Fig. 5 Average Reflectance Spectrum of Each Class.

Line Colors correspond to Fig. 4.

本研究により、全球統一的な基準により分類された地質図（分光特徴分類図）が作成された。本地質図を用いることで、今後、Vesta の地殻構造の解析や、その進化を紐解くにあたって、重点的に詳細なデータ分析すべき場所が特定することが出来、Vesta 研究の加速が期待される。

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 3件）

1. 発表者名 石原吉明・晴山慎・大竹真紀子
2. 発表標題 教師無し分類手法を用いた小惑星ベスタの地質分類の試み
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ishihara, Y., M. Hareyama, M. Ohtake
2. 発表標題 Preliminary Unsupervised Classification of 4 Vesta's Surface using Multiband Reflectance Data Obtained by DAWN Framing Camera.
3. 学会等名 AOGS 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ishihara, Y., M. Hariyama, M. Ohtake
2. 発表標題 Preliminary Unsupervised Classification of the 4 Vesta's Surface using Multiband Reflectance Data Obtained by DAWN Framing Camera
3. 学会等名 49th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ishihara, Y., M. Hariyama, M. Ohtake
2. 発表標題 Vestian Reflectance Spectral Characteristic Map Based on Unsupervised Classification of Multiband Reflectance Data Obtained by DAWN Framing Camera and Its Relation of Chemical Composition and Topographic Features.
3. 学会等名 54th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究 分担者	晴山 慎 (Hareyama Makoto) (60327286)	聖マリアンナ医科大学・医学部・助教 (32713)	

	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
研究 協力者	大竹 真紀子 (Ohtake Makiko)	会津大学・教授	

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
---------	---------