

## IMPROVEMENT IN THE PERFORMANCE OF THE PXR SOURCE USING A WEDGE-SHAPED TARGET CRYSTAL

Yasushi Hayakawa\* <sup>A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Manabu Inagaki<sup>A)</sup>, Takao Kuwada<sup>A)</sup>, Keisuke Nakao<sup>A)</sup>,  
Kyoko Nogami<sup>A)</sup>, Isamu Sato<sup>B)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University,  
Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501

<sup>B)</sup>Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities, Nihon University,  
Goban-cho 12-5, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8251

### Abstract

The PXR emission from asymmetric cut-surface of the target was recently studied to improve the low X-ray intensity due to low average electron beam current from the LEBRA linac. The experimental results suggested that the use of the asymmetric cut-surface was quite effective in increasing the PXR intensity. However, the deterioration was observed in the spectral resolution and the spatial coherence at the same time. To solve the problem Si(111) crystal plates with wedge-shaped cross section have been tested as the PXR targets. As the result of the imaging experiment, the image blur caused by the degradation of the spatial coherence has been suppressed by the use of PXR from the wedge-shaped asymmetric cut surface; the advantage of the PXR intensity from the asymmetric cut surface has not suffered any significant reduction. The reduction of the exposure time has made it possible to carry out an experiment of computed tomography (CT) by diffraction-enhanced imaging in a practical machine time, and phase-contrast tomograms with PXR have been demonstrated for a biological organ at an X-ray energy of 17.5 keV.

## 楔型ターゲット結晶によるPXR線源の性能改善

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research and Application) では、125 MeV 電子リニアックを利用したX線源を開発し、近赤外自由電子レーザー (FEL: free electron laser) とともに共同利用光源としてX線ビームの供給を実施している [1,2]。これはパラメトリックX線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) と呼ばれる現象を放射原理として採用しており、リニアックからの相対論的な電子ビームを結晶に照射することによって連続エネルギー可変で単色なX線ビームが得られる [3,4]。LEBRAのPXR線源は電子ビームを照射して線源となるターゲット結晶と、発生するPXRビームを回折により輸送する第2結晶で構成されているが、そのX線ビームは $1/\gamma$ 広がりのため照射野が比較的大きくとることができ、また空間コヒーレンスにも優れているため、X線イメージングが主な応用となっている [5]。

線源となるターゲット結晶には、結晶の完全性、電子照射に対する耐久性、コストなどの理由によりシリコン単結晶を用いてきた。結晶面としてSi(111)面を用い、5~20 keVのX線を供給してきたが、最近ではSi(220)面の利用により、34 keVまでのPXRの発生を達成している [6]。当初は結晶のカット面が使用結晶面とほぼ一致するようにした、Braggケース対称結晶を用いてきたが、X線強度の増強を狙った非対称結晶面の利用にも着手した [7]。非対称カットの効果により、得られるPXR強度は増加したが、X線の品質の悪化を示す現象も見られた。これは対称結晶の場合に結晶のエッジ部分に電

子ビームを照射した際に観測された現象と同様であり、ターゲット結晶の形状に検討の余地があることを意味している。そこで対称平板結晶のエッジを楔状にカットし、非対称面を形成した結晶を用意し、X線品質の悪化を抑制しながら高強度化が可能かどうか調べることにした。

### 2. ターゲット結晶エッジ効果

日本大学LEBRAでは、2004年のPXR線源運用開始以来、ターゲット結晶には図1(a)のようにSi(111)面が結晶のカット面となっている対称結晶が用いられてきた。また最近の研究において、PXRの結晶外部への取り出し効率向上による強度増強を狙って、図1(b)のようなカット面が非対称となっているターゲット結晶が用いられた。多目的な実験のためにエッジを楔状にし、裏側の傾斜面が対称面となるようにした。この非対称結晶では得られるX線量が増加し、より短時間でのX線像の取得が可能となった。非対称面の利用は強度の面

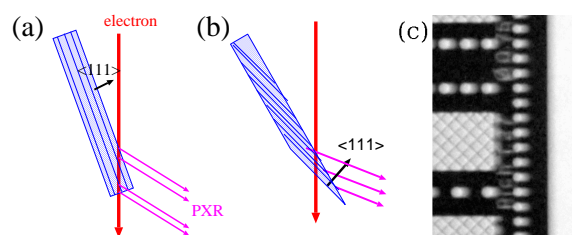


図1: (a): Si(111) 対称結晶; (b): 6.5° 非対称結晶; (c): 伝播距離 2.2 m の IC ゲージ像@17.5keV。

\*E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

では利点となったが、X線の品質面では問題が生じた。図1(c)に試料と検出器間の伝播距離を2.2m(ターゲット結晶-試料の間の距離は7.3m)にしたときに得られたX線像を示すが、水平方向に強いブレが見られた。この現象は、対称結晶の場合でもターゲットのエッジ周辺に電子ビームを照射したときに観測されており、またPXRビーム輸送用の第2結晶の角度に対する依存性がある<sup>[9]</sup>。こうしたことから、ターゲット結晶のエッジから放出されるPXRビームは、境界条件の違いから僅かに方向の異なる2本のX線ビームの重ね合わせとなっており、その結果としてX線像のブレが生じたものと考えられる。これはエッジ部分の形状の工夫により、ある程度抑制できる可能性もあり、新しい形状のターゲット結晶を用意し、試験することにした。

### 3. 楔型ターゲット結晶

図1(b)の非対称結晶でX線像のブレが生じたことから、裏面に不連続な境界があることが悪影響を及ぼすことが考えられた。そのため、新しいターゲット結晶として図2(a)のような楔型のターゲット結晶を試すことにした。これは厚さ0.2mmの対称平板結晶のエッジ部分を楔状にし、その傾斜面が非対称面となるようにしたものである。楔の傾斜角としては、1.15°と6.5°の2種類用意した。特に6.5°のものは、X線エネルギーが17.5keVのときに非対称面が電子ビームと平行な、grazing入射と呼ばれる状態になり、PXRの結晶からの放出効率の向上が期待できる<sup>[10]</sup>。これらのターゲット

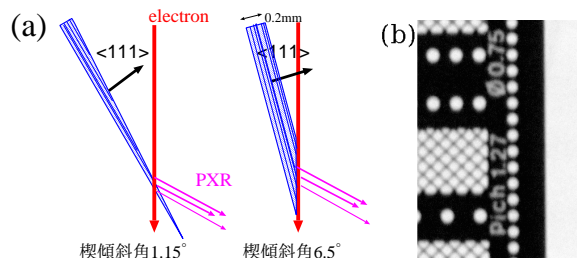


図2: (a): 傾斜角1.15°および6.5°の楔型結晶; (b): 6.5°楔型ターゲットの場合に得られた、伝播距離2.2mのX線像@17.5keV。

結晶を用い、同様に伝播距離2.2mのイメージング実験を実施したが、両者とも対称結晶や旧非対称結晶のときのようなX線像のブレは観測されなかった。図2(b)がその例である。この結果、ターゲット結晶を楔型にすることで、エッジ効果による空間コヒーレンスの悪化を抑制できることがわかった。

また楔型ターゲット結晶の場合、第2結晶における回折曲線の幅が狭くなる傾向があることがわかってきた。図3にPXRエネルギーが13.5keVのときの規格化された回折曲線の比較を示すが、楔型ターゲットの場合、対称結晶や旧非対称結晶と比べて回折幅が数分の1となっている。リニアックの運転パラメータの違いもあって単純比較はできないが、楔型ターゲットでは、結晶から放出されるPXRのスペクトル線幅が従来のターゲット結晶から得られるものより狭くなっている可能性が示唆される。また、回折幅が狭くなることによりピークが高くなる、すなわち第2結晶での輸送効率が向上

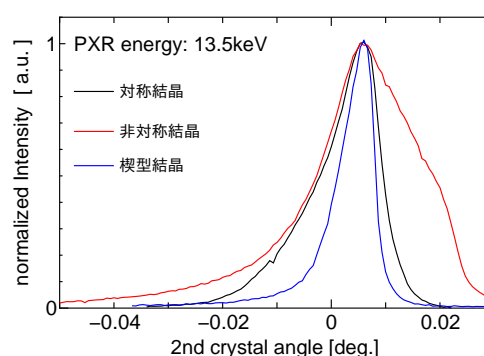


図3: PXRエネルギー13.5keVのときの第2結晶回折曲線の比較。

することが期待できる。その結果、ターゲットから放出されるPXRの総量については旧非対称結晶に及ばずとも、2結晶システムから取り出され利用できる線量としては同等以上のものが得られている。そのため、リニアックの平均ビーム電流が2~3μAのときに得られるX線光子数は10<sup>8</sup>/s程度となり、フラットパネル検出器(FPD: flat-panel detector)のような比較的検出効率の高いイメージセンサーを使用すれば、通常のX線吸収像ならば図4のように10秒程度での撮像が可能となった。この光子数は、非対称面の効果によりターゲット結晶内部でのPXRの消衰が無視できると仮定すれば、実効厚1mmのシリコン結晶から得られる量としてはPXRの理論計算と概ね整合する<sup>[11]</sup>。ここで、楔型ターゲットを用いた現状のLEBRA-PXR線源の主なパラメータを表1に示す。

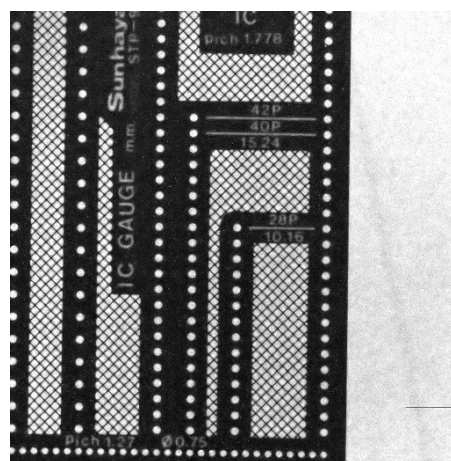


図4: FPDを用い、撮像時間10秒で取得したICゲージのX線像@17.5keV。FPDのピクセルサイズは50μm×50μm。

また、楔傾斜角1.15°と6.5°のターゲットから得られるX線強度を17.5keVにおいて比較すると、6.5°のターゲット結晶から得られるPXRの方がやや強くなる傾向はあったが、明確にgrazing入射の効果が現れたとは言い難い差であった。より高強度のX線が得られる条件については、最適な楔傾斜角や裏面对称面の寄与も含め、今後も探求していく必要がある。

表 1: 現在の LEBRA-PXR 線源の主なパラメータ

|               |                  |
|---------------|------------------|
| 電子エネルギー       | 100 MeV          |
| 加速周波数         | 2856 MHz         |
| マクロパルスビーム電流   | 120 – 135 mA     |
| マクロパルス幅       | 4 – 10 $\mu$ s   |
| 繰り返し          | 2–5 pps          |
| 平均電流          | 1 – 3 $\mu$ A    |
| X 線エネルギー      |                  |
| Si(111) ターゲット | 5 – 20 keV       |
| Si(220) ターゲット | 6.5 – 34 keV     |
| 照射野サイズ@X 線窓   | 直径 100 mm        |
| X 線光子数@X 線窓   | $10^7 - 10^8$ /s |

#### 4. 回折強調イメージング

楔型ターゲットの導入によりエッジ効果による X 線の品質悪化が抑制されたことは、X 線位相コントラストイメージングにとって特に大きなメリットとなる。位相コントラスト法の中で、結晶の回折を用いて X 線の屈折を検出する方法は回折強調イメージング (DEI: diffraction-enhanced imaging) と呼ばれており、位相感度に優れ軽元素物質のイメージングに適しているが、X 線には数  $\mu$ rad の屈折角が測れるほどの平面波性が要求される [12]。PXR は円錐ビームでありながら、図 5 のような実験セットアップで実際に DEI に成功しており、特に線源であるターゲット結晶から 10 m 以内の距離で大面積の撮像が可能なのは特筆すべき点となっている [13, 14, 15, 16]。

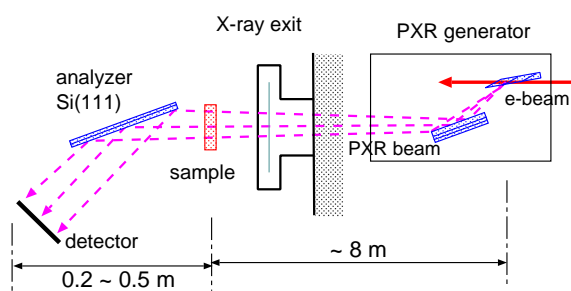


図 5: 上から見た PXR-DEI 実験のセットアップ。

この DEI というイメージング手法では、アナライザー結晶の角度により、X 線の屈折を定量的に扱うことができるので、屈折の向き異なる複数の DEI 像を用いた演算により、X 線の吸収の寄与と位相シフト (屈折) の寄与を分離して画像化することが可能となる。図 6 は 17.5 keV の PXR ビームを用いた DEI 実験の結果であるが、屈折の向きが逆の 2 枚の DEI 像の加算により吸収コントラスト像が、減算により位相コントラスト像が得られている。図 6 の場合、各 DEI 像はアナライザー結晶回折曲線の半値で、I.I.CCD を用いて撮像時間 30 秒で取得したものであり、合計 1 分の撮像時間で 2 種類の像が得られたことになる。楔型結晶の導入によって、高強度化と空間コヒーレンスの向上の両立が可能となり、それが位相コントラスト像取得時間の短縮につながって

いる。また、リニアック自体も 0.01°C の温度制御の導入により安定性が向上し、DEI で得られる像の品質を長時間維持することが可能となった [17, 18]。これらの改善により、サンプルを回転させながら DEI を撮像するコンピュータトモグラフィ (CT: computed tomography) 実験を、現実的なマシンタイム内で実施することが可能となった。図 7 は DEI で得られた位相コントラスト像から再構成されたマウス腎臓の断層像である。各プロジェクションには 30 秒で取得した DEI 像 2 枚が用いられ、2° 刻みの試料回転で 90 プロジェクションの取得を行ったので、正味の撮像時間の合計は 5400 秒であった。画像の保存などを手動で行っていたため実時間では 3 時間程度掛かっているが、自動化や高性能検出器の導入が進めば、基礎研究としては十分高品質な CT 画像のマシンタイム内での取得が期待できる。

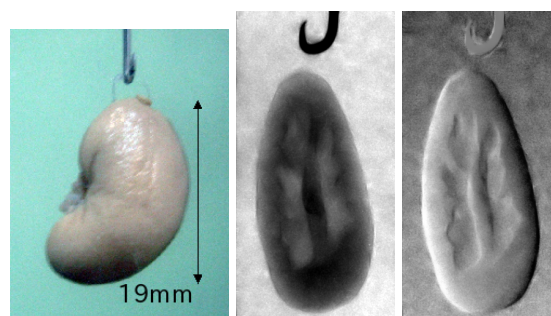


図 6: マウス腎臓 (左) をサンプルとした DEI 実験結果; I.I.CCD を用い各 30 秒で撮像された DEI 像 2 枚の演算により得られた吸収コントラスト像 (中) および位相コントラスト像 (右) @17.5keV。

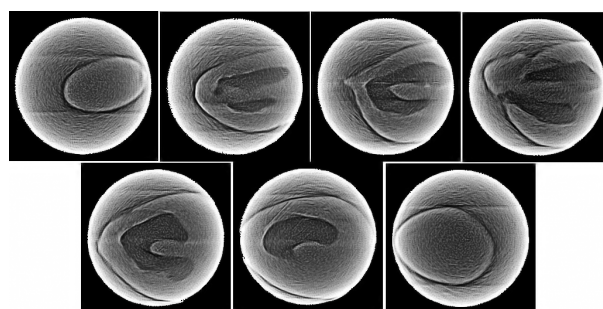


図 7: DEI 位相コントラスト像の CT で得られた位相断層 @17.5 keV。

#### 5. 今後の予定・課題

楔型のターゲット結晶の導入により、空間コヒーレンスなどの悪化を抑制しながら X 線量を増強することに一定の目処が立った。次の試験としては、Si(220) 面を用い、楔傾斜角を 5° としたターゲット結晶を用意し、34 keV の PXR の高強度化と高品質化の両立を試みる予定である。特に 25 keV 以上の高エネルギー領域での DEI や CT の実験は、医療機器としての PXR 線源の開発を推進する上で、重要となってくる [19]。

また、楔型ターゲット結晶における高強度化については、裏面对称面が果たす役割にも興味深いところがあ



り、PXR の物理現象としての原理的な研究も進展させる必要がある。今後も様々な境界条件を持ったターゲット結晶を用意し、検証を行うとともに、PXR 線源の更なる高強度化を模索していく。

## Acknowledgments

本研究の一部は科研費 (課題番号: 21560055, 21686088) および日本大学学術助成金 (総 09-024) の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa and T. Tanaka, Nucl. Instrum. Methods B **227** (2005) 32.
- [2] Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, K. Yokoyama, T. Kuwada, A. Mori, K. Nogami, T. Sakai, K. Kanno, K. Ishiwata, K. Nakao, 第 1 回日本加速器学会年会・第 29 回リニアック技術研究会 (2004) 60.
- [3] M. L. Ter-Mikaelian, *High-energy electromagnetic processes in condensed media* (Wiley-Interscience, New York, 1972).
- [4] V. G. Baryshevsky and I. D. Feranchuk, Nucl. Instrum. & Methods **228** (1985) 490.
- [5] Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, A. Mori, T. Kuwada, T. Sakai, K. Nogami, K. Nakao and T. Sakae, Nucl. Instrum. & Methods B **252**, (2006) 102.
- [6] Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kaneda, T. Kuwada, K. Nakao, K. Nogami, Y. Numata, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, K. Sekiya, M. Suemitsu, Y. Takahashi, T. Tanaka, H. Yamamoto, 第 6 回日本加速器学会年会 (2009) 748.
- [7] Y. HAYAKAWA, K. HAYAKAWA, M. INAGAKI, T. KUWADA, K. NAKAO, K. NOGAMI, T. SAKAI, I. SATO, Y. TAKAHASHI, T. TANAKA, 第 5 回日本加速器学会年会・第 33 回リニアック技術研究会 (2008) 69.
- [8] Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kuwada, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi and T. Tanaka, CHARGED AND NEUTRAL PARTICLES CHANNELING PHENOMENA Channeling 2008 (World Scientific, Singapore, 2010) 677.
- [9] Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kuwada, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. S. I. Sato, Y. Takahashi and T. Tanaka, Nucl. Instrum. & Methods B **266** (2008) 3758.
- [10] I. D. Feranchuk and S. I. Feranchuk, Eur. Phys. J. Appl. Phys. **38**, (2007) 135.
- [11] H. Nitta, *Phys. Lett. A* **158** (1991) 270.
- [12] R. Fitzgerald, *Phys. Today* **53** (2000) 23.
- [13] Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kuwada, A. Mori, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi and T. Tanaka, Proceedings of SPIE **6634** (2007) 663411-1.
- [14] T. Kuwada, Y. Hayakawa, K. Nogami, T. Sakai, T. Tanaka, K. Hayakawa and I. Sato, AIP Conference Proceedings **879** (2007) 1968.
- [15] 高橋由美子, 早川恭史, 桑田隆生, 境武志, 中尾圭佐, 野上杏子, 田中俊成, 早川建, 佐藤勇, X 線分析の進歩 (Adv. X-ray Chem. Anal. Japan) **40** (2009) 269.
- [16] Y. Takahashi, Y. Hayakawa, T. Kuwada, T. Sakai, K. Nakao, K. Nogami, M. Inagaki, T. Tanaka, K. Hayakawa, I. Sato, AIP Conference Proceedings **1221** (2010) 119.
- [17] 境武志, 非破壊検査 **57** (2008) 282.
- [18] T. Sakai, T. Kuwada, M. Inagaki, I. Sato, T. Tanaka, K. Hayakawa, Y. Hayakawa, Y. Takahashi, K. Nakao, K. Nogami, Proceedings of LINAC08 (Sep. 29 - Oct. 3, 2008, Victoria, Canada) (2009) 331.
- [19] I. Sato et al., 第 6 回日本加速器学会年会 (2009) 752.