

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01264

研究課題名(和文) 太陽系天体着陸探査における元素・同位体分析に向けた計測システムの構築

研究課題名(英文) Development of the measurement system for the mass analyses in future solar system landing missions

研究代表者

笠原 慧 (Kasahara, Satoshi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：00550500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：惑星の起源と進化を探るうえで、惑星の元素組成や同位体比は極めて重要な情報である。このため、惑星探査において元素分析は最重要観測項目の一つとなっている。ところが、固体物質の「その場・多点」質量分析は、複雑な機構のロボティックアームの実装が想定されるなど、工学的ハードルの高さゆえに日本の探査機での実施が困難であった。そこで本研究では、将来の惑星着陸探査に向け、複雑なサンプルハンドリング機構無しで固体物質の元素分析が可能な、シンプルで小型軽量の質量分析システムの基礎開発を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、宇宙機搭載用の質量分析システムの構築に取り組んだ。特に、真空バルブや真空ポンプといったサンプル分析に欠かせない要素については、宇宙機に搭載可能なコンポーネントの開発がこれまで国内では遅れており、実現性の見通しが立ちづらい状況であった。したがって本研究開発を通じて得られた技術的知見は、今後の着陸探査をはじめとする幅広い太陽系探査の可能性を広げるものである。

研究成果の概要(英文)：Elemental abundances and isotope ratios of planetary materials provide us with important information on the origin and evolution of solar system. Mass spectroscopy plays, therefore, a key role in planetary explorations. However, in-situ multipoint measurements of solid samples is challenging because of the technical hurdle of realizing complicated sampling systems. Here we performed a preliminary development of a simple mass spectroscopy system for the elementary analyses of solid samples, which will work without a complex handling systems. This study paved the way for future landing mission on solar system bodies.

研究分野：宇宙惑星探査

キーワード：太陽系探査

1. 研究開始当初の背景

惑星の起源と進化を実証的に解明するうえで、惑星を形成する固体物質の元素分析は極めて重要な情報をもたらす。惑星を構成する物質が原始太陽系においてどのタイミングで、どのように供給されたのか、そして、惑星を包む大気がどのように獲得され、さらにどこに散逸あるいは集積したのか、といった課題については、多くの研究が固体物質あるいは大気元素組成・同位体比をベースに議論を組み立てている。しかしながら、これまでの限られたデータでは、異なる元素の分析結果がそれぞれ相反するモデルを支持するなどの矛盾も多いことから、今後の直接探査の意義は増している。具体例は枚挙に暇がないが、一例としては、火星に取り込まれた希ガスの起源の問題がある。火星隕石の Ne 同位体比分析からは、原始惑星系円盤が起源である事を示唆する結果 (Swindle+, 1986; Wiens+, 1986; Pepin, 1991) と、小天体由来を示唆する結果 (Garrison&Bogard, 1998; Park&Nagao, 2006) がどちらも得られており、決着がつけられずにいる。この問題が未解決である最大の要因は、火星隕石が地球に飛来する際の汚染であり、火星に着陸して物質分析をしない限り、決着は困難である。

惑星探査における物質分析の一つのアプローチとしてサンプルリターンがあるが、これには採取地点が限られるという重大な制約がある。リスクを乗り越えデータを持ち帰っても、その一点のサンプルデータが天体全体を代表する物であるといえる根拠が不十分であると、理論を進めるアンカーポイントとしてのインパクトが限定的になってしまう。このため、サンプルリターンと並行して、「その場・多地点」の物質分析が極めて重要となる。特に、惑星・衛星の固体表面においてレーザアブレーションなどによりサンプルをガス化し、質量分析することができれば、大きなインパクトを持つデータが多く得られることになる。

「その場」サンプル分析に際しては通常、高度なロボティックアームを用いてサンプルをホールドし、分析室にセットするような手法が想定される。しかしながら、サンプルをその場で分析室にセットするようなロボティックアームの場合、はやぶさ・はやぶさ2に搭載されたサンプルホーンなどに比べると可動部の数や可動範囲が格段に多くなることは避けられず、技術的リスクが格段に高くなる。また、サンプルセット後の真空封止も実績がない。さらには、こうした工学的チャレンジを宇宙空間で実施する機会が実質的にほとんど得難いという宇宙科学推進体制上の問題がある。原理実証の機会すら得ることが難しいために、技術的な検討が具体的に進まず、したがっていつまでも技術の検証ができない、というジレンマは、研究者コミュニティによるボトムアップの探査創出を阻んでいる最大の要因といっても過言ではない。そこで本研究では、複雑なロボティックアームを使わずに、固体物質の質量分析を実施する革新的なシステムを開発することとした。

2. 研究の目的

本研究では、惑星表面における揮発性物質に富む岩石の元素・同位体分析を将来目標とし、それに必要な「その場」質量分析に高い実現性をもたせるため、複雑なハンドリング機構なしでサンプルガスを分析器に導入する、新しいシステムを検討する。具体的には、計測対象の固体物質に質量分析器を近づけて準閉鎖空間(密閉する必要はない)を確保したうえで、対象にレーザを断続的に照射して蒸発ガスを充満させた状態でリークバルブを調整し、ガスを分析器内に導入する方式を念頭に置く。レーザ照射による掘削量・脱ガス量は調整可能であるが、関連する先行研究での典型的な掘削量は $100 \mu\text{g}$ であり、例えば $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 3\text{cm}$ の準閉鎖空間に換算すると脱ガス分の圧力は 1000 Pa 以上に相当するため、火星地表($\sim 750\text{Pa}$)では十分なサンプルガス導入が期待できる。月をはじめとする他の小天体でも、同様に計測が可能と考えられる。これまで着陸探査での質量分析には、複雑なロボティックアームを用いた「サンプル採取」→「サンプル室への輸送」→「サンプル台への設置・固定」→「サンプル台の密閉、真空引き」といったハードルの高い一連の技術的要素が想定され、それが探査計画の検討推進を阻害する高い壁となっていた。上記の手法でこの壁がクリアされれば、探査の実現性が飛躍的に増大し、後述する超小型探査機なども含めて惑星・衛星への多様なアプローチが可能になる(なお、表層の凹凸や表面を覆うダストの存在を考慮すると、計測対象固体面に対する前処理としてドリリング・グライディングは必要であろうが、それはサンプルハンドリング機構を省略できるメリットを損なうものではない)。本研究では、複雑なハンドリング機構なしでサンプルガスを分析器に導入するシステムの構築に向けて、宇宙機搭載可能なサイズ・電力でのリークバルブ制御、真空ポンプ制御、レーザ照射の各要素技術の確立を目指した。

3. 研究の方法

リークバルブ制御試験

これまでに申請者らが実施してきた質量分析は電離圏から磁気圏といった超高真空下での観測であったが、火星着陸探査を想定するとき大きく異なるのが、周囲の大気存在である。質量分析器の検出素子周囲は、ポンプを取り付けて超高真空を確保する必要がある。一方で、分析器

の入射部は、サンプルガスを適切な量だけ導入するために、バルブ開閉が必要となる。探査機上でこのバルブ開閉を実施するため、まずは真空計をモニタしつつ、リークバルブの開閉を制御するシステムを構築する。ここで、バルブは宇宙機搭載可能なスペックのコンポーネントを選定し、その動作を確認する。

真空ポンプ制御試験

火星やタイタンのような大気を持つ天体の着陸探査では、質量分析器を大気中で動作させるために真空引きが必要となる。この技術を習得するため、宇宙機搭載が可能なスペックの真空ポンプを選定し、質量分析器と結合したうえで試験を実施し、質量スペクトルを取得する。

レーザー照射試験

固体サンプルから脱ガスさせるためのレーザー照射手法を確立する。特に、レーザーとしては宇宙機搭載が容易になるよう低消費電力のコンポーネントを選定し、それでもサンプル掘削に十分なエネルギーが得られることを目標とする。

4. 研究成果

リークバルブ制御試験

宇宙機搭載可能な真空バルブ(図1)を選定したうえで、機械的インターフェイス(取り付け構造)及び制御に必要なドライバと制御プログラム(図2)を準備して動作試験を実施し、実効的なコンダクタンス等の特性を調べた(図3)。

バルブのインレットをオープンにして、バルブが開いた際には大気が流入するようにしたうえで、バルブを一定時間(7ms, 20ms, 45ms, 100ms)だけ開けた際の真空度の時間変化を計測した(図4)。このデータからバルブを開いた時のコンダクタンスを計算したところ、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と求まった。今後、探査機搭載を意識した詳細な配管設計・バルブ動作計画を行う際には、このコンダクタンスの値が重要な制約を与える。

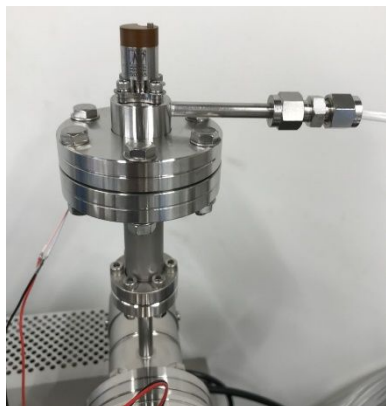


図1: Mindrum社製真空バルブ。



図2: バルブの制御系。駆動回路(下段)を、Raspberry Pi(上段)上のプログラムで制御する。

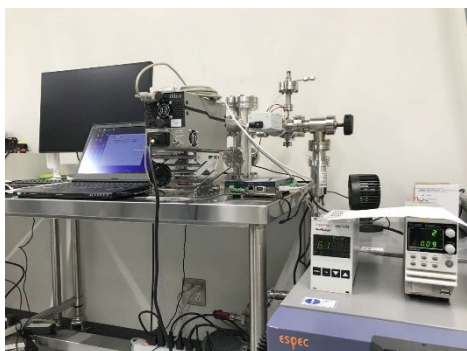


図3: 試験のセットアップ。

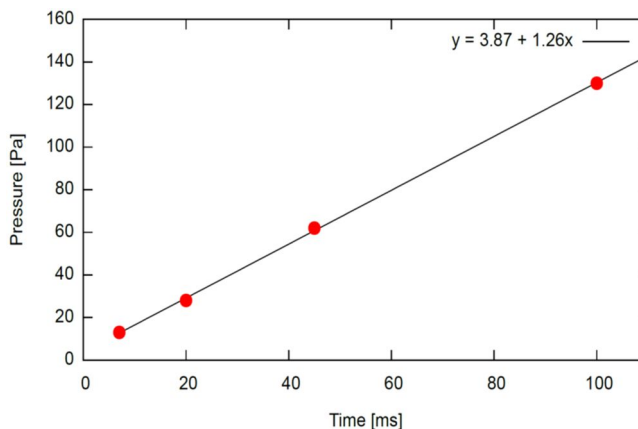


図4: バルブ開放による圧力上昇の時間依存。

真空ポンプ制御試験

宇宙機搭載可能な小型真空ポンプを選定し、それに合わせて用意した機械的インターフェイスに取り付けて動作させ、 5×10^{-4} Pa 以下の真空を達成できることを確かめた（構成は図3）。さらに、その真空下で質量スペクトルを取得し、「真空引き・ガス導入・ガス分析」という一連の作業を確立した。図5は、 N_2 ガス導入前（バルブ閉）と N_2 ガス導入後（バルブ開）の質量スペクトルを示す。バルブを開けたときに質量・電荷比 28 (N_2^+), 14 (N_2^{++} , N^+) のピークが1桁程度高くなっていることがわかる。

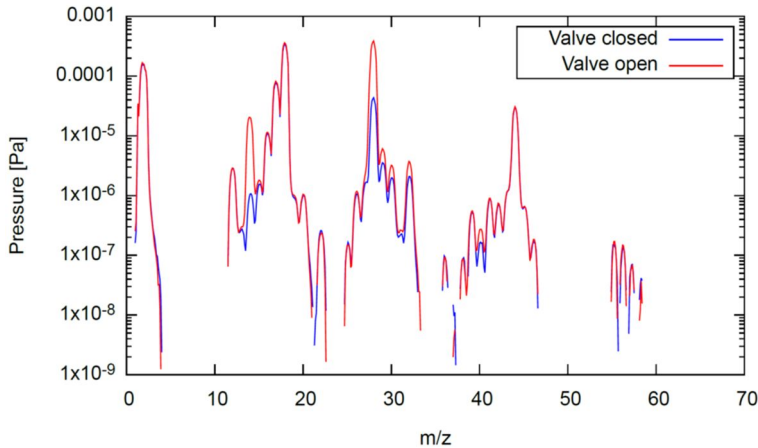


図5: N_2 ガス導入前（青）と導入後（赤）の質量スペクトル。

レーザー照射試験

岩石試料に赤外レーザーを照射した。レーザーと試料の間には集光のためのレンズ（焦点距離 30mm）を設置した（図6）。試料は真空槽内に設置し、先述の真空ポンプで真空引きを行った。レーザー照射時は、試料表面で閃光がみられるとともに、複数の質量・電荷比でのピークの上昇が観察された（一方、真空槽壁面由来 H_2O , OH のピークは変化しなかった）。今後、組成の異なる複数の試料での照射試験・組成分析を行うことで、定量分析の手法の確立が可能になる。

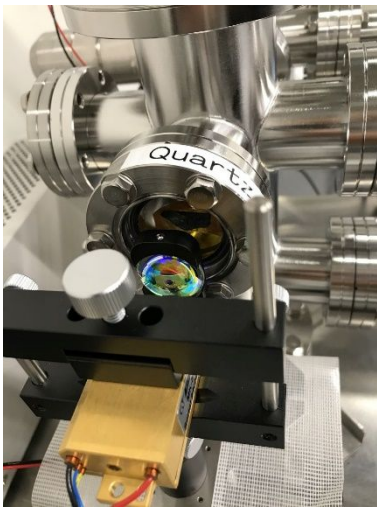


図6: レーザー照射時のセットアップ。

以上のように、本研究では将来の固体天体着陸探査に向けて、宇宙機搭載可能な真空系（バルブ・ポンプ）および赤外レーザーのアセンブリ・動作実証を行った。これまでに各コンポーネントの動作確認と特性の把握をすることができた。今後は、さらに宇宙機への搭載性を意識して各コンポーネントをコンパクトに収納する配置設計およびそのセットアップでの試験などが課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 川島桜也, 笠原慧, 齋藤義文, 横田勝一郎, 平原聖文, 杉田精司
2. 発表標題 太陽系探査を目指したイオントラップフーリエ変換型質量分析器の開発
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 Kawashima, O., Kasahara, S., Saito, Y., Yokota, S., Hirahara, M., Sugita, S.
2. 発表標題 Development of a miniature ion-trap Fourier-transform mass spectrometer for future space missions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳瀬 菜穂、笠原 慧、齋藤 義文、横田 勝一郎、平原 聖文、川島 桜也
2. 発表標題 Development of an Ion Source for Future Solar System Explorations
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳瀬 菜穂、笠原 慧、齋藤 義文、横田 勝一郎、平原 聖文、川島 桜也
2. 発表標題 月極域探査の質量分析に資するタンデム型イオン源の開発
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 Kasahara, S., S. Yokota, K. Asamura, Y. Saito, M. Hirahara, T. Mitani, and T. Takashima
2. 発表標題 In-situ particle measurements in planetary exploration
3. 学会等名 ISAS planetary exploration workshop (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠原慧, 亀田真吾, 吉岡和夫, 松岡彩子, 河北秀世, 新中善晴, 船瀬龍, 尾崎直哉
2. 発表標題 太陽系の水進化と彗星
3. 学会等名 惑星圏研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠原慧, 沖津由尚, 平原聖文, 齋藤義文, 横田勝一郎, 三浦弥生, 杉田精司
2. 発表標題 Development of particle measurement techniques for planetary exploration by micro-spacecraft
3. 学会等名 日本航空宇宙学会
4. 発表年 2018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	巽 瑛理 (Tatsumi Eri) (60623197)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員 (12601)	

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
---------	---------