

■第13回日本放射光学会奨励賞受賞研究報告

放射光用高精度 X 線ミラーの製作とナノビーム応用

三村秀和 (大阪大学大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻)

「光源」の発展が放射光分野の成長エンジンであるが、そのエンジンを有効に活用する「光学系」も重要であり、光源の性能を最大限に引き出す研究を進めなければならない。第3世代放射光施設では、強度だけでなく、可干渉性も優れた X 線の利用が可能になった結果、後段の光学系の不具合が、実験に、より影響するようになった。「X 線の強度にムラがある。」「X 線ビームが振動している。」「理想的な X 線の強度が得られない。」などである。放射光実験の場合、ビームタイムに限りがあり、また、ため込み型の計測が多く、強度が1.5倍違って影響が大きい。光学系には、非常に高価な光学素子とそのアライメント装置が並べられる。

本研究対象は、光学系で使用される光学素子の中でもミラーである。X 線を反射するための鏡である。ミラーを用いないビームラインはなく、ミラーの性能は、強度や波面分布に大きく影響する。これまで、X 線ミラーの開発に取り組んだ結果、X 線ミラーに必要な性能を明らかにし、新しい X 線ミラーの加工・計測法を確立、理想的な X 線ミラーの開発を経験した。ここでは、成功へのターニングポイントを中心に、本研究を紹介したい。

X 線平面ミラーの開発

あらゆる物質は原子から構成されているので、「加工の極限精度は原子のサイズである」と、学生時代の教授である森勇藏先生（現大阪大学名誉教授）から何度も言い聞かされた。科学者、研究者は、研究の独創性が大事であるが、研究目的の設定に苦勞する。森先生が目指された研究は極めてシンプルであり、極限の原子レベルの超平滑な表面を実現することであった。具体的には、30年以上に亘って、その極限の原子単位の加工法の開発を精力的に進められ、EEM (Elastic Emission Machining) と呼ばれる化学反応をベースとした加工法により、その目的が達成された¹⁾。そして、その応用先の一つとして、X 線ミラーが有力の候補として挙がり、2001年に SPring-8 との共同研究がスタートした。私は、山内和人先生（現大阪大学大学院教授）の御指導の下、硬 X 線用の X 線ミラーの作製と SPring-8 での X 線による評価に携わるようになった。

ここでの X 線ミラーは全反射ミラーを示す。X 線は、物質内部の屈折率が空気または真空中の屈折率よりも小さく、反射させるためには、ミラー表面から mrad レベルの角度で入射させる必要がある。完全に平坦であれば問題ないが、凹凸が存在すると、その凹凸の影響で反射 X 線の

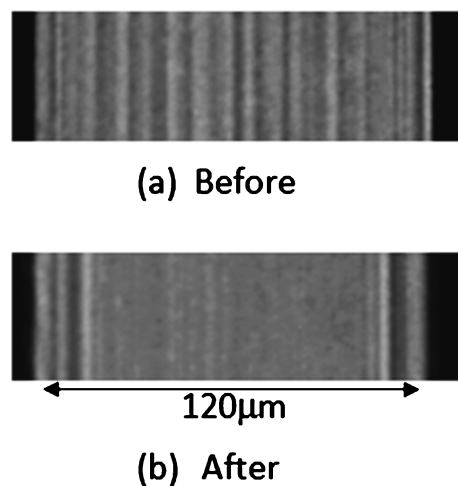


Fig. 1 Intensity distribution images of X-ray reflected on fabricated flat mirror surfaces before and after mirror fabrication system improvement. Fig. 1(a) is the first data, using the firstly fabricated X-ray mirror. Fig. 1(b) is the image obtained by using X-ray mirror not having high frequency figure errors around 1mm wavelength range.

波面が乱れる。当時は、X 線ミラーの性能にどのような性能が必要かわからなかった。とりあえず実験を先行させ、完成したばかりの SPring-8、1 km 長尺ビームライン (BL29XUL) において、作製した X 線ミラーに X 線を照射し、反射強度像を観察した。その結果、Fig. 1(a)に示すように、強度ムラの激しい結果が得られた。すなわち、入射 X 線の性能を損なう、ダメなミラーであった。

ミラーの作製と同時に、X 線がミラーを反射する際の挙動を予測可能な、波動光学に基づく計算手法の開発を同時に進め、X 線の反射像を実験しなくても予測することが可能になった。この計算手法を用いて、実験結果を考察すると、ミラーの表面に存在する 1 ナノメートルレベルの凹凸でも、その凹凸の周期が 1 mm 前後であれば、反射像にはっきりとした強度ムラを発生させることがわかった。

当時、EEM を用いると、表面粗さでは、原子レベルの超平滑面を実現でき、さらに、形状においても数値制御加工により、オンGSTロームの単位で任意の形状を作ることができた。しかしながら、加工分野において「測れないものは作れない」という言葉があるように、加工だけでなく、その形を計測する手法も、ミラー作製には重要になる。前述した凹凸を除去するためには、高分解能でミラー全面を計測する必要がある。そこで、Microstitching In-

terferometry (MSI) と呼ばれる、表面粗さの評価で使用していた白色干渉顕微鏡を用いた形状計測手法を完成させた。その結果、 $30\ \mu\text{m}$ の横分解能で $0.1\ \text{nm}$ の高さ精度で表面凹凸の形状計測を可能にした^{2,3)}。本計測器と EEM を組み合わせ、再度、強度ムラの原因となった凹凸を除去し、再実験を行った。Fig. 1(b) に示すように、予想どおりに X 線の反射像の強度ムラを除去することに成功した⁴⁾。この研究により、EEM による数値制御加工、MSI、波動光学シミュレーションなど、次の X 線集光ミラーの開発のための土台が完成した。

X 線集光ミラーの開発

X 線を集光することは、光子密度を増大させ、また、顕微鏡の分解能を向上させるなど、大きな意味があり、世界的に見ても長年に亘って X 線用の集光光学素子の研究が進められてきた。可視光であれば、簡単に回折限界の集光サイズや結像性能を得ることができるが、X 線は物質との相互作用が弱く、簡単に X 線の方向を曲げることができない、また、X 線の波長が短いために、理想性能を得ることは難しいとされた。

X 線をミラーで集光するためには、Kirkpatrick-Baez (K-B) 配置と呼ばれる二枚の楕円ミラーを用いて集光する。入射角度は mrad レベルであるので、ミラー形状の最高点と最低点の高低差は、 $100\ \text{mm}$ 長のミラーでも、 $1\ \mu\text{m}\sim 20\ \mu\text{m}$ であり、見た目は平面である。

平面ミラーで培った作製手法を集光ミラーの作製に応用した。初めて作製したミラーは、焦点距離 $300\ \text{mm}$ で、回折限界で決定される集光径は $15\ \text{keV}$ の X 線で $180\ \text{nm}$ の設計である。形状誤差 $5\ \text{nm}$ (P-V) まで完成させ、1 次元の集光特性の評価を SPring-8 $1\ \text{km}$ 長尺ビームライン (BL29XUL) で実施し、理想的な集光サイズ、ビームウェスト近傍において、波動光学的な振る舞いを世界で初めて観察した⁵⁾。

X 線集光ミラーの研究において、極限の超平滑な表面を目指したように、いかにして理想的な極限の回折限界集光を達成するかを念頭に研究を進めた。更に集光径を小さくするためには、光学系の NA (Numerical Aperture) を大きくする必要があり、ミラーの入射角度を大きくし、急峻な形状にする必要がある。ミラーの形状は非球面形状であり、ナノメートルの精度でミラー形状を測定するのは困難であった。そこで、フィゾー干渉計を用いた Relative Angle Determinable Stitching Interferometry (RADSI) を発案し完成させた⁶⁾。この手法は、スティッチング時に用いる補正角度を高精度に測定する方法であり、急峻なミラー形状に対応可能である。本手法と MSI, EEM を組み合わせ、ミラー基板を作製し、大きな入射角度でも反射するように、白金をミラー表面に蒸着し、集光ミラーを完成させた。その結果、 $50\ \text{nm}$ サイズの集光径を突破し、理想的な回折限界集光を実現させ^{7,8)}、さらに、 $15\ \text{keV}$ の X

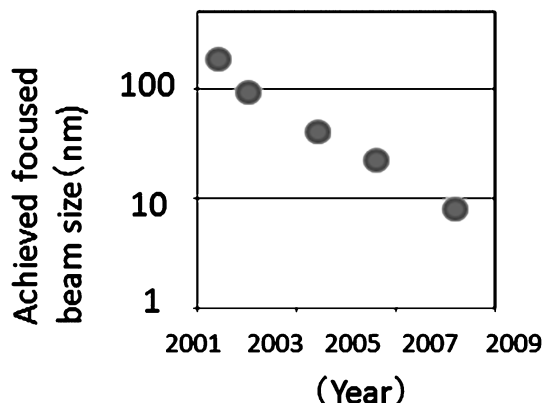


Fig. 2 Progress of achieved focal beam sizes.

線を、全反射ミラーでは限界最小に近い、 $25\ \text{nm}$ サイズまで集光することに成功した⁹⁾。本研究により実現された X 線集光ミラーは、集光径、集光効率ともに、理想的な性能を確認している。また、昨年度、X 線自由電子レーザーに対応した、 $400\ \text{mm}$ 長さの X 線集光ミラーの作製と評価を行い、ワークディスタンス $350\ \text{mm}$ の設計において、理想的な回折限界集光を確認した¹⁰⁾。本ミラーを用いるとワークディスタンスが長いので真空装置の外から集光ビームを入れることも可能である。今後、放射光施設のビームラインへの導入や、様々な X 線顕微鏡システムへの応用を期待している。

以上、平面、集光ミラーの開発に関して振り返ってみると、EEM が加工法として完成度が高かった事は言うまでもないが、それ以外に、波動光学シミュレーションにより反射像を予測可能にしたこと、二つの新しい概念の形状計測器の開発に成功したことが、鍵であったと考える。本研究により、シミュレーションによりミラーに必要な性能を示し、それを作製するための、加工、計測法の開発、改善を実施するというスタイルが確立した。

今後の計画

Fig. 2 にこれまで達成した集光径の推移を示す。2001 年に取り組んで以降、集光サイズの縮小を進めており、世界的な X 線集光に関する研究競争の中にいる。加工法や形状計測法以外にも、集光マニピュレーターの開発¹¹⁾ や集光ビームを用いた走査型蛍光 X 線顕微鏡の開発¹²⁾、位相回復法によるミラー形状の算出¹³⁾、高精度ビームプロファイル計測法の確立¹⁴⁾、などの研究を行った。現在は、多層膜ミラーによる Sub- $10\ \text{nm}$ 集光やアクティブミラーを用いた補償光学系の開発を行っており、また、X 線自由電子レーザー用のミラーの開発を進める計画である。

謝辞

本賞の受賞に至った高精度 X 線ミラーの研究は、非常に多くの方のご指導やご協力により行ったものです。山内

和人教授(阪大)には、学生時代から現在に至るまで、研究の心得、研究方針など御指導頂きました。本研究は、大阪大学の山村和也准教授、佐野泰久准教授、斎藤彰准教授、松山智至助教、高橋幸生講師、湯本博勝博士(現SPring-8/JASRI 研究員)、山内研究室の在学学生、20名を超える卒業生と共同で研究を行いました。本研究を進めるにあたっては、理化学研究所の石川哲也主任研究員、玉作賢治専任研究員、西野吉則専任研究員、矢橋牧名チームリーダー、高輝度光科学研究センターの大橋治彦副主席研究員をはじめとするSPring-8の方々には、研究のアドバイス、実験方法を指導して頂き、非常にお世話になっております。皆様に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki and Y. Mori: Review of Scientific Instruments, **73**(11) 4028-4033 (2002).
- 2) H. Mimura, K. Yamauchi, K. Yamamura, A. Kubota, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and Y. Mori: Journal of Synchrotron Radiation **11**, 343-346 (2004).
- 3) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: Review of Scientific Instruments **74**(5), 2894-2898 (2003).
- 4) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, A. Souvorov, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and Y. Mori: Applied Optics **44**, 6927-6932 (2005).
- 5) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: Journal of Synchrotron Radiation **9**, 313-316 (2002).
- 6) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Review of Scientific Instruments **76**, 045102 (2005).
- 7) H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, H. Hara, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Review of Scientific Instruments, **76**, 063708 (2005).
- 8) H. Mimura, S. Matsuyama, H. Yumoto, H. Hara, K. Yamamura, Y. Sano, M. Shibahara, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Japanese Journal of Applied Physics Part 2, **44**(18), L539-L542 (2005).
- 9) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Applied Physics Letters **90**, 051903 (2007).
- 10) H. Mimura, S. Morita, T. Kimura, D. Yamakawa, W. Lin, Y. Uehara, S. Matsuyama, H. Yumoto, H. Ohashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohmori and K. Yamauchi: Review of Scientific Instruments **79**, 083104 (2008).
- 11) S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, H. Hara, K. Yamamura, Y. Sano, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Review of Scientific Instruments **77**, 093107 (2006).
- 12) S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, Y. Sano, K. Yamamura, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Review of Scientific Instruments **77**, 103102 (2006).
- 13) H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, S. Handa, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Review of Scientific Instruments **77**, 063712 (2006).
- 14) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, S. Handa, T. Kimura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Physical Review A **77** 015812 (2008).

● 著者紹介 ●



三村秀和

大阪大学大学院工学研究科 精密科学・
応用物理学専攻 助教

E-mail: mimura @ prec.eng.osaka-
u.ac.jp

専門・超精密加工, X線光学素子

【略歴】

2002年3月, 大阪大学大学院工学研究
科, 博士課程修了, 同年4月より, 同
大学, 特任講師, 2003年4月より現職。
2006年10月より, JST さきがけ研究員
(兼務)。