

平成 30 年 4 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2013～2017

課題番号：25120006

研究課題名（和文）スパースモデリングが拓く太陽系博物学：はやぶさ後の小惑星探査戦略の創出

研究課題名（英文）Spars-modeling view of natural history of the solid bodies in the solar system:  
Exploration strategy of small bodies after the Hayabusa mission

研究代表者

宮本 英昭（Miyamoto, Hideaki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：00312992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 55,800,000 円

研究成果の概要（和文）：予定通り、隕石組成の世界最大のデータベースを構築し、このクラスタ解析から、本質的な元素の選別と共に、自動的にタイプ別の分類が行えることを示した。また小惑星・隕石双方のスペクトルについて、信頼度に応じて波長域を揃えリサンプリングした形でそれぞれについてデータベースを構築した。その解析の結果、互いに共通した潜在的クラスタ構造があるというデータ分析的な結果が得られ、高精度で対応関係を明らかにすることができた。成果は火星衛星探査計画(MMX)の創出につながり、シミュラント開発という思わぬ成果につながった。これははやぶさ2計画にも利用され、今後の探査計画にも重要な役割を果たすと期待される。

研究成果の概要（英文）：Asteroids are classified based on their reflectance spectra, which are compared with those of meteorites, which are known to be mostly originated from asteroids. However, some types of asteroids do not really match with meteorites, and their direct comparisons are generally difficult without professional skills. We applied the concept of the sparse modelling to connect asteroids with meteorites to search for the optimal integration scheme for two different databases without relying on preliminary knowledge. We developed large databases of asteroids and meteorites for easy application of sparse modelling. Through our analyses including principal component analysis, Bayesian spectral deconvolution and dimensionality reduction, we found that our data-driven approach can extract potential information consistent with previous studies. Our methods show a new type of data handling scheme for asteroid and meteorite data, potentially having a significant contribution for future missions.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 隕石 反射スペクトル クラスタ解析 スパースモデリング

### 1. 研究開始当初の背景

小惑星は大きさこそ小さいが、太陽系形成期における残存物が独自の進化を遂げたものと考えられている。そのため惑星や衛星には残っていない過去の履歴を保持している可能性が高く、惑星科学的にきわめて価値の高い調査対象といえる。さらに海や有機物を地球にもたらした主要因とも考えられることから、地球という天体を理解する上で大変意義深い。小惑星は太陽系内に 300 万個以上存在するとも言われており、そのすべてに探査機を送り、観測することは現実的ではない。そのため地上からの観測データから、各小惑星の特徴を理解することが不可欠となる。

人類は、小惑星起源であると考えられている岩石をすでに多数手にしている。その岩石とは、隕石である。しかし隕石を小惑星の観測データと単純に比べても、なかなかうまく対応がつかないという問題があった。特に不思議であったのは、地球にいちばん簡単に落ちてきそうである近地球型小惑星に多いタイプ (S 型小惑星) の反射スペクトルが、地球で最も頻繁に見つかる隕石種 (普通コンドライト) の反射スペクトルと、あまりよく似ていないという点であった。

この状況を打破したのが、日本の小惑星探査機「はやぶさ」であった。地上からきちんと観測され S 型に分類された小惑星「イトカワ」に行き、そこからサンプルを取得してこの S 型小惑星が普通コンドライトで形成されていることを、だれの目においても確実な形で証明してみせたのだ。こうして反射スペクトルの違いは、構成物質の違いを示しているのではなく、たとえば宇宙風化など、天体のごく表面的な影響が原因であったことが明らかになった。はやぶさ探査機の大きな功績は、微量元素や同位体組成などを分析できる隕石を用いた高精度分析と、低精度であるが広い空間スケールを網羅できる小惑星の地上観測とを対応付けられる可能性を示したことである。つまり小惑星観測に物質科学的根拠を与えられれば、太陽系の物質分布に関する理解は飛躍的に進むことを証明したといえる。

こうして隕石と小惑星の関連性が確実視されるようになったが、同時にそれぞれの分野で独立して発達した経験則を互いに対比することが、いかに困難であったかも浮き彫りとなった。小惑星は色や反射スペクトルの形状から約 30 種類に経験的に分類されてきたが、より研究の歴史の長い隕石は、岩石組織と鉱物組成の違いから約 70 種類と倍以上の種類へと分類されており、これらの直接的な対比が困難であるのは、ある意味あたりまえでもあった。また小惑星の分類の根拠となる反射スペクトルは、波長幅の制約や宇宙風化の影響、さらには多様な表面状態や内部分化の可能性などを含んだ観測量であったし、スペクトル観測に対して単純に吸収帯域や吸収度合で分類することは、適切でないこと

もわかってきた。

一方で隕石も地上における風化や汚染の影響や、そもそもサンプリングバイアスを含むという問題点を持っていたことも問題を複雑にしている。ただしこの問題点は、簡単には解決できない。たとえば岩石学的には異なる種類とされている隕石同士であっても、酸素同位体比が極めて類似している場合があるし、その逆もある。つまり隕石は従来と全くことなる分類法もありうるのだ(3)。隕石と小惑星が対比できるはずだ、とわかったとはいえ、それぞれの大きさもおかれた環境も大きく異なり、かつそれぞれ異なる計測上の制約を受けることを考えれば、隕石および小惑星の観測データを個別に議論していても、どうしても解決できない部分が残ってしまう。

### 2. 研究の目的

上述の背景に対し、太陽系科学的には、そうした問題点の素過程の解明や物理的な理解よりも、まずはある程度粗くても良いから、対比することが重要である。そのためより本質的には、そもそも精度と確度の異なるデータ群を対象とした統合手法、または適切な基底関数を選ぶ手法の欠如が、大きな問題点であったともいえる。そこで本研究は、そもそも基底を仮定せず、目的に特化した客観的分類を双方においてやり直すことが必要なのではないかと考えた。そのため隕石と小惑星に関するデータベースを独自に作り直し、それぞれの対比を目的とした解析手法を開発しながら、客観的な変数選択を通じた新たな分類方法の開発を目指している。換言すれば、リモートセンシングデータの数理的な「読み方」を理解しようとした(図 1)。

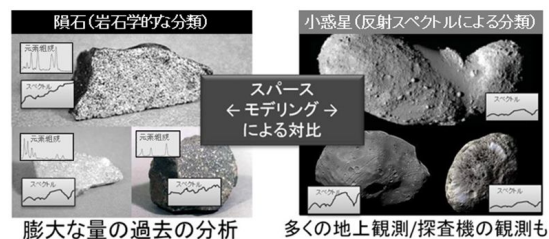


図 1. 研究の概念図

### 3. 研究の方法

#### 3 - 1. 隕石の組成

隕石の全岩組成は、これまで多くの論文が発表されているが、統一的な規格のデータベースとして公開している例はあまり多くはなかった。このことは、スパースモデリングや統計学的手法を用いて解析する際に大きな障害となり得る。そこで私たちはまず、これまで出版された査読論文から隕石の全岩化学組成を調べ、単位などの規格も統一し、データベース化した。いままでの所、延べ 5,628 個の試料数に対し 80 元素以上について総データ数 136,000 個以上を集計した。これは既存のデータベースを大きく凌駕する規模である。ただし構築したデータベースには

計測手法や精度の異なるさまざまな計測値が含まれているため、全ての元素組成を最初から統一的に解析するのは困難である。そこでまず南極隕石の全岩組成データベースを用いて隕石の分類が可能な検討を行った。

国立極地研究所が公表している隕石の主要元素の全岩組成データは、日本が保有する膨大な南極隕石コレクションの中から無作為に選ばれた約 500 個の隕石を分析しており、ほぼ全種の隕石を網羅したデータベースとなっている。精度が高いとされる湿式分析によって全岩組成が計測されており、また同一の分析者が全ての計測を行ったため、観測者バイアスが存在しない。そのため全岩組成に基づいて隕石を分類することが可能かどうか判断するには、最も適切なデータベースであると考えられる。

そこでこのデータベースに対して、主要元素の全岩組成データを用いたワード法によるクラスター解析をベースとして検討した。さらに過去の隕石科学に関するレビューを行い、上述の手法による分類がどの程度過去の知見と調和的かを調べることにした。

### 3 - 2 . 小惑星・隕石の反射スペクトル

隕石と小惑星の反射スペクトルはこれまで多くの地上および宇宙望遠鏡によって観測されており、特に 0.3 - 2.5  $\mu\text{m}$  の波長域(可視近赤外波長域)における反射スペクトルの形状に基づいて小惑星の型が分類されている。これらの波長帯が使われてきた理由は、観測が比較的容易であり、古くから多くの小惑星の観測例があったからである。しかし、全く異なる種類の岩石であっても見かけ上は似たスペクトルが生じることがある。これは構成する鉱物種(輝石やかんらん石)や粒径が反射スペクトルに影響するが、異なる岩石種であってもそれらがほとんど同じことがあるためであり、化学組成のように微細な変化をとらえることが難しいことにある。反射スペクトルのこのような性質は、従来の可視近赤外波長域の反射スペクトルの形状のみに依存した小惑星の分類方法には限界があることを示唆している。

そこで 0.3 - 2.5  $\mu\text{m}$  以外の波長域が近年注目されている。より短い波長の紫外線領域においては大気中のオゾンやその他様々な気体分子による吸収があるため、地上からの小惑星の観測は基本的に難しい。一方で 2.5  $\mu\text{m}$  より長い中間赤外域では、大気中の水蒸気による吸収があるためこちらも観測は困難であったが、近年観測装置の進歩に伴って徐々にデータが得られるようになってきた。その結果、一部の小惑星の中間赤外域の反射スペクトルには含水鉱物に由来すると思われる吸収が確認された。可視近赤外波長域では主要な造岩鉱物(輝石やかんらん石など)に含まれる  $\text{Fe}^{2+}$

イオンの結晶場分裂による吸収が卓越しているが、中間赤外域では 3  $\mu\text{m}$  付近に鉱物中の OH 基や H 基による緩やかな吸収が存在する。そのため、惑星に水がどのようにしてもたらされたかを考える上でも、小惑星表面上に存在する含水鉱物を検出することは、太陽系科学にとって大きな意義がある。そこで 3  $\mu\text{m}$  帯を含む中間赤外域まで反射スペクトルのデータベースを拡張することで、小惑星の新たな分類法、および隕石と小惑星の対応付けの検討を行った。

## 4 . 研究成果

### 4 - 1 隕石組成のクラスター解析

主要元素の全岩組成データのみを用いたワード法によるクラスター解析を行った。その結果、従来の岩石学・鉱物学による隕石の分類と調和的なクラスターが得られた。隕石の分類は長い歴史があり、これまでは岩石学的な組織および鉱物組成から分類し、さらに詳細な微量元素組成や同位体組成などを用いた緻密な分類が行われてきたが、このような緻密な分類法を経なくても、全岩組成の値のみから、ある程度の階層(4 段階ある分類階層のうちの 2 段階目)までは、隕石の分類を自動的に行えることを私たちは示した。

私たちはさらに主成分分析の負荷行列を求め、隕石を分類する上での本質的な元素の抽出も行った。その結果、Si, Na, Ca, Mg, Fe という岩石学にとって基本的な 5 つの主要元素が、岩石の分類をするうえで最も代表的な元素であることがわかった。この 5 元素を用いて k-means 法により隕石を分類したところ、全ての隕石が 8 個のクラスターへ分離した(図 2)。この結果を解釈すると、PC1 が分化の度合いを、PC2 が熱的な影響(変成など)の度合いを示すと理解することができる。このことは隕石学的な解釈とも調和的である。

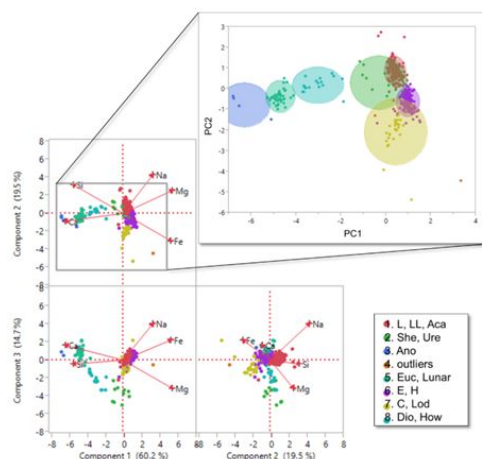


図 2 国立極地研究所が収集した隕石の全岩組成を用いたクラスター解析 [12]。全岩組成によって隕石が明瞭にクラスター化することが観察されただけでなく、主成分空間上での各クラスターの並び方から、PC1 が分化の度合いを、PC2 が熱的な影響の度合いを表していることがわかった。

この解析を基に、データ数を大幅に増やした新たに構築したデータベースにおいても検討を行った。結論は類似しており、PC1, PC2 において各グループの隕石は識別可能である。70%以上の多様性は PC1 で表現できること、PC2 は主に Na が支配していることから、元素の揮発性が分類に大きな影響を与えることなどが示された。

#### 4 - 2 小惑星・隕石のスペクトル解析

まずは中間赤外域まで含めた反射スペクトルのデータベース構築が必要である。これまで私たちは、隕石と小惑星の可視近赤外波長域のデータベースの構築を行ってきた。

すでに様々な研究機関、観測者、装置によって得られた小惑星、隕石の反射スペクトルが公開されているが、観測された波長域や波長分解能、データ形式などが異なる。そのため私たちは、取得したデータを3次スプライン補間によってスペクトルを近似した上で、波長域、波長分解能、データ形式を統一した。さらにこれまでの小惑星、隕石の分類に基づいてラベル付けを行い、外れ値などを専門家の目で見取り除いていくことで、統計的处理を施しやすい反射スペクトルデータベースを構築した。

これによって、小惑星について 2000 年~2012 年において公表された 370 個の観測データ、32 種類の隕石について 744 個のスペクトルデータ収集し、データベース化をめざしている。そして現在さらに中間赤外域の反射スペクトルを収集して加えている。

隕石については KECK/NASA Reflectance Experiment Laboratory (RELAB) から 3.5  $\mu\text{m}$  までの反射スペクトルを収集し、データの補間やラベル付け、外れ値の除去などを行った。また小惑星の 3  $\mu\text{m}$  帯を含む中間赤外域の反射スペクトルの取得を進めた。こちらは NASA Planetary Data System に登録されたデータベースから約 30 個の小惑星に対する反射スペクトルを得ると同時に、過去の文献からのデータ抽出も行っている。小惑星の 3  $\mu\text{m}$  帯の観測は可視近赤外波長域とは異なる観測装置を用いるため、二つの波長域の両方に調和的な規格化や接続の方法を検討している。また 3  $\mu\text{m}$  帯はまだ観測例が少ないこともあり、可視近赤外波長域と比較するとデータ量に偏りが生じるため、データに重みづけを行うことも検討している。

中間赤外域に見られる含水鉱物の吸収を検出することは、地上観測だけでなく探査機によるその場観測においても主要な科学目標の一つとなっている。実際、はやぶさの後継機である「はやぶさ 2」や米国版のはやぶさと言える OSIRIS-Rex 探査機は 3  $\mu\text{m}$  帯を検出できる分光器を搭載しており、それぞれ観測対象の C 型小惑星に向けて現在宇宙空間を航行している。本研究で進めている 3  $\mu\text{m}$  帯を含めた隕石・小惑星の対応付けが確立さ

れば、それら探査計画に対しても重要な貢献になると、私たちは考えている。

#### 4 - 3 相関距離および t-SNE を用いた解析

隕石と小惑星の反射スペクトルには一定の類似性が見られ HED 隕石には V 型小惑星、普通コンドライトには S 型小惑星、炭素質コンドライトには C または D 型小惑星が、それぞれ対応する母天体と考えられてきた。しかし隕石と小惑星のスペクトルの対応関係を定量的に比較検討した研究例は少なく、Britt et al. (1992) によって可視波長領域の反射スペクトルを主成分空間上で比較した例が報告されているのみである。それによると、HED 隕石と V 型小惑星はよく対応するが、普通コンドライトと炭素質コンドライトについては、期待されていた S 型小惑星や C 型小惑星は主成分空間上でうまく対応しないとの結果が得られた。このことは、小惑星表面では宇宙風化が進行しており、実験室で計測された隕石の粉末試料の反射スペクトルとは必ずしも一致しないなどのいくつかの可能性を示唆している。このことは小惑星と隕石の反射スペクトルの直接的な比較は難しいかもしれないことを示している。

そこで私たちは非線形形班 (C01-1) と共同で、スペクトルの微妙な違いを補正しつつ、潜在的な共クラスター構造を抽出できるような可視化手法を検討した。

まず、スペクトル同士の類似度を定量的に評価するための尺度として、スペクトルをベクトルと見なし、そのベクトル間の距離を計算した。その結果を用いて MDS や Isomap などの次元圧縮法を用いて低次元空間において可視化を行った。

具体的に検討した距離は、ACF, PACF, AR, LPC, CEPS, SPEC, GLK, SPEC, LLR, SPEC, ISD, DTWARP, COR, CORT, MINDIST, SAX, NCD, DTW, CID, PER, FRECHET, EUCL の 16 種類である。その中でも相関距離 (COR) に基づく可視化が隕石・小惑星の対応関係を良く表しているとの結果を得た。なお 2 つのスペクトル  $x, y$  の相関距離  $d$  は以下のように定義した。

$$d(x, y) = \sqrt{2(1 - \rho)},$$

ここで

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \{(x_i - \bar{x})^2\} \times \{(y_i - \bar{y})^2\}}},$$

および

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

とする。

距離を決定した後、距離の学習方法も検討した。LFDA, LMNN と MDL, Isomap, t-SNE の、合計 6 種類の組み合わせを検討した結果、距離学習はせずに相関距離を t-SNE [21] で可視化した時に、予想される隕石・小惑星の対応関係が最もうまく可視化されることがわか

った。

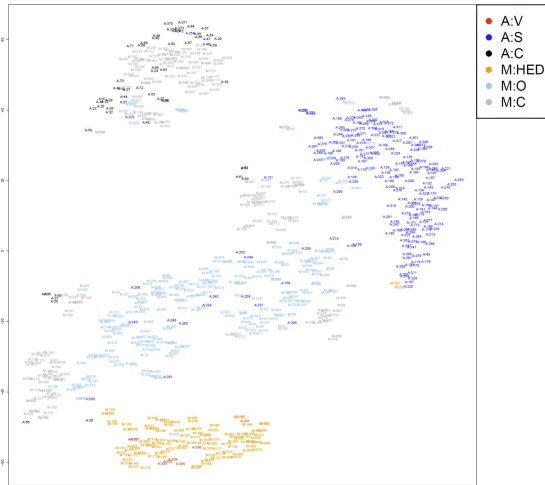


図3 小惑星と隕石の反射スペクトルの相関距離を t-SNE で可視化した結果、赤とオレンジの点が V 型小惑星と HED 隕石、青と水色の点が S 型小惑星と普通コンドライト、黒と灰色の点が C 型小惑星と炭素質コンドライトをそれぞれ表す。

図3はその計算の一例であり、この図から以下のような傾向が見られた：(1)V 型小惑星と HED 隕石がよく対応する、(2)C 型小惑星と炭素質コンドライトが対応するが、それらがさらに3つほどの小クラスターに分離する、(3)S 型小惑星と普通コンドライトは近い関係にあるが、完全には対応しない。これは従来から提唱されていた宇宙風化の効果だが、S 型小惑星の反射スペクトルに固有の情報として埋め込まれており、多少の数的手法をもってしても取り除けない可能性を示唆している。またそれぞれの主要クラスターから離れた場所にある外れ値について、元々のスペクトルデータを調べたところ、分類ミスのあるサンプルであることもわかった。今回の可視化手法については、主に2種類のパラメータが存在し、可視化結果は多少そのパラメータに依存するが、パラメータをある程度振っても、基本となるクラスター構造はあまり変化しないことも確認した。本研究の手法によって、初めて主要な隕石・小惑星の反射スペクトルの対応関係を定量的に可視化することができた。

#### 4 - 4 実際の探査への応用と新ミッションの創出

上述の検討は、私たちが行っている実際の宇宙探査の現場においても有益に応用されている。たとえば現在、対象天体リュウグウに向けて順調に飛行を続けているはやぶさ2ミッションにおいては、その対象天体の反射率の低さから、着陸・サンプリング運用においてこれを模擬したりハーサルの重要性が問われていた。対象が月や火星であれば、地球の火山岩で代用した模擬地形を作成し、こうした検討を進めることができる。小惑星の場合、大量の隕石があればこれが可能となる

が、当然その数は極めて限られている。

そこで本研究の手法を応用することで、光学的特徴を正確に合わせた模擬物質を検討することとした。具体的には、小惑星リュウグウの観測で得られた反射スペクトルと類似したスペクトルを持つ物を、安価・安易に大量に作り出せる組み合わせを調べることとなる。その結果隕石および鉱物の分光データベースから、アンティゴライトとリザルダイトの破碎混合物にナノサイズのカーボン粒子を組み合わせた模擬物質を作ることによって、小惑星リュウグウの光学特性を現実的に模擬できることがわかった。このアイデアは実際の探査機の運用チームに採用されることとなり、私たちは大量の模擬土壌を作成し運用リハーサルのための模擬地形も作成し運用チームに利用されている。

私たちは、ごく小さな反射スペクトルの変化が重要な場合と、ある程度大きく異なって見える場合であっても、それほど科学的な意義を持たない場合などがあることに着目し、火星の衛星であるフォボスの重要性について議論してきた。そのフォボスからサンプルが採取できれば、例えば衛星の起源や太陽系内の物質分布などに関連した重要な科学的問題に関する見通しが極めて良くなる。こうしたことから私たちは JAXA 及びいくつかの大学の関係者らと協力して探査計画を検討し、JAXA はこれを MMX(火星衛星探査計画)という名で推進することとなった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計33件)

1. 宮本英昭, 宇宙資源開発の現状と展望, エネルギー・資源, v39, n2, 119-123, 2018
2. Koga, S. C., S. Sugita, S. Kamata, M. Ishiguro, T. Hiroi, E. Tatsumi, S. Sasaki (2018), Spectral decomposition of asteroid Itokawa based on principal component analysis, *Icarus*, 299, 386-395, doi: 10.1016/j.icarus.2017.08.016.
3. Kuritani, T., Tanaka, M., Yokoyama, T., Nakagawa, M. and Matsumoto, A., Intensive hydration of the wedge mantle at the Kuril arc-NE Japan arc junction: implications from mafic lavas from Usu Volcano, northern Japan. *Journal of Petrology* 57, 1223-1240, 2016
4. 宮本英昭, 新原隆史, 洪鵬 (2016) スパースモデリングによる小惑星物質分布の理解に向けて, *電子情報通信学会誌*, 99, 411-417.
5. Hong, P.K., Miyamoto, H., Niihara, T., Sugita, S., Nagata, K., Dohm, J.M., Okada, M. (2016). An automatic deconvolution method for Modified Gaussian Model using the Exchange Monte Carlo method: application to reflectance spectra of synthetic clinopyroxene. *Journal of Geology & Geophysics*, 5, 3. DOI 10.4172/2381-8719.1000243
6. Cho, Y., S. Kameda, Y. N. Miura, Y. Saito, S.

- Yokota, S. Kasahara, R. Okazaki, K. Yoshioka, K. Shibasaki, T. Oishi, and S. Sugita (2016). Conceptual Design of an In Situ K-Ar Isochron Dating Instrument for Future Mars Rover Missions, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Sp. Sci.*, 14, 89 – 94
7. Sekine, T., N. Ozaki, K. Miyanishi, Y. Asaumi, T. Kimura, B. Albertazzi, Y. Sato, Y. Sakawa, T. Sano, S. Sugita, T. Matsui, R. Kodama (2016), Shock compression response of forsterite above 250 GPa, *Science Advances*, 2, e1600157. DOI 10.1126/sciadv.1600157
  8. Kameda, S., H. Suzuki, T. Takamatsu, Y. Cho, T. Yasuda, M. Yamada, H. Sawada, R. Honda, T. Morota, C. Honda, M. Sato, K. Shibasaki, S. Ikezawa, S. Sugita (2016), Preflight calibration test results for optical navigation camera telescope (ONC-T) onboard the Hayabusa2 spacecraft, *Space Sci. Rev.*, DOI 10.1007/s11214-015-0227-y
  9. Kameda, S., H. Suzuki, T. Takamatsu, Y. Cho, T. Yasuda, M. Yamada, H. Sawada, R. Honda, T. Morota, C. Honda, M. Sato, K. Shibasaki, S. Ikezawa, S. Sugita (2015), Preflight calibration test results for optical navigation camera telescope (ONC-T) onboard the Hayabusa2 spacecraft, *Space Sci. Rev.*, in press.
  10. Kameda, S., H. Suzuki, Y. Cho, S. Koga, M. Yamada, T. Nakamura, T. Hiroi, H. Sawada, R. Honda, T. Morota, C. Honda, A. Takei, K. Takamatsu, Y. Okumura, M. Sato, T. Yasuda, K. Shibasaki, S. Ikezawa, S. Sugita (2015) Detectability of hydrous minerals using ONC-T camera onboard the Hayabusa-2 spacecraft. *Adv. Space Res.* 56, 1519-1524. DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.037
  11. Kuwahara, H. and S. Sugita (2015), Chemical composition diversity among early terrestrial atmospheres generated by impacts, *Icarus*, 257, 290-301. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.05.007
  12. S. Ohno, T. Kadono, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Watari, K. Otani, T. Matsui, S. Sugita, Production of sulphate-rich vapour during the Chicxulub impact and implications for ocean acidification. *Nature Geoscience*, vol. 7, pp. 279-282, 2014.
  13. T. Kuritani, T. Yoshida, J. Kimura, T. Takahashi, Y. Hirahara, T. Miyazaki, R. Senda, Q. Chang, Y. Ito, Primary melt from Sannome-gata volcano, NE Japan arc: constraints on generation conditions of rear-arc magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 167, pp. 1-18, 2014.
  14. D. Kuroda, M. Ishiguro, N. Takato, S. Hasegawa, M. Abe, Y. Tsuda, S. Sugita, F. Usui, T. Hattori, I. Iwata, M. Imanishi, H. Terada, Y.-J. Choi, S. Watanabe, M. Yoshikawa, Visible-wavelength spectroscopy of subkilometer-sized near-Earth asteroids with a low delta-v, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 66, pp. 1-10, 2014.
  15. T. Kuritani, T. Yoshida, J. Kimura, Y. Hirahara, T. Takahashi, Water content of low-K tholeiitic basalt from Iwate volcano, NE Japan Arc: implications for differentiation mechanism of frontal-arc basalt magmas. *Mineralogy and Petrology*, vol. 108, pp. 1-11, 2014.
  16. \*A.N.E. Assah, T. Yokoyama, F.T. Aka, T. Usui, T. Kuritani, M.J. Wirmvem, H. Iwamori, E.M. Fozing, J. Tamen, G.Z. Mofor, T. Ohba, G. Tanyileke, J.V. Hell, Geochemistry of lavas from maar-bearing volcanoes in the Oku Volcanic Group of the Cameroon Volcanic Line. *Chemical Geology*, vol. 406, pp. 55-69, 2015.
- 他 27 件  
〔学会発表〕(計 38 件)
1. H. Miyamoto, T. Niihara, K. Wada, K. Ogawa, N. Baresi, P. Abell, E. Asphaug, D. Britt, G. Dodbiba, T. Fujita, K., Fukui, M. Grott, K. Hashiba, R. Hemmi, P. Hong, T. Imada, H. Kikuchi, P. Michel, K. Mogi, T. Nakamura, PHOBOS ENVIRONMENT MODEL AND REGOLITH SIMULANT FOR MMX MISSION. 49th Lunar and Planetary Science Conf (LPI Contrib No 2083), 1882, 2018
  2. Sugita, S., Tatsumi, E., Kouyama, T., Kameda, S., Yokota, Y., Sakatani, S., Suzuki, H., Yamada, M., Sawada, H., Honda, R.; and 10 coauthors, Pre-Arrival Scientific Calibration of the Hayabusa2 Multi-Band Visible Camera, 49th Lunar and Planetary Science Conf (LPI Contrib No 2083), 2018
  3. Miyamoto, H. Prototype simulant of Phobos regolith for the MMX mission, International regolith science group workshop, Sumida-ku, Tokyo, May 24, 2017
  4. Niihara, T., Miyamoto, H., Kring, D.A. (2017) Statistical classification of Apollo 16 impact melt using major element compositions. *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XLVIII, Houston, TX, USA, March 20-24, #1784
- 他、34 件  
〔図書〕(計 0 件)  
〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)
- 〔その他〕  
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
宮本 英昭 ( MIYAMOTO, Hideaki )  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：00312992  
(2) 研究分担者  
杉田 精司 ( SUGITA, Seiji )  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：80313203  
(3) 研究分担者  
栗谷 豪 ( KURITANI, Takeshi )  
北海道大学・理学研究院・准教授  
研究者番号：80397900