

レーザーフォトカソード高周波電子銃から生成される 電子ビームの 3 次元分布計測

3-DIMENSIONAL MEASUREMENT OF AN ELECTRON BUNCH FROM LASER PHOTOCATHODE RF ELECTRON GUN

坂上和之^{#,A)}, 小柴裕也^{A)}, 佐々木智則^{A)}, 大塚誠也^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 高富俊和^{B)}, 浦川順治^{B)}
Kazuyuki Sakaue^{#,A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Tomonori Sasaki^{A)}, Seiya Otsuka^{A)}, Masakazu Washio^{A)},
Toshikazu Takatomi^{B)}, Junji Urakawa^{B)}

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

^{B)} KEK

Abstract

Laser photocathode rf electron gun can produce low emittance, short pulsed, and high brightness electron beam. It is very important to measure the electron beam parameters for application researches. We measured “tilt” of the electron bunch and also the three-dimensional profile by using CT (Computed Tomography) technique with an rf transverse deflecting cavity. We will report the measurement results of precise electron beam diagnostics and discuss about the electron beam qualities produced by laser photocathode rf electron gun.

1. はじめに

レーザーフォトカソード高周波電子銃はレーザーによって制御された光電子を生成し、即座に高電界の高周波加速を行うことで、非常に高品質な電子ビームを生成することが可能である。このような高品質電子ビームは大規模加速器の電子入射器部として用いられている他、それ単体でも応用が可能であり、様々な研究がなされている。これらどちらの利用においても生成された電子ビームの性能を詳しく理解することは非常に有用であり、リングへの入射の最適化を行うことも可能であるし、利用においても最大限のパフォーマンスを引き出すことが可能である。我々は、電子銃から生成される電子ビームのバンチ長の計測を目的とし、独自に高周波偏向空洞を開発した。[1,2] 極短バンチを直接計測することが可能であることを実証し、現在ではこれを用いた応用研究などを実施している。高周波偏向空洞においては、電子ビームを直接高周波磁場(電場を用いることもある)によって挿引することで、電子ビームの縦方向プロファイルを横方向に投影し、計測することができる。簡単な原理は後述するが、つまり、電子ビームに傾きを付与し、直接縦方向のプロファイルを実測する。逆に、もともと電子ビームが傾きを持っていれば、これによってその傾きを計測することが可能であるし、また傾きを変化させてプロファイルを多数取得することによって、CT 手法によって 3 次元のプロファイルを再構成することが可能である。本論文では、上記 2 種類の計測を実施し、レーザーフォトカソード高周波電子銃から生成されるビームの詳細を評価した結果に関して報告する。

2. 高周波偏向空洞の原理

本章では、バンチ長計測を目的として我々が独自に開発した高周波偏向空洞に関して、簡単に述べる。詳

[#] kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

細な設計に関しては、REF. [1]を、評価結果等に関しては REF. [2]を参照いただきたい。高周波偏向空洞の原理図を以下の Fig. 1 に示す。

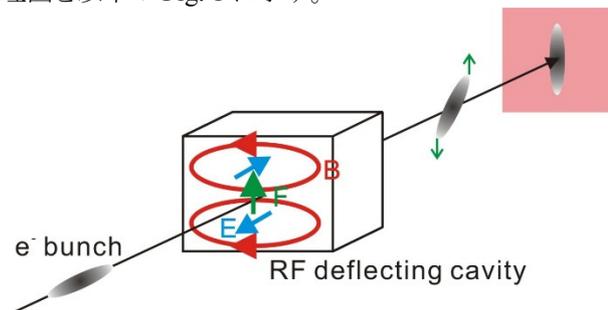


Figure 1: Schematic of an rf transverse deflecting cavity.

高周波偏向空洞として、加速周波数と同じ 2856MHz で TM120 モードが共振する方形型の空洞を採用している。ビーム軸上に生成した高周波磁場によってビームを偏向させ、適当なドリフトスペースを進行させることによって電子ビームの縦方向プロファイルを横方向に投影し、直接計測することができる。高周波偏向空洞では、電子の縦方向位置に応じた横方向キックを与え、ドリフトスペースによって横方向位置に変換する。つまり、電子バンチの回転とは異なることに注意されたい。我々の高周波偏向空洞は十分な時間分解能を得るために 2-Cell の方形空洞を組み合わせで構成している。

3. 電子ビームの傾き角計測

電子ビームは通常、軸対称電場を用いて加速、軸対称磁場を用いて収束などを行うため、進行軸に沿った形状を取っていると認識し、図表を作成したり、設計等を行ったりしている。(Fig. 1 も確実に軸に沿っている) 計算機シミュレーションにおいても円筒対称系を用いることが

多く見受けられる。これらの認識などに異議を唱えるわけではないが、実は軸に沿って電子ビームが生成されていると思っけても多少なりともその軸に対して角度を持っていたりすることがあるということを実際に観測したので、共有したい。傾き角計測の一例を以下の Fig. 2 に示す。

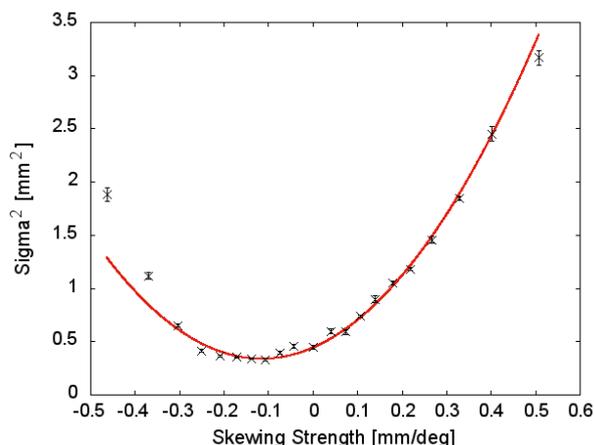


Figure 2: Example of beam tilting angle measurement.

Figure 2 の横軸には高周波偏向空胴による偏向の強さをプロットしている。実際には、高周波偏向空胴に印加する高周波のパワーを変化させている。負の値は高周波の逆の位相で偏向を加えていることに相当する。もしも電子ビームに傾きがなければ、このプロットは y 軸を中心に対称な放物線を描くはずであるが、結果はそれとは異なり、Skewing Strength=-0.1 付近で最小値を取っている。これがビームの持つ傾きに相当する。我々の高周波電子銃は斜めからレーザーを入射(67.5 度)するポートがあり、この Fig. 2 の結果は斜めからレーザーを入射し、意図的に傾けた際の計測結果である。電子の生成初期に傾きを持たないようにするためには、レーザーをカソードに対してほぼ垂直から照射する必要がある。我々のセットアップにおいても可能であり、ビームライン中ほどより穴あきミラーを通して入射することによって、約 1 度での入射が可能である。

以下の Fig. 3 にそれぞれの入射方法に対する傾き角計

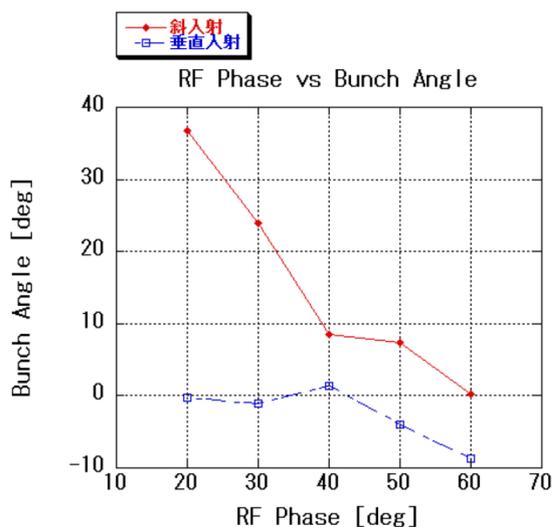


Figure 3: Luminosity dependence on collision angle.

測結果を示す。斜め入射の方が明らかに垂直入射に対して傾いてビームが進行していることがわかる。また、加速位相が大きくなるほど傾き角は小さくなっているが、垂直入射に関しては多少の傾きが大きくなっていることがわかる。この挙動に関しては、非常に多くのパラメータが寄与しており、全てを明らかにすることはできていないが、シミュレーション等を用いて予想できることとして、いくつか挙げられる。まず垂直入射に関しては、加速電界と直後に設置しているソレノイド磁場の中心が完全に一致していないため、カソードの中心にレーザーを照射できていないことがあげられる。これにより、より横方向加速電界を受けやすい高位相領域において、傾きが付加されていると考えている。斜め入射に関しては、同様に中心から外れていることもあるが、加速空胴内におけるバンチングの効果、さらにソレノイド磁場の影響も考えられる。高周波電子銃においては、低位相側においてバンチング効果が強いいため、より大きな傾きとなって現れることになる。一方、斜めからレーザーを入射することによって、初期には X 軸方向にのみついていた傾きであるが、ソレノイド磁場中を進行することで、X と Y がカップリングし、どちらにも傾いてビームが進行する。ソレノイド磁場を変化させるとその傾きの変化がわかる。また、ビームエネルギーが変化することでも同様の現象が確認でき、高位相側で電子ビームエネルギーが低くなったために傾きも減少していることも考えられる。このソレノイド磁場による影響を明らかにするため、CT 法を用いて 3 次元的にビームのプロファイルを明らかにすることを試みた。

4. CT 法による 3 次元電子ビーム分布計測

前述電子ビームの傾き角計測における結果を解析することによって、ソレノイド磁場中の X と Y のカップリングが明らかになり、より多次元で分布を計測することで、詳細な電子ビームの形状を評価する必要があることがわかった。そこで、高周波偏向空胴を用いて電子ビームを CT 計測し、そのプロファイルの評価を実施した。以下の Fig. 4 にその概念図を示す。

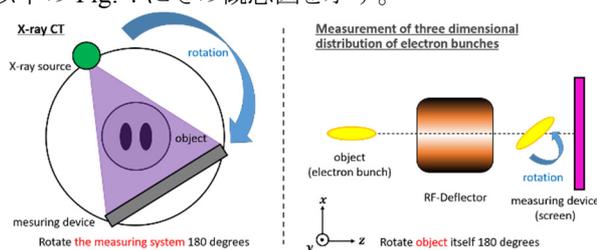


Figure 4: Three-dimensional electron profile measurement by CT technique using rf transverse deflector.

Figure 4 左図には通常医療などで行われている X 線の CT イメージングを示している。X 線源と検出器のセットを被写体に対して回転させることで、様々な角度の断面プロファイルを取得し、それを再構成する。右図には高周波偏向空胴を用いた場合の原理図を示している。高周波偏向空胴で電子ビームに傾きを付与し、そのプロファ

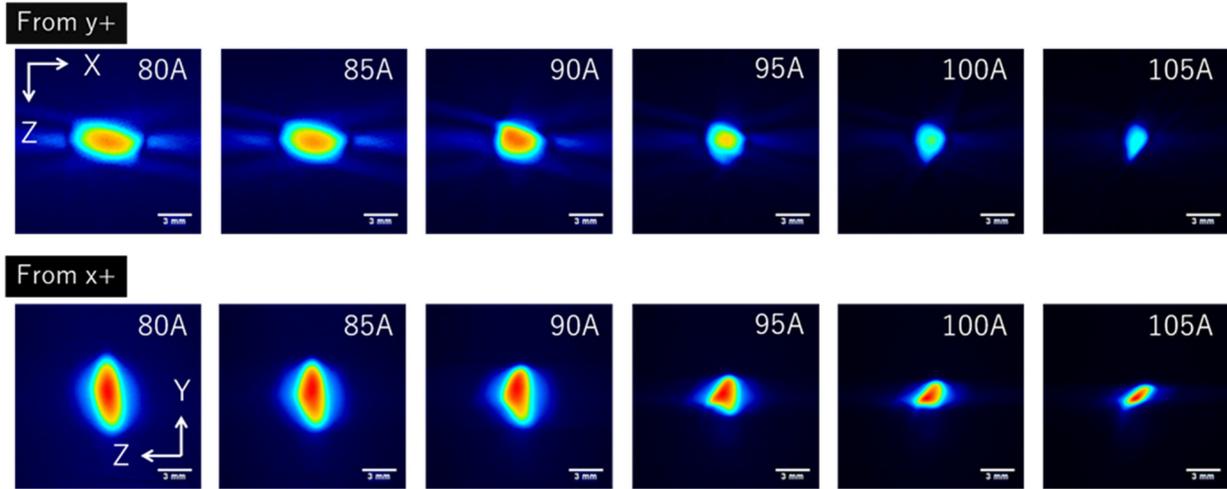


Figure 5: Measurement results of three-dimensional electron beam profile measurement by CT technique using rf transverse deflecting cavity. Beam profile versus solenoid current.

イルを計測する。傾きの付与を様々な強度で実施することで、CT法と同様の計測が可能である。先にも述べたが、高周波偏向空洞では電子ビームを回転させるのではなく、偏向させるため、偏向から回転に変換するプロセスが1つ必要であるが、係数をかけるのみである。これには関しては[3]に詳しいため、参照されたい。高周波偏向空洞に印加する高周波のパワーと傾き角の関係を校正した後、80度から-80度の範囲でビームプロファイルを取得し、CT法による再構成を行った。その結果を以下のFig. 5に示す。3次元的に表現することは難しいため、X軸方向もしくはY軸方向から見たビームのプロファイルをそれぞれ示している。それぞれに対して、ソレノイド電流値を変化させ、3次元プロファイルを取得した。それぞれのプロファイルにおいてビーム以外を起因とする雑音成分が残っているが、これはCT法での再構成の際に生じている。演算フィルタを用いて最小化しているが、全てを消すことはできていない。-180度から180度までをより細かくビームプロファイルとして取得することができれば格段に落とすことが可能であるが、現時点では傾きやプロファイルの評価に対しては問題ないと考えている。それぞれの傾きに関してしてみると特にY-Z平面に関して顕著であるが、傾きがソレノイド電流を増やすことで反転していることがわかる。また、95A付近で最小を取っている。また、横方向サイズに注目すると、ソレノイド電流値を増やすことによって収束されていることも確認できる。

次に3次元計測が正しく再構成できていることを確認するために3次元それぞれのビームサイズのソレノイド電流値に対する変化をプロットした。以下のFig. 6にその結果を示す。上の2つのプロットがそれぞれX方向ビームサイズ(左上)、Y方向ビームサイズ(右上)を示している。Figure 5からも明らかであったが、ソレノイド電流値を増加させるとともにビームが横方向に収束されていることがわかる。次にFig. 6下図では、進行方向(Z方向)ビームサイズであるバンチ長を示している。当然のことではあるが、ソレノイド電流値の変化に対してまったく変化してい

ない。これにより、高周波偏向空洞を用いた3次元ビームプロファイル計測が正常に動作していることを確認した。

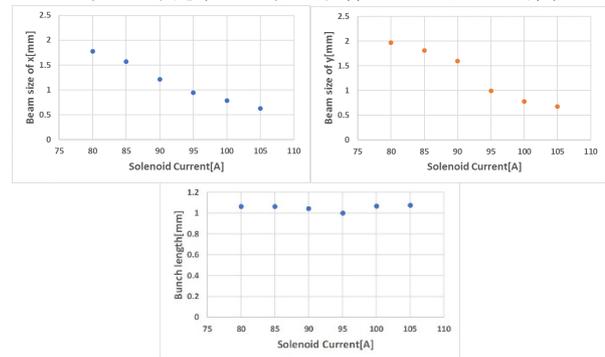


Figure 6: Electron beam size measured by CT technique. X (upper left), Y (upper right) and Z (bottom) directions.

5. まとめ

レーザーフォトカソード高周波電子銃によって生成される電子ビームの詳細計測を高周波偏向空洞を用いて行った。特に電子ビームの傾きが付加されうること、その計測を行い、実際に評価した。またCT法による3次元分布計測を実施し、ビームの3次元プロファイルや3次元プロファイルの変化を計測評価することに成功した。今後、この手法によるビームの詳細評価とともに、電子ビームに傾きが付加される原因の特定、これを用いたさらなる高品質電子ビーム源の開発を推進していく。

参考文献

- [1] Y. Nishimura *et al.*, "Design of a two-cell rf-deflector cavity for ultra-short electron bunch measurement", Nucl. Instrum. Meth., A764, pp. 291-298, 2014.
- [2] K. Sakaue *et al.*, "Temporal profile measurement of an electron bunch with the two-cell rf deflecting cavity at Waseda University" Jpn J Appl. Phys., vol. 54, pp. 026301-1-6, 2015.
- [3] T. Sasaki *et al.*, "Measurement of three-dimensional bunch profile using rf deflecting cavity", Proc. of 14th PASJ, Hokkaido, Japan, Aug. 2017, pp. 568-571.