

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14778

研究課題名（和文）月・火星隕石のアイソクロン分析による月惑星探査用その場年代計測法の実証

研究課題名（英文）Demonstration of in situ isochron measurements of lunar and Martian rocks

研究代表者

長 勇一郎（Cho, Yuichiro）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：00737687

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、月・火星探査において岩石のカリウム・アルゴン年代を現地で計測することを目指し、一連の原理実証実験を行った。まず、異なるレーザー径や年代を持つ火星の岩石を計測したときに得られるK-Arアイソクロン（等時線）をモデル化した。その結果、40億年の年代をもつ火星の岩石に対して2億年の精度で年代を得るために必要な測定条件を見出した。また、実際に火星隕石を真空容器に入れてパルスレーザーを照射し、カリウム・アルゴン年代を計測し、既知の年代と誤差の範囲で一致する結果を得た。以上のことから、本研究で開発するレーザーアイソクロン法が火星の岩石についても適用できることを示唆する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、月・火星への着陸探査において岩石の形成年代を計測し、これらの天体の歴史を明らかにすることを目指して、レーザーを使った分析法を開発した。まずは、複数の火星隕石の鉱物マップを作成し、岩石に照射するレーザーの直径や分析精度などの条件を変えながら、火星岩石を計測した際に得られる年代データをモデル化した。その結果、40億年前に形成した火星の岩石に対して2億年の誤差で年代を測定するのに必要な条件を見出すことができた。さらに、実際に火星隕石を真空容器に入れて年代を計測したところ、本研究の新手法が既知の値を再現することがわかった。これらの結果から、本研究で開発した手法が火星で使えることが分かった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted a series of proof-of-concept experiments for in situ potassium-argon dating of rocks during lunar and Martian explorations. First, we modeled K-Ar isochrons that could be obtained from Martian rocks with different laser diameters and ages using EPMA mapping data. We found the measurement conditions necessary to obtain an age with an accuracy of 200 million years for a Martian rock with an age of 4 billion years. We also measured potassium-argon ages by actually placing Martian meteorites in a vacuum chamber and obtained results consistent with the known ages within the measurement uncertainties. These results suggest that the laser isochron method developed in this study can be applied to Martian rocks.

研究分野：惑星科学

キーワード：年代測定 レーザー誘起プラズマ発光分光法 質量分析 火星探査 月探査

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

太陽系が生まれた直後の10億年間は、巨大惑星の大移動に伴う天体重爆撃や火星温暖湿潤気候の出現といった惑星科学の重大イベントが発生したとされる時代である。それらの有無や継続期間を解明するためには、その記録をもつ月惑星表面の絶対年代を高精度で決定する必要がある。サンプルリターンを伴わない片道探査において、その場で年代が計測できれば有用である。申請者はこれまで、岩石に含まれるカリウムとアルゴンをそれぞれレーザー誘起プラズマ分光法および質量分析計によって定量し、地球の粗粒の岩石のカリウム・アルゴン(K-Ar)年代の計測可能性を実証してきた。

しかし月・火星試料のK濃度は、KREEP玄武岩などを除くと極めて低い(<1000 ppm)。従って高精度の測定は非常に困難であった。実際、申請者の過去の研究でのK計測の誤差は±500 ppm(相対誤差50%)もあり[Cho et al., 2017b]、K-Ar年代計測の最大の誤差源となっていた。また、岩石中でKが分布する相が非常に小さいことも測定を難しくしていた。細部に含まれるKを希釈せずにS/N良く検出するためには、高い空間分解能(100 μmスケール)の局所分析が必要となる。しかし、レーザースポット径を小さくすると、抽出可能なアルゴンの量がその分少なくなってしまうため、年代計測精度とレーザースポット径の間にはトレードオフが存在することが予想される。そのため、探査機搭載に向けて最適なレーザースポット径を決定するには、火星に存在する岩石の鉱物分布を考慮に入れた検討が必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、申請者が開発してきたアイソクロン法によるK-Ar年代その場計測装置を発展させ、月や火星でも活用できる年代計測技術を開発することを目指す。具体的には以下の項目の達成を目指した。

- (1) レーザープラズマ分光法によってカリウムなどの岩石構成元素を誤差10%で定量する技術を開発すること。
- (2) 現実の火星隕石の鉱物組織やカリウム濃度分布に基づいて、達成可能な年代計測精度を評価すること。
- (3) 火星隕石の年代計測実験により、測定手法を実証すること。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の5項目を中心に開発や分析を行なった。

- (1) 過去に開発した年代分析装置の分析機能拡張

これまで開発してきた装置の問題点を踏まえて、カリウムおよびアルゴンの分析性能を向上させる開発を行なった。具体的には、分光計測システムのスループット向上のための集光光学系の改良、蒸発体積の測定のための深度合成機能の追加、希ガスの前処理プロセスの改良、を行なった。

- (2) 標準試料による元素定量モデルの構築と月隕石の元素分析

上述した装置の改良と並行して、カリウムをはじめとする主要元素の定量性能を高めるため、元素分析アルゴリズムを開発した。具体的には、複数の標準試料に対してレーザーを照射してレーザー誘起プラズマの発光スペクトルのライブラリを作成し、未知試料のスペクトルをPartial Least Squares (PLS法)と呼ばれる多変量解析手法で分析するモデルを構築した。その上で、月の海由来の玄武岩(NWA479)と、高地由来のレゴリス角礫岩(NWA11474)という、月の異なる地質を代表する2通りの隕石を分析して、その測定精度を評価した。後者の月隕石については元素分析値の報告がなかったため、SEM-EDS分析を行って定量値を得た。

- (3) 火星隕石の鉱物元素マッピングに基づくK-Arアイソクロンの統計的検討

火星での分析に必要な計測条件や、原理的に達成可能な年代測定精度を検討するため、NWA1068、Zagami、NWA817の三つの火星隕石に対してEPMA(電子プローブマイクロアナライザ)分析を実施した。これにより個々の鉱物相を同定し、各相の大きさや形状、そこに含まれるカリウムの濃度を測定した。得られた鉱物組成マップをカリウム濃度マップに置き換え、様々な年代を仮定したときに蓄積される放射壊変由来の<sup>40</sup>Ar量を計算した。その上で、火星の古い火成岩に様々なビーム径のレーザーを照射して、含まれるカリウムとアルゴンを計測する状況を模擬した。ビーム径やそれぞれのデータの測定精度など、複数の測定条件を変化させてアイソクロンを作成し、年代決定精度を統計的に計算した。

#### (4) 火星隕石の K-Ar アイソクロン年代計測

シャーゴットイトに分類される火星隕石(NWA1068 隕石)を年代計測装置に導入してパルスレーザーを照射し、実際に K-Ar 年代を分析した。

### 4. 研究成果

研究方法(1)-(5)に対応する研究結果を以下に示す。

#### (1) 装置の機能拡張

第一に、複数コアバンドル式の光ファイバを導入することで光量損失の低減を行い、分光計で検出されるプラズマ由来の光量を従来約2倍にまで向上させた。さらに、ファイバー入射口に高次光カットフィルタを追加することで、カリウム輝線の周辺に出現していた二次光を抑制し、カリウム輝線の信号/バックグラウンド比を大きく向上させた。このことは、カリウムの検出限界の引き下げと高精度化に寄与する。第二に、深度合成機能付きの顕微鏡を用いた三次元測定用システムを構築した。これにより、レーザー痕の体積を計測する機能を年代計測装置に追加することができた。第三に、試料観察用カメラと光学系を改良し、低ゴースト量の試料観察系を実現した。これによって、測定点の高解像度の観察と選定が可能になった。第四に、これまでに行なってきたアルゴンの定量にとどまらず、宇宙線照射年代の計測に必要なヘリウムやネオンの計測を可能にするため、希ガス前処理手法の改良を行った。真空ラインの炭化水素系ブランクの低減のため、粗引き用にドライポンプを導入した。これに加えて、岩石から抽出されるガスの精製に用いる小型のゲッターポンプを製作した。このポンプは活性金属を焼結させたもので、惑星探査ミッションでの搭載実績を持つ物質からなる。これまで本研究では外部昇温式ゲッターポンプを用いていたが、新しく製作したポンプは焼結体内部に通電して直接ゲッター材を加熱する構造となっている。そのため、限られた電力を有効に加熱に活用しつつ、希ガスの精製を行えることが期待される。これらの希ガスのブランクレベルを定量したのち、ユークライト隕石にパルスレーザーを照射し、希ガスを抽出して分析を行った。ヘリウムおよびネオンの同位体は量が少ないことから、1000回以上のレーザー照射が必要にはなるものの、これまでカリウム・アルゴン年代を計測するために構築してきた装置に、隕石の宇宙線照射年代計測機能を追加することができた。

#### (2) 月隕石の分析

二つの月隕石に対するレーザー照射実験の結果、斑晶として海の玄武岩に含まれる鉱物の組成が推定できること、月試料の全岩組成の定量分析が可能であることが分かった。この結果は本手法によって月試料の分析が可能であることを強く示唆する。さらに、月の高地組成に近い高アルミニウム・低鉄の較正試料を複数準備することで、 $Al_2O_3 = 30 \text{ wt\%}$ を超えるような極端な組成についても確度の高い分析ができることがわかった。一方で、ふわふわの粉末試料と岩石試料のように、化学組成が同じでも物理的状態が大きく異なるような試料では、アルミ濃度が系統的に変化する傾向(物理マトリックス効果)が確認された。これを克服するために、ガラス試料のような物理的マトリックスに近い較正試料を準備する必要性が新たに示された。

#### (3) 火星隕石の鉱物元素マッピングに基づく K-Ar アイソクロンの統計的検討

40億年の年代をもつ火星の岩石に対して2億年の精度で年代を得るために必要な測定条件を見出した。火星隕石のバルクカリウム濃度は、NWA1068は0.13 wt%、NWA817は0.32 wt%(Sautter et al., 2002)などと一般に低いが、レーザースポット径500 μm、掘削深さ500 μmの条件で局所分析を行えば、それぞれ、0.06–0.94 wt%、0.13–0.97 wt%と幅広いカリウム濃度を取りうるようになった。一方、細粒の鉱物からなるZagami隕石では、バルク濃度0.17 wt%に対して0.14–0.34 wt%と他の二つに比べ狭いカリウム濃度範囲しか取らないことも分かった。隕石の鉱物分布を反映したカリウム濃度分布によるアイソクロンのシミュレーションでは、NWA817と同様の組織

を持つ岩石や NWA1068 的な岩石において、アイソクロンのデータ点のカリウム濃度幅(カリウム濃度最大とカリウム濃度最小の比)が 4 以上になるようなデータ点のセットでは 20%以下の精度で年代を決定できる可能性があるという結果を得た。Zagami 的な岩石ではそもそもカリウム濃度幅が 4 以上となりえないため、年代決定精度の統計的なばらつきが大きく、最も良いデータセットでも年代測定誤差は 20%程度になることも明らかとなった。また、EPMA から得たシミュレーションは開発中の装置によるカリウム濃度の測定結果と整合的な結果であった。以上の結果から、レーザー径 500  $\mu\text{m}$  の装置においてはアイソクロンのデータ点 15 点かつカリウム濃度とアルゴン濃度の測定精度測定精度がそれぞれ 8%以下であれば、40 億年前の火星岩石の K 年代が 2 億年の精度で求まることが分かった。この数値シミュレーションからは、火星岩石の年代決定に必要な精度を達成するための装置や鉱物組成の条件が明らかになった。

#### (4) 火星隕石の分析実験

火星隕石 NWA1068 を計測したところ、4 スポットのデータから作成した内部アイソクロン年代は  $726 \pm 132 \text{ Ma}$  と計算された。これは、すでに報告されている NWA1068 の K-Ar 年代 610 Ma と誤差の範囲で一致しており、本手法によるアイソクロン年代計測の成立性を強く示唆する結果であった。また、アイソクロンの切片として得られた値  $2.71 \pm 14.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$  は、先行研究において報告されている過剰アルゴン ( $1.32 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ , Bogard et al. 2009) と誤差の範囲で一致する。今までの測定方法では放射崩壊由来の  $^{40}\text{Ar}$  とトラップされた  $^{40}\text{Ar}$  を区別することが不可能であったが、今回の測定ではトラップされた  $^{40}\text{Ar}$  を検出できた可能性がある。このことは、測定された年代の精度向上に寄与する。以上のことから、本研究で開発するレーザーアイソクロン法が火星の岩石についても適用できることを強く示唆する結果が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ulamec Stephan, Michel Patrick, Grott Matthias et al.	4. 巻 210
2. 論文標題 Science objectives of the MMX rover	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 95 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2023.05.012	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 該当する
1. 著者名 Cho Yuichiro, Yumoto Koki, Yabe Yuna, Mori Shoki, Ogura Jo A., Yada Toru, Miyazaki Akiko, Yogata Kasumi, Hatakeda Kentaro, Nishimura Masahiro, Abe Masanao, Usui Tomohiro, Sugita Seiji	4. 巻 221
2. 論文標題 Development of a multispectral stereo-camera system comparable to Hayabusa2 optical navigation camera (ONC-T) for observing samples returned from asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 105549 ~ 105549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2022.105549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yumoto Koki, Cho Yuichiro, Kameda Shingo, Kasahara Satoshi, Sugita Seiji	4. 巻 205
2. 論文標題 In-situ measurement of hydrogen on airless planetary bodies using laser-induced breakdown spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 106696 ~ 106696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sab.2023.106696	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 Yada Toru, Abe Masanao, Okada Tatsuaki, Nakato Aiko, Yogata Kasumi, et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 214 ~ 220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-021-01550-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Cho Yuichiro, Boettger Ute, Rull Fernando, Huebers Heinz-Wilhelm, et al.	4. 巻 73
2. 論文標題 In situ science on Phobos with the Raman spectrometer for MMX (RAX): preliminary design and feasibility of Raman measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01496-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Cho Y., Morota T., Kanamaru M., Takaki N., Yumoto K., Ernst C. M., et al.	4. 巻 126
2. 論文標題 Geologic History and Crater Morphology of Asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020je006572	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 該当する

1. 著者名 Miura Yayoi N., Okuno Mamoru, Cho Yuichiro, Yoshioka Kazuo, Sugita Seiji	4. 巻 193
2. 論文標題 Ne-Ar separation using a permeable membrane to measure Ne isotopes for future planetary explorations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 105046 ~ 105046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2020.105046	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 Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S., Sawada H., Tatsumi E., Yamada M., Honda C., Yokota Y., et al.	4. 巻 364
2. 論文標題 The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw0422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Barucci M. A., Hasselmann P. H., Fulchignoni M., Honda R., Yokota Y., Sugita S., Kitazato K., et al.	4. 巻 629
2. 論文標題 Multivariable statistical analysis of spectrophotometry and spectra of (162173) Ryugu as observed by JAXA Hayabusa2 mission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A13 ~ A13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201935851	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 該当する

[学会発表] 計10件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Hikaru Hyuga, Yuichiro Cho, Yayoi N. Miura, Haruhisa Tabata, Koki Yumoto, Seiji Sugita
2. 発表標題 Simulating K-Ar isochron ages of Martian meteorites with EPMA mapping
3. 学会等名 JpGU 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuichiro Cho
2. 発表標題 Laser-induced breakdown spectroscopy for space exploration
3. 学会等名 LSSE 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長 勇一郎ほか
2. 発表標題 月面サンプルリターンのためのその場探査装置の開発
3. 学会等名 第23回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長 勇一郎ほか
2. 発表標題 月面サンプルリターン探査に向けたその場物質分析装置の開発
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日向 輝ほか
2. 発表標題 レーザ 局所分析法による火星隕石のK-Ar年代測定
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三浦 弥生
2. 発表標題 Development of a method to separate Ne from Ar using a polyimide sheet for future planetary missions
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長 勇一郎, 湯本航生, 小倉暁乃丞, 臼井寛裕, Ute Boettger, Conor Ryan, Maximilian Buder, Till Hagelschuer, Selene Routley, Enrico Dietz, Emanuel Kopp, Heinz-W. Huebers, Andoni Moral, Fernando Rull
2. 発表標題 MMX ローバ搭載用ラマン分光計 RAX の エンジニアリングモデル開発状況
3. 学会等名 日本惑星科学会 秋季講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 長 勇一郎、亀田真吾、湯本航生、臼井寛裕、Conor Ryan、Till Hagelschuer、Roderick Vance、Maximilian Buder、Ute Boettger、Heniz-Whilhelm Huebers、Andoni Moral、Fernando Rull、
2. 発表標題 火星衛星探査計画ローバに搭載するラマン分光装置(RAX)の開発
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯本 航生、長 勇一郎、亀田 真吾、小倉 暁乃丞、山本 直輝、笠原 慧、臼井 寛裕、杉田 精司
2. 発表標題 月極域探査に向けたLIBS装置の開発
3. 学会等名 第20回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長 勇一郎、湯本 航生、亀田 真吾、臼井 寛裕、小川 和律、館野 直樹、Ryan Conor、Till Hagelschuer、Maximilian Buder、Rod Vance、Ute Boettger、Heinz-Whilhelm Huebers、Andoni Moral、Fernando Rull
2. 発表標題 MMXローバ用ラマン分光計(RAX)の開発
3. 学会等名 第20回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2020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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	ドイツ航空宇宙センター			
スペイン	スペイン国立航空宇宙技術研究所			