

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：87202

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654078

研究課題名(和文)パラメトリックX線を利用した新しい電子ビームプロファイルモニタの開発

研究課題名(英文)Development of electron beam profile monitors using parametric X-ray radiation

研究代表者

高林 雄一 (TAKABAYASHI, Yuichi)

公益財団法人佐賀県地域産業支援センター九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・副主任研究員

研究者番号：50450953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：従来、リニアックの電子ビームのプロファイルモニタとして、可視遷移放射(OTR)が用いられてきた。しかし最近、X線自由電子レーザー用リニアックにおいて、OTRがコヒーレントになり、ビームのプロファイル測定に利用できないことが判明した。コヒーレントになることを避けるには、より波長の短い光を利用する必要がある。そこで、本研究では、パラメトリックX線(PXR)の利用を提案する。PXRを用いた測定法として、近接法、ピンホール法、フレネルゾーンプレート法という3つの手法を提案し、前者の2つに関して、原理の検証実験に成功した。さらに、残るフレネルゾーンプレート法に関する研究が進行中である。

研究成果の概要(英文)：A beam profile is extremely useful for the examination of the beam emittance and optical parameters associated with accelerators. Optical transition radiation (OTR) is commonly used as a high precision profile monitor for electron beams in linacs. However, it was found that for short beam bunches in linacs dedicated to X-ray free electron lasers, the OTR becomes coherent, making it unsuitable for use as a beam profile monitor.

In order to avoid this coherence, photons with shorter wavelengths are required. In this study, we propose to exploit parametric X-ray radiation through three new approaches: (i) a local method, (ii) a pinhole method, and (iii) a Fresnel-zone-plate (FZP) method. We have succeeded in performing proof-of-principle experiments on the local method and the pinhole method. In addition, we designed an experimental setup for the FZP method; its proof-of-principle experiment is in progress.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：パラメトリックX線 相対論的電子ビーム 結晶 ビームモニタ

## 1. 研究開始当初の背景

ビームのプロファイルは、ビームのエミッタンスや加速器電磁石の配置で決まる光学的関数を把握する上で重要であり、その測定は加速器分野において必要不可欠である。従来、電子ビームのプロファイルの測定には、蛍光板がよく用いられてきた。この手法では、電子ビームが蛍光板に入射した際に放出される蛍光を CCD カメラで捉えることにより、ビームのプロファイルが測定される。非常にシンプルな手法であるため、広く用いられてきた。しかし、蛍光板の内部で発生した光が散乱されて広がる効果、いわゆる“にじみの効果”により、ビームサイズが実際よりも大きく測定されてしまうという問題がある。

一方、より正確な測定が必要な場合には、可視遷移放射 (optical transition radiation: OTR) が用いられてきた。OTR とは、荷電粒子が誘電率の異なる物質の境界を横切るときに生じる放射現象である。OTR 用スクリーンとして、金属薄膜等が用いられている。この場合、OTR は金属薄膜の表面で生成されるため、にじみの効果はなく、正確な測定が可能となる。

しかし最近、X 線自由電子レーザー (X-ray free electron laser: XFEL) 施設であるアメリカの LCLS や日本の SPring-8 SACLA において、OTR がコヒーレントになり、ビームのプロファイル測定に利用できないことが判明した [1,2]。XFEL 用リニアックでは、ビームのパンチ長は短くなるよう調整されるが、パンチ内の微視的構造 (microstructure) が、その原因である。OTR がコヒーレントになると、もはや OTR の強度はビームの強度に比例しないため、ビームのプロファイル測定に利用できなくなるのである。また、ビームサイズが可視光の波長より小さい場合にも、OTR はコヒーレントになると考えられる。現在、世界規模で研究開発が進んでいる国際リニアコライダー (International Linear Collider: ILC) では、電子と陽電子の衝突頻度をあげるため、ビームを小さく絞ることが考えられているが、この場合も OTR はコヒーレントになると考えられる。

コヒーレントになることを避けるには、より波長の短い光を利用する必要がある。ロシアのトムスク工科大学のグループは、極端紫外 (EUV) 領域の遷移放射の利用を提案している [3]。しかし、EUV 光は物質中での吸収が大きいために、大気中に取り出すことが困難であるため、CCD カメラや光学系を真空中に設置しなければならないという問題がある。

そこで、本研究では、パラメトリック X 線 (parametric X-ray radiation: PXR) の利用を提案する。PXR とは、相対論的荷電粒子が結晶に入射した際に、ブラッグ条件を満たす方向に X 線が放射される現象である。入射荷電粒子のまわっている擬似的な光子が、結晶によって回折される現象と解釈することができる。

PXR は X 線であるため、波長は十分短く、XFEL 用の電子ビームを用いても、コヒーレントにはならない。また、EUV の遷移放射と異なり、ベリリウム窓等を用いれば、大気中に簡単に取り出すことも可能である。このように PXR は、パンチ長が極端に短い XFEL 加速器やビームサイズが極端に小さい ILC のような先端加速器用のビームプロファイルモニタとして有用であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、PXR を利用した、新しい電子ビームのプロファイルモニタを開発することである。後述するように、本研究では、電子ビームのプロファイルの測定法として、下記の 3 つの手法を提案する。

- (1) 近接法
- (2) ピンホール法
- (3) フレネルゾーンプレート法

本研究では、これら 3 つの手法に関して、原理の検証実験を行う。

## 3. 研究の方法

電子を結晶に入射させた際に発生する PXR のプロファイルは、PXR の角度分布、結晶におけるビームプロファイル、結晶におけるビームの角度分布の 3 者によって決まる。近似的に、PXR のプロファイルの大きさ  $\sigma_{\text{PXR}}$  は、次式のように書くことができる。

$$\sigma_{\text{PXR}} \approx \sqrt{(L\sigma'_{\text{PXR}})^2 + \sigma_{\text{beam}}^2 + (L\sigma'_{\text{beam}})^2}. \quad (1)$$

ここで、 $\sigma'_{\text{PXR}}$  は PXR の角度拡がり、 $\sigma_{\text{beam}}$  はビームの大きさ、 $\sigma'_{\text{beam}}$  はビームの角度拡がり、 $L$  は結晶から X 線検出器までの距離を示す。X 線検出器を結晶に十分近づけると ( $L \rightarrow 0$ )、(1)式から、 $\sigma_{\text{PXR}} \rightarrow \sigma_{\text{beam}}$  となる。つまり、PXR のプロファイルは、主にビームのプロファイルを反映するようになる。これが近接法の原理である。

近接法は、非常にシンプルな手法ではあるが、実験条件によっては、X 線検出器の放射線損傷が問題となり、X 線検出器を結晶に近づけられない場合もあると考えられる。そこで、X 線検出器を結晶から遠い位置に設置する“遠隔法”を提案する。この場合は、ビームの像を X 線検出器まで転送するための光学系が必要となる。本研究では、遠隔法として、ピンホール法とフレネルゾーンプレート法という 2 つの手法を提案する。

実験は、九州シンクロトロン光研究センター (SAGA Light Source: SAGA-LS) のリニアックからの 255 MeV 電子ビームを用いて行った。SAGA-LS のリニアック室には、相対論的電子ビームと結晶の相互作用研究を目的とし、2010 年に研究代表者らが構築した専用ビームライン [4] が備わっており、それを利用して実験を行った。ビームの平均電流は  $\sim 7$  nA、加速の繰り返しは 1 Hz であった。標的として、厚さ 20  $\mu\text{m}$  の Si 単結晶を用いた。

Si 結晶は、真空チェンバー内に収納された 2 軸回転可能なゴニオメーターに取り付けた。以下、手法ごとに詳述する。

### (1) 近接法

図 1 に近接法の実験装置の概念図を示す [5]。回折面は Si の(220)面、ブラッグ角は  $13^\circ$  とした。この場合、ブラッグエネルギーは 14.4 keV と計算される。X 線検出器として、大きさ  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  のイメージングプレートを採用した。イメージングプレートは、感度のリニアリティが高い、位置分解能が高い、検出面積が大きい、扱いやすいなど多くの長を持つ。光源点になるべく近づけるために、イメージングプレートも真空チェンバー内に設置した。光源点からイメージングプレート上の回折スポットまでの距離は 55.6 mm であった。ビームを遮らないようにするため、イメージングプレートの中心には直径 20 mm の穴をあけた。

### (2) ピンホール法

この手法は、いわゆるピンホールカメラの原理に基づくものである。図 2(a)にピンホール法の実験装置の概念図を示す[6]。回折面は Si の(220)面、ブラッグ角は  $16.1^\circ$  とした。この場合、ブラッグエネルギーは 11.6 keV と計算される。PXR は、 $32.2^\circ$  方向にある厚さ 250  $\mu\text{m}$  のベリリウム窓を通して大気中へと取り出した。X 線検出器として、大きさ  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  のイメージングプレートを用いた。ピンホールプレートの材質はタングステン、厚さは 2 mm、ピンホールの直径は 200  $\mu\text{m}$  であった。光源点からピンホールまでの距離は  $d_1 = 421 \text{ mm}$ 、ピンホールからイメージングプレートまでの距離は  $d_2 = 210.5 \text{ mm}$  とした。この場合、ピンホールカメラの倍率は  $M = d_2/d_1 = 0.5$  と計算される。

比較のため、OTR を用いたビームプロファイルの測定も行った。その実験装置の概念図を図 2(b)に示す。Si 結晶を  $45^\circ$  傾け、 $90^\circ$  方向に放出される OTR を、真空窓を通して取り出し、CCD カメラで捉えた。

### (3) フレネルゾーンプレート法

図 3 にフレネルゾーンプレート法の実験装置の概念図を示す。フレネルゾーンプレート

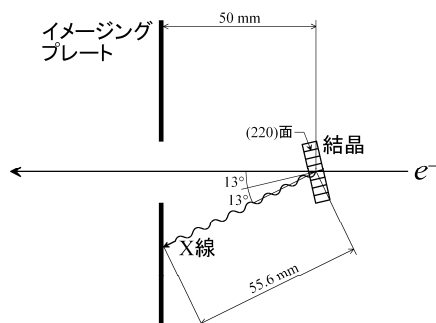


図 1：近接法の実験装置の概念図。

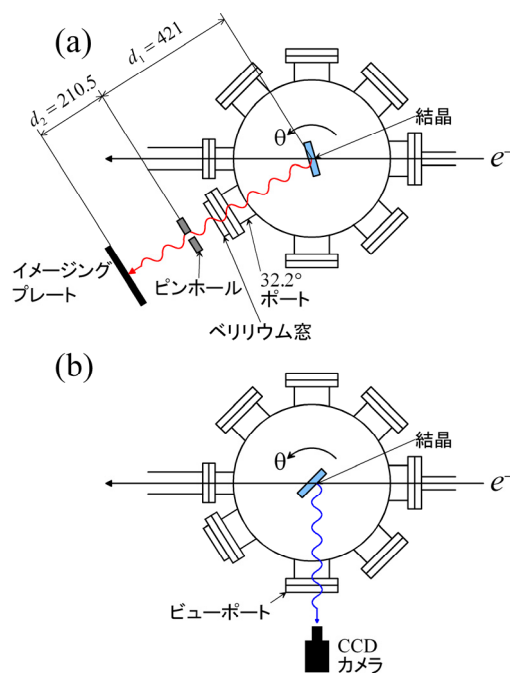


図 2：(a) ピンホール法の実験装置の概念図。(b) OTR を用いたビームプロファイル測定の概念図。

とは、X 線の透過帯と不透過帯が、交互に同心円状に配置されたものであり、X 線領域においてレンズとしての働きを持つ。図 3 には、フレネルゾーンプレートを 2 枚用いた例 (X 線のエネルギーは 7.1 keV、倍率は 2 倍) を示した。フレネルゾーンプレートを 2 枚用いることにより、倍率の調整が柔軟に行えるようになる。また、2 枚目のプレートは高次光を抑制する働きもある。X 線吸収体は、非回折光 (0 次光) を遮るために用いる。

## 4. 研究成果

### (1) 近接法

イメージングプレートを用いて測定した PXR のプロファイルを図 4(a)に示す。測定時間は、60 s であった。PXR の収量は計算により、 $\sim 7 \times 10^6$  と見積もられる。青い丸は、イメージングプレートにあけた穴を示す。イメージングプレートをビームに近づけたため、バックグラウンドは大きかったが、PXR のプロファイルを明瞭に観測することに成功した。縦長のプロファイルが得られたが、これは、入射したビームが縦長であったことを反映している。

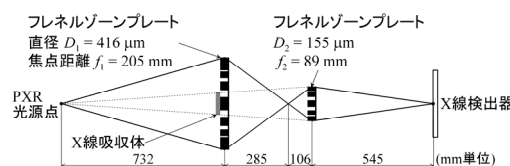


図 3：フレネルゾーンプレート法の実験装置の概念図。

図 4(b)と(c)は、それぞれ、水平と鉛直方向のプロファイルを示す。これらのプロファイルは、主にビームのプロファイルを反映しているが、正確には PXR の角度分布も畳み込まれている。つまり、PXR のプロファイルからビームサイズを導出するためには、PXR の角度分布をデコンボリュートする必要がある。そこで、理論計算により、ビームサイズと PXR プロファイルの大きさの対応関係を求めた。結果を図 5 に示す。横軸はビームサイズ  $\sigma$  (ガウス関数で表したときの標準偏差)、縦軸はビームサイズを考慮して理論計算により求めた PXR プロファイルの半値半幅 (half width at half maximum: HWHM) を示す。この図の対応関係を使えば、観測された PXR のプロファイルからビームサイズを導出することができる。

図 4(b)と(c)から、PXR プロファイルの半値半幅は  $\Delta x_{\text{HWHM}} = 0.64 \text{ mm}$ ,  $\Delta y_{\text{HWHM}} = 1.31 \text{ mm}$  と求められた。イメージングプレートが垂直入射条件から  $26^\circ$ 傾いていることを考慮すると、 $\Delta x_{\text{HWHM}} = 0.64 \cos(26^\circ) = 0.57 \text{ mm}$  と補正される。図 5 の対応関係を用いると、これらの半値半幅からビームサイズは、 $\sigma_x = 0.15 \text{ mm}$ ,  $\sigma_y = 0.76 \text{ mm}$  と導出された。別途、結晶位置にスクリーン (厚さ  $100 \mu\text{m}$  のアルミナ蛍光板) を設置してビームサイズを測定したところ、 $\sigma_x \cong 0.2 \text{ mm}$ ,  $\sigma_y \cong 0.7 \text{ mm}$  と求められた。これらの値は、PXR のプロファイルから得られた値とよく一致した。このように、本研究により、近接法の原理の検証実験に成功したといえる。

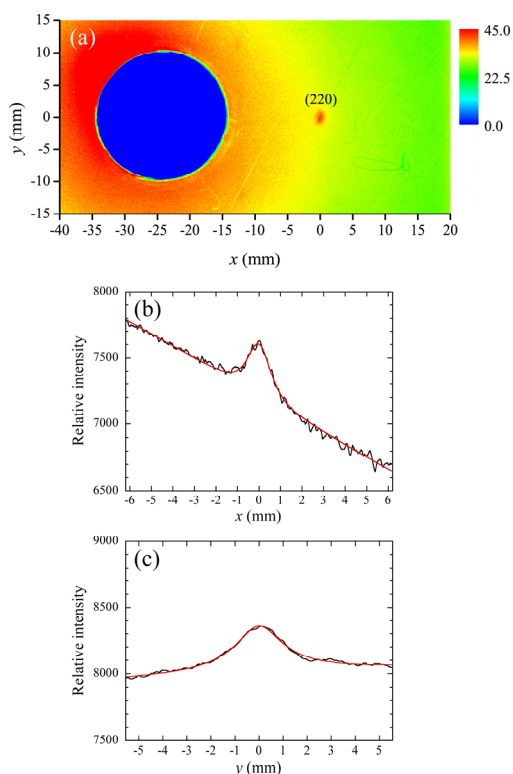


図 4 : (a) PXR の 2 次元のプロファイル。 (b) 水平プロファイル。 (c) 鉛直プロファイル。 赤の実線は、あるモデル式によるフィットを示す。

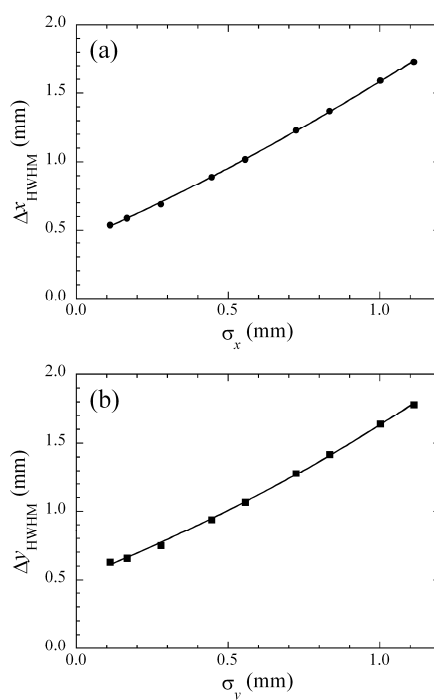


図 5 : 理論計算により求めたビームサイズと PXR プロファイルの大きさ (半値半幅) の関係。 (a) 水平方向, (b) 鉛直方向。

## (2) ピンホール法

まず、ピンホールを設置せずに、PXR のプロファイル (PXR の角度分布) の測定を行った。結果を図 6 に示す。  $\theta_x = x_{\text{IP}}/(d_1 + d_2)$ ,  $\theta_y = y_{\text{IP}}/(d_1 + d_2)$  ( $x_{\text{IP}}$ ,  $y_{\text{IP}}$  はイメージングプレート上の水平、鉛直位置)、ブラッグ方向を  $0^\circ$  と定義した。測定時間は、600 s であった。PXR に特徴的な、中心に穴のあいた分布が得られた。ピンホールは、PXR の分布のピーク位置に設置した。

ピンホールを設置して得られたプロファイルを図 7(a)に示す。ピンホールカメラの倍率を考慮し、 $x = x_{\text{IP}}/M$ ,  $y = y_{\text{IP}}/M$  と換算した。このプロファイルは、12600 ショット分積算したものである。計算により、ピンホールを

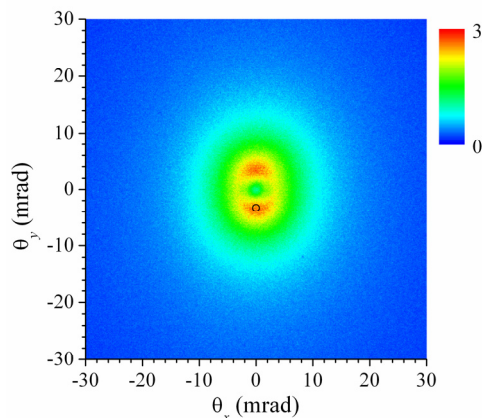


図 6 : ピンホールを設置せずに測定した PXR のプロファイル (角度分布)。この測定の後、丸で示した位置にピンホールを設置した (ピンホールの大きさは、拡大していることに注意)。

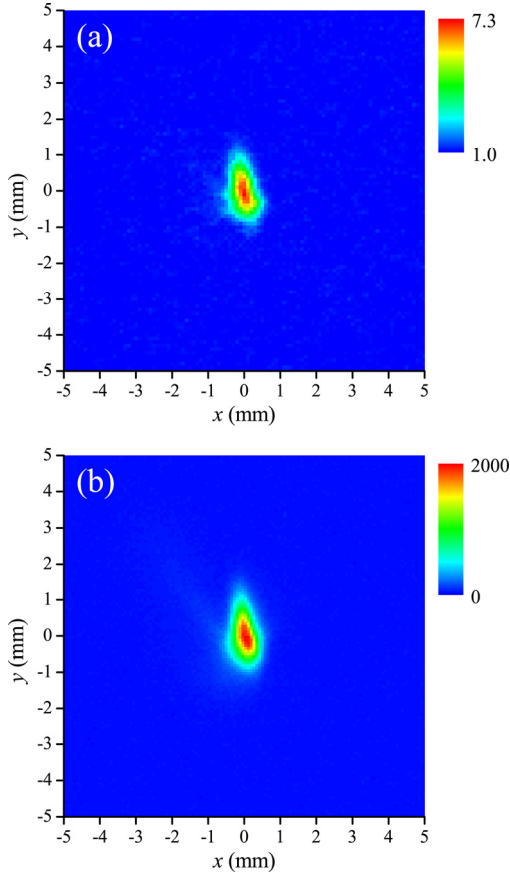


図7:(a) PXR を用いて得られたビームプロファイル. (b) OTR を用いて得られたビームプロファイル.

通過した PXR の収量は、 $\sim 3 \times 10^5$  と見積もられる。図 8(a)と(b)には、それぞれ、水平と鉛直方向のプロファイルを示した。バックグラウンドは差し引き、ピークの高さは1になるように規格化した。これらのプロファイルにガウス関数をフィットすることにより、プロファイルの大きさは $\sigma_{\text{PXR},x(\text{meas})} = 268 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{\text{PXR},y(\text{meas})} = 539 \mu\text{m}$ と求められた。これらの値には、ピンホールが有限の大きさを持つことによる像のぼけの大きさ ( $\sigma_{\text{pinhole}}$ ) と測定系の位置分解能 ( $\sigma_{\text{det}}$ ) が畳み込まれている。よって、真のビームサイズは、次式のように書くことができる。

$$\sigma_{\text{PXR},s} = \sqrt{\sigma_{\text{PXR},s(\text{meas})}^2 - \sigma_{\text{pinhole}}^2 - \sigma_{\text{det}}^2}. \quad (2)$$

ここで、 $s=x, y$ である。 $\sigma_{\text{pinhole}}$ は次式のように書くことができる。

$$\sigma_{\text{pinhole}} = \frac{d_1 + d_2}{d_1} \frac{r_0}{2}. \quad (3)$$

$r_0$ はピンホールの半径である。また、 $\sigma_{\text{det}}$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{\text{det}} = \frac{\sigma_{\text{IP}}}{M}. \quad (4)$$

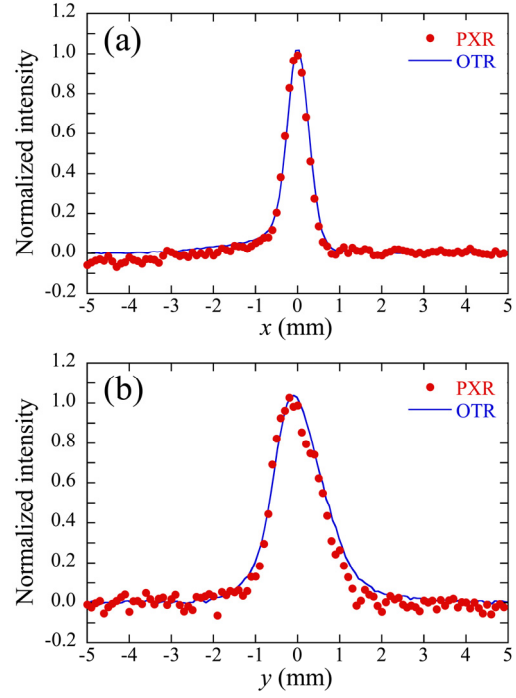


図8 : PXR と OTR を用いて得られたビームプロファイル. (a) 水平方向, (b) 鉛直方向.

$\sigma_{\text{IP}}$ はイメージングプレートの位置分解能で、 $48 \mu\text{m}$ と見積もられた[7]。これらの値を(2)式に代入すると、 $\sigma_{\text{PXR},x} = 238 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{\text{PXR},y} = 539 \mu\text{m}$ と求められた。表1に、これらの値をまとめた。なお、ピンホールによってX線が回折される効果は、ピンホール径が比較的大きいために無視できる。

また、比較のため、OTRを用いてビームプロファイルの測定を行った。結果を図7(b)に示す。これは、1ショット分のプロファイルである。非対称性も含めて、PXRを用いて得られたプロファイルとよく一致した。図8(a)と(b)の実線は、水平と鉛直方向のプロファイルを示す。これらのプロファイルにガウス関数をフィットすることにより、プロファイルの大きさは、 $\sigma_{\text{OTR},x(\text{meas})} = 278 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{\text{OTR},y(\text{meas})} = 616 \mu\text{m}$ と求められた。これらの値には、測定系の位置分解能 ( $\sigma_{\text{CCD}}$ ) が畳み込まれている。よって、真のビームサイズは次式のように書くことができる。

$$\sigma_{\text{OTR},s} = \sqrt{\sigma_{\text{OTR},s(\text{meas})}^2 - \sigma_{\text{CCD}}^2}. \quad (5)$$

$\sigma_{\text{CCD}}$ は $125 \mu\text{m}$ と見積もられた[6]。よって、(5)式から、 $\sigma_{\text{OTR},x} = 248 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{\text{OTR},y} = 603 \mu\text{m}$ と求められる。表2に、これらの値をまとめた。

$\sigma_{\text{PXR},x}$ は $\sigma_{\text{OTR},x}$ とほぼ一致したが、 $\sigma_{\text{PXR},y}$ は $\sigma_{\text{OTR},y}$ よりも約10%小さい値となった。ピンホールカメラに用いられる光が非等方的な分布を持つ場合、得られる像は、実際よりも小さく観測される傾向のあることが知られている[8]。ピンホールが光源を見込む実効的な角度は、次式のように書くことができる。

表 1 : PXR を用いて得られたビームサイズ.

Horizontal	( $\mu\text{m}$ )	Vertical	( $\mu\text{m}$ )
$\sigma_{\text{PXR},x(\text{meas})}$	$268 \pm 3$	$\sigma_{\text{PXR},y(\text{meas})}$	$553 \pm 9$
$\sigma_{\text{pinhole}}$	$75 \pm 0.1$	$\sigma_{\text{pinhole}}$	$75 \pm 0.1$
$\sigma_{\text{det}}$	$97 \pm 1$	$\sigma_{\text{det}}$	$97 \pm 1$
$\sigma_{\text{PXR},x}$	$238 \pm 3$	$\sigma_{\text{PXR},y}$	$539 \pm 9$

表 2 : OTR を用いて得られたビームサイズ.

Horizontal	( $\mu\text{m}$ )	Vertical	( $\mu\text{m}$ )
$\sigma_{\text{OTR},x(\text{meas})}$	$278 \pm 2$	$\sigma_{\text{OTR},y(\text{meas})}$	$616 \pm 8$
$\sigma_{\text{CCD}}$	$125 \pm 6$	$\sigma_{\text{CCD}}$	$125 \pm 6$
$\sigma_{\text{OTR},x}$	$248 \pm 4$	$\sigma_{\text{OTR},y}$	$603 \pm 8$

$$\sigma'_{\text{view},s} = \frac{\sigma_{\text{OTR},s}}{d_1}. \quad (6)$$

ビームの角度拡がり、この値よりも大きければ、光の放出は等方的であるとみなすことができる。(6)式から、 $\sigma'_{\text{view},x} = 0.59 \text{ mrad}$ 、 $\sigma'_{\text{view},y} = 1.4 \text{ mrad}$ と求められる。本実験では、ビームの角度拡がりは、 $\sigma'_{\text{beam},x} = 0.40 \text{ mrad}$ 、 $\sigma'_{\text{beam},y} = 0.46 \text{ mrad}$ であった。このように、 $\sigma'_{\text{beam},x}$ は $\sigma'_{\text{view},x}$ とほぼ等しい値であった。しかし、 $\sigma'_{\text{beam},y}$ は $\sigma'_{\text{view},y}$ よりも小さい値であったために、非等方性の効果により、 $\sigma_{\text{PXR},y}$ は $\sigma_{\text{OTR},y}$ よりも小さい値になったと考えられる。より厚い結晶を用いれば、多重散乱により、ビームの角度拡がりを増加させ、非等方性の影響を緩和することができると考えられる。また、厚い結晶の使用は、PXRの収量を増加させる(測定時間を短縮させる)ことにもつながる。このように、本研究により、ピンホール法の原理の検証実験に成功したといえる。

### (3) フレネルゾーンプレート法

まず、予備的実験として、フレネルゾーンプレート1枚のみを用いて、PXRの集束を試みた。しかし、研究期間内に、ビームプロファイルの測定まで行うことはできなかった。主要な実験装置の構築はほぼ終了しており、今後も測定を継続する予定である。

## 参考文献

- [1] H. Loos *et al.*, Proc. of FEL08, 485 (2008).
- [2] 原徹ら, 第 8 回日本加速器学会年会 Proceedings, 55 (2011).
- [3] L.G. Sukhikh, S.Yu. Gogolev, A.P. Potylitsyn, Nucl. Instrum. Methods A **623**, 567 (2010).
- [4] Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, Y. Iwasaki, Nuovo Cimento C **34** (4), 221 (2011).
- [5] Y. Takabayashi, Phys. Lett. A **376**, 2408 (2012).
- [6] Y. Takabayashi, K. Sumitani, Phys. Lett. A **377**, 2577 (2013).
- [7] Y. Takabayashi, A.V. Shchagin, Nucl. Instrum. Methods B **278**, 78 (2012).
- [8] P. Elleaume, C. Fortgang, C. Penel, E. Tarazona, J. Synchrotron Rad. **2**, 209 (1995).

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① Y. Takabayashi, K. Sumitani, “New method for measuring beam profiles using a parametric X-ray pinhole camera”, Phys. Lett. A **377**, 2577-2580 (2013), 査読有  
DOI:10.1016/j.physleta.2013.07.035

② Y. Takabayashi, K.B. Korotchenko, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin, “Channeling and parametric X-ray studies at the SAGA Light Source”, Nucl. Instrum. Methods B **315**, 105-109 (2013), 査読有  
DOI:10.1016/j.nimb.2013.02.024

③ Y. Takabayashi, “Parametric X-ray radiation as a beam size monitor”, Phys. Lett. A **376**, 2408-2412 (2012), 査読有  
DOI:10.1016/j.physleta.2012.06.001

[学会発表] (計 2 件)

① Y. Takabayashi, K.B. Korotchenko, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin, “Channeling and parametric X-ray studies at the SAGA Light Source”, ICACS25, 2012 年 10 月 23 日, Kyoto, Japan.

② Y. Takabayashi, K. Sumitani, “Development of a Beam Profile Monitor Using Parametric X-ray Radiation”, Channeling 2012, 2012 年 9 月 27 日, Alghero, Italy.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高林 雄一 (TAKABAYASHI, Yuichi)  
九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・副主任研究員  
研究者番号 : 5 0 4 5 0 9 5 3

### (2) 研究分担者

隅谷 和嗣 (SUMITANI, Kazushi)  
九州シンクロトロン光研究センター・ビームライングループ・副主任研究員  
研究者番号 : 1 0 4 1 6 3 8 1