

# フレネルゾーンプレートを用いた高分解能 ビームプロファイルモニタの開発

中村典雄 東京大学物性研究所附属軌道放射物性研究施設 〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5  
 阪井寛志 東京大学物性研究所附属軌道放射物性研究施設 〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5  
 武藤俊哉 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1  
 早野仁司 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 要旨

本稿では、フレネルゾーンプレートを用いた高分解能でリアルタイム性のある電子ビームプロファイルモニタについて紹介する。このモニタは、2つのゾーンプレートで構成されるX線結像光学系を基本とするシステムであり、電子ビームからの放射光をシリコン結晶分光器によって単色化し、電子ビーム像を2つのゾーンプレートによって拡大・集光してX線CCDカメラによって検出する。KEK-ATF ダンピングリングに建設されたビームプロファイルモニタは、単色化された3.235 keVのX線に対してX線結像光学系の拡大率が20倍で、空間分解能はガウス分布でサブマイクロレベルになるように設計されている。このモニタによって、高品質な2次元電子ビーム像を検出して10 μm以下の極小ビームプロファイルを測定することに成功した。今後、高輝度放射光源や低エミッタンス加速器の常時モニタとしての利用が大いに期待される。

## 1. はじめに

電子ビームプロファイル（ビームサイズ情報も含む）は電子ビームのエミッタンス、運動量広がり及び光源の輝度と関連する重要なパラメータで、その測定は電子ビームの位置や電流の測定と共に加速器内でのビームの状態を診断する上で不可欠なものである。特に近年の低エミッタンス化された光源加速器では、高い空間分解能を持つビームプロファイルモニタが要求されている。

加速器内の電子ビームのプロファイル測定は、電子ビームからの放射光の可視光部を光学系で結像させて行うことがこれまでの主流であった。しかし、最近の低エミッタンス加速器では、可視光の回折限界のために垂直方向はもちろん水平方向のビームサイズも測定不可能となりつつある。電子ビームの軌道上に設けた蛍光板やワイヤーを用いてビームプロファイルを測る方法もあるが、電子ビームそのものを破壊してしまう。最近では、破壊性を緩和する意味もあってレーザーと電子ビームのコンプトン散乱を利用してビームサイズやプロファイルを測定するモニタが高エネルギー物理学用加速器において開発されている<sup>1,2)</sup>、高いビームの安定性が要求される光源加速器ではビーム電流や寿命の減少が生じるために運転中の常時モニタとして使用することは困難である。加えて、レーザーもしくは電子ビームをスキャンするために長い測定時間を要してしまう。一方、放射光可視光の干渉を利用してビームサイズを測定する方法が提案され<sup>3)</sup>、いくつかの加速器に設置されている。しかし、ビーム形状を仮定する必要があるため、得られるビームの情報も限られる。

回折限界を下げるために可視光ではなくX線などより

短波長の放射光成分を用いてプロファイル測定を行うことは自然の流れである。新しいX線光学素子の1つとして注目されているフレネルゾーンプレート<sup>4)</sup> (Fresnel Zone Plate: FZP) は、数keVのX線に対しても0.1 μm程度の最外郭ゾーン幅を持ち、理論値に近い回折効率で集光することができる<sup>5)</sup>。ゾーンプレートを用いたビームプロファイル測定はAPSにおいて最初に試みられている<sup>6)</sup>。しかし、1枚のゾーンプレートによる縮小光学系を用いたために検出器に過度の空間分解能が要求され、X線CCDなどのリアルタイム性のある2次元検出器を利用することが不可能であった。そのために可動式のナイフエッジと1次元半導体検出器を組み合わせた検出部をスキャンする必要があり、プロファイルを取得するのに長い時間を要した。屈折型レンズをゾーンプレートの代わりに用いた測定がESRFで行われたが、同様な欠点を持っていた<sup>7)</sup>。

このような欠点を解消するために、我々は、ゾーンプレートを2枚とする拡大結像光学系を用い、電子ビーム像を数十倍に拡大することで2次元像をリアルタイムに測定するモニタシステムを提案した<sup>8)</sup>。この電子ビームプロファイルモニタは、2枚のゾーンプレートの他にX線を単色化してエネルギー収差を消すための結晶分光器、2次元電子ビーム像を検出するX線CCDから構成され、次のような特長を有する。

- (1) X線領域を使うので、可視光に比べて回折限界が小さく高分解能である。
- (2) 放射光を用いるので、完全な非破壊測定を行える。
- (3) 2次元電子ビーム像を直接観測できる。ビームプロファイル（ビームサイズを含む）はもちろん、ビーム

位置、ビームの傾きなども高分解能で測定可能である。

(4) リアルタイム性がある。測定時間が短く、短時間（ミリ秒オーダー）に変動している電子ビームの測定にも有効である。

加えて、今後のナノテクノロジーの発展によって、分解能の点で大きな改善の可能性を秘めている。近年、KEKのATFダンピングリングにおいてこのモニタを建設し、それを用いたビームプロファイルの測定を行っている<sup>9,10)</sup>。このモニタが設置されたATFダンピングリングはリニアコライダー用に超低エミッタンスビームを生成するためのリングで光源のような蓄積リングとは目的が異なるものであるが、世界最小のエミッタンスを有しているために、この種のモニタの開発及びビームサイズ測定の性能評価には最適な装置と言える。ここでは、このビームプロファイルモニタとその開発状況について紹介する。

## 2. 原理

### 2.1 ゾーンプレート

ゾーンプレートは透明、不透明の輪帯（ゾーン）が交互に組み合わせられたもので、 $n$  番目のゾーンの半径は次のように表される。

$$r_n = \sqrt{nf\lambda} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は対象とする X 線の波長であり、 $f$  はその焦点距離である。ゾーンプレートはこの波長と焦点距離に基づいて製作されることになる。ゾーンプレートの空間分解能  $\delta$  は、点光源からの光がゾーンプレートによって集光されて作られる像の大きさ（ぼけ）を意味し、このゾーンプレート上に一様に照射されるとすると、

$$\delta = 1.22\Delta r_N \quad (2)$$

と表わすことができる。ここで、 $N$  は最大ゾーン数を意味し、 $\Delta r_N$  は最外郭ゾーン幅で、 $N \gg 1$  で次のような関係がある。

$$\Delta r_N = f\lambda/2r_N = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda f}{N}} \quad (3)$$

点源の像分布はエアリーパターン（Airy Pattern）として知られており、その第 1 暗環の半径を像の大きさとして定義している。この暗環の半径は、ガウス分布で標準偏差の約 3 倍（ $3\sigma$ ）に相当する。

### 2.2 X 線結像光学系

ここではビームプロファイルモニタの 2 枚のゾーンプレートで構成される結像光学系の基本的性質について述べる。Fig. 1 にその結像光学系を示す。光源（電子ビーム）からの X 線は最初のゾーンプレート（CZP: Condenser

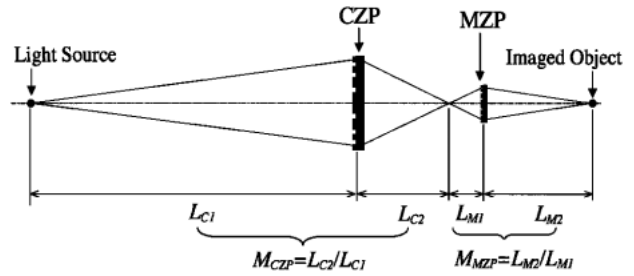


Figure 1. X-ray imaging optics with two Fresnel zone plates (CZP and MZP).

Zone Plate) で  $M_{CZP}$  倍になって集光され、次のゾーンプレート（MZP: Micro Zone Plate）で  $M_{MZP}$  倍になって CCD 上で結像される。この光学系の全体の拡大率  $M$  は、それぞれのゾーンプレートの拡大率の積  $M = M_{CZP} \times M_{MZP}$  である。光源からの X 線がゾーンプレートに一様に照射される場合、CZP の分解能  $\delta_{CZP}$  は、X 線の波長  $\lambda$ 、焦点距離  $f_C$ 、CZP の半径  $r_{N,C}$  と最外郭ゾーン幅  $\Delta r_{N,C}$  を用いて、

$$\delta_{CZP} = 1.22\Delta r_{N,C} = 0.61\lambda f_C / r_{N,C} \quad (4)$$

と書ける。モニタの光学系の分解能  $\delta_0$  は、これを光源点での分解能に換算して、

$$\delta_0 = \delta_{CZP} / M_{CZP} = 1.22 \frac{\Delta r_{N,C}}{M_{CZP}} = 0.61 \frac{\lambda f_C}{r_{N,C} M_{CZP}} \quad (5)$$

である。MZP の分解能への影響は、 $\delta_{CZP} > \delta_{MZP} / M_{MZP}$  という条件が満足されていれば無視できる。

対象とする X 線が偏向電磁石からの放射光とすると、高い指向性のために必ずしもゾーンプレート上を一様に照射するとは限らない。この場合、X 線の角度分布は次の幅  $\sigma_{SR}$  [rad]（標準偏差）を持つガウス分布で近似的できる<sup>11)</sup>。

$$\sigma_{SR} = 0.289 \times 10^{-3} (\epsilon_c / \epsilon_{ph})^{0.425} / E_e \quad (6)$$

ここで、 $\epsilon_c$  [keV] は光子の臨界エネルギー、 $\epsilon_{ph}$  [keV] は光子エネルギー、 $E_e$  [GeV] は電子ビームエネルギーである。通常は、電子ビームの発散角はこれに比べて無視できる。今、Fig. 1 のように光源から距離  $L_{C1}$  に CZP が置かれた時に、 $r_{N,C} < L_{C1}\sigma_{SR}$  の場合には X 線は CZP 上でほぼ一様な照射となり 分解能は式 (5) で近似的に与えられて最外郭ゾーン幅  $\Delta r_{N,C}$  と拡大率  $M_{CZP}$  のみで決まる。 $r_{N,C} > L_{C1}\sigma_{SR}$  の場合は一様とは言えなくなり、 $r_{N,C}^{eff} \equiv L_{C1}\sigma_{SR}$  で定義される実効的なゾーンプレートの半径を考えて、(5) 式の  $r_{N,C}$  代わりに代入すると、空間分解能  $\delta_0$  [μm] は、

$$\delta_0 = \frac{2.62\epsilon_{ph}^{-0.575}\epsilon_c^{-0.425}E_e}{1+M_{CZP}} \quad (7)$$

となる。 $M_{CZP}$ が一定あるいは1に比べて無視できるくらい小さい場合、分解能は $\epsilon_{ph}^{0.575}$ に比例し、光子のエネルギーが高いと分解能が良くなる。より精確には波動光学的な計算を行って分解能を求める必要がある。

### 3. モニタシステム

#### 3.1 システムの配置と構成

Fig. 2に、ATFダンピングリングに建設したモニタシステムの配置及び写真を示す。前節でも述べたように、このシステムは、放射光を単色化して色収差の影響を抑えるシリコン結晶分光器、X線結像光学系を構成する2つのゾーンプレート (MZP, CZP)、2次元電子ビーム像を検出するX線CCDカメラによって主に構成される。Table 1に、これら主要光学機器のパラメータを示す。その他、超高真空であるリングの真空とビームライン側の真空を切り離すために50  $\mu\text{m}$ 厚のベリリウム窓、光軸位置調整のためにX線用蛍光板モニタが配置されている。モニタビームラインの真空度は、X線CCD上での水の結露と大気によるX線の吸収を防ぐために $10^{-5}$  Torr以下に抑えられている。

KEK-ATFダンピングリングは周長138.6 mで36台の偏向電磁石を含む2つのアーク部と2つの長直線部を持つレーストラック型のリングで、電子エネルギー $E_e = 1.28[\text{GeV}]$ に対してエミッタンスは約1 nmradである。このモニタビームラインでは放射光を長直線部直前の磁場 $B = 0.748[\text{T}]$ を持つ偏向電磁石 (BH1R.27) から取り出している。この放射光の臨界エネルギーは $\epsilon_c = 0.816[\text{keV}]$ で、数keVを越えると光子フラックスが急激に減少する。我々は、モニタビームラインの使用可能スペース、光学系の空間分解能、光子フラックス、分光結晶面などを考慮して、X線のエネルギーを $\epsilon_{ph} = 3.235[\text{keV}]$ に設定した。

Table 1. Specifications of optical elements

Fresnel zone plate	CZP	MZP
Total number of zones	6444	146
Radius	1.5 (1.26 <sup>a</sup> ) mm	37.3 $\mu\text{m}$
Outermost zone width	116 (138 <sup>b</sup> ) nm	128 nm
Focal length	0.91 m	24.9 mm
Magnification	$M_{CZP} = 0.1$	$M_{MZP} = 200$
Monochromator		
Spectral resolution	$5.6 \times 10^{-5}$	
Crystal lattice plane	Si (220)	
Lattice spacing	0.192 nm	
Bragg angle $\theta_B$	86.35°	
X-ray CCD camera		
CCD	Back-thinned illuminated type	
Quantum efficiency	> 90% @ 3.235 keV	
Effective area	12.29 × 12.29 mm	
No. of pixels	512 × 512	
Pixel size	24 $\mu\text{m}$ × 24 $\mu\text{m}$	

<sup>a</sup>The effective radius of the CZP defined by  $r_{eff,C}^2 = L_{C1}\sigma_{SR}$ .

<sup>b</sup>The zone width at the effective radius of the CZP.

#### 3.2 主要光学機器

2つのFZPは共に0.2  $\mu\text{m}$ 厚のSiNの基板の上に0.8  $\mu\text{m}$ 厚のX線の吸収体であるTaを被せて作られている。それぞれのSEM画像をFig. 3に示す。CZPとMZPは、Fig. 1のようにX線結像光学系を構成し、それぞれの拡大率は $M_{CZP} = 0.1$ ,  $M_{MZP} = 200$ になるように設計・配置されていて ( $L_{C1} = 10\text{ m}$ ,  $L_{C2} = 1\text{ m}$ ,  $L_{M1} = 0.025\text{ m}$ ,  $L_{M2} = 5\text{ m}$ )、結像系全体としては20倍の拡大率になっている。結像系の分解能 $\delta_0$ は、3.235 keVのX線に対して約1.7  $\mu\text{m}$ で、ガウス分布の標準偏差 $\sigma_0 = 0.6\text{ }\mu\text{m}$ に相当する。各ゾーンプレートはベローズで挟まれ、可動ステージとステップモータによってCZPはX及びY方向に、MZPはX, Y及びZ方向にそれぞれ独立に動かすことができる。

分光器は、色収差の影響を抑えるために $8 \times 10^{-4}$ 以下のエネルギー分解能と使用可能なスペースの制限から高角

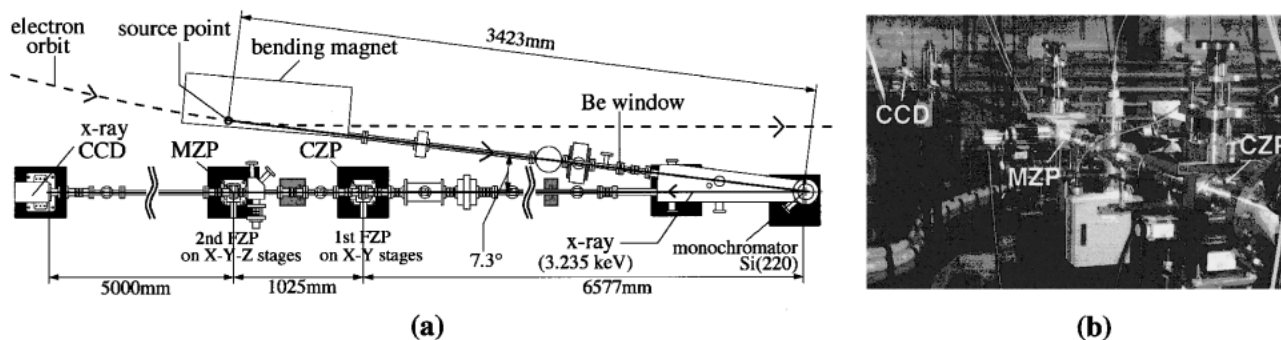


Figure 2. (a) Layout of the beam profile monitor at the KEK-ATF damping ring and (b) the photograph of the monitor beamline from the CZP holder to the X-ray CCD camera.

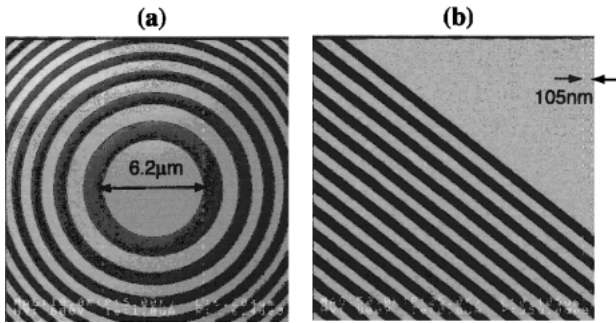


Figure 3. SEM (Scanning Electron Microscope) images of the FZPs. (a) the center zones of the MZP and (b) outer zones of the CZP.

なブラッグ角が要求され、この条件を満たすために、ブラッグ角86.35度で $5.6 \times 10^{-5}$ のエネルギー分解能を持つSi(220)面の1結晶分光器を用いている。シリコン結晶は、ゴニオメータとパルスモータによって遠隔よりそれぞれ水平・垂直方向に角度調整ができる。当初はパルスモータ稼働時の熱による結晶面の角度ドリフトが顕著であったが、現在ではセラミックによるモータとの熱的絶縁と冷却水によるモータの間接冷却を行ってドリフトを抑えることに成功している。

X線 CCD カメラは、選択した光子エネルギー3.235 keV に対して量子効率90%以上を持つ背面照射型の CCD を内蔵している。この CCD は、約1.2 cm × 1.2 cm の有効面積を持ち、その中に24 μm の解像度を持つピクセルが512 × 512存在する。光学系の拡大率が20倍なので、1ピクセルの半幅は光源点で換算すると0.6 μm に対応し、光学系の分解能にほぼ等しい。CCD はペルチェ素子によって-50度まで冷却され、低雑音を実現している。カメラ自身の最小露光時間は20 ms で、CCD データは最大7フレーム/秒で転送される。フルフレーム転送なので、メカニカルシャッター（最小露光時間6 ms）との同期によってデータ転送中の X 線を除くようになっている。X線 CCD カメラは内部クロックの他に外部信号と同期をとって測定することができる。

これら主要光学機器はすべて振動の影響を考慮して、御影石の架台の上に設置されている。機器の制御はその直上にあるハッチ内のコンピュータによって行っている。最近、X線 CCD カメラの制御を ATF のコントロール室から遠隔操作できるように制御系の増強を行い、加速器本体の制御と有機的にリンクさせながら常時モニタとしてビームプロファイル測定を行うことが可能になりつつある。

### 3.3 アライメント

最初の光学機器設置では、まずリング側の基準を用いて放射光軸を決めて、それを基準にレーザー付きセオドライトを CCD 設置位置に置いて、放射光軸をレーザーで模擬した。分光結晶を所定の角度にして設置した後、2つのゾーンプレートも同様にレーザーでアライメントを行い、

最後に CCD を設置した。その際、X線蛍光板モニタ上でのレーザーの位置を記録しておき、ビームを用いたアライメントを行う時に使用した。ビームを用いたアライメントは、当初はこの X線蛍光板モニタと X線 CCD を使って調整を行っていたが、現在では X線 CCD のみでより精密なアライメントが可能になっている。FZP 用ホルダーは、建設最初は FZP の位置を光軸上に完全に固定するタイプのものであったので、FZP を設置してしまうとその前での X線ビームの状態が CCD ではわからなかった。その後、FZP を真空中で上下に移動できるホルダーに改造した結果、結晶分光器、CZP、MZP と順次各光学装置からの X線ビームを X線 CCD によって観測することができ、精度の高いアライメントを実現している。例えば、CZP と光軸のアライメントは、CZP をわずかに透過する X線成分（円形状）の中心位置と結晶分光器からの X線ビーム位置（光軸）を利用して X線 CCD の1ピクセル（24 μm）程度の精度で行うことができ、MZP では電子ビーム像の中心を先ほどの光軸位置に合わせることで原理的には1ピクセルの1/200（拡大率の逆数）程度の精度でアライメントが可能である。一方、ゾーンプレートの軸と光軸との角度誤差は、水準器と機械加工精度によって決まっているが、大きくても0.5°以内には抑えられている。ここで詳しく述べることは紙面の都合もあってできないが、光軸からの位置のずれや角度の誤差による影響は幾何光学的にも波動光学的にも計算されていて、現状の誤差であれば問題がない（分解能に大きく影響しない）ことがわかっている。

## 4. 測定

### 4.1 ビームプロファイル測定

建設後最初の測定は平成14年5月から行われ、光軸調整とゾーンプレートで集光された電子ビーム像の探索を行った結果、X線 CCD 上で電子ビーム像を捉えることができた。像を水平・垂直各方向に投影したビームプロファイルをガウス分布にフィットすることによって、ビームサイズ（ガウス分布  $1\sigma$ ）を測定することができる。その際、MZP による Z 方向の位置調整によってビームサイズが最小となる位置（焦点）を探して、CCD 上に焦点が来るように調整する。CCD のバックグラウンドは、主に読み出しノイズと MZP を透過する X 線で、共に信号であるビーム像のカウント数に比べて小さい。読み出しノイズは CCD 上でほぼ一様であるが、透過 X 線は CCD 上でその基板の形状を反映した約 3 mm × 3 mm の正方形となって現れる。この透過 X 線の影響を除くために、通常は MZP の位置を少し動かすことでビーム像と透過 X 線が重ならないようにしている。あるいは、MZP の位置を X（または Y）方向へ数十 μm 移動させることで、ビーム像を CCD 上からはずした画像を取得し、それをバックグラウンドとして差し引いている。MZP の移動によって、ビー

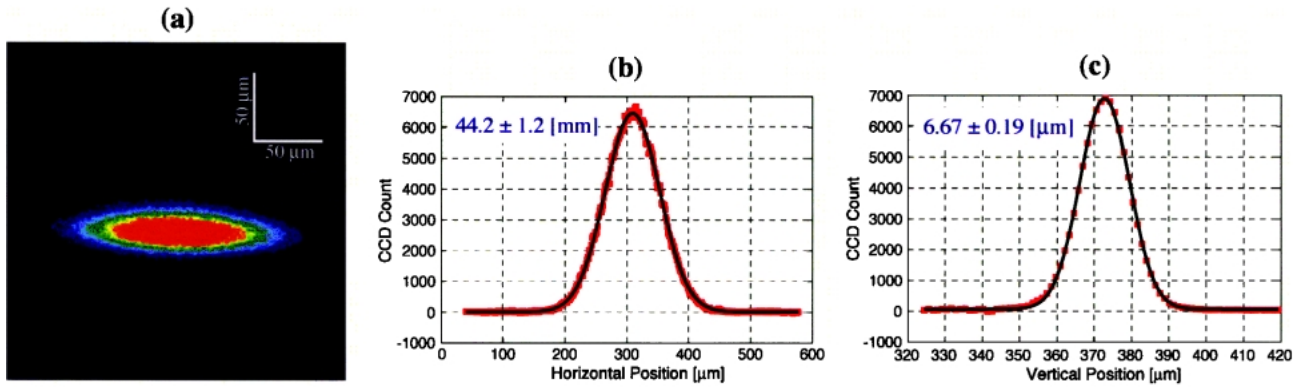


Figure 4. (a) Electron beam image observed by the beam profile monitor. The horizontal and vertical white bars correspond to 50  $\mu\text{m}$  at the source point. (b) Horizontal and (c) vertical beam profiles with their fitted Gaussian curves.

ム像はその200倍動くが、透過X線成分はCCD1-2ピクセル程度しか変化しないためにそれが可能になっている。なお、最近CZPの焦点付近にピンホール型のX線マスクを設置することで、透過X線によるバックグラウンドを1/100程度まで低減することに成功している。Fig. 4に得られた電子ビーム像と電子ビームプロファイル(サイズ)の測定例を示す。はっきりとした2次元電子ビーム像が得られ、そのプロファイルはガウス分布に良く合うことがわかる。

ダンピングリングは超低エミッタンスリングであるため、エミッタンスや運動量幅はバンチ内散乱(intrabeam scattering)の影響を強く受けており、ビームサイズはバンチ電流に依存し、カップリングや軌道の状態等にも敏感である。ビームサイズのintrabeam scatteringによるバンチ電流依存性とスキュー四極磁場成分を持つ補正コイル(六極電磁石SD, SFに巻かれているコイル)によるカップリング依存性の測定結果をFig. 5に示す。観測した光源点でのintrabeam scatteringの影響は、特に運動量幅の増加が分散関数を通じて水平方向に大きな影響を与えていることがわかった。また、スキュー四極磁場によって水平・垂直方向のエミッタンスカップリングが変化し、ビームサイズが水平・垂直で逆に変化していることも観測された。

ビームプロファイル測定を通じて、その他のビームあるいは加速器のパラメータを測定することも可能である。例えば、入射のタイミング信号と同期したビームプロファイル測定を行うことで、放射減衰時間をもとめることができる。Fig. 6は、垂直方向のビームサイズを入射後の時間の関数として測定した結果を示す。Fig. 6より、時間とともにビームが放射減衰しビームサイズが小さくなっていく様子が見られる。測定から得られた放射減衰時間は約25 msで、設計値とほぼ一致していることがわかった。

#### 4.2 拡大率の測定

ビームプロファイル測定と並行して、X線結像光学系の拡大率の測定も行っている。RF周波数を変えながら、ビーム像及び光源(電子ビーム)のX方向の位置を測定

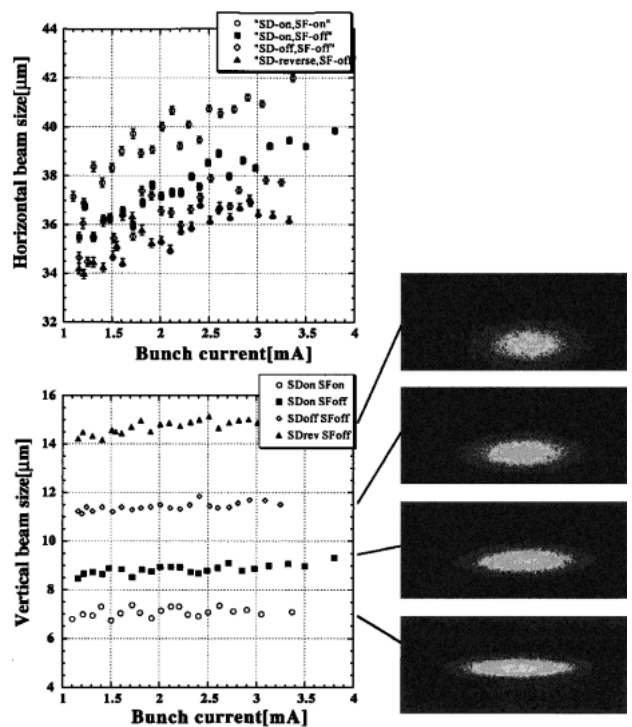


Figure 5. Measured current dependences of the horizontal and vertical beam sizes for four emittance-coupling states: “SD-on and SF-on”, “SD-on and SF-off”, “SD-off and SF-off” and “SD-reverse and SF-off”. The emittance coupling is changed by skew-quadrupole coils wound on two kinds of sextupole magnets, SD and SF. Four beam images corresponding to the four states are also shown.

し、その変位の比から拡大率を求めることができる。測定例をFig. 7(a)に示す。結像系全体の拡大率は20.6で、設計値と矛盾しない。また、同じ時期にMZPの拡大率を測定した結果をFig. 7(b)に示す。これは、MZPをX(あるいはY)方向に動かしながら、ビーム像の位置の変化を測定して、その傾きから拡大率を求めている。測定されたMZPの拡大率は206で、全体の拡大率20.6とからCZPの拡大率は0.10となり、CZP, MZP共にほぼ設計通りの拡大率であることが確認された。

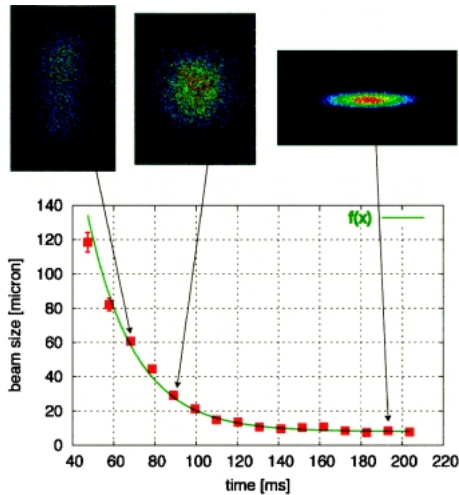


Figure 6. Time dependence of the measured vertical beam size after the injection from the injector linac to the damping ring. The radiation damping time is obtained by fitting the measured data (red squares) to an exponential curve (green line). Three beam images at three different times are also shown.

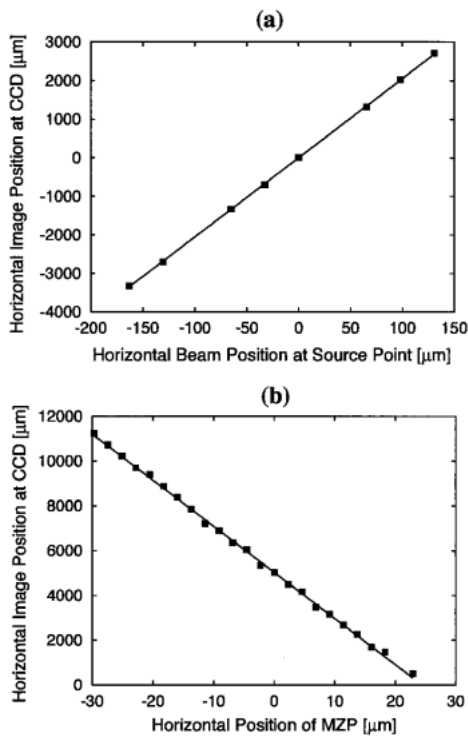


Figure 7. (a) Relation between the horizontal beam position at the SR source point and the horizontal position of the beam image on the X-ray CCD. (b) Relation between the horizontal beam position of the MZP and the horizontal position of the beam image on the X-ray CCD. Magnifications of the imaging optics and the MZP are obtained by fitting the measured data (solid squares) to straight lines.

## 5. まとめ

ゾーンプレートを基本とする X 線結像光学系を用いた高分解能電子ビームプロファイルモニタを KEK-ATF に建設し、2次元電子ビーム像を観測することに成功した。

これまでに測定された垂直方向の最小サイズは  $7\mu\text{m}$  以下であり、このビームプロファイルモニタの高い分解能を示す結果となった。また、蓄積電流が数 mA 程度にもかかわらず、露光時間 20 ms での測定を十分な S/N で行うことができ、リアルタイム性も兼ね備えたモニタリングが実現できることを確認できた。非破壊型であるこのモニタは、放射光源の運転における常時モニタとして十分に威力を発揮するものと期待できる。現在、KEK-ATF のコントロール室からのリモート制御が可能になりつつあり、実際の運転で常時モニタとして長期的に試験されることになろう。

今後の課題の 1 つは、さらに分解能を高めるために考慮すべき問題を洗い出すことである。X 線用ゾーンプレートの加工精度以外に分解能に影響を与える要因について十分に研究を重ねておく必要がある。既に述べたように、アライメント誤差による収差やゾーンプレートの振動の影響については現在評価が行われている。今後は、その他のパラメータや光学機器の影響についても理論的あるいは実験的に評価していく予定である。この研究は、第 3 世代放射光源はもちろんであるが、さらなる低エミッタンス加速器や次世代の放射光源におけるビームプロファイルモニタの設計に対して 1 つの指針になるものと期待している。

## 謝辞

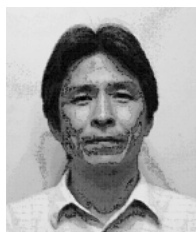
このモニタは、第 3 世代の極紫外・軟 X 線高輝度光源のビームプロファイル測定を目的として提案したもので、その後開発のために KEK-ATF での建設へとつながった。本稿の内容は、東京大学物性研究所附属軌道放射物性研究施設のグループと高エネルギー加速器研究機構 (KEK) との共同開発研究になっている。物性研究所からは 2 年に渡る所長裁量経費を含めた支援を受け、高エネルギー加速器研究機構からは平成 13 年度から現在まで共同開発課題として採択されている。モニタの立ち上げ時には、私の研究室の大学院生である飯田健介君 (現ソニー) が中心となり、修士論文にもなった。現在までに、我々の他に高木宏之氏、藤沢正美氏、篠江憲治氏、工藤博文氏、田中猛夫氏が物性研から参加している。また、軌道放射物性研究施設の柿崎明人施設長にもさまざまな面で御支援をいただいた。KEK では、物質構造科学研究所の野村昌治主幹に参加していただき、結晶分光器の設計・製作を担当していただいた。神谷幸秀加速器研究施設長には物性研究所時代はもちろんであるが、KEK においても多大な御支援をいただいた。また、KEK-ATF グループの方々にも様々な面で御協力いただいた。東京大学新領域創成科学研究科の雨宮慶幸氏、理研の小関忠氏、東芝の青木延忠氏、中山光一氏にも設計当初から多くの助言と協力をいただいた。ここに、改めて感謝する次第である。最後に、本研究が平成 16 年度の科学研究費補助金 (基盤研究) に採択さ

れたことをご報告して、本稿を終わらせていただく。

#### 参考文献

- 1) T. Shintake: Nucl. Instrum. and Meth. A311, 453 (1992).
- 2) H. Sakai, Y. Honda, N. Sasao, S. Araki, Y. Higashi, T. Okugi, T. Taniguchi, J. Urakawa and M. Takano: Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams 4, 022801 (2001).
- 3) T. Mitsuhashi: Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, 766 (1997).
- 4) J. Ojeda-Castaneda and C. Gomez-Reino (editors), B. J. Thomson (general editor): *Selected Papers on Zone Plates*, (SPIE Optical Engineering Press, 1996).
- 5) A. Ozawa, T. Tamamura, T. Ishii, H. Yoshihara and T. Kagoshima: Microelectronic Engineering 35, 525 (1997).
- 6) Z. Cai, B. Lai, W. Yun, E. Gluskin, D. Legnini, P. Ilinski, E. Trakhtenberg, S. Xu, W. Rodrigues and H. Lee: Proceedings of the tenth US National Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation: AIP Conference Proceedings 417, American Institute of Physics, New York, 101 (1997).
- 7) T. Weitkamp, O. Chubar, M. Drakopoulos, I. Snigireva, A. Snigirev, C. Schroer, F. Guenzler and B. Lengeler: Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference, Vienna, 1824 (2000).
- 8) N. Nakamura, Y. Kamiya, T. Koseki, H. Takaki, N. Aoki and K. Nakayama: Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 1628 (2001).
- 9) K. Iida, N. Nakamura, H. Sakai, K. Shinoe, H. Takaki, M. Fujisawa, H. Hayano, M. Nomura, Y. Kamiya, T. Koseki, Y. Amemiya, N. Aoki and K. Nakayama: Nucl. Instrum. and Meth. A506, 41 (2003).
- 10) N. Nakamura, H. Sakai, K. Iida, K. Shinoe, H. Takaki, M. Fujisawa, H. Hayano, T. Muto, M. Nomura, Y. Kamiya, T. Koseki, Y. Amemiya, N. Aoki and K. Nakayama: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation: AIP Conference Proceedings 705, San Francisco, 545 (2003).
- 11) G. K. Green: BNL50552 (1976).

#### 著者紹介



##### 中村典雄

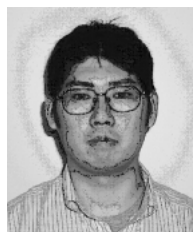
東京大学物性研究所附属軌道放射物性研究施設・助教授

E-mail: nakamura@issp.u-tokyo.ac.jp

専門：加速器科学，ビーム物理，放射光科学

#### 略歴：

東京大学大学院理学系研究科(物理学専攻)博士課程修了，理学博士。その後，高エネルギー物理学研究所(現高エネルギー加速器研究機構)放射光実験施設光源研究系助手。その間，1993年に文部省長期在外研究員としてイタリアのトリエステに10か月間滞在し，第3世代放射光源ELETTRAのあるSincrotrone Triesteで共同研究を行う。1996年より現職。東京大学物性研究所では，極紫外・軟X線放射光源計画の光源加速器に関する設計や開発研究に従事している。本研究もその中から生まれた成果の1つである。



##### 阪井寛志

東京大学物性研究所 軌道放射物性研究施設・助手

E-mail: hrsakai@issp.u-tokyo.ac.jp

専門：加速器物理，ビーム物理

#### 略歴：

京都大学理学研究科博士後期課程修了，理学博士。高エネルギー加速器研究機構，非常勤講師の後，2002年に東京大学物性研究所：軌道放射物性研究施設助手となり，現在に至る。専門は加速器，特に本実験を含め，現在まで様々なビームモニタ開発に従事している。また，全国規模で設計が進められている極紫外・軟X線高輝度光源計画に従事し，入射器・真空の設計・開発をメインに行っている。



**武藤俊哉**  
 高エネルギー加速器研究機構 加速器  
 研究施設 学術振興会特別研究員  
 E-mail: tmuto@post.kek.jp  
 専門：加速器物理，ビーム物理

**略歴：**

東京都立大学大学院理学研究科博士課程修了後，2003年に日本学術振興会の特別研究員（PD）として高エネルギー加速器研究機構で研究に従事，現在に至る。主にビームモニターの開発研究を行っており，現在本実験のほか回折輻射を用いた非破壊的ビームモニターの開発を行っている。



**早野仁司**  
 高エネルギー加速器研究機構 加速器  
 研究施設 助教授  
 総合研究大学院大学 高エネルギー加  
 速器科学研究科 併任助教授  
 E-mail: hitoshi.hayano@kek.jp

専門：加速器科学（ビーム計測，ビーム制御）

**略歴：**

東北大学大学院理学研究科終了後すぐに高エネルギー物理学研究所に助手として入所，トリスタン加速器の高周波加速制御部分の開発と建設に従事した。加速器完成後はビーム開発グループに属し，衝突リミノシティー向上のためのビーム調整に専念した。トリスタンを越える LEP が始動後は，さらなるエネルギーフロンティアを目指すリニアコライダーの開発に専念，そのなかで超低エミッタンス加速器の実証を行う ATF の建設とビーム開発を行って来た。エミッタンス実証に欠かせない高精度ビームモニターの開発に従事している。

## Development of a high-resolution electron-beam profile monitor using Fresnel zone plates

Norio NAKAMURA Synchrotron Radiation Laboratory, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan  
 Hiroshi SAKAI Synchrotron Radiation Laboratory, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan  
 Toshiya MUTO High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan  
 Hitoshi HAYANO High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

**Abstract**

We present a high-resolution and real-time beam profile monitor using Fresnel zone plates (FZPs) developed in the KEK-ATF damping ring. The monitor system has an X-ray imaging optics with two FZPs. In this monitor, the synchrotron radiation from the electron beam at the bending magnet is monochromatized by a crystal monochromator and the transverse electron beam image is twenty-times magnified by the two FZPs and detected on an X-ray CCD camera. The expected spatial resolution for the selected photon energy of 3.235 keV is less than 1  $\mu\text{m}$ . With the beam profile monitor, we succeeded in obtaining a clear electron-beam image and measuring the extremely small beam size less than 10  $\mu\text{m}$ . It is greatly expected that the beam profile monitor will be used in high-brilliance light sources and low-emittance accelerators.