

§6. 利用実験

6-3. ウォルターミラーを利用したサブミクロン・マイクロビームの生成

青木 貞雄, 竹内 晃久

筑波大学物理工学系*

Submicron X-ray Microbeam Production with a Wolter-type Grazing Incidence Mirror**Sadao AOKI and Akihisa TAKEUCHI***Inst. of Appl. Phys., Univ. of Tsukuba*

Tristan Main Ring (MR) at KEK in Japan was temporarily operated as a synchrotron radiation source from September to December in 1995. The machine was operated at 8 GeV and the beam current was several mA during our experiment. Although our machine time was limited to only about 80 hours, the results were very useful. A quasi-monochromatic beam from the undulator was monochromatized by two silicon parallel crystals. An 8.54 keV monochromatic X-ray beam was focused by the Wolter-type grazing incidence mirror which consists of paraboloidal and hyperboloidal inner surfaces. The distance between the undulator and the mirror was 100 m, which gave rise to a relatively large coherent area (vertical $\sim 50 \mu\text{m}$, horizontal $\sim 30 \mu\text{m}$) at the entrance plane of the mirror. A highly collimated beam (vertical divergence $\sim 3 \mu\text{rad}$, horizontal $\sim 5 \mu\text{rad}$) was so sensitive to the mirror surface undulation that several focal spots were produced. The shape of the spots were nearly elliptical. The smallest diameter of the spots was less than $1 \mu\text{m}$.

1. はじめに

物質の微小領域における構造解析や元素分析を、非破壊で、比較的簡便に行なえる方法への要求が高まって来ている。X線回折, XAFS, 蛍光X線分析などの手法を、微小に絞ったX線プローブによって行なえば、これらの要求に答えられる分析が原理的に可能である。

我々は、X線の全反射を利用した斜入射光学

系を集光素子として注目し、光源に放射光を利用することで高輝度なX線マイクロビームを生成する研究を進め、システムの検討を行なってきた。今回は特に、集光素子に比較的収差の少ないウォルターミラー¹⁾を用い、X線源には第3世代並の輝度をもつMR放射光を使用して実験を行なったのでその結果について報告する。

* 筑波大学物理工学系 〒305 つくば市天王台 1-1-1
TEL 0298-53-5299 FAX 0298-53-5205 e-mail aoki@kirz.bk.tsukuba.ac.jp

2. 実験

2.1 望遠鏡型ウォルターミラー

これまで開発が進められてきた放射光マイクロビーム光学系は、微小光源を縮小系で結像させた設計が主流であったが、このような光学系をX線領域で組むと、全体の距離が長くなってしまい、一般に光源のふらつきや振動の影響を受けやすい。放射光科学の進歩により、最近では高輝度で、指向性の高いX線が得られるようになってきた。我々はこのことに注目し、生成される望遠鏡的な集光特性を示す回転放物面ミラーの導入を、放射光マイクロビーム光学系の集光素子としてこれまで検討してきた²⁾。

しかしながら、単一の鏡面では、コマ収差の除去が不可能で、このことはこの光学系に関していえば、アライメントを極めて困難なものにし、結局光源のふらつきや振動の影響を大きく受けてしまう。この問題を解決できる光学系として考え出された光学系の一つに、ウォルターミラーがある。今回の実験で集光素子として使用したウォルターミラー (Type-I) のパラメータを図1に示す。

鏡面は、1つの焦点を共有する軸対称の回転放物面と回転双曲面からなる。図1からも分かるように、ミラーに入射する平行光は、2回の反射により焦点で一点に収束する。反射面のどの部分に入射しても光路長は一定であり、しかもアッペの正弦条件を近似的に満たす。更に、鏡面を2枚使用することで、コマ収差は極端に軽減される。また、斜入射鏡の場合、臨界角の条件から、焦点距離の短い素子を設計するのはなかなか困難であるが、ウォルターミラーの場合、反射を2回行うことで、回転放物面鏡1枚のみの場合に比べ、焦点距離を約半分縮めている。これは、幾何光学的に予想されるスポットの大きさを、半分に押さえる事が出来るということの意味する (図2)。

実際のミラーの作製と、図3に示されるような鏡面の形状測定については(株)ニコンに依頼した。

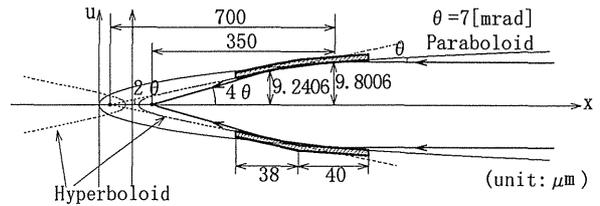


Figure 1. Parameters of the Wolter mirror (type-I).

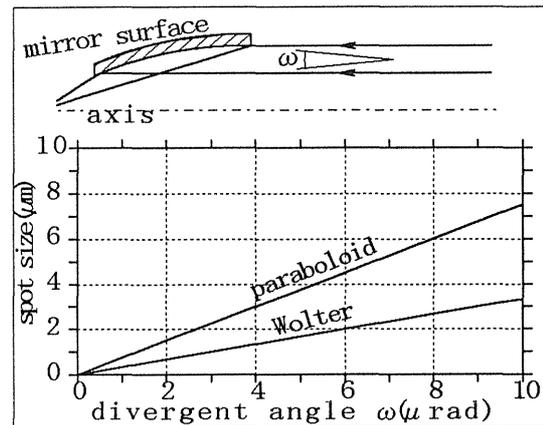


Figure 2. Calculated spot size obtained with the Wolter mirror and the paraboloidal mirror.

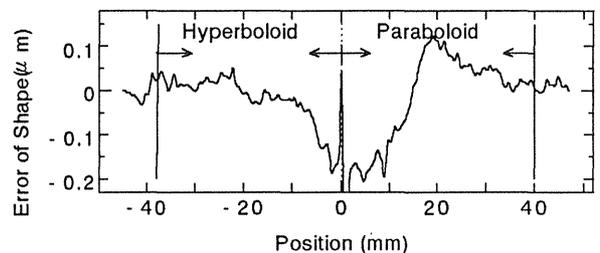


Figure 3. Surface profile of the Wolter mirror (meridional).

ミラーの詳しい製法についてはここでは省略する³⁾。

光学素子が、波長が短いX線を扱うものになると、実際に製作されたミラーの鏡面の平均自乗粗さや形状精度もその分解能を考える上で無視できない要因となってくる。レーリーの結像条件では、光路差が4分の1波長以下であればその素子は近似的に理想的な結像をする。ウォルターミラーの場合、この条件は、 $\theta=7$ mrad, $\lambda=1.45$

\AA のとき、鏡面粗さの最大許容量は 24.6\AA 、(\Rightarrow 鏡面の平均自乗粗さ σ が約 5\AA 以下) で要求される。また反射率の低下も鏡面粗さに起因する。 $\sigma=0$ のとき反射率は約83%であるのに対し、 $\sigma=5 \text{\AA}$ のときは約75% (1.45\AA) になる。一般に、平面、球面に比べて、放物面や双曲面などの非球面の加工は極めて難しく、実際に製作されたミラーも、回転面方向 (sagittal) は比較的理想的に仕上がっているのに対し、放物面、双曲面方向 (meridional) の加工精度は、鏡面全体の形状誤差が $\pm 100 \text{ nm}$ 程度あって、あまり良くない (図3)。実験では、ミラーに入射する X 線の開口を制限して、比較的形状が良いと思われる所だけを使用することにした。

2.2 光学系の概要

図4にMR放射光マイクロビーム光学系の配置を示す。光源からミラーまでは約100 m 離れている。途中に設置されている2枚の Si(220) 結晶を使って、X線を 1.45\AA (8.54 keV) に単色化した。2結晶の間とミラーの直前の2ヶ所に4象限スリットを設置しており、これでビームを平行化し、ミラーへ入射させた。特にミラー直前の4象限スリットは、同時にミラーへの開口制限の役割をも果たしている。今回は、ビームの垂直成

分はミラーの sagittal 面で、水平成分は meridional 面で集光されるように配置した。

集光点でのスポット撮影には、富士原子核乾板を用いた。また、 $200 \mu\text{m}\phi$ の金ワイヤーを用いたエッジスキャンによりスポットの大きさを測定した。途中に、光量を調節するために適当な厚さの Al 膜を吸収体として挿入した。検出器の直前には、余分な反射光や散乱をカットするためにスペーシャルフィルターを設置した。結晶、スリット、スペーシャルフィルター、ミラー、検出器は全てパルスモーター駆動により、実験ハッチの外から制御できるようにした。

2.3 PFにおける予備実験

MRにおいて実験を行なう前に、同研究所のPFのBL-6C₂において、光源から25 m 下流の位置に図4とほぼ同様な系を組み、予備実験を行った。ただし、ここでは 1.38\AA (9 keV) の X 線を使用した。その時得られたスポットを、図5(a)に、その垂直方向のプロファイルを図5(b)に示す。このときのミラーへの入射ビームの発散角は、約 $20 \mu\text{rad}$ (垂直方向) \times $30 \mu\text{rad}$ (水平方向) であった。鏡面の1回反射における反射率は39% (MR放射光での実験で使用した 1.45\AA (8.54 keV) の X 線に換算すると43%) であっ

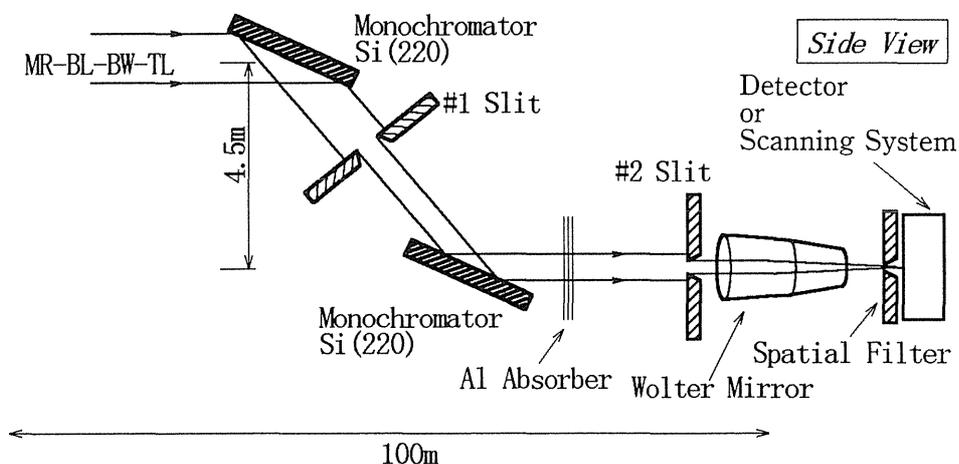


Figure 4. Schematic diagram of the microbeam optics at MR.

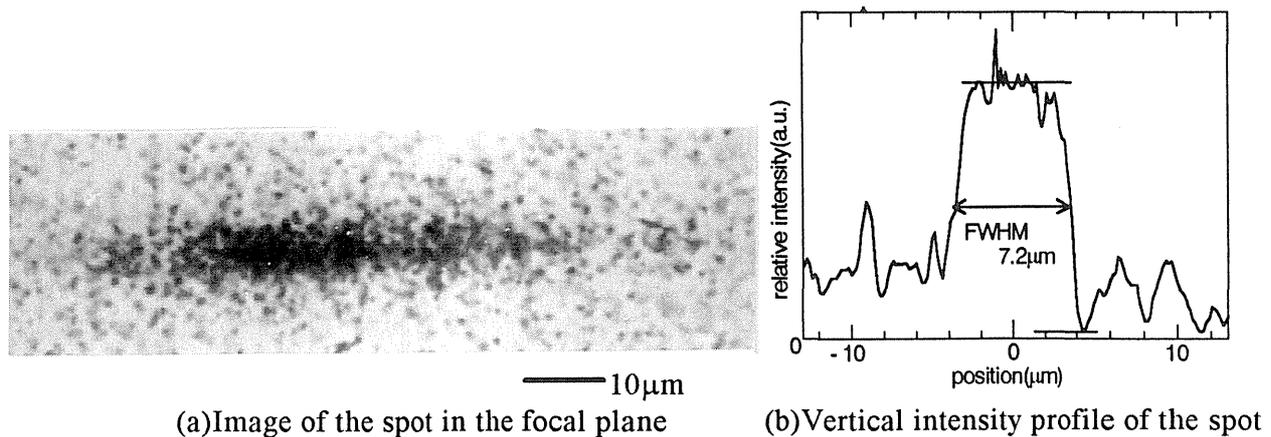


Figure 5. Image and intensity profile of the spot obtained at KEK-PF.

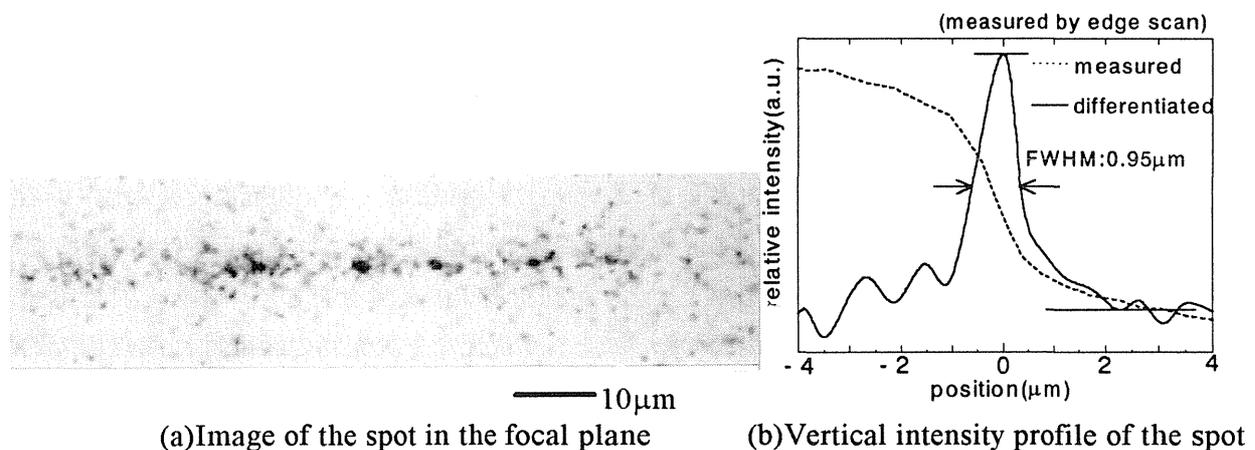


Figure 6. Image and intensity profile of the spot obtained at KEK-MR.

た。また、これより鏡面の平均自乗粗さ $\sigma=13.4$ Å という結果を得た。

2.4 MR 放射光での集光実験

実際に MR を光源に用いて集光実験を行なった。ミラーへの開口を制限し、焦点位置で得られたスポットの像を図 6(a) に示す。また、その時のスポットの垂直方向の大きさをエッジスキャンにより測定したところ、半値幅約 $1 \mu\text{m}$ を得た (図 6(b))。このときのミラーへの入射ビームの発散角は、4 象限スリットによるコリメーションで約 $3 \mu\text{rad}$ (垂直方向) $\times 5 \mu\text{rad}$ (水平方向) であった。

スポットの垂直方向の集光を担う sagittal 面の集光についてまず考える。図 2(b) で示されるシミュレーションから予想される傾向と、PF, MR 両者での実験で得られた結果はそれぞれほぼ一致している。このことより、ほぼ理想的にこのミラーが集光を行なっていると考えることができる。

一方、meridional 方向に関しては、PF での実験結果図 5(a) を見る限りでは、 $100 \mu\text{m}$ 程度のライン状のスポットになっており、この方向の形状誤差が大きく影響していることが分かる。ただし、MR での実験結果図 6(a) を見ると、同じように全体としては $100 \mu\text{m}$ 程度の大きなラインになっているが、複数個の微小なスポットが離散的に分

散してこれを形成していたことが分かる。これらのことは、PFでは、入射ビームの平行性が充分でなく、もともと水平方向に分布していたそれぞれのスポットがはっきり分離されるほど収束されなかったのに対し、MRでは逆に、充分な入射ビームの平行性によりそれらを明確に分離することができたと考えることができる。これらの点状スポットは、検出器の直前にスペーシャルフィルターを適当に設置することで任意の一つだけを取り出すことができた。取り出されたスポットの水平方向の大きさは約 $2\mu\text{m}$ であった。

分散しているこれらのスポットは、sagittal方向の焦点が、それぞれ異なる位置にある。図6(a)の写真では、右端のスポットが最も下流側に焦点があり、そこから順に左側のスポットほど焦点位置は系の上流側に存在している。

meridional方向の集光にこれらの傾向が見られる原因については、2通りの見方ができる。鏡面の凸凹による単なる幾何学的な光路の分離とする見方が1つ。それから、もう1つは鏡面の形状誤差のパターンがある程度周期的なものであることから、鏡面が反射型回折格子的役割をはたして、入射ビームを多数次の光線に分離しているとする見方である。これらのことについては、ミラーの形状誤差を考慮した光線追跡によるシミュレーションを行った。その結果を図7に示す。ほぼMRでの実験と同じ条件であるが、ここでは幾何光学による影響のみを考慮し、波動光学的效果は考慮していない。ここで実際に得られたスポット(図6(a))と光線追跡による結果(図7)を比較してみる。両者共にmeridional方向へのスポットの分離が認められるが、前者は分離された1つ1つのスポットの間隔が、約 $10\text{--}20\mu\text{m}$ 程度であるのに対し、後者のそれはせいぜい数 μm 程度である。このことから、スポットの分離が、幾何光学だけでは充分に議論できないことが分かる。ただし、光線追跡に用いたミラーの形状データのモデル化が充分なものであったかどうかとも再検討

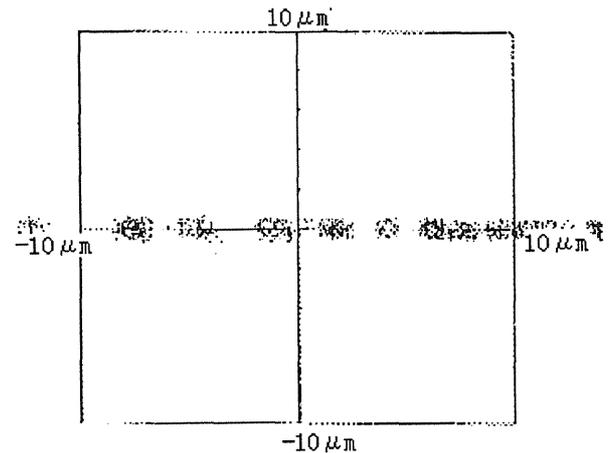


Figure 7. Spot diagram obtained with the same conditions as Fig. 6(a).

する必要がある。逆に、もし、今回用いたミラーの鏡面が回折格子的な役割を担っていたと考えてみる。鏡面研磨の過程で、周期 $1\text{--}2\text{mm}$ 程度のうねりが機械的なくせで鏡面に反映されている恐れがあるとの報告をニコンから受けている。これが回折格子的な働きをしているとして計算すると、0次光と1次光間の距離は、焦点面で約 $10\mu\text{m}$ 前後となり、これは図6(a)の結果とよく一致する。しかしいづれにせよ、スポットの分離の原因を明確にするには、コヒーレントなX線を用いて再度実験をする必要がある。

Ge半導体検出器を用いて、スポットの光子数を計測し、光子の面密度を簡単に算出した結果、 $5000(\text{phs./sec./}\mu\text{m}^2)$ で、面密度は、ミラー入射前に比べて約30倍のゲインを得た。PFにおいて同様に行なった実験では、光子の面密度 $0.6(\text{phs./sec./}\mu\text{m}^2)$ 、ゲインは約0.6倍であった。MRとPFで、これだけゲインが大きく違うのは、ミラーの開口をMRのほうが大きく取れたことと、生成されたスポットは逆にMR放射光のほうがずっと小さかったことによる。

3. 結果と考察

MR放射光を光源として用い、集光素子にWolterミラーを用いてマイクロビーム生成の実

験を行なった。sagittal 方向は $1\ \mu\text{m}$ を切るスポットを生成することに成功した。これはほぼ、このミラーの sagittal 方向の形状が理想的に加工されていると考えられる。一方, meridional 方向は, 離散的なスポットが形成された。この鏡面の meridional 方向の形状精度並びに表面粗さは, 十分なものは得られていないといえる。しかし, 離散したスポットの一つ一つは, それぞれが数 μm 程度の大きさであり, 鏡面の微視的な領域では, 何箇所か理想面に近い形状のところがあると思われる。スペーシャルフィルターの挿入で, 分散しているスポットの一つを任意に選び出すことができる。

スポットを形成する光子の面密度は約5000 phs./sec./ μm^2 で, これは PF でほぼ同じ系を用いて生成したスポットと比べて4桁程度高いものであった。また, MR での実験においてこのミ

ラーのゲインは約30倍であった。この値は入射するビームの平行性が高くなるほど, また, 開口が大きくなるほど向上する。

縦・横両方向ともサブミクロンに達するスポットを生成するには, ミラーの meridional 方向の形状誤差, 表面粗さの問題を解決しなければならない。新たにミラーを作る場合は, 本実験で得たデータをフィードバックして, 製作するのが望ましい。また, 鏡面の直接研磨を容易に行なえる方法を見つけることが, 形状精度の改善にそのままつながるといえる。

参考文献

- 1) H. Wolter: Ann. Phys. **10**, 94-114 (1952).
- 2) S. Aoki, K. Iida, et al.: Photon Factory Activity Report #12, p127 (1994).
- 3) T. Onuki, K. Sugisaki and S. Aoki: Proc. SPIE. **1720**, 258-263 (1992).