

楔形ターゲット結晶を用いたパラメトリック X 線源における X 線トポグラフの振舞い

BEHAVIOR OF X-RAY TOPOGRAPH FOR PARAMETRIC X-RAY SOURCE USING A WEDGE-SHAPED TARGET CRYSTAL

稲垣 学^{#,A)}, 早川 恭史^{A)}, 早川 建^{A)}, 田中 俊成^{A)}, 中尾 圭佐^{A)}, 境 武志^{A)}, 野上 杏子^{A)}, 高塚 健人^{A)},
佐藤 勇^{A)},

Manabu Inagaki^{#,A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Takeshi Sakai^{A)},
Kyoko Nogami^{A)}, Kento Takatsuka^{A)}, Isamu Sato^{A)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Nihon University

Abstract

The X-ray beam from the parametric X-ray radiation (PXR) generator consisting of the double-crystal system at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University has been applied to wavelength dispersive X-ray absorption fine structure (DXAFS) measurement and diffraction-enhanced imaging. The diffraction pattern (X-ray topograph) appeared clearly when using the target crystal which had a partly wedge-shaped cross-section. Therefore, the dependence of the X-ray topograph on the angle of each crystal and on the position of the incident electron beam at the target crystal was investigated. As a result, the X-ray topograph was dependent on the angle of the target crystal, but was not dependent on the position of the incident electron beam at the target crystal and on the angle of the second crystal.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) の新しい X 線源であるパラメトリック X 線放射 (PXR) 発生装置は、125 MeV 電子線形加速器を用いている^[1]。LEBRA-PXR システムは 2 枚の完全結晶を使用してエネルギー可変な単色 X 線ビームを発生させている。ここで、第一結晶は X 線の放射源であるターゲット、第二結晶は X 線の取り出し位置を固定するための X 線輸送の役割を果たしている。PXR からの X 線ビームは、Bragg の回折条件をほぼ満たした状態で発生する。つまり、入射電子ビームに対してターゲット結晶の角度を変えれば、X 線エネルギーを自由に変更できる。この X 線ビームはコヒーレンスが良く、水平方向に一次関数的なエネルギー (波長) 分散がある。この特性を利用して、波長分散型 X 線吸収微細構造 (DXAFS) 測定や回折強調型位相コントラストイメージング (DEI) などの研究に応用されている^[2-5]。LEBRA-PXR システムの主なパラメータを表 1 に示す。

LEBRA-PXR システムの完全結晶は、主に Si(111) および Si(220) を使用している。PXR の特性を調べるために、多種多様な形状の結晶も試している。これまでに傾斜角 5 deg. の楔形 Si(220) ターゲット結晶を用いた場合、回折像 (X 線トポグラフ) と思われる現象が X 線ビームに現れた^[6]。X 線ビームを用いた実験は、試料を透過した X 線を検出器で測定する方法が主であるため、X 線トポグラフの影響は試料の構造解析をするにあたり厄介な存在となる。このため、今回新たに傾斜角 3 deg. の楔形 Si(220) ター

Table 1: Specifications of the LEBRA-PXR System

<u>Linac</u>	
Electron energy	100 MeV
Acceleration frequency	2856 MHz
Macropulse beam current	120 - 135 mA
Macropulse duration	4 - 10 μ s
Macropulse repetition rate	2 - 5 pps
<u>PXR generator</u>	
First (target) crystal	Si(111), Si(220)
Wedge gradient angle	3, 5 degree
Second (reflector) crystal	Si(111), Si(220)
X-ray energy region	
Si(111)	4.0 - 21 keV
Si(220)	7.0 - 34 keV
<u>X-ray exit port</u>	
Window material	125 μ m thickness polyimide film
Aperture diameter	100 mm
Distance from source point	\sim 7.34 m
Total X-ray photon rate	$10^6 - 10^8$ /s

ゲット結晶を入手したので、各々の傾斜角の違いによるターゲット結晶に入射する電子ビームの Bragg 角 (X 線エネルギー) および位置、第二結晶の角度における X 線トポグラフの振舞いを報告する。

2. 実験方法

LEBRA-PXR システムはターゲット結晶から X 線取り出しポートまでの距離 L が 7.34 m であり、PXR ビームは X 線取り出しポートから大気中に出る。ターゲット結晶は厚さ 0.2 mm の Si(220) 対称平板結

[#] inagaki@lebra.nihon-u.ac.jp

晶のエッジ部分を楔状にして、その傾斜面が非対称面になるようにした。傾斜角は 3 deg. および 5 deg. である。楔形の場合、電子ビームに対して垂直方向にターゲット結晶を移動させると、電子ビームの入射位置を結晶の対称面あるいは非対称面に変更することが可能である。第二結晶は厚さ 5 mm の Si(220) 平板結晶である。検出器にはイメージングプレート (IP) を用い、X 線取り出しポートの直後に設置した。Figure 1 に実験のセットアップ概略図を示す。

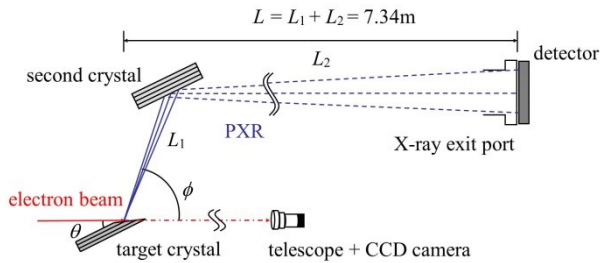


Figure 1: Schematic setup for the measurement of the X-ray topograph. The incident electron beam position on the target crystal was observed using the digital CCD video camera mounted on a telescope.

3. 実験結果

3.1 X線エネルギーとX線トポグラフ

楔形ターゲット結晶の傾斜角と PXR の X 線エネルギーを 7.0 - 34.0 keV と変更した場合における、X 線トポグラフの振舞いを調べた。電子ビームの入射位置はターゲット結晶の非対称面にした。本実験において、明度に関しては対数化したネガ像、また X 線トポグラフが明瞭になるようにコントラストを調整した。撮像時間は X 線エネルギーによって異なるが 5 - 10 分である (Figure 2)。次に、一例として PXR の X 線エネルギーが 14.0 keV、楔形ターゲット結晶の傾斜角が 5 deg. のときに着目した。X 線エネ

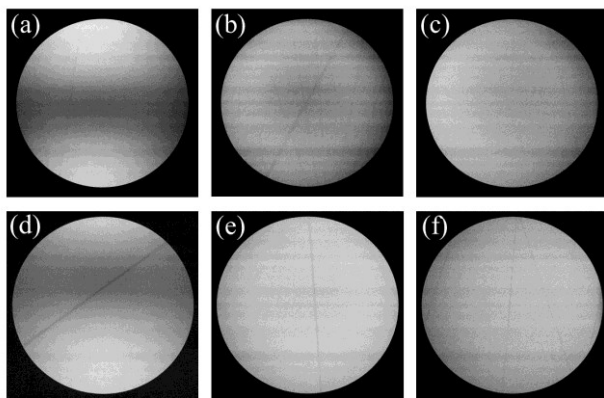


Figure 2: The X-ray topograph at each PXR energy. The PXR energy is (a) and (d) 7.0 keV, (b) and (e) 18.0 keV, (c) and (f) 28.0 keV. The gradient angle of the wedge-shaped target crystal is 5 degree (upper) and 3 degree (lower).

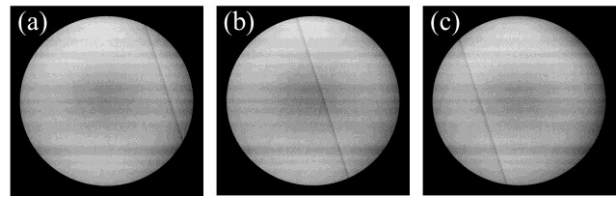


Figure 3: The X-ray topograph; the PXR energy is (a) 14.0 keV, (b) 14.25 keV and (c) 14.5 keV. The gradient angle of the wedge-shaped target crystal is 5 degree.

ルギーを 14.0、14.25、14.5 keV に変化させると、X 線トポグラフもそれに応じてシフトすることが確認できた (Figure 3)。撮像時間は 10 分である。これらの結果から、X 線トポグラフは同じ X 線エネルギー (Bragg 角) の場合でも楔の傾斜角によって違いが生じた。すなわち、X 線トポグラフは PXR ではなく、結晶に起因する現象であることがわかった。

3.2 電子ビームの入射位置と X 線トポグラフ

ターゲット結晶に入射する電子ビームの位置にお

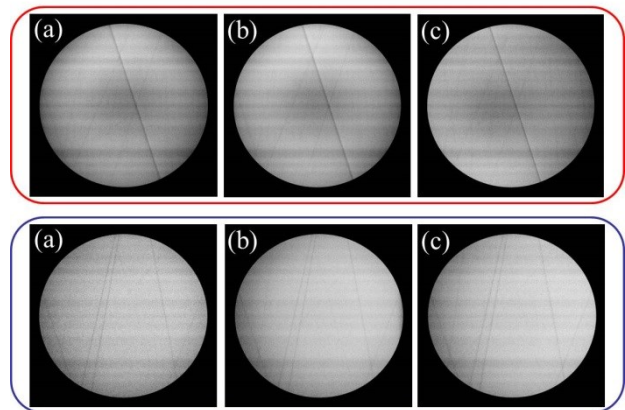
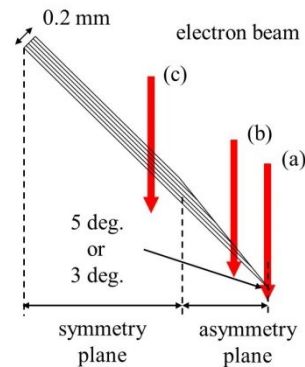


Figure 4: The position of the incident electron beam on the target crystal (upper), and the X-ray topograph at each position (lower). The incident electron beam position on the target crystal; (a) is the edge part of an asymmetry plane, (b) is an asymmetry plane and (c) is a symmetry plane. Red frame: the PXR energy is 14.25 keV and the gradient angle of the wedge-shaped target crystal is 5 degree. Blue frame: the PXR energy is 26.0 keV and the gradient angle of the wedge-shaped target crystal is 3 degree.

ける X 線トポグラフの振舞いを調べた。電子ビームの入射位置は、望遠鏡に取り付けられた CCD カメラを用いて、ターゲット結晶から発生する光学的遷移放射の位置から判断した (Figure 1)。PXR の X 線エネルギーは 14.25 keV と 26.0 keV である。撮像時間は楔の傾斜角または電子ビームの入射位置によって異なるが 8 - 15 分である (Figure 4 上)。ターゲット結晶の楔の傾斜角における X 線トポグラフの違いは生じたが、ターゲット結晶上の電子ビームの入射位置に対して明らかな違いは生じなかった (Figure 4 下)。この結果から、X 線トポグラフは対称面あるいは非対称面に関係なく、Bragg 角に依存することがわかった。また、結晶表面ではなく結晶内部の損傷などによって X 線トポグラフが発生していると考えられる。

3.3 第二結晶の角度と X 線トポグラフ

ターゲット結晶に入射する電子ビームの位置を非対称面に固定して、第二結晶の角度における X 線トポグラフの振舞いを調べた。PXR の X 線エネルギーが 14.25 keV のとき楔形ターゲット結晶の傾斜角が 5 deg. における第二結晶の回折曲線を Figure 5 上、また同様に X 線エネルギーが 26.0 keV のとき傾斜角が 3 deg. の回折曲線を Figure 6 上に示す。各々の傾斜角に対して、X 線強度が最大 (Figure 5 上(b)、Figure 6 上(b)) および半値 (Figure 5 上(a)(c)、Figure 6 上(a)(c)) になる第二結晶の角度における X 線トポグラフを Figure 5 下および Figure 6 下に示す。撮像時間は傾斜角および第二結晶の角度によって異なるが 8 - 15 分である。この結果から、第二結晶の角度を変化させても X 線トポグラフに違いが生じないことがわかった。すなわち、X 線トポグラフは

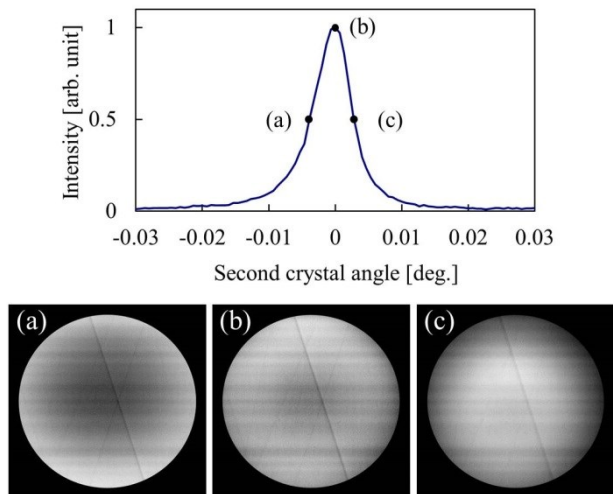


Figure 5: The normalized diffraction curve of the second crystal (upper), and the X-ray topograph of each crystal angle (lower); (a) is the low angle side where the X-ray intensity is half-value, (b) is the peak angle of the diffraction curve and (c) is the high angle side where the X-ray intensity is half-value. The gradient angle of the wedge-shaped target crystal is 5 degree, and the PXR energy is 14.25 keV.

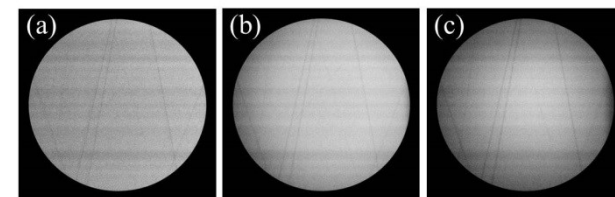
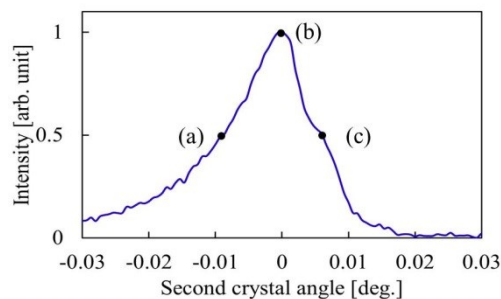


Figure 6: The normalized diffraction curve of the second crystal (upper), and the X-ray topograph of each crystal angle (lower); (a) is the low angle side where the X-ray intensity is half-value, (b) is the peak angle of the diffraction curve and (c) is the high angle side where the X-ray intensity is half-value. The gradient angle of the wedge-shaped target crystal is 3 degree, and the PXR energy is 26.0 keV.

ターゲット結晶から発生し、第二結晶でそのまま反射して輸送されていると考えられる。

4. まとめ

これまでの研究から LEBRA-PXR システムにおいて傾斜角 5 deg. の楔形 Si(220) ターゲット結晶を用いると、X 線トポグラフが発生することはわかっていた。今回新たに傾斜角 3 deg. の楔形 Si(220) ターゲット結晶を入手したので、各々の傾斜角の違いによる PXR の X 線エネルギー (Bragg 角)、ターゲット結晶における電子ビームの入射位置、第二結晶の角度に対する X 線トポグラフの振舞いを調べた。その結果、X 線トポグラフは PXR に由来するものではなく、ターゲット結晶から発生する現象であることがわかった。さらに、ターゲット結晶に入射する電子ビームの角度 (Bragg 角) にのみ依存した。また、X 線トポグラフの様子は全て線形であり、結晶表面ではなく結晶内部の損傷などによって発生していると考えられる。

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", NIM. B 227 2005, http://ac.elsa-cdn.com/S0168583X04008298/1-s2.0-S0168583X04008298-main.pdf?_tid=b813bba0-34ee-11e5-aad8-00000aab0f02&acdnat=1438063740_fc5533a9ffbfc2625a3711bc195651ef
- [2] Y. Hayakawa et al., "Improvement in the performance of the X-ray source based on parametric X-ray radiation using a wedge-shaped target crystal", IL NUOVO CIMENTO 34 C,

N.4, pp. 253-259, 2011.

- [3] Y.Hayakawa et al., "X-ray imaging using a tunable coherent X-ray source based on parametric X-ray radiation", Journal of Instrumentation Vol. 8, 2013, http://iopscience.iop.org/1748-0221/8/08/C08001/pdf/1748-0221_8_08_C08001.pdf
- [4] M.Inagaki et al., "Wavelength Dispersive X-ray Absorption Fine Structure Imaging by Parametric X-ray Radiation", Japanese Journal of Applied Physics 47 2008, http://iopscience.iop.org/1347-4065/47/10R/8081/pdf/1347-4065_47_10R_8081.pdf
- [5] M.Inagaki et al., "IMPROVEMENT IN XANES MEASUREMENT USING PARAMETRIC X-RAY SOURCE", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Aug. 8-11, 2012, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS132.pdf
- [6] M.Inagaki et al., "INFLUENCE OF X-RAY TOPOGRAPH FOR IMAGE ACQUISITION USING PARAMETRIC X-RAY RADIATION", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 2-6, 2013, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUP1/SUP108.pdf