

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

X-RAY FRESNEL DIFFRACTOMETRY FOR MICRON LIGHT SOURCE SIZE MEASUREMENT OF ULTRALOW-EMITTANCE NEXT-GENERATION STORAGE RING

正木満博[#], 高野史郎, 高雄勝, 下崎義人

Mitsuhiro Masaki[#], Shiro Takano, Masaru Takao, Yoshito Shimosaki

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

Abstract

A novel emittance diagnostics technique with high sensitivity using X-ray Fresnel diffraction by a single slit has been developed to measure micron-order electron beam sizes at insertion devices (IDs) of photon beamlines. The X-ray Fresnel diffractometry (XFD) is promising for diagnostics of next-generation light sources, where a tuning of ultra-low emittance at IDs is essentially important to ensure the absence of degradation of brilliance and transverse coherence of radiation at beamlines due to distortion of lattice functions. The validity of the new method was theoretically and experimentally studied at SPring-8. The achievable resolution of XFD is also discussed.

1. はじめに

光源用蓄積リングの挿入光源(ID)部におけるマイクロオーダーのビームサイズを、シングルスリットによるX線フレネル回折を用いて高感度で測定できる新しい手法を開発した。このX線フレネル回折法(XFD)は、回折限界光源^[1]を目指した次世代の超低エミッタンス蓄積リングにおいて特に有用である。このようなリングでは必然的に強い4極および6極電磁石が必要となるため、磁石の製作・設置誤差に起因する誤差磁場によりラティス関数の局所的な歪みおよび局所XYベータatron結合が強くなり、結果として放射光ビームラインの光源点における電子ビームサイズはビームラインごとに異なっている可能性が高い。それゆえ、輝度性能、空間コヒーレンスを特に必要とするビームラインにおいては、光源サイズを実測して蓄積リングのラティスを最適化することが求められるだろう。XFDは、4象限スリット・分光器が装備されている標準的な放射光ビームラインに適用可能で、IDの種類も問わない。この新手法は、観測波長および光源点・スリット・観測位置の間の距離関係に応じてスリット幅を最適化した際に出現するダブルピーク状のX線フレネル回折像を用いる。この論文では、XFDの原理とともに、次世代の超低エミッタンスリングにおける光源サイズ測定を想定したシミュレーション結果、ID光源サイズの変化に対して感度を有することをSPring-8蓄積リングで実験的に確認した測定結果、およびXFDが到達可能な測定分解能について述べる。

2. X線フレネル回折法の原理

挿入光源からのアンジュレーター放射やウィグラー放射のシングルスリットによるX線回折像をフレネル領域で観測する。光源点からシングルスリットまでの距離 L 、シングルスリットから観測点までの距離 R 、観測する波長 λ としたとき、これらの条件の下でスリット幅 A を最適化した際に現れるダブルピーク状の回折像を用いる (Figure 1)。

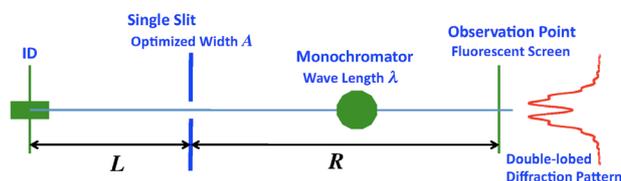


Figure1: A schematic for the source size measurement of ID using the XFD.

XFDは、このダブルピーク状の回折パターンの中中央部のくぼみの深さと光源サイズとの相関、すなわち、光源サイズの増加と共にくぼみが浅くなることを利用する。光源に要求される条件は、スリット幅よりも広い放射フラックス分布と球面波位相を持つということだけである。それゆえXFDは、ほとんどのタイプの挿入光源と偏向電磁石光源に対して適用することができる。簡単のために、一次元モデルでの球面波を仮定すると、観測位置での点像強度関数(PSF)は、近軸光線近似による球面波位相を用いて、次のようなフレネル積分で表される。

[#] masaki@spring8.or.jp

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

ここで、 $I_s(y_s - y_e)$ はスリットでのフラックス強度分布、 y_e は光源点での電子の位置、 y_s と y は、それぞれスリット、観測位置もおける座標である。ここで、電子の位置は原点($y_e=0$)にあるとする。スリットでのフラックス分布がほぼ一定であるとする、ダブルピーク状のPSFが得られるスリット幅 A は、 $y=0$ に寄与する光が弱め合う干渉条件から、

$$A \approx \sqrt{7\lambda \frac{LR}{L+R}} \quad (2)$$

と表される。一方、2つのピーク間の距離、すなわちピッチ P は、光の強め合いの条件から、

$$P = 2\lambda \frac{R}{A} \approx 2\sqrt{\frac{\lambda R(L+R)}{7L}} \quad (3)$$

となる。(1)式のPSFは、光源点における電子の位置 y_e に応じて観測点で $-(R/L)y_e$ だけシフトする。これにより、電子ビームサイズを畳み込んだ際に中央のくぼみが埋まることになる。一方、電子軌道角度 y_e' が変化しても放射された球面波の位相分布はスリット上で変化しないので、PSFの位置は何ら影響を受けない。したがって、電子ビーム角度発散に関しては、 $10 \mu\text{rad}$ (r.m.s.)以下であれば観測される回折像に対してほとんど影響を及ぼさない。また、XFDは単色化されたX線を必要とする。数値計算により必要な光のバンド幅を見積り、それが2% (peak-to-peak)よりも狭いときには、有限バンド幅によるPSFの歪みが無視できることを確認した。広く使われている分光結晶であるシリコンの(111)反射のバンド幅は 10^{-4} のオーダーであり、2%に比べて十分に狭い。

アンジュレーター放射やウィグラー放射は、XFDが要求する光の特性を兼ね備えている。光の波面はスリットが置かれている光軸近傍では、球面波近似が良く成り立っている^[2]。さらに、アンジュレーター放射の共鳴条件波長におけるon-axis放射の空間分布は、数十ミクロン幅のスリット幅よりも広いフラットトップ領域を持っている^[2]。

3. ID光源サイズ測定のシミュレーション

回折限界光源を目指した次世代超低エミッタンス蓄積リングの放射光ビームラインでのXFDによる光源サイズ測定を想定したシミュレーションの例を示す。光源点からシングルスリットまでの距離 L を25 m、スリットから観測点までの距離 R を25 m、観測するX線のエネルギーを40 keVとする。このとき、ダブルピーク状の回折パターンを得るためのスリット幅は、(2)式から $52 \mu\text{m}$ である。スリット開口内でのフラックス強度分布 $I_s(y_s - y_e)$ が一定であるとして、(1)式から計算したPSF、およびガウシアン

分布した電子ビームによるコンボリューションをFigure 2に示す。中央のくぼみのpeak-to-valley強度比 I_v/I_p は、 $10 \mu\text{m}$ (r.m.s.)以下の電子ビームサイズ(光源サイズ)のミクロンオーダーの変化に対して高い感度を有していることが分かる。このビームサイズは、垂直エミッタンスが10から20 pm·rad、数メートルの垂直ベータatron関数が仮定されたときのID光源点における垂直ビームサイズに相当する。Figure 3に、光源サイズの関数としての I_v/I_p 、すなわち感度曲線をX線エネルギー40、16、7.2 keVに対して示す。観測するX線のエネルギーは、測定する光源サイズのレンジに応じてビームラインに装備されている分光器によって調整することができる。7.2 keVを用いたXFDについては、将来光源で想定される $100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 程度の超低エミッタンスリングにおける $20 \mu\text{m}$ (r.m.s.)程度の水平方向の光源サイズ測定にも適用することができる。

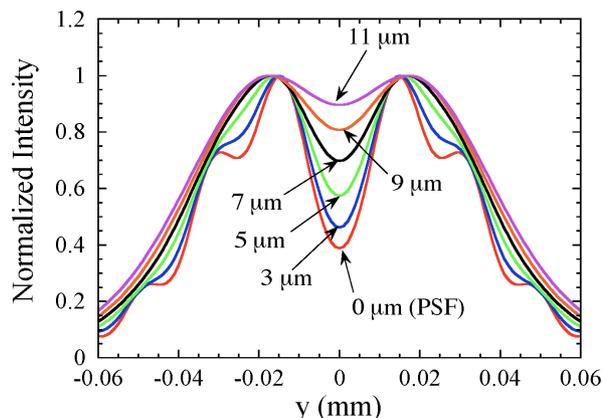


Figure 2: The calculated PSF and its convolution with Gaussian-distributed sources having 3 to 11 μm (r.m.s.), assuming vertical source size measurement using XFD of 40 keV at a beamline of an ultra-low emittance ring.

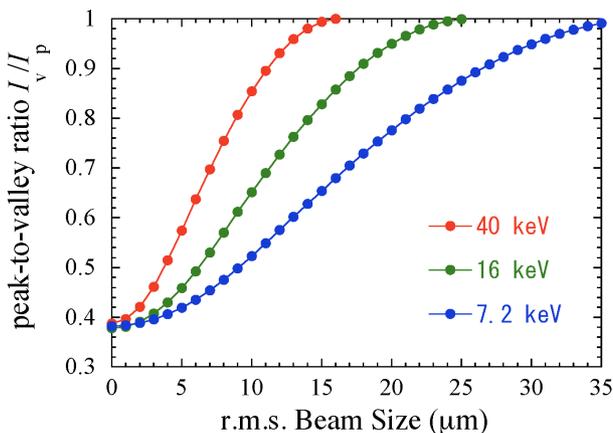


Figure 3: Sensitivity curves calculated at some observing X-ray energies. Red, green and blue dots show the curves at 40, 16 and 7.2 keV, respectively.

4. SPring-8 ビームラインでの測定

4.1 測定条件

ID 光源サイズの変化に対して XFD が感度を有することを実験的に確かめるために、垂直エミッタンスの異なる電子ビームにより光源サイズを変えてダブルピーク状のフレネル回折パターンを観測した。蓄積リングの運転動作点の変更やエミッタンス結合比補正用のスキュー4極電磁石の on/off により、垂直エミッタンスを変化させた。測定は、SPring-8 加速器ビーム診断ライン II(BL05SS)^[3]で行なった。このビームラインには、プラナー型の挿入光源(ID05)^[4]が設置されている。スリットは、ビームラインフロントエンド部の ID 光源点から 26.8 m の距離に設置されている4象限スリット(FE スリット)を用いた。また、このスリットから観測点までの距離は 65.4 m である。ダブルピーク状の回折パターンは、10 μm 厚の P43 蛍光板、結像系として 1/2 縮小光学系、CCD カメラからなるイメージングシステム(浜松ホトニクス製)を用いて観測した。光学的解像度は、直径 0.5mm のステンレスワイヤーをこのシステムの直前に置いて観測することにより、16.6 μm (r.m.s.)と評価された。これを光源点での値にスケールすると 6.8 μm (r.m.s.)に相当する。CCD カメラの露光時間は、液体窒素冷却されている分光結晶 Si(111)の振動の影響を低減するために設定最小値である 1 ms にセットされた。1 ms の積分時間内の単色 X 線の角度振動量を測定により評価したところ、典型的には 0.3 μrad (r.m.s.)であった。これを光源点での振動に焼き直すと約 3 μm (r.m.s.)に相当する。

ID05 からのアンジュレーター放射は、K 値 0.46 における 7.2 keV の 1 次光を用いた。X 線のエネルギーは、FE スリット全開で観測したフラックス分布のフラットトップ部の垂直方向の幅が最大となるように 7.167 keV に微調整された。垂直方向光源サイズを測定するための FE スリット幅の最適値は、(2)式から 150 μm である。このスリット幅は、観測された回折像の中央くぼみが最も深くなるように実験的に調整した幅と矛盾していなかった。水平方向のスリットについても 200 μm の狭い幅に制限した。これは、現状の SPring-8 蓄積リングの水平エミッタンス (2.4 nm \cdot rad) に起因する off-axis 放射による PSF のぼやけ効果を最小化するためである。この PSF のぼやけ効果とは、フラックス分布のフラットトップ領域が狭い、もしくは存在しない off-axis 放射の寄与が回折像中央くぼみの peak-to-valley 強度コントラストを劣化させる現象である。我々は、水平スリット幅についても垂直スリットと同様に、観測されるくぼみが最も深くなるように調整した。ここで、回折限界光源リングのような超低エミッタンスリングでは、PSF ぼやけの原因となる off-axis 放射の影響は、ほとんど無視できることを言及しておく。

4.2 測定結果

Figure 4 に、水平方向ベータトロンチューンが異なる運転動作点、およびスキュー4極電磁石の

on/off により、垂直エミッタンスを変えて観測したフレネル回折像の例を示す。垂直方向には、ダブルピーク構造を持った回折パターンが明瞭に観測されているが、水平方向に関しては、エミッタンスが大きいため回折による構造は完全にスミアされている。Figure 5 に、この2次元イメージの中央部における垂直方向のラインプロファイルを示す。

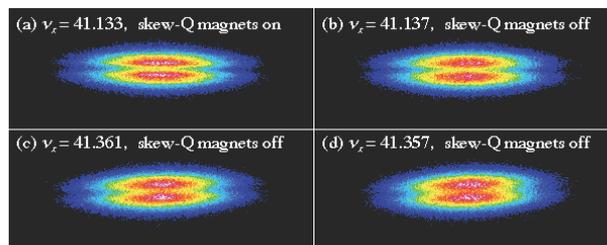


Figure 4: Double-lobed diffraction images observed at different operation points with four horizontal betatron tunes ν_x , with and without skew quadrupole magnetic fields.

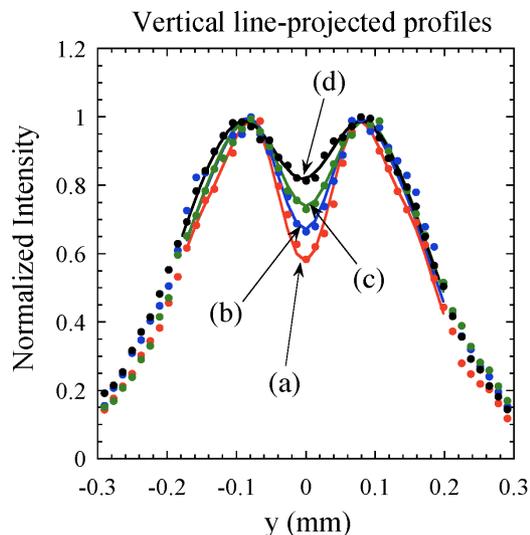


Figure 5: Normalized vertical line-projected profiles (dots) of the four 2D images, their fitted curves (solid lines) by Gaussian source distributions convoluted with the PSF. Red, blue, green, and black lines correspond to (a), (b), (c) and (d) in Fig. 4, respectively.

この XFD による測定と同時に、偏向電磁石を光源に持つ2つのビームサイズモニター、すなわち X 線ビームイメージャー(XBI)^[5]と2次元放射光干渉計(2D-interferometer)^[6]を用いて垂直ビームサイズを測定した。Figure 6 に、XFD で測定した peak-to-valley 比 I_v/I_p と2次元干渉計での測定との相関を示す。干渉計で測定された垂直ビームサイズの増加とともに、観測された回折像の I_v/I_p も増加(谷が埋まる)傾向を示しており、垂直エミッタンスの増加に応じた光源サイズの変化に対して XFD が感度を有していることを実験的に確認することができた。

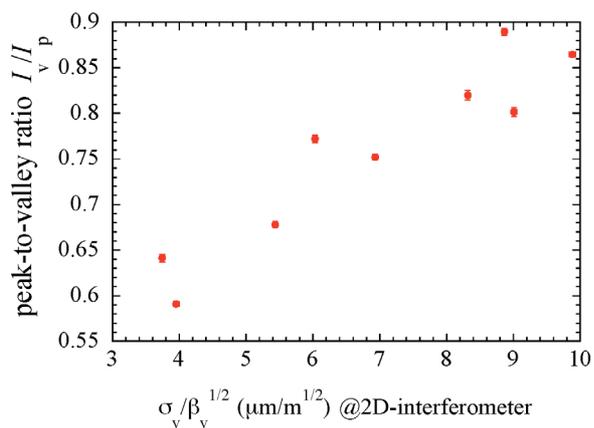


Figure 6: Correlation between peak-to-valley intensity ratios measured by the XFD at the ID05 and simultaneously measured vertical beam sizes by the 2D-interferometer at the bending magnet source.

測定された I_v/I_p を ID05 光源点での垂直ビームサイズに変換するためには、測定条件での PSF が必要である。式(1)で与えられる PSF を計算するために、スリット上でのフラックス強度分布 $I_s(y_s-y_e)$ の情報が必要であるが、これには電子ビームの水平エミッタンスに起因する off-axis 放射からの寄与と、エネルギー広がりによって起因する off-resonant 放射からの寄与を考慮しなければならない。これらを厳密に取り扱うには、非常に複雑な数値計算を要する。そこで我々は、FE スリットの垂直方向の開口を広げて、7.167 keV の垂直方向のフラックス分布を実測し、これを $I_s(y_s-y_e)$ として用いることにした。この実測された分布には、測定している電子ビームの水平エミッタンスとエネルギー広がりも反映されており、実効的に off-axis 放射や off-resonant 放射の効果を含んでいる。実測した垂直方向フラックス分布に基づいた $I_s(y_s-y_e)$ を用いて(1)式から計算した PSF を、ガウス分布で畳み込んだ次のフィッティング関数、

$$f(y) = C \int_{-\infty}^{\infty} I(y, y_e) \exp\left[-\frac{(y_e - y_0)^2}{2(\sigma_{y,e}^2 + \sigma_{res}^2)}\right] dy_e \quad (4)$$

を用いて、測定されたラインプロファイルにフィットすることにより垂直ビームサイズを評価した。ここで、フィッティングのフリーパラメーターは、規格化因子 C 、分布の中心位置 y_0 、光源点での垂直ビームサイズ $\sigma_{y,e}$ である。 σ_{res} はイメージングシステムの分解能であり、上述したように $6.8 \mu\text{m}$ である。評価されたビームサイズの中で、Figure 4(a)の回折像から求めたサイズが最も小さく、 $8.1 \mu\text{m}$ (r.m.s.)であった。Figure 7に XFD によって測定された全ての垂直ビームサイズを、偏向電磁石光源における XBI と 2D-interferometer を用いた測定結果とともに示す。ここで、垂直ビームサイズは、各光源点での垂直方

向のベータatron関数 β_y の平方根で規格化してプロットしている。Figure 7の黒実線は、グローバルベータatron結合のモデルが良い近似で成立している、すなわち、XY エミッタンス結合比が蓄積リングに沿った s 方向の位置に依存しない場合を示している。3つの光源点で測定した垂直ビームサイズは、概ね黒実線に沿った傾向を示しているが、明らかにエラーバーを越えて実線から外れている。我々は、これが局所的な XY ベータatron結合の影響ではないかと推測している。なお、垂直ディスパージョンは、測定によれば数 mm であるので、これらのビームサイズへ寄与はほとんど無視できる。

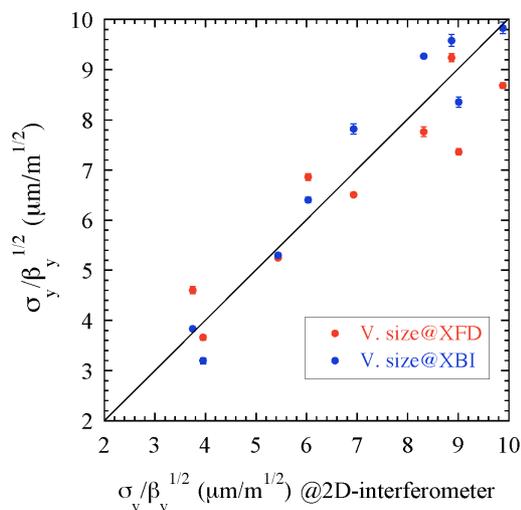


Figure 7: Correlation between results of the simultaneous measurements by XFD at the ID05 source, XBI and 2D-interferometer at the other two bending magnet sources. Red and blue dots indicate the vertical beam sizes evaluated from I_v/I_p and measured by XBI, respectively. The black solid line shows the correlation on the global betatron coupling model.

4.3 高速 CCD カメラを用いた測定

4.2 節で述べた XFD による測定において、カメラの露光時間は 1 ms 、使用している蛍光板 P43 の 10% 減衰時間も 1 ms 程度であり、分光器結晶の振動および電子ビーム自身の振動の影響を排除するために十分に短い測定積分時間とは言えない。そこで、より短い積分時間で測定するために、 100 ns 以下の減衰時間を持つ YAG(Ce) 蛍光板 ($50 \mu\text{m}$ 厚) と、高速シャッター付きの CCD カメラ (ProEM-512B: Roper Scientific) を用いて測定した。また、光学的解像度を向上させるために、倍率 2 倍の結像レンズをカメラに取り付けた。YAG(Ce) 蛍光板の前に置かれたタンタルスリットのナイフエッジを観測することにより評価された解像度は、光源点での値に換算すると $2.4 \mu\text{m}$ (r.m.s.) である。また撮像の際に、カメラに搭載されている kinetics readout mode と呼ばれる

特殊な機能を用いた。これは、フレーム内の狭い領域に予め受光エリアを設定し、そのエリアの CCD 電荷を外部トリガー信号に同期してフレーム内の上側方向にシフトさせることができる機能である。この機能を用いて、1 フレーム内に 19 個の回折像を撮像した(Figure 8 上段)。Figure 8 の下段に、1.0 ms と 0.1 ms の露光時間で観測した回折像の垂直方向ラインプロファイルを示す。0.1 ms で撮像した回折像(赤線)の谷の深さが、1.0 ms のとき(青線)と比べて、振動の影響が低減されたことにより明らかに深くなっている。両者に対して評価した垂直ビームサイズ(r.m.s.)は、0.1 ms と 1.0 ms に対してそれぞれ、 $7.8 \mu\text{m}$ と $9.1 \mu\text{m}$ となった。

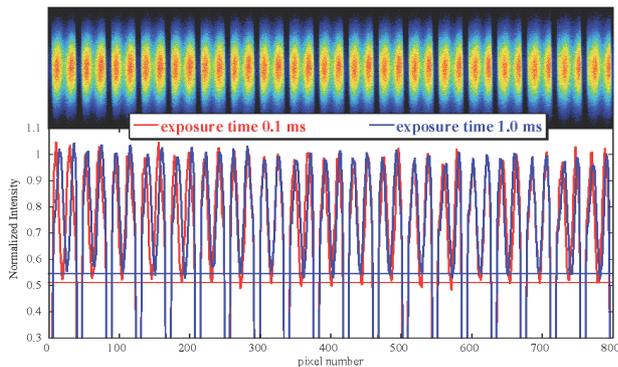


Figure 8: Double-lobed diffraction patterns observed by using a CCD camera with fast electrical shutter and a YAG (Ce) fluorescent screen with short decay time. Red and blue lines show the vertical line profiles of the 19 diffraction patterns with the exposure time of 0.1 ms and 1.0 ms, respectively.

5. XFD の到達可能分解能

SPring-8 での測定により、XFD が ID 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であることが実験的に示された。仮に、更に高いエネルギーの X 線を用い、スリットを通常の X 線ピンホールカメラ(XPC)と同様に光源から数メートルの距離に設置できれば、 $1 \mu\text{m}$ (r.m.s.) 程度の光源サイズでさえ測定できる可能性がある。例えば、光源点からスリットまでを 3 m、スリットから観測位置までを 9 m とし、40 keV の X 線を用いた場合について、XFD と XPC の両方で分解能を比較してみる。XFD の場合のスリット幅は式(2)から $22 \mu\text{m}$ 、XPC の場合の最適ピンホールサイズは、フレネル回折に基づいて導かれた計算式^[7]から $13 \mu\text{m}$ となる。それぞれの場合に対して、PSF とそれをガウシアン光源分布によって畳み込んだ分布を Figure 9 に示す。例えば光源サイズが $1 \mu\text{m}$ (r.m.s.) のとき、XFD の場合には、 I_w/I_p 強度比が PSF と比べて 26 % 上昇するのに対して、XPC では、分布の半値幅が PSF のそれと比べて 8 % しか増加していない。XFD における I_w/I_p 強度比の上昇率の方が、XPC における半値幅の増加率に比べて明らかに大きく、ミクロンオーダーの光源サイズの変化に対して、より

高い感度を持っていることが分かる。また、Figure 9(a)の例は、XFD が $1 \mu\text{m}$ (r.m.s.)以下の光源サイズ測定でさえ可能にする分解能を有していることを示している。

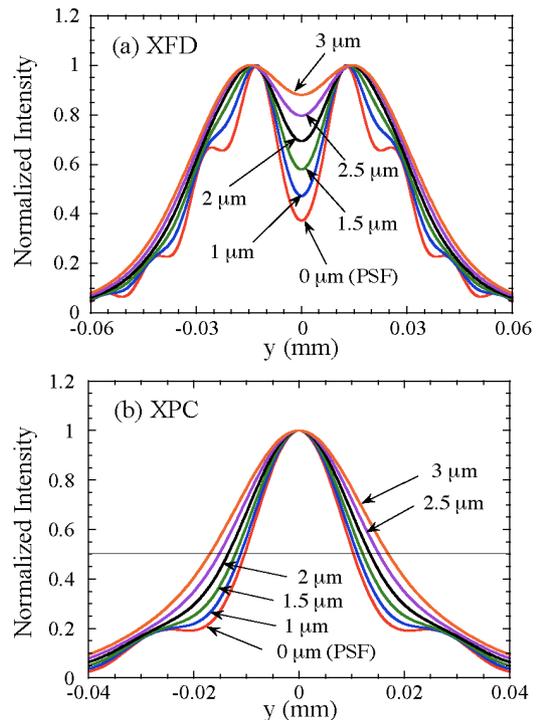


Figure 9: PSFs and their convolutions with Gaussian-distributed sources of r.m.s. sizes from 1 to $3 \mu\text{m}$ for (a) XFD with a slit width of $22 \mu\text{m}$ and (b) XPC with a pinhole size of $13 \mu\text{m}$, respectively.

6. 結論

ミクロンオーダーの微小な ID 光源サイズ診断のために、X 線フレネル回折に基づいた新しい手法を開発した。この手法の有効性、妥当性が、理論と実験の両面から検証された。条件によっては、 $1 \mu\text{m}$ (r.m.s.)以下の分解能を実現することも可能であるので、XFD は次世代光源リングの輝度性能を最大化するための有望なエミッタンス診断法の一つである。

参考文献

- [1] R. Hettel, et al., Proceedings of PAC 2013, Pasadena, CA USA (2013) p. 19.
- [2] H. Onuki and P. Elleaume, eds., "Undulators, wigglers and their applications", (Taylor&Fransis, 2003) Chap. 3. p. 69.
- [3] S. Takano, et al., Proceedings of IBIC 2012, Tsukuba, Japan (2012) p. 186.
- [4] M. Masaki, et al., AIP Conf. Proceedings, SRI 2009, Melbourne, Australia, Vol.1234 (2010) p. 560.
- [5] S. Takano, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **556**, p. 357 (2006).
- [6] M. Masaki, et al., J. Synchrotron Rad., **10**, p.295 (2003).
- [7] C. Thomas, et al., Phys. Rev. ST-AB, **13**, 022805 (2010).