

# YAG:Ce を用いたビームハローモニター BEAM HALO MONITOR USING YAG:CE SCREEN

内藤孝<sup>#</sup>、三橋利行

Takashi Naito <sup>#</sup>, Toshiyuki Mitsuhashi

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

At the ATF2 project, we are aiming to produce an extremely small beam having a vertical beam size of 37nm. The beam halo surrounding of beam core will make a background for the beam size measurement using the Laser interferometer beam size monitor. The understanding of beam halo distribution is important for measurement of the beam size at the final focus point of ATF2. In order to measure the beam halo distribution, we developed a beam halo monitor based on fluorescence screen. A YAG:Ce screen, which has 1mm slit in the center is set in the beam line. The image on fluorescence screen is observed by imaging lens system and CCD camera. In this configuration, the beam in the core will pass through the slit. The beam in surrounding halo will hit the fluorescence screen, and we can observe the distribution of beam halo. The intensity contrast of beam halo to the beam core is measured by scanning the beam position for the fixed fluorescence screen position. The results of the beam halo measurement are presented.

## 1. はじめに

ILC のための先端試験加速器 ATF/ATF2 では、超低エミッタンス電子ビームによる最終収束系の試験が進められている。最終収束系では仮想衝突点に於ける垂直ビームサイズは 37nm まで絞られる予定である。最終収束系に於けるビームサイズの測定はレーザー干渉計によって測定されるが、ビーム形状は Gauss 分布であるとして求められている。<sup>[1]</sup> 通過するビームにビームハローが存在する場合、計測値が過大に算出される可能性がある。このビームハローを評価することによって、垂直ビームサイズにどのような影響があるのか調べる必要がある。

電子・陽電子リングでは、beam-gas scattering, beam-gas bremsstrahlung, intra-beam scattering の影響により Gauss 分布より広がった分布を持つ様になり Gauss 分布に従う中心部分をビームコア、Gauss 分布を逸脱したテール部分をビームハローと呼んでいる。ATF ダンピングリングの場合のシミュレーションでは、beam-gas scattering が垂直ビーム分布に及ぼす影響は  $10^{-7}$ Pa の真空度でもピークに対して  $10^{-3}$  程度の量の Gauss 分布からの逸脱があると予想されている。<sup>[2]</sup> Figure 1 に真空度の違いによる垂直方向のビーム分布のシミュレーション結果を示す。

ビームハローの測定に関しては、フランス LAL のグループがダイヤモンドセンサーを使った測定を試みようとしている。ダイヤモンドセンサーはダイナミックレンジの広い強度センサーであるが、数  $\text{mm}^2$  程度の面積に照射された荷電粒子・放射線の強度のみを測定するためビームハローの形状は測定出来ない。<sup>[3]</sup>

ATF2 のビーム測定で YAG:Ce を使ったスクリー

ンモニター(YSC)<sup>[4][5][6]</sup>は、スクリーンの厚みを薄くすることによって高感度、高分解能のプロファイルモニターとして有望であることを示した。<sup>[7]</sup> 高分解能のプロファイルモニターとして KEK では LUCX 加速器でも使用されている。<sup>[8]</sup> YSC は、OTR に比べて 2桁~3桁高い感度を持つ。YSC をビームハロー測定に用いることによってビームハローを 2次元のイメージとして見る事が出来る。YSC を中心部分にスリットを作り、ビームコアの部分はスリットを通過させることによってビームハローの部分のみを測定出来るようにした。

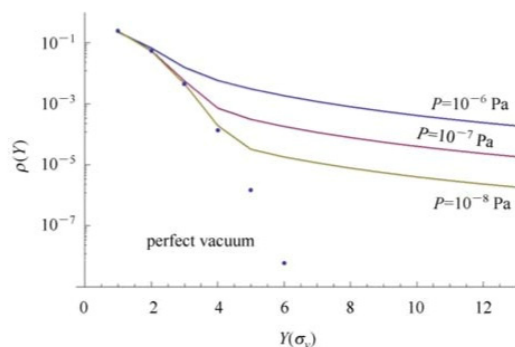


Figure 1: 真空度の違いによる垂直方向のビーム分布 (縦軸  $\rho$ : provability、横軸  $Y$ : normalized RMS beam size). Chinese Physics C, Vol. 38, No. 12 (2014) 127003より.

## 2. ビームハローモニターの構成

Figure 2 にビームハローモニターの測定イメージを示す。中心部分に約 1mm のスリットがあり、ビー

<sup>#</sup> takashi.naito@kek.jp

ムコアがスリット部分を通過するようにするとスクリーンにはビームハローの部分だけが現れることになる。今回の測定では Figure 3 に示す様に、YSC のアクチュエーターにスリット付きの YAG:Ce(100 $\mu$ m 厚)を取り付けて行った。縦方向のビームハローを測定するためにスリットは、水平方向に切られている。YSC のアクチュエーターであるため、可動機構はビームラインに出し入れするのみでスリットの位置をスキャン出来ない。測定では本来ビーム位置に対してスリットの位置をスキャンするべきであるが、ビームの位置をスキャンして行った。Figure 4 に測定例を示す。ビームコアはイメージの右側を通過するがスクリーンがないためビームコアのイメージは現れない。スリットはビームサイズに対して十分に大きいいためビームハローは片側だけを測定し、逆サイドのビームハローはビームの位置を移動させると共に CCD の観測エリアも同時に移動することによって測定した。

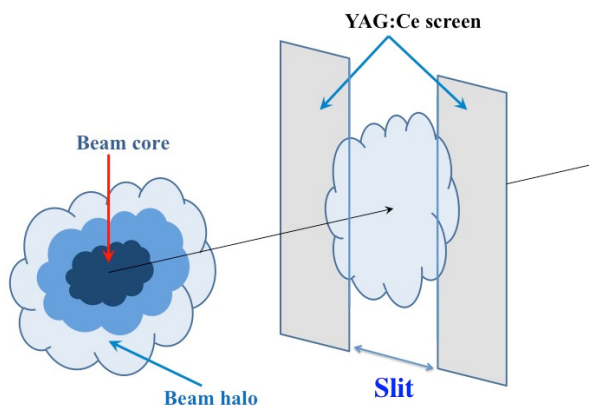


Figure 2: ビームハローモニターの測定イメージ。

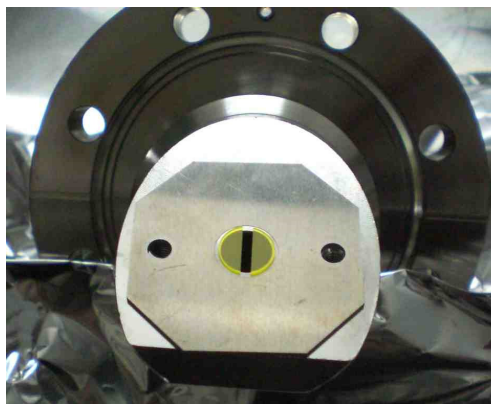


Figure 3: ビームハローモニターの YAG:Ce 取付ホルダーと可動機構。

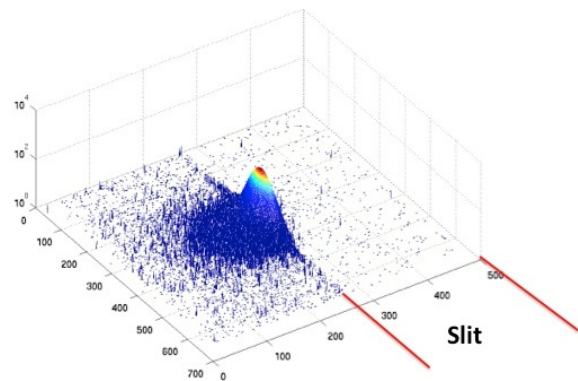


Figure 4: ビームハローの測定例。

測定に使用した CCD と結像系は YSC と同じものを使用した。Figure 5 に測定光学系のレイアウトを示す。ビームラインに対してスクリーンは横に 45° 傾けて挿入される。上流からの放射光や FEL で問題になっている Coherent Optical Transition Radiation(COTR), Optical Diffraction Radiation(ODR)はビームラインに対して 90° 方向に進むため、スクリーンに対して正面方向(45° 方向)に測定光学系を設置することによって、これ等の影響を排除出来るよう設計した。

CCD は IMPREX 社製 IGV-B0610M、杉藤製 TS-93022 レンズを結像系に使用した。レンズのパラメーターを Table 1 に示す。像の拡大率は最大で 3 倍になる。焦点深度は 0.3mm のため、YAG:Ce の厚み方向全体の発光に焦点を合わせることが出来る。レンズに対してスクリーンは直角であるため発光点がずれても焦点がずれることはない。CCD にスクリーンからの X 線が直接入らないようにするため、レンズはミラーで光軸を上方に変更して設置した。このレンズは焦点が固定のため、焦点やプロファイルの位置の調整は 3 軸のムーバーで行っている。空間分解能は、基準ターゲットを測定し Modulation transfer function から Point spread function(PSF)を求め、その広がりから求めた。TS-93022 レンズの PSF を Figure 6 に示す。PSF の広がり gauss 分布から少しずれているため中心に近い部分を gauss 関数でフィットしてその  $\sigma$  値を分解能とした。測定するビームサイズに対して十分小さいことを確認した。

Table 1: Parameters of the Lens (SUGITOH TS-93022)

Magnification ratio	0.38~3
Diameter of lens	38mm
Focus length	165 mm
Focal depth	0.3mm
Resolution	4.3 $\mu$ m

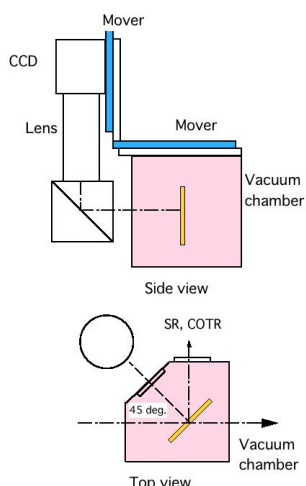


Figure 5: 測定光学系のレイアウト.

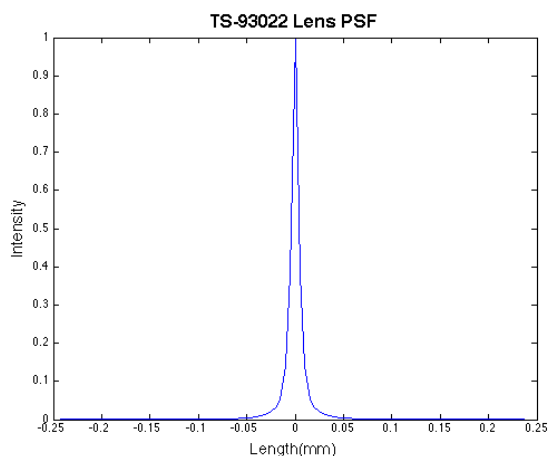


Figure 6: TS-93022 レンズの PSF.

### 2.1 YAG:Ce スクリーンの飽和特性

YAG:Ce は、高感度の発光特性を持つが入射される電子の密度が高い場合、発光が飽和する。YSM によるビームサイズの測定では発光量が飽和する電子密度を電荷量とプロファイルの面積( $\sigma$  値)から計算すると  $0.25\text{pC}/\mu\text{m}^2$  であった。この値はプロファイルの形状が明確に変形する値であるため、今回の様にビームコアのピークの大きさを求める時間問題となる。本来であれば OTR などの飽和しない他のモニターでビームコアの部分を測定し、測定値の連続性からビームコアとビームハローの全体像を測定すべきであるが、今回は他のモニターを用意出来なかったため、YAG:Ce の発光特性から直線フィットでビームコアのピークの大きさを求めた。Figure 7 は、YAG:Ce にビームコアの部分を照射した時の発光特性である。発光特性が飽和していなければ電子のバンチ電荷量を変えた時、電荷量に比例して発光量も

増えるはずであるが途中から飽和している様子が分かる。

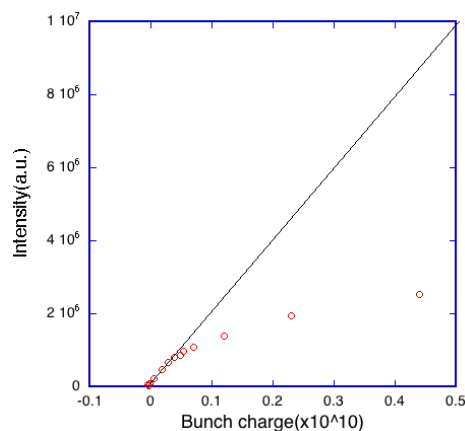


Figure 7: 計測される水平方向の最小ビームサイズ.

### 3. 測定結果

シミュレーションでは beam-gas scattering の影響が顕著であり、真空度やバンチ電荷の大きさが関係する。Figure 8, Figure 9 はそれぞれバンチ電荷が  $2.3 \times 10^9$  electrons,  $4.5 \times 10^9$  electrons の時のビームハローの広がりである。ダンピングリングの真空度はイオンポンプをオフすることによって変えている。ビームコアは上流のエミッタンス測定から測定位置でのビームサイズは  $25\mu\text{m}$ ,  $27\mu\text{m}$  と推測され、Gauss 分布に従うとして赤の実線で示されている。バンチ電荷の違いによってビームサイズが増加しているのは intra-beam scattering の効果である。縦軸は log scale である。

ビームコアの部分は Gauss 分布によく一致し、真空度に従ってビームハローが増加している傾向が測定されている。また、バンチ電荷の大きさが大きいとビームハローが増加している。測定値はシミュレーションによく一致していると言える。

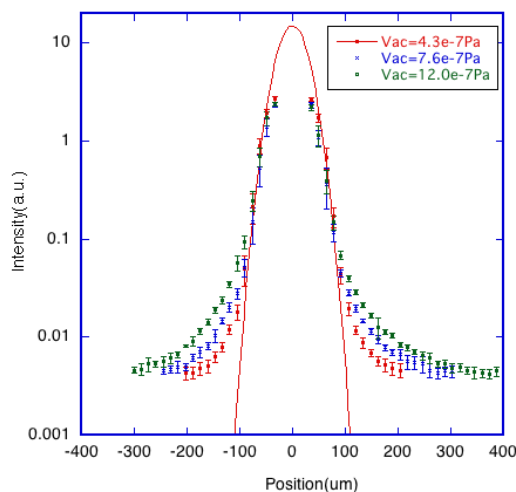


Figure 8: 測定されたビームハロー (バンチ電荷:  $2.3 \times 10^9$  electrons) .

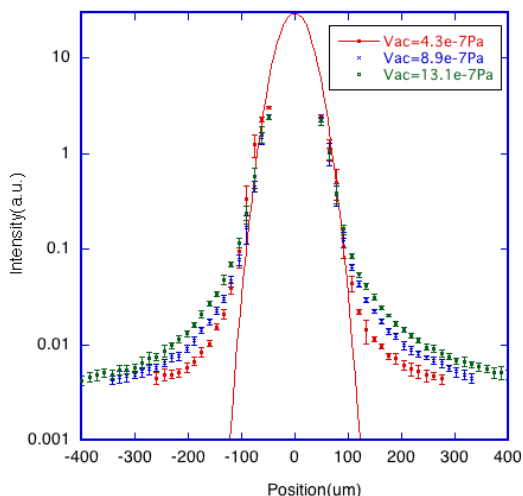


Figure 9: 測定されたビームハロー (バンチ電荷： $4.5 \times 10^9$  electrons) .

#### 4. まとめと今後の方針

ATF2 ビームラインに於いてビームハローモニターを製作し、現在までの測定では Gauss 分布から逸脱するビームハローが存在することが測定された。その強度は  $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$  程度であり、真空度、ビーム強度に依存する特性が測定された。ビームハローの広がりほぼシミュレーションに一致することが確かめられた。この測定ではビームコアの直接測定がなされないためにビームコアのピーク値は YAG:Ce の飽和特性から直線フィットで求めた。精度のある議論をするためには OTR モニターなどによるビームコアのピーク値の直接測定が必要である。また、今回は垂直方向のビームハローを測定するために水平方向のスリットを用いたが、垂直方向のスリットを用いて水平方向のビームハローも測定する必要がある。今後、これ等の測定を進めていきたい。

#### 謝辞

本研究を支援していただきました山口施設長、道園主幹、山本 ILC 推進室長に感謝致します。測定に協力いただきました ATF グループに感謝いたします。また、YAG:Ce スクリーンに関する情報を教えていただきました Spring8 松原氏に感謝いたします。本研究は文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」のサポートを受けました。

#### 参考文献

- [1] 久保、奥木, Proc. of 10<sup>th</sup> PASJ, SAOTP1, Nagoya, (2013)
- [2] Dou Wang, et al., Chinese Physics C, Vol. 38, No. 12 (2014) 127003.
- [3] M. Hempel, et al., Proc. of IBIC13, MOPC43, Oxford, UK (2013).
- [4] W. J. Berg, et al., Proc. of XX Int. Linac Conf., MOC06, Monterey, California(2000).
- [5] H. Maesaka, et al., Proc. of DIPAC, MOOA03, Basel, Switzerland (2009).
- [6] S. Matsubara, et al., Proc. of PASJ2012, WEPS093, (2012).
- [7] 内藤 他, Proc. of 11<sup>th</sup> PASJ, SAOM07, Aomori, (2014).
- [8] A. Arishev, Private communication.