

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01267

研究課題名(和文) 宇宙風化作用・熱疲労による天体表面進化：はやぶさ2探査結果の実証

研究課題名(英文) Surface evolution of small bodies of the solar system by space weathering and thermal fatigue

研究代表者

佐々木 晶 (Sasaki, Sho)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：10183823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)： 現有の拡散反射測定システムを3.4ミクロンまで測定できるように改良した。CM2炭素質隕石の測定では、レーザー照射後は3 μ mの吸収帯が少し弱くなること、全体的にスペクトルが弱く赤化することがわかる。最近形成されたクレーターの色はリュウグウでは相対的に青く(Morota et al., 2020)。これは、我々の結果と整合的である。

紫外線照射については、カンラン石の可視域が、短時間で暗化するという面白い結果が出ている。宇宙空間でも数日の照射で数10%の反射率低下が予想される。リュウグウ表面の岩石の亀裂が南北方向に卓越しており熱疲労が原因と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

はやぶさ2による炭素質小惑星リュウグウの探査は、地球惑星科学や宇宙工学にとどまらず、広い分野にインパクトを与えている。科学成果を最大化するために、ミッションデータ解析や地上実験のサポートは意義が高く不可欠である。我々のCM2炭素質隕石の測定では、レーザー照射後は3 μ mの吸収帯が少し弱くなること、全体的にスペクトルが弱く赤化する。最近形成されたクレーターの色はリュウグウでは相対的に青く(Morota et al., 2020)これは、我々の結果と整合的であり、研究の学術的意義の高さを示す。

研究成果の概要(英文)： The current diffuse reflection measurement system was modified to measure down to 3.4 microns, and measurements of the CM2 carbonaceous meteorite show a slight weakening of the 3- μ m absorption band after laser irradiation and an overall weakening and reddening of the spectrum. The color of recently formed craters is relatively blue in Ryugu (Morota et al., 2020). This is consistent with our results.

Regarding ultraviolet irradiation, an interesting result is that the visible region of olivine darkens in a short period of time. Even in space, a reflectance decrease of several 10% is expected after a few days of irradiation. Cracks in the rocks on the surface of Ryugu are predominantly in the north-south direction, which may be due to thermal fatigue.

研究分野：惑星科学

キーワード：宇宙風化作用 熱疲労 はやぶさ2 反射スペクトル 炭素質隕石 暗化 含水鉱物 リュウグウ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまで大気のない炭素質天体 (C, D, P 型小惑星) の宇宙風化作用では反射スペクトルの青化、赤化の両方の場合があると考えられている。はやぶさ 2 探査機の小惑星表面探査により、現実の炭素質小惑星ではどちらが卓越しているか、明らかになる。これまでの実験的研究から、細かい有機物粒子の生成や硫化物がスペクトルの青化に関与していることを我々は示唆した。さらに、太陽に近づき温度変化の大きな天体では、熱疲労による表面更新が重要になる。

2. 研究の目的

本研究では、隕石資料・シミュラント (アナログ試料) を用いた風化実験を行い、反射スペクトルを 3 ミクロンまで測定することにより、宇宙風化作用および熱疲労への、含水鉱物や揮発性成分の役割を明らかにする。室内実験の結果を、はやぶさ 2 探査機のリモセンデータ、地上望遠鏡や「あかり」などの宇宙望遠鏡の観測結果と比較する。これにより、炭素質天体の風化の本質を明らかにし、年代と反射スペクトルとの関係を明らかにする。

大気のない炭素質天体 (C, D, P 型小惑星) の宇宙風化作用では反射スペクトルの青化、赤化の両方の場合があると考えられている。はやぶさ 2 探査機の小惑星表面探査により、現実の炭素質小惑星ではどちらが卓越しているか、明らかになる。これまでの実験的研究から、細かい有機物粒子の生成や硫化物がスペクトルの青化に関与していることを我々は示唆した。さらに、太陽に近づき温度変化の大きな天体では、熱疲労による表面更新が重要になる。本研究では、隕石資料・シミュラント (アナログ試料) を用いた風化実験を行い、反射スペクトルを 3 ミクロンまで測定することにより、宇宙風化作用および熱疲労への、含水鉱物や揮発性成分の役割を明らかにする。室内実験の結果を、はやぶさ 2 探査機のリモセンデータ、地上望遠鏡や「あかり」などの宇宙望遠鏡の観測結果と比較する。これにより、炭素質天体の風化の本質を明らかにし、年代と反射スペクトルとの関係を明らかにする。

3. 研究の方法

「研究の目的」で示した段階的実験を炭素質隕石およびアナログ物質について行う。

- (i) 本研究ではまず、3 ミクロン帯の無いか弱い炭素質隕石について、微小隕石の衝突加熱を模擬したパルスレーザー照射実験により可視・近赤外の反射スペクトル変化を調べる。
- (ii) さらにもともと含水鉱物を有して 3 ミクロン帯の吸収のある隕石について、加熱で吸収帯を弱めた後に、宇宙風化模擬実験を行う。
- (iii) 有機物の効果を別途考えるため、有機物を含まない含水鉱物として、蛇紋岩について、風化実験を行い、反射スペクトル変化を調べる (予想: 含水鉱物の吸収帯が弱くなるとともに低波長域は赤化)。
- (iv) さらに、asphaltite などの有機物を加えてスペクトル変化を調べる (予想: 反射スペクトルの青化がはじまる)。
- (v) はやぶさ 2 のカメラ、ライダーなどのデータ解析を進める。
- (vi) 温度変化が岩石に与える熱ストレスを画像解析により測定して、熱疲労の影響による、クラック形成・風化の可能性を検討する。

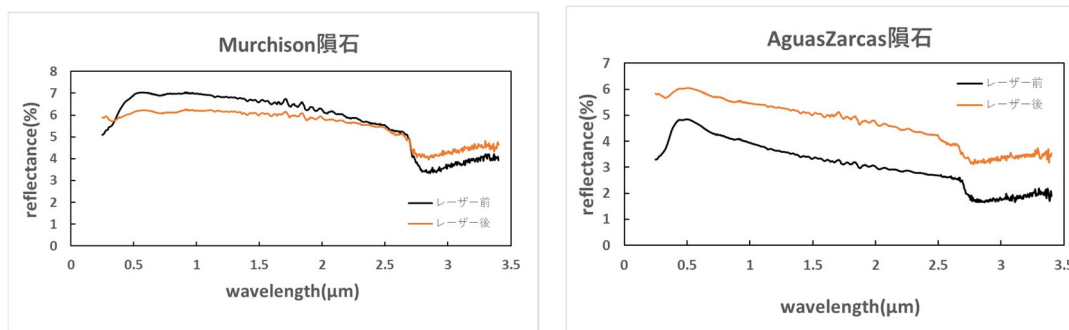
はやぶさ 2, OSIRIS-REx 探査機による観察では、リュウグウ、ベンヌともに、反射率が非常に低い (2%) 一方で、岩石内部はその数倍以上明るいことがわかっている。両天体とも、可視域 (および赤外域) の暗化が急速に進むと考えられる。そのため、紫外線照射も風化の原因として検討したい。

4. 研究成果

研究の方法で述べたものの中で、(iv) を除けば、当初の計画を進めることができた。」

これまでの反射スペクトル測定システムを生かす形で改良を行い、最大 3.4 ミクロンまで測定ができるようになった。図は、CM2 炭素質隕石 Murchison 隕石と、AguaZarcas 隕石の測定例

である。実際のリュウグウの反射スペクトルは、これらよりも暗く単純な比較はできないが、微小隕石衝突による宇宙風化を模擬したパルスレーザー照射によってスペクトルが弱く赤化する。最近形成されたクレーターの色はリュウグウでは相対的に青く (Morota et al., 2020)、これは、我々の結果と整合的である。含水鉱物の影響が弱くなっている事は予想通りである。



小惑星リュウグウの表面は様々なサイズの岩塊 (ボルダー) で覆われている。Ryugu 表面の画像からボルダー上の亀裂を抽出し、その方向を統計的に調べた。我々は、100 枚以上の高分解能画像の解析から、20cm から数 10m 程度のサイズの岩塊に亀裂があること、しかもその方向は南北に偏っていることを明らかにした。500 個以上の亀裂のある岩のうち、方向を 10 度毎に分類すると、6 割の亀裂の方向が南北 (± 15 度) の範囲に集中する。亀裂には、蛇行するもの、直線的なもの、途中で止まるもの、分岐するもの、複数方向など複雑なもの、と分類することができるが、南北方向への卓越はいずれのタイプでも見られる。蛇行タイプ、中途タイプには、岩塊の内部組織の影響を受けているものがある。複雑タイプのもは、方向のバラツキがあり、衝突の関与を示していると考えられるが、衝突だけでは、南北方向への亀裂の偏りは説明できない。太陽を背にしている小さい位相角による、見かけの効果 (影の幅が狭く亀裂に見える) の可能性もあるが、同じ解像度であれば、異なる時期に撮られた位相角が異なる画像でも、同一と判別できる亀裂は少なくない。

岩塊の亀裂の方向が特定の方向に卓越することは、地球の砂漠の岩石や火星表面の岩石で確認されている。岩塊表面の日照による非対称な温度変化が、熱ストレスを生じて、亀裂を生んだ可能性が考えられる。リュウグウの自転軸傾斜角は、 171.64 ± 0.03 度でほぼ逆行自転である。温度の日変化の及ぼすスケールは限定的である。一方で、軌道離心率は大きく過去には近日点は水星軌道より内側にあった可能性がある。表面温度の年変化が大きく、南北方向の熱疲労亀裂を生んだかも知れない。

カンラン石への紫外光照射によって可視光領域での反射スペクトル強度が 30%減少するという、宇宙風化作用 特有の暗化の変化が見られた。一方、赤外領域ではスペクトル強度の変化は見られない。カンラン石の試料は非常に短いタイムスケールで変化が現れたものの、すぐに変化が飽和することが分かった。ここから、太陽から 1AU おける天体のタイムスケールに換算すると、十日程度で紫外光による宇宙風化は進行すると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Morota T., Sugita S., Cho Y., Kanamaru M., Tatsumi E., et al.	4. 巻 368
2. 論文標題 Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 654 ~ 659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz6306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tatsumi E., Sugimoto C., Riu L., Sugita S., et al.	4. 巻 5
2. 論文標題 Collisional history of Ryugu 's parent body from bright surface boulders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 39 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-020-1179-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamamoto Keiko, Otsubo Toshimichi, Matsumoto Koji, Noda Hiroto, Namiki Noriyuki, et al.	4. 巻 72
2. 論文標題 Dynamic precise orbit determination of Hayabusa2 using laser altimeter (LIDAR) and image tracking data sets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01213-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Kanamaru Masanori, Sasaki Sho, Morota Tomokatsu, Cho Yuichiro, Tatsumi Eri, Hirabayashi Masatoshi, Hirata Naru, Senshu Hiroki, Shimaki Yuri, Sakatani Naoya, Tanaka Satoshi, Okada Tatsuaki, Usui Tomohiro, Sugita Seiji, Watanabe Sei ichiro	4. 巻 126
2. 論文標題 YORP Effect on Asteroid 162173 Ryugu: Implications for the Dynamical History	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JE006863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tatsumi Eri, Sakatani Naoya, Riu Lucie, Matsuoka Moe, et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 Spectrally blue hydrated parent body of asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-26071-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamura Tomoki, Ikeda Hitoshi, Kouyama Toru, et al.	4. 巻 73
2. 論文標題 Science operation plan of Phobos and Deimos from the MMX spacecraft	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01546-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyamoto Hideaki, Niihara Takafumi, Wada Koji, et al.	4. 巻 73
2. 論文標題 Surface environment of Phobos and Phobos simulant UTPS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01406-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Michikami Tatsuhiro, Hagermann Axel, Morota Tomokatsu, et al.	4. 巻 381
2. 論文標題 Three-axial shape distributions of pebbles, cobbles and boulders smaller than a few meters on asteroid Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115007 ~ 115007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.115007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kanamaru Masanori, Sasaki Sho, Wieczorek Mark	4. 巻 174
2. 論文標題 Density distribution of asteroid 25143 Itokawa based on smooth terrain shape	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 32 ~ 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2019.05.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hasegawa Sunao, Hiroi Takahiro, Ohtsuka Katsuhito, Ishiguro Masateru, Kuroda Daisuke, Ito Takashi, Sasaki Sho	4. 巻 71
2. 論文標題 Q-type asteroids: Possibility of non-fresh weathered surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsumoto, K., Noda, H., Ishihara, Y., Senshu, H., Yamamoto, K., Hirata, N., Hirata, N., Namiki, N., Otsubo, T., Higuchi, A., Watanabe, S., Ikeda, H., Mizuno, T., Yamada, R., Araki, H., Abe, S., Yoshida, F., Sasaki, S., et al	4. 巻 338
2. 論文標題 Improving Hayabusa2 trajectory by combining LIDAR data and a shape model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113574 ~ 113574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.113574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuoka Moe, Nakamura Tomoki, Hiroi Takahiro, Okumura Satoshi, Sasaki Sho	4. 巻 890
2. 論文標題 Space Weathering Simulation with Low-energy Laser Irradiation of Murchison CM Chondrite for Reproducing Micrometeoroid Bombardments on C-type Asteroids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L23 ~ L23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab72a4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Sugita et al.	4. 巻 346
2. 論文標題 The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw0422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Thermally Controlled Crack Orientation of Boulders on Ryugu: N-S Preference and Exfoliation Structure
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Sulfur effect of space weathering experiment simulating micrometeorite bombardment on the Hermean surface
3. 学会等名 Workshop on Mercury 's Surface Response to the Interplanetary Environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Crack Orientation of Boulders on Ryugu: Meridional Preference and Exfoliation
3. 学会等名 The 33rd ISTS (International Symposium on Space Technology and Science) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 晶
2. 発表標題 リュウグウ表面の熱疲労
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

1. 発表者名 川上 結生
2. 発表標題 金属の露出した小惑星における宇宙風化作用について
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

1. 発表者名 盛満 眞一
2. 発表標題 カンラン石への紫外光照射を用いた宇宙風化模擬実験
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

1. 発表者名 Kanamaru Masanori, Sasaki Sho, Wieczorek Mark
2. 発表標題 Density Distribution within Small Solar System Bodies Based on Smooth Terrain Shape: Asteroid 25143 Itokawa and Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2019 assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sasaki Sho, Sugita Seiji, et al
2. 発表標題 Brightness and morphology variations on surface boulders of 162173 Ryugu: Space weathering, breccia, and thermal cracks
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2019 assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sasaki Sho, Sugita Seiji, Tatsumi Eri, et al
2. 発表標題 Brightness and Morphology Variations on Surface Rocks of 162173 Ryugu by Hayabusa2: Space Weathering, Impacts, and Meridional Cracks
3. 学会等名 EPSC-DPS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木晶, 神田志穂ほか
2. 発表標題 162173リュウグウ表面の高解像度画像から探る岩塊の熱疲労
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 鳥名亮太、佐々木晶、廣井孝弘
2. 発表標題 月の表面を模擬した混合物組成による宇宙風化実験
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 Sasaki Sho
2. 発表標題 Cracks of Boulders on Ryugu: Possibility of Thermally-Induced Origin
3. 学会等名 Asteroid Science in the Age of Hayabusa2 and OSIRIS-REx (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Sulfur-Powered Space Weathering
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2018 assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Promotion of Space Weathering with Sulfur
3. 学会等名 COSPAR General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木晶
2. 発表標題 162173 リュウグウの表面の明るさと色の変化：宇宙風化、熱疲労、物質移動
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 田中宏和
2. 発表標題 硫黄に富んだ環境下での宇宙風化の模擬実験と分光計測
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 Sasaki Sho
2. 発表標題 Brightness and Color Variations on the Surface of 162173 Ryugu: Space Weathering, Thermal Fatigue and Mass Movement
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2
3. 学会等名 第20回惑星圏研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Brightness and Morphology Variations on Surface rocks of 162173 Ryugu: Space Weathering, Breccia Structure and Meridional Cracks
3. 学会等名 The 50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sasaki Sho
2. 発表標題 Brightness and Morphology Variations on Surface rocks of 162173 Ryugu: Space Weathering, Breccia Structure and Meridional Cracks
3. 学会等名 The 50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐々木 晶、土山 明、笠羽 康正、大竹 真紀子	4. 発行年 2019年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 400
3. 書名 太陽・惑星系と地球	

〔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
研究協力者	廣井 孝弘 (Hiroi Takahiro)	ブラウン大学・上級研究員	
研究協力者	臼井 文彦 (Usui Fumihiko) (30720669)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任研究開発員 (82645)	

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