

氏 名 仲内 悠祐

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1912 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 The space weathering effect of solar wind implantation on the
C-type asteroids

論文審査委員 主 査 教授 早川 基
准教授 安部 正真
准教授 岩田 隆浩
准教授 高島 健
教授 杉田 精司 東京大学
教授 中村 智樹 東北大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Asteroids and meteorites are thought to retain information on the early solar system. In particular, planetesimals similar to C-type asteroids and/or parent bodies of carbonaceous chondrites may have carried water and organics to the earth. Carbonaceous chondrites are classified into many types, which have different amounts of hydrated minerals and organic matter and different composition of oxygen isotopes. These differences are thought to be related to the environments that these meteorites had experienced. Such record of environmental history is important to understand the solar system. However, meteorites do not retain direct evidence for which parent body they come from. Nevertheless, reflectance spectra suggest that carbonaceous chondrites may be from C-type asteroids. More specifically, C-type asteroids often exhibit spectral features for hydrated minerals and organics found in carbonaceous chondrites.

The surface of asteroids, however, exhibit spectra affected by space weathering effect, which are caused by the bombardment of micrometeorites, solar wind ions, and cosmic ions. Recent studies suggest that the influence of solar wind implantation cannot be ignored in near earth asteroids. However, space weathering effect of proton accounting for 95% of solar wind have not understood well. The main purpose of this thesis is to investigate the incorporation mechanism of solar wind protons into silicate minerals and the rate of spectral change by solar wind protons on C-type asteroid surface.

In this thesis, the spectral change by proton implantation on the airless bodies is described. Introduction is described in Chapter 1. Chapter 2 describes the details of laboratory simulation of solar wind implantation and analysis method of effect with respect to the reflectance spectra. Ion implant experiments for anhydrous and hydrated minerals were conducted using microwave ion source ion implantation device to simulate space weathering. The energy of irradiated H_2^+ beam using this device was 10keV to emulate to solar wind. The reflectance spectra were measured from 1.28 μ m to 27 μ m. Among which the wavelength related to H_2O/OH absorption band is focused.

In Chapter 3, the observation on difference of spectral change between silicate minerals is discussed. The samples were olivine (San Carlos), antigorite (Sangencyaya) and saponite (Kunimine Industries Co., Ltd.), which are contained in carbonaceous chondrites. Olivine was used as a

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

representative of anhydrous minerals and the others were used as a representative of hydrous minerals. In this laboratory simulation, it was detected that the absorption strength around $3\mu\text{m}$ of reflectance spectra was increased by irradiation of H_2^+ ions. This change strongly suggests that hydroxyl group and/or H_2O were created by H_2^+ irradiation. Especially, the spectral change of hydrated minerals clearly indicated existence of hydrogen bonded hydroxyl with silanol. In consequence, the solar wind protons would break the original hydroxyl group and bonds of SiO_2 and create hydroxyl group and H_2O in hydrated silicate minerals at the same time.

In Chapter 4, the spectral change of antigorite with respect to the amount of H_2^+ ions is discussed. This series of experiments revealed a relationship between irradiated dose and change of reflectance spectra. The reflectance spectra were changed with increase of the irradiation dose and the spectral change of antigorite would saturate with about 10^{18} ions/ cm^2 . Furthermore, the contribution of proton irradiation to the absorption strength around $3\mu\text{m}$ is larger near 1AU in present compared with experiment simulating micrometeorite impacts considering another cause of space weathering.

In Chapter 5, the estimation of spectral change on the surface of C-type asteroids are described based on results in chapter 3. The reflectance spectra of a mixture of several minerals can be described using average of single scattering albedo weighted mineral abundance. The alteration ratios of single scattering albedo of carbonaceous chondrites were decreased after H_2^+ irradiation. These results indicate that the surface reflectance spectra of C-type asteroids at near earth region show a large change due to space weathering effect. When we estimate carbonaceous chondrite types using reflectance spectra of C-type asteroids, then, the space weathering effect of solar wind protons must be considered.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、C型小惑星表層の反射スペクトルに対して、太陽風プロトンによる宇宙風化作用がどのように影響するかについて実験的に明らかにしたものである。本研究で示された反射スペクトルの変化やそのタイムスケールは、反射スペクトルを用いたC型小惑星表層物質の決定に対して重要な指標となる。さらに、C型小惑星を母天体とすると考えられる炭素質コンドライトの一部は、地球の水の起源となったと考えられており、太陽系内側に存在する小惑星が持つ含水量を推定する場合にも最も考慮が必要な指標の一つとなるであろう。

本論文の第1章では、反射スペクトルを用いた炭素質コンドライトとC型小惑星の対応付けの重要性について触れ、現行の宇宙風化作用がC型小惑星表層の反射スペクトルの解釈に与える影響について述べている。さらに、近年の月面探査の結果から示唆された太陽風プロトンによる OH基や H₂O の生成について触れ、微小隕石衝突や他の太陽風イオン (HeやAr) による宇宙風化作用とは変化の現れ方が異なることに着目した上で、本研究の動機と目的について述べている。第2章では、マイクロ波イオン源イオン注入装置を用いた水素イオン照射実験と、実験で得られた反射スペクトル変化の解析手法について詳しく記載されている。試料には全ての炭素質コンドライトに多く含まれる3種類の珪酸塩鉱物 (Olivine, Antigorite, Saponite) を用いている。解析では、水素イオン照射前後の反射スペクトルの比をとることで、3 μ m 付近の複雑な反射スペクトル形状における変化をわかりやすく表現した。

第3章では、水素イオン照射による 3種類の珪酸塩鉱物の反射スペクトル変化を調べ、それぞれの鉱物における反射スペクトル変化の違いについて示し、照射された水素イオンの取り込まれ方について議論している。3種類の鉱物全てにおいて、水素イオン照射により反射スペクトルの 3 μ m 付近の吸収強度の増加を確認し、OH基や H₂O が新たに形成されたことが強く示唆された。さらに、Antigorite と Saponite の反射スペクトルの 2.72 μ m、2.77 μ m、2.85 μ m において、他の波長より大きな変化が見られた。この結果から珪酸塩鉱物中において水素は、SiOH や H₂O といった形で取り込まれていることが示唆された。先行研究において珪酸塩鉱物中で照射された水素が SiOH として取り込まれているという提案はあったが、反射スペクトルを用いた直接的な示唆は世界で初めてである。第4章では、Antigoriteの 3 μ m の反射スペクトル変化に注目し、太陽風プロトンによる宇宙風化作用のタイムスケールを示した。3 μ m 付近における変化は、地球近傍の H⁺(1keV) で換算すると数百年程度で止まることがわかった。太陽風プロトンによる最大変化量と同程度の変化量を、微小隕石衝突により変化させようとする10⁸年程度かかることが先行研究からわかっている。また、地球近傍小惑星である小惑星イトカワの表層粒子の希ガスの詳細分析から、イトカワ表層粒子の小惑星表層滞在年代は10²~10³年とされている。宇宙風化作用は小惑星表層にしか影響を与えないため、小惑星表層における実効的な宇宙風化年代は10²~10³年と考えられる。それぞれのタイムスケールを比較すると、地球近傍小惑星における宇宙風化作用は太陽風プロトンによる影響が顕著であると言える。第5章では

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

実験で得られた反射スペクトルの変化量を元にC型小惑星表層の反射スペクトル変化を推定した。反射スペクトル変化は含まれる鉱物の質量含有量に大きく依存する。近年の小惑星探査などで提案されている反射スペクトルを用いたC型小惑星と炭素質コンドライトの対応付けへ、どの程度影響するのかが議論されている。第6章には、本論文の結論が記されている。

以上のように本研究は、C型小惑星表層の物質推定に対して新しい視点で行われた実験的研究であり、近年国内外で計画されている小惑星探査計画や天文観測衛星の反射スペクトルデータの解釈において有益な知見となると期待される。審査会においては、約1時間の公開講演および質疑応答、その後の審査委員全員との非公開質疑を通し、本研究の構想や実験の実施、また得られた結果の解釈や議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行なっていることが明確に認められた。出願論文は日本語で記述されているものの、併せて提出された英語版の論文概要、及び国際学会での発表・質疑応答の状況から、語学力も十分な水準にあると判断された。なお本研究の一部は出願者を筆頭著者として既に査読付き学術雑誌に投稿中（査読結果を受けて改訂中）である。

以上のことから、出願者は博士(理学)の学位授与にふさわしい知識と学力を有すると認められ、審査委員全員一致で試験合格と判定した。