

全反射ミラーを用いた色収差のない結像型硬 X 線顕微鏡の開発

松山智至

大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

要旨

結像型 X 線顕微鏡は、X 線の持つ高い分析能力や透過力を最大限活用できる顕微鏡である。また、X 線の持つその短い波長ゆえに、100 nm 以下の空間分解能でナノ構造を観察できるポテンシャルを有する。一方で、これまでの X 線顕微鏡開発では、色収差のない顕微鏡の開発はほとんどなされていないというのが現状であった。そこで本研究では、4 枚の全反射ミラー（楕円ミラー、双曲ミラー）を組み合わせて、色収差のない結像光学系（Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー光学系）を開発した。SPring-8 BL29XUL にて、縮小結像と拡大結像のセットアップを構築し、その性能を評価した。縮小結像実験では、点広がり関数を直接観察し、開発した光学系がサブ 50 nm の分解能を有していることを確認した。また、拡大結像実験でテストパターンの透過像を拡大結像し、約 200 nm まで解像できていることを確認した。

1. はじめに

普通（可視）の顕微鏡を覗くと色とりどりのミクロの世界を観察することができる。このような感動は通常は気づかないかもしれない。なぜなら、この“色とりどり”の世界を作り出すことは難しいにもかかわらず、いとも簡単に見えてしまうからである。通常の屈折レンズを例に挙げると、波長によって屈折率が異なるので、波長によって焦点距離が変化し、これが収差（色収差）となるはずである。色収差のない結像を実現できた所以は、分散の異なるガラスで作られたレンズを複数枚組み合わせた色消しレンズのおかげであり、これによって波長の異なる光であっても一様に同じ場所に像を作ることができるようになった。このように、当然とも思える色収差のない観察は先人の研究の賜物であり、そこには多くの苦勞があったものと容易に推測できる。

一方で、硬 X 線領域における色収差のない X 線顕微鏡の開発状況について考えてみることにする。例えば、フレネルゾーンプレートをベースにした顕微鏡では、約 50 nm 分解能（論文などでは 30 nm を切るものがすでに出始めている）^{1,2)}の顕微鏡が開発されている。また、その発展形である位相差顕微鏡や微分干渉顕微鏡によって自由自在な試料観察が可能となったことは特筆すべき進歩である。しかし、フレネルゾーンプレートを用いた結像は色収差、つまり、短波長ほど遠くに焦点を結ぶ特性があり、すべての X 線をフルカラーで結像することは難しい。もちろん、放射光施設では、モノクロメータによって単色化された X 線を用いる場合が多いのであるが、例えば、様々な事

情で非単色光しか使用できない（積極的に使用したい）場合や、そもそも発光している X 線を見たい場合には、当然色収差のない結像がふさわしい。可視光で実現した色消しレンズの原理を軟 X 線領域に適用した研究が Nature 誌で報告されている³⁾。本文献の場合、屈折レンズとゾーンプレートを用いている。課題は適用できるバンド幅であり、今のところ幅広く補正することは難しい。現在のところ、硬 X 線領域では、全反射現象を基とする結像ミラーが色収差の点、スループットの点で優れていると思われる。全反射現象は臨界角以下の斜入射角で起こり、基本的には波長依存性はない。ミラー光学系の中から、有名かつ有望である Wolter ミラー⁴⁾と Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー⁵⁾について説明しながら、色収差のない結像について考えてみることにする。

Wolter ミラー（様々なタイプがあるが通常はタイプ I）は 1952 年に Wolter によって提案された画期的な光学系である（Fig. 1(a, b)）。本ミラーは回転楕円面と回転双曲面によって構成されている。物点から発せられた光は 2 枚の曲面に反射されたのち像点に到達する。この時、楕円と双曲の幾何学的な性質により、どのような光路を選んだとしても光路長が一定で、かつ、1 点に集まる。つまり、よい集光素子として機能するわけである。さらに大事な点はわざわざ 2 回の反射をさせている点である。実際のところ集光だけであればいいのであれば、楕円ミラーだけでいいはずである（楕円ミラーもまた第一焦点から出た光はどのような光路をたどったとしても光路長一定でかつ一点に集まる）。この 2 回の反射は、コマ収差を補正するために重要な作業なのである。楕円ミラーのみの場合、光路によ

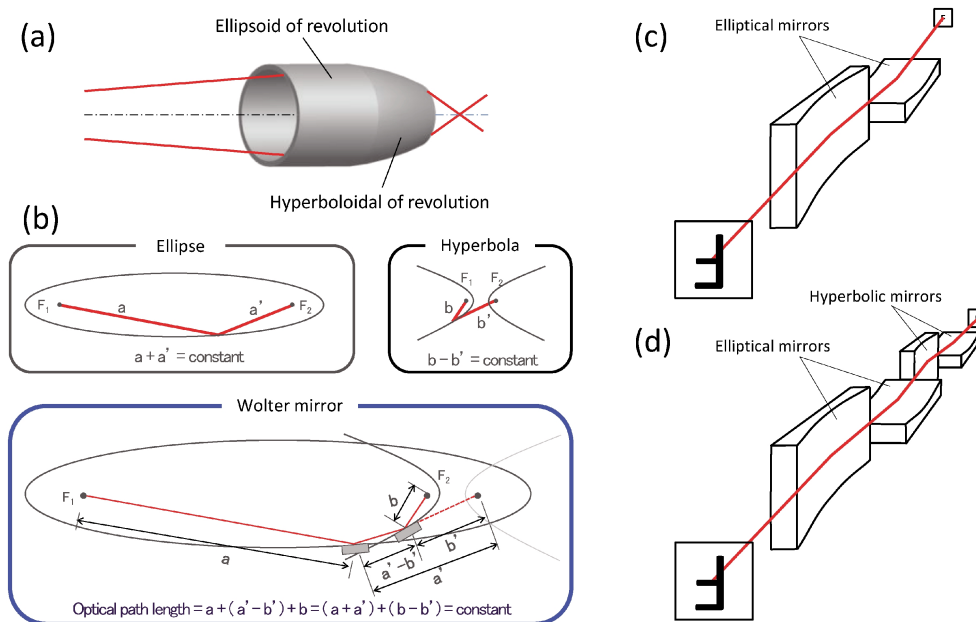


Fig. 1 (Color online) Schematics of (a) Wolter mirror, (c) Kirkpatrick-Baez mirror and (d) advanced Kirkpatrick-Baez mirror. (b) Geometric characteristics of an ellipse, a hyperbola and a Wolter mirror.

てミラー上の反射位置が変化⇒焦点距離が変化⇒像倍率が変化 となり、光軸上の1点を除いては明瞭な像を形成できない。2回反射を持つ Wolter ミラーでは、この像倍率の変化が2回の反射を経てキャンセルされるため、像倍率が一定となり視野の広い結像が行えるわけである。このように Wolter ミラーは理想的な結像素子（色収差・コマ収差がなく、大きな開口数を実現できる）であるが、一方でその有効反射領域は筒状形状の内壁であって、また、その形状は非球面である。許容される形状誤差は約1 nm と大変厳しい。特に硬 X 線領域では、その直径は数 mm 程度と、内壁を高精度に加工・計測するには狭すぎる。その作製は現在の超精密加工・計測の技術をもってしても作製困難であると言われている。一方で、KB ミラーは、2枚の楕円ミラーのみで構成されている (Fig. 1(c))。ミラー自体はほとんど平坦な形状であるため、現在の加工技術をもってすれば1 nm の精度で作製可能である⁶⁾。しかし、上述したように1次元に着目すると楕円ミラーの単独反射であるためコマ収差が発生し、集光用途にしか使えない。

このように Wolter ミラーと KB ミラーは長所・短所を持つことがわかる。これら長所をうまく利用したミラーシステムが大阪大学の児玉らによって提案された⁷⁾。このシステムは Advanced Kirkpatrick-Baez ミラーと呼ばれている。Fig. 1(d)に示すように、それぞれ楕円ミラーと双曲ミラーの対で構成されている。1次元で考えた場合、これは Wolter ミラーと同じシステムであるため、広い視野が確保できる。縦方向と横方向の結像を直交するミラーシステムで独立に制御する点は KB ミラーと同じであるため、比較的作製しやすい形状のミラーで構成できる。新たに生じ

た欠点を挙げるなら、ミラー枚数の増加とアライメントが煩雑になる点である。ミラー枚数の増加によって開発期間の長期化や反射率の低下が懸念されるが、ミラー作製プロセスがすでに確立されており、かつ、設計次第で反射率低下をほとんど無視できるものが実現できるため、それほど問題にならない。一方で、アライメントの問題は、準備期間の長期化や長時間安定性への懸念がすぐに思い浮かぶが、そもそも現実的な許容アライメント誤差でなければ、実際に使うという観点では実現不可能であるため、最も大きな懸案事項である（それがゆえに本光学系は提案されてからほとんど開発されてこなかった）。

筆者らの研究は、この Advanced KB ミラー光学系を使って、50 nm 以下の空間分解能を持つ色収差のない結像型顕微鏡を実証するものである。本研究のスタートは、2008年から始めた光学系の設計とシミュレータの開発からであった。特に、本光学系は4枚のミラーで構成されているため、許容されるアライメント誤差について研究当初より心配が大きかった。そのため、研究は、シミュレータの開発、ミラーの作製、アライメントシステムの開発、縮小結像テスト、拡大結像テストと段階を踏みながら進められた。

2. 光学系設計とシミュレータの開発

光学系設計の前提として、理研ビームラインである BL29XUL の2つの実験ハッチ間（現在の第一、第三ハッチ間）に相当する45 m の距離を利用することにした。50 nm の空間分解能を実現しようとした場合、少なくとも

Table 1 Designed mirror parameters

	M1	M2	M3	M4
Shape	Ellipse (for vertical imaging)	Ellipse (for horizontal imaging)	Hyperbola (for vertical imaging)	Hyperbola (for horizontal imaging)
a^* (m)	22.79	22.75	95.67×10^{-3}	58.46×10^{-3}
b^* (m)	14.26×10^{-3}	10.84×10^{-3}	0.8634×10^{-3}	0.5437×10^{-3}
Incident glancing angle (mrad)**	2.8	2.8	4.6	5.0
Distance from object (mm)**	385	215	115	65
Distance from image (m)**	45	45.17	45.27	45.32
Mirror length (mm)	200	130	60	30

* ellipse: $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$; hyperbola: $x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$

** At the center of the mirror

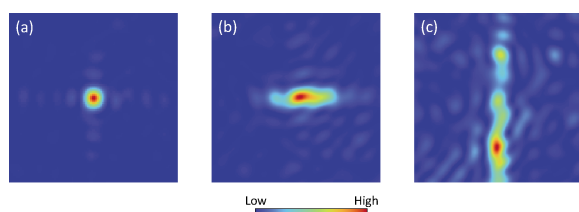


Fig. 2 (Color online) PSFs calculated at the (a) on-axis and (b) (c) off-axis conditions.

200倍の像倍率がほしいものである。この場合、像面上では、 $10 \mu\text{m}$ に相当し、ぎりぎり解像できるのではないかと考えた。また、ミラー作製上の都合で、曲率半径の小さなミラー形状は作製精度悪化の原因となるため、若干の余裕を持たせて設計せざるをえなかった。この結果、開口数 1.2×10^{-3} 、像倍率 385×210 (横×縦)、作動距離 50 mm 、最大 X 線エネルギー 11.5 keV (ミラーコーティングを白金としたため、L 吸収端を一応の限界と定めた) の光学系を設計した。ミラーパラメータの詳細を Table 1 に示す。本光学系におけるアライメント誤差を調べるために、回折限界近傍の性能を正しく評価できる波動光学シミュレータを開発した⁸⁾。本シミュレータの基幹部分はもともと、集光用楕円ミラーの許容形状誤差等を調べるために開発されたものである。Fresnel-Kirchhoff 回折積分に基づいており、波動の伝搬を計算することができる。Fig. 2 に計算した一例を示す。点光源を縮小結像した場合に得られる像の強度分布 (つまり、点広がり関数、PSF) を表している。(a)は視野中心に点光源を配置した場合、(b)、(c)は中心から 8 (水平方向)、 12 (垂直方向) μm それぞれ外側に配置した場合の計算結果である。このように、PSF は干渉作用が加味された強度分布を示し、回折限界近傍の波動場を正しく計算できていることを確認した (本シミュレーションが実際の実験結果を良く再現できることは 5 章で示す)。

本シミュレータを用いて、光学系にミスアライメントを付与した場合の PSF を計算した (Table 2, Fig. 3)⁸⁾。Table

Table 2 Summary of tolerance limits to alignment errors

	Tolerance limit
Grazing incident angle	$100 \mu\text{rad}$
Relative angle	$13 \mu\text{rad}$
Rolling	$40 \mu\text{rad}$
Yawing	$\sim 1 \text{ mrad}$
Relative length (1)	$2 \mu\text{m}$
Relative length (2)	$300 \mu\text{m}$
Focal length	$110 \mu\text{m}$

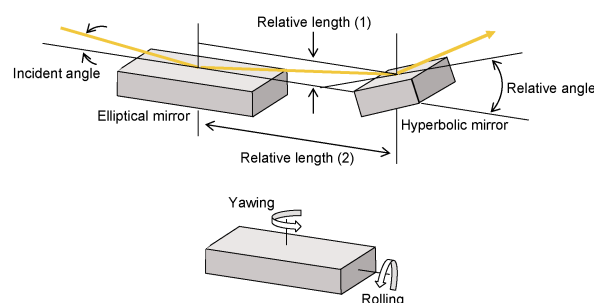


Fig. 3 (Color online) Mirror alignments indicated in the table 2.

2はこの結果から判断した許容アライメント誤差 (PSFの半値幅の増大が20%以内で許容できるアライメント誤差と定義)を表している。値を見るとそれほど厳しくない精度であることに気づく。実際のところ、すべてを同時にアライメントすることは手間のかかる作業であるが、精度自体が厳しいわけではないので、これは実験的に十分実現できるものであることが分かった。また、ミラー作製の際に許容される形状誤差についても同様に詳しく調べた⁹⁾。計算はミラー上にサイン波状の形状誤差を導入し、その空間周波数と振幅を変化させるにつれて PSF がどのように乱れるかを先ほどと同様に計算した (Fig. 4)。この計算では、ミラー上にいくつの山が存在するか (空間周波数) を

WAVE (1 WAVE はミラー上に 1 周期のサイン波状の形状誤差が存在していることを意味する。) と便宜上定義した。空間周波数が大きくなるにつれて、メインピークから離れた位置にサテライトピークが発生した。また、徐々に小さくかつ幅広くなる傾向があった。振幅については、8 WAVE 以下の空間周波数では 1 nm (つまり peak-to-valley では 2 nm) 以上で、それ以上の空間周波数では振幅 2 nm 以上で、大きなサテライトピークが発生し PSF を著しく劣化させることが分かった。この結果から形状誤

差は 2 nm (peak-to-valley) まで許容されると結論付けた。

3. ミラー作製

次に、ミラー作製について述べる。ミラー作製はこれまで筆者が所属する大阪大学山内研究室で開発された超精密加工法、Elastic Emission Machining (EEM)¹⁰⁾ と形状計測法、Microstitching interferometer (MSI) と Relative angle determinable stitching interferometer (RADSI)^{11,12)} を用いた。詳細は論文等を参考してほしい。重要な点は、本形状計測法を使って 1 nm の精度で非球面形状を計測し、これを基にコンピュータ制御された EEM 装置を使って決定論的に加工を進める点である。EEM での加工は加工液吐出ノズルをミラー面上に走査しながら加工液を吐出して行うが、この走査速度データを形状計測データからデコンボリューション演算によって正確に計算することで、形状誤差がゼロになるように加工 (決定論的加工) を進めている。当然得られるミラーの形状誤差は形状計測装置の測定誤差に起因する。我々の場合、おおよそ 1 nm の精度でミラーを加工することができる。Fig. 5 に実際に作製したミラーの形状誤差を示した。このように予定通りおおよそ 2 nm (peak-to-valley) の精度で 4 枚のミラーを作製することに成功した。また、表面粗さもミラー作製に関する大事な指標の一つである。作製したミラーの表面粗さを白色干渉計 (ZYGO NewView 200CHR) によって評価した。少なくとも 0.2 nm (root mean square) が得られており、反射率損失がほとんどないミラーを作製することができた。最終的に、マグネトロンスパッタ装置を用いて白金を 50 nm 均一に成膜した。

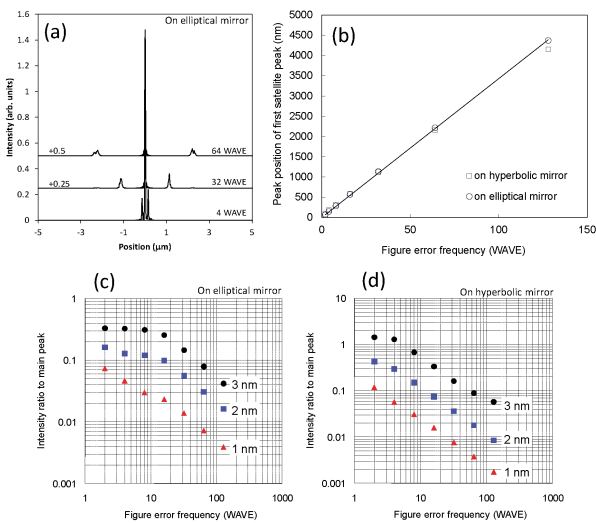


Fig. 4 (Color online) (a) Satellite peaks produced by figure errors on the elliptical mirror and (b) the relationship between the figure error frequency and the absolute position of satellite peaks. Sine amplitude: 2.5 nm, X-ray energy: 11.5 keV. (c) Relationships between spatial frequency and ratios of the intensity of the satellite peaks to the main peak for sine curves that have amplitudes of 1, 2 and 3 nm. X-ray energy: 11.5 keV.

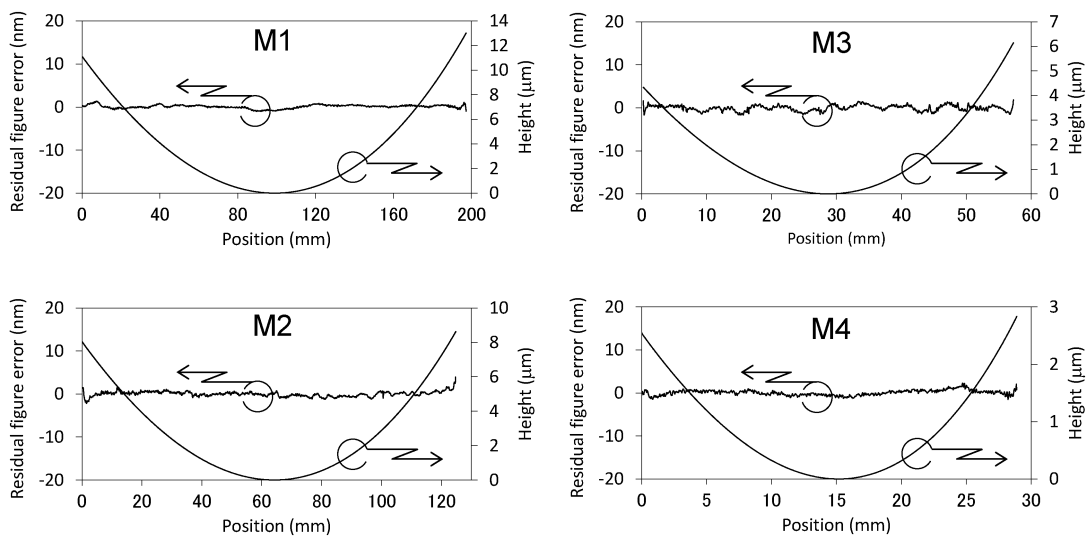


Fig. 5 Shapes and residual figure errors of fabricated mirrors.

4. アライメントシステムの開発

上述したように4枚ミラーシステムの許容アライメント誤差が得られている。これを基にアライメント手順について検討した。KBミラーの場合、通常、ミラーの面内回転と直角度の回転はオフラインで調整され、入射角と焦点距離はX線を用いながら試行錯誤で決定される。これをそのまま本システムに適用するとおそらく途方もない時間がかかると予想される（調整軸が多いため）。楕円ミラーと双曲ミラーの相対位置関係を調整する点は、X線という基準を必要としないアライメントであるため、オフラインでのアライメントが可能である。このため、レーザー変位計とオートコリメータ、走査ステージで構成された簡易形状・角度計測システムを導入することにした（Fig. 6 (a)）。本システムは変位計とオートコリメータを走査ステージで走査し、4枚ミラーの配置と角度分布を計測することができる。前もって平面かつ直角基準ミラーで校正することで $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{rad}$ の精度でアライメントをモニタリングできる。これを手がかりにアライメントを実施することにした。このようにできるところは時間がかかってもいいのでオフラインでアライメントし、限られたビームタイムの中では必要最低限の調整（入射角、焦点距離）のみを行うようにした。これによって、ビームタイム開始後1日程度で像を取得できるようになった。ちなみに、このような形状・角度計測システムは比較的簡易かつ低コストで構築できるため、今後登場すると思われる複雑なミラー光

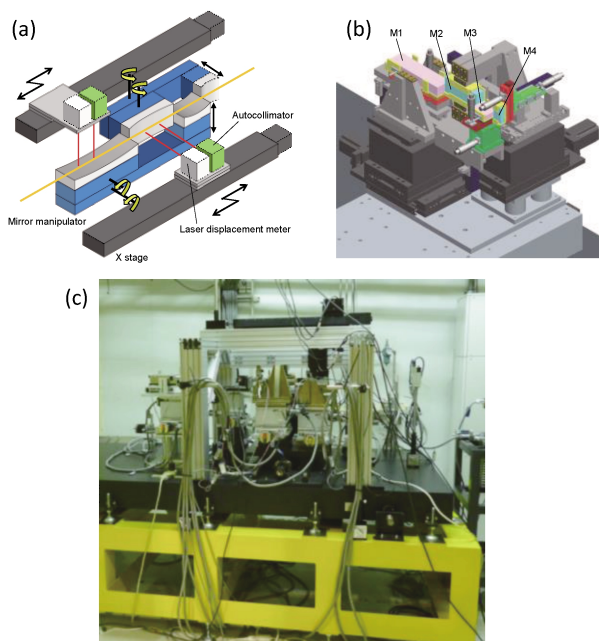


Fig. 6 (Color online) Schematic of developed alignment system. (a) Schematic of shape and slope profiler. (b) 3D diagram of developed mirror manipulator. (c) Photograph of the whole system.

学系への適用も有効と思われる。

次に、実際に4枚のミラーをアライメントするためのミラーマニピュレータを設計・開発した¹³⁾。これまでKBミラーのために開発されたマニピュレータをベースに、解析された許容アライメント誤差を上回る精度でアライメントできるように設計されている。Fig. 6 (b)に3D CADで作られたモデルを示す。非常に複雑なシステムになっており詳述は省くが、内蔵された計18軸（粗微動含めて）を使って4枚のミラーを必要な精度内に合わせ込むことが可能になった。

5. 2次元縮小結像実験

ようやくすべての必要な装置がそろったため、結像実験に取り掛かることになった。反射光学系を使った拡大結像実験は実は少々面倒な問題がある。それは反射すると軌道がずれる点である。我々の場合、結像ミラーから検出器までは45 mであるので、このような軌道ずれがあれば単純な実験配置では実験ハッチ間をつなぐ真空ダクトを通せない（単純計算で、 $16\ \text{mrad} \times 45\ \text{m} = 720\ \text{mm}$ 縦横方向にずれる）。そこで、はじめに簡単に実験できる縮小結像実験を行った。縮小結像実験の場合、結像ミラーを反射した後の光路は短く、軌道のずれはほとんど気にならないためである。この場合、Fig. 7に示すような簡単なセットアップでよく、つまり、通常の集光実験と何ら変わらない。実験では、上流スリットで形成された仮想的な点光源（約 $5\ \mu\text{m}$ ）を縮小結像し、得られた像の形と半値幅を評価した。像面には点光源を縮小して得られる像、つまり、結像光学系のPSFが得られるため、結像光学系の不完全さを直接的に評価できる。この像面で得られるPSFの強度分布を測定するために、集光実験で用いられるワイヤスキャン法を用いた。縦横別々の評価になるが、結像自体は縦横独立であると考えられることができるので、ちょうどよい評価方法である。まず、視野中心のPSFを測定した。視野中心の探索は比較的簡単である。シミュレーション結果によると本光学系は像面湾曲が存在し、視野の端では極端に像が歪む（視野の端ではフォーカスがずれるため）。視野の端が実験的に明確にわかるため、そのちょうど中心を探すこと

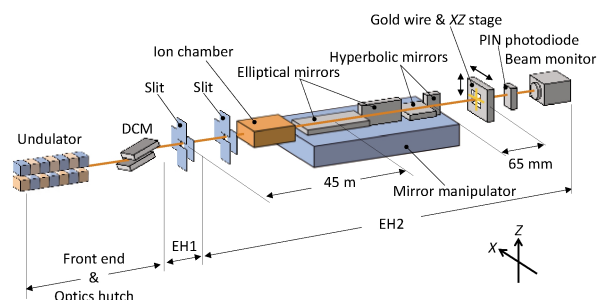


Fig. 7 Experimental setup to form a demagnified image.

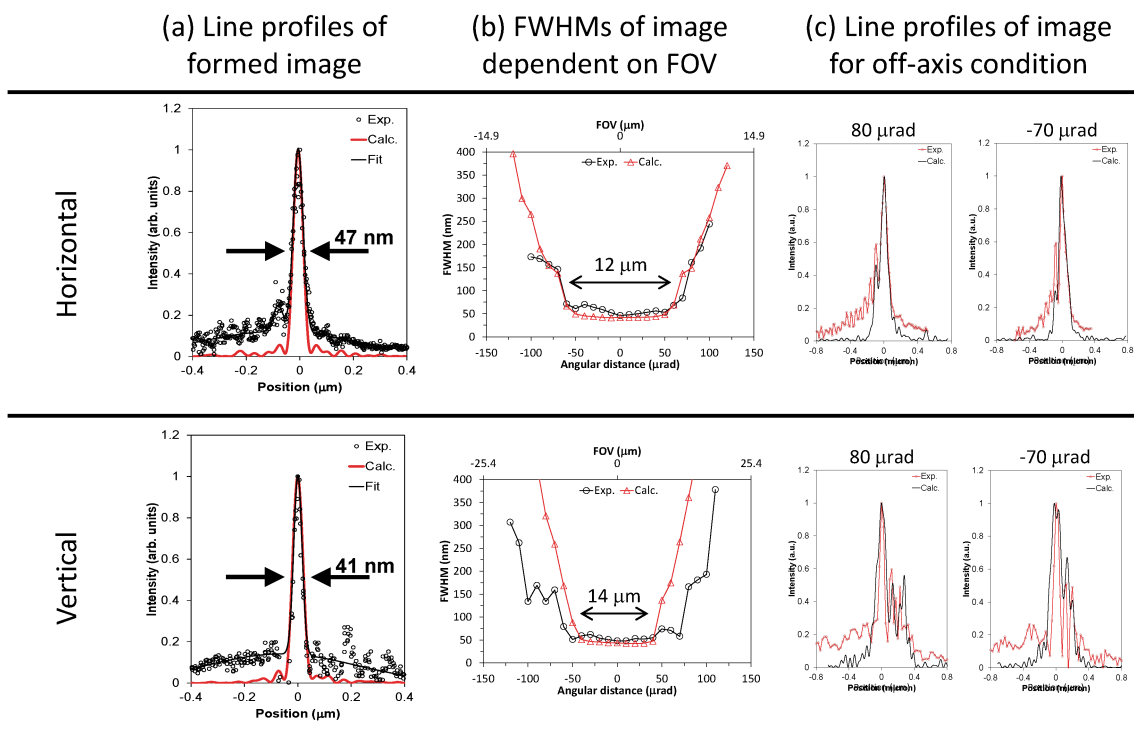


Fig. 8 (Color online) Images obtained in the image plane. X-ray energy: 11.5 keV.

で視野中心を決定した。ちなみに、視野の変更は物点である上流スリットの位置を変更すればいいのであるが、完全な点光源でないため、発散角が限られ、結像ミラーにはX線がほとんどやってこないこともあり得る。このため、反対に結像ミラー全体の角度を振ることで、相対的に物点の位置を変更した。視野中心のPSFを測定した結果をFig. 8(a)に示す。半値幅 $47 \times 41 \text{ nm}^2$ (H×V)のピークが得られ、これはほとんど回折限界の値に一致する¹³⁾。次に視野全体を同様に測定した。視野の変更は先ほど説明したように結像ミラー全体の入射角を変更することで行い、同様の方法でPSFを評価した。結果をFig. 8(b)にまとめた。視野の中心付近には良好な半値幅を維持する広い領域が観察され、これは計算によって得られた特徴とよく一致した。この結果から、有効な視野は約 $12 \times 14 \mu\text{m}^2$ (H×V)であることが確認された。また、視野端(ミラーを傾斜した角度が $80, -70 \mu\text{rad}$ の場所)のPSFの形状をFig. 8(c)に示す。面白いことに像の特徴はシミュレーション結果とよく一致しており、これは光学系が理想的に構築できていることだけでなく、シミュレーションも正しく行っていることを意味している。以上の縮小結像実験から、作製した4枚のミラーとそれをアライメントするシステムは正しく機能し、回折限界に迫る分解能を実現できるポテンシャルを有していることを確認した。

6. 2次元拡大結像実験

いよいよ最後の段階である拡大結像実験に漕ぎ着けることができた。前述した軌道変化の問題を解決するために、照明光学系の入射角を結像光学系の入射角に一致させることで、結像ミラー反射後の軌道をビームラインに平行となるようなセットアップを構築した。照明光学系は別の実験のために開発したKBミラーを用いて構築した。ただし、この反射光を平行にする調整を行うために、そのKBミラーの入射角を若干デチューンせざるを得なかった。このため理想的な照明光とは言い難いが、ひとまず結像テストを実施してみた。試料位置には同軸の可視顕微鏡を配置し、試料の位置決めを行えるようになっている。45 m下流にX線カメラ(AA20MOD, リレーレンズ: 2倍, シンチレータ: P43, CCD: ORCA-II-BT-1024G, 実効ピクセルサイズ: $6.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$)を配置し、拡大された像を記録した。用いた試料はSiemensスターチャート(XRE-SO-50, NTT AT)で、厚み200 nm, 最小線幅50 nmのタンタル製パターンである。試料を透過した光を開発した光学系で拡大結像した¹⁴⁾。

実験では視野中心と最適な焦点距離を探す必要があるが、これは意外にも時間を要した。少しずつパラメータを変更しては像を取得し、比較するという試行錯誤を重ね、ようやくもっとも良い条件(ただし、これがはたしてベストフォーカスかつ視野中心であるかは不明)を探し出した(Fig. 9)。得られた生データの拡大結像イメージは縦横の

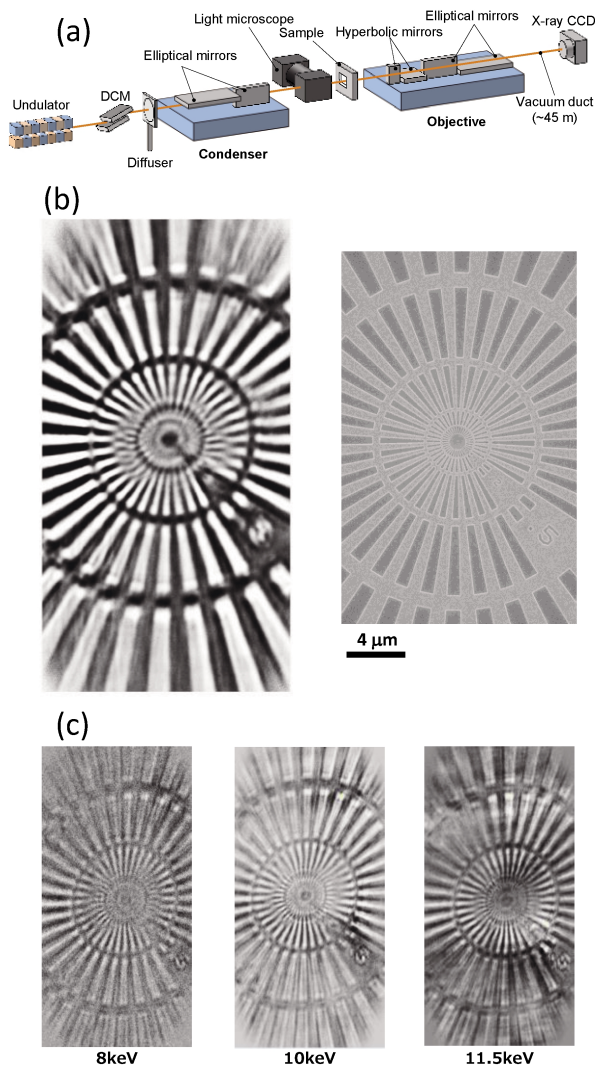


Fig. 9 (Color online) Magnification imaging test. (a) Experimental setup. (b) (left) X-ray and (right) SEM images. X-ray energy = 10 keV, exposure time = 20 sec. (c) X-ray images taken at 8, 10 and 11.5 keV. Exposure time = 20 sec.

拡大倍率が異なっているため、スターチャートが真円になるように補正を行った。同時にこの補正から像倍率を見積もることができ、これは設計値とほとんど同じ 380×200 倍（横×縦）であった。現在のところ、約 200 nm の分解能は得られているが、目標の 50 nm には到達できなかった。また、コントラストがゼロやマイナスになる領域が存在し、これはPSFがシングルピークではなく、複数のピークを持っていることを示唆している。このような乱れは、①ミラーアライメントが途中で変化した、②視野中心と焦点距離の調整が不十分が考えられる。①については、実験ハッチの温度制御を行っておらず、おそらく 0.5°C 程度変化しているためであると予想している。無振動かつ精密な温調システムの導入が必要不可欠である。②は、今のところ試行錯誤以外の有効な調整手段を持っていないため、完全な調整ができていない。現在最適な調整手段をシ

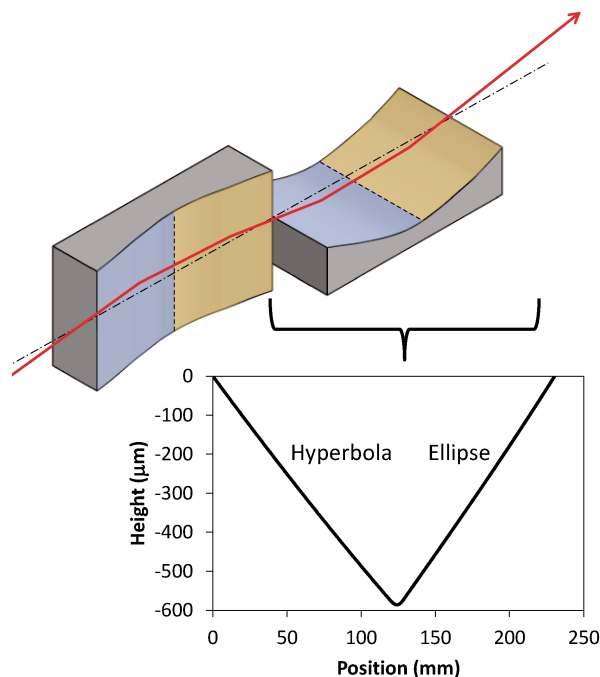


Fig. 10 (Color online) Combined mirror for a one-dimensional Wolter mirror. It has elliptical and hyperbolic shapes on a single substrate.

ミュレータを用いて検討中である。

実験は続いて結像特性のエネルギー依存性を確認するために、X線エネルギーを変更しながら像取得を行った。11.5~8 keVまで変化させて像を取得したが、大きな変化は観察されなかった。8 keVではノイジーな像が得られているが、これは空気吸収の影響とテストチャートの材質であるタンタルの吸収が小さくなったためである。

7. 今後の展望

まだ 50 nm 分解能を持つ顕微鏡の実証はなされていないが、あと少しというところまで到達することができた。実験を進めながら思うこととして、ユーザー利用を考えた場合、4枚ミラーのアライメントは面倒、かつ、これを安定に保つことは神経を使う作業になるのではないかと思う。実用を考えた場合、これらの問題を最小化するために、**Fig. 10**に示すような楕円・双曲ミラーの一体化が必要であると痛感した。もちろん、このようなアイデアは研究当初に検討されたのであるが、一枚の基板上に2つの曲面を 1 nm の精度で作製することは難しいとして却下されていた。現在、株式会社ジェイテックと共同でその作製プロセスの確立を進めている。詳細は省くが、すでに試作品レベルでは形状誤差 1 nm のミラーは完成している。このようなミラーを安定的に作製できるようになれば、本光学系の応用に道が拓けると期待している。

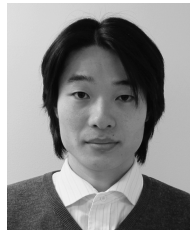
謝辞

本研究を共にこなって頂いたすべての共同研究者の皆様へ感謝いたします。とりわけ、大阪大学 山内和人教授、理化学研究所 香村芳樹博士 (SPRING-8 BL29XUL)、石川哲也センター長に深く感謝いたします。また、本実験を一緒に行った山内研究室のメンバーである恵美陽治氏、木野英俊氏、木谷直隆氏、脇岡敏之氏、藤井正輝氏に感謝いたします。本研究は、主に JST 先端計測分析技術・機器開発プログラムの助成を受けて行われました。BL29XUL の利用は理化学研究所の支援によって実現いたしました。

参考文献

- 1) Y.-T. Chen *et al.*: *Nanotechnology* **19**(39), 395302 (2008).
- 2) Y. Suzuki *et al.*: *X-Ray Opt. Instrum.* **2010**, 1-6 (2010).
- 3) Y. Wang *et al.*: *Nature* **424**(6944), 50-53 (2003).
- 4) H. Wolter: *Ann. Phys.* **10**, 94-114 (1952).
- 5) P. Kirkpatrick and A. V Baez: *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 766-774 (1946).
- 6) H. Mimura *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **90**(5), 051903 (2007).
- 7) R. Kodama *et al.*: *Opt. Lett.* **21**(17), 1321-1323 (1996).
- 8) S. Matsuyama *et al.*: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **616**(2-3), 241-245 (2010).
- 9) S. Matsuyama *et al.*: *Proc. SPIE* **7802**, 780202-780202-9 (2010).
- 10) K. Yamauchi *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **73**(11), 4028 (2002).
- 11) K. Yamauchi *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **74**(5), 2894 (2003).
- 12) H. Mimura *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **76**(4), 045102 (2005).
- 13) S. Matsuyama *et al.*: *Opt. Express* **20**(9), 10310-10319 (2012).
- 14) S. Matsuyama *et al.*: "Development of achromatic full-field hard X-ray microscopy using four total-reflection mirrors," *JPCS*, *in press*.

著者紹介



松山智至

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：X線顕微鏡，超精密加工

【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。

Development of achromatic full-field hard X-ray microscopy system based on total reflection mirrors

Satoshi MATSUYAMA Department of Precision Science and Technology, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Abstract A full-field X-ray microscope is an instrument that can produce magnified images of samples illuminated with X-rays. It enables the observation and analysis of even the internal structure of a sample owing to its superior analysis ability and the high penetration power of X-rays. In addition, it can be used to observe nanostructures with a spatial resolution greater than 100 nm owing to the very short wavelengths of X-rays. On the other hand, few developments have been made in the achromatic X-ray microscope. In this research, we describe the development of achromatic imaging optics, i.e., advanced Kirkpatrick-Baez mirror optics with four total-reflection mirrors. The performance of the optics was evaluated by using demagnification and magnification imaging system setups at BL29XUL of SPRING-8. The demagnification imaging test, using which the point-spread function of the optics was determined, showed that the optics has the potential to image X-rays with a sub-50 nm resolution. Further, the transmission images of a test pattern with resolution of ~200 nm were obtained in the magnification imaging test.