

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 8 月 26 日現在

機関番号：32713

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05641

研究課題名(和文) 機械分類アルゴリズムを用いた水星の全球地質図の作成

研究課題名(英文) Building of global geological map of the Mercury by using auto classification algorithm

研究代表者

晴山 慎 (Hareyama, Makoto)

聖マリアンナ医科大学・医学部・助教

研究者番号：60327286

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水星探査機MESSENGER搭載の観測機器MDISで得られた水星の可視・近赤外分光スペクトルデータを自動分類することで、水星地質図としての水星全球のスペクトル区分図を作成した。この区分図と先行研究で報告された月のスペクトル区分図との比較によって、初期に形成された領域のスペクトルは、月の高地のように連続した広い領域に比較的均質な特徴を示した一方、後期段階に形成された領域のスペクトルは月の海のように様々な特徴もつスペクトルがそれぞれ小さな領域を構成していることを示した。また、現在の水星表面は、スペクトルの吸収深さと元素量分布とは対応が見つからないほど、宇宙風化が進んでいることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地質図は、地球において地殻形成や火山活動の歴史を理解する上で最も基本的な資料となる。このような地質図を水星で作成することは、本研究でなされたように水星形成史を構築する上で大きく寄与すると考えられる。本研究では、地質図として主題図に可視・近赤外分光データを用いたが、この主題図に他の観測データを組み込むことでより詳細な地質図の作成が可能となる。特に現在、水星周回軌道への投入が行われている日欧共同の水星探査機「BepiColombo」による水星周回探査の観測は詳細な地質図作成の重要なデータとなるとともに、本研究で作成した全球地質図は観測計画立案の一助になると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we created a global map of Mercury's spectral classification as a geological map of Mercury by automatically classifying the visible and near-infrared spectral data of Mercury obtained by the MDIS onboard the Mercury explorer MESSENGER. By comparing of the classification map with the spectral classification map of the moon reported in previous studies, we found that the spectra in regions formed the early stage showed a relatively homogeneous features in continuous wide regions as like the lunar highlands, while the spectra of the regions formed in the late stage indicated the various spectral features that each spectral class constitute a small region, as like the lunar maria. In addition, we found that showed that space weathering has progressed to the extent that the absorption depth of the spectra and the elemental amount are incompatible on the currently surface of Mercury.

研究分野：惑星科学

キーワード：水星 分光スペクトル 自動分類 地質学 地殻進化 宇宙風化

1. 研究開始当初の背景

水星の分光スペクトルは、過去の観測から、月の分光スペクトルと比較して分光スペクトルの吸収は浅く、また地域差が小さいことが知られてきた。このような観測結果と月研究との比較から、水星の表面は斜長岩質であり、太陽に近い宇宙風化がかなり進んでいると考えられてきた。しかしながら、2011年から観測を始めた米国の水星探査機「MESSENGER」は、可視・近赤外(MDIS)・可視・赤外・紫外(MASCS)、X線(XRS)・γ線(GRS)・中性子(NS)の各分光計、レーザー高度計(MLT)などを用いて、水星表面の鉱物・元素分布、地形情報などを全球に渡って観測をして、水星に関する新情報を次々に報告している。特に、X線・γ線分光により、水星表面に炭素や硫黄、塩素などの揮発性元素が存在することが近年明らかにされた[1,2]。このような揮発性物質は、マグマオーシャン分化過程と地殻形成やその後の火山活動に大きく関係する。例えば、炭素の存在は、可視赤外分光カメラでは暗い領域として撮像され、その多くは大きな衝突クレーター内やその放出物として観測されている。この結果は下部地殻起源を示唆し初期マグマオーシャンから浮遊したグラファイト地殻の形成と一致していると報告されている[3]。だが、その興味対象とデータの巨大さから、これまでの研究は局所領域についてのみなされており、水星全球で統一的な可視赤外分光データの区分とその解釈＝地質図の作成はなされていない。

また、水星探査については、2018年に欧州と日本の共同で水星探査機「BepiColombo」が打ち上げられ、2025年より水星の周回観測を行う予定である。全球地質図の存在の有無は、「BepiColombo」の詳細な観測計画立案に大きく役立つと考えられる。

一方、水星と同程度の大きさをもつ地球の衛星である月では、「かぐや」に代表されるようなリモートセンシング探査で揮発性物質は観測されていないが、本研究の参加者らによる平成26年度基盤B研究(代表者：大竹真紀子、28年度終了)で、可視赤外分光データの機械分類により月全球の地質区分を明らかにした(図1)[4]。水星と月の統一的な手法で得られた地質区分を用いて、その相違を全球で明らかにすることは、月や小惑星を含む太陽系固体惑星の形成と地殻進化の解明に繋がる。

2. 研究の目的

本研究は、水星の地殻形成史に迫るために、水星全球の地質図を作成することを目的とする。そのために米国の水星探査機「MESSENGER」により取得された可視分光スペクトル、元素濃度、標高データといった異なる物理量の観測データを用いて機械分類を行なって、水星表面全球の地質区分を決定する。具体的には、鉱物と表面状態(ラフネス・粒度など)を反映した可視近赤外分光データ(MDIS)(図2上段)を主要データとして教師なし機械分類法により水星全球のスペクトル区分を決定し、これと標高(MLT)(図2中段)、元素濃度(XRS)(図2下段)、クレーター密度などの異なる観測量とを比較することにより、機械的に分類された各スペクトル区分がどのような地質的特徴があるのかを明らか

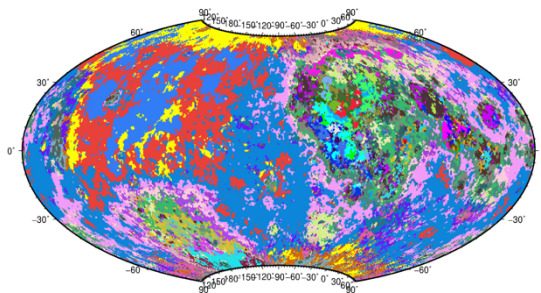


図1：月全球の可視赤外分光データの機械分類によって得られた地質区分。右半分が月の表(地球側)、左半分が月の裏側である。月は66の地質区分に分類され、遠く離れた領域が同じ地質に分類されることを明らかにした[4]。

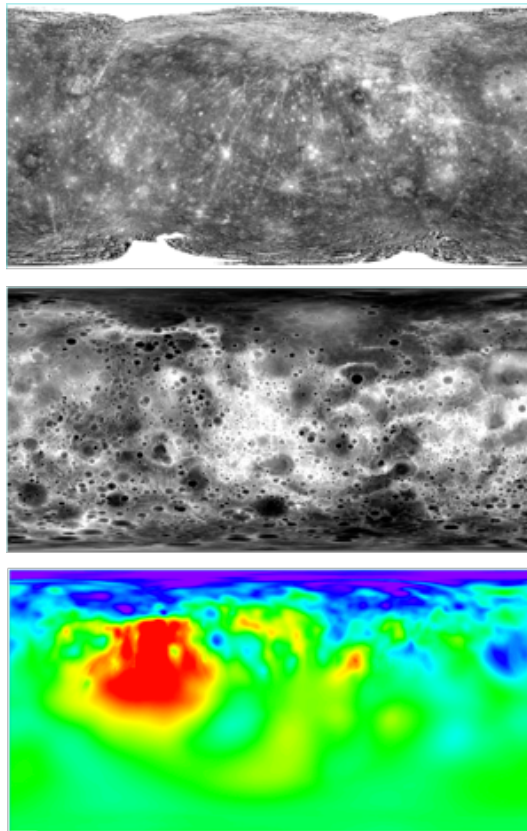


図2：MESSENGERに搭載された観測器による観測結果の一例。上段；MDISによる830nm帯反射率マップ中段：MLTによる標高マップ、下段：XRSによるマグネシウム量マップ。

にしスペクトル区分図を地質区分図とする。さらに、この地質区分図をもとに、水星の地質進化について考察する。

3. 研究の方法

本研究は、MESSENGER-MDIS で得られた 8 バンドの可視・近赤外分光スペクトルデータを教師なし自動分類法の一つである ISODATA 法を用いて、緯度で南北 65 度以内のスペクトルデータを分類した。この分類に先立つ予備的な解析によって、使用する分光データの分類の特徴量が反射率、スペクトル連続部の傾きおよび吸収率であることを明らかにし、これらの観測量の頻度分布を規格化した量を ISODATA によって機械分類をおこなった。ISODATA による分類は、インプットデータの直交座標系内での分割・結合条件である 2 つの量、各分類クラス内の頻度分布の標準偏差の大きさ（分割条件 = Maximum Standard Deviation, MSD）と各クラス平均値間の距離（結合条件 = Mean of Class Distance, MCD）をいくつかの組み合わせについて行なった。なお、分割結合条件の組み合わせは無限にあるため、本研究では $MSD = 3 \times MCD$ として分割条件を設定した。分光スペクトルの分割後、各クラスの特徴量の平均値を算出し、また対応する表面領域の元素濃度の平均値、標高の平均値、クレータ密度の平均値の算出を行い、これらの関係を比較から水星表面の地質区分や水星の地殻進化について考察を行った。

4. 研究成果

図 3 は ISODATA によって MESSENGER-MDIS の可視・近赤外分光スペクトルを自動分類した結果の水星表面マップである。分類クラス数は、分割パラメータの値に依存して分割数が増加した。MCD が大きいときには 2 分割(図 3 日左上)であり、MCD を小さくしていくとより細かく分割されるが、基本的には初めの 2 分割の中でそれぞれ細かく分割される傾向があった。そこで、本研究では 2 クラス分類(図 3 日左上)の結果と 13 クラス分類(図 3 日右上)の結果に注目して考察を行なった。

はじめに地理的な分布について比較した。図 3 左上の 2 クラス分類で赤色に分類されるクラスは、比較的標高が高く表面の凹凸が多く、クレータ密度の高い地理的領域に主に分布した。13 クラス分類では、13 クラス中 4 クラス（この 4 クラスをグループ 1 と呼ぶ）がこの地理的領域に対応し、各クラスの地理的な分布は連続的に大きく広がっていた。一方、図 3 左上の 2 クラス分類で緑色に分類されるクラスは、対照的に、比較的標高が低く表面は平らで、クレータ密度の低い地理的領域に主に分布した。13 クラス分類では、13 クラス中 9 クラス（この 9 クラスをグループ 2 と呼ぶ）がこの地理的領域に対応し、微細な地理的構造が入り組むように構成された。しかしながら、図 2 下段で示したマグネシウム濃度分布マップで見られる高 Mg 領域(High-Mg Region: HMR)は鉄量、カルシウム量、硫黄量についても高い濃度が認められる地域であるが、スペクトル分類からは明確にこの地域に対応するクラスは認められなかった。

次にスペクトル特徴量について分類された各クラスの特徴量の平均値を用いて比較した。反射率とスペクトルの傾きには全 13 クラスについて良い正の相関が見られたが、グループ 1 とグループ 2 では若干傾向が異なった。また、反射率または傾きとクレータ密度との間には、負の相関が見られた。吸収率との比較では、各吸収帯の吸収率と元素濃度との間には相関が見えなかった。しかしながら、いずれ吸収帯においても、グループ 1 の吸収率は比較的小さい値を持つものに対し、グループ 2 の吸収率の値は広く分布していた。苦鉄質鉱物の存在量に関する 900nm および 1000nm 帯の吸収率に注目すると、吸収率とスペクトルの傾きには負の相関が見

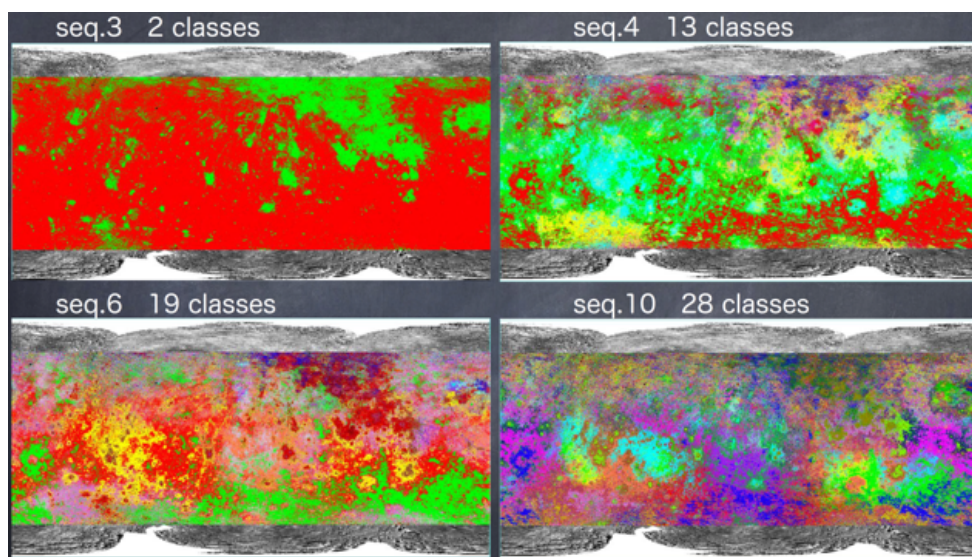


図 3 : ISODATA を用いて分類された MESSENGER-MDIS で観測された分光スペクトルの分類マップ。分割・結合パラメータに依存して、分割数が増加する。

られ、クレータ密度とは弱い正の相関が確認できた。つまり、傾きが急なほど吸収が深く、クレータ密度が高いほど吸収が浅い傾向となった。一方、鉄量およびカルシウム量との相関は見られなかった。

以上の結果を、文献[4]で報告された月の可視・赤外スペクトル分類結果と比較して、水星の地殻進化について考察した。水星のスペクトル分類の地理的分布を月のそれと比較すると、グループ1のスペクトル分類の地理的分布は月の高地領域でのスペクトル分類の地理的分布に近く、

グループ2のスペクトル分類の地理的分布は月の海領域でのスペクトル分類の地理的分布に近いことが明らかになった。また、クレータ密度や表面の凹凸状態についてのグループ1とグループ2の関係も、グループ1は月の高地、グループ2は月の海に対応した。また、特徴量から見えるスペクトル形状も、グループ1はクラス間のスペクトルの変化は小さく、かつ連続的に変化しており、この様子は月の高地のスペクトル変化に近しい。一方、グループ2はスペクトル形状が変化に富み、隣り合うユニットでも形状に違いが見られるなど、月の海の玄武岩ユニットに対応するようなスペクトルの集合であった。しかしながら、水星の分光吸収の深さは月のそれと比べると浅く、地域差が小さいため、本来分光スペクトルからは得られる鉱物・元素情報は水星の分光スペクトルからは得られなかった。

これらの月と水星の分光スペクトル分類の比較から、推察された水星全球の地殻進化は以下の通りである。

- ✓ グループ1の比較的均質な組成をもつ広大な領域が、月の高地領域のように、現在の水星の初期に形成された。
- ✓ その後、グループ2の領域がマグマ噴出により形成され、月の海領域のように、噴出ユニットごとに特徴ある組成のマグマが噴出された。
- ✓ しかしながら、現在の水星表面全体は、分光スペクトルからは鉱物・元素情報が得られないほどに宇宙風化が進んだ。

なお、水星地殻の形成過程は月のそれと近しいが、宇宙風化の進捗が月の場合と大きく異なる原因はいくつかの理由が考えられるが、その解明には今後さらなる研究を必要とする。

以上のように、本研究の遂行によって、水星の可視・近赤外分光スペクトルデータの自動分類で得られたスペクトル分類を基にしたスペクトル区分図を水星の地質図として作成され、この作成した区分図と月のスペクトル区分図[4]との比較から水星の地殻形成とその後の表面進化について明らかにし、研究目的を達成した。

参考文献

- [1] Weider, S.Z. et. al., *Geophys.Res.Lett*, 43, pp.3653-3661, 2016.
- [2] Evans, L.G. et. al., *Icarus*, 57, pp.417-427, 2015.
- [3] Peplowski, P.N. et. al., *Nature Geosci.* 9, pp.273276, 2016.
- [4] Hareyama, M. et. al. *Icarus*, 321, pp407-425, 2019.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1 . 発表者名 Makoto HAREYAMA, Yoshiaki ISHIHARA, Makiko OHTAKE, Chikatoshi HONDA
2 . 発表標題 Preliminary Result of Unsupervised Classification for Reflectance Spectra of Mercury's Surface Obtained by MESSENGER/MDIS
3 . 学会等名 15th Annual Meeting Asia Oceania Geoscience Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 晴山慎、石原吉明、大竹真紀子、本田親寿
2 . 発表標題 水星全球スペクトル区分図と化学組成
3 . 学会等名 日本惑星科学会 2018 年秋季講演会
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Makoto HAREYAMA, Yoshiaki ISHIHARA, Makiko OHTAKE, Chikatoshi HONDA
2 . 発表標題 Global Map of Spectral Classification for the Mercury and Its Chemical Composition.
3 . 学会等名 50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hareyama M. Ishihara Y. Honda C. Ohtake M.
2 . 発表標題 Preliminary Unsupervised Classification of the Mercury's Surface Using Multiband Reflectance Data Obtained by MESSENGER/MDIS
3 . 学会等名 49th Lunar and Planetary Science Conference 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 晴山慎、石原吉明、大竹真紀子
2. 発表標題 水星の分光スペクトル分類マップに基づく水星の表面進化の考察
3. 学会等名 日本惑星科学会 2021 年秋季講演会
4. 発表年 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
研究 分担者	石原 吉明 (Ishihara Yoshiaki) (80400232)	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・研究員 (82645)	

	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
連携 研究者	大竹 真紀子 (Ohtake Makiko) (30373442)	会津大学・コンピュータ理工学科・教授 (21602)	

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