

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14381

研究課題名(和文) 惑星探査機搭載能動型蛍光X線分光計の高精度軽元素分析

研究課題名(英文) Development of light-element analyses by active x-ray spectrometer for planetary exploration

研究代表者

長岡 央 (Nagaoka, Hiroshi)

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・特別研究員(PD)

研究者番号：10707805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：将来の惑星“着陸探査”への搭載を目指し、その場での高精度・多元素同時分析が可能な“能動型蛍光X線分光計”の開発に関わる研究を行った。本研究では、軽元素の高精度分析のため、従来検出器のX線窓として使用されてきたベリリウム(Be)ではなく、安全により薄く加工が可能な“シリコンナイトライド(Si₃N₄)”を検出器のX線窓として使用した。Si₃N₄を使用することで、低エネルギーのX線透過率が上昇し、X線の検出効率が向上するため、軽元素分析の短時間化が可能となる。また、本研究では焦電結晶型X線発生装置の高真空化での圧力依存性についても報告した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星探査においてその場の元素組成を分析することは、その天体環境の理解や環境がどのような過程を経て現在の姿に至ったのかを理解する上で非常に重要である。本研究では惑星探査という限られた時間とリソースの中で最大限の科学的成果を引き出すために、多元素同時分析が可能な装置開発について研究した。X線分析装置は、惑星探査のみならず、地球での実地調査にも広く用いられる。放射性同位体を使用することなく、短時間で高精度な分析が可能で、かつ小型軽量の装置の開発は、宇宙用のみならず、地上用としても非常に意義がある。

研究成果の概要(英文)：Active X-ray spectrometer (AXS) is designed and developed to measure many elements on site with high precision at the same time. In this work, Si₃N₄ film which is much thinner than Be is used as X-ray window to reduce the attenuation coefficient of low-energy X-rays. Because the detection efficiency of low-energy X rays increases by the usage of Si₃N₄ as X-ray window, it is enable to make the analysis time of light elements (e.g., Mg, Al) shorter. Furthermore, it is reported that the X-ray intensity of X-ray generator with pyroelectric crystal LiTaO₃ depends on the inner-gas pressure under high vacuum.

研究分野：惑星科学

キーワード：蛍光X線分析 惑星探査 元素組成

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

蛍光 X 線分析という手法は、惑星表層の元素組成を測定する手段として、今までに多くの惑星探査で利用されてきた。惑星表面の探査活動では、探査車による広範囲かつ長時間の調査が望まれるため、搭載される科学観測機器の重量、消費電力、データ量をできるだけ抑える必要がある。そのために、探査車に搭載する観測機器は、科学的要求を満たす前提で、可能な限り小型・軽量かつ低消費電力化を図ることが必須である。そこで限られたリソースと時間の中で、より多くの元素情報を取得し、短時間で着陸地点の地質学・化学的情報を取得可能な多元素同時分析装置の搭載が求められる。

惑星を構成する岩石に含まれるマグネシウム (Mg) と鉄 (Fe) の量比は、マグマ組成の時間経過における組成変化に関する情報を与えるため、これらの元素量決定が科学観測機の最重要目的の一つに上げられる。しかし、Mg 以下の元素から得られる特性 X 線は、低いエネルギーであるため、X 線検出ウィンドウでの X 線の減衰が大きい。ウィンドウでの特性 X 線の減衰を抑えて、軽元素の検出限界を向上させる工夫が惑星探査用として必須である。そこで既存の Be ウィンドウと比較して、素材が丈夫で薄く加工ができるシリコンナイトライドを用いることで全エネルギー帯にて X 線透過率が上がり、多くの元素の検出限界を大幅に向上させることができると期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、将来の惑星“着陸探査”に向けて、惑星の起源と進化の解明に繋がる惑星物質の元素情報を詳細に解説するため、その場での高精度・多元素同時分析が可能な“能動型蛍光 X 線分光計”の開発を行うことである。本研究では、従来検出器の X 線窓として使用されてきたベリリウム (Be) ではなく、より薄く加工が可能な“シリコンナイトライド (Si_3N_4)”を検出器の X 線窓として使用する。これにより、低エネルギーの X 線透過率が上昇し、低エネルギー X 線の検出効率の大幅な向上が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では X 線検出器として、広いエネルギー範囲を一度に計測でき、短時間での多元素同時分析を可能とするシリコンドリフト検出器 (SDD) を採用した。X 線の受光部にはノイズとなる電子の制動放射 X 線等を遮蔽するためのウィンドウを装着する必要がある。しかし、この X 線ウィンドウが低いエネルギーの特性 X 線を減衰させてしまうため、軽元素の X 線分析を困難にしている。通常の SDD では Be をウィンドウとして一般的に用いることが多く、Be ウィンドウでは Mg の特性 X 線は約 4 割程度減衰し、フッ素以降の軽元素の特性 X 線はほとんど透過しない。本研究では、図 1 に示す二つの実験系を用いて、X 線発生装置からの X 線を検出した。図 1(a) は、焦電結晶 (LiTaO_3) を用いた X 線発生装置、図 1(b) はカーボンナノチューブ (CNT) を用いた X 線発生装置である。

(1) 焦電結晶型 X 線発生装置では、 LiTaO_3 を低真空環境 (チャンバー内にガスを 1Pa 前後で封入) で、ペルチェ素子を使って温度変化 ($\Delta T \sim 80$ 度) を与えた。その結果、結晶表面に高電場が発生し、低真空環境内に存在する電子が、結晶表面と金属箔 (Cu or Mo) との間の電場で加速され、金属箔もしくは結晶表面に衝突し、特性 X 線が発生する (Brownridge 1992)。その発生した X 線をチャンバー上部に設置した検出器で計測する。この実験では封入するガス (乾燥空気、窒素) の圧力を変化させ、得られる X 線量を比較した。

(2) CNT 型の X 線発生装置では電子エミッターとして CNT を用いる。CNT に高電圧 (500V) をかけると、CNT の先端から電界放出により電子が飛び出す。その放出された電子を Mo 箔にかけた高電圧 (3kV) で加速させ、電子を Mo 箔に衝突させることで、Mo の特性 X 線を得る。発生した X 線は上部に設置した検出器 SDD で計測する。この実験では、Be 窓 (厚さ $8 \mu\text{m}$) を用いた SDD と Si_3N_4 窓 (厚さ 40 nm) を用いた X 線検出器をそれぞれ使い、X 線の計測結果を比較する。

(3) X 線窓として使用する素材 Si_3N_4 は、厚さが 50nm 前後と単独では非常に薄く破れ易いため、打ち上げ時の振動衝撃に対する耐性について検証した。正方形のシリコンフレームにより周囲を補強した Si_3N_4 薄膜 (既製品) を用意し、伊勢崎にある明星電気殿の振動実験場にて Si_3N_4 (厚さ 50nm) の耐振動試験を行った。

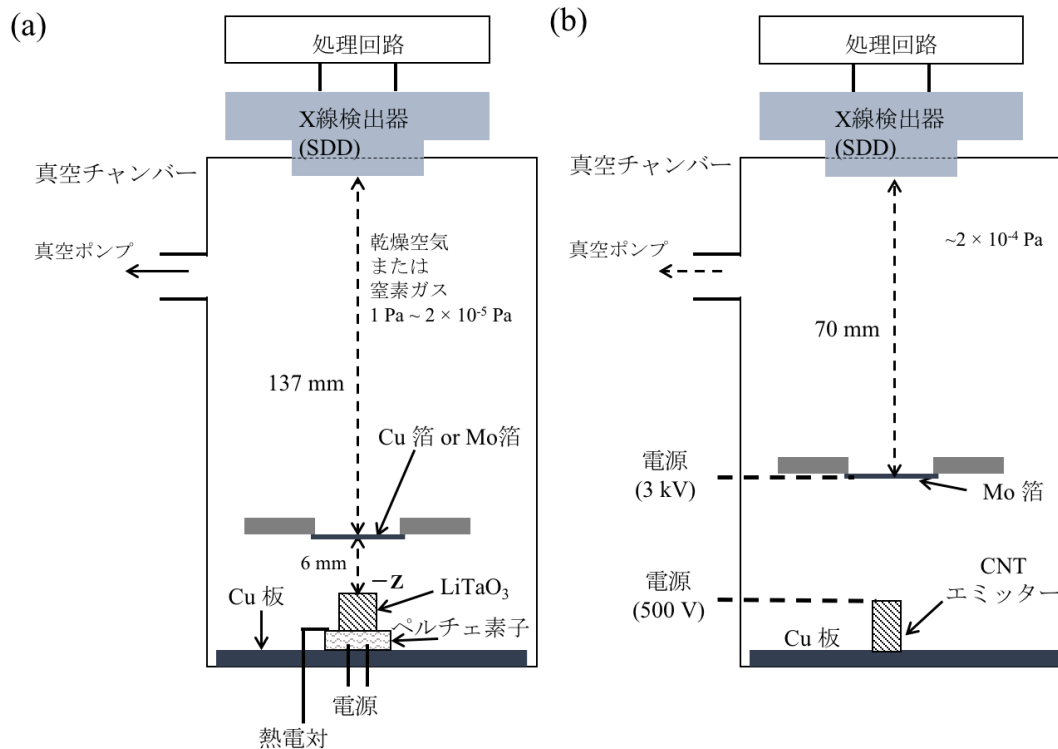


図1(a)焦電結晶 (LiTaO₃) を用いた X 線発生装置と X 線検出器 (SDD) の模式図. (b)CNT を用いた X 線発生装置と X 線検出器 (SDD) の模式図. SDD は Be 窓と Si₃N₄ 窓のそれぞれを用意し、取り替えが可能. Cu 板は接地済. 図は H. Nagaoka, et al. (2019) ISTS Web Paper Archives, 2019-k-04 の論文から一部改訂.

4. 研究成果

(1) 高真空環境下で焦電結晶を用いた X 線発生実験を行った (図 1(a)). この実験では過去の研究と条件を揃えるため、ターゲットとなる金属箔は Cu 箔、検出器には Be ウィンドウ型 SDD (XR-100SDD) を用いた. 結果は、乾燥空気の大気圧を 1Pa から真空度を上げていき、 1.0×10^{-4} Pa を越えたところで X 線の強度が半分程度減少した (図 2). 窒素ガスを用いた場合でも同様の結果となった. これは装置内で発生する電子の起源として、装置内のガスが結晶と電極間の高電圧による電離により供給されており、真空度が上がることで残留ガスが少なくなった結果、供給される電子も少なくなり、強度が下がったと考えられる. この結果は X 線発生装置を開発する際に封止の必要性を示唆した. この結果は焦電結晶を用いた X 線発生の物理プロセスを解明しただけでなく、宇宙機に応用した場合の開発へ重要な示唆を与えた. 上記実験結果と Nagaoka et al. (2018) の結果を合わせて、能動型蛍光 X 線の性能を評価した結果、月レゴリス中の Si, Ca, Ti, Fe の濃度を 10%精度で計測するのに必要な時間は、10 分程度であることがわかった. 本研究成果は、国際会議 (the 32nd International Symposium on Space Technology and Science) にて成果報告を行った. さらに発表内容を論文としてまとめ、査読付英文雑誌に投稿中である.

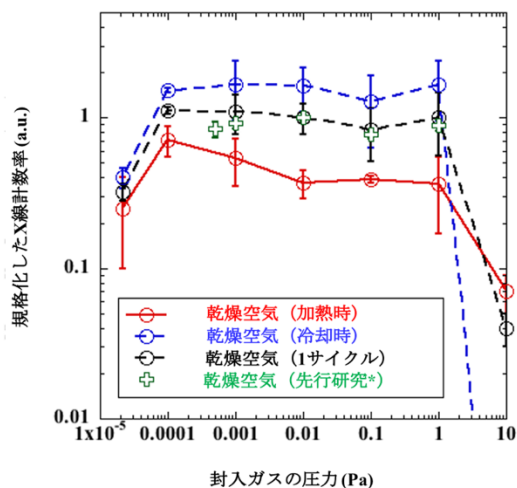


図 2. 封入ガスの圧力と X 線強度の関係. 加熱時間、冷却時間はそれぞれ 300 秒づつ、計 600 秒を 1 サイクルとする. 各プロットはそれぞれ 3 サイクルの平均値、エラーバーはその標準偏差を表す. 縦軸の値は、 1.0×10^{-2} Pa での 1 サイクルの平均値で規格化してある. 図は H. Nagaoka, et al. (2019) ISTS Web Paper Archives, 2019-k-04 の論文から一部改訂. 先行研究*は Kusano et al. (2016) での 1 サイクル (600 秒) での結果.

(2) 電子エミッターとしてCNTを用いたCNT型のX線発生装置を用いてBe窓と Si_3N_4 窓の計測結果を比較した。X線発生装置には、カーボンナノチューブ(CNT)とMo箔を組み合わせたX線発生装置を使用した(MoのL線のエネルギーは2.29 keV)(図1(b))。これはSi以下の軽元素を効率的に励起することができ、Al、Mgに加えて、より軽い元素の計測に特化した計測システムである。X線の計測にはAmptek社で市販されている Si_3N_4 ウィンドウ型SDD(XR-100FASTSDD-C2, Si_3N_4 厚40nm)を用いて、高真空下($\sim 10^{-4}$ Pa)にて、検出器の性能を評価した。実験の結果、従来のBe窓のSDDと比較して、 Si_3N_4 を窓に用いたSDDでは低エネルギー側でのX線透過率が高いこともあり、MoのL線をより高効率で観測することができた。今回のCNT発生装置と Si_3N_4 窓を組み合わせたX線分光計を過去結果(Nagaoka et al. 2016)と比較した場合、Mgの観測時間は約7割程度削減可能となる。

(3) X線窓として使用する素材 Si_3N_4 は、厚さが50nm前後と単独では非常に薄く破れ易いため、打ち上げ時の振動衝撃に対する耐性について検証した。正方形のシリコンフレームにより周囲を補強した Si_3N_4 薄膜(既製品)を用意し、 Si_3N_4 (厚さ50 nm)の耐振動試験を行った。宇宙機打ち上げ時を想定した振動試験の結果、シリコンフレームの破損は見られなかった。膜についても振動前後で大きな破損は見られなかったが、伸長の可能性については検討の余地が残った。検出器表面に Si_3N_4 を形成する際には、検出器の結晶表面に直接 Si_3N_4 を密接着させ、フレームで周囲を補強するなどして、振動に対応する必要がある。

参考文献

- J. D. Brownridge, Nature, 358, 287-288, 1992.
- H. Kusano, N. Hasebe, H. Nagaoka, M. Naito, M. Mizone, Y. Amano, E. Shibamura, H. Kuno, JPS Conference Proceedings, 11, 040005, doi: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.11.040005>, 2016
- H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, Y. Amano, T. Ohta, T. J. Fagan, 47th Lunar and Planetary Science Conference, #1837, 2016
- H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, K. J. Kim. Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 16, 137-142, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, K.J. Kim	4. 巻 16
2. 論文標題 Development of X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 137-142
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 該当する
1. 著者名 H. Nagaoka, T. Okada, H. Kusano, N. Tanaka, M. Naito, N. Hasebe	4. 巻 2019-k-04
2. 論文標題 Current Status of Development of Pyroelectric and Carbon Nanotube X-ray Generators for Future and Planetary Landing Observation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives	6. 最初と最後の頁 1-6
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 無
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 Y. Karouji, H. Hiesinger, M. Abe, J. Haruyama, M. Ohtake, W. Carey, M. Picard, T. Haltigin, K. Hashizume, N. Hasebe, Y. Ogawa, T. Yada, H. Nagaoka, Y. Ishihara, M. Kayama, S. Yamamoto, P. Pinet, C. Wohler, M. Landgraf	4. 巻 2019-k-05
2. 論文標題 HERACLES Mission the Exploration and Sample Return of the Moon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives	6. 最初と最後の頁 1-7
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 無
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 H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, Y. Nabekura, K.J. Kim	4. 巻 2017-k-27
2. 論文標題 Developed of X-ray Generators for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives	6. 最初と最後の頁 1-4
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 無
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 H. Nagaoka, T. Okada, H. Kusano, N. Tanaka, M. Naito, N. Hasebe
2. 発表標題 Current Status of Development of Pyroelectric and Carbon Nanotube X-ray Generators for Future and Planetary Landing Observation
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nagaoka, N. Tanaka, K. Shintaro, M. Naito, N. Hasebe, H. Kuno, K. J. Kim
2. 発表標題 Current status (2018s) of development basic of active X-ray generators for X-ray fluorescence spectroscopy in future lunar and planetary landing missions
3. 学会等名 15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, M. Mizone, H. Kuno
2. 発表標題 Pyroelectric X-ray generator for active X-ray fluorescence spectrometer on future lunar and planetary landing mission
3. 学会等名 14th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, Y. Nabekura, K.J. Kim
2. 発表標題 Developed of X-ray Generators for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長岡央、田中直道、氣賀信太郎、内藤雅之、長谷部信行、久野治義
2. 発表標題 Basic studies for development of active X-ray generators used in X-ray fluorescence spectrometer on future lunar landing missions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長岡央、長谷部信行、内藤雅之、溝根美穂、久野治義
2. 発表標題 Performance of the pyroelectric X-ray generator developed for active X-ray spectrometer on future lunar and planetary landing missions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
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