

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247092

研究課題名 (和文) 惑星表面その場年代計測装置の開発

研究課題名 (英文) Basic Development of an in-situ Age Measurement System for Planetary Surfaces

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) 32,100,000 円

研究成果の概要 (和文)：本研究では、将来の火星着陸探査機に搭載するためにK-Ar計測装置の基礎開発を行った。具体的には、飛行時間型質量分析装置、集光光学系を含むパルスレーザー部、分光計測部、岩石試料操作機構を含むレーザー照射チェンバーを製作し、システム全体の性能評価と運用方法の開発を行った。研究の結果、本研究計画で基礎開発してK-Ar年代計測システムは、基本的なスペックとして、日本が打上げを検討しているサイズのローバーへ搭載できる寸法や重量に収められて且つ十分な耐振動衝撃性能を持つ装置を組み上げることが可能であることが確認できた。

研究成果の概要 (英文)：In this study, we conducted basic development of K-Ar age measurement system for future Mars lander. We developed time-of-flight mass spectrometer, pulse laser unit including optics, spectrometer unit, laser irradiation unit including rock sample handing system, and operation protocols for the entire system. In particular we conducted a field test in Izu Island with a test rover unit and our K-Ar measurement system. The results of our research strongly suggest that the basic specifications of our K-Ar measurement system can meet the requirements for size, weight, shock, and vibration for a rover that Japanese science community is planning for near-future Mars missions.

研究分野：惑星化学

キーワード：惑星探査 年代計測 アイソクロン法 K-Ar年代 衛星搭載装置開発

### 1. 研究開始当初の背景

従来の固体惑星探査は、電磁波物理観測による遠隔観測法 (or リモセン観測) によって大きく発展し、探査対象は太陽系の隅々にまで至った。しかし同時に、この観測手法の限界も露呈したことも事実である。リモセン観測では、野外地質調査の現地観察レベルの分析 (層序や岩相の観察、主要鉱物推定) しかできない。これでも多くの情報は得られるが、地球の野外調査で考えれば、従来の固体惑星探査は巡検のみを行ってラボでの精密分析を行わない状況に等しい。これでは、惑星地質学が地球地質学の成熟度に追いつくことは決してない。この問題の打破には試料回収探査が最も有効だが、微小重力天体以外では試料回収探査には巨額の費用が必要で、実現は容易でない。そのため、近い将来に期待されるのは、着陸機による惑星表面のその場高精度分析である。実際、月・火星を始め多くの惑星について、国の内外で着陸探査が盛んに検討・実施されつつある。

ここで重要な点は、どんな分析装置でどんな計測を行うかである。物質科学的観点から見て最も有効性の高い計測の一つは、質量分析装置による同位体計測である。その中でも年代計測の価値は特に高い。各種観測量に絶対時間軸を与えることで地質記録の解釈の正確性がどれほど増しうるかには、議論の余地はない。

だが、自動制御で年代計測できる機器を製作して惑星着陸機に搭載させることは、技術的に非常に大きな困難な課題である。実際、日本ではその開発検討はほとんど行われてこなかったし、欧米でも実際に計測に成功した事例は未だにない。

こうした中、研究代表者ら (杉田と三浦) は 10 年ほど前より、パルスレーザー、分光器、質量分析器を組み合わせるアイソクロン法による K-Ar 年代計測を自動的に行う装置の基礎開発に取り組んできた。その成果として、10~20% 程度の精度のアイソクロン年代が得られる可能性を示す実験結果を得るに至った。地球で行われている年代計測の精度と比べれば非常に低いレベルだが、ファクターで 2 倍程度ある惑星の表面年代の不確実性を 1 桁近くも引き下げるインパクトを持っている。また、重要な点は、実験に使用した要素技術の全てが惑星探査で用いられた実績を持つことである。例えば、レーザーや分光計は、日本の月周回衛星かぐやに搭載された装置のスペック以下のものであり、質量分析器も NASA の火星着陸機 Phoenix 搭載の四重

極質量計(QMS)以下の性能である。

### 2. 研究の目的

しかし、室内実験装置製作と衛星搭載装置製作には大きな技術上の隔りがある。現状では、フライト品の開発予算が得られても衛星搭載に必要な耐環境性能と科学観測に必要な計測性能を兼ね備えた装置を確実に製作できる状況ではない。これでは、巨額のフライト品開発の予算を得ることはできないし、この装置を当てにした探査計画も実現し得ない。そこで本研究計画では、惑星着陸機に搭載可能な小型軽量の質量分析装置の開発と小型堅牢な民生レーザー装置の改良を行い、それらを実際のローバー試作車への搭載実験を行うことを目的として研究を行うこととした。

### 3. 研究の方法

#### (1) リフレクトロン:

その場 K-Ar 年代測定の質量分析部に使用できる TOF-MS (Time-Of-Flight Mass Spectrometer: 飛行時間型質量分析器) の開発を実施した。本研究で開発した TOF-MS には将来のフライト品を想定して、重量・サイズ・電力に制約を課し、その条件下で Ar 同位体計測を達成するように TOF-MS を設計した。イオンを反射させる二段リフレクター方式の TOF-MS を採用し、テストモデルを試作・試験することでその性能を把握し、今後フライト品の製作までに必要となる開発項目についての貴重な情報を得た。

図 1 (上) に今回試作、試験を行った、1 段加速 2 段リフレクター型の原理図を示す。今回は、この測定原理を持つ、全長 200mm、直径 100mm 程度の小型の TOF-MS を開発した。イオン源でイオン化された中性粒子は、図 1 (上) の左端の Acceleration Region に入射する。Acceleration Region には、パルス高圧を印加することで、入射したイオンを図 1 (上) の右方向に加速する。加速されたイオンは、Drift Tube と示された部分を飛行し、図 1 (上) 右側の Reflector 部分で反射され、再び Drift Tube を飛行した後、Detector で検出される。パルス高圧を印加したタイミングと、Detector でイオンを検出したタイミングの時間差を測定することで、イオンの飛行時間からイオンの質量を求めることができる。装置の具体的な寸法は計算機シミュレーションによって設計したが、寸法と電極に印加する電圧を最適化した他、Drift Tube の電位を負の高圧にすることでパルス高圧を高い繰り返し周波数で印加する方式を採用した。

設計したリフレクトロンの動作と性能を確認するためにリフレクトロンの試験モデルを製作した。製作した試験モデルの写真を図1(下)に示す。

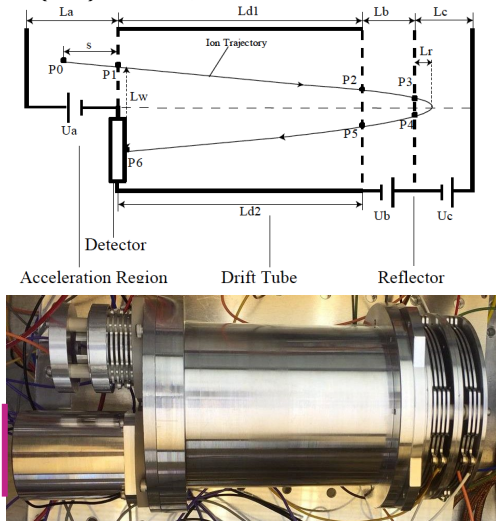


図1(上)1段加速2段リフレクタ型の装置の構成図。左からイオンの加速領域、自由飛行区間、反射領域を示す。(下)リフレクトロン試験モデルの外観。イオンの入射位置手前の電極を接地し、押し出し電極の印加電圧を抑える設計にしている。

さらに製作したリフレクトロン試験モデルの動作と性能を確認するため、試験モデルを真空チャンバー内に設置し、残留ガスのマススペクトルを取得した。試験モデルでは、リングング(パルス高圧信号の反射)をできるだけ抑えるため、チャンバーの外に用意したパルス高圧電源と真空フィードスルーを高圧同軸ケーブルで接続して、真空チャンバー内部も高圧同軸ケーブルを用いて、押し出し電極に配線した。検出器の信号線や他の高圧線については、チャンバー外は同軸ケーブルを用い、チャンバー内部は単線のケーブルを用いた。この残留ガス計測で用いた配線とTOF計測の概念図を図2に示す。

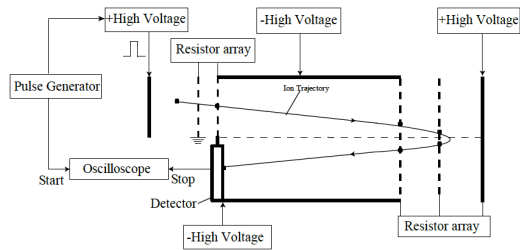


図2 試験モデルの配線と TOF 計測の概念図。パルス発生器のコントロール信号をスタート信号とする。押し出されたイオンは抵抗分割された電極により加速され、自由飛行区間を飛行し、リフレクタで反射され検出器に到達する。この信号をオシロスコープでストップ時刻として計測する。

(2) 小型ゲッター (SAES ST-175) 性能試験

SAES ST175 (図3) は、NASA の Curiosity 探査車にも搭載された省電力・小型のゲッターで、実験室での希ガス同位体分析において一般的に用いられるゲッターに比べて電力やサイズは数分の1以下である。ST175 に流す電流を 3A および 0A に設定して、 $\sim 3 \times 10^{-3}$  Torr ( $8 \times 10^{-4}$  cmSTP) の大気を精製できるか、および脱ガス量の確認試験を行った。



図3 . 小型ゲッター (SAES ST-175)

(3) メタルシールの性能試験 : サンリーメス I の 0233BS と 0350CS (SUS301 に銀メッキ) を特注した真空槽の溝にセットして締め付けトルクを上げていき、真空が保たれるようになる締め付けトルクを調べた。さらに、この時の Ar リーク量が検出限界以下であることを確認した。シール直径は ID と OD の平均値を使用 (0233BS = 20.9 mm, 0350CS = 31.4 mm)。2つのシールの線長比は、1.50、面積比は、2.26 である。

(4) LIBS 部の開発 : 室内実験で LIBS に用いられる従来のパルスレーザーは 1m 程度の非常に大型なものであり、このままローバ試作車に搭載することはできないため、小型軽量のレーザー (Kigre 社 AO1010) を選定して LIBS 部の試作を行った。多くのパルスレーザーには 1kV 程度の高圧電源が用いられるため、火星表面気圧では放電が起き、故障につながると考えられる。AO1010 は 85V の高周波電源を用いることでこの問題を回避できている。

(5) 伊豆大島での野外実験 : 本装置を使って、実験室内で K と Ar の検出に成功し、実際の取り付け確認による搭載能力の事前確認を経て、2016 年 11 月に伊豆大島裏砂漠において、フィールド実験を実施した。

4 . 研究成果

(1) リフレクトロン :

図4には、試験モデルで得られた真空チャンバー中の残留ガスの TOF マススペクトルと、真空チャンバーに Ar ガスを導入した時の 1.8us - 4.0us 間の TOF マススペクトルを示す。この性能試験で得られたマススペクトルの形状はシミュレーションで求めたものより、時間方向に幅を持つことが判った。これは、一つには押し出し電極に印加するパルス高

圧の立ち上がり時間が長いことによりと考えられる。このスペクトル幅の広がり、パルス高圧のモジュールと押し出し電極とを短距離で接続し、かつインピーダンスマッチングを正しくとることで、改善されると考えられる。また、もう一つの理由は、検出器のストップ信号の記録方法に起因する。ストップ信号はオシロスコープのヒストグラム機能を用いて記録したため、信号に含まれるリングング波形もストップ信号として記録してしまう。その結果、本来であればストップ信号の最初の立ち下がりだけを検出するべきであるが、これに加えて、最初の信号に続くリングング波形の立ち下がりも検出してしまい、長い飛行時間の信号も記録してしまっていた。これについては、ストップ信号の最初の立ち下がりだけを検出できるような計測方法を用いることで解決することができると明らかにすることができた。

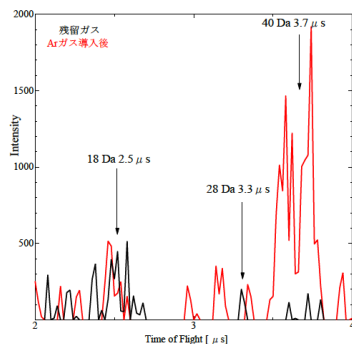


図4 . リフレクトロンを最適値に設定して得られた真空チャンバーの残留ガスの質量スペクトル(黒線)と Ar 導入後の質量スペクトル(赤線)。計測時間はそれぞれ 10 分間である。2.5s 付近のピークは H<sub>2</sub>O(18Da)、3.3s 付近のピークは N<sub>2</sub> と CO (28Da)、3.7s 付近のピークは Ar (40Da) (いずれも 1 価イオン)を表す。

(2) 小型ゲッター(SAES ST-175) 性能試験:  
試験の結果、どちらの電流値の場合でも大気の高純度は特に問題はなく行われた。<sup>40</sup>Ar の脱ガス量は、3A でのプレ脱ガスでは通常より 1 桁程度高かったが、7A-15 分のプレ脱ガスを行うと半減して  $8 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ STP } (^{40}\text{Ar})$  となり実用レベルとなった。3A (~400 )および 7A (~600 )の時の電力は、3.8W および 27W である (実験室で使用しているゲッターでは~100W)。

(3) メタルシールの性能試験 :

本研究計画の試験では、フランジの両側を M3 ネジ 6 本で均等に締めていった。ネジのトルクを次の値まで上げると真空シールが可能となった : 0233BS では 4.0 N m、0350CS では 8.0 N m。軸力に換算すると、~5 kN (0.77 kN/cm) および ~10 kN (1.0 kN/cm) となる。すなわち、直径約 2 cm の真空槽をサンリーメスを用いてシールする場合は、5 kN の軸力が

必要であることが分かった。

振動試験および複数回使用のためのくり返し試験等を行えば、探査機搭載装置で使用に必要な性能確認が得られる目処が立った。

(4) LIBS 部の開発 : Curiosity に搭載されたレーザーより強度の点では劣るが十分な定量精度で K 濃度を測定できることを実験的に実証した[Cho et al., 2015]。このレーザーを利用して小型の探査ローバに搭載可能な K-Ar 年代測定装置を試作した (図 5)。これまでに K-Ar 年代測定に使われている実験系は数 m 立方の大きさであったが、本試作機では外寸 650x450x300mm 程度以下となっており (一般的な宅急便でも搬送できる大きさであり)、慶應大学工学部石上研が開発中の小型ローバに搭載できる大きさ、質量に収めることができた。

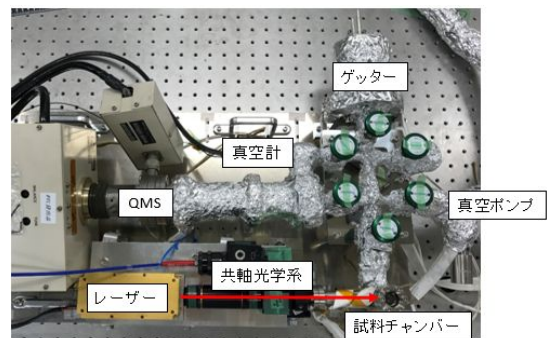


図 5 . 小型 K-Ar 年代測定装置試作機

(5) 伊豆大島での野外実験 :

実験結果、上記の実験システムを用いて K と Ar の同時検出に成功した (図 6)。しかし、本機は小型ローバの積載可能制限には収まっているものの、駆動性能を低下させる程度の質量になっており、今後はさらなる小型軽量化を目指す。具体的には、小型排気システムの導入、小型質量分析器の導入などが挙げられる。

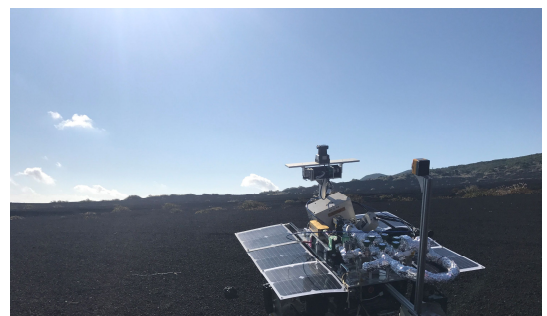


図 6 . 伊豆大島フィールド試験中の小型ローバと K-Ar 年代測定装置試作機

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 26 件)(全て査読有)

1. 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, doi:10.2322/tastj.14.Pk\_89.
2. Saito, Y., S. Yokota, K. Asamura, and A. Krieger (2017), High-speed MCP anodes for high time resolution low-energy charged particle spectrometers, *J. Geophys. Res.*, 122, 1816 – 1830, doi: 10.1002/2016JA023157.
  3. Sawada, H., R. Okazaki, S. Tachibana, K. Sakamoto, Y. Takano, C. Okamoto, H. Yano, Y. N. Miura, M. Abe, S. Hasegawa, T. Noguchi and Hayabusa2 SMP Team (2017) Hayabusa2 sampler: Collection of asteroidal surface material, *Space Science Review*, DOI:10.1007/s11214-017-0338-8.
  4. 三浦弥生 (2017) エポ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, *日本惑星科学会誌遊星人*, 26, 15-20, 2017.
  5. Jaumann, R., 25 coauthors S. Sugita, T. Okada, M. Yoshikawa, H. Yabuta, The Camera of the MASCOT Asteroid Lander on Board Hayabusa 2, *Space Science Review*, DOI 10.1007/s11214-016-0263-2, pp. 1 – 26.
  6. Sekine, T., 8 coauthors, S. Sugita, T. Matsui, R. Kodama (2016), Shock compression response of forsterite above 250 GPa, *Science Advances*, 2, e1600157.
  7. Cho, Y., S. Sugita, Y. N. Miura, R. Okazaki, N. Iwata, T. Morota, and S. Kameda (2016), An in-situ K–Ar isochron dating method for planetary landers using a spot-by-spot laser-ablation technique. *Planet. Sp. Sci.*, 128, 14 - 29. DOI: 10.1016/j.pss.2016.05.004.
  8. Hong, P. K., H. Miyamoto, T. Niihara, S. Sugita, K. Nagata, J. M. Dohm, M. Okada (2016), Deconvolution of reflectance spectra of synthetic clinopyroxene using the exchange Monte Carlo method, *J. Geol. Geophys.*, 5, 243, pp. 1-15, DOI:10.4172/2381-8719.1000243.
  9. Miyamoto, H., 4 coauthors and S. Sugita (2016), Cluster analysis on the bulk elemental compositions of Antarctic stony meteorites, *Meteo. Planet. Sci.*, 906-919, doi: 10.1111/maps.12634.
  10. 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.
  11. Okazaki, R., H. Sawada, S. Yamanouchi, S. Tachibana, Y. N. Miura, K. Sakamoto, Y. Takano, M. Abe, S. Itoh, K. Yamada, H. Yabuta, C. Okamoto, H. Yano, T. Noguchi, T. Nakamura and K. Nagao (2016) Hayabusa2 sample catcher and container: Metal-seal system for vacuum encapsulation of returned samples with volatiles and organic compounds recovered from C-type asteroid Ryugu, *Sp. Sci. Rev.*, DOI:10.1007/s11214-016-0289-5.
  12. Osawa, T., M. Kobayashi, T. Konno, M. Egashira, R. Okazaki, Y. N. Miura and K. Nagao (2014) Temperature control system for laser heating: Application for minute asteroidal materials, *Measurement*, 50, 229-235.
  13. 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
  14. Kurosawa, 4 coauthors, S. Sugita, and T. Matsui (2015), Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging, *J. Geophys. Res.*, 120, 1237–1251. DOI: 10.1002/2014JE004730
  15. 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
  16. Cho, Y., S. Sugita, S. Kameda, Y. N. Miura, and 7 coauthors (2015), High-precision potassium measurements using laser-induced breakdown spectroscopy under high vacuum conditions for in situ K–Ar dating of planetary surfaces, *Spectrochim. Acta Part B*, 106, 28-35.
  17. Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, T. Morota, and 8 coauthors (2015), The relative timing of Lunar Magma Ocean solidification and the Late Heavy Bombardment inferred from highly degraded impact basin structures, *Icarus*, 250, 492–503. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.12.025
  18. Kadono, T., A. I. Suzuki, K. Wada, N. K. Mitani, S. Yamamoto, M. Arakawa, S. Sugita, J. Haruyama, A. M. Nakamura (2015), Crater-ray formation by impact-induced ejecta particles, *Icarus*, 250, 215-221. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.11.030
  19. Kuroda, D., M. Ishiguro, N. Takato, S. Hasegawa, M. Abe, Y. Tsuda, S. Sugita, and 8 coauthors (2014), Visible-wavelength spectroscopy of subkilometer-sized near-Earth asteroids with a low delta-v, *Pub. Astron. Soc. Japn.*, 66, 51.
  20. Tachibana, S., M. Abe, M. Arakawa, M. Fujimoro, Y. Iijima, M. Ishiguro, K. Kitazato, N. Koyayashi, N. Namiki, T. Okada, R. Okazaki, H. Sawada, S. Sugita, 5 coauthors and Hayabusa2 Project Team (2014), Hayabusa2: Scientific importance of samples returned from C-type near-Earth asteroid (162173) 1999 JU<sub>3</sub>, *Geochem. J.*, 48, 571-587.
  21. Sekine, Y., H. Genda, Y. Muto, S. Sugita, T.

- Kadono, T. Matsui (2014), Impact chemistry of methanol: Implications for volatile evolution on icy satellites and dwarf planets, and cometary delivery to the Moon, *Icarus*, 243, 39-47, doi: 10.1016/j.icarus.2014.08.034.
22. Ohno, S., K. Ishibashi, T. Sekine, K. Kurosawa, T. Kobayashi, S. Sugita, and T. Matsui (2014), Gas recovery experiments to determine the degree of shock-induced devolatilization of calcite, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 500, Part 6, 062001.
23. Ohno, S. 10 coauthors and S. Sugita (2014), Production of sulphate-rich vapour during the Chicxulub impact and implications for ocean acidification, *Nature Geoscience*, 7, 279-282, doi:10.1038/ngeo2095
24. 洪鵬, 関根康人, 杉田精司 (2016), 還元的な惑星大気における有機物エアロゾルの成長過程に関する実験的研究, *エアロゾル研究*, 31(3) 185-191, doi: 10.11203/jar.31.1
25. 杉田精司, 桑原秀治, 黒澤耕介 2015, 超高速衝突実験が明らかにした衝突蒸発現象・化学反応過程, *日本惑星科学会誌 遊星人*, 24, 182-191.
26. 永田賢二, 杉田精司, 佐々木岳彦, 岡田真人 (2014), 実験データからピークの数と推定するには?—スペクトル分解とベイズ統計—, *物理学会誌*, 69 (12), 876 – 880.
- [学会発表] (計 9 件)
1. Saito, Y. and S. Yokota, Low Energy Charged Particle Spectrometers for High Time Resolution Measurements, Measurement Techniques in Solar and Space Physics, April 20-24 2015, NCAR Center Green Campus, Boulder, CO, USA.
2. Saito, Y. and S. Yokota, Low Energy Charged Particle Spectrometers for High Time Resolution Measurements, AOGS 2015, August, 2-7, Singapore.
3. Sugita, S. and H. Kuwaraha (2015), Impact-induced methane formation on early Mars and Earth, *Goldschmidt*, Prague, Czech Republic, Aug. 16-21.
4. Cho, Y., S. Kameda, Y. N. Miura, Y. Saito, S. Yokota, S. Kasahara, R. Okazaki, K. Yoshioka, K. Shibasaki, T. Oishi, M. Umeyama, S. Sugita, An In-situ Dating Instrument Package for a Future Mars Rover Mission, *30<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science*, July 9, 2015, 兵庫県神戸市 Kobe Convention Center.
5. Miura, Y. N., Y. Cho, T. Morota, H. Miyamoto, T. Usui, S. Kameda, S. Sugita and R. Okazaki (2015), Possible landing sites on Mars for an in-situ K-Ar dating by future Japan's Mars rover mission, *JpGU*, 2015.5.28, 千葉県千葉市 幕張メッセ
6. Cho, Y., M. Horiuchi, K. Shibasaki, S. Kameda, K. Wada, T. Nakamura, T. Mikouchi, Y. Miura, R. Okazaki, K. Ishibashi, K. Yoshioka, S. Sugita, A laser-induced breakdown spectroscopy instrument for elemental analyses on Phobos, *Phobos, Deimos, and Mars Workshop*, February 15th – 16th, 2016, ELSI Hall, ELSI-1 Building, 東京工業大学 東京都目黒区, Poster presentation.
7. Sugita, S., M. Yamada, H. Sawada, S. Kameda, 10 coauthors, and ONC Team (2016), Earth-Moon imaging with HAYABUSA2 Optical Navigation Camera (ONC) during the Earth Swing-by, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXVII*, Houston, TX, USA, March 21-25, #2826, pp.1-2.
8. T. Kouyama, 6 coauthors, S. Kameda, H. Sawada, H. Suzuki, R. Honda, T. Morota, C. Honda, K. Ogawa, and S. Sugita (2016), Lunar Calibration for Planetary Explorers using SELENE/SP Lunar Reflectance Model, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXVII*, Houston, TX, USA, March 21-25, #1723, pp.1-2.
9. Doan, D., E. Tatsumi and S. Sugita (2016), An experimental investigation on the yield of Hayabusa2 sampler system using different grain-size distribution”, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXVII*, Houston, TX, USA, March 21-25, #2420, pp.1-2.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
杉田 精司 (SUGITA, SEIJI)  
東京大学・理学系研究科・教授  
研究者番号：80313203
- (2) 研究分担者  
笠原 慧 (KASAHARA, SATOSHI)  
東京大学・理学系研究科・准教授  
研究者番号：00550500  
齋藤 義文 (SAITO, YOSHIFUMI)  
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授  
研究者番号：30260011  
亀田 真吾 (KAMEDA, SHINGO)  
立教大学・理学部・准教授  
研究者番号：30455464  
三浦 弥生 (MIURA, YAYOI)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号：90282730
- (3) 連携研究者  
諸田 智克 (MOROTA, TOMOKATSU)  
名古屋大学・環境学研究所・講師  
研究者番号：30415898  
岡崎 隆司 (OKAZAKI, RYUJI)  
九州大学・理学研究科・助教  
研究者番号：40372750  
長 勇 一 郎 (CHO, YUICHIRO)  
米国航空宇宙局マーシャル飛行センター  
研究者番号：00737687