

STATUS OF THE PXR INSTRUMENTATION AT LEBRA, NIHON UNIVERSITY *

Yasushi Hayakawa[†], Ken Hayakawa, Manabu Inagaki, Takao Kuwada, Keisuke Nakao,
Kyoko Nogami, Takeshi Sakai, Isamu Sato, Yumiko Takahashi, Toshinari Tanaka
Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University,
Narashinodai 7-24-1, Funabashi, 274-8501

Abstract

The X-ray beamline based on parametric X-ray radiation (PXR) has satisfactorily worked since its commissioning at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University. At the PXR beamline, diffraction-enhanced imaging and absorption spectroscopy are main applications because of the coherence and the monochromaticity. To improve the quality of experiments, the cooling-water systems for the linac and the PXR target crystal were replaced. As the results, the stability of the PXR beam was drastically improved. The electron beam size on the target and the time structure of the PXR intensity were observed in order to investigate the PXR property in detail. These results suggest that the PXR performance is restricted by the distortion of the target crystal.

日大LEBRA-PXRビームラインの活動状況

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、相対論的荷電粒子と結晶媒質との相互作用によって発生するパラメトリック X 線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) を利用した X 線源を開発し運用している。100 MeV の電子ビームによってエネルギー可変な単色 X 線ビームを発生させることが可能であり、2004 年より利用実験へのビームの供給を開始している。PXR ビームラインにおける現在の主な応用はイメージングと X 線吸収微細構造 (XAFS: X-ray absorption fine structure) であるが、特に PXR のエネルギー分散特性を利用したエネルギー分散型 XAFS (DXAFS) や優れた空間コヒーレンスに基づく位相コントラストイメージングの比率が高くなってきている。位相コントラストイメージングに関しては、伝播によるエッジ強調の手法だけではなく完全結晶分光器を用いた回折強調イメージング (DEI: diffraction enhanced imaging) にも成功しており、PXR の優れた空間コヒーレンスを実証している^[1]。DXAFS や DEI の実験の場合、現状では測定手法開発という側面が強く、また PXR 自体の特性研究も必要なため、加速器施設サイドが主導的に進めている。

このように、DXAFS や DEI のような PXR の特長を生かすことのできる応用において進展を見せているが、これらの実験には高性能の X 線ビームと測定系が必要となる。特に DEI の測定においては主に温度変動に起因する PXR ビームの不安定性が問題となっていたが、リニアックの水冷システムの更新などにより安定性が劇的に向上した。また、遷移放射 (OTR: optical transition radiation) を利用した電子ビームのプロファイルモニタを導入し、PXR のターゲット上で

の電子ビームサイズを観測可能にした。このような PXR ビームラインの整備を進めていった結果、実験データの質の向上とともに、PXR の興味深い振舞も観測されるようになった。これら、PXR ビームラインの現状について報告する。

2. 水冷システム更新による安定化

LEBRA-PXR のシステムではリニアックの精密温調からの冷却水を PXR ターゲット結晶ホルダーの冷却に用いていた。しかし、水圧が高いため振動が発生し、水自身を媒介して結晶に伝播していた。また、精密温調の制御精度も十分ではなかったため、ターゲット結晶の冷却系を試験的に PC の CPU 水冷キットを流用した独立で低圧なものに切り替えた。温度コントロールは行っていないので室温に依存しているが、PXR 発生装置が設置されている加速器室は室温の変化が少なく、冷却水の変動も短周期で ± 0.02 °C、長周期で 0.02 °C / 3 時間程度に抑えられている。これにより、PXR ビームの安定度は大幅に向上した。それに加え、リニアックの性能改善のため、冷凍機や精密温調の更新を進め、その結果として加速管の温度変動が ± 0.01 °C 以下に抑制されるようになった^[2]。電子ビームの安定化の効果も加わり、PXR ビーム強度の変動はさらに減少し、図 1 に示すように、当初 ± 10 % 近くあった変動が、現在は ± 2 % 以下にまで改善されている。

この水冷系改善による安定化は、DEI においてアナライザー結晶による回折の再現性向上をもたらし、結果として位相イメージの鮮明度が改善に寄与している^[3]。しかしながら、現在のターゲット結晶ホルダーの冷却系は暫定的なものであり、温度制御や耐久性という点で問題がある。リニアック水冷系の制御精度は、精密温調を更新した結果十分満足なものとなっているので、ターゲット結晶の冷却も水圧を

* 文部科学省学術フロンティア推進事業 (継続) 「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」(H.17 - H.19)

[†] E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

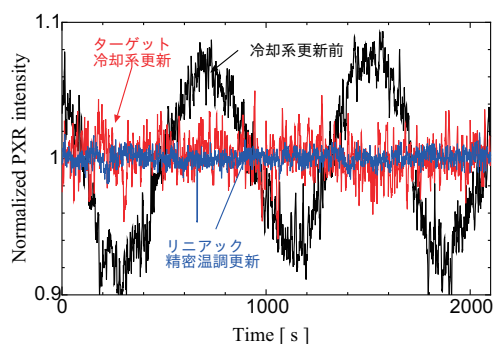


図 1: PXR ビーム強度の変動の様子。PXR のパルス当たりの強度は電離箱出力のパルス波高として測定。グラフは 2 秒間の移動平均を取っている。

低減するレギュレータを介して再びリニアック水冷系に組み込むことを予定している。

3. OTR によるビームプロファイルモニタ

LEBRA-PXR において、DXAFS と DEI が主要な利用研究になるにつれ、PXR ビームの品質を左右するパラメータとしてターゲット結晶上での電子ビームスポットサイズが重要な意味を持つようになってきた。そこでビームプロファイルモニタとして一般的に用いられている OTR をモニタすることにした。放射線対策として遮蔽壁の背後に設置された CCD カメラまで OTR を輸送し、それを望遠鏡で観測する必要がある。当初は光路の確保の容易さから、ターゲット結晶の前方 50 cm のところにアルミ板を挿入して OTR 発生源としたが、電子ビームの電離損失による発熱ですぐに穴が空いてしまった。そのため、PXR ターゲット結晶自体から放出されている OTR を観測する方針に切り替えた。光路が長くなり位置分解能が悪くなるデメリットはあるものの、熱的な問題はなくなり、また常時モニタとして用いることが可能となった。(図 2)

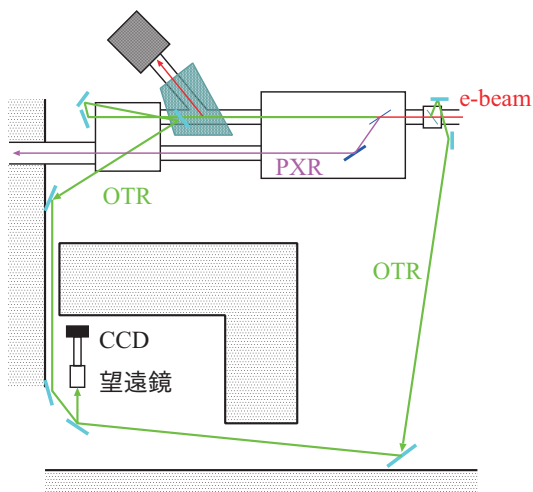


図 2: OTR モニタシステムの概略図。

4. 電子ビームサイズと結晶の歪み

ターゲット結晶上での電子ビームサイズは PXR ビームの質を決める重要な要素の 1 つである。例えば DX-AFS 実験の場合、測定のエネ르기分解能は原理的に水平方向の電子ビームスポットサイズに依存する [4]。また、一般的な X 線源では幾何光学に支配されるために線源サイズが X 線イメージの「ボケ」を決める要因になる。PXR の場合、線源の周期性に起因するコヒーレンスを有しており平面波的な振舞になるので、幾何光学的な概念は慎重に検証する必要がある。そこで、リニアックの四重極電磁石を用いてターゲット結晶上の電子ビームスポット形状の調整を行いながら、図 3 のようなセットアップで IC ゲージの X 線像の観測を行った (17.5 keV)。PXR ビームは電子ビームスポットを光源として、およそ $1/\gamma$ の広がりを持つため、このセットアップでは幾何学的に約 30% 拡大された X 線像が得られる。また、単純に幾何光学を適用すると、X 線像のエッジは光源サイズの約 30% 程度の幅のボケが生ずることになる。

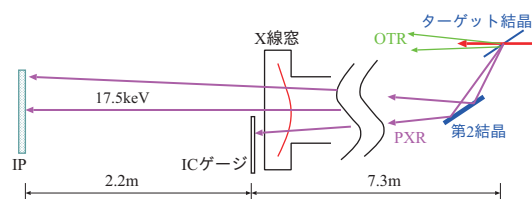


図 3: イメージ測定セットアップ。

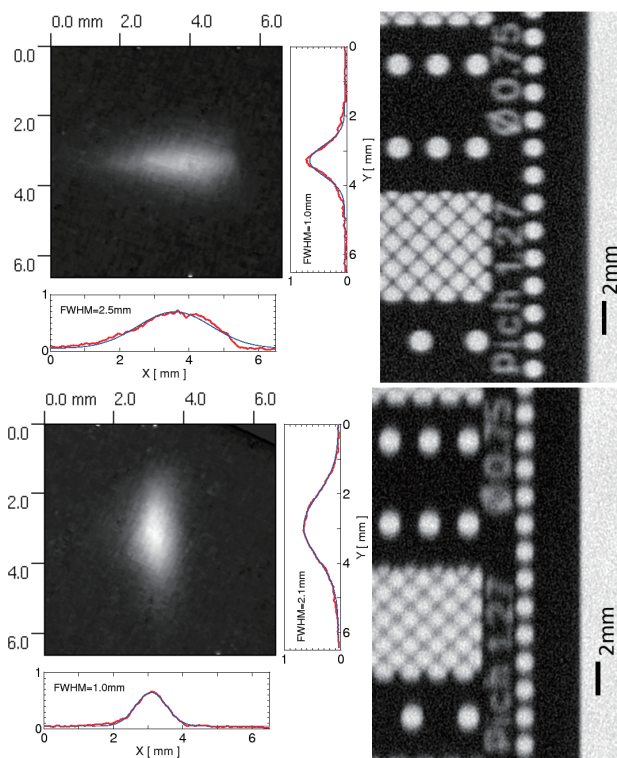


図 4: 電子ビームスポット形状と X 線像 (17.5 keV) の相関。X 線像のスケールは観測面上の値。

OTR によって観測された電子ビーム形状とともにその結果を図 4 に示す。垂直方向にビームが広がっている (半値幅で水平:1.0 mm; 垂直:2.1 mm) 場合は確かに X 線像にボケが認められるが、幅 150 μm のメッシュ線はまだ認識できている。一方、水平方向に広がっている (半値幅で水平:2.5 mm; 垂直:1.0 mm) ときはボケは少なくなっている。このような振舞は、単純な幾何光学では PXR の波面を扱うことができないことを示唆している。

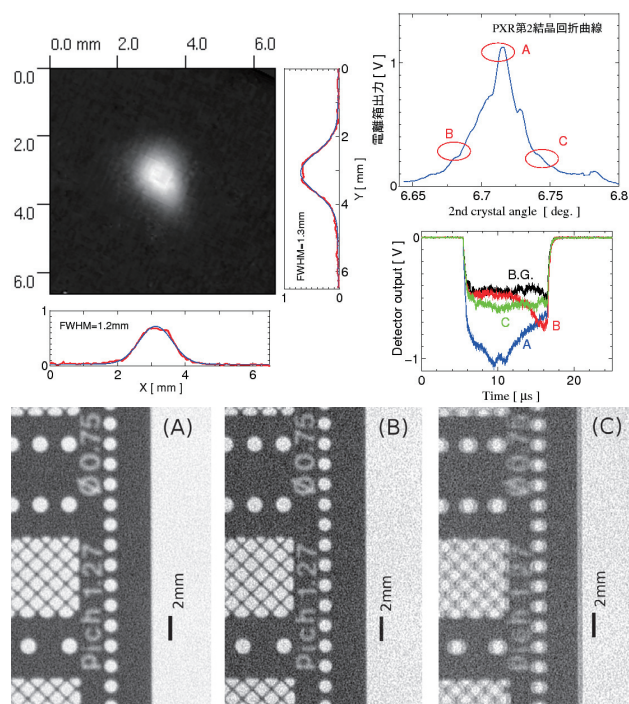


図 5: 第 2 結晶回折角をパラメータとした、PXR パルスの時間構造と X 線像の相関。

ここで、水平、垂直方向ともにバランス良く電子ビームを集束させた場合、図 5 に示すようにビーム直径は半値幅でおよそ 1.2 ~ 1.3 mm になった。CCD がやや飽和している感じなので、サイズを過大評価している可能性はあるが、それを考慮に入れても直径 1 mm 程度になると思われる。この場合について詳しく調べると、ターゲットから発生した PXR を輸送する第 2 結晶の角度によって PXR のパルス構造が変化する。この現象は電子ビームの照射によって発生するターゲット結晶の歪みに起因すると考えられ、歪みによって軸の方向が異なる結晶の寄与の重ね合わせの結果として PXR の時間構造が複雑になるものと思われる^[5]。図 5 において、第 2 結晶回折曲線とシンチレータ検出器で測定された PXR の時間構造の相関を示すが、回折曲線のピーク (A) のときに比べて低角側の裾野 (B) のほうが時間構造がシンプルで、X 線像もやや鮮明となっている。一方、高角側の裾野 (C) ではパルス的前半と後半では結晶の歪みの状態が異なっていると思われ、実際に X 線像も二重にダブったものが得られた。これらの結果は、PXR においてはターゲット結晶の歪みが X 線像のボケを発

生させる主要因であることを示唆している。また、現在はターゲット結晶をホルダーに機械的に固定しているため、電子ビーム照射にともなう動的な歪みばかりではなく静的な歪みも無視できない。特に電子ビームのスポットサイズが大きい場合、広く面積積分してしまうために結晶歪みの影響が出やすくなると思われる。

5. X 線窓の更新

これまで PXR ビームは厚さ 125 μm のポリイミド (カプトン) フィルムを窓として実験室の大気中に取り出されていたが、ここでのリークによる真空の悪化が問題となっていた。そこで排気系を強化するとともにポリイミドフィルムを片面アルミ蒸着したものに交換した。真空に関しては PXR 発生装置本体へのリークの影響は問題ないレベルにまで改善された。しかしその半面、アルミ蒸着したことによって X 線に対するレンズ効果が強くなり、DEI の測定に影響が出てしまっている。これについては現在対策を検討中である。

6. まとめと課題

冷却系のアップグレーに伴う PXR ビームの安定性向上および OTR モニタなど各種の測定系の整備により、電子ビームの状態と得られる PXR の特性の相関についてより詳細な情報が得られるようになってきた。電子ビーム形状をパラメータとした X 線像の観測結果は、ホルダーへの固定や電子ビーム照射に伴って生ずるターゲット結晶の歪みが PXR の性能を制約する大きな要因となっていることを示唆している。窓を含む X 線光学系の整備とともに、ターゲット結晶の歪み対策が今後の重要な課題である。

Acknowledgments

本研究の一部は科研費 (課題番号: 17760058, 17560046) および日大学術助成金 (総合: 04-019 & 05-029, TS) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa et al., "Advanced applications of PXR at LEBRA, Nihon University", Proceedings of SPIE Vol. 6634 (2007), DOI: 10.1117/12.741898.
- [2] T. Sakai et al., "日本大学リニアックの冷却水温度の精密制御", in these proceedings (2007) FP68.
- [3] I. Sato et al., "電子リニアックによる空間干渉 X 線源", in these proceedings (2007) FO01.
- [4] M. Inagaki et al., "電子ビーム条件と PXR のエネルギー分散分解能の相関", in these proceedings (2007) TP56.
- [5] K. Nogami et al., "日大 LEBRA-PXR 強度の時間構造", in these proceedings (2007) TP57.