

鈴木芳生
JASRI/SPring-8

X線顕微鏡は普通water windowと呼ばれる窒素K吸収端と酸素K吸収端の間のエネルギーを中心とした領域の軟X線顕微鏡と大気中で実験される硬X線領域の顕微鏡に大きく分けられる。軟X線マイクロビームでは1980年代には既に100nmのレベルの分解能を達成していたのに対して、同時期の硬X線マイクロビームではまだ10 μ m程度の分解能に過ぎなかった。硬X線マイクロビームの分解能が μ m-sub μ mになったのは90年代になってからである。しかしながら現在では硬X線領域で100nmの分解能が得られるようになってきた。この間の技術的な進歩は光学素子それ自体による部分もちろんあるが、もっとも重要な進歩は光源技術にあったと考えられる。例えば回折限界の集光ビームサイズを得ようとした場合、光学系が最適化されていたとしても利用可能なフラックスは光源のフラックスに対して光源のエミッタンスとX線の固有エミッタンス($\lambda^2/4$)の比で決められる。従って、重要なのは光源の強度でなく輝度であり、また、波長が短いほど利用可能なフラックスが減少する。

SPring-8ではマイクロビームの為の光学素子開発だけでなく、波面を(エミッタンスを)保存して光学素子をコヒーレントに照明する為のビームライン技術に関しても重要な技術として考えてきている。図1にマイクロビーム実験装置の構成例を示すが、現在では主にアンジュレータ光源の中尺ビームラインであるBL20XUで実験が行われている。アンジュレータからのX線は二結晶分光器で単色化された後、コヒーレンスを正確に定義するための仮想光源ピンホール(あるいはスリット)を通過して、約200m下流の実験ステーションに導かれる。このビームラインでは結晶分光器以外の光学素子はなく、仮想光源ピンホールからのX線は200mの自由空間を伝搬した後、ビームライン最下流のカプトン窓(厚さ50-125 μ m)を通して大気中に取り出される。光源が有限の大きさSを持つ場合の空間コヒーレント領域は、光源からの距離Lと波長 λ により、 L/λ で定義出来る。したがって波長 λ のX線では、ピンホールサイズ100 μ mで可干渉領域200 μ m、20 μ mピンホールでは1mmのコヒーレント領域が得られる。

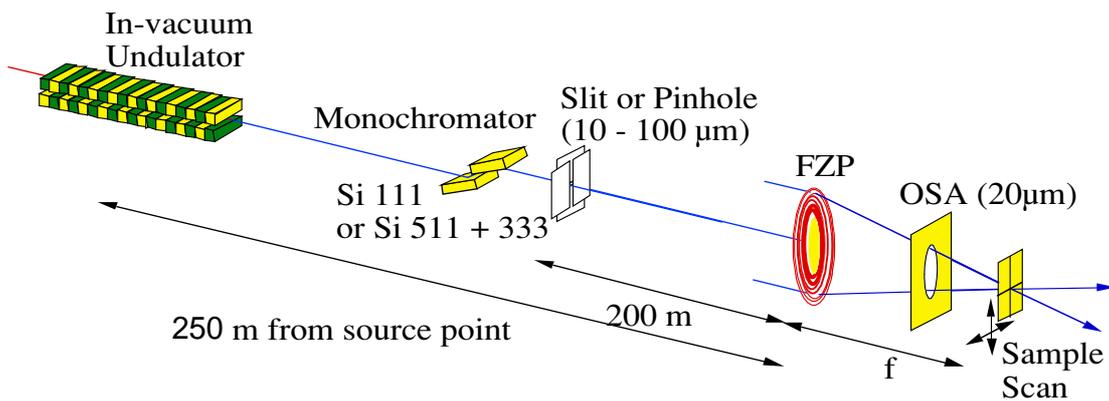


図1 . SPring-8 BL20XUにおけるマイクロビーム実験装置構成

我々は現在各種の光学素子(フレネルゾーンプレート[1,2], 多層膜ゾーンプレート[3,4], 全反射ミラー[5], 屈折レンズ[6]等)を用いたマイクロビームや走査型顕微鏡, 結像顕微鏡の開発を進めている。フレネルゾーンプレートや多層膜ゾーンプレートでは既に回折限界の集光ビームサイズが得られており、空間分解能は0.1 μ mに達している。図2に最外線幅0.25 μ mのフレネルゾーンプレートを用いてマイクロビーム生成を行った例を示すが、一次集光で半値幅0.3 μ m、三次集光位置では0.1 μ mのマイクロビームが得られている。これらの値は回折理論に基づく理論値に一致しており、ほぼ理想的な集光条件が達成されている。また集光ビームのフラックスは 10^9 - 10^{10} photons/s 程度であり、走査型

顕微鏡や μ -XAFS, 蛍光 X 線分析等の応用に十分な強度が得られている。図 3 に走査型顕微鏡像の例を示すが, $0.2 \mu\text{m}$ のライン/スペースまで解像されていることがわかる。

分解能が 100nm レベルになると硬 X 線領域でも放射線損傷が問題になってくる。これを避けるために今後はクライオ顕微鏡技術や位相コントラスト法による高感度化が重要になると考えられる。

発表では, SPring-8 における各種光学素子の開発状況ならびに FEL 等の次世代光源を考えた X 線顕微鏡の将来についても述べる予定である。

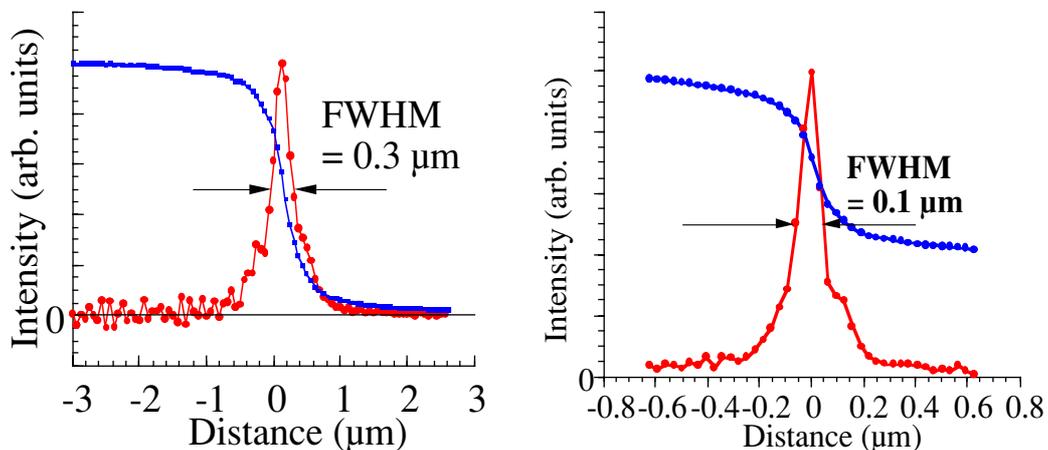


図 2 . フレネルゾーンプレートを用いたマイクロビーム

X 線エネルギー 8 keV , 左図: 一次集光位置でのビームプロファイル, 右図: 三次集光.

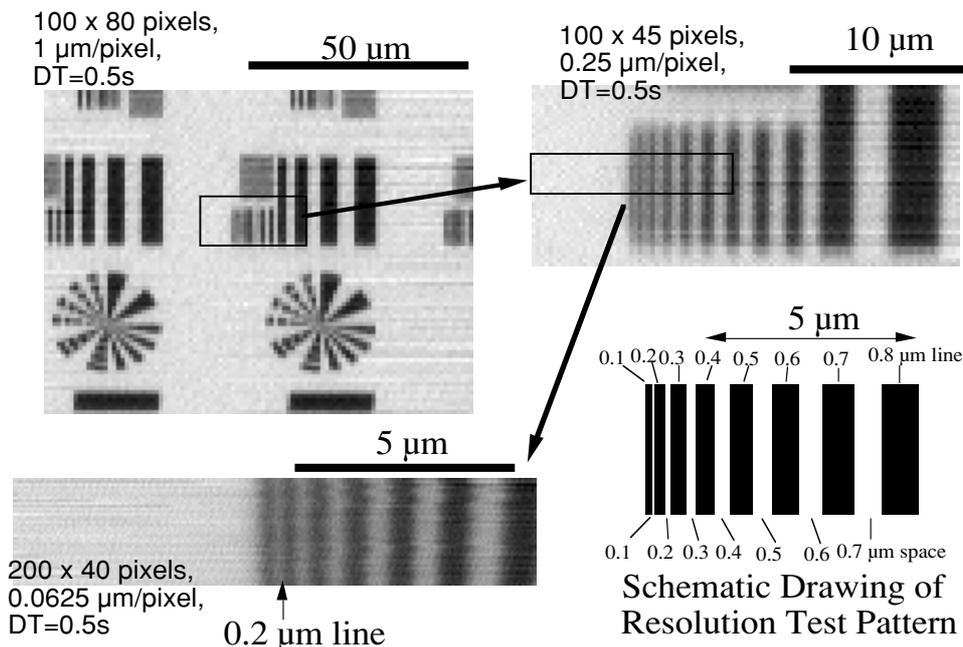


図 3 . テストパターンの走査顕微鏡像

X 線エネルギー 8 keV . 図 2 に示す一次集光ビームを用いて測定.

- 1) Y. Suzuki, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 1508.
- 2) A. Takeuchi, et al., J. Synchrotron Radiation 9 (2002) 115.
- 3) Y. Suzuki, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A467-468 (2001) 951.
- 4) N. Kamijo, et al., J. Synchrotron Rad. (2002). 9, 182-186.
- 5) A. Takeuchi, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A467-468 (2001) 302.
- 6) Y. Kohmura, et al., Rev. Sci. Instrum. 70 (1999) 4161.

