

RF-Deflector を用いた電子ビームの 3 次元分布計測

MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL BUNCH PROFILE USING RF DEFLECTING CAVITY

佐々木智則^{#, A)}, 中里佑介^{A)}, 坂上和之^{B)}, 鷲尾方一^{A)}

Tomonori Sasaki^{#, A)}, Yusuke Nakazato^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Masakazu Washio^{A)}

^{A)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

^{B)} Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

Abstract

We have been studying a high quality electron beam generated by a photocathode RF gun at Waseda University. The electron beam is applied to various experiments. In those application, it is very important to measure the three-dimensional distribution of electron beam. We have succeeded in fully reconstructing the three-dimensional profile of electron beams by using an RF deflecting cavity and the computed tomography (CT) technique. The beams are tilted by the deflecting cavity at zero-phase and projected towards a downstream screen. The acquired images under different deflecting voltages are equivalent to the projections of the beam at different angles. The electron distribution can be computed by using the reconstructing algorithm of the computed tomography technique. In this paper, we report the principle of measurement, experimental results of the three-dimensional reconstruction and future prospects.

1. はじめに

早稲田大学では、フォトカソードを用いた RF-Gun によって高輝度・短パルス・低エミッタンスなどの特徴を有する高品質な電子ビームを生成している。生成した電子ビームは、パルスラジオリシス[1]やコヒーレント放射を利用したテラヘルツイメージング実験[2], クラッシュ衝突によるルミノシティ増加の原理実証[3]などに応用されている。電子ビームを応用するにあたり、その 3 次元的なパラメータの計測は非常に重要であると言える。本研究室では RF-Deflector と呼ばれる装置を独自に設計・開発し[4], これまでに電子ビームの持つ傾き角の計測に成功しており[5], 今回、その知見に CT 技術を適用することで、ビームの 3 次元分布計測を試みた。RF-Deflector とは空洞内に共振させた高周波磁場によって電子ビームを偏向させる装置であり、供給する電力を変化させることで電子ビームの回転角を調節することが出来る。一方、医療分野で用いられているような X 線 CT では、物体の側面データ(X 線透過像)を 180 度分計測することで物体の 3 次元分布を取得できる(投影定理)。本研究も全く同様の原理を用いた。即ち、RF-Deflector によって電子ビームに様々な傾き角を付与し、スクリーン上で電子ビームの側面データを多方向から計測することで、その 3 次元分布を取得した。本発表ではソレノイド電流値を変化させた際のビームの 3 次元分布計測結果、及び今後の展望について報告する。

2. ビームの 3 次元分布計測の原理

2.1 RF-Deflector の原理

RF-Deflector の原理図を Figure 1 に示す。RF-

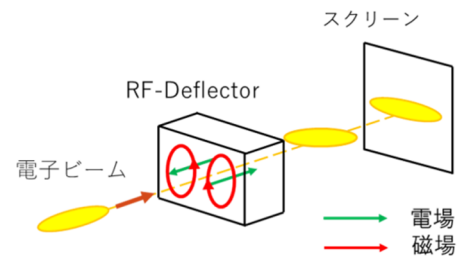


Figure 1: The diagram of an RF deflector.

Deflector は、RF-Gun 同様、一種の高周波空洞となっており、電磁波を供給すると固有の電磁場が空洞内で共振する。早稲田大学の RF-Deflector では TM210 モードと呼ばれる、進行方向に電場が立ち、その周りを時計回りに磁場が回転する電磁場が誘起される。ビーム軌道上には、磁場しか立っておらず、電子はこの磁場のみからローレンツ力を受ける。電磁場は時間変化しているため、電子ビームは進行方向の位置毎に異なる力を受ける。RF-Deflector に供給する電力量を変化させることによって、電子ビームを任意の角度に偏向することが出来る。

2.2 CT (Computed Tomography) の原理

スクリーンに投影された電子ビームの 2 次元画像は CT 技術の要領で、3 次元的に可視化される。Figure 2 (左) は CT の原理図を示しており、中心に置かれた物体の周りを測定系が回転することにより、180 度分の X 線透過像を得る。得られた画像データに対して、逆 Radon 変換と呼ばれる数学的な処理を施すことにより、Figure 2 (右) のような物体の断面像が得られる。

電子ビームの 3 次元分布計測にも全く同様の原理を用いている (Figure 3)。即ち、RF-Deflector を用いて、電子ビーム自体を回転させることにより、その側面プロファイル

[#] sasaki-56@ruri.waseda.jp

イルを 180 度分スクリーンに投影する. 得られた画像データに対して, CT 技術と同様の数学的な処理を施すことにより, Figure 3(右)のような電子ビーム像を得ることが出来る.

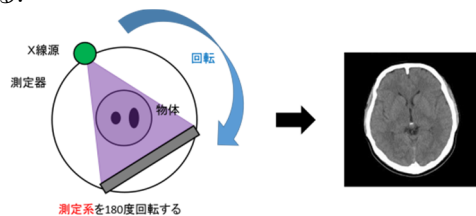


Figure 2: The diagram of CT and reconstructed image[6].

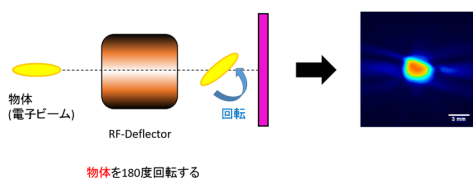


Figure 3: The principle of three-dimensional visualization of electron beam.

2.3 偏向と回転の差異の補正

RF-Deflector によるビームの偏向は回転とは異なる. RF-Deflector による偏向では電子ビームの進行方向の長さ(バンチ長)には変化を与えないのに対して, 回転では, そのバンチ長が傾きに応じて短くなる(Figure 4).

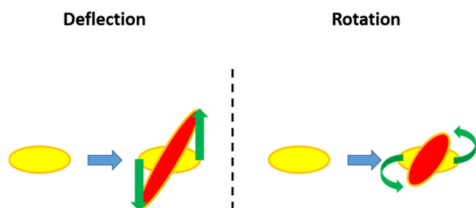


Figure 4: The difference between deflection and rotation.

しかし, 簡単な演算により, 偏向と回転は等変換することが出来る. 実際, 回転行列は偏向を表す行列を用いて, 式(1)のように変形できる[7].

ここで, θ は電子ビームの回転角を表すパラメータであり, $T(=\tan\theta)$ は偏向強度を表すパラメータである. 式(1)

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\cos\theta & 0 \\ 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\cos\theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ T & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

を物理的に解釈した概念図を Figure 5 に示す. 電子ビームがz方向に進行しており, RF-Deflector によりx方向に偏向されることを考える. すると, 電子ビームに対して, x方向への偏向, z方向へのせん断, x方向への拡大及びz方向への縮小を順に施すことにより, 電子ビームの回転像が得られる. Figure 5 より, 実験で得られた Deflection 像から CT に必要な回転像を得るためには, Deflection 像をx軸方向に $\cos\theta$ 倍すれば良いことがわかる.

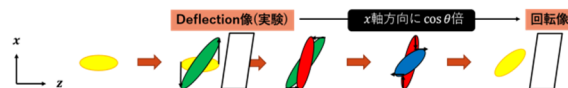


Figure 5: Correction of difference between deflection and rotation.

3. ビームの3次元分布計測

3.1 実験セットアップと実験方法

3次元分布計測のセットアップを Figure 6 に示す. 1.6Cell RF-GunとRF-Deflector にはそれぞれ, クライストロンから電力が供給されている.

カソードへのレーザーの照射方法には, 斜入射を採用した. 斜入射では, レーザーはカソード面に対して入射角 67.5 度で照射される. そのため, レーザーがカソード面に照射される際に時間差が生じ, 初期バンチが傾き角を持つことがこれまでの計測によって明らかとなっている[5].

次に実験方法について示す. 我々は, 電子ビームの3

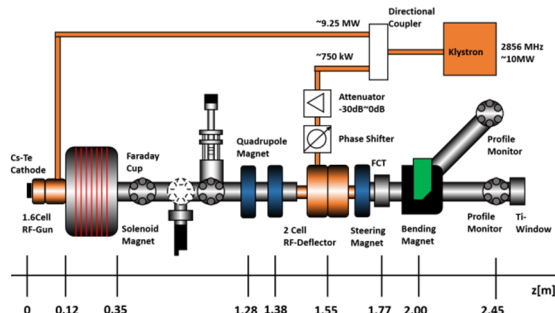


Figure 6: Experimental setup of three-dimensional bunch profile measurement.

次元的なパラメータがソレノイド電流値に対してどのような挙動を示すのかを調べるため, 以下の手順で実験を行った. まずは, Table1 に示したようにソレノイド電流値を 80~105[A]まで 5[A]刻みで振った. そして各条件において, 電子ビームの3次元分布再構成を適用することにより, ビームサイズを及び傾き角を計測した. 最後に, 実験値とシミュレーション値を比較することにより, 実験の妥当性について検証を行った.

Table 1: Experimental Condition

Parameter	Value
Solenoid Current [A]	80,85,90,95,100,105

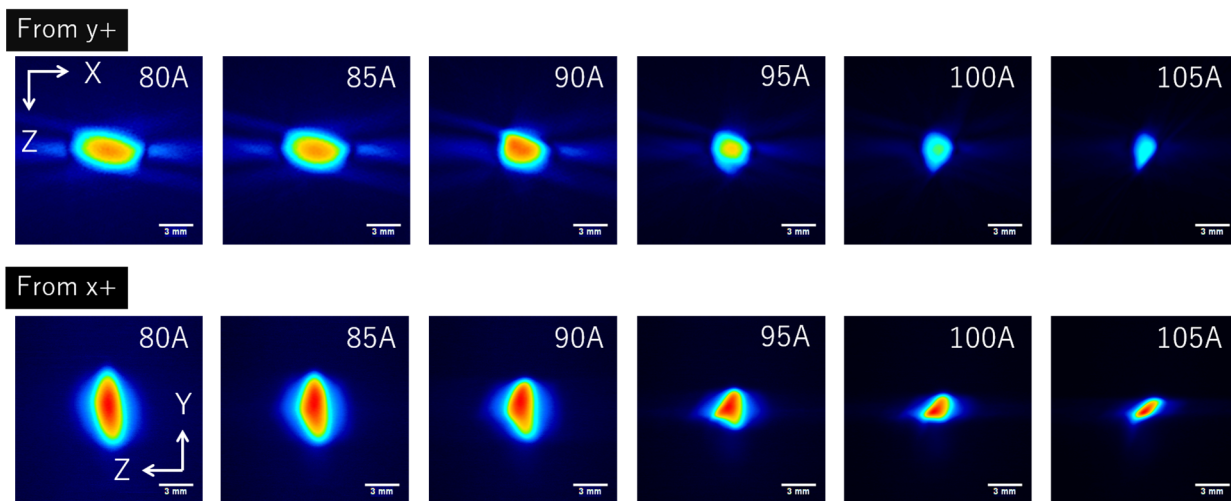


Figure 7: The result of three-dimensional bunch profile measurement.

3.2 ソレノイド電流値に対する傾き角の変化

各条件において、電子ビームを3次元的に再構成し、それらをy軸の正方向及びx軸の正方向から観測したプロファイルを図7に示す。なお、電子ビームはz軸の正方向へ進行している。右上の数値は、ソレノイド電流値を示しており、ソレノイド電流値が大きくなるにつれてビームサイズがだんだんと小さくなっていく様子が見られる。実際、これらのプロファイルからx方向ビームサイズ及びy方向ビームサイズを計測した結果は、それぞれ図8、図9のようになる。

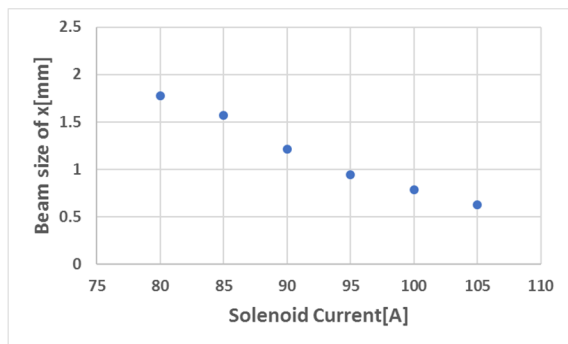


Figure 8: Solenoid Current vs Beam Size of x.

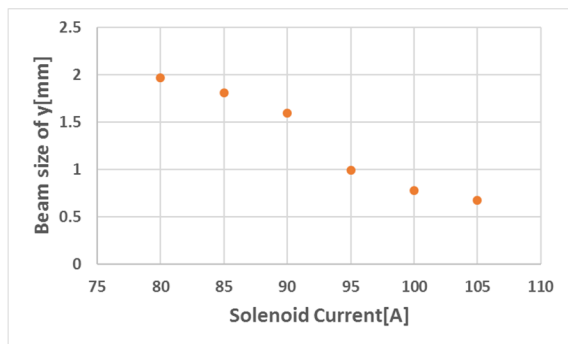


Figure 9: Solenoid Current vs Beam Size of y.

Figure 8, Figure 9より、ソレノイド電流値が大きくなるにつれて、x方向ビームサイズ及びy方向ビームサイズが小さくなっていく傾向がわかる。このような傾向になるのは、ソレノイド電流値が大きくなるにつれて、電子ビームへの回転収束の効果が大きくなるためである。

次に、ソレノイド電流値に対する電子ビームの傾き角の変化を表したグラフを図10に示す。青いプロットが実験値を示しており、赤いプロットがGPT (General Particle Tracer) によるシミュレーション値を示している。また、縦軸に X-Angle というパラメータを定義しているが、これは電子ビームが進行方向であるz軸の正方向からx軸に対してどれだけの角度を有しているかを表すパラメータである (Figure 11)。まずは、実験値に注目されたい。ソレノイド電流値が大きくなるにつれて、傾き角の正負が入れ替わりながらその絶対値が小さくなっていく様子が分かる。これは、Figure 8, Figure 9 で見たような電子ビームの回転収束の効果に起因している。つまり、回転の効果により傾き角の正負が交換し、収束の効果により傾き角の絶対値が小さくなっていると考え出来る。

また、実験値とシミュレーション値でそれぞれ同様の傾向が見られることから、実験の妥当性及び3次元分布計測の妥当性が証明されたと言える。

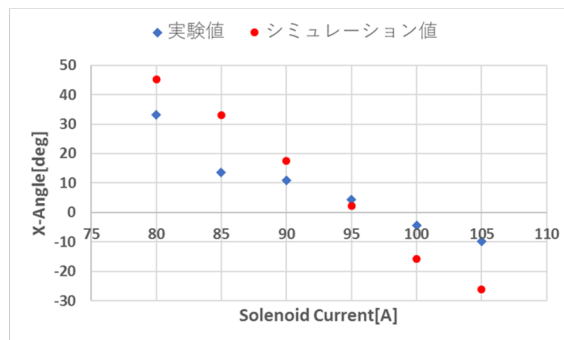


Figure 10: Solenoid Current vs X-Angle.

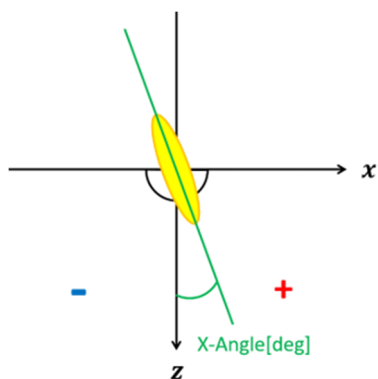


Figure 11: The definition of X-Angle.

4. まとめと今後

RF-Deflector による傾き角付与の知見に CT 技術を適用することにより、電子ビームの 3 次元分布計測に成功した。これにより、電子ビームの 3 次元的なパラメータを直接的に計測することが可能になった。また、本実験より、ソレノイド電流値が大きくなるにつれて、傾き角の正負が交換しながら、その絶対値が小さくなっていく様子が観測された。これは、ソレノイドによる電子ビームへの回転収束の効果に起因するものであると考えることができる。

今後は、ソレノイド電流値以外のパラメータについても電子ビームの 3 次元分布計測を行っていきたいと考えている。また、3 次元分布計測の知見をクラブ衝突実験等の応用研究に生かしていきたいと考えている。

参考文献

- [1] Y. Hosaka *et al.*, Radiat. Phys. Chem. 84, 10 (2013).
- [2] K. Sakaue *et al.*, Proc. IPAC2016, TUPOW047, 1870–1872.
- [3] Y. Koshiba *et al.*, Proc. of PASJ2016, MOP054 (2016).
- [4] Y. Nishimura *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 764 (2014) 291-298.
- [5] Y. Nakazato *et al.*, Proc. of PASJ2016, THP083 (2016).
- [6] 東芝メディカルシステムズ株式会社 ,
<http://www.nishioka-hp.com/ct.html.html>
- [7] J. Shi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 752 (2014) 36–41.