



ミラー光学素子の開発およびその応用の現状と将来展望

三村秀和 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
松山智至 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

要旨 ミラー光学素子による硬 X 線集光技術は近年急速に発展しており、現在、理想的な回折限界の性能を有する集光光学系を構築することが可能となっている。本稿では、ミラー光学素子の開発とその応用に関する現状と将来展望を述べる。

1. はじめに

ミラーは、可視領域のレーザーから放射光に至るまで様々な光学系に用いられている。特にレーザーを用いた可視領域における光学の研究は現在盛んであるが、その光学システムには何枚ものミラーが配置されている。光学システムを構築する時、ミラーの精度を気にすることはあまりない。例えば、顕微鏡の空間分解能などの性能は、ミラーなどの光学素子の作製精度で決まるわけではなく、設計段階で決定される。これは、現在量産可能な加工技術により、ミラーにおいて、少なくとも数10 nm (P-V (peak-to-valley 最高点と最小点の差)) レベル以上の表面粗さや形状精度が達成されており、数100 nm の光の波長と比べると十分に小さいためである。すなわち、数10 nm 程度の表面粗さや形状誤差があっても光の波面は乱れず、位相もほとんど変化もしないので、光の強度は変化しない。皆さんが毎日使用している一般的な鏡でさえも、顔がゆがんだり曇ったりしないということは、数10 nm レベルで表面が平坦化されているからである。可視光の領域では、一部の非球面鏡を除いて理想的なミラーが利用可能であることを意味する。

X 線領域でも考えは同じであるが、波長が極めて短いために、本来であれば途方もない精度が要求される。しかし、少し前までは、X 線の波面が反射することで歪むということをあまり気にしなくてもよかった。なぜなら、入射する X 線そのものが質の高いものではなく、直進性や可干渉性が乏しかったためである。ミラーの性能を気にすることより、光の性能を向上させることの方が重要であるためである。

しかしながら、近年の第3世代の放射光施設などで発生する X 線は、直進性、可干渉性に優れており、分光器などの性能も良くなった結果、ミラーの性能が実験ハッチ

で利用する X 線の質を決定する要因のひとつとなった。そのため、ビームライン前段に設置される高調波カット用の平面ミラーにおいても、入射 X 線を乱す悪者となり、理想的な X 線ミラーの実現が期待されていた。X 線ミラーは、超精密加工の教科書にも極限の精度が必要な対象物であると紹介されており、なぜ超精密加工技術の研究が必要か? との問いの答えの一つであった。しかしながら、枕言葉のようであり、具体的にどのような精度が X 線ミラーに必要なかは、誰も理解していなかった。

超精密加工の分野において、2000年前後は、研究レベルにおいて達成される加工精度が一桁 nm の領域に突入した時代であった。1990年代から切削、研削などの従来の機械加工技術に加えて、化学反応をベースとしたナノ精度加工技術の開発が進み、当時の最新の研究において、比較的大きな加工物であっても、形状誤差、表面粗さともに RMS : 0.2 nm レベル (P-V にすると約 2 nm 前後である)^{1,2)}が報告されてきた。我々、大阪大学でも、極限の表面平滑性と形状精度の実現を目標に精力的に研究開発を進めており、独自に開発した EEM (Elastic Emission Machining)^{1,3,4)}や PCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining)^{5,6)}などの超精密加工法が完成の域に達しようとしていた。

こうした背景の下、2001年より具体的に高性能な放射光用 X 線ミラーの開発をテーマに SPring-8 と大阪大学の共同研究がスタートした。特に、硬 X 線の領域におけるミラー開発を推進した。本稿では、これまでの X 線ミラーに関する研究の経過について説明し、最新の研究開発状況、今後の展望に関して報告する。

2. X 線ミラーに求められる必要精度

理想的な硬 X 線の性質を損なわないように反射させる

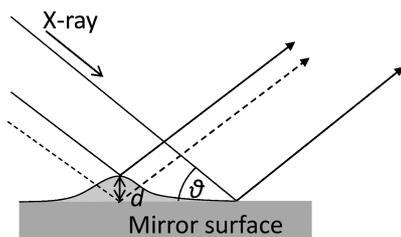


Fig. 1 Phase error originated from the height error of mirror surface.

ためにはどうすればよいか? という疑問に対して、1990年代から多くの研究者により議論されてきた⁷⁾。もっともシンプルな答えは、波面を乱さなければよいので、

$$\phi = 2d \sin(\theta) / \lambda \quad (1)$$

の値が十分に小さければよい。Fig. 1における d は高さ誤差、 θ はX線の入射角度、 λ は波長、 ϕ はこの式により発生する位相差である。 d に直すと

$$d = \phi \times \lambda / (2 \sin(\theta)) \quad (2)$$

となるので、例えば硬X線の波長を0.08 nm、入射角度を2 mrad、 ϕ を0.2とすると、 d は4 nmとなる。このように、波長は0.1 nm以下であるが0.1 nmオーダの形状精度が必要であるわけではなく、硬X線の場合はミラー面と入射X線のなす角度が1 mrad~10 mrad程度の斜入射光学系のため、入射するX線の波面を乱さないための必要精度は数nmオーダとなる。

Fig. 2(a)は2001年の2月に初めて得られた15 keVの硬X線のミラーによる反射強度分布である。研究開始から現在に至るまで、ほぼ完全な空間コヒーレンスの硬X線を利用可能なSPring-8 1 km長尺ビームライン(BL29XUL)^{8,9)}にて作製したX線ミラーの評価を行っている。この時は、何も知らず、我々が作ることができる最高のミラーを準備したつもりであった。しかしながら、この写真のように反射強度像の非常にムラがあった。この原因は、実験の後、すぐに明らかになり、作製した平面ミラーの表面上に空間波長0.5 mm~数mmの周期で2~3 nmの凹凸が存在したためであった。この結果を受け、ミラー作製技術の向上に努め、特に、形状計測において顕微干涉計を用いるMicrostiching Interferometry (MSI)¹⁰⁾を開発することで、強度ムラの原因となった凹凸を完全に除去することが可能となり、Fig. 2(b)の均一な強度分布を得ることに成功した。この時、同時にミラーによる反射光学系における波動光学シミュレータを開発し^{11,12)}、その結果、任意のミラーの形状、光源サイズや光源とミラー間距離、焦点距離などの条件の下で得られる反射像の強度プロファイルや位相分布を計算することが可能になった。この

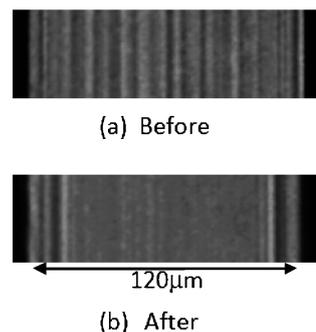


Fig. 2 Intensity distribution images of X-ray reflected on fabricated flat mirror surfaces before and after mirror fabrication system improvement. Fig. 1(a) is the first data, using the firstly fabricated X-ray mirror. Fig. 1(b) is the image obtained by using X-ray mirror not having high frequency figure errors around 1mm wavelength range.

波動光学シミュレータのおかげで、SPring-8で評価することなく結果を予測することができ、後述するX線集光ミラーの光学設計、必要な形状精度やアライメント精度などを事前に調べることが可能になり、その知見をもとに、ミラーの加工技術、計測技術だけでなく、ミラーマニピュレータの開発も行うことができた。

3. X線ミラーの作製とナノビーム応用

3.1 硬X線 Sub-100 nm レベル集光

2001年当時、X線光学素子の中で集光光学素子が注目を集め始めていた。ゾーンプレートや屈折レンズ、曲げミラーなどの開発が進み、1 μmを切る集光サイズが報告されていた。SPring-8と大阪大学においても、今日に至るX線集光ミラーの開発を開始した。各種の集光光学素子の特徴に関する比較、説明は他に譲るとして、X線集光ミラーの他に対する特徴は、色収差がない(全反射ミラーの場合)、開口が大きい、焦点距離を比較的長く設定できる特徴がある。X線集光ミラーの形状は、一つの焦点が光源であり、もう一つが集光点である楕円の一部分のプロファイルとなる。そして、Kirkpatrick Baez (K-B)配置と呼ばれる2枚の1次元集光ミラーを垂直に配置させ、垂直方向、水平方向を別々に集光することで、2次元集光が可能となる¹³⁾。作製の観点で言えば、球面や平面は比較的容易に作製可能であるが、非球面となると格段に難しくなるためこのような楕円形状ミラーに関しては、サブμm程度の精度しか得られていなかった¹⁴⁾。また、ミラーのアライメントにおいては設計の楕円プロファイルに合わせて、集光ミラーの姿勢を調整する必要があるため、焦点距離や入射角度の調整が極めて難しいと考えられていた。しかしながら、ミラー作製やアライメントにおけるデメリットは理論的な短所ではなく、「難しい」というだけで、それが「簡単」になれば他の集光光学素子にない、集

光ミラーの長所が大きく生きてくるわけである。

X線集光ミラーの設計を行う上では、前述のシミュレータが重要な役割を果たした。平面ミラーにおいて、強度ムラを発生させる要因をシミュレーションから突き止めたように、理想的な集光径である回折限界集光を得るためには、どの程度形状精度が必要であるかを波動光学シミュレータにより前もって調べることが可能であった。それにより得られた必要精度を満たすための楕円形状の評価測定が、既存のフィゾー干渉計により可能であることがわかった。フィゾー干渉計により測定されたデータと顕微干渉計のスティッチングにより得られた形状データを組み合わせることで、全体形状から細かな形状までをナノメートル精度で測定可能なシステムを構築した¹⁰⁾。このシステムとEEMやPCVMを組み合わせることで高精度な集光ミラーの作製が可能となった。2回のX線集光ミラーの評価を行い、世界で初めて集光ミラーを用いて理想的な回折限界で決定される集光径を確認した^{15,16)}。この時、ミラーのアライメントに関しては入射角度と焦点距離が存在するが、シミュレーションにより焦点距離は、1~2 mm オーダの狂いがあっても、入射角度を μrad オーダで調整することにより焦点距離の狂いを補完でき、ほぼ理想的な集光径が得られることを突き止めており、実際にSPring-8で、入射角度調整のみで理想的な集光径を得られた。この時の集光ミラーの集光径は、15 keVの硬X線で180 nm、焦点距離は300 mmであった。また、ミラーの素材はシリコンであり、入射角度を1.4 mradとし、ミラーの長さは100 mm、開口の縦方向の長さは約140 μm 程度であった。

さらに、2次元集光のために、回折限界集光サイズが90 nmの集光ミラーを作製した。光線追跡法を用いて理想的な2次元集光を実現するためのミラー面内回転や垂直度などのアライメント精度を調べた。その許容精度を実現することが可能なミラーマニピュレータの作製を行い、理想的な180 nm \times 90 nmサイズの2次元集光を確認した^{17,18)}。

3.2 硬X線30 nm レベル集光

集光径をより小さくするためには、集光光学系のNA (Numerical Aperture) を大きくする必要があり、X線ミラーの入射角度を大きくしなければならない。表面に白金などの重金属をコーティングすることで、大きな入射角度で硬X線を反射させることが可能となる。入射角度増大に伴って、ミラーに求められる必要精度は式(2)における θ の値が大きくなるために高くなる。更に、形状を決定する楕円プロファイルの短軸が長くなり、ミラーの形状プロファイルは急峻に変化するプロファイルとなる。この形状プロファイルを計測する方法は、フィゾー干渉計による一括計測では不可能である。そこで、より急峻な形状プロファイルを測定する方法として、傾斜角度決定型スティッチング法 (RADSI: Relative Angle Determinable Stitching Interferometry) を開発した¹⁹⁾。通常のスティッチングに

よる形状計測は、開口の大きさよりも大きな表面の形状のプロファイルを測定するために、意図的に測定領域を重ねて測定する。そして、重複して測定された計測領域を用いてその誤差が小さくなるように各形状データをつなげるため、測定データそのものに誤差が存在するとつなぎ合わせる時に避けられない誤差が発生し、つなぎ合わせ誤差は全体の形状に影響する。RADSIでは、個々に測定された形状データの取得時においてミラーの傾き角度を高精度に測定することで、つなぎ合わせの精度を飛躍的に向上させている。

本方法を用いてX線集光ミラーを作製し、15 keVにおいて40 nmサイズの硬X線の集光を実現し、最終的には、全反射ミラーで実用的な限界の25 nmサイズの硬X線1次元集光を実現した^{20,21)}。また、集光点、集光点近傍の強度プロファイルを正確に評価し、理想値に対して80%程度の集光効率を確認した。30 nmレベルの2次元集光を実現するためには、ミラーのアライメントにおいてSub-100 nm集光よりも高い精度が求められる。そこで新しく開発したマニピュレータでは、二枚のミラーの垂直度をオートコリメータにより調整可能とし、40 μrad レベルの精度で調整を可能とした²²⁾。その結果、30 nmレベルの15 keVのX線の2次元集光を確認した^{22,23)}。

3.3 硬X線ナノビームの蛍光X線分析への応用

何かの要素技術を開発する時、その最終形態を思い描きながら進めるのと進めないのでは大きな差がある。当然ながら、X線の集光には目的がある。例えば、硬X線ナノプローブを利用した走査型顕微鏡の分解能の向上や強度密度向上による感度向上などが挙げられる。これらの応用研究とX線集光の技術開発を同時に行うことで、新たな設計方針が現れる。例えば、応用を考えた場合は、ワークディスタンスの必要性や集光径、硬X線プローブのポジションの安定性などが重要となってくる。また、ミラーが存在するためにサンプル周りの配置においても工夫が必要になり、研究開発の要素を含む。そこで、大阪大学とSPring-8では硬X線ナノビームの応用として、走査型の蛍光X線分析法の開発を進めた。特に、生体細胞を対象とした蛍光X線顕微鏡の開発を進めた。開発したシステムには、サンプルの後ろ側に1 μm 分解能の微分干渉顕微鏡を設置しサンプルの位置合わせを簡便にした。また、ディテクターにSDDを採用し、弾性散乱の影響を極力抑えるために光軸方向に対して垂直に設置した。得られたスペクトルはマルチチャンネルアナライザーにより、各元素に相当するX線のシグナルに変換され同時に多元素の情報を得られるシステムとした。Fig. 3に、マウス細胞内の細胞骨格であるチューブリンを観察した結果を示す。ここでは、細胞骨格を明瞭に観察するために細胞骨格をCdSe/ZnSのナノ微粒子で修飾している。拡大イメージでは、100 nm以下の幅でチューブリンが観察されている²⁴⁾。また、

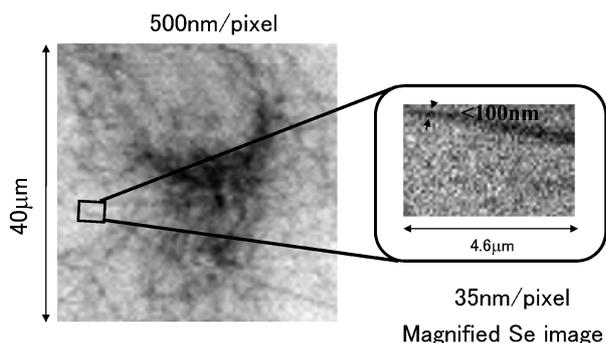


Fig. 3 The Se distribution images of a mouse cell. Mouse cell tubulin was stained with nanocrystals of CdSe/ZnS to be imaged clearly by X-ray fluorescence microscopes.

このシステムは、抗がん剤のがん細胞への作用の解明に関する研究にも使用された²⁵⁾。現在、実際の生きた状態に近い生体細胞の元素状態の観察を可能にするために、細胞を急速冷凍させ観察するクライオ走査型蛍光 X 線顕微鏡の開発も行っており、将来生体細胞内部の分析に役に立つと考えている²⁶⁾。

この応用研究では、システムや実験ハッチの恒温化を実施し 0.1°C 以上の環境温度のばらつきを抑えることで位置、サイズともに安定した集光 X 線を提供することが可能となった。

3.4 硬 X 線 Sub-10 nm 集光

全反射ミラーにより 25 nm の 1 次元集光を達成した頃、屈折レンズや多層膜ラウエレンズなどの各集光光学素子において理論的にどこまで X 線を集光できるかという議論が活発になってきた。その中でも、多層膜ラウエレンズは理論的には 1 nm を切る集光径が理論的に予測された²⁷⁾。全反射ミラーでは、全反射条件の限界から理論的に 10 nm レベルが限界であり、ワークディスタンスなどの実用を考えると 20 nm 程度が設計上の限界値であった。ミラーにより硬 X 線の微小集光を実現するためには、横方向に対して、膜厚が変わるグレーデッド (Graded) 多層膜をミラーに施すことで、各反射位置でのブラッグ条件を満たし、入射角度を増大させることで集光における開口を大きくすることができ、10 nm を下回る集光径が実現できる²⁸⁾。多層膜ミラーを用いると最大入射角度を 10 mrad 以上にまで大きくすることができるが、式(2)から、求められる表面形状精度は 1 nm レベルとなる。これまでの全反射ミラーでは、ミラーの作製精度が理想的な X 線の集光に求められる精度を十分に上回っていたため、すべての作製したミラーにおいて理想的な回折限界集光を実現することができた。しかしながら、1 nm という目標精度は極めて高く、更にミラー表面の多層膜の膜厚ムラによる位相変化も存在する可能性があり、それまでのように、前もって作製したミラーが理想的な性能を持つことを保証すること

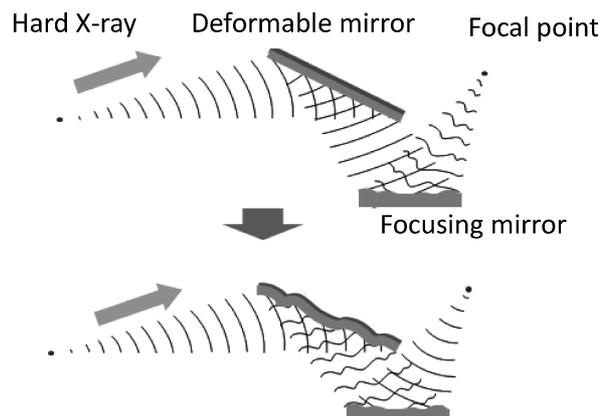


Fig. 4 Concept of sub-10 nm hard X-ray focusing system. The phase error originated from the figure error or thickness error of the multilayer is compensated by the deformable mirror placed upstream of the focusing mirror.

ができない。

そこで、この問題を解決するために、**Fig. 4** に示す波面計測、波面制御による硬 X 線集光光学系を提案した。この光学系では、集光点近傍で計測された強度プロファイル情報から位相回復法により、集光ミラーに起因する波面誤差を求める。その結果をもとに、この誤差を補正するように前段に設置した平面ミラーの形状プロファイルを変化させ、理想集光を得ようとするものである。ここでポイントとなるのは、前段に設置した平面ミラーの X 線の入射角度を小さくすることである。式(2)からわかるように、形状の凹凸の d に対して、 ϕ の値が鈍感になるために、平面ミラーの変形誤差の影響が小さくなる。例えば、15 keV の X 線を用いて、1.0 mrad の入射角度にすると 4 nm 程度の精度で形状プロファイルを変化させれば、 $\lambda/10$ という高精度で X 線の波面プロファイルの制御を行うことができる。この構想を実現するためには、グレーデッド多層膜ミラー形成装置、急峻プロファイル形状のミラーに対応した形状計測装置、集光強度プロファイルからの波面誤差決定方法、Sub-10 nm 集光ビーム測定法、高精度波面補正ミラー、高精度ミラーマニピュレータを開発する必要があった。この中でも、波面誤差決定法や高精度ビームプロファイル計測の開発は、前述した Sub-30 nm の集光ミラーを用いて実施した。集光ビームの強度分布から位相誤差の算出を可能にする位相回復プログラムには、ロチェスターの Fienup らが開発した Angular Spectral Method と位相回復法を組み合わせた方法を採用した²⁹⁾。また、ビームプロファイル計測法では、SPring-8 の鈴木らが提案した方法を採用している³⁰⁾。この方法では、急峻なエッジを持つ物体を集光点に挿入した時に発生する暗視野領域における回折・散乱 X 線を測定することで、従来のワイヤスキャン法で必要な微分プロセスを必要せずにプロファイルの強度分布の計測が可能となる。本研究では、これを応用し分解能をさらに高めるために、上端がナノメートルレベル

で平坦で、X線の位相が半位相回転するような位相物体を作製し、2~3 nmの分解能を持つ高精度なビームプロファイル計測法を実現した。これらの開発の結果、30 nmサイズの硬X線ナノビームにおいて、測定された集光ビームプロファイルからミラーの形状誤差に起因する波面誤差を決定することができた^{31,32)}。

Sub-10 nm集光用のミラーの形状プロファイルはより急峻な形状となるために、新たに顕微干渉型 RADSII を開発し³³⁾、1 nmの再現性でミラー基板形状の計測法を確立した。また、グレーデット多層膜コーティングを行うために2台のマグネトロンスパッタガンと精密な速度制御が可能なステージを使用した成膜装置を開発した。そして、30 nm集光用のミラーに対して、追加成膜による形状修正を施し、サテライトピークも含めて理想的な硬X線ナノビームの形成を確認し、サブ1 nmの精度で膜厚の厚みの制御が可能であることを示した³⁴⁾。そして、作製した多層膜ミラーを用いて、20 keVの硬X線の15 nmサイズの集光を確認した³⁵⁾。これらの研究と同時に、フィゾー干渉計で1 nmの精度で形状プロファイルを制御可能な波面補正ミラーを完成させ、Fig. 4に示す光学システムをSPring-8 1 km長尺ビームラインの長尺ハッチに構築した^{35,36)}。硬X線のSub-10 nm集光を実現するためには、入射角度を1 μ rad以上、焦点距離を3 μ m程度で合わす必要があるために、集光システムには光学顕微鏡を取り付け、ミラーの面内回転、焦点距離、垂直度をこれまでよりも一桁高い精度で調整可能なアライメントシステムを構築した。一連のシステムを完成させ硬X線Sub-10 nm集光に挑戦した。波面補正ミラーを反射したX線を多層膜ミラーにより集光したX線の焦点近傍において、複数のプロファイルを正確に測定した。その場で位相回復法により波面誤差を決定し、それを補正するように波面補正ミラー

の形状を変化させ再度集光プロファイルを評価した。その結果、Fig. 5に示す半値幅が7 nmの硬X線のライン集光を実現した³⁶⁾。現在、同システムを用いて2枚のミラーによる2次元集光、2次元波面補正システムの構築を進めている。なお、全反射ミラーによるX線集光サイズの限界は、7 nmであることが1948年にKirkpatrickとBaezの論文に、記載されており¹³⁾、約60年経ち、多層膜ミラーであるがこの値が達成されたことになる。

4. 将来展望

大阪大学で開発されたX線ミラーの作製方法は、企業への技術移転を終え、開発した高精度のX線ミラーは、誰もが入手可能となっている。特に、SPring-8にはすでに多数の集光システムが各ビームラインにインストールされており、設計値どおりの理想的な集光ビームが得られている。また、SPring-8との共同研究により、400 mmの長さを持つX線集光ミラーも作製可能であり、SPring-8の硬X線ビームラインにおいて、通常の実験ハッチであればすべてのX線を受け止め、集めることができる集光ミラーが実現している³⁷⁻³⁹⁾。また、この長尺ミラーは現在建設が進むX線自由電子レーザーの集光に使用される予定である。今後、ミラーにより実現された硬X線ナノビームの各種のX線分析法への応用が進むと思われる。

我々は一貫してX線ミラーの作製技術、形状計測技術、X線ナノビーム評価技術、KB集光マニピュレータ、X線反射光学系における波動光学、光線追跡、位相回復シミュレーションプログラムを開発しており、今まで培った要素技術をベースに、更に様々な研究を進めている。現在、進めているテーマとしては、1. 硬X線の1 nmレベル集光、2. X線自由電子レーザー用集光システムの開発³⁹⁾、3. 双曲面ミラーと楕円ミラーを組み合わせたX線結像光学系の構築 などである。3番目は、アッペの正弦条件を満たすことで、色収差のない全反射ミラーによる結像光学系の構築が可能であり、イメージングへの応用が期待される。さらに、本特集でも紹介されている、集光光学系とX線回折顕微鏡の組み合わせにより、シングルナノメートルの分解能で電子密度分布の観察ができており⁴⁰⁾、様々な応用が同時並行に進んでいる。

これまでの一連の研究におけるミラーの評価は、SPring-8の1 km長尺ビームラインを使用している。このビームラインの長尺ハッチでは、ミラー全面にわたって均一な強度をもつX線を照射でき、更に、ミラー照射領域において、完全な空間コヒーレンスを有しているため、波動光学に基づいたシミュレーションや波面計測や波面補正を行うことができた。これまでの実験において、理論計算の予測どおりの実験結果を得ることができたのは、入射X線が優れていたためである。現在、建設が進むX線自由電子レーザーは完全に理想的なコヒーレンスを持つ光の

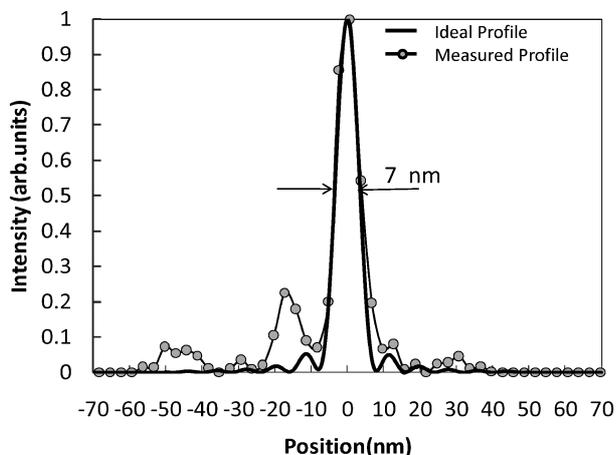


Fig. 5 Intensity distribution profile of the hard X-ray focused beam. X-ray energy is 20 keV. The ideal focused beam size is 7 nm. After wavefront correction, the nearly diffraction limited focusing was realized.

利用が可能になるばかりか、将来、ERL計画やSPRING-8-II計画で検討されている次世代リング型光源においても、空間コヒーレンスに優れたX線が、多くのビームラインでも可能になるので硬X線ナノビーム利用が一層進むと期待している。可視領域の光学が発展し多くの成果が得られたように、十分な強度と理想的なコヒーレンスを持つX線と理想的な集光光学素子の組み合わせにより、X線領域においても、予想もつかないようなアプリケーションや光学システムが実現されると考えている。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 特別推進研究、若手研究B、X線自由電子レーザー利用推進研究、科学技術振興機構さきがけ、文部科学省グローバルCOEの支援の下、行われた。また、X線ミラーの評価およびX線集光の実験はSPRING-8のBL29XULにおいて実施された。

本研究は、大阪大学の山内和人氏、佐野泰久氏、山村和也氏、斎藤彰氏、高橋幸生氏、半田宗一郎氏、木村隆志氏、山川大輔氏、藤井正輝氏、脇岡敏行氏、木谷直隆氏、横山光氏、今井将太氏、および理化学研究所播磨研究所の石川哲也氏、西野吉則氏、玉作賢治氏、矢橋牧名氏、高輝度光科学研究センターの大橋治彦氏、湯本博勝氏との共同研究である。また、大阪大学の多くの卒業生、国内、海外の多くの共同研究者の方の協力により実施された。

参考文献

- 1) K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki and Y. Mori: Figuring with sub-nanometer-level accuracy by numerically controlled elastic emission machining, *Review of Scientific Instruments* 73(11), 4028-4033 (2002).
- 2) A. Schindler, T. Haensel, D. Flamm, A. Nickel, H.-J. Thomas and F. Bigl: Nanometer Precision (Reactive) Ion Beam Figuring of (Aspherical) Optical Surfaces', in Proc of the 9th International Conference on Production Engineering, Y. Furukawa, Y. Mori, T. Kataoka, eds., (Japanese Society of Precision Engineering Publ. Series No. 3 Tokyo 1999), pp. 243-248.
- 3) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: Elastic Emission Machining, *Precision Engineering* 9(3), 123-128 (1987).
- 4) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Endo, T. Ide, H. Toyama, K. Nishizawa and M. Hasegawa: Evaluation of elastic emission machined surfaces by scanning tunneling microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. A* 8(1), 621-624 (1990).
- 5) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura and Y. Sano: Development of plasma chemical vaporization machining, *Rev. Sci. Instrum.* 71(12), 4627-4632 (2000).
- 6) K. Yamamura, Y. Sano, M. Shibahara, K. Yamauchi, H. Mimura, K. Endo and Y. Mori: Ultraprecision Machining Utilizing Numerically Controlled Scanning of Localized Atmospheric Pressure Plasma, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 45, No. 10B, 8270-8276 (2006).
- 7) A. Gibaud and S. Hazra: X-ray reflectivity and diffuse scattering, *Current Science* 78(12), 1467-1477 (2000).
- 8) K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki, N. Kawamura, M. Suzuki and T. Ishikawa: SPRING-8 RIKEN beamline III for coherent X-ray optics, *Nucl. Instr. and Meth. A* 467-468, 686-689 (2001).
- 9) T. Ishikawa, K. Tamasaku, M. Yabashi, S. Goto, Y. Tanaka, H. Yamazaki, K. Takeshita, H. Kimura, H. Ohashi, T. Matsushita and T. Ohata: One kilometer beamline at SPRING-8, *Proc. SPIE* 4145, 1-10 (2000).
- 10) 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: Microstitching interferometry for x-ray reflective optics, *Review of Scientific Instruments* 74(5), 2894-2898 (2003).
- 11) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, A. Saito, H. Kishimoto, Y. Sekito, M. Kanaoka, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: Development of plasma chemical vaporization machining and elastic emission machining systems for coherent hard x-ray optics, *Proc. SPIE* 4501, 30-42 (2001).
- 12) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, A. Souvorov, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and Y. Mori: Wave-optical evaluation of interference fringes and wavefront phase in hard X-ray beam totally reflected by mirror optics, *Appl. Opt.* 44, 6927-6932 (2005).
- 13) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: Formation of Optical Images by X-rays, *J. Opt. Soc. Am.* 38, 766 (1948).
- 14) G. E. Ice, J. S. Chung, J. Z. Tischler, A. Lunt and L. Assoufid: Elliptical x-ray microprobe mirrors by differential deposition, *Rev. Sci. Instrum.* 71(7), 2635-2639 (2000).
- 15) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: Nearly diffraction-limited line focusing of hard X-ray beam with elliptically figured mirror, *Journal of Synchrotron Radiation* 9, 313-316 (2002).
- 16) K. Yamamura, K. Yamauchi, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: Fabrication of elliptical mirror at nanometer-level accuracy for hard x-ray focusing by numerically controlled plasma chemical vaporization machining, *Rev. Sci. Instrum.* 74(10) 4549-4553 (2003).
- 17) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: Two-dimensional Submicron Focusing of Hard X-rays by Two Elliptical Mirrors Fabricated by Plasma Chemical Vaporization Machining and Elastic Emission Machining, *Jpn. J. Appl. Phys.* 42 pp. 7129-7134 (2003).
- 18) S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, K. Yamamura, Y. Sano, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Diffraction-limited two-dimensional hard-X-rays focusing in 100nm level using K-B mirror arrangement, *Rev. Sci. Instrum.* 76, 083114 (2005).
- 19) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Relative angle determinable stitching interferometry for hard X-ray reflective optics, *Rev. Sci. Instrum.* 76, 045102 (2005).
- 20) 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: Fabrication of elliptically figured mirror for focusing hard X-rays to size less than 50 nm, *Rev. Sci. Instrum.* 76, 063708 (2005).
- 21) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Efficient focusing of hard x-

- rays to 25 nm by a total reflection mirror, *Appl. Phys. Lett.* 90, 051903 (2007).
- 22) S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, Y. Sano, K. Yamamura, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Development of scanning X-ray fluorescence microscope with spatial resolution of 30 nm using K-B mirrors optics, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 103102 (2006).
- 23) 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: Hard X-ray Diffraction-Limited Nanofocusing with Kirkpatrick-Baez Mirrors, *Japanese Journal of Applied Physics Part 2* 44(18), L539-L542 (2005).
- 24) S. Matsuyama, M. Shimura, H. Mimura, M. Fujii, H. Yumoto, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Trace element mapping of a single cell using a hard x-ray nanobeam focused by a Kirkpatrick-Baez mirror system, *X-ray Spectrometry* 38, 89-94 (2009).
- 25) M. Shimura, A. Saito, S. Matsuyama, T. Sakuma, Y. Terui, K. Ueno, H. Yumoto, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, M. Yabashi, K. Tamasaku, K. Nishio, Y. Nishino, K. Endo, K. Hatake, Y. Mori, Y. Ishizaka and T. Ishikawa: Element Array by Scanning X-ray Fluorescence Microscopy after Cis-Diamminedichloro-Platinum (II) Treatment, *Cancer Research* 65(12), 4998-5002 (2005).
- 26) S. Matsuyama, M. Shimura, M. Fujii, K. Maeshima, H. Yumoto, H. Mimura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, Y. Ishizaka, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Elemental mapping of frozen hydrated cells with cryo-scanning X-ray fluorescence microscopy, *X-ray Spectrometry in press* (2010).
- 27) H. C. Kang, J. Maser, G. B. Stephenson, C. Liu, R. Conley, A. T. Macrander and S. Vogt: Nanometer Linear Focusing of Hard X-rays by a Multilayer Laue Lens, *Phys. Rev. Lett* 96, 127401 (2006).
- 28) O. Hignette, P. Cloetens, G. Rostaing, P. Bernard and C. Morawe: Efficient sub 100 nm focusing of hard x rays, *Rev. Sci. Instrum.* 76, 063709 (2005).
- 29) G. R. Brady and J. R. Fienup: Nonlinear optimization algorithm for retrieving the full complex pupil function, *Optical Express*, 14(2), 474-486 (2006).
- 30) Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano and H. Takenaka: Performance Test of Fresnel Zone Plate with 50 nm Outermost Zone Width in Hard X-ray Region, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1* 44, 1994 (2005).
- 31) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, S. Handa, T. Kimura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Direct Determination of the Wave Field of an X-ray Nanobeam, *Phy. Rev. A*, 77 015812 (2008).
- 32) H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, S. Handa, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: At-wavelength figure metrology of hard x-ray focusing mirrors, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 063712 (2006).
- 33) H. Yumoto, H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, S. Matsuyama, Y. Sano, H. Ohashi, K. Yamauchi and T. Ishikawa: Stitching-angle measurable microscopic interferometer: Surface-figure metrology tool for hard X-ray nanofocusing mirrors with large curvature, *Nucl. Instr. and Meth. A*, On-line published (2010).
- 34) S. Handa, H. Mimura, H. Yumoto, T. Kimura, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Novel Scheme of Figure-Error Correction for X-ray Nanofocusing Mirror, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 096507 (2009).
- 35) T. Kimura, S. Handa, H. Mimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Inagaki, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Wavefront Control System for Phase Compensation in Hard X-ray Optics, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 072503 (2009).
- 36) H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Breaking the 10 nanometer barrier in hard X-ray focusing, *Nature Physics* 6, 122-125 (2010).
- 37) H. Ohashi, T. Tsumura, H. Okada, H. Mimura, T. Masunaga, Y. Senba, S. Goto, K. Yamauchi and T. Ishikawa: Microstitching interferometer and relative angle determinable stitching interferometer for half-meter-long x-ray mirror, *Proc. SPIE* 6704, 670405 (2007).
- 38) T. Kimura, H. Ohashi, H. Mimura, D. Yamakawa, H. Yumoto, S. Matsuyama, N. Tsumura, H. Okada, T. Masunaga, Y. Senba, S. Goto, T. Ishikawa and K. Yamauchi: A Stitching Figure Profiler of Large X-ray Mirrors Using RADSI for Subaperture Data Acquisition, *Nucl. Instr. and Meth. A*, On-line published (2010).
- 39) 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: Focusing mirror for x-ray free-electron lasers, *Rev. Sci. Instrum.* 79, 083104 (2008).
- 40) Y. Takahashi, Y. Nishino, R. Tsutsumi, H. Kubo, H. Furukawa, H. Mimura, S. Matsuyama, N. Zettsu, E. Matsumura, T. Ishikawa and K. Yamauchi: High-Resolution Diffraction Microscopy Using the Plane-Wave Field of a Nearly Diffraction-Limited Focusing X ray, *Phys. Rev. B* 80, 054103 (2009).

● 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)。



松山智至

所属: 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: matsuyama@prec.eng.osaka-u.ac.jp

専門: 超精密加工, X線顕微鏡

【略歴】

2007年大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻博士課程修了, 工学博士。2007年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。2007年3月より現職。

Current status of the development and application of ultraprecise hard X-ray mirrors and a perspective

Hidekazu MIMURA

Department of Precision Science & Technology Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamadaoka Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Satoshi MATSUYAMA

Department of Precision Science & Technology Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamadaoka Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Abstract The performance of hard X-ray mirror optics has been rapidly progressed, which enable us to use the diffraction limited focused beam with a size less than 100 nm. In this review, the development history and a perspective on it are presented.