

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800239

研究課題名(和文) 惑星着陸機搭載元素分析用X線発生装置の安定高輝度化

研究課題名(英文) Development of active X-ray generator with increased intensity for planetary landing mission

研究代表者

長岡 央 (Nagaoka, Hiroshi)

早稲田大学・理工学術院・次席研究員

研究者番号：10707805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000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、焦電結晶を励起源としたX線発生装置のX線強度の安定化と高輝度化に関わる研究を行った。実験により装置に封入する結晶の種類やサイズ、電子を集めX線を放出するための銅薄膜のサイズや形状、封入する部品の幾何配置の最適化を図った。基礎実験結果を基に、焦電結晶、ペルチェ素子、円筒型金属ターゲット(銅薄膜を添付)を窒素N<sub>2</sub>で1Pa以下の環境下のもと真空装置に封入し、装置から発生するX線を測定した。本研究で最適化した発生装置のX線強度は、市販のCool-X(Amptek社)のものと比較して、約50倍以上の高輝度X線が得られた。

研究成果の概要(英文)：Active X-ray generator with pyroelectric crystal with increased X-ray intensity is designed and developed for future lunar and planetary landing mission, as the emission intensity from present pyroelectric X-ray generator (PXG) is not so strong for space mission. The X-ray emission intensity depends heavily on several operation parameters as the size and species of pyroelectric crystal, the size and shape of metallic target film as electron collector, their geometry and condition of inner gas (kinds, pressure). Appropriate conditions to increase X-ray intensity have investigated by several experiments, and these parameters were decided on experimental results. X-ray intensity of our PXG is about fifty times higher than that of commercial one (COOL-X by Amptek).

研究分野：惑星科学

キーワード：蛍光X線分析 惑星探査 焦電結晶

## 1. 研究開始当初の背景

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。

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。しかし、過去の着陸探査では X 線の励起源として、放射性物質を使用してきた(引用文献、 )。放射線源を宇宙機に搭載することは、日本では現状困難であり、その採用は難しい。また X 線管は、一般的に高圧電源を使用して電子を加速する必要があるため、大型になり、消費電力も大きい。惑星探査用の X 線発生装置としては、小型軽量、省電力であることが望ましく、日本独自で小型軽量・省電力かつ放射性物質を使用しない安全性にも優れた元素分析装置の開発が求められている。

本研究では、将来の惑星着陸探査車への搭載を目指した能動型蛍光 X 線分光計の実現に向け、励起源として焦電結晶 (LiNbO<sub>3</sub>、LiTaO<sub>3</sub>; 引用文献 ) に着目した。しかし、既存の焦電結晶型 X 線発生装置は、安定した高強度の照射ビームが得られず、対象物質から定量分析に必要な統計量の特長 X 線を得ることが出来ないという問題点がある。

## 2. 研究の目的

これからの惑星探査では、惑星表面に着陸して、“その場観測”による詳細な地質を理解する段階へと移行しつつある。したがって、限られたリソースの中、短時間で高精度・多元素分析が、可能な着陸探査車搭載用の高輝度 X 線発生装置の研究開発が、強く望まれている。

本研究では、“焦電結晶”を X 線発生装置に応用することで、放射性物質や高圧電源を使用しないで、装置の“小型・軽量・低消費電力化”が可能であり、しかも“安定”かつ“高輝度”な照射 X 線を実現可能な“新型 X 線発生装置”の開発を目的とする。さらに、現状では十分とはいえない焦電結晶の X 線発生機構の物理的理解を含めて、焦電結晶型 X 線発生装置の X 線強度の“安定化”と“市販品と比較して約 10 倍以上の高輝度化”の実現を目指す。

## 3. 研究の方法

焦電結晶型 X 線発生装置は焦電結晶、金属ターゲット(コレクター)、ペルチェ素子が

ら構成され、装置内部は低圧ガスで満たされている(図 1)。

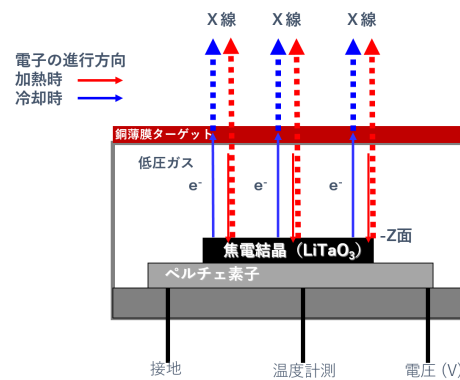


図 1. 焦電結晶を用いた X 線発生装置の模式図

X 線発生装置の性能は、1) 結晶の種類やサイズ、2) 結晶の過熱温度や加熱冷却サイクル、3) 電子を収集するコレクター(金属ターゲット)の大きさや形状、4) 装置内部に封入する気体の種類や圧力などをパラメータとしている(引用文献等)。

本研究では上記に示すような様々な物理パラメータや部品の幾何的配置を変えることで、得られる X 線強度が最大となる条件を調査した。

## 4. 研究成果

実験により装置に封入する結晶の種類やサイズ、電子を集め X 線を放出するための銅薄膜のサイズや形状、封入する部品の幾何配置の最適化を図った。

Congruent 型と Stoichiometric 型の LiTaO<sub>3</sub> を用意し、X 線強度を比較した。後者は前者と比較して約 2 倍熱電度率が大きいため、温度サイクルを効率的に早めることで、X 線発生効率を高める狙いがあった。しかし、同条件で両者それぞれから発生する X 線量の測定を試みたが、stoichiometric 型からは X 線が発生しなかった。

また電子を収集する金属ターゲットの形状を図 1 にみられるような平板ターゲットに加えて、結晶がある側に一部円筒型で張り出したターゲット(直径 10 mm)を用意し、得られる X 線の強度比を比較した。後者のターゲットは、銅薄膜ターゲット周辺の電場をより強めることで、電子の収集効率を上げる狙いがある。加熱 300 秒と自然冷却 300 秒で焦電結晶に温度変化を与え、その間に得られた X 線の計数率を、表 1 に示す。円筒型を用いることで、得られる X 線強度が増加することがわかった。

表 1. 円筒型ターゲットと平板型ターゲットから得られる X 線の発生率 ( 結晶とターゲット間の距離が 9mm の場合 ).

	円筒型 ターゲット	平板 ターゲット
全計数率	$1.45 \times 10^4$	$9.30 \times 10^3$
標準偏差	$3.43 \times 10^2$	$1.15 \times 10^3$

表中の値は、それぞれ 3 回同様の実験を行ったときに得られた X 線計数率の平均値とその標準偏差 ( 1 ) である。

基礎実験結果を基に、焦電結晶 (OXIDE 社製 Congruent LiTaO<sub>3</sub>: 直径 7.1 mm、厚さ 4 mm)、ペルチェ素子、円筒型金属ターゲットと銅薄膜 (直径 10 mm、厚さ 10 μm) を窒素 N<sub>2</sub> で 1 Pa 以下の環境下のもと真空装置に封入する。焦電結晶を 50 秒間加熱し、100 秒間自然冷却をさせ室温に戻す 1 サイクルを、連続的に合計 10 サイクル作動させ、装置から発生する X 線を測定した。

この場合、本研究で最適化した発生装置の X 線強度は、市販の COOL-X (Amptek 社) のものと比較して、約 50 倍以上の高輝度 X 線が得られ、宇宙探査への実用可能性を示した。

#### 引用文献

Rieder R. et al. The new Athena alpha particle X-ray spectrometer for the Mars Exploration Rovers, *J. Geophys. Res.*, **108** (2003), 8066.

Fu X.-H. et al. Data processing for the Active Particle-induced X-ray Spectrometer and initial scientific results from Chang'e-3, *Res. Astron. Astrophys.*, **14** (2014), 1595-1606.

Brownridge J.D. Pyroelectric X-ray generator, *Nature*, 358 (1992), 287-288

Brownridge J.D. and Shafroth S.M. Pressure dependence of energetic (=160 keV) focused electron beams arising from heated or cooled (LiNbO<sub>3</sub>) pyroelectric crystals, *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003), 1477

#### 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線 )

[ 雑誌論文 ] ( 計 4 件 )

- 1) H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, Y. Amano, E. Shibamura, T. Ohta, T.J. Fagan, M. Naito, H. Kuno, J.A. Matias Lopes “Instrumental Overview of an Active X-ray Spectrometer for Future Lunar Landing Mission” *JPS Conference Proceedings*, **11**, 040004, doi: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.11.040004>, 2016 ( 査読有 )

- 2) H. Kusano, N. Hasebe, H. Nagaoka, M. Naito,

M. Mizone, Y. Amano, E. Shibamura, H. Kuno “Current Development Status of an X-ray Generator for X-ray Fluorescence Analysis on Space Mission” *JPS Conference Proceedings*, **11**, 040005, doi: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.11.040005>, 2016 ( 査読有 )

- 3) 長谷部信行, 草野広樹, 長岡央, “ 惑星探査における蛍光 X 線分光 ” *X 線分析の進歩*, **47**, 59-77, 2016 ( 総説 ) ( 査読有 )

- 4) 長岡央, 長谷部信行, 草野広樹, 大山裕輝, 内藤雅之, 柴村英道, 久野治義 “ 惑星探査期搭載に向けた蛍光 X 線分光計の焦電結晶 X 線発生装置の基礎開発 ” *X 線分析の進歩*, **46**, 347-354, 2015 ( 査読有 )

[ 学会発表 ] ( 計 8 件 )

- 1) H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, Y. Amano, E. Shibamura, T. Ohta, T.J. Fagan, M. Naito, H. Kuno “Instrumental overview and scientific expectation of Active X-ray Spectrometer (AXS) for future lunar landing mission” 13<sup>th</sup> Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Bejin, China, July 31<sup>st</sup> -August 5<sup>th</sup>, 2016

- 2) H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, Y. Amano, T. Ohta, T.J. Fagan “Active X-ray fluorescence spectrometer on-board landing rover for future lunar and planetary landing missions” 47<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, Texas, US, March 21<sup>th</sup> – 25<sup>th</sup>, 2016

- 3) H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, K. J. Kim, J.A.M. Lopes, J. Martinez-Frias “Current status of development for active X-ray fluorescence spectrometer for future planetary missions” 78<sup>th</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society, Berkeley, US, July 27-31, 2015

- 4) H. Nagaoka, M. Naito, N. Hasebe, H. Kusano, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J. A. M. Lopes “X-ray generator for active X-ray fluorescence spectrometer on-board landing rover for future planetary missions” 46<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, Texas, US, March 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup>, 2015

- 5) 長岡央, 長谷部信行, 柴村英道, 内藤雅之, 天野嘉春, 太田亨, ティモシー・フェイガン “ 重力天体着陸探査に向けた元素分析装置「能動型蛍光 X 線分光計」の開発 ”

日本惑星科学会 2016 年秋季講演会 岡山，  
日本，9/12-14，2016

- 6) 長岡央、長谷部信行、草野広樹、内藤雅之、柴村英道、天野嘉春、太田亨、Fagan Timothy “ 将来の月着陸探査機搭載能動型蛍光 X 線分光計の概要とその開発状況 ” 日本地球惑星科学連合 2016 年大会，幕張，日本，5/22-5/26，2016
- 7) 長岡央、長谷部信行、草野広樹、内藤雅之、柴村英道、天野嘉春、太田亨、Fagan Timothy “ 月着陸探査に向けた能動型 X 線分光計の開発状況 ” 日本地球惑星科学連合 2015 年大会，幕張，日本，5/24-5/28，2015
- 8) 長岡央，長谷部信行，草野広樹，内藤雅之，柴村英道，天野嘉春，太田亨，ティモシー・フェイガン “ 将来の惑星探査に向けた小型放射線分光装置の提案 ” 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会，仙台，日本，9/24-26，2014

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

長岡 央 (Nagaoka, Hiroshi)  
早稲田大学 理工学術院総合研究所  
次席研究員 ( 研究院講師 )  
研究者番号 : 1 0 7 0 7 8 0 5