

SPACIAL RESOLUTION OF SCREEN MONITOR FOR XFEL/SPring-8

Kenichi Yanagida^{1A)}, Shinobu Inoue^{B)}, Hiromitsu Tomizawa^{A)}, Hirokazu Maesaka^{B)},
Shinichi Matsubara^{B)} and Yuji Otake^{B)}

^{A)}JASRI, XFEL Joint Project /SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{B)}RIKEN, XFEL Joint Project /SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

Abstract

Screen monitors for the XFEL/SPring-8 were optimally designed to satisfy required transverse spacial resolutions. The main factors that contribute to a spacial resolution come from an aberration, diffraction, defocus due to a depth of field and the pixel size of CCD. Our optical systems were designed not to increase these four factors. Calculated resolutions of the optical systems are 2.5 μm (OTR, 4x magnification), 3.1 μm (Ce:YAG, 4x magnification), 25.0 μm (OTR, 0.44x magnification) and 16.6 μm (Ce:YAG, 0.44x magnification). The optical systems were examined at the SCSS Test Accelerator by using electron beams that were horizontally focused within a several ten micrometer. Because of comparable or larger beam size, an obtained image was too large to evaluate the resolution, however the optical systems were thought to satisfy the required resolutions.

XFEL用スクリーンモニタの空間分解能

1. はじめに

線型加速器やビーム輸送系に於いて一般的に使用されるスクリーンモニタの横方向空間分解能は数十 μm であった。しかし、線型加速器ベースの将来計画である X 線自由電子レーザー (XFEL) エネルギー回収型リニアック及びリニアコライダー等では、低エミッタンスビーム ($1 \pi\text{m}\cdot\text{mrad}$ 以下) のエミッタンス測定等を行うため、10 μm 以下の分解能が要求される。分解能には光学で決定される原理的な限界値があり、上記の将来計画で必須とされる分解能はそれに達するものである。

本論文では分解能に寄与する要因とその寄与の大きさを述べると共に、原理的な空間分解能を達成するためにはどのような問題が存在するかについて述べる。さらに、SPring-8 で建設中の XFEL 計画^[1] (XFEL/SPring-8) に使用されるスクリーンモニタについて、その設計と性能の検証を行ったので報告する。

2. スクリーンモニタの概要

XFEL/SPring-8 の非分散部に使用されるスクリーンモニタでは、発光体として OTR 発生用の金属フォイル (OTR フォイル) もしくは蛍光発生用の Ce:YAG が使用される (図 1 参照)^[2]。OTR フォイルはビームエネルギー 30 MeV 以上、Ce:YAG は 300 MeV 以下で使用する。

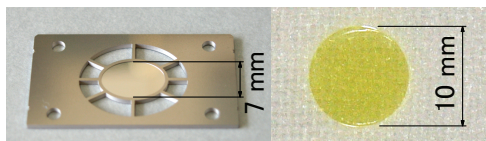


図 1: OTR フォイル (左) と Ce:YAG (右) の写真

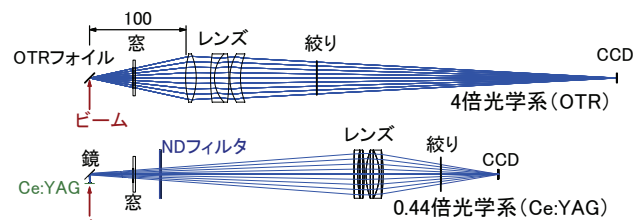


図 2: 光学系のレイアウト及び Zemax による光線追跡

OTR は電子が真空中から金属中 (または金属中から真空中) へ遷移する境界点で発生する輻射で、 $1/\gamma$ (γ はローレンツ因子) の円錐状強度角分布を持つ。我々の OTR フォイルは、図 2 のようにビーム軸に対して 45° 傾けられており、ビーム軸に対して 90° の方向に光が取り出される。

Ce:YAG は黄色透明な単結晶で、厚さ 0.1 mm の円板に加工されている。等方的に放出された光の一部はビーム下流側の金属鏡で反射され、OTR と同じくビーム軸に対して 90° の方向に取り出される (図 2 参照)。

光学系にはビームエミッタンス測定などに使用される 4 倍光学系と一般的なプロファイル観測用の 0.44 倍光学系がある。4 倍光学系に使用されるレンズは幾何収差及び色収差を最小に抑えるように特別に設計されたものであり^[3]、0.44 倍光学系は市販のアクロマティックレンズをリレーレンズとして組んだものである。両光学系では全ての光学定数 (曲率半径や硝材の屈折率、アッペ数等) が既知なため、収差等の計算を行うことが可能である。

3. 分解能に寄与する要因

以下に結像光学系 (Near Field) の分解能に寄与する各要因と、その寄与の大きさについて述べる。

¹ E-mail: ken@spring8.or.jp.

3.1 収差

幾何収差及び色収差の計算には光学設計・評価ソフトウェア Zemax (ZEMAX DEVELOPMENT CORPORATION) の光線追跡機能を使用した。入力した主な光学素子は Ce:YAG、光取り出し窓、ND フィルタ、レンズ及び CCD 保護ガラス (図 2 参照) である。なお、ND フィルタは Ce:YAG からの光量が強過ぎる (OTR の 1000 倍以上) ため点光量を 1/100 に低減させるのに使用する。

光線追跡の波長帯域は 400 - 800 nm (OTR) 及び 550 nm (Ce:YAG) とし、絞りが制限する物体空間での開口数 NA_o は 0.213 (4 倍光学系) 及び 0.074 (0.44 倍光学系) とした。収差は NA_o に比例するので、絞りを絞って NA_o を小さくすると収差は小さくなる。

計算のため、仮想的なシャープエッジ 50 μm (4 倍光学系) 及び 0.5 mm (0.44 倍光学系) の正方形物体を物体面に置き、得られた像 (図 3 参照) のエッジ部分を解析した。

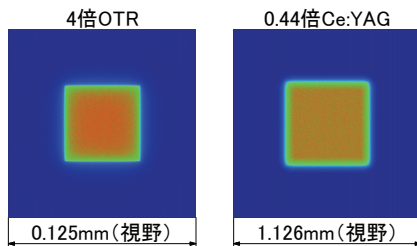


図 3: 仮想的な物体 (光源) からの光線追跡により得られた像

収差 (点像のボケ) の大きさはエッジ部分の幅 (25 - 75% 変化幅の半値) とした。図 4 は図 3 各像の中心付近、鉛直方向の強度分布で、立ち上がりエッジ部分を拡大している。図より収差による寄与は OTR の 4 倍光学系で 1.0 μm 、Ce:YAG の 0.44 倍光学系で 13.5 μm と得られた。

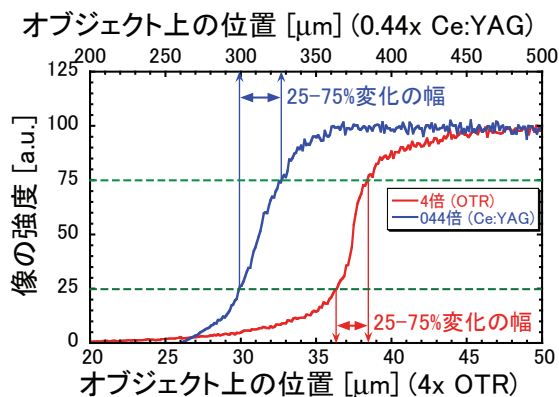


図 4: 図 3 各像の立ち上がりエッジ部分

3.2 回折パターン

結像光学系を構築した場合、レンズが無収差であるとしても回折により点像は有限な大きさを持った

像 (回折パターン) となる。回折パターンの計算には Fraunhofer 回折の式が用いられる。ここではレンズや円形絞りを考えているので、円形開口の回折パターンを考える。

Fraunhofer 回折を計算する際、開口数が小さく (0.3 以下) 且つ光がランダム偏光の場合はスカラービームとして扱われるが、それ以外はベクトルビームとして扱われなければならない。今回、Ce:YAG の場合はスカラービームとして、OTR の場合はベクトルビームとして扱われる。

Ce:YAG など等方的に光を放出する場合、その回折パターンはエアリーパターンとして知られ、その半値半幅 (Half Width at Half Maximum) は光の波長を λ とした場合、次のようになる。

$$\frac{\lambda}{4NA_o} \quad (1)$$

一方、OTR の回折パターンは Fraunhofer 回折の式に発光の角度分布をたたみ込み、フーリエ積分を遂行することによって得られる^{[4][5]}。回折パターンは円環状で、電子ビームのエネルギーには依らない。OTR はラジアル偏光を持つベクトルビームとして扱われ、2 次の伝搬 (高次) モードまで考えると、回折パターンの大きさ (半値半幅) はエアリーパターンの 3 倍程度になると思われる。

$$\sim \frac{3\lambda}{4NA_o} \quad (2)$$

式 (1) 及び式 (2) から判るように回折パターンの大きさは NA_o に反比例するため、絞りを絞って NA_o を小さくすると回折パターンは大きくなる。 λ を 600 nm (OTR の代表波長) 及び 550 nm (Ce:YAG) とすると、分解能への寄与は 2.1 μm (OTR の 4 倍光学系) 及び 1.9 μm (Ce:YAG の 0.44 倍光学系) と得られる。

3.3 発光点が深度を持つ場合

発光点がレンズに対して被写界深度を持つ場合、ピンボケにより分解能が悪化する。ピンボケの程度は幾何学的な計算から以下のように表される。

$$\frac{tNA_o}{2n} \quad (3)$$

ここで、 t は被写界深度の深さで、Ce:YAG の場合は結晶厚の半値、OTR の場合はビームサイズとなる。 n は発光体の屈折率で、Ce:YAG の場合は 1.82、OTR の場合は 1 (真空) である。式 (3) から判るようにピンボケの大きさは NA_o に比例するため、絞りを絞って NA_o を小さくするとピンボケは小さくなる。

OTR の場合、ピンボケは最大でビームサイズの 5% 程度となるが、ビームサイズに比して小さいとして無視できる。Ce:YAG の 0.44 倍光学系の場合は 1.0 μm となる。

ピント調整が不十分な場合のピンボケも式 (3) より計算可能で、例えば 4 倍光学系に於いて発光体-レンズ間距離がベストフォーカスから 0.1 mm ずれると、11 μm のボケが生じる ($n = 1$ で計算)。

3.4 CCDのピクセルサイズによる最小像サイズ

CCDカメラを使用して像を取得する場合、観測される最小像サイズはCCDのピクセルサイズとなり、それ以下にはならず、分解能に寄与する要因と考える。 σ_{pel} をCCDのピクセルサイズ、光学倍率を M とすると、分解能への寄与は以下ようになる。

$$\frac{\sigma_{pel}}{2M} \quad (4)$$

4倍光学系で使用されるCCDカメラのピクセルサイズは $6.5\ \mu\text{m}$ で分解能への寄与は $0.8\ \mu\text{m}$ に、0.44倍光学系で使用されるCCDカメラのピクセルサイズは $8.3\ \mu\text{m}$ で分解能への寄与は $9.4\ \mu\text{m}$ になる。

3.5 電子散乱、制動X線、発光の飽和

Ce:YAGを使用する場合、電子の多重散乱、制動放射X線による蛍光発生及び発光強度飽和による分解能の悪化が起こる^{[6][7]}。例えばエネルギー250 MeVの電子ビームプロファイルを0.1 mm厚のCe:YAGで観測する場合、電子の多重散乱による分解能への寄与は $0.1\ \mu\text{m}$ 程度、制動放射によるX線の拡がりによる寄与は $0.1\ \mu\text{m}$ 程度となる。

Ce:YAGの発光強度飽和による分解能への寄与を計算することは困難である。飽和密度以下で使うことが望ましい。文献^[7]によると、発光の減衰時定数(80 ns)以内に電子密度が $0.3\ \text{pC}/\mu\text{m}^2$ 以上になると発光強度の飽和が起こると報告されている。我々のビーム試験では最大でも $0.03\ \text{pC}/\mu\text{m}^2$ 程度であり、発光強度は飽和しなかったと考える。

これらはビームエネルギーが低い場合や高電子密度の場合に起こる現象で、個別に分解能への寄与を見積もるものとする。

3.6 計算結果

上記各要因は1次独立な事象であり、寄与を計算し、それらの二乗和平方根を取ることで分解能(合計)を算出した(表1参照)。収差による寄与がCe:YAGの場合に小さくなるのは単色での計算であること、物質中(屈折率1より大)での発光であることが原因である。

OTRの4倍光学系では回折による寄与が最大となるが、開口数はこれ以上大きく取れず、改善の余地は無いだろう。Ce:YAGの4倍光学系では深度による寄与が支配的になるが、発光する部分の厚みを薄く、例えば $20\ \mu\text{m}$ にすると他の要因と同程度にできる。4倍光学系の分解能はFFGD(Fixed Frequency Grid Distortion)ターゲットを使用した試験で $2\ \mu\text{m}$ 程度と測定されており^[3]、今回計算された分解能とほぼ一致している。

0.44倍光学系は収差が支配的となるが、これは市販のレンズを組み合わせ使用しているため、専用のレンズを製作すれば収差は小さくなるし、絞リによって開口数を小さくすれば分解能は良くなる。

表 1: 計算された分解能 [μm]

倍率	発光体	収差	回折	深度	CCD	合計
4	OTR	1.0	2.1	0.0	0.8	2.5
4	Ce:YAG	0.4	0.6	2.9	0.8	3.1
0.44	OTR	22.3	6.1	0.0	9.4	25.0
0.44	Ce:YAG	13.5	1.9	1.0	9.4	16.6

4. ビームプロファイルの確認

光学系を評価するために、SCSS試験加速器^[8]にスクリーンモニタを設置しOTRとCe:YAG蛍光を観測した。図5は使用した光学系である。4倍光学系はレンズ及びCCDカメラがモーター付きステージの上にマウントされており、ピントは像を見ながら遠隔にて調整可能である^[2]。一方、0.44倍光学系は現場でのピント調整になるためベストフォーカスは得にくい。特にCe:YAGの場合は照明をONしても、透明で何も反射しないため調整は困難である。



図 5: SCSS 試験加速器に設置されたスクリーンモニタ光学系(上:4倍光学系、下:0.44倍光学系)

図6及び図7は4倍光学系及び0.44倍光学系を使用して得られた像である。加速器上流の四極電磁石を調整して水平方向に電子ビームを絞った。0.44倍光学系では視野が広いので照明をONするとOTRフォイルのフレーム等が見られる。

図8及び図9は図6及び図7の像強度を水平方向

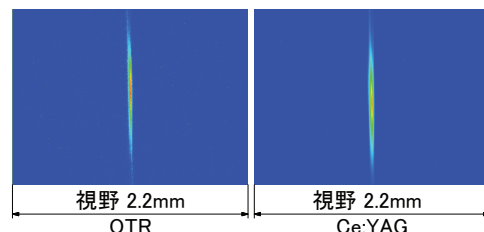


図 6: 4倍光学系を使用して得られた像(左:OTR、右:Ce:YAG、照明OFF時)

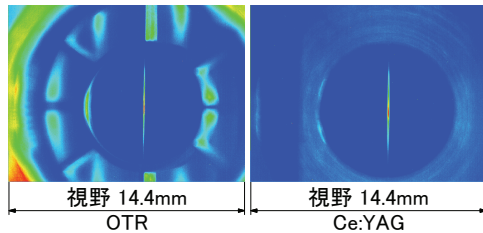


図 7: 0.44 倍光学系を使用して得られた像 (左:OTR、右:Ce:YAG、照明 ON 時)

への射影した強度分布である (照明 OFF 時)。横軸は CCD 面上の位置ではなく、発光点の位置に換算されている。グラフから射影強度分布の半値半幅を読み取ったものを表 2 の換算像サイズに示す。ビームサイズは換算像サイズから分解能 (表 1 の合計) を差し引いて算出したものである。

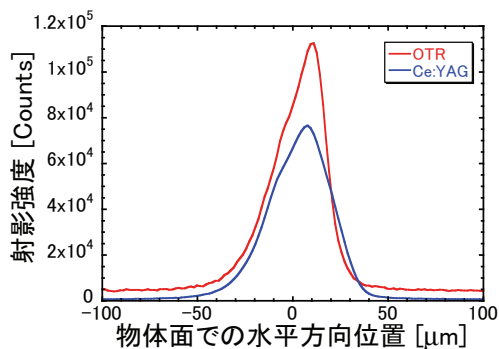


図 8: 図 6 の水平方向射影強度分布 (照明 OFF 時)

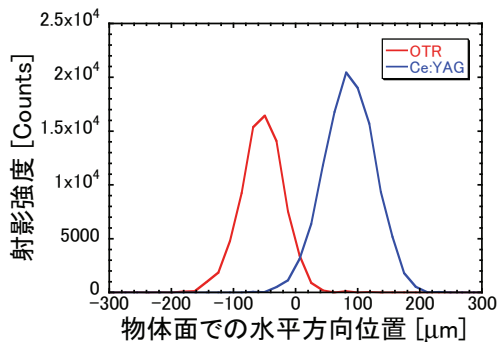


図 9: 図 7 の水平方向射影強度分布 (照明 OFF 時)

表 2 から、実際のビームサイズは 4 倍光学系試験時で 14 μm 以下、0.44 倍光学系試験時で 30 μm 以下であったと思われる。OTR と Ce:YAG の場合で差があるのは、Ce:YAG の方が ND フィルタ等光学要素が多く、ピンボケをより十分に抑え切れなかった為だと思われる。特に Ce:YAG の 0.44 倍光学系ではピンボケが大きく、ビームサイズが大きく表れた。この時の被写界深度のずれは 0.9 mm 程度あったと思われる。今回の試験ではビームサイズが大きく、設計分解能が得られているかどうかは明快でない。しかし、ピンボケ以外の光学系に関する問題は現れず、FFGD ター

表 2: 像サイズ (換算値) 及びビームサイズ [μm]

倍率	発光体	換算像サイズ	ビームサイズ
4	OTR	14.3	14.1
4	Ce:YAG	18.7	18.4
0.44	OTR	38.9	29.8
0.44	Ce:YAG	48.4	45.5

ゲットを使用した試験を参考にして総合的に考えると、ピント調整さえ正確に行えば設計通りの性能が得られると判断する。

5. まとめ

XFEL/SPring-8 で使用されるスクリーンモニタの分解能は 4 倍光学系で 2.5 μm (OTR)、3.1 μm (Ce:YAG) と計算された。どちらも 10 μm 以下であるが、Ce:YAG の場合は発光強度の飽和が予想されるため、小さなビームサイズの測定に使用すべきでない。一方、0.44 倍光学系では 25.0 μm (OTR)、16.6 μm (Ce:YAG) と計算された。

OTR の 4 倍光学系はエミッタンス測定に使用される。その分解能へは回折が最も大きく寄与している。これは、OTR が $1/\gamma$ の円錐状強度角分布を持ち、且つラジアル偏光を持つために、回折パターンが大きさがエアリーパターンの 3 倍程度と見積もられるためである。回折による寄与を小さくするには開口数を大きく取れば良いが、実際には開口数をこれ以上大きく取れず、回折が実質的に分解能を決めている。OTR の回折に関しては、今後より詳細に議論を進めて行く必要があるだろう。

SCSS 試験加速器でビーム試験を行ったが、ビームサイズが大きく、設計分解能が得られているかどうかは明快ではなかった。問題としてはピント調整不十分によるピンボケが比較的大きいことが判明した。ピント調整を正確に行えば光学系は設計通りの性能を発揮すると思われる。

参考文献

- [1] T. Shintake, et al., "Construction Status of XFEL/SPring-8", in these proceedings.
- [2] S. Inoue, et al., "Screen Monitor Prototype for XFEL/SPring-8", Proc. of the 5th Particle Accel. Soc. of Japan, Higashihiroshima, August 2008, pp. 545-547.
- [3] K. Yanagida, et al., "Optics of Screen Monitor for XFEL/SPring-8", Proc. of the 5th Particle Accel. Soc. of Japan, Higashihiroshima, August 2008, pp. 542-544.
- [4] D. Xiang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **570** (2007) 357.
- [5] M. Castellano, et al., Phys. Rev. ST-AB **1** (1998) 062801.
- [6] W. S. Graves, et al., "A High Resolution Electron Beam Profile Monitor", Proc. of the 1997 Particle Accel. Conf., Vancouver, May 1997, pp. 1993-1995.
- [7] A. H. Lumpkin, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **429** (1999) 336.
- [8] H. Tanaka, et al., 「加速器」 vol. **5** (2008), 237.