

次期月着陸探査搭載能動型蛍光X線分光計の研究開発

研究代表者 長岡 央
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

本研究課題は、将来の惑星探査機への搭載に向け、元素分析装置の開発を行うことである。探査機には厳しいリソース制限と観測時間のなかで、より多くの元素情報を取得可能である高性能元素分析装置の開発・搭載が必須である。本報告書では、着陸探査車に搭載可能な小型X線発生装置を備えた能動型X線分光計の開発に焦点を当てている。

惑星探査における蛍光X線分析を用いたその場観測では、能動型のX線発生装置の搭載が必須である。特にリソースの限られた探査車への搭載には、発生装置の小型軽量化と低消費電力化を達成する必要がある。そこで焦電結晶 (LiTaO_3) を惑星探査用のX線発生装置に応用することで、小型・軽量・低消費電力化を達成する。焦電結晶型の発生装置は高压電源や放射性物質が不要な点も宇宙機の搭載には有利である。

焦電結晶型のX線発生装置は、“焦電結晶”、“結晶に温度変化を与えるためのペルチェ素子”、“金属ターゲット”から構成され(図1)、焦電結晶に温度変化を与えることで自発分極が引き起こされ、結晶表面に高い電場を形成する。装置内の電子がその電場で加速され、金属ターゲットもしくは結晶に衝突することで、X線が発生する。この発生X線を励起源として、試料に対し蛍光X線分析を行う。しかし、現状市販品の焦電結晶X線発生装置(COOL-X, Amptek 社)は、得られるX線の強度が弱く、元素の定量分析を行うことになると、十分な統計を得るのに非常に時間がかかってしまう。これはリソースや観測時間が厳しく制限される惑星探査において、解決すべき大きな問題点である。そこで、本研究ではいまだに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“高輝度化”の実現を目指した。

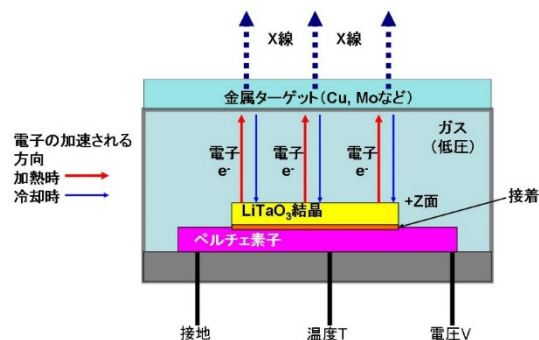


図1. 焦電結晶型X線発生装置の模式図（図は長岡他, 2015 より引用）

2. 主な研究成果

1) 焦電結晶型 X 線発生装置の高輝度化に関わる研究成果 (2016 年度～)

2016 年度の研究成果を以下に簡単にまとめる。金属ターゲット周辺の電場を強くし、電子の収集効率を上昇させる目的で円筒型の金属ターゲットを作成し、従来の平板型と円筒型の金属ターゲット（ターゲット部は銅薄膜）それぞれを用いて、発生する X 線量を計測した。この実験ではすべて封入気体 (N_2) の圧力は 1Pa のもと実験を行った。それぞれの実験結果を比較すると、検出された X 線量は円筒型ターゲットを用いたほうが、平板型のものより増加した。最も高い強度が得られた条件は、CLT 型焦電結晶 $LiTaO_3$ （結晶直径 7.1 mm, 厚さ 4mm）と円筒型ターゲット（銅薄膜直径 10 mm, 厚さ $10\mu m$ ）を用いて、ターゲットー結晶間距離を 9mm とした場合である。以上の条件下、結晶を 50 秒間加熱し、100 秒間自然冷却させる温度サイクルを 1 サイクルとして、計 10 サイクルで得た X 線の計数率 (3.0×10^4 cps) は、過去長谷部研にある市販品 COOL-X を用いて計測した計数率 (4.5×10^2 cps) と比較して、60 倍以上高い結果が得られた。2017 年度は、2016 年度の実験結果を取りまとめ必要な追加実験を執り行い、得られた研究成果を査読付学術誌 (Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan) に投稿し、論文として掲載された。

2) カーボンナノチューブを用いた X 線発生装置の開発 (2017 年度～)

焦電結晶型 X 線発生装置のバックアップとして、カーボンナノチューブ (CNT) を用いた X 線発生装置を検討した。CNT 型 X 線発生装置を惑星探査に応用するため、その基礎研究を行った。特に焦電結晶型 X 線発生装置では、低濃度元素を測定するには十分な強度の励起 X 線が得られない、低エネルギー側の特性 X 線を励起するために、CNT を電子エミッターとして用いた。CNT から放出された電子を高圧電源で加速し、金属ターゲットに衝突させ、金属ターゲットから放出される特性 X 線を励起源とする (図 2)。集束電極は効率よく金属ターゲットに電子を収集する役割である。

実験では CNT、ゲート、金属ターゲットを真空チャンバー内に配置した。高圧電源で加速した電子 (Max 3 keV 程度) が衝突する金属ターゲットには、薄い Mo 泊を使用し、Mo の L 線 (2.29 keV) を X 線検出器 SDD で計測した。この X 線により、Si (ケイ素) 以下の軽元素の測定を効率的に行うことが狙いである。CNT 型発生装置から得られた X 線量は、同条件で検出した焦電結晶型 X 線発生装置のものよりも強い強度を示した。今後は発生装置の設計にかかわるパラメータについて系統的な実験を行い、CNT 型発生装置の最適条件を導くことで、より高強度の X 線が得られると期待される。

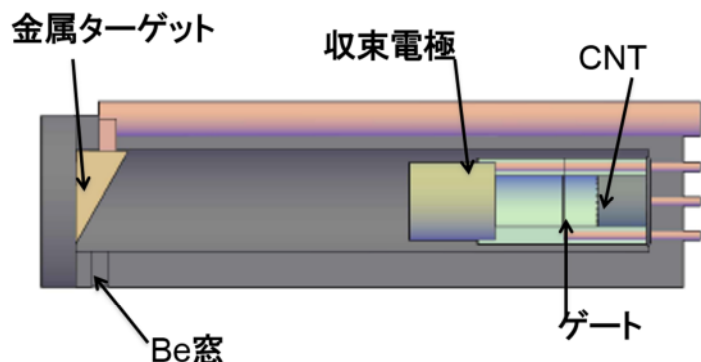


図 2. CNT 型 X 線発生装置の模式図 (図は長谷部他, 2016 より引用)

引用文献

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
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)

3. 共同研究者

長谷部 信行 (先進理工学部・物理学科・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文 (査読有)

- H. Nagaoka**, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, K.J. Kim “Development of X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science” *Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan*, vol. 16, No. 2, 137-142, 2018.
- M. Naito, N. Hasebe, **H. Nagaoka**, E. Shibamura, M. Ohtake, K.J. Kim, C. Wöhler, A.A. Berezhnoy “Iron distribution of the Moon observed by the Kaguya gamma-ray spectrometer: Geological implications for the South Pole-Aitken basin, the Orientale basin, and the Tycho crater” *Icarus* 310, 21-31, 2018.
- M. Kayama, N. Tomioka, E. Ohtani, Y. Seto, **H. Nagaoka**, J. Götze, A. Miyake, S. Ozawa, T. Sekine, M. Miyahara, K. Tomeoka, M. Matsumoto, N. Shoda, N. Hirao, T. Kobayashi “Discovery of moganite in a lunar meteorite as a trace of H₂O ice in the Moon’s regolith” *Science Advances* 4, eaar4378, 2018.
- M. Naito, N. Hasebe, **H. Nagaoka**, Y. Oshima, M. Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A.M. Lopes, J. Martínez-Frías “Improved pyroelectric x-ray generator for planetary active x-ray spectroscopy” *Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering* 10392, 1039215-8, 2017.
- M. Naito, N. Hasebe, **H. Nagaoka**, J. Ishii, D. Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A.M. Lopes, J. Martínez-Frías “A high performance neutron spectrometer for planetary hydrogen measurement” *Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering* 10392, 103920C, 2017.

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

代表コンビーナ, 「月の科学と探査」セッション, “日本地球惑星科学連合 連合大会”, 2017 年 5 月, 幕張大会

5. 研究活動の課題と展望

CNT は焦電結晶と比較して、高強度の X 線が得られるという点で惑星探査に非常に有利である。一方で、CNT 型は電子を加速する高圧電源の搭載が必要となり、リソースの観点から増大する重量と消費電力が惑星探査機搭載には不利な点である。今後はこれらの課題を解決しつつ、より小型軽量を目指した X 線発生装置の開発を進めていく。今回の研究活動で高輝度化に成功した Cu 泊を金属ターゲットに使用した比較的重い元素 (Si から Fe までの元素) の分析に特化した焦電結晶型 X 線発生装置と、Mo の金属箔を用い軽元素 (Al 以下の元素) の分析に特化した CNT 型を併用することで、リソースの削減を目指す。