

氏 名 荒井武彦

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1135 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 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 Major elemental analysis of asteroid 25143 Itokawa
with X-ray fluorescence spectrometer onboard Hayabusa
and its relation to meteorite-analogues

論文審査委員 主 査 教授 堂谷 忠靖
教授 前澤 洌
教授 石田 学
准教授 岡田 達明
准教授 加藤 學(JAXA 宇宙科学
研究本部)

論文内容の要旨

This thesis reports results on the major elemental composition ratios of asteroid 25143 Itokawa through remote X-ray fluorescence spectroscopy using the X-ray fluorescence spectrometer (XRS) onboard the Japanese asteroid spacecraft Hayabusa. Much more detailed and plausible results are provided than in the previous preliminary study (Okada *et al.* Science 312, 1338-1341, 2006), utilizing newly released spacecraft's position and attitude data. With these results, a relationship between asteroids and meteorites is discussed as well as the origin and evolution of the asteroid.

Hayabusa successfully carried out *in situ* observations of 25143 Itokawa, an S (IV)-class near-Earth asteroid. The primary scientific goal of the mission is to unveil an asteroid-meteorite connection and consequently apply the evidence of meteorites to the solar system evolution. A fundamental question remains unsolved for decades whether asteroids are truly parent bodies of meteorites or not. There has been a “paradox” in asteroid science that reflectance spectra of S-class asteroids, most abundantly discovered in the solar system, have features more reddened, darkened, and shallower in absorption band depth than those of ordinary chondrite meteorites, most frequently found on earth. On the other hand, these spectral features rather resemble those of less frequently found iron-rich stony iron meteorites. Some explanations were proposed that S-class asteroids are substantially enriched in iron, or they are intrinsically like ordinary chondrites but only the uppermost surface has been altered by some processes like space weathering.

The XRS observed X-ray fluorescence emission from the uppermost surface materials of Itokawa, excited by solar X-rays, in order to determine major elemental composition of surface of the asteroid. This is the second *in situ* asteroid X-ray fluorescence observation in history next to the Near-Earth Asteroid Rendezvous Shoemaker mission (Trombka, *et al.*, 2000; Nittler *et al.*, 2001), and the first one with the advanced instruments based on charge-coupled device (CCD). In this study, composition of major elements such as Mg, Al, Si, S, Ca, and Fe was estimated and the relation of the asteroid to some possible candidates of meteorite-analogues was investigated.

For that purpose, analyses of the XRS data have been carefully carried out. The failure of two reaction wheels of the spacecraft caused severe disturbance of the attitude control and significantly reduced duration to view the asteroid by the XRS. Many observational data include cosmic X-ray backgrounds and solar wind particles other than instrumental noises. Effective energy resolution was also degraded due to frequent thermal changes of the XRS. Thus, XRF spectra were extracted by subtraction of all these effects. Only a few percents of useful data out of three month observation were finally extracted for further detailed analysis under appropriate conditions. Considering the instrumental characteristics, intensities of XRF line spectra were determined by fitting with the response function of each CCD chip that has been evaluated in the laboratory. Temporal fluctuation

of incident solar X-rays as well as regional variation of surface geomorphology of Itokawa were also the important points considered. Geometric corrections were carried out using the shape model developed by Aizu University (Demura *et al.*, 2006) and the updated spacecraft's position and attitude data relative to the asteroid.

A key result of analysis indicates that major elemental composition of the surface materials of Itokawa resembles that of ordinary chondrite meteorite-analogues. In particular, the results show that (1) elemental mass ratio of Fe/Si is somewhat larger than that of the average composition of ordinary chondrites, but its corrected result with mineral mixing effect indicates the ratio is considered almost equal to it, (2) elemental mass ratio of Mg/Si is globally homogeneous on the surface of Itokawa, neglecting the occurrence of substantial chemical differentiation, (3) in spite of large uncertainties, elemental mass ratios of best-fit Al/Si and S/Si may slightly vary in local areas, and the corrected results with mineral mixing effect suggest that elemental mass ratio of S/Si is less than, or almost the same as that of average composition of ordinary chondrites, indicating slight processes underwent on the surface.

Asteroid 25143 Itokawa, an S (IV)-class of the taxonomy by Gaffey *et al.* (1993), is attempted to be classified as meteorite-analogues referring to the elemental mass ratios of Mg/Si, Al/Si, S/Si, Ca/Si and Fe/Si. The results indicate that iron and stony iron meteorites such as IAB, pallasites, and mesosiderites are ruled out due to its Fe/Si. This fact strongly supports the idea that the reddened and darkened features as well as shallower absorption band depth found in visible and near infrared reflectance spectra is not by substantial amount of iron but by the alteration due to uppermost surface processes such as space weathering. Additionally, these elemental composition ratios suggest that most probable candidates for Itokawa are ordinary chondrite meteorites, especially L- or LL-chondrites. But other types of meteorites including EL-chondrites, or primitive achondrites such as Brachinites, Acapulcoites or Winonaites still cannot be ruled out when Mg/Si vs. Fe/Si are compared.

These results imply that Itokawa is like a primitive meteorite. Regional distribution of S/Si found on local areas implies that some surface alteration might occur on Itokawa. However, sulfur does not seem globally depleted and has regional distribution. Only the surface material on Itokawa might be altered but the inner materials are expected to remain fresh and primordial. Resurfacing on Itokawa due to seismic destruction by impacts and/or tidal destruction by planet encounters (Miyamoto, *et al.*, 2007) could cause such surface heterogeneity. Low average density and global compositional homogeneity of Itokawa implies that the asteroid is a rubble-pile (Fujiwara *et al.*, 2006) and assembled by compositionally homogeneous rocks originated from the parent bodies.

論文の審査結果の要旨

本研究では、日本の小惑星探査機「はやぶさ」による S 型小惑星イトカワの蛍光エックス線観測によって取得したデータを解析することによってイトカワの主要元素組成を求め、S 型小惑星と隕石との関係や、探査された史上最小の天体であるイトカワの起源や始原性について議論している。

太陽系初期の物質と物理状態の日心距離分布を理解することは惑星科学の最も重要な課題のひとつであり、始原天体の探査によって得られる定量的な物質的情報が不可欠である。太陽系初期の物質について現在手に入る情報源は隕石と惑星間塵（および STARDUST によって得られた彗星塵）があるが、内部の組織を保持するものは隕石だけである。隕石はこれまで地上の装置で徹底的かつ精緻に分析され、その結果が太陽系初期の情報として利用されてきた。

隕石を用いるときの問題点は産地が分からないことである。揮発性成分の少ない隕石の産地は太陽系小天体のうち小惑星と考えられている。小惑星は地上からの可視・近赤外反射分光法によっていくつかのスペクトル型に分類される。しかし、地球近傍で最も発見される S 型小惑星のスペクトル型と最も地上で発見される普通隕石のスペクトルの特徴が一致しない(全体的に反射率が低下し、特に短波長成分が暗くなる赤化と呼ばれる現象がみられ、吸収帯が浅くなる)。金属鉄の存在度が大きくなる場合にみられる特徴と類似しており、普通コンドライトよりもむしろ稀少な石鉄隕石に似ているという「パラドクス」があった。一方、普通コンドライトの表層が変成した場合でも同様な特長がみられるという室内実験の結果もあった。

そのため、小惑星を直接探査して調べる必要があった。「はやぶさ」が S 型小惑星イトカワを探査訪問する際に、地上からの観測では得られない主要元素組成を現地で取得することで、この問題に決着をつけ、かつ地上観測による小惑星の分類の意義や信頼性を評価することが期待されていた。

蛍光エックス線スペクトロメータ (XRS) は、そのために搭載された観測装置である。太陽エックス線が小惑星面に照射することで励起する 2 次エックス線 (蛍光エックス線) を観測すると同時に搭載した標準試料からの励起蛍光エックス線と比較することで、小惑星表面の元素組成を調べることができる。

申請者は XRS の打ち上げ前の性能評価から参加しており、特にエックス線検出器である電荷結合素子 (CCD) の検出効率の測定や応答関数の構築を室内実験によって行い、さらに数値計算に取り込める形にモデル化した。打ち上げ後、小惑星に到着するまでに CCD が宇宙放射線の照射を受けた影響を評価するため、定期的に検出器の診断データを取得・解析する必要があるが、その作業を申請者が中心的に行った。その結果のひとつとして、不良画素を除去する機上データ処理のロジックの一部に誤りがあることを発見し、不具合対処のためのソフトウェア修正を行うなど、申請者が大きな貢献を果たした。

このように申請者は XRS の特徴を熟知した上で、XRS による小惑星の蛍光エックス線観測データの解析を行ったが、大きな課題が 2 点あった。ひとつは探査機の姿勢制御装置の不具合によって探査機姿勢が安定せず、小惑星が XRS の視野の内外を移動することと、放熱面への太陽光入射量が時間変動することによる温度変動に伴い、XRS のゲインが激しく変動したことである。申請者は、小惑星探査から 1 年後に決定された探査機姿勢・位置の情報をもとに各瞬間における XRS 視野内の小惑星の位置や小惑星の自転フェーズによって観測される経度を追跡した。このとき、小惑星表面の地形 (入射角、放射角、位相角の変化) が蛍光エックス線放射強度に影響するため、表面凹凸

の激しい小惑星の形状モデル (Aizu モデル : Demura et al., 2006) を用い、各微小領域に分けてモデル計算している。もうひとつは、観測時の太陽エクス線強度が非常に弱く、その結果 S/N が悪いため、長時間の積分に加え、他のノイズ源となる宇宙背景エクス線や機器ノイズなどを厳密に評価し、除去する必要が生じたことである。申請者は、これらのノイズ源の特徴を検討し、解析可能データを効果的に抽出することによって、最終的に小惑星イトカワの主要元素組成を決定した。

その結果得られたものは、S 型小惑星の主要元素組成が普通コンドライトとよく一致すること、逆に火成活動など分化や変成を受け、元素組成がコンドライト組成と大きく異なるような隕石は適合しないことが分かった。特に、スペクトル型にみられた赤化・暗化の特徴が、金属鉄が過剰にある状態 (石鉄隕石など) ではなく、宇宙風化による表層のみの現象として決着させる重要な結果となった。これは最近の向上した地上分光観測の結果 (連続成分を恣意的に除去するなど課題があるが) と一致し、地上観測によってある程度物質の種類の特定が可能であることを確認した重要な成果でもある。

以上から、本研究は S 型小惑星と普通隕石の関係を結びつける重要な役割を担うものであり、申請された論文は博士学位論文として相応しい水準にあると判断した。申請者がデータ解析と科学的考察で十分な成果を上げたことに加え、観測装置の開発や運用においても重要な役割を果たした点も高く評価された。申請者は査読付欧文誌に主著者として論文 1 編が掲載されている (Arai et al., *Earth Planets Space*, 60, 21-31, 2008)。また、本論文が英語で執筆されており、語学力も十分な水準にあり、博士論文申請に必要な全ての要件を満足していると判断された。以上により、審査委員全員一致で申請者が学位授与に相応しい知識と学力をもち、博士 (理学) に値すると判定した。