

Title	放射光用X線ミラーの開発
Author(s)	三村, 秀和; 山内, 和人
Citation	大阪大学低温センターだより. 2009, 148, p. 19-25
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/11811">https://hdl.handle.net/11094/11811</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」

拠点リーダー：山内 和人（工学研究科）

## 事業推進者

氏名	所属・役職	GCOEでの役割
山内 和人	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	拠点形成計画総括、新世代製造プロセスによる教育プロジェクト、研究プロジェクトの総括
安武 潔	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻、附属超精密科学研究センター）・教授	実践教育企画総括、機能表面創成プロセスの開発
森田 瑞穂	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	広報総括、次世代半導体電子デバイスの開発
片岡 俊彦	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	自己点検・評価総括、新機能光デバイス・システムの開発
桑原 裕司	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	グローバルコミュニケーション教育企画総括、自己組織化によるナノファブリケーション・ナノデバイスの開発
遠藤 勝義	工学研究科（附属超精密科学研究センター）・教授	運営企画総括・センター運営担当、超精密非球面形状測定法の開発
渡部 平司	工学研究科（生命先端工学専攻、附属超精密科学研究センター）・教授/センター長	産学連携総括・センター運営総括、新機能薄膜・ナノ構造創成プロセスの開発
笠井 秀明	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	国際化支援総括、計算機シミュレーションによるプロセス機能の解明
垣内 弘章	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	国際化支援担当、大気圧プラズマによる低温・高速成膜プロセスと薄膜デバイスの開発
中野 元博	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	実践教育企画担当、計算機シミュレーションによるプロセスデザイン
佐野 泰久	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	運営企画担当、大気圧プラズマ、触媒応用による次世代半導体デバイス用基板の開発
後藤 英和	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻、附属超精密科学研究センター）・准教授	グローバルコミュニケーション教育企画担当、超純水のみによる低環境負荷型加工・洗浄プロセスの開発
山村 和也	工学研究科（附属超精密科学研究センター）・准教授	産学連携・センター運営担当、大気圧プラズマおよびウェットプロセスによる高機能材料の超精密加工法の開発
志村 孝功	工学研究科（生命先端工学専攻）・准教授	運営企画担当、放射光による表面・界面の結晶学的評価
影島 賢巳	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	広報担当、走査型プローブ顕微鏡による各種機能表面評価
齋藤 彰	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	グローバルコミュニケーション教育企画担当、放射光を利用した高機能表面計測・評価システムの開発
大参 宏昌	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻、附属超精密科学研究センター）・助教	実践教育企画担当、大気圧プラズマによるSi系薄膜の高効率形成プロセスの開発
有馬 健太	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・助教	広報担当、走査型プローブ顕微鏡による各種機能表面原子・電子構造の評価
赤井 恵	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・助教	運営企画担当、自己組織化による表面機能付与
三村 秀和	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・助教	自己点検・評価担当、放射光・EUVL用光学素子の超精密加工と計測・評価
小野 倫也	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・助教	国際化支援担当、第一原理計算による超精密加工プロセスの解明とナノデバイスデザイン

印：本号で紹介する研究者及び研究グループ関係者  
 太字：低温センターから支援を受けている事業推進者

# 放射光用X線ミラーの開発

工学研究科 三村 秀和

山内 和人（内線7286）

## 1. はじめに

私達が推進するグローバルCOEプログラム「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」では、X線や中性子などの量子ビームを取り扱う光学素子に関する研究をテーマの一つとして挙げている。こうした量子ビームの波長はナノメートル、オングストロームオーダーであるので、使用する光学素子に、原子レベルの精度が求められる。光学素子の開発において重要なことは、X線や中性子を取り扱う上で、光学素子にはどのような性能が必要かを完全に理解し、それに合わせて必要な課題を見つけ開発する必要がある。そのためには、光学素子作製法に精通し、かつ、X線や中性子に関する知識も持ち合わせた分野横断型の人材育成が求められ、本グローバルCOEプログラムの目的にも合致している。

我々は、これまで長年に亘って、SPring-8との共同研究を推進してきた。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り、ミラーを用いないビームラインはなく、ミラーの性能は、実験ハッチにおけるX線の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線ミラーを開発した。ここでは、これまでの成功へのターニングポイントを中心に、本研究を紹介する。

## 2. X線平面ミラーの開発

本専攻では、20年以上に亘って、極限の精度である原子単位の加工法の開発を精力的に進め、EEM（Elastic Emission Machining）と呼ばれる化学反応をベースとした加工法を開発している<sup>[1]</sup>。その応用先の一つとして、X線ミラーが有力な候補として挙がり、2001年にSPring-8との共同研究の下、現在にまで至る次世代の放射光用X線ミラーの開発プロジェクトがスタートした。

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

---

\*この印の付いている語は、後に「用語説明」があります。

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。(図1)可干渉性(コヒーレンス)の乏しいX線であれば、元々の光源の波面自体が乱れているので問題なかったが、X線の可干渉性の向上とともに、ミラーの性能の悪さが目立つようになった。完全に

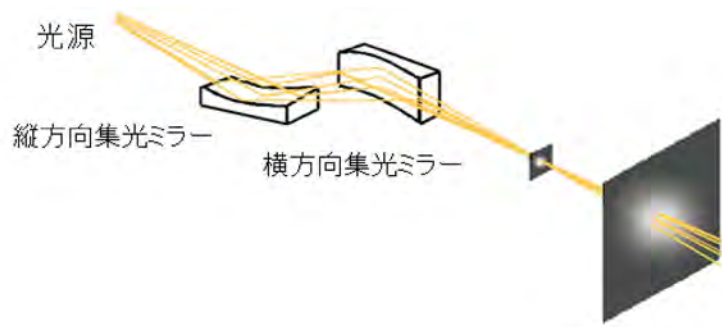


図1 放射光におけるX線ミラーを用いた集光光学系、mradレベルでしかX線が反射しないために、斜入射光学系となる。

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線の波面が乱れる。図2(a)は、X線ミラーに形状誤差が存在するときの、X線の反射像である。X線ミラーには、わずか5 nmの形状誤差しか存在していないが、反射像の強度分布にムラがあることがわかる。本研究では、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線の反射像を実験を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。



(a) Before



120 $\mu$ m

(b) After

図2 ミラーを反射したX線の強度分布。(a)高周波の形状誤差を取り除く前、5 nmレベルの形状誤差が存在。(b) EEMにより高周波の形状誤差を除去した場合。

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、形状に関しても、加工ヘッドの滞在時間を制御する方法の進歩により、オングストロームの単位で任意の形状を作製可能であった。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 Interferometry (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  $\mu$ mの横分解能で0.1 nmの高さ精度で表面凹凸の形状計測を可能にした<sup>[2,3]</sup>。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。図2(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<sup>[4]</sup>。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。

### 3 . 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、集光光学素子の研究が進められている。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、ミラーの中心点と端の高さの違いは、100 mm長のミラーでも、1  $\mu\text{m}$  ~ 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 mmで、回折限界で決定される集光径は15 keVのX線で180 nmの設計である。形状誤差5 nm ( P-V ) まで完成させ、1次元の集光特性の評価をSPring-8 1 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<sup>[5]</sup>。

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<sup>[6]</sup>。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 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<sup>[7,8]</sup>、さらに、図3に示すように、15 keVのX線を全反射ミラーでは、限界最小に近い、25 nmサイズまで集光することに成功した<sup>[9]</sup>。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 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 mmの設計において、理想的な回折限界集光を確認した<sup>[10]</sup>。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。

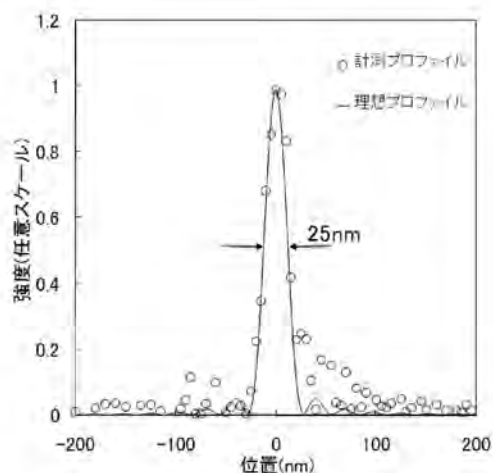


図3 作製したミラーにより、X線を集光した時の強度分布。X線の波長は0.8  $\text{\AA}$ 。理論的に限界である回折限界集光を実現。

#### 4 . 今後の予定

本研究には、X線ミラーを作製するための、超精密加工、計測分野の専門知識は、もちろんのこと、光学、X線に関する知識、技術が必要となる。放射光施設の実験は非常に貴重であり、限られた時間の中で、結果を出す必要がある。そのため、放射光施設の研究者との連携が不可欠となる。また、放射光施設は、世界中に存在し、本分野は非常に横のつながりが強く、ヨーロッパの各国、USAを中心として広い共同研究を行っている。グローバルCOEプログラムでは、世界に通用する若手研究者の育成に力を注いでおり、本研究グループに携わる学生は、海外での国際会議発表や、関連する研究者招聘などを精力的に行うことで、常に、外部からの刺激があり、グローバル人材を育てる環境を提供している。

図4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ある。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<sup>[11]</sup>や集光ビームを用いた走査型蛍光X線顕微鏡の開発<sup>[12]</sup>、位相回復法によるミラー形状の算出<sup>[13]</sup>、高精度ビームプロファイル計測法の確立<sup>[14]</sup>、などの研究を行った。現在は、多層膜ミラーによるSub-10 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、現在建設が進む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。

本研究は、大阪大学グローバルCOEプログラム「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」、文部科学省科学研究費補助金、特別推進研究「硬X線Sub-10 nmビーム形成と顕微鏡システムの応用」の援助の下行った。

#### 参考文献

- [ 1 ] K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki, 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, Y. Mori, Applied. Optics, 44 , 6927-6932 ( 2005 )

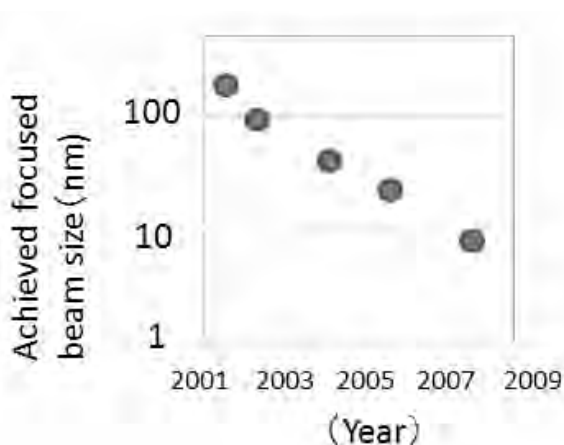


図4 本研究室で、これまで達成したX線集光ビームサイズ。

- [ 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, 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, 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, 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, K. Yamauchi, Physical Review A 77 015812 ( 2008 )

## 用語説明

### X線ミラー

X線は、波長が短いため屈折率が小さい。そのため、可視光で用いられているレンズや反射光などは用いることができない。反射率を得るためには、X線をmradレベルの入射角度で表面に侵入させることで反射する。X線ミラーは、高長波カットやX線集光のために、放射光施設のビームラインに多数導入されている。

### EEM ( Elastic Emission Machining )

微粒子表面と加工物表面間の化学反応を用いた超精密加工法。加工物表面に対して、機械的な負荷なく加工を行うことができる。加工物表面に対して化学反応性をもった微粒子の利用と、その微粒子の精密な供給によって、原子レベルの精度を持った平坦表面の作製が可能になる。

## SPring-8

理化学研究所が所有する、兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高の大型放射光施設。SPring-8の名前はSuper Photon ring-8GeVに由来する。放射光（シンクロトロン放射）とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げたときに発生する、細く強力な電磁波のことである。SPring-8では、遠赤外から可視光線、軟X線を経て硬X線に至る幅広い波長域で放射光を得ることができるため、原子核の研究からナノテクノロジー、バイオテクノロジー、産業利用や科学捜査まで幅広い研究が行われている。

## 回折限界

光の本質的な性質である回折によって、光学系ごとに、光をどれほど狭い領域に集められるかに理論的な限界がある。これを回折限界という。具体的には、集光鏡もしくはレンズの受光面積や、焦点距離、波長などによって決まる。