

X線フレネル回折を用いた超低エミッタンス次世代蓄積リングの 微小光源サイズ測定法

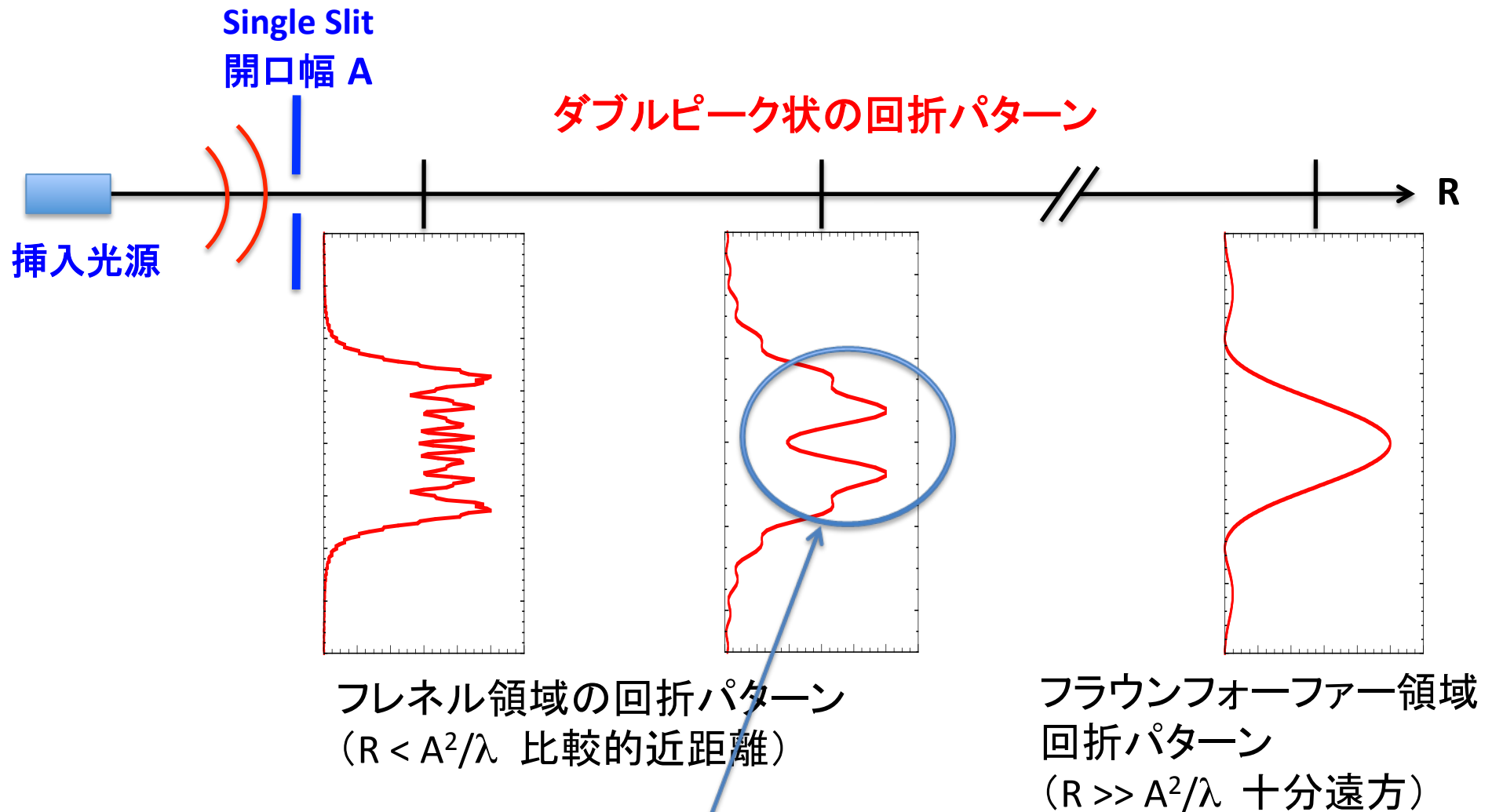
正木満博、高野史郎、高雄勝、下崎義人

(公財)高輝度光科学研究センター
JASRI/SPring-8

アウトライン

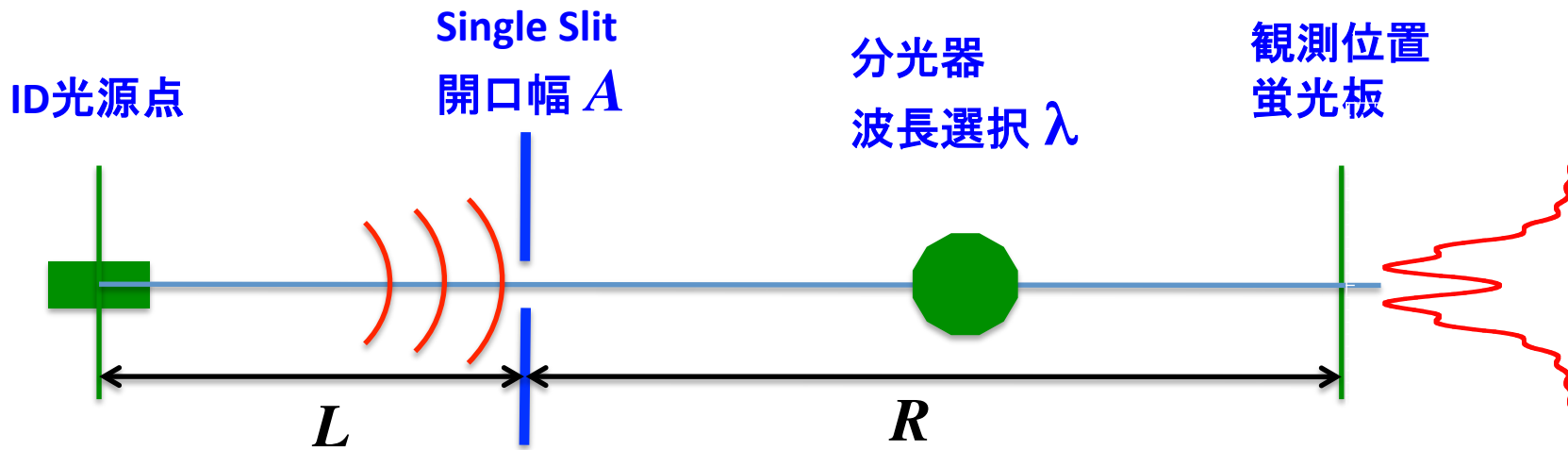
- X線フレネル回折法(XFD)の原理
- ミクロンオーダー光源サイズ測定を想定したシミュレーション
- SPring-8蓄積リングでの実験
- 到達可能分解能
- XFDの有用性

X線フレネル回折法 (X-ray Fresnel Diffraction)



回折像中央部の谷の埋まり具合が光源サイズと相関することを利用

フレネル回折像がダブルピークになる条件



点像強度関数(PSF) $I(y, y_e) \propto \left| \int_{-A/2}^{A/2} \sqrt{I_s(y_s - y_e)} \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda} \left\{ \frac{1}{L} + \frac{1}{R} \right\} \left\{ (y_s - y_e) - \frac{L(y - y_e)}{L + R} \right\}^2 \right] dy_s \right|^2$

フラックス分布
Parabolic Phase

→ スリット幅よりも広い放射フラックスを持った球面波を仮定

ダブルピーク状の回折像が出現するスリット幅 $\Rightarrow A \approx \sqrt{7\lambda \frac{LR}{L + R}}$

→ 光が中央で弱め合う条件から導かれる

ミクロンオーダーの光源サイズ測定を想定した計算例

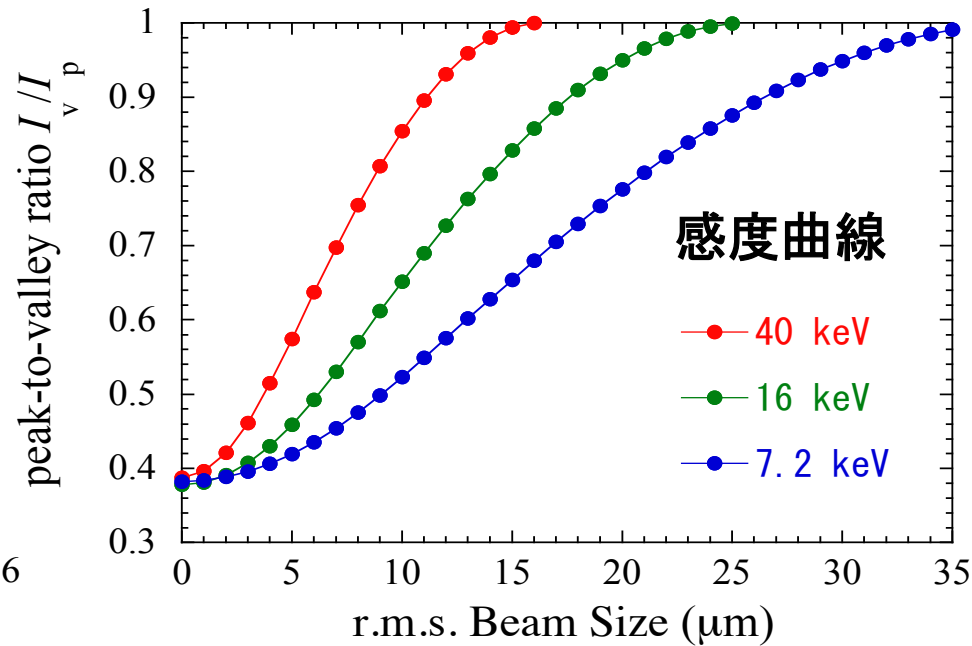
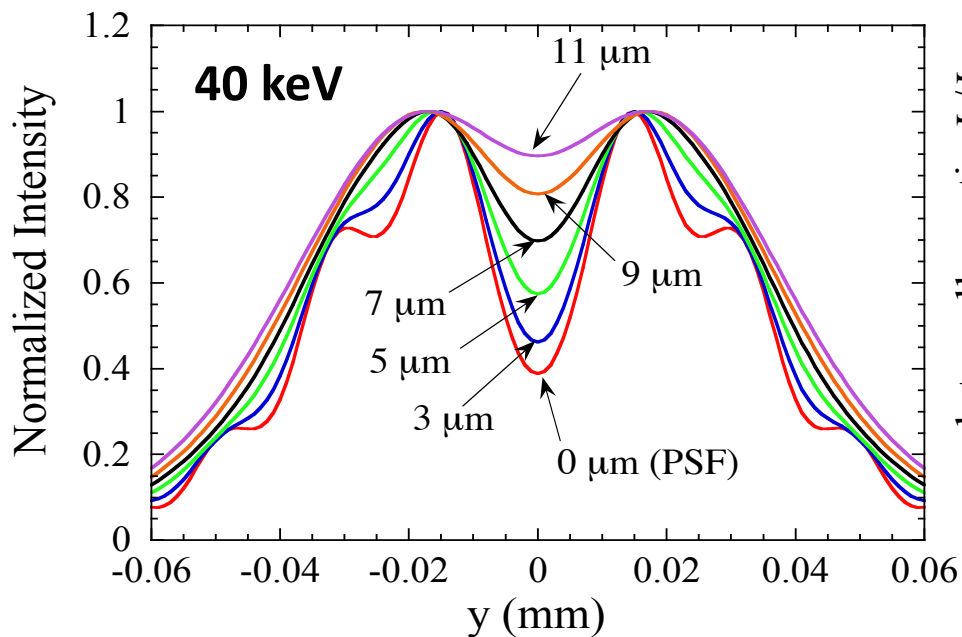
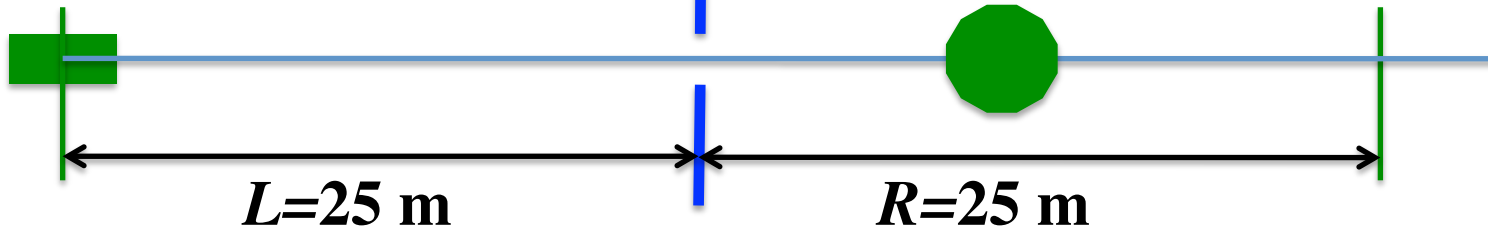
放射光ビームライン

挿入光源 (ID)

スリット開口
 $A=52\mu\text{m}$

分光器 Si(111)
・X線エネルギー
40 keV

観測位置
・蛍光板
・CCDカメラ

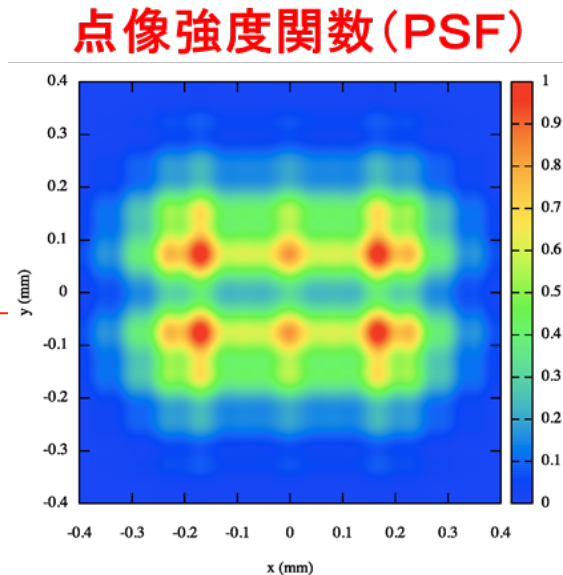
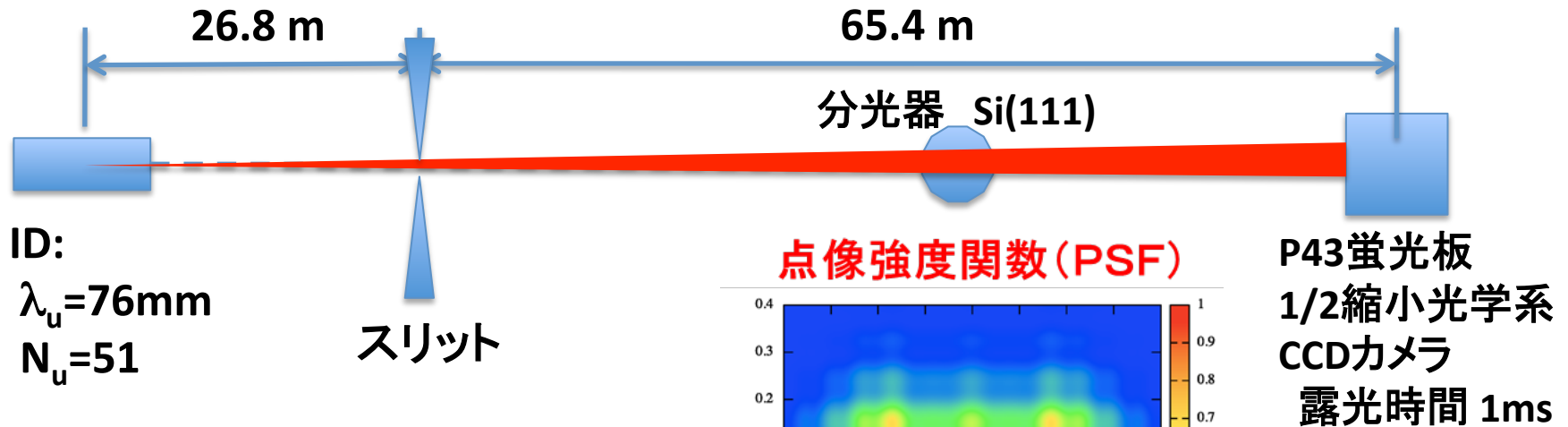


M. Masaki et.al., submitted to PRST-AB

ピーク／ボトム強度比と光源サイズとの関係

SPring-8 蓄積リングでの実験

加速器ビーム診断ライン(BL05SS)



ID : K=0.46, 7.167 keV@1次光

スリット 開口: $\Delta X=0.2\text{mm}$, $\Delta Y=0.15\text{mm}$

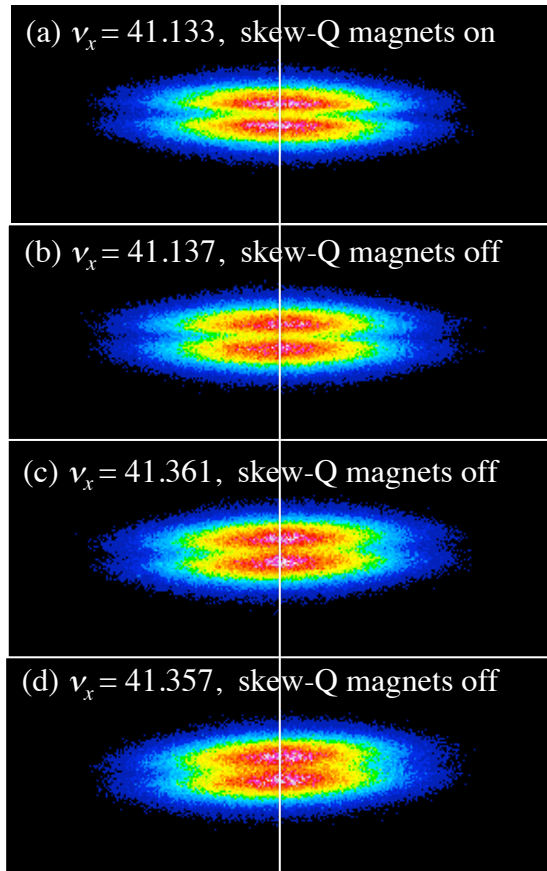
→観測された回折像中央のくぼみが最も深くなるように調整

$\Delta Y=0.15\text{ mm}$ は、式 $A \approx \sqrt{7\lambda \frac{LR}{L+R}}$ で計算した幅と矛盾しない。

SPring-8蓄積リングでの実験(続)

異なる垂直エミッタンスを持つ電子ビームを蓄積して回折像を観測

- ・運転動作点を変える(水平方向ベータatronチューンを動かす)
- ・エミッタンス結合補正用スキュー4極電磁石のon/off

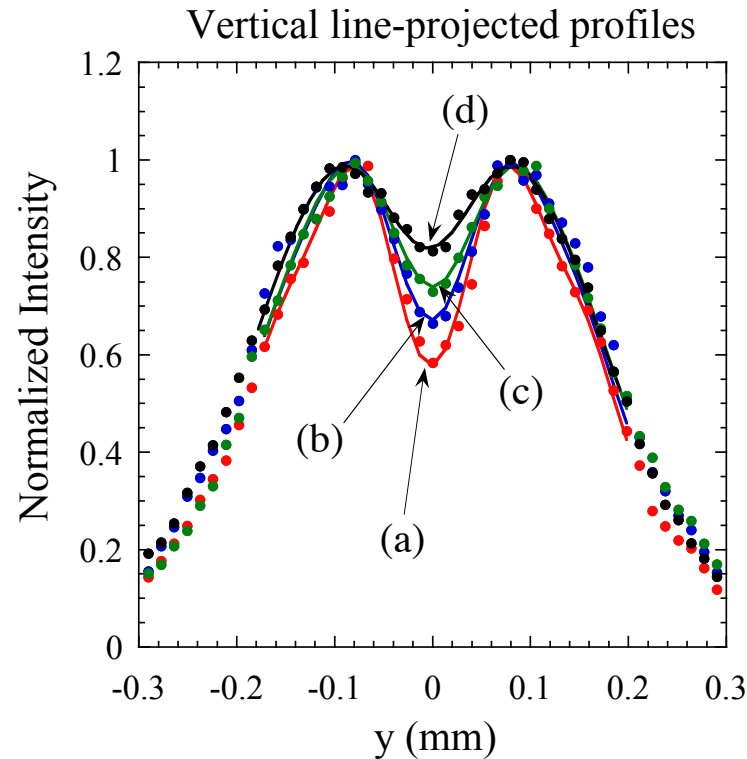


回折パターンの構造:

垂直方向: クリアに観測

水平方向: エミッタンス大 → スミア

M. Masaki et.al., submitted to PRST-AB



$\sigma_{y,e}$ (r.m.s.)
(a) 8.1 μm
(b) 11.7 μm
(c) 14.5 μm
(d) 17.7 μm

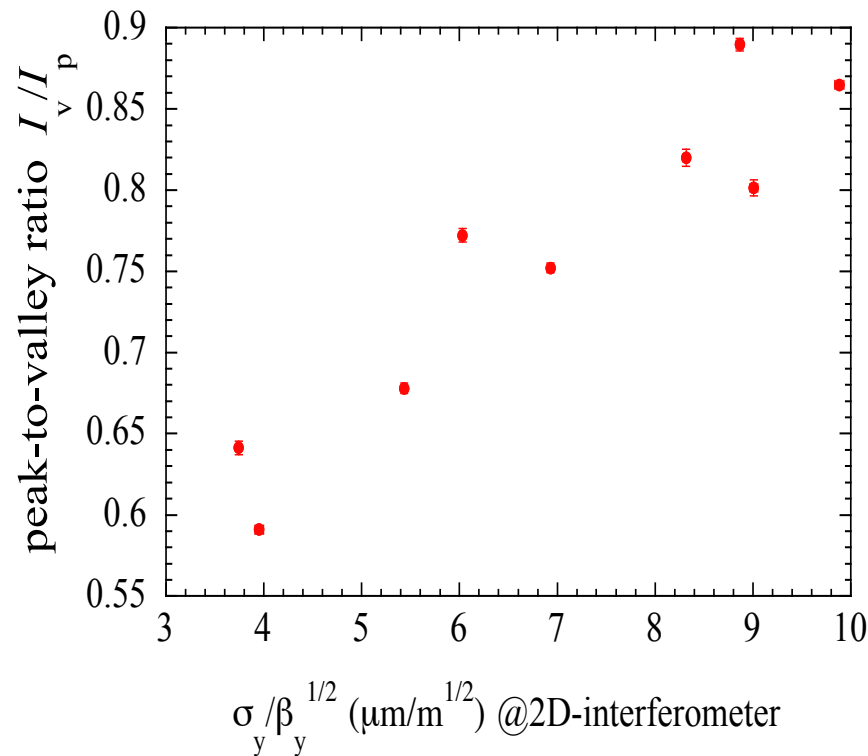
$$\text{フィッティング関数 } f(y) = C \int_{-\infty}^{\infty} I(y, y_e) \exp\left[-\frac{(y_e - y_0)^2}{2(\sigma_{y,e}^2 + \sigma_{res}^2)}\right] dy_e$$

イメージングシステム分解能 $\sigma_{res} = 6.8 \mu\text{m}$ (r.m.s.)

SPring-8蓄積リングでの実験(続)

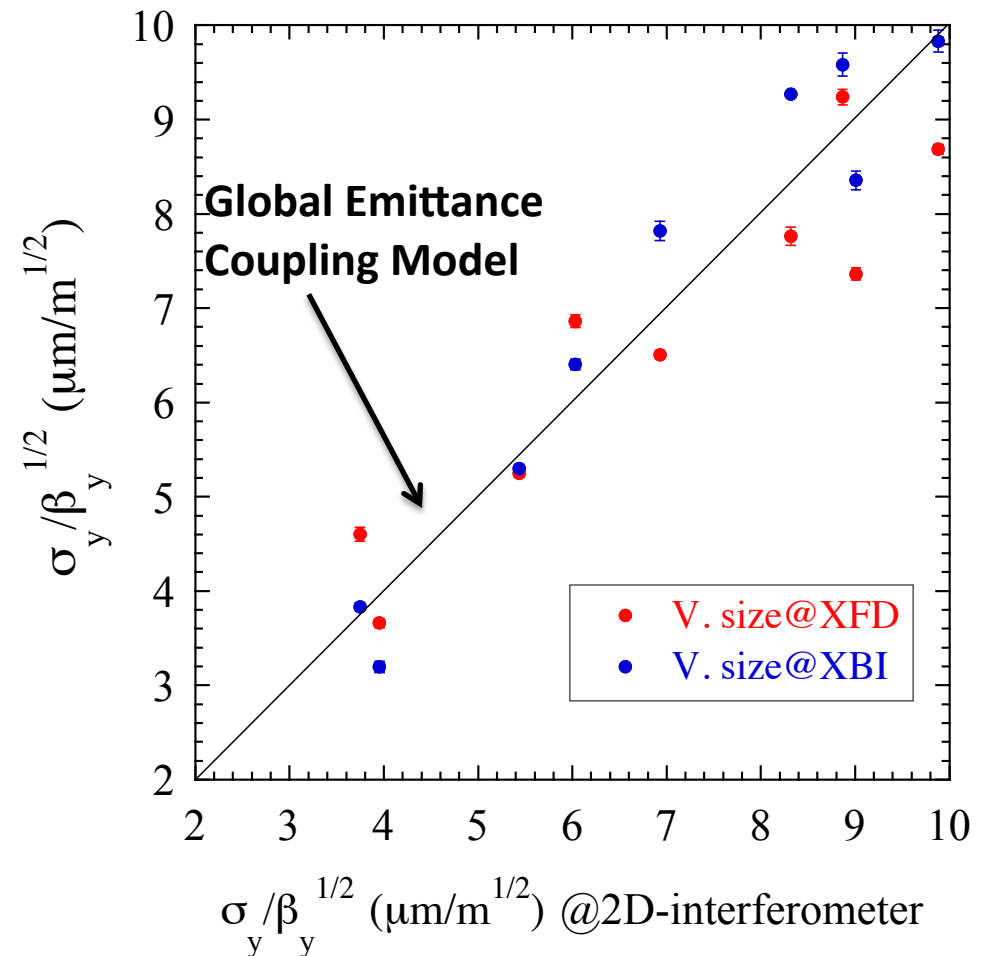
X線フレネル回折法と同時に、2箇所の偏向電磁石光源で垂直ビームサイズを測定
by 2次元放射光干渉計(2D-interferometer)とX線ビームイメージャー(XBI)

I_v/I_p measured by XFD



Vertical Beam Size measured by the 2D-interferometer

XFD, 2D-interferometer, XBI の3つで測定した垂直ビームサイズの相関



2次元測定を想定した例(計算)

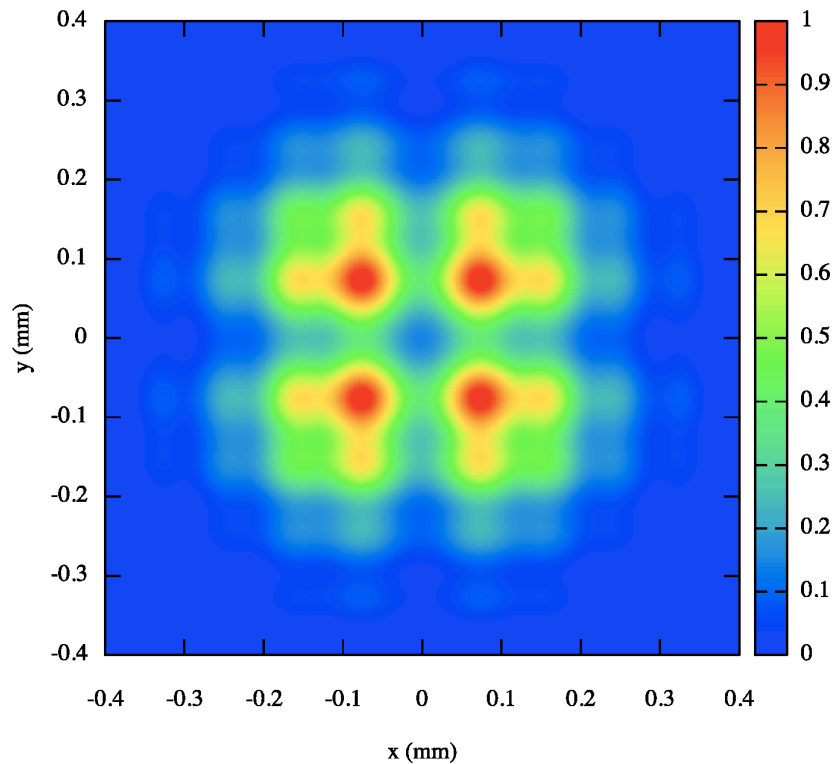
X線エネルギー7.2 keV, $L=26.8$ m, $R=65.4$ m

スリット開口: 正方形

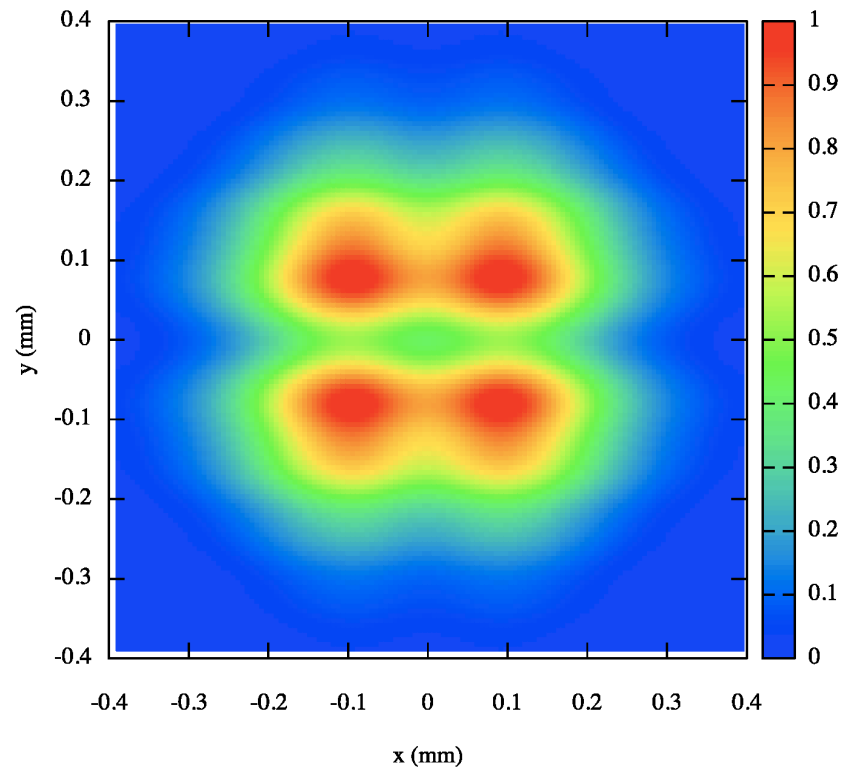
水平方向 $\Delta X = 0.15$ mm

垂直方向 $\Delta Y = 0.15$ mm

点像強度関数 (PSF)



$\sigma_x = 20$ μm , $\sigma_y = 10$ μm convoluted

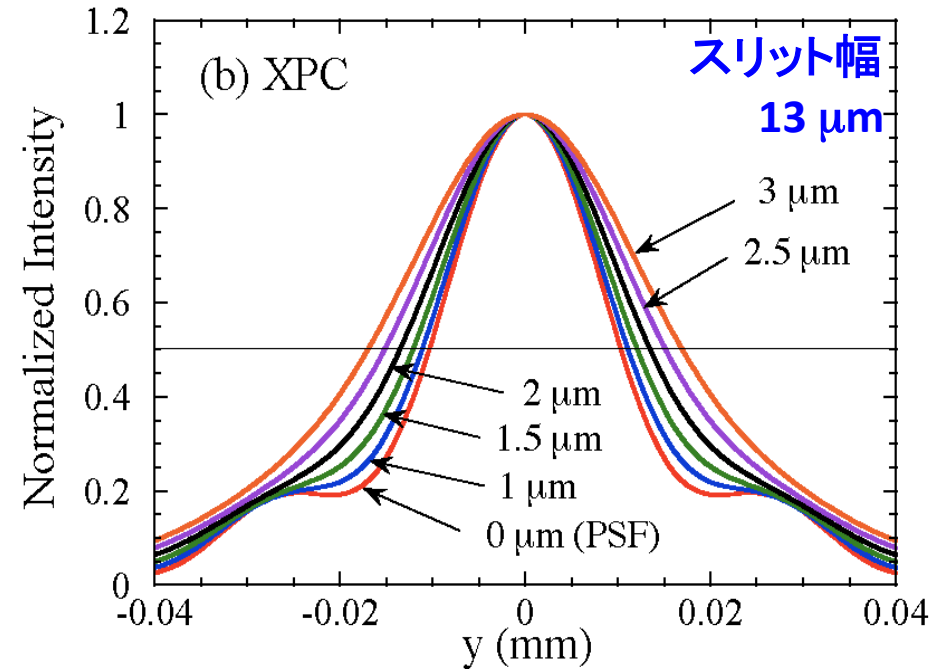
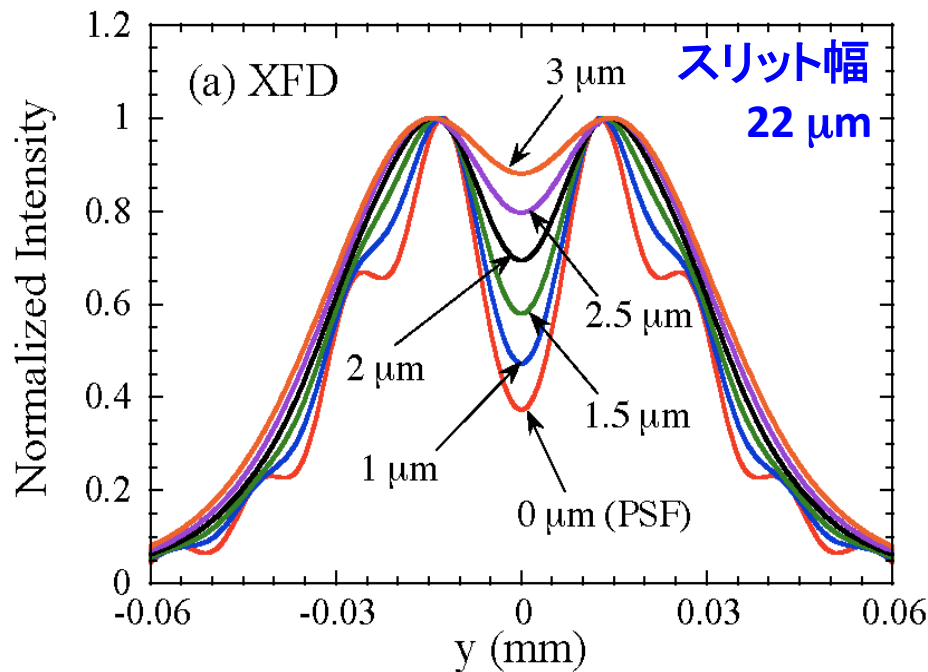


XFDの到達可能分解能

スリットを光源点から数メートルの距離まで近づけると分解能が向上

以下の条件で、X線フレネル回折法(XFD)とX線ピンホールカメラ(XPC)を比較

光源からスリット(ピンホール)	3 m
スリット(ピンホール)から観測位置	9 m
X線エネルギー	40 keV



1 μm (r.m.s.) のビームサイズでも測定可能

XFD の 有用性

放射光ビームラインごとの光源サイズ測定

- ・ビームラインごとに光源点でのビームサイズが異なる可能性

局所ベータ関数歪み、垂直ディスパージョン、局所エミッタンス結合が要因。
強い4極、6極電磁石を使う次世代光源リングほど、ラティス関数の局所歪みの影響は大きいと思われる。

- ・輝度性能を重視するビームラインでは、その場所での光源サイズを測定することが必要

各ビームラインで簡便に測定が可能

- ・必要な機器

挿入光源、4象限スリット、分光器（通常ビームラインで標準装備）
蛍光板、レンズ、CCDカメラ

将来光源への適用

- ・条件によっては、1 μm (r.m.s.) 程度のビームサイズ測定が可能
- ・次世代超低エミッタンス蓄積リングのエミッタンス診断に有用

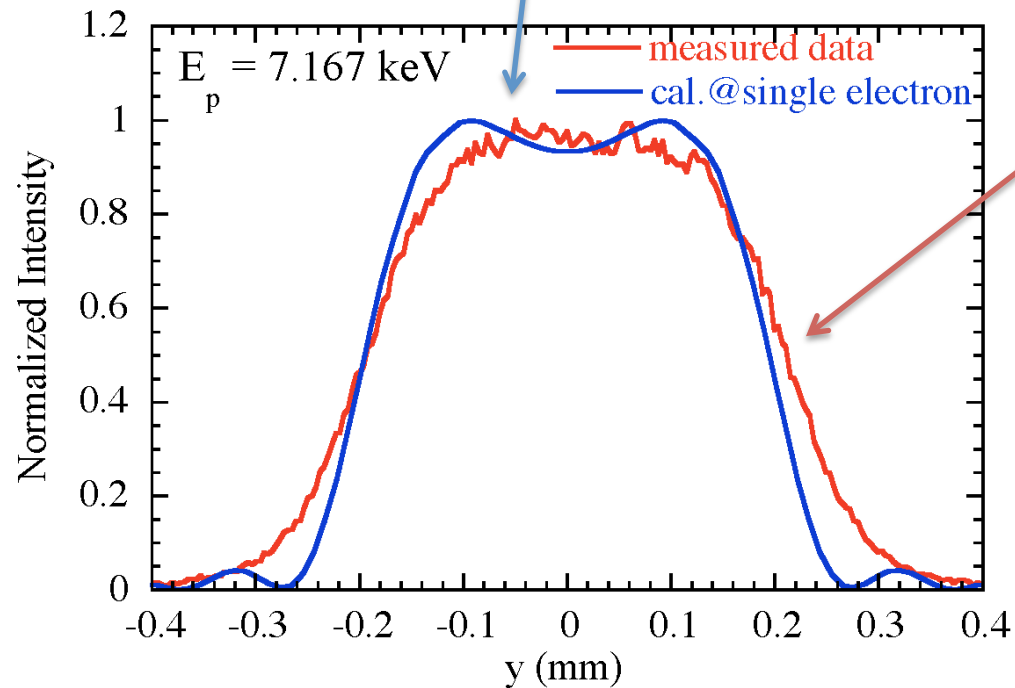
まとめ

- (1) ID光源点におけるミクロンオーダーの光源サイズ測定のために、X線フレネル回折を用いた手法(XFD)を開発した。
- (2) SPring-8での測定により、光源サイズの変化に対して感度を有し、 $10\ \mu\text{m}$ (r.m.s.)以下の光源サイズ測定が可能なことを実験的に示した。
- (3) XFDは、回折限界光源のような次世代光源リングの輝度性能最大化のためのエミッタンス診断法として期待できる。

Back Up

PSF計算に用いるスリットでの垂直フラックス分布

$$I(y, y_e) \propto \left| \int_{-A/2}^{A/2} \sqrt{I_s(y_s - y_e)} \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda} \left\{ \frac{1}{L} + \frac{1}{R} \right\} \left\{ (y_s - y_e) - \frac{L(y - y_e)}{L + R} \right\}^2 \right] dy_s \right|^2$$



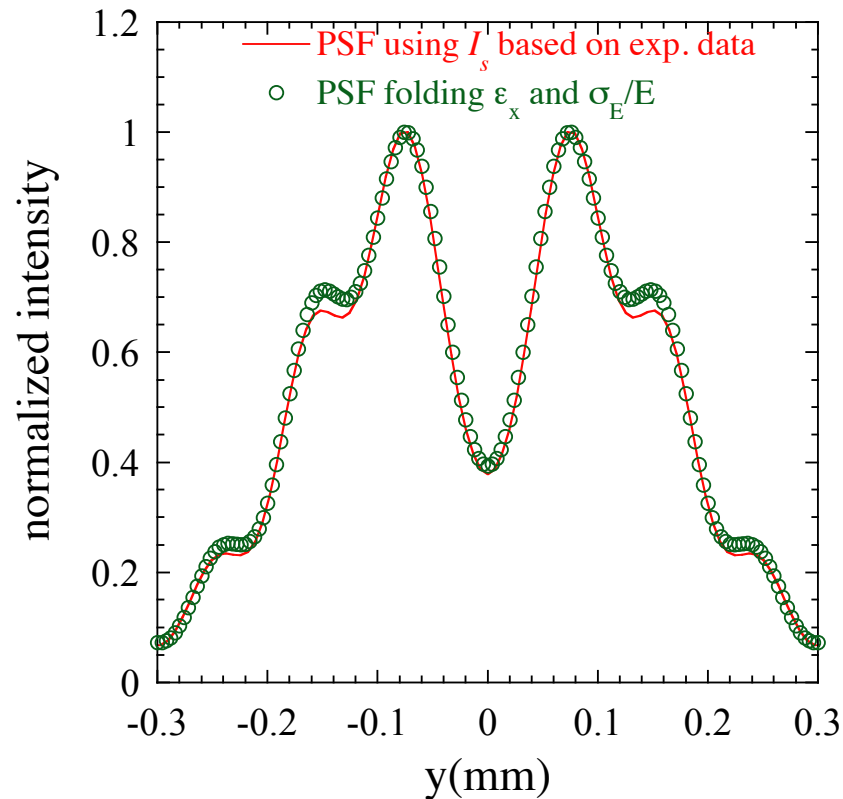
垂直スリット全開で実測した
垂直フラックス分布を用いる。

- ・水平エミッタンスによる
off-axis radiation の寄与
 - ・エネルギー広がりによる
off-resonant radiation の寄与
- これらを実効的に含んでいる。

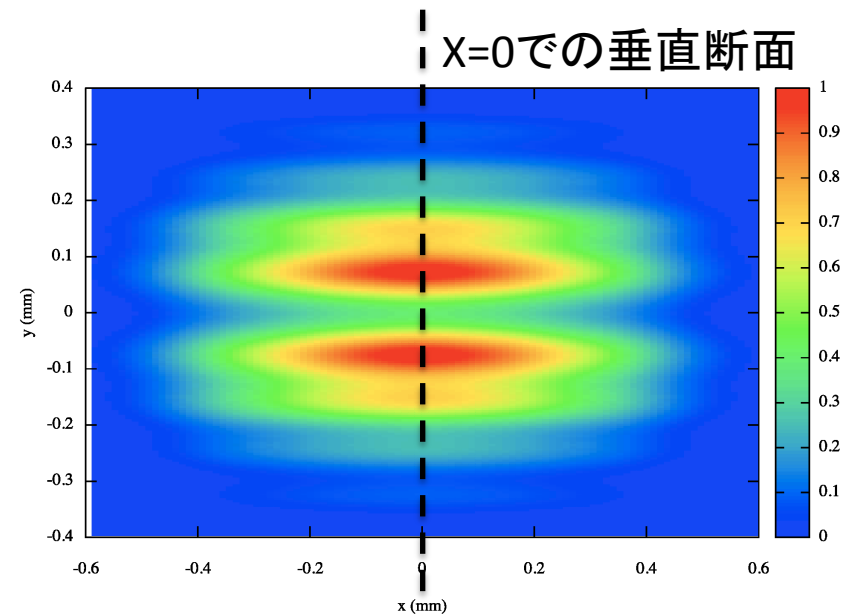
実測した垂直フラックス分布を用いたPSF計算の妥当性

- 1) 実測の垂直フラックス分布を用いた1次元計算(赤線)
- 2) 水平エミッタンスとエネルギー広がりを含んだ計算(緑丸)
→ off-axis radiation, off-resonant radiationからの寄与を積分

両者に本質的な差はない。



$\epsilon_x=2.4\text{nm.rad}$, $\sigma_E/E=0.109\%$ convoluted



2次元PSFを水平エミッタンスとエネルギー広がりを含んだ分布

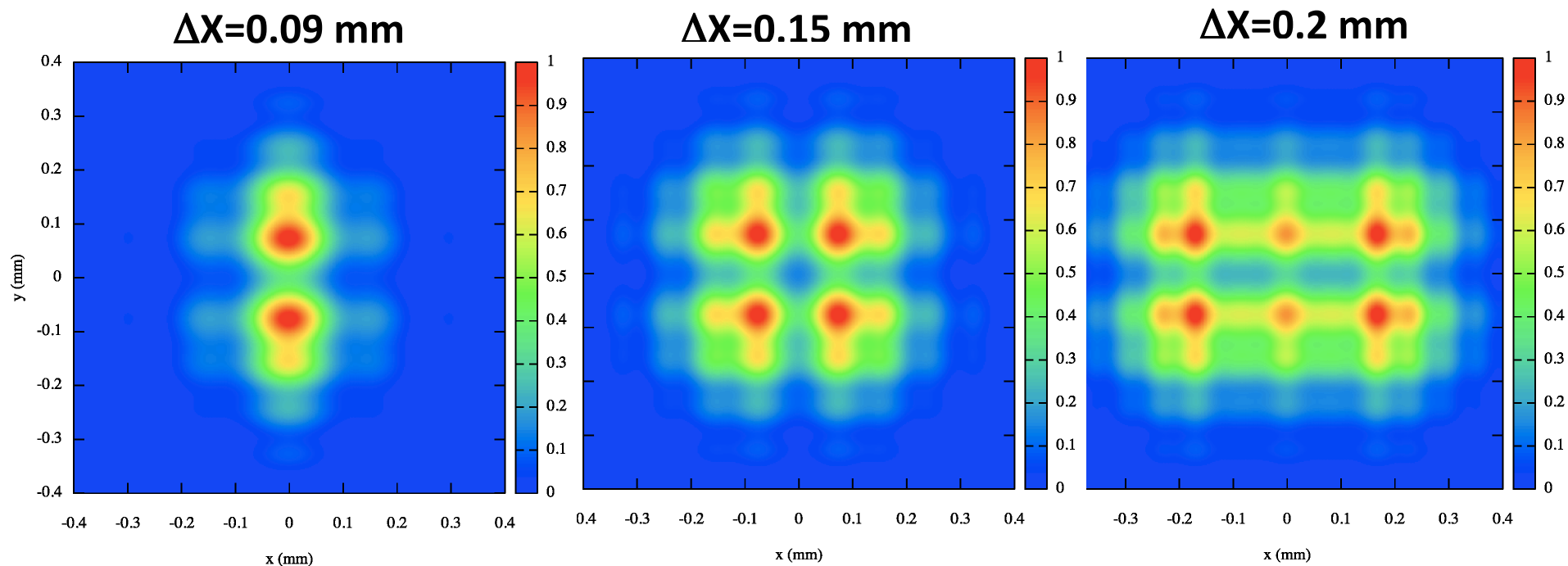
点像強度関数(PSF) の2次元イメージ

X線エネルギー7.2 keV, $L=26.8$ m, $R=65.4$ m

矩形スリット幅:

垂直方向 $\Delta Y = 0.15$ mm

水平方向 ΔX が異なる3パターン



垂直ビームサイズ測定のみ

2次元測定用

垂直ビームサイズ測定のみ

光量小

光量大