

令和元年6月11日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04044

研究課題名(和文) 惑星表層物質進化の探求：宇宙風化現象解明によるリモート観測と物質分析研究の統合

研究課題名(英文) Exploring planetary surface material evolution

研究代表者

安部 正真 (Abe, Masanao)

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・准教授

研究者番号：00270439

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：小惑星模擬表層物質への太陽風を模擬した水素イオン照射実験を実施した。1keVの水素イオンを10の18乗個/cm²照射すると、反射スペクトルの3μm帯に、水に関する吸収バンドの変化が生じることが分かった。これはイオン照射によって含水鉱物やH₂Oが新たに生成されたことによる変化であると考えられる。

また照射したケイ酸塩鉱物の断面を透過型電子顕微鏡で観察し、イオン照射を受けた鉱物表面がアモルファス化していることや、鉱物表層から深さ数十nmのところにプリスターと呼ばれる気泡が形成されている様子も確認できた。実験で再現したスペクトル変化ははやぶさ2で観察された反射スペクトルの特徴を説明できる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

月や小惑星など大気の無い太陽系天体表面では、太陽風と呼ばれるイオンが常に照射されている。この太陽風によって、無水の天体表面に水や含水鉱物が形成されている可能性が近年指摘され、月ではその特徴が見つかったと同時に、はやぶさ2でも小惑星表層に同様な特徴を発見した。この原因を探るために、本研究では太陽風を模擬したイオン照射を太陽系天体表層を模擬した物質に照射し、同様な反射スペクトルの特徴の変化を起こすことに成功した。このような水の生成機構を解明することで、将来の人間の宇宙進出における資源利用の可能性が開かれるだけでなく、太陽系における水の生成や輸送と天体の進化の関係を明らかにすることにもつながる。

研究成果の概要(英文)：Hydrogen ion irradiation experiments were conducted to simulate the solar wind on the asteroid surface analog material. It was found that a change in the absorption band with respect to water occurs in the 3 μm band of the reflection spectrum when the samples were irradiated with 1 keV H⁺ ions with dose of 1E+18 ions/cm². This is considered to be a change due to the newly generated water-containing mineral by ion irradiation. In addition, the cross section of the irradiated silicate mineral is observed with a transmission electron microscope, and the ion irradiated mineral surface is amorphous, and bubbles called blisters are formed at a depth of several tens of nm from the mineral surface. The spectral change reproduced in the experiment may explain the characteristics of the reflection spectrum observed by Hayabusa 2.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 太陽風 水 反射スペクトル リモートセンシング 宇宙風化

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

1. 研究開始当初の背景

はやぶさは S 型小惑星イトカワからサンプルを持ち帰り、小惑星と隕石の関係、小天体の形成史について明らかにし、現在の惑星科学において標準となる考えを提示した。さらに希ガス分析や TEM(透過型電子顕微鏡)観察によって、小天体表層での物質進化がこれまで我々が考えていた以上に活発であることを明らかにした(Nakamura+2011, Nagao+2011)。特に透過型電子顕微鏡(TEM)観察において、表層物質極表面にプリスターと呼ばれる気泡があることや、微小硫化鉄の生成など、これまで月試料での観察から明らかになっていた微小鉄粒子の生成とは異なる宇宙風化現象の発見があり(Noguchi+2011)、太陽風照射を原因とする固体惑星物質への影響をはやぶさサンプルの観察を通して研究することが可能になってきていた。これらは、イトカワサンプルを、地球大気の影響を受けずに持ち帰ることができ、大気の影響を極力避けた状態で高性能な TEM を用いて観察できたことによって初めて可能となった。宇宙風化の原因としては、これまで太陽風起源以外にも微小隕石衝突起源が考えられている。日本では微小隕石衝突を模擬したレーザー照射による実験が先行しており、海外では逆に太陽風を模擬したイオン照射による実験が盛んである。しかし、イオン照射は Ar など重粒子を用いたものが多く、太陽風の粒子数として多い H や He イオンについては、その影響深度が 5~50nm 程度と極表層にとどまることから、これまであまり研究が進められていなかった。一方近年、月のリモートセンシング観測で、月表面に H や水の存在を示す証拠が発見され話題となった(Pieters+2009)。この H や水の起源としては、もともと月に存在した水である可能性、あるいは彗星の衝突により供給されたなどの可能性もあるが、太陽風の H イオンの照射により、ケイ酸塩鉱物の O に H が付与され OH や H₂O が生成したという考えがあり、いくつかの実証研究が始まっている(Ichimura+2012)。これまで、かんらん石や月サンプルに H イオンを照射させ、反射スペクトル観測によって、OH 基、H₂O の存在を示す 3 μm 吸収バンドの再現に成功しているが、OH や H₂O がどのように岩石中に取り込まれているかは明らかになっていない。またこれらの研究は吸着水の影響もあり、太陽風照射でできた水との区別がつけにくく、実験におけるサンプルの取り扱い方法の工夫が重要な課題である。

2. 研究の目的

はやぶさサンプル分析により、固体惑星表層の物質進化である宇宙風化の理解が進み、太陽風の影響が支配的であることが示唆された。しかし、その影響は回収試料の極表層に限られており、観察が困難であると同時に、大気に晒されるとその特徴を損なってしまうという問題がある。本研究では太陽風を模擬したイオン照射から、リモートセンシング観測を模擬した反射分光観測、およびサンプル分析までを一貫して大気遮断環境下で実施し、小惑星表層における物質進化を実験的に解明する。本研究によりイオン照射による反射スペクトル変化と表層物質進化の関係を定量的明らかにすることで、リモート観測と物質分析研究を統合し、反射スペクトル変化から惑星表層年代や表層物質進化を推定する手法の獲得を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、太陽風照射を模擬したイオン照射と試料観察を一貫して大気に触れない環境で連続して行える装置を製作し、太陽風の固体天体表層物質への影響を調べる。

観察は反射分光測定と走査型電子顕微鏡(SEM)および TEM 観察を行う。反射分光観測としては、惑星探査機のリモートセンシング観測と同様なバルクの反射分光への影響と、1 粒子単位での反射スペクトル変化を調べる。SEM 観察では太陽風による微粒子表層のアモルファス化やプリスター生成の観察、TEM 観察では鉱物種の変化および鉱物の構造の変化、特に OH や H₂O の配位の仕方について調べる。

本研究はイオン照射量とサンプルの変化を定量的に把握し、イトカワサンプルで観察される特徴と比較することで太陽風照射のタイムスケールを明らかにする。宇宙風化現象に時間軸のものさしを入れる研究はこれまでほとんどなく、これが成功すればこの分野の研究を大きく進展させる成果となる。

回収試料を用いた天体の表層年代推定法としては、希ガス分析等による宇宙線照射年代法が存在するが、本研究で反射スペクトル変化と太陽風照射量の関係を定量的に明らかにし、リモートセンシング観測により得られる情報から太陽風照射年代を知ることができるようになる。これは地上観測で得られる反射スペクトル情報を用いて、太陽系の様々な場所に存在する小惑星の表面年代を系統的に議論できるまったく新しい研究分野を生み出すことを意味し、小惑星の軌道進化の研究と合わせて太陽系の物質進化研究を大きく進展させることができる。

4. 研究成果

小惑星模擬表層物質への太陽風を模擬した水素イオン照射実験を実施した。1KeV の水素イオンを 10 の 18 乗個/cm² 照射すると、反射スペクトルの 3 μm 帯に、水に関する吸収バンドの変化が生じることが分かった。これはイオン照射によって含水鉱物や H₂O が新たに生成されたことによる変化であると考えられる。また照射したケイ酸塩鉱物の断面を透過型電子顕微鏡で観察し、イオン照射を受けた鉱物表面がアモルファス化していることや、鉱物表層から深さ数十 nm のところにプリスターと呼ばれる気泡が形成されている様子も確認できた。実験で再現したスペクトル変化ははやぶさ 2 で観察された反射スペクトルの特徴を説明できる可能性がある。

月や小惑星など大気の無い太陽系天体表面では、太陽風と呼ばれるイオンが常に照射されている。この太陽風によって、無水の天体表面に水や含水鉱物が形成されている可能性が近年指摘され、月ではその特徴が見つかっていると同時に、はやぶさ2でも小惑星表層に同様な特徴を発見した。この原因を探るために、本研究では太陽風を模擬したイオン照射を、太陽系天体表面を模擬した物質に照射し、同様な反射スペクトルの特徴の変化を起こすことに成功した。このような水の生成機構を解明することで、将来の人間の宇宙進出における資源利用の可能性が開かれるだけでなく、太陽系における水の生成や輸送と天体の進化の関係を明らかにすることにもつながる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

- 1) Kitazato K., Milliken R. E., Iwata T., Abe M., et al.
The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy
Science, 2019, 査読有
[10.1126/science.aav7432](https://doi.org/10.1126/science.aav7432)
- 2) Watanabe S., Hirabayashi M., Hirata N., Hirata N., Noguchi R., Shimaki Y., Ikeda H., Tatsumi E., Yoshikawa M., Kikuchi S., Yabuta H., Nakamura T., Tachibana S., Ishihara Y., Morota T., Kitazato K., Abe M. et al.
Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu?A spinning top?shaped rubble pile
Science, 2019, 査読有
[10.1126/science.aav8032](https://doi.org/10.1126/science.aav8032)
- 3) Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S., Sawada H., Tatsumi E., Yamada M., Honda C., Yokota Y., Kouyama T., Sakatani N., Ogawa K., Abe M. et al.
The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes
Science, 2019, 査読有
[10.1126/science.aaw0422](https://doi.org/10.1126/science.aaw0422)
- 4) Hasegawa Sunao, Kuroda Daisuke, Kitazato Kohei, Abe Masanao et al.
Physical properties of near-Earth asteroids with a low delta-v: Survey of target candidates for the Hayabusa2 mission
Publications of the Astronomical Society of Japan, 2018, 査読有
<https://doi.org/10.1093/pasj/psy119>
- 5) Jourdan F., Timms N. E., Eroglu E., Mayers C., Frew A., Bland P. A., Collins G. S., Davison T.M., Abe M., and Yada T.
Collisional history of asteroid Itokawa
GEOLOGY, 2017, 89-822, 査読有
- 6) Matsuoka Moe, Nakamura Tomoki, Osawa Takahito, Iwata Takahiro, Kitazato Kohei, Abe Masanao, Nakauchi Yusuke, Arai Takehiko, Komatsu Mutsumi, Hiroi Takahiro, Imae Naoya, Yamaguchi Akira, Kojima Hideyasu
An evaluation method of reflectance spectra to be obtained by Hayabusa2 Near-Infrared Spectrometer (NIRS3) based on laboratory measurements of carbonaceous chondrites
Earth, Planets and Space, 2017, 査読有
<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0705-4>
- 7) Sawada Hirotaka, Hayabusa2 SMP Team, Okazaki Ryuji, Tachibana Shogo, Sakamoto Kanako, Takano Yoshinori, Okamoto Chisato, Yano Hajime, Miura Yayoi, Abe Masanao, Hasegawa Sunao, Noguchi Takaaki
Hayabusa2 Sampler: Collection of Asteroidal Surface Material
Earth, Planets and Space, 2017, 査読有
[10.1007/s11214-017-0338-8](https://doi.org/10.1007/s11214-017-0338-8)
- 8) Okazaki Ryuji, The Hayabusa2 SMP Team, Sawada Hirotaka, Yamanouchi Shinji, Tachibana Shogo, Miura Yayoi N., Sakamoto Kanako, Takano Yoshinori, Abe Masanao, Itoh Shoichi, Yamada Keita, Yabuta Hikaru, Okamoto Chisato, Yano Hajime, Noguchi Takaaki, Nakamura Tomoki, Nagao Keisuke
Hayabusa2 Sample Catcher and Container: Metal-Seal System for Vacuum Encapsulation of Returned Samples with Volatiles and Organic Compounds Recovered from C-Type Asteroid Ryugu
Earth, Planets and Space, 2017, 査読有
[10.1007/s11214-016-0289-5](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0289-5)

9) Iwata T., Kitazato K., Abe M., Ohtake M., Arai T., Arai T., Hirata N., Hiroi T., Honda C., Imae N., Komatsu M., Matsunaga T., Matsuoka M., Matsuura S., Nakamura T., Nakato A., Nakauchi Y., Osawa T., Senshu H., Takagi Y., Tsumura K., Takato N., Watanabe S., Barucci M. A., Palomba E., Ozaki M.
NIRS3: The Near Infrared Spectrometer on Hayabusa2
Earth, Planets and Space, 2017, 査読有
10.1007/s11214-017-0341-0

[学会発表](計28件)

- 1) A. Takigawa, Y. Asada, Y. Nakauchi, T. Matsumoto, A. Tsuchiyama, M. Abe, N. Watanabe
H+ ION IRRADIATION EXPERIMENTS OF ENSTATITE: SPACE WEATHERING BY SOLAR WIND
82th Annual meeting of Meteoritical Society (国際学会) 2019
- 2) L. Riu, K. Kitazato, R. Milliken, T. Iwata, M. Abe et al.
GLOBAL VIEW OF THE MINERALOGY AND SURFACE PROPERTIES OF THE ASTEROID RYUGU USING NIRS3
NEAR-INFRARED SPECTROMETER ON BOARD HAYABUSA2.
50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2019
- 3) S. Watanabe, M. Hirabayashi, M. Abe et al.
HIGH POROSITY NATURE OF THE TOP-SHAPE C-TYPE ASTEROID 162173 RYUGU AS OBSERVED BY
HAYABUSA2.
50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2019
- 4) T. Nakamura, M. Matsuoka, K. Amano, S. Kobayashi, H. Mita, R. Brunetto, C. Lantz,
T. Hiroi, M. E. Zolensky, K. Kitazato, S. Sugita, R. Honda, T. Morota, E. Tatsumi,
R. E. Milliken, T. Iwata, S. Kameda, H. Sawada, M. Abe et al.
POSSIBLE INTERPRETATIONS OF VISIBLE/NEAR-INFRARED SPECTRA OF ASTEROID RYUGU OBTAINED BY
THE HAYABUSA2 MISSION.
50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2019
- 5) T. Hiroi, R. E. Milliken, K. M. Robertson, H. Kaiden, K. Misawa, H. Tanaka, S. Sasaki,
M. Matsuoka, T. Nakamura, K. Kitazato, T. Iwata, M. Abe et al.
GAUSSIAN DECONVOLUTION OF THE 2.7-MICRON BAND OF HAYABUSA2/NIRS3 SPECTRUM OF ASTEROID
RYUGU; POSSIBLY A HEAVILY SPACE-WEATHERED CM CHONDRITE BODY.
50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2019
- 6) M. Matsuoka, T. Nakamura, T. Hiroi, K. Kitazato, T. Iwata, M. Abe et al.
INFRARED SPECTRA OF ASTEROID RYUGU: COMPARISON TO LABORATORY-MEASURED CARBONACEOUS
CHONDRITES.
50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2019
- 7) M.A. Barucci, R. Honda, Y. Yokota, S. Sugita, T. Morota, S. Kameda, E. Tatsumi, ,
K. Kitazato, T. Iwata, M. Abe et al.
STATISTICAL ANALYSIS OF SPECTROPHOTOMETRY AND SPECTRAL VARIATION ON THE SURFACE OF
(162173) RYUGU AS OBSERVED BY JAXA HAYABUSA2 MISSION.
50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2019
- 8) Moe Matsuoka, Kohei Kitazato, Takahiro Iwata, Masanao Abe et al.
Infrared spectra of asteroid 162173 Ryugu obtained by Near-infrared Spectrometer (NIRS3)
Hayabusa 2018 (国際学会) 2018
- 9) M. Abe, T. Yada, K. Yogata, T. Okada, K. Sakamoto, M. Yoshitake, S. Furuya, M.
Nishimura, K. Kumagai, and H. Yurimoto
Hayabusa2 sample recovery and phase-1 curation
Hayabusa 2018 (国際学会) 2018
- 10) Moe Matsuoka, Tomoki Nakamura, Takahiro Hiroi, Kohei Kitazato, Takahiro Iwata,
Masanao Abe et al.
Interpretation of infrared spectra of asteroid Ryugu based on comparison to carbonaceous
chondrites and other meteorites
AGU Fall Meeting 2018 (国際学会) 2018
- 11) Rosario Brunetto, Kohei Kitazato, Takahiro Iwata, Masanao Abe et al.
Hayabusa2/NIRS3 spectral observations of asteroid (162173) Ryugu
AGU Fall Meeting 2018 (国際学会) 2018
- 12) Moe Matsuoka, Tomoki Nakamura, Takahiro Hiroi, Kohei Kitazato, Takahiro Iwata,
Masanao Abe et al.
Spectral comparison between asteroid (162173) Ryugu and carbonaceous meteorites
DPS meeting #50 (国際学会) 2018
- 13) Kohei Kitazato, Takahiro Iwata, Masanao Abe et al.
Surface composition of asteroid (162173) Ryugu from Hayabusa2/NIRS3 observations
DPS meeting #50 (国際学会) 2018
- 14) 松本 徹, Dennis Harries, 仲内 悠祐, 浅田 祐馬, 瀧川 晶, 土山 明, 安部 正真, 三宅 亮,

- 中尾 聡、Falko Langenhorst
小惑星イトカワのレゴリス粒子に見られる硫化鉄鉱物の宇宙風化組織
日本地球惑星科学連合 2018 年大会 (国際学会) 2018
- 15) Y. Nakauchi, M. Abe, T. Matsumoto, K. Kitazato, A. Tsuchiyama
An experimental investigation of thermal stability of OH/H₂O formed by solar wind implantation on lunar surface
49th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2018
- 16) K. Kitazato, S. Nasu, T. Iwata, M. Abe, M. Ohtake, and Hayabusa2 NIRS3 Team
Near-infrared spectroscopy of Mars and Jupiter from the NIRS3 instrument on Hayabusa2
49th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2018
- 17) M. Abe, T. Yada, T. Okada, K. Sakamoto, M. Yoshitake, Y. Nakano, T. Matsumoto, N. Kawasaki, K. Kumagai, S. Matsui, M. Nishimura, H. Yurimoto
Curation Facility for asteroid sample return missions in Japan
49th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会) 2018
- 18) Kohei Kitazato; Naru Hirata; Hirohide Demura; Tomoki Inasawa; Masanao Abe; Yukio Yamamoto; Akira Miura; Jun'ichiro Kawaguchi
Thermally induced rock breakdown on asteroid Itokawa
49th Annual Division for Planetary Science Meeting (国際学会) 2017
- 19) Yusuke Nakauchi; Toru Matsumoto; Yuma Asada; Masanao Abe; Akira Tsuchiyama; Aki Takigawa; Naoki Watanabe
New equipment the ion beam irradiation equipment installed at ISAS / JAXA
49th Annual Division for Planetary Science Meeting (国際学会) 2017
- 20) 北里宏平, 岩田隆浩, 安部正真, 大竹真紀子
はやぶさ 2 近赤外分光計のクルージング観測と小惑星近傍観測計画
日本地球惑星科学連合 2017 年大会 2017
- 21) 仲内 悠祐, 松本 徹, 安部正真, 土山 明, 瀧川 晶, 渡部 直樹, 浅田 祐馬
Performance report of solar wind ion irradiation equipment
日本地球惑星科学連合 2017 年大会 2017
- 22) 浅田 祐馬, 土山 明, 瀧川 晶, 松本 徹, 仲内 悠祐, 安部正真, 渡部 直樹
太陽風による宇宙風化を模擬した輝石・かんらん石への水素イオン照射実験
日本地球惑星科学連合 2017 年大会 2017
- 23) 浅田 祐馬, 瀧川 晶, 土山 晃, 松本 徹, 仲内 悠祐, 安部正真, 渡部 直樹
エンスタタイトへの 1 keV 水素イオン照射による太陽風宇宙風化模擬実験
日本惑星科学会 2017 年秋季講演会 2017
- 24) 北里宏平, 平田成, 出村裕英, 稲澤朋生, 安部正真, 山本幸生, 三浦昭, 川口淳一郎
小惑星イトカワの表面に見られる白色地域の成因
日本惑星科学会 2017 年秋季講演会 2017
- 25) 仲内悠祐, 安部正真, 松本徹, 北里宏平, 土山明
珪酸塩鉱物中における OH/H₂O の温度安定性の実験的検証
日本惑星科学会 2017 年秋季講演会 2017
- 26) Nakauchi Y., Matsumoto T., Abe M., et al.
Laboratory simulation of solar wind proton Implantation on hydrated silicate minerals.
Goldshmidt Workshop on Experimental Cosmochemistry (国際学会)2016
- 27) 仲内悠祐, 松本徹, 安部正真, 他
層状ケイ酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響
日本惑星科学会秋季講演会 2016
- 28) 北里浩平, 岩田隆浩, 安部正真, 他
はやぶさ 2 近赤外線分光計を用いた地球・月観測
第 60 回宇宙科学連合講演会 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

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：矢田 達

ローマ字氏名：Yada toru

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：宇宙科学研究所

職名：主任研究開発員

研究者番号（8桁）00294877

(2)研究協力者

研究協力者氏名：渡部 直樹

ローマ字氏名：Watanabe naoki

研究協力者氏名：土山 明

ローマ字氏名：Tsuchiyama akira

研究協力者氏名：中藤 亜衣子

ローマ字氏名：Nakato aiko

研究協力者氏名：松本 徹

ローマ字氏名：Matsumoto toru

研究協力者氏名：仲内 悠祐

ローマ字氏名：Nakauchi yusuke

研究協力者氏名：瀧川 晶

ローマ字氏名：Takigawa aki

研究協力者氏名：浅田 祐馬

ローマ字氏名：Asada yuma

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。