

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01175

研究課題名(和文) 超小型火星探査機用Ne計測装置の基礎開発

研究課題名(英文) Development of Ne measurement instrument for ultra-small Mars missions

研究代表者

杉田 精司 (Sugita, Seiji)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：80313203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、火星大気の新オンの同位体精密分析に向け、探査機搭載可能性を高める超小型(手のひらサイズ)ながら革新的な高質量分解能($m/dm > 10,000$)を持ちうる「オービトラップ型」質量分析器を開発した。さらに、質量測定部(真空容器)に火星大気を取り込む前の段階でNeとArを分別する膜を開発し、実際の透過特性とその時間依存性を確認した。また、ゲッター式ポンプを用いて小型・軽量・無電源ながら真空度を維持する機能を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太古の火星に液体の水が安定に存在した証拠は多数得られたが、太陽光度が低い古火星でどのように温暖湿潤気候が保持されたのか未解明である。この問題の解決には火星の大気散逸史の解明が鍵となる。だが、大気散逸に最も敏感なNeは、存在度も同位体組成も正確に測られておらず、この問題の解決を阻んでいる。本計画で基礎開発を行ったNe計測装置は、安価な打上げが可能なPROCYONクラス(-65kg)の超小型探査機による火星探査に搭載可能であるため、今後の日本の惑星探査に極めて大きな波及効果がある。

研究成果の概要(英文)：In order to measure the neon isotope ratio in the Mars atmosphere with ultra-small spacecraft, we developed orbitrap-type light-weight high-mass-resolution ($m/dm > 10,000$) mass spectrometer. We also developed membrane system to separate Ne and Ar before taking Mars air into the mass spectrometer. Using the newly developed system, we obtained gas separation performance as a function of time. We also designed a new mechanism to keep high vacuum condition using getter-type pump with very limited resources, such as size, weight, and electricity.

研究分野：惑星科学

キーワード：惑星探査 惑星起源・進化 惑星大気 同位体 希ガス 質量分析装置

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太古の火星の表層環境の解明、特に暗い太陽のパラドックスの解決は、惑星科学の最も重要な課題の一つである。過去 20 年の探査で火星の古環境に関する知見は飛躍的に増大し、何らかの形で温暖湿潤気候が一時的にでも成立した可能性は非常に高くなった。だが、具体的にどんな機構で温暖湿潤気候が保持されたのかは、解決の糸口すら見えていない。実は、本質的に同じ問題が前生命期の地球にも存在しており、この問題は地球惑星科学全般に広汎な意義を持つ。

この問題の解決には、火星大気の大気量や化学組成がどう進化したかを理解する必要がある。しかし、火星大気には初期条件と散逸過程の両方に大きな不確定があり、進化の全体像を掴むことが難しい状況にある。もう少し具体的に言うと、同位体組成や元素組成が、質量分別を伴う大気散逸の存否について相矛盾する測定値になっているのである。例えば、水素(D/H)、窒素($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)、アルゴン($^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)は重い同位体に富んでおり、質量分別を伴う大気散逸を示唆している(Bogard+, 2001)。その一方で、炭素や酸素は同位体分別を否定する計測値が得られている(Pepin, 2006)。隕石の分析からは、炭素や酸素が固体火星と大気との間で物質交換が不活発だったことを示す結果も得られており、大気中の炭素・酸素の同位体分別の効果が固体火星の炭素・酸素で薄められたと解釈することは難しい(Bogard+ 2001)。つまり炭素・酸素には質量分別を伴う散逸が効かなかったことが示唆される。さらに、火星の希ガスの元素存在度はコンドライトと彗星の混合で説明できるパターンを示しており、質量分別を要しない。隕石中に捕獲された Ne の同位体比($^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$)はバラツキが多いものの地球の値に近く、これも強い質量分別がなかったことを示唆している。

このような相矛盾する解釈は、データ解釈の前提である火星大気の初期値が地球や他の惑星の値に近いとの前提条件が間違っている可能性を示唆する。そのため、今後はこの前提条件を使わずに解釈できるような精度の良いデータを取る必要がある。実際、火星の希ガス存在度は計測誤差が 1 桁程度もある Viking データ(Owen+, 1977)が最新であり、大きな改善の余地がある。

この不確定性の解消には、質量分別効果に鋭敏に応答する Ne の存在度と同位体比の情報が最も重要である。信頼できる Ne 計測値が得られれば、火星大気の質量分別散逸の程度を正確に把握でき、質量分別前の火星大気の大気組成と同位体比が得られる可能性が高い。この情報が得られれば火星大気の供給源の同定は現在より遥かに高い信頼度で可能となる。もしマグマオーシャンからの脱ガスや火山ガス由来であるのか (CO_2 主体の比較的酸化的な大気の可能性が大)、原始太陽系星雲の捕獲大気や衝突脱ガス大気であるのか (CH_4 主体の還元大気の可能性が大) が判別できれば、初期大気の温室効果の度合いや大気中での有機物生産率の推定に大きな展望が開ける。これは、火星の暗い太陽のパラドックスの解決に新たな展開を与えるものである。

このような重要性にもかかわらず、火星大気の正確な Ne 計測は一度も実現していない。Viking は、より量の多い ^{20}Ne を測れないため、 ^{22}Ne を計測して地球や太陽の $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比を仮定して Ne 総量を算出している。これが大きな誤差要因となっている。この状況は NASA の最新ローバー Curiosity でも解決されていないし、次期ローバー Mars2020 でも変化しない。この背景には、 ^{20}Ne が 2 価の ^{40}Ar との干渉のために容易には計測できないという技術上の問題が存在する。ただし、この技術的な困難さが最大の障害なのではない。メタンなど生命との直接的な関連が強い分子の計測を NASA が希ガスより重視していることが主因である。現在開発中 or 運用中の火星探査機は、いずれも反応性の高い分子に着目して生命の痕跡探しを目指している。NASA ロードマップの第 3 期目標 “Seek for Signs of Life” の制約を受けているからである。最新の NASA Decadal Survey でも、この方針に変更はないため、Ne 問題は今後も未解決のまま放置されてしまう可能性が高い。

こうした状況において、我々は宇宙機搭載用の質量分析装置の基礎開発を行ってきた。H26 年度からの科研費で K-Ar 年代計測用に高質量分解能($m/\Delta m=400$)の飛行時間型質量分析装置(TOF-MS)の開発を行い、15kg 以内で高電圧パルス装置を含む全構成をまかなうシステムの製作を完了し、火星では濃度に 1000 倍以上の差がある ^{36}Ar と ^{40}Ar の計測を正確に行える性能を実現した。また、火星土壌中に存在する ^{39}Cl と ^{40}Ar を分別するに十分な質量分解能も実現した。しかし、火星着陸探査の実現にはまだ幾つかの技術的実証ステップを踏む必要がある。

こうした状況において、我々は宇宙機搭載用の質量分析装置の基礎開発を行ってきた。H26 年度からの科研費で K-Ar 年代計測用に高質量分解能($m/\Delta m=400$)の飛行時間型質量分析装置(TOF-MS)の開発を行い、15kg 以内で高電圧パルス装置を含む全構成をまかなうシステムの製作を完了し、火星では濃度に 1000 倍以上の差がある ^{36}Ar と ^{40}Ar の計測を正確に行える性能を実現した。また、火星土壌中に存在する ^{39}Cl と ^{40}Ar を分別するに十分な質量分解能も実現した。しかし、火星着陸探査の実現にはまだ幾つかの技術的実証ステップを踏む必要がある。

最大のステップは火星大気突入機の実証である。そのような大気突入機の大気降下中に完結できる観測があれば、工学実証探査の段階から重要な科学観測を行える。また、大気中の Ne 計測には 40 程度の質量分解能($m/\Delta m$)で済むため加速電圧も飛行距離も大きく削減でき、大幅な小型化が可能である。さらに、三浦らと進めてきた予備実験により、比較的一般的な樹脂膜の透過で Ar と Ne を高効率に分別できることが分かってきた。この樹脂膜を質量分析装置の前段に設置して計測装置を構成すれば、小型軽量の特殊 GCMS(ガスクロマトグラフ質量分析装置)が成立

して Ne の質量分析が可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、これらの知見を生かして火星探査機に搭載可能な小型 Ne 計測装置の開発を行うことを目的とする。特に、火星表面到達前の大気降下フェーズで Ne 計測が完了できるように、低気圧中で高速計測できる計測システムの基礎開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、質量分析器、Ne/Ar 分離透過膜、ゲッター式ポンプを含む真空容器、可視カメラの 4 ユニットからなる。それぞれのユニットについて以下のような形で開発を進めた。

【質量分析器】 探査機搭載可能性を高める超小型（手のひらサイズ）ながら革新的な高質量分解能 ($m/dm > 10,000$) を持ちうる「オービトラップ型」質量分析器を開発した。本装置の基本的な設計は、数値シミュレーションを用いて実施し、図面設計の後にテストモデルを製作して実験室での性能検証試験を実施した。本装置の設計は組み立て公差に対して非常にシビアになっているため、必要な精度を保証する組み上げプロセスを考慮しながら図面を作成した。また、オプティクスの一部には 100V を超える高電圧も使用するため、放電のリスクを回避することも念頭に置いた。このように完成させた図面をベースに、装置の実機製作をメーカーに依頼した。

検証試験では、供試体を真空槽内に設置し、サンプルとして窒素ガスを微量 ($< \text{mPa}$) 導入しつつ、フィラメントによるガス分子の電離（イオン化）を行い、そのイオンを $1 \mu\text{s}$ 以下の極短時間に集中させて質量分析器に導入した。このイオン集中には、電位レンズ・ミラーを適切なパラメータで組み合わせたイオントラップオプティクスを設計・利用した。

【Ne/Ar 分離透過膜】 ポリイミド膜を用いて Ne-Ar 分離を行う場合の Ne, Ar 透過量、および Ne/Ar 分別性能について、透過実験により得られた結果や拡散係数・透過係数・イオン化効率等の文献値をもとにして評価を行った。さらに、樹脂膜の透過理論に基づいて実験結果を説明するためのモデル解析を行った。

【真空容器】 本研究では火星大気に含まれる Ne の同位体比を測定するために、ローバーにと搭載する質量分析器を開発した。さらに、同位体比の測定精度を向上させるために、容器を安定して高真空に保つ手法の確立を目指した。なおゲッター式ポンプはチタンを含む多孔質合金でできており、 600°C まで加熱すると吸着されたガスが内部に拡散するため、ガス吸着効率の高い表面が露出する（活性化）。この効果を利用し、いわゆる吸着剤として真空容器に取り付けるものである。なお合金の内部に白金ヒーターが組み込まれているため、ジュール加熱によりゲッター自体を活性化できる。

【表層カメラ】 着陸候補地点の決定への応用を意識して、表面環境遠隔モニタするための可視カメラの設計検討も行った。さらに、電気回路部や CCD など、既存の宇宙ミッションにおいて使用された経験も考慮しながら現実的な設計検討を行った。

4. 研究成果

【小型高性能質量分析器】 イオン光学の設計から行った「オービトラップ型」質量分析器の試験機を実際に製作したこと、その試験機を用いてイオン集中化部分に実際に $< 1 \mu\text{s}$ でイオンが集中して質量分析器に成功裏に投入されていることや、イオンの空間電荷効果によるイオン集中量の飽和などが事前の理論予想通りになっていることなどを、実験データ上で確認できたことが成果である。

【Ne/Ar 分離透過膜】 実際の膜材を用いた試験の結果、ポリイミドを用いた透過膜であれば、火星大気条件下で十分な Ar/Ne 分離性能を得られることを実験で確かめられたこと、実験結果をガス透過の理論モデルで正確に再現できることを示したこと、火星表層で火星大気中の Ne 同位体測定を行うためには、厚さ ~ 75 ミクロンのポリイミド膜を用いて 30-60 分間透過させると良いこと、質量分析計のイオン源のイオン化電圧を通常用いる電圧よりも少し低く設定すると良いこと（通常は 70eV 前後に設定し使用することが多いが、例えば、 50eV にすると（ 70eV の場合と比較して） $\text{Ar}^{++}/\text{Ar}^{+}$ 比は $1/40$ 、Ne 感度は 0.7 倍であった）、火星上で透過による分離を行う際にはヒーターで常温付近の温度に保つことが望ましいこと、などの成果を得た。

【真空容器】 図 1 に示すゲッター式ポンプを用いて小型・軽量・無電源ながら真空度を維持する機能を考案し、実際の透過特性とその時間依存性を確認した [Miura et al. under revision]。また、本研究では飛翔体搭載を意識して、1 センチ四方の小型ゲッターに対して、振動・衝撃耐性を考慮した設計を考案し、実際に 80g のゲッター排気部を試作した（図 2）。この試作機のテストか

ら計測に十分な性能が出せることが確認できた。

【表層カメラ】 耐放射線性を考慮したレンズを含めて5枚のレンズを組み合わせ、さらにフィルターターレットを組み合わせた分光光学系を考案した。この遠隔観測システムは火星表層の観測だけに留まらず、小天体探査など様々な応用が可能である。



図 1. ゲッター式ポンプ

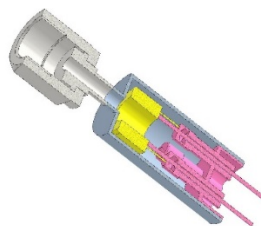


図 2. ゲッターポンプの取り付ける装置の内部構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Cho Yuichiro, Kameda Shingo, Okuno Mamoru, Horiuchi Misa, Shibasaki Kazuo, Wagatsuma Ryo, Aida Yusuke, Miura Yayoi N., Yoshioka Kazuo, Okazaki Ryuji, Sugita Seiji	4. 巻 60
2. 論文標題 Experimental characterization of elastomeric O-rings as reusable seals for mass spectrometric measurements: Application to in situ K ⁴⁰ Ar dating on Mars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 1453 ~ 1462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2017.07.002	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 -
1. 著者名 Cho Yuichiro, Horiuchi Misa, Shibasaki Kazuo, Kameda Shingo, Sugita Seiji	4. 巻 71
2. 論文標題 Quantitative Potassium Measurements with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Using Low-Energy Lasers: Application to In Situ K ⁴⁰ Ar Geochronology for Planetary Exploration	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 1969 ~ 1981
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/0003702817701941	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 Kameda S., Ikezawa S., Sato M., Kuwabara M., Osada N., Murakami G., Yoshioka K., Yoshikawa I., Taguchi M., Funase R., Sugita S., Miyoshi Y., Fujimoto M.	4. 巻 44
2. 論文標題 Ecliptic North-South Symmetry of Hydrogen Geocorona	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 11,706 ~ 11,712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL075915	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 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	4. 巻 208
2. 論文標題 Hayabusa2 Sampler: Collection of Asteroidal Surface Material	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 81 ~ 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-017-0338-8	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 Kadono Toshihiko, Tanigawa Takayuki, Kurosawa Kosuke, Okamoto Takaya, Matsui Takafumi, Mizutani Hitoshi	4. 巻 309
2. 論文標題 Correlation between fragment shape and mass distributions in impact disruption	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 260 ~ 264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.03.014	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 Kurosawa Kosuke, Genda Hidenori	4. 巻 45
2. 論文標題 Effects of Friction and Plastic Deformation in Shock-Comminuted Damaged Rocks on Impact Heating	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 620 ~ 626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL076285	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 Suzuki A.I., Okamoto C., Kurosawa K., Kadono T., Hasegawa S., Hirai T.	4. 巻 301
2. 論文標題 Increase in cratering efficiency with target curvature in strength-controlled craters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.10.019	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 Kurosawa Kosuke, Okamoto Takaya, Genda Hidenori	4. 巻 301
2. 論文標題 Hydrocode modeling of the spallation process during hypervelocity impacts: Implications for the ejection of Martian meteorites	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 219 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.09.015	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 Kurokawa Hiroyuki, Kurosawa Kosuke, Usui Tomohiro	4. 巻 299
2. 論文標題 A lower limit of atmospheric pressure on early Mars inferred from nitrogen and argon isotopic compositions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 443 ~ 459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.08.020	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 三浦弥生	4. 巻 26
2. 論文標題 エボックメイキングな隕石たち(その11) : ~Allan Hills 84001 隕石~ 太古の火星を明らかにする隕石,	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 15-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Sugita, S., E. Tatsumi, T. Kouyama, S. Kameda, Y. Yokota, S. Sakatani, H. Suzuki, M. Yamada, H. Sawada, R. Honda, C. Honda, T. Morota, K. Ogawa, M. Hayakawa, K. Yoshioka, N. Ogawa, N., Tanabe, H. Kamiyoshihara, Y. Iijima, ONC?Team
2. 発表標題 Pre-Arrival Scientific Calibration of the Hayabusa2 Multi-Band Visible Camera
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kurosawa, K. and S. Takada
2. 発表標題 An analytical model to predict the ejecta velocity distribution and transient crater radii
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tatsumi, ヲ?E., S. Sugita
2 . 発表標題 Itokawa's Orbital Transition from Main Belt to Near-Earth Orbit as Derived from Spectral Ages of Quasi-Circular Depressions on Itokawa
3 . 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tatsumi, E., D. Domingue, N. Hirata, K. Kitazato, F. Vilas, S. M. Lederer, P. R. Weissman, S. C. Lowrys, S. Sugita
2 . 発表標題 Regolith Properties on the S-Type Asteroid Itokawa Estimated from Photometrical Measurements
3 . 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yabuta, H. ,N. Hirata, R. Honda, Y. Ishihara, K. Kitazato, M. Komatsu, A. Miura, K. Matsumoto, T. Morota, T. Nakamura, A. Nakato, T. Noguchi, T. Okada, N. Sakatani, S. Sugita, S. Tachibana, S. Tanaka, E. Tatsumi, S. Watanabe, T. Yamaguchi, Y. Yamamoto, Hayabusa2?Lssaa?Team
2 . 発表標題 Hayabusa2 Landing Site Selection (LSS) Training: Summary Report of Scientific Evaluation
3 . 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Ehlmann, B. L., A. Klesh, T. Alsedairy, R. Dekany, J. Dickson, C. Edwards, F. Forget, A. Fraeman, D. McCleese, S. Murchie, T. Usui, S. Sugita, K. Yoshioka, J. Baker
2 . 発表標題 Mars Nano Orbiter: A Cubesat for Mars System Science
3 . 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Schmitz, N., Jaumann, R., Koncz, A., Schroeder, S., Trauthan, F., Mottola, S. Hoffmann, H. Michaelis, H.; Otto, K., Sugita, S. and Perez-Prieto
2. 発表標題 The Camera of the MASCOT Asteroid Lander on Board Hayabusa 2 - Science Objectives, Imaging Sequences, and Instrument Design
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Horiuchi, M., M. Hosokawa, A. Kawashima, M. Uno, Y. Cho, S. Kameda, Y. N. Miura, S. Kasahara, S. Sugita
2. 発表標題 K-Ar Dating System for Mars Lander Missions
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Socieity Meetig (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	笠原 慧 (Kasahara Satoshi) (00550500)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	永田 晴紀 (Nagata Harunori) (40281787)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	吉岡 和夫 (Yoshioka Kazuo) (70637131)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	黒澤 耕介 (Kurosawa Kosuke) (80616433)	千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員 (32503)	
研究分担者	黒川 宏之 (Kurokawa Hiroyuki) (80713643)	東京工業大学・地球生命研究所・研究員 (12608)	
研究分担者	三浦 弥生 (Miura Yayoi) (90282730)	東京大学・地震研究所・助教 (12601)	