



YAG:Ce を用いた高分解能スクリーンモニター



2014/08/09 PASJ14

○内藤孝、三橋利行、荒木栄、浦川順治、
奥木敏行、久保浄、黒田茂、照沼信浩

Contents

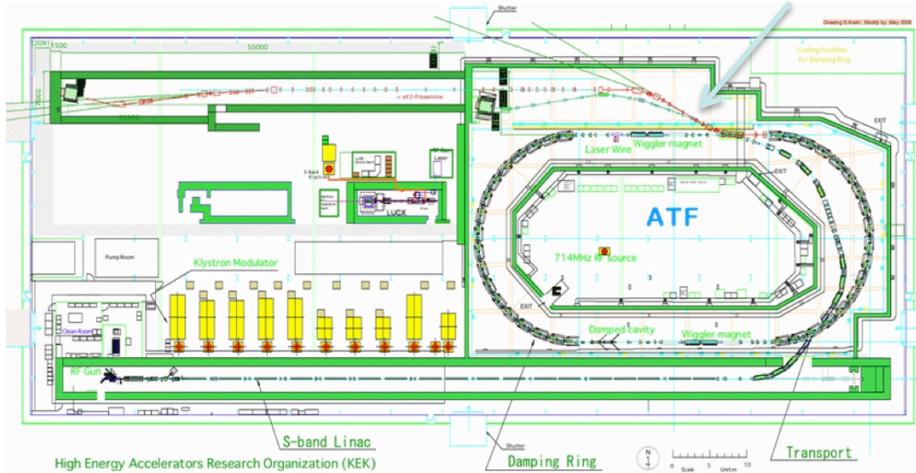
1. 開発の動機
2. YAG:Ce シンチレーターの特徴
3. スクリーンモニターのハードウェア
 - レンズ
 - CCDの電子シャッター特性
4. ビーム測定
5. スクリーンの厚みによる違い
 - 100um セラミックス
 - 50um セラミックス
 - 50um 結晶
6. エミッタンス測定
7. まとめ



開発の動機



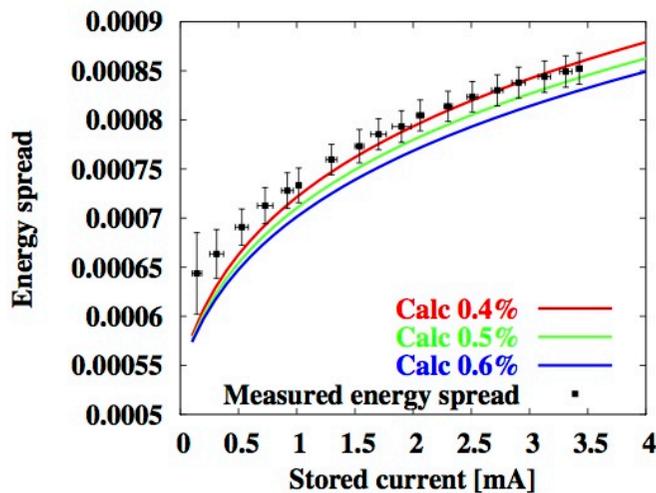
Screen monitor



ATF ダンピングリングから取り出した高品質ビームの特性の測定

- Momentum spread
- X-Y coupling
- Kick angle jitter

デマルケスト蛍光板を用いたスクリーンモニターを使用していたが分解能が不足。
下流のATF2 Beam LineではOTRモニターが使われているが、Low intensityでは感度が足りない。



Momentum spread の測定例
(ATF beam line)

設計上予想されるビームサイズ

$$\sigma_x = 297 \mu\text{m} (\eta \Delta p / p = 292 \mu\text{m})$$

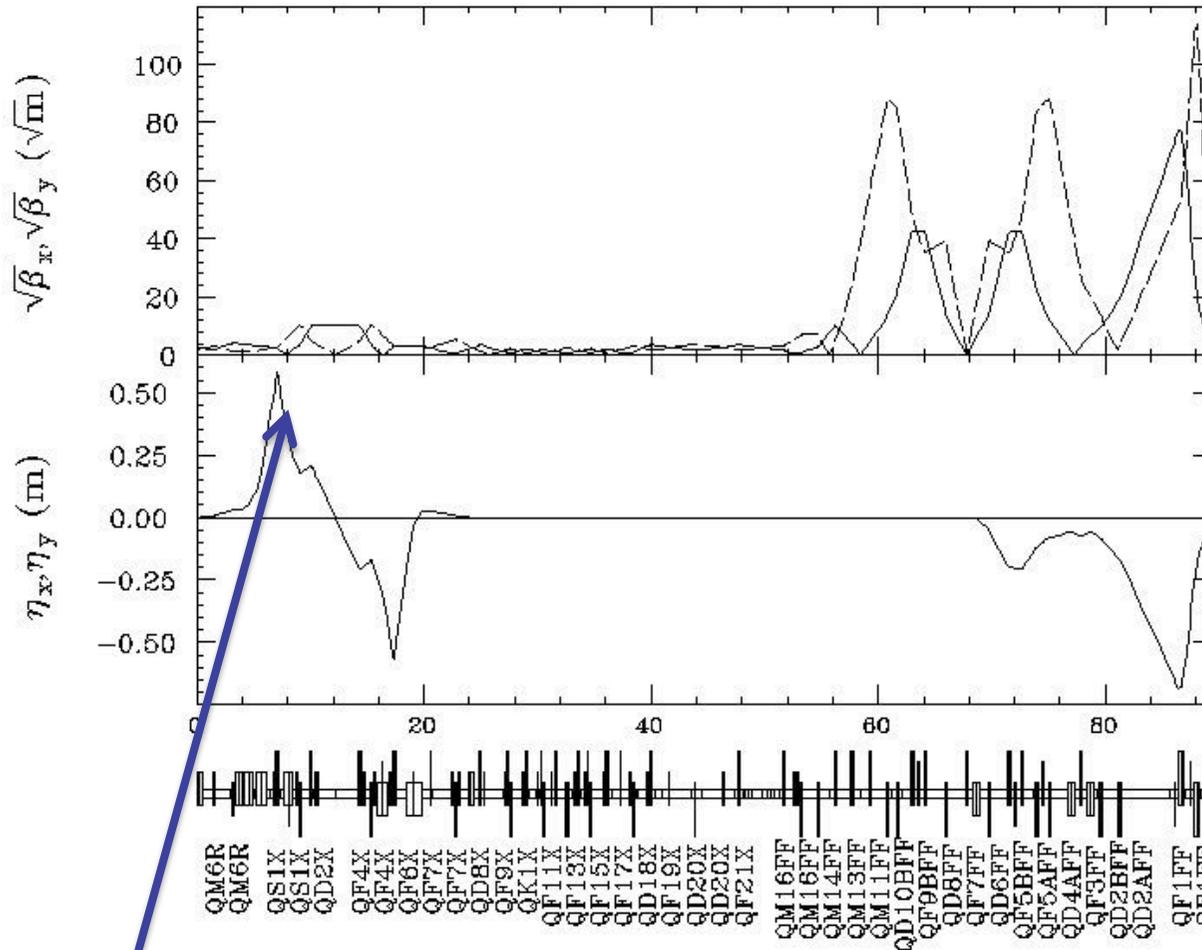
$$\sigma_y = 11 \mu\text{m}$$

ビーム強度に対し広いダイナミックレンジ
を持ち高分解能のモニター

-> YAG:Ce scintillator



Beam Size Calculation



$$\beta_x = 2.2148 \text{ m}$$

$$\beta_y = 8.5675 \text{ m}$$

$$\eta_x = 0.4868 \text{ m}$$

$$\epsilon_x = 1.3 \text{ nm (measured in DR)}$$

$$\epsilon_y = 14 \text{ pm (measured in DR)}$$

$$dp/p = 0.0006$$

Beam size at YSM monitor:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= (\epsilon_y \times \beta_y)^{1/2} \\ &= (14 \times 10^{-12} \times 8.5675)^{1/2} \\ &= \underline{11 \mu\text{m}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \\ &= ((\epsilon_x \times \beta_x)^{1/2})^2 + (\eta_x \times dp/p)^2)^{1/2} \\ &= ((53.6)^2 + (292)^2)^{1/2} = \underline{297 \mu\text{m}} \end{aligned}$$

YAG:Ce Screen Monitor (YSM)



YAG:Ce Scintillatorの特徴

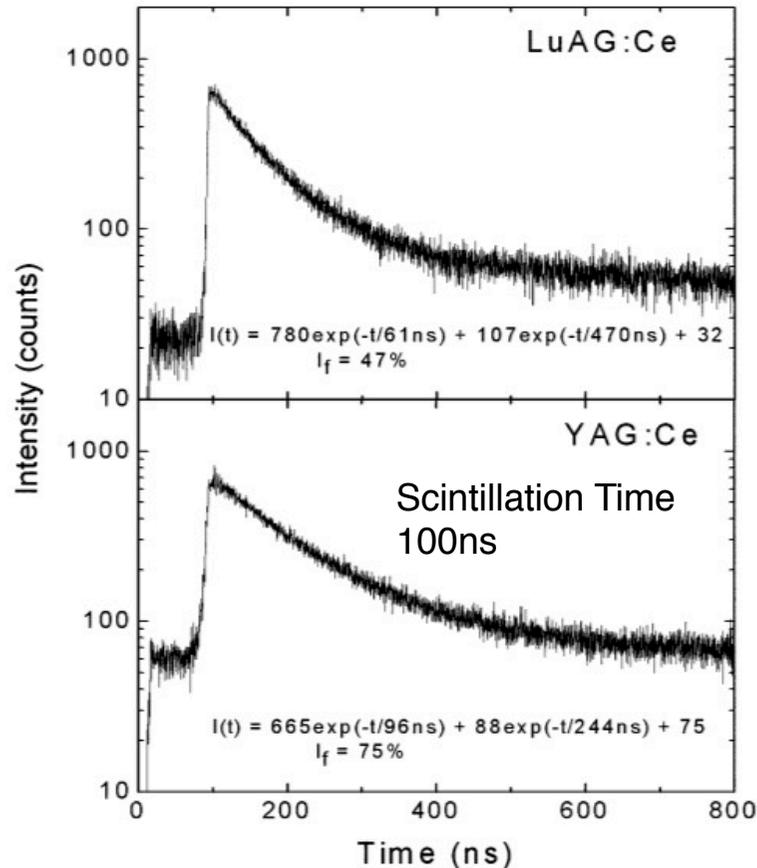


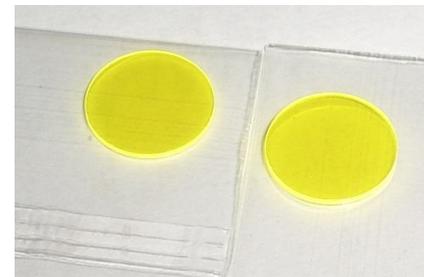
Fig. 4. Scintillation decay spectra of LuAG:Ce and YAG:Ce crystals under excitation with 662 keV γ -rays from a ^{137}Cs source as measured within $1\ \mu\text{s}$ range. Experimental data are fitted by the function $I(t)$ displayed in the figure.

IEEE TRANS. ON NUCL. SCI.,
VOL. 56, NO. 6, DECEMBER 2009

YAG:Ce (CeをドープしたYttrium Aluminum Garnet) scintillator は、

1)真空特性、2)機械特性、3)使用寿命
がよく、

1. 発光波長550nm, 発光時間~100ns
2. 高感度 - OTRと比較して100~1000倍
(XX Linac Conf. MOC06)
3. 高分解能 ~16 μm
(DIPAC09 MOOA03, Spring8)



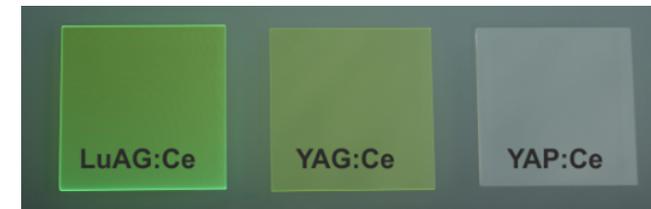
50 μm thickness
YAG:Ce scintillator



YAG:Ce Scintillatorの特徴



	NaI:TI	YAG:Ce	LuAG:Ce	YAP:Ce
Physical properties				
Density[g/cm ³]	3.67	4.57	6.73	5.37
Hardness [Mho]	2	8.5	8.5	8.6
Index of refraction	1.85	1.82	1.84	1.95
Crystal structure	Cubic	Cubic	Cubic	Rhombic
Melting point [°C]	651	1970	2020	1875
Hygroscopic	Yes	No	No	No
Linear coef. thermal expansion [10 ⁻⁵ /K]	4.75	0.8-0.9	-	0.4-1.1
Cleavage	Yes	No	No	No
Chemical formula	NaI	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Lu ₃ Al ₅ O ₁₂	YAlO ₃
Luminescence properties				
Integrated light output [% NaI:TI]	100	40	20	70
Wavelength of max. emission [nm]	415	550	535	370
Decay constant [ns]	230	70	70	25
Afterglow [% at 6 ms]	0.5-5	<0.005	-	<0.005
Radiation length [cm] for 511 keV	2.9	3.5	-	2.7
Photon yield at 300 K [10 ³ Ph/MeV]	38	35	20	25





スクリーンモニターのハードウェア構成(1)

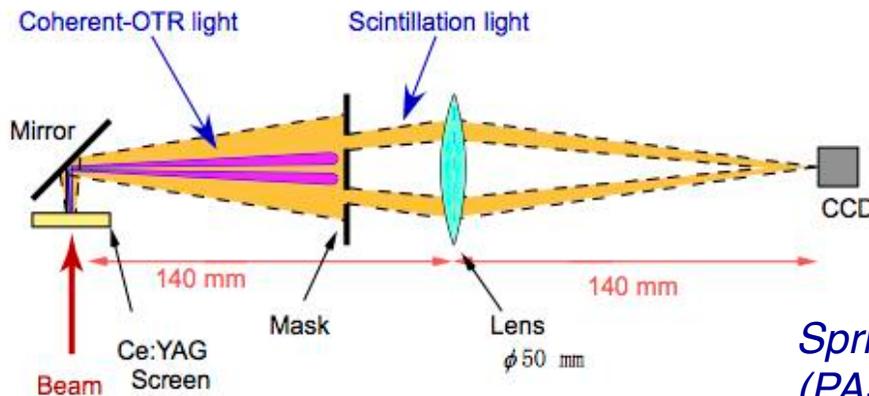
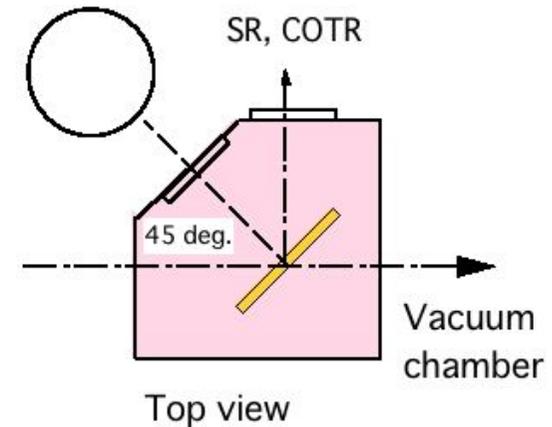
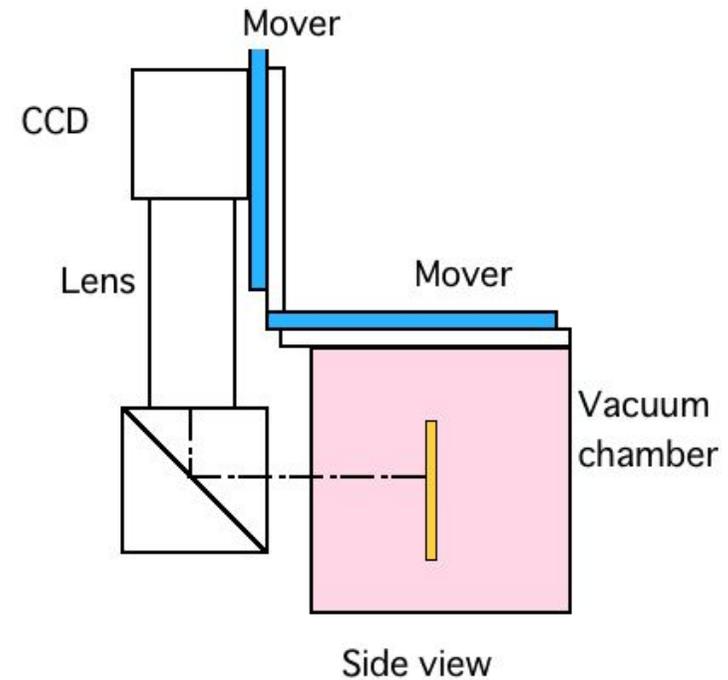


既存のデマルケスト用アクチュエーターチャンバーを改造し、CCDはビームに対し水平45°の角度のビューポートから測定する。

上流からのSRの反射やCoherent OTRは90°方向に進むため、これ等を排除することが出来る。

また、レンズの光軸はスクリーンを正面から見ることになり焦点深度の浅いレンズ系を用いても像の位置によって焦点がずれない。

CCDはスクリーンからのX線が直接当たらないようにするため光軸をミラーで90°曲げている。CCDは3軸のステージ上に固定され、X, Y, Focusをリモートから調整出来るようにした。



Spring8のスクリーンモニター
(PASJ 2012WEPS093)

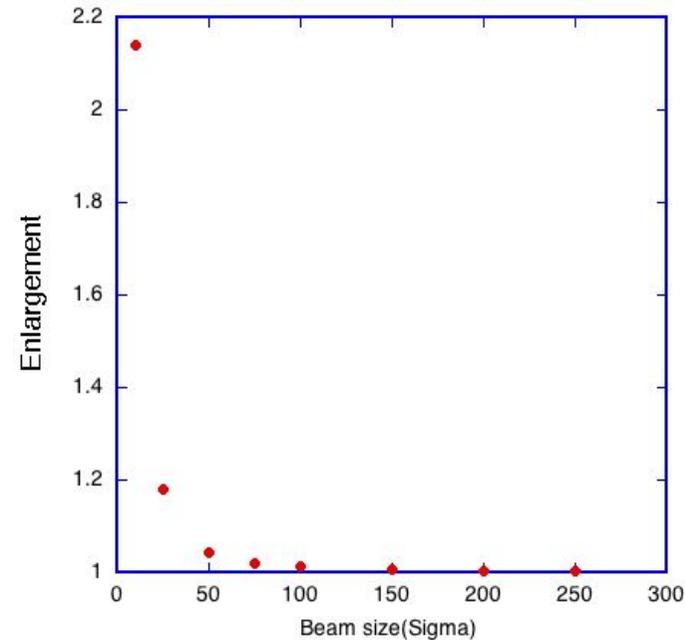
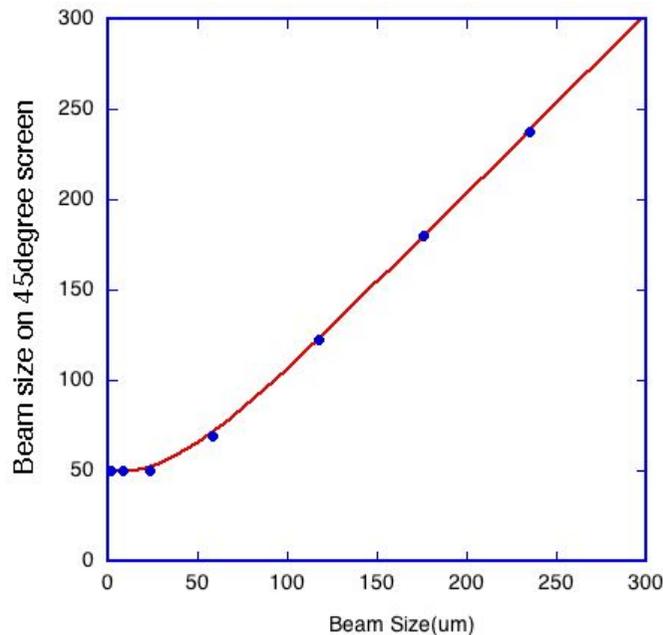
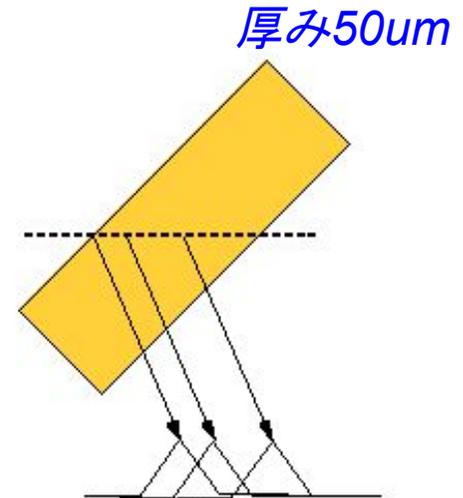


スクリーンモニターのハードウェア構成(2)



水平方向の最小ビームサイズ

- Scintillatorに斜め45° からビームが入射するとビームが通過した部分だけ発光が広がる。
- ビームがgauss分布の広がりを持っている場合、ビームサイズとScintillatorの厚みのConvolutionになる。
- 計算ではビームサイズと同じ厚みのScintillatorを通過した場合でも約4%程度の増加であり、この程度の大きさまでのビームサイズ計測が可能。





スクリーンモニターのハードウェア構成(3)



レンズ SUGITOH TS-93022

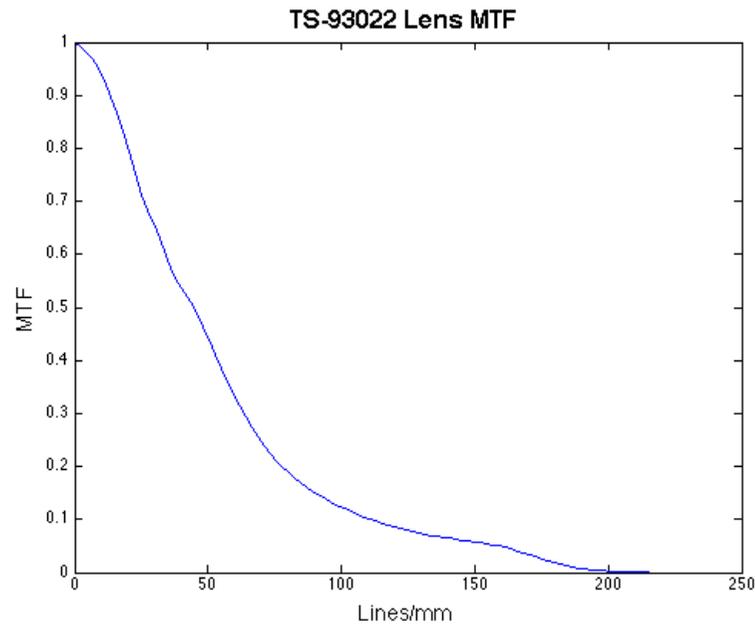
倍率 0.38~3

口径 38mm

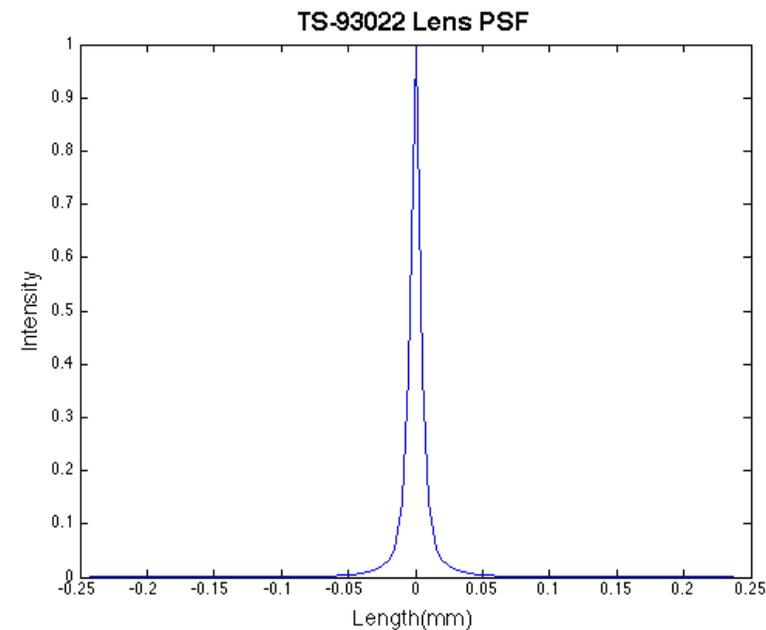
焦点距離 165mm

焦点深度 0.3mm

分解能 4.3 μ m



TS-93022の
Modulation Transfer Function



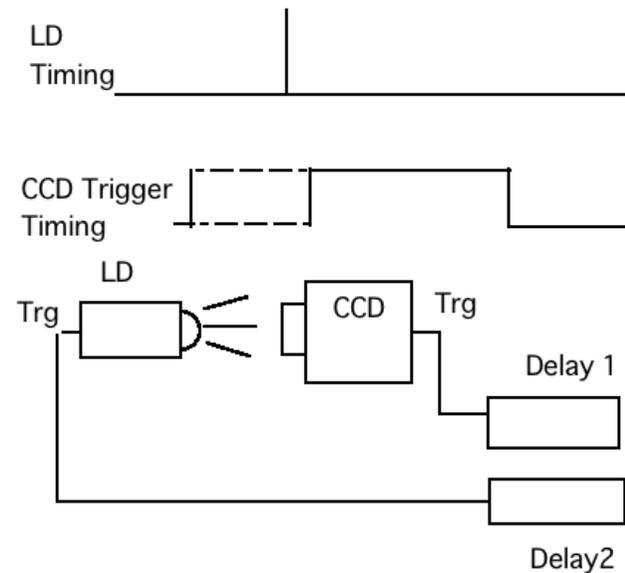
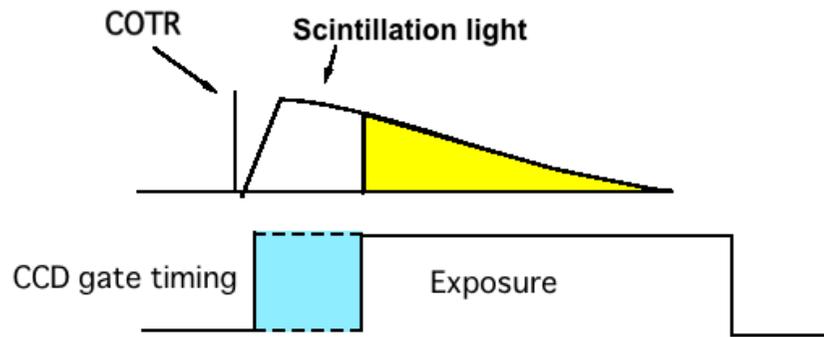
TS-93022の
Point Spread Function



スクリーンモニターのハードウェア構成(4)



CCDカメラの 電子シャッターの評価



当初、SR,COTRとScintillationを分離するためにCCDの電子シャッター機能を使いSR,COTRの発光タイミングを外して撮像することを考えた。

CCDの撮像タイミングは、外部トリガーに対して非同期の内部クロックのタイミングで撮像されるため最低でも1内部クロック周期(40MHzの場合25ns)のジッターが発生する。さらに外部トリガーに対する応答速度などが加味されるためYAG:Ceの発光時間(~100ns)に対して無視出来ない効果になる。この動作を評価するために、Laser Diodeの短時間発光30ps(浜松フォトニクスC4725)を外部トリガーのタイミングを変えながら撮像するテストを行った。



スクリーンモニターのハードウェア構成(5)



1) IMPREX IGV-B0610M

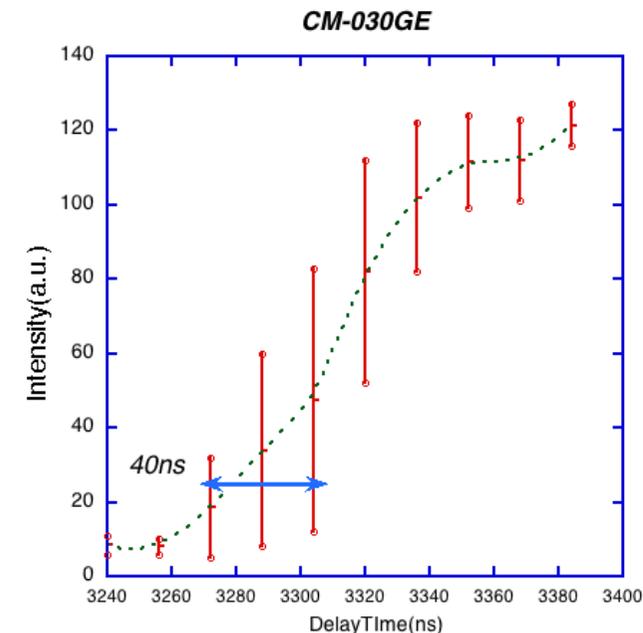
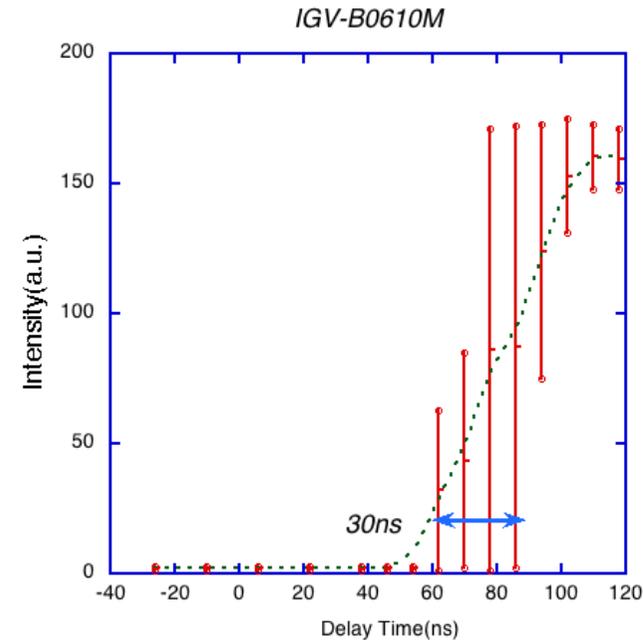
1/3 inch, GE interface
pixel size: $7.4\mu\text{m} \times 7.4\mu\text{m}$
pixel number: 684 x 488
elect. shutter: $2\mu\text{m}$ min.

2) JAI CM-030GE

1/3 inch, GE interface
pixel size: $7.4\mu\text{m} \times 7.4\mu\text{m}$
pixel number: 640 x 480
elect. shutter: $50\mu\text{m}$ min.

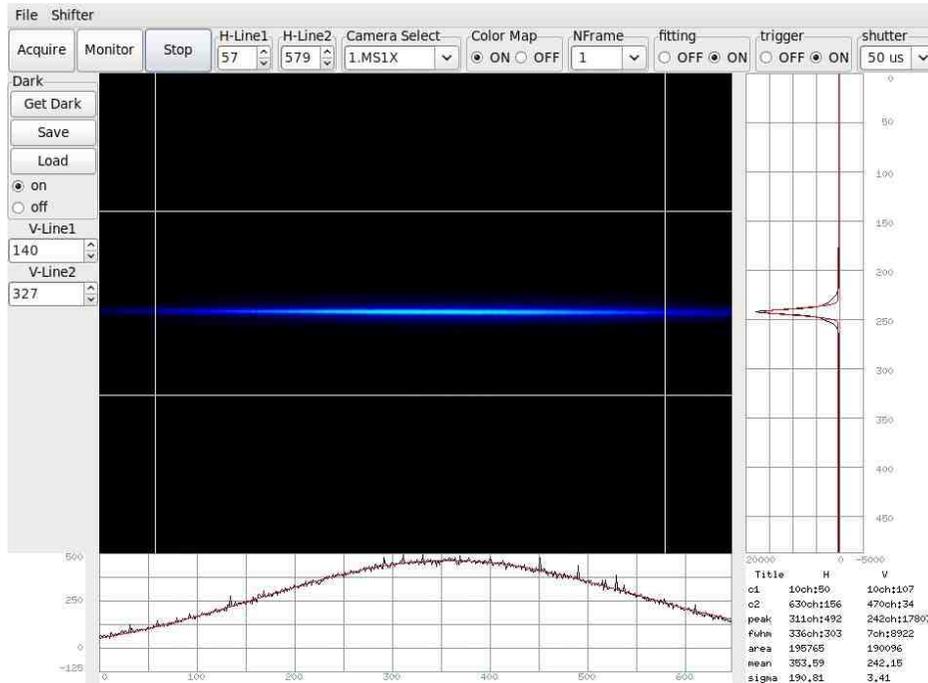
2種類のCCDについて、LD光源を電子シャッターのタイミングを変えながら撮像し、撮像した像のピーク値から電子シャッターの動作を評価した。

	IGV-B0610M	CM-030GE
Delay	50ns	$3.2\mu\text{s}$
Jitter	30ns	40ns
Rise Time	60ns	120ns

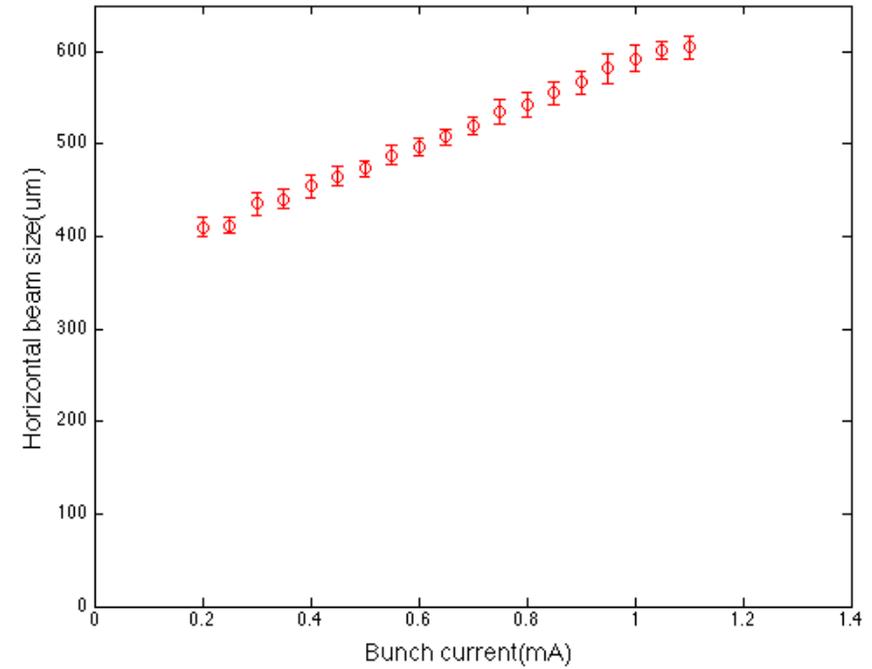




ビーム測定



測定プロファイル



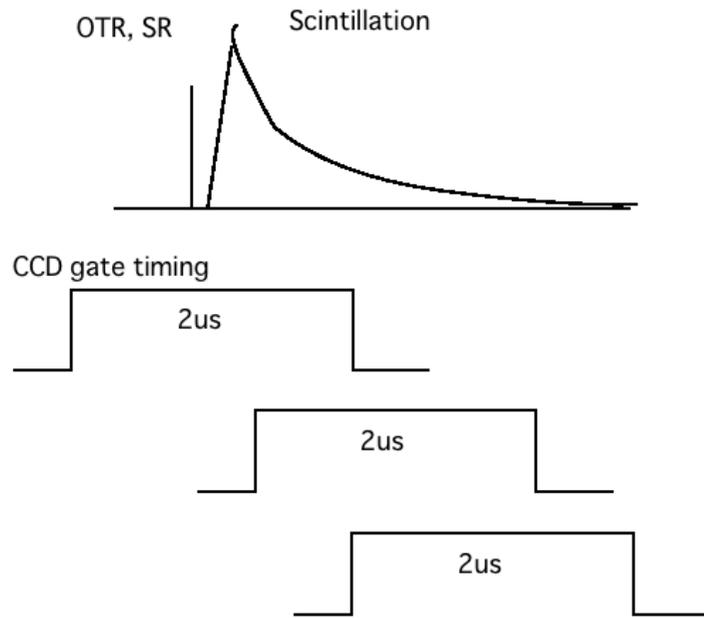
水平方向のビームサイズの
バンチ電流依存性



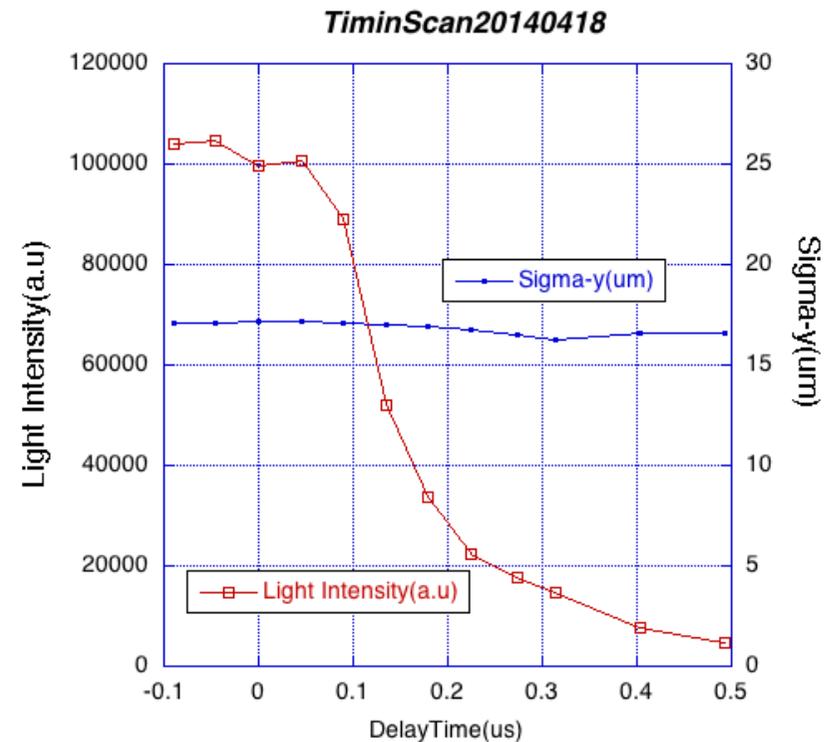
撮像タイミングによる発光特性の測定



CCDへのトリガータイミングを変更することによってYAG:Ceスクリーンの発光タイミングに対して、CCDの撮像タイミングを変えることができる。言い換えると $2\mu\text{s}$ のウィンドウでスクリーンの発光特性を測定することになる。



- 減衰特性はYAG:Ceの発光特性に一致
- 光量に変化してもビームサイズの測定値に変化はない
- ビームタイミングから $1\mu\text{s}$ 以上遅れたタイミングも測定可能





スクリーンの厚みによる違い(1)

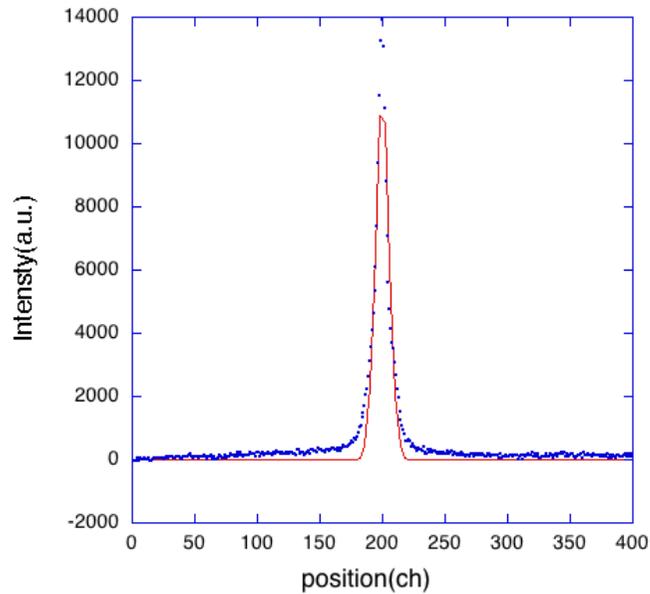
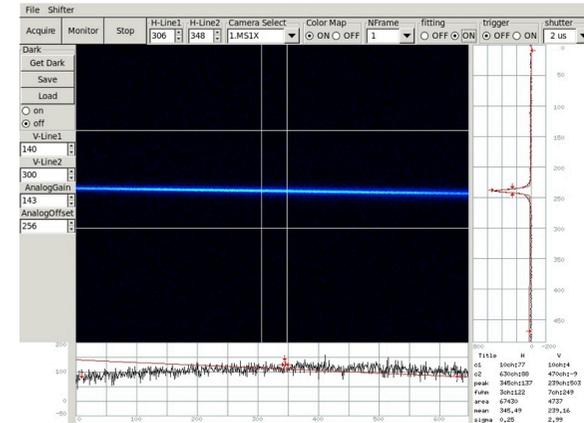


ATFのビームを垂直方向にフォーカスした時の
最小ビームサイズの測定

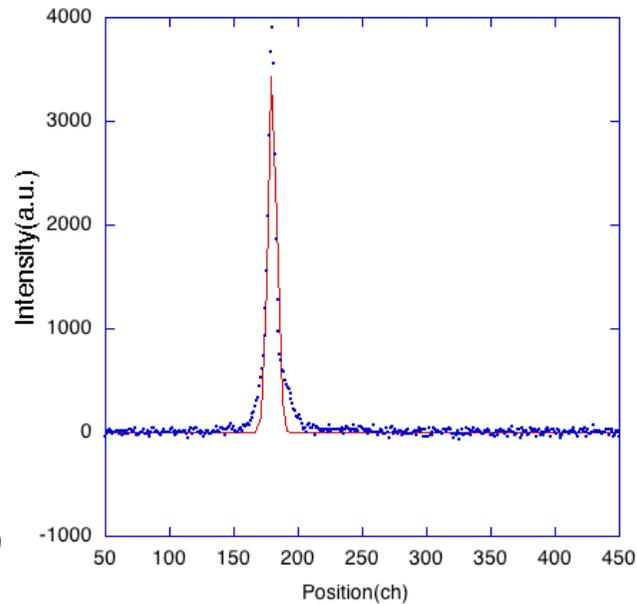
YAG:Ceスクリーンは

- 1) 厚さ 100um(セラミック焼結:神島化学)
- 2) 厚さ 50um(セラミック焼結:神島化学)
- 3) 厚さ 50um(結晶:CRYTUR)

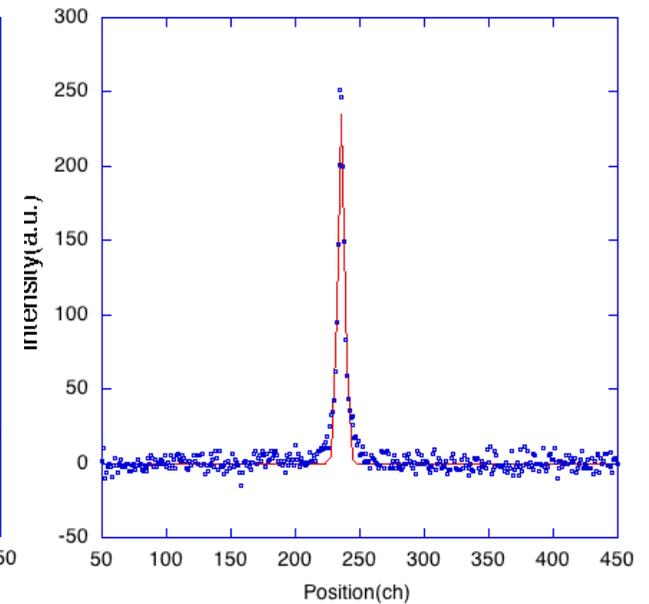
の3種類をテスト。



100um セラミック
13.9 μ m



50um セラミック
8.6 μ m



50um 結晶
7.0 μ m



スクリーンの厚みによる違い(2)



測定エラー

- スクリーンのにじみ
- レンズの分解能
- スクリーンのSaturation
- Multiple scattering ->小さい

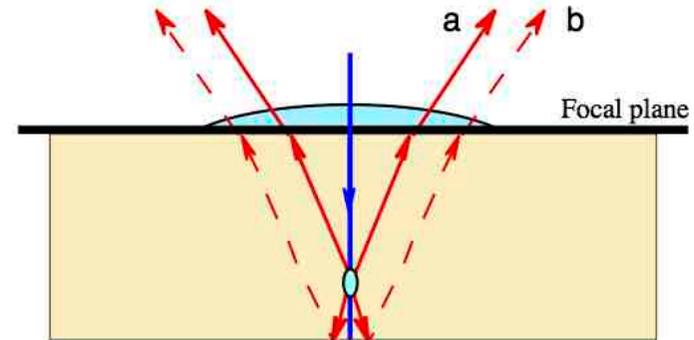
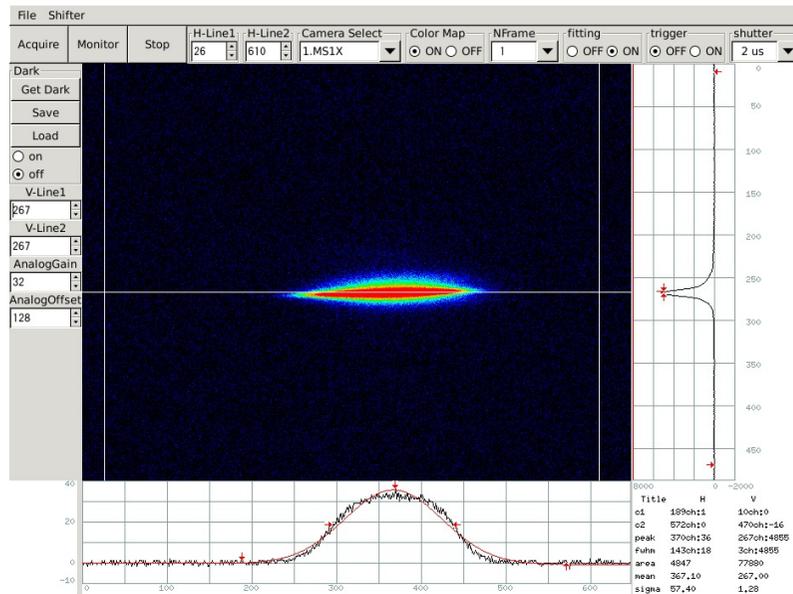


Figure 4: Limitations on YAG optical resolution at large emission angles. Image from a point source is not sharp due to: (a) finite crystal width, and associated depth of focus problem; (b) light reflection from the back wall of a crystal.

A. MUROKH et. al.,
Proceedings of the 2nd ICFA Advanced
Accelerator Workshop. Held 9-12
November 1999 in Los Angeles



Bunch charge = $0.3 \times 10^{10} e$

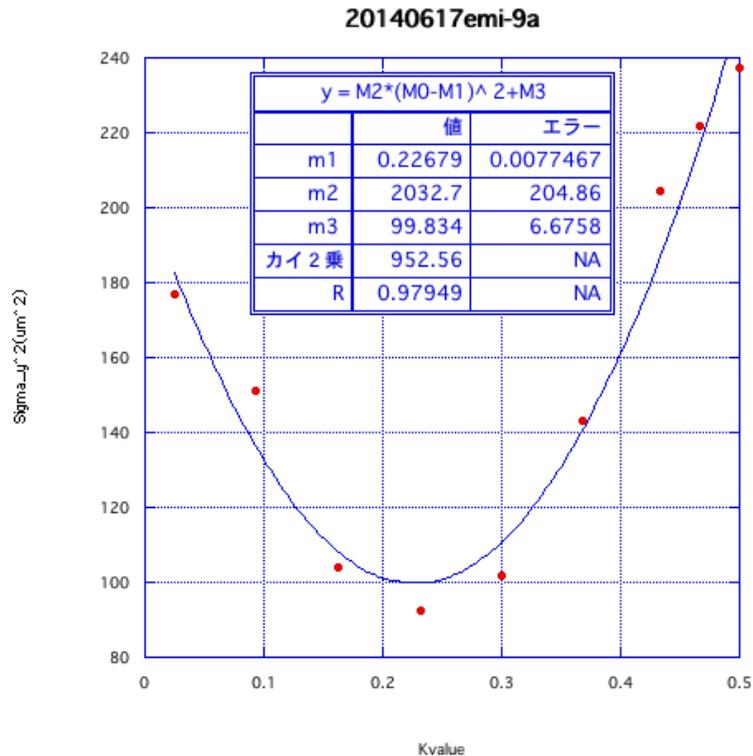
Saturation
 $0.3 \text{ pC}/\mu\text{m}^2$



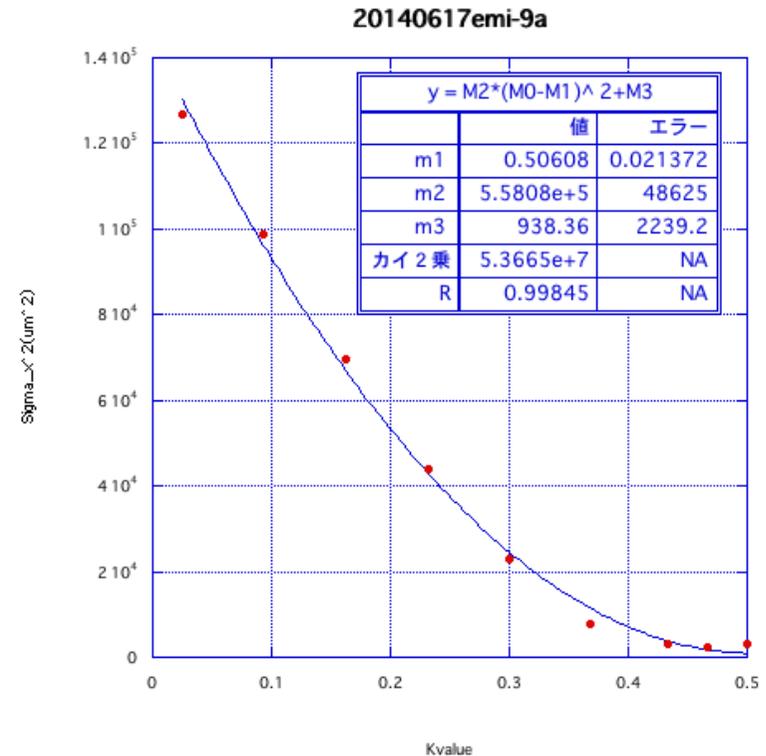
Emittance 測定



スクリーンモニターをDispersionのない場所に移動し、Q-scanによってEmittanceの測定を(設計値 $\epsilon_x=1.3\text{nm}$, $\epsilon_y=10\text{pm}$)行った。バンチ電荷の少ない条件でもプロファイルの測定には問題がなかったが、特に縦方向のEmittance測定に誤差が大きい。



Emittance(y) = 35.7pm



Emittance(x) = 1.81nm



まとめ



1. ATF2ビームライン用 YAG:Ce スクリーンモニターの開発を行った。Momentum spread の測定に十分な精度があることを確認した。
2. 電子シャッターのタイミング調整によりCCDの光量を調節する機構を構築し、入射光量を変えても一定のビームサイズを計測出来ることを確認した。
3. 最小ビームサイズは現在までに7umが測定された。測定エラーとして、にじみの効果、レンズの分解能、Saturation の効果に注意する必要がある。にじみの効果は厚みを薄くすることである程度低減出来る。
4. さらに薄いYAG:Ce を用い、レンズ系の分解能を上げることによってさらに小さいビームサイズの計測が可能になると期待される。