

## CORRELATION BETWEEN THE ELECTRON BEAM CONDITION AND THE ENERGY RESOLUTION OF PXR DISPERSION\*

Manabu Inagaki<sup>1,A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>B)</sup>, Ken Hayakawa<sup>B)</sup>, Keisuke Nakao<sup>B)</sup>,  
Kyoko Nogami<sup>B)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>B)</sup>, Takeshi Sakai<sup>A)</sup>, Isamu Sato<sup>A)</sup>

A) Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University  
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

B) Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University  
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

### Abstract

When X-ray absorption near edge structure is measured, the energy resolution of measurement system is one of the most important properties. Theoretically, the energy resolution of the LEBRA-PXR system depends on the effective electron beam spot size on the target crystal and on the distance between the target crystal and the detector. Since the LEBRA-PXR system is based on the linac, the energy resolution can be comparatively easily adjusted by changing the electron beam focusing condition. For example, the electron beam diameter of 0.5mm in horizontal direction corresponds to the energy resolution 3eV at the measurement distance 7.67m. The dependence of the energy resolution on the electron beam profile was experimentally confirmed by observing several XANES spectra. This adjustability suggests the PXR-XAFS system can be optimized for the application requirement.

## 電子ビーム条件と PXR のエネルギー分散分解能の相関

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)にあるパラメトリック X 線放射(PXR)発生装置は、125 MeV 電子線形加速器が基盤となっている。表 1 に LEBRA-PXR システムの性能を示す。LEBRA-PXR 発生装置はシリコン完全結晶を用いた二結晶型のシステムであり<sup>[1]</sup>、現在では 5.0 - 20 keV まで連続的にエネルギー可変で単色 X 線を供給している。この X 線ビームは、指向性の高い X 線が供給できること、X 線出力窓の直径( $\phi$  100 mm)に由来する広範な照射野を持つことなどの特徴を利用して現在、エネルギー分散型 X 線吸収微細構造(DXAFS)測定や位相コントラストイメージング<sup>[2]</sup>などの研究に応用されている。

表 1 LEBRA-PXR システムの性能

電子エネルギー	100 MeV
加速周波数	2856 MHz
パルス幅	10 - 20 $\mu$ s
繰り返し数	2 - 5 Hz
第一結晶	Si(111) 200 $\mu$ m 厚
第二結晶(反射用)	Si(111) 5 mm 厚
X線エネルギー Si(111)	4.0 - 20 keV (設計性能) 5.0 - 20 keV (実績)
X線出力窓 (カプトン窓)	直径 100 mm 125 $\mu$ m 厚

PXR は、照射野内において水平方向の位置に関する一次関数的なエネルギー分散を示すという特徴を持ち、その特徴を活かした DXAFS 測定へ応用している<sup>[3]</sup>。高分解 DXAFS 測定を行うためには、エネルギー分散が重要で、それにより PXR 線源自体のエネルギー分散とイメージングデバイスの空間分解能の向上が必要とされる。今回は、前者に着目しエネルギー分散の向上を試みた。ここで、ターゲット結晶から測定面までの距離を  $L$ 、測定面における水平位置を  $x$  とすると、PXR のエネルギー分散は以下となる。

$$\hbar\omega' \approx \hbar\omega \left( 1 - \frac{x}{L \tan \theta} \right) \quad (1)$$

(1)式で示したエネルギー分散の特性を考慮すると、ターゲット結晶上の電子ビームスポットサイズと電子ビーム軌道における揺らぎは、エネルギー分散の分解能を制限する。ターゲット結晶上での電子ビームの直径を  $\Delta d$  とするとその分解能  $\Delta E_d$  は、

$$\Delta E_d \approx \hbar\omega \frac{\Delta d}{L \tan \theta} \quad (4)$$

と概算される<sup>[4]</sup>。したがって、エネルギー分散は電子ビームの良いフォーカスと安定性、またはターゲット-検出器間の距離  $L$  を十分確保すれば高分解能にできる。LEBRA-PXR システムの場合、電子線

\*本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業(継続)(平成 17~19 年度)

<sup>1</sup> E-mail: inagaki@lebra.nihon-u.ac.jp

形加速器を用いているため、集束条件を変えることでターゲット結晶上での電子ビームプロファイルを調整することが比較的容易である。このため、LEBRA-PXR を用いた高分解 DXAFS 測定を行う予備的実験として、電子ビーム条件と PXR のエネルギー分散分解能の相関を調べる必要がある。そこで本研究では、エネルギー分散分解能と電子ビームプロファイルとの依存性を、いくつかの X 線吸収端近傍構造(XANES)スペクトルを観測して確認する方法を試みた。

## 2. 実験方法

電子ビームプロファイルを測定するため、PXR 発生装置の前方に Al の薄板(約 0.2 mm 厚)を設置し、電子ビームを当て遷移放射光(OTR)を観測した。図 2 にセットアップ概略図を示した。

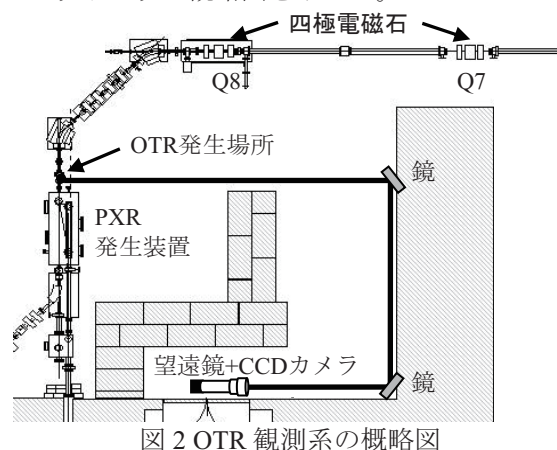


図 2 OTR 観測系の概略図

線形加速器部の四極電磁石(Q7,Q8)の集束条件を変えて、Al の薄板上での電子ビームプロファイルの変化を CCD カメラで観測した。また、各プロファイルの電子ビームから発生した PXR をサンプルに照射し、イメージングプレート(IP)および CCD カメラを用いて撮像した。そこで得られた XANES スペクトルから電子ビーム条件とエネルギー分散分解能の相関を調べた。本実験で用いたサンプルは、以下の通りである。

- ・ Zn : 薄膜(厚み:25  $\mu\text{m}$ )、ZnO : 粉末(<200 mesh)
- ・ Nb : 薄膜(厚み:12.7  $\mu\text{m}$ )、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 粉末

## 3. 実験結果

ターゲット-検出器間距離 7.67 m のとき、四極電磁石(Q7,Q8)の集束条件を変えた場合の OTR の形状の変化の例を表 2 に示した。これから、OTR 画像が①縦長の形状のときは、水平方向の電子ビーム直径が 0.5 mm でエネルギー分散分解能は 3 eV となり、②横長、③丸形の形状のときは、ビーム直径が 3.5 mm でエネルギー分散分解能は 21 eV に相当する。

次に各ビーム形状において、サンプルを用いて得られた吸収端付近のスペクトルを図 3-4 に示した。

表 2 ターゲット-検出器間距離 7.67 m における OTR の形状とエネルギー分散分解能の関係

	OTR画像	ビームサイズ	エネルギー分散分解能
①		水平方向 : 0.5 mm 垂直方向 : 3.0 mm	3 [eV]
②		水平方向 : 3.5 mm 垂直方向 : 0.5 mm	21 [eV]
③		水平方向 : 3.5 mm 垂直方向 : 4.0 mm	21 [eV]

図 3 の測定条件は、粉末の ZnO に PXR エネルギー 9.661 keV を照射し、図 4 の測定条件は、粉末の Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> に PXR エネルギー 18.98 keV を照射した場合である。それぞれの吸収端の傾きを算出した結果を表 3 に示した。図 3-4 の結果から、縦長の形状のときに、吸収端の立ち上がり方が最も鋭く、表 3 から傾きも大きいことがわかった。つまり、水平方向のビームサイズを小さく調整したとき、エネルギー分散分解能が良くなることが確認できた。

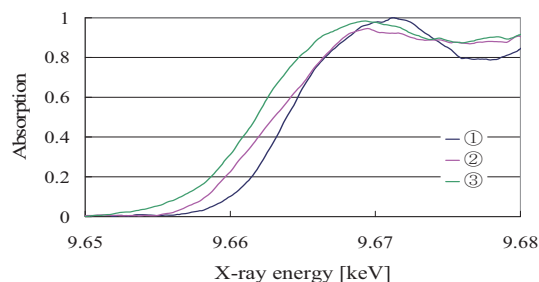


図 3 各 OTR の形状において粉末の ZnO を用いた吸収端の立ち上がり方。

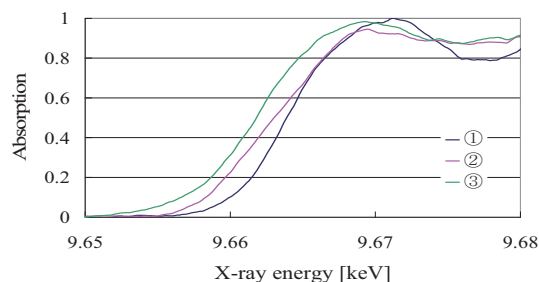


図 4 各 OTR の形状において粉末の Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を用いた吸収端の立ち上がり方。

最後に、高分解能が得られた縦長の形状に調整し、XAFS スペクトルの観測を行い、その結果を図 5-6 に示した。図 5 は粉末の ZnO と薄膜の Zn を用い、

表 3 各電子ビームの形状における吸収端の傾き

各電子ビーム の形状	吸収端の傾き	
	粉末のZnO	粉末のNb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
①	0.12	0.031
②	0.088	0.023
③	0.098	0.026

図 6 は粉末の Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と薄膜の Nb を用いた。両者の結果から酸化物のサンプルは、吸収端が高エネルギー側にシフトしていることが確認できた。図 5 の薄膜の Zn のスペクトルに関して、吸収端より高エネルギー側ではスペクトル構造がほとんど現れていない理由は、サンプルが厚いためだと考えられる。また図 6 の粉末状の Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> のスペクトルの細かい構造は、サンプル作成時に生じた厚みムラのためであると考えられる。

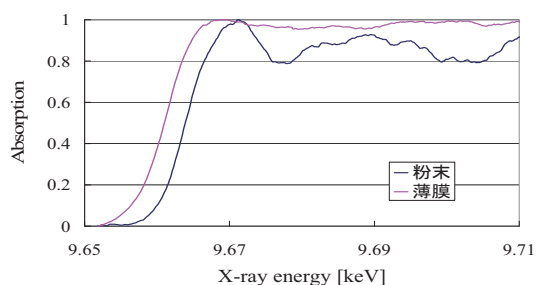


図 5 縦長の OTR において粉末の ZnO と薄膜の Zn を用いたときの XAFS スペクトル。

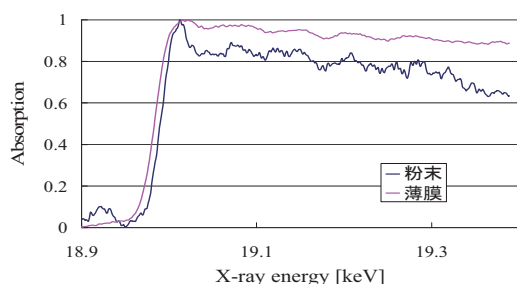


図 6 縦長の OTR において粉末の Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と薄膜の Nb を用いたときの XAFS スペクトル。

#### 4. まとめ

LEBRA-PXR システムの場合、エネルギー分解能を決める要因としては、PXR 線源自体のエネルギー分散とイメージングデバイスの空間分解能が挙げられる。特に、線源のエネルギー分散がエネルギー分解能を制約する主な原因であり、これはターゲット結晶上での電子ビームサイズと線源-検出器間距離に依存する。LEBRA-PXR システムは、電子線形加速器を用いているため、集束条件を変えることでターゲット結晶上での電子ビームプロファイルを調整することが比較的容易に行える。このため、ターゲット結晶上での電子ビームサイズを変える手法を採用し、電子ビームサイズとエネルギー分解能

の測定を行った。測定距離 7.67 m では、水平方向に対して直径 0.5 mm の電子ビームサイズは、エネルギー分解能 3 eV、直径 3.5 mm の電子ビームサイズは、エネルギー分解能 21 eV に相当する。これらの電子ビームプロファイルで XANES スペクトルを測定した結果、水平方向の電子ビームサイズが小さいほど吸収端の立ち上がり方が鋭くエネルギー分解能が良いことが確認できた。すなわち、電子ビームプロファイルとエネルギー分解能の依存性を実験的に確認することができたと言える。したがって、この依存性を利用することは、測定方法の要求に応じて PXR-XAFS システムを最適化できることを示唆している。

#### 5. 今後の課題

今回の OTR 観測システムは、PXR 発生装置の前で観測を行った。しかし正確な議論を行うためには、ターゲット結晶上での電子ビームプロファイルを観測しなければならない。このため現在では、ターゲット結晶上での電子ビームプロファイルを観測するための新しい OTR 観測システムを構築した。今後は、新システムで同様の実験を行い、更なる PXR-XAFS システムの最適化を行う必要がある。

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業(継続)(平成 17~19 年度)「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」の支援を受けて行った。

#### 参考文献

- [1] Y.Hayakawa et al., Simulations to the project of a PXR based X-ray source composed of an electron linac and a double-crystal system: Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B227 (2005) 32-40.
- [2] T. Kuwada et al., AIP Conference Proceedings 879; 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (May 28 - June 2, 2006, Daegu, pp1968-1971)
- [3] M.Inagaki et al., Performance Evaluation of DXAFS Measurement Using Parametric X-ray Radiation: Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan) 526-528.
- [4] Y.Hayakawa et al., Advanced Applications of PXR at LEBRA, Nihon University: International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (July 3-7, 2006, Frascati (Rome), Italy).