



|              |                                                                                     |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | 空間分解能30nmを持つアクロマティック硬X線顕微鏡の開発                                                       |
| Author(s)    | 松山, 智至                                                                              |
| Citation     | 大阪大学低温センターだより. 2012, 157, p. 13-17                                                  |
| Version Type | VoR                                                                                 |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/12317">https://hdl.handle.net/11094/12317</a> |
| rights       |                                                                                     |
| Note         |                                                                                     |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

# 空間分解能30nmを持つ アクロマティック硬X線顕微鏡の開発

工学研究科 松山 智至(内線7286)

<sup>†</sup> E-mail: matsuyama@prec.eng.osaka-u.ac.jp

## 1 . はじめに

硬X線顕微鏡は波長の短い電磁波を用いているため、可視顕微鏡に比べ原理的に高分解能化が実現でき、かつ、電子顕微鏡では見ることでできない厚い試料の内部を観察することが可能である。また、結像型X線顕微鏡では、リアルタイム観察が可能であると同時に、顕微分光によって透過X線だけでなく蛍光X線の結像イメージを取得することで、試料の組成をも知ることができる。このため、材料分野、医療・生物分野などの様々な領域でX線顕微鏡の発展が期待されている。

結像型X線顕微鏡では、レンズに相当する結像素子こそがその性能を左右する。望まれる性能は、波面収差が小さく回折限界の結像が実現できること、色収差がないこと、視野が広いことである。波面収差は、結像素子の作製精度を反映しており、いかに正確に結像素子を作製できるかが分解能を決める重要な要素となる。色収差は、結像現象の原理が何であるかによって根本的に決まっている。例えば、屈折現象を利用した屈折レンズや回折現象を利用したフレネルゾーンプレートは原理的に色収差から逃れられない。全反射現象を利用するX線ミラーだけが硬X線領域では色収差なしを実現できる。視野が広い、つまり、コマ収差がないためには、光学系がアッペの正弦条件を満たすかどうかで決まる。一般的に単枚のミラーのみで構成される結像光学系では、正弦条件を満たさないため、X線ミラー結像光学系の視野は極端に狭いことが知られている。このように、結像素子の特徴は一長一短であるため、硬X線領域では上記3つの条件を満たす結像素子は未だ存在していない。

以上のように、硬X線領域では、高性能な結像素子が開発されていないため、高分解能かつ色収差のない結像光学系の開発はこれまで報告されていない。次世代硬X線結像光学系を開発できれば、極短時間(ナノ秒~100フェムト秒)の硬X線発光の様子をフルカラー(多波長)かつナノ分解能で可視化することも不可能ではない。

## 2 . X線結像光学系の開発

X線結像光学系の研究は1950年ごろから盛んに研究されてきた。1952年にWolter氏によって提案

---

\*この印の付いている語は、後に「用語説明」があります。

された回転楕円面と回転双曲面で構成されたミラーシステム（Wolterミラー光学系）<sup>[1]</sup>（図1）はX線顕微鏡・X線望遠鏡において特に重要な光学系である。本光学系では、コマ収差を補正するために2枚の曲面でX線反射させることで広い視野を実現した。しかし、回転非球面はミラー領域が筒状形状の内側にあり、かつ、非球面であるため、その作製は現在の超精密加工技術をもってしても困難である（理想的な結像を実現できるほど精度の良いWolterミラーは未だ開発されていない）。

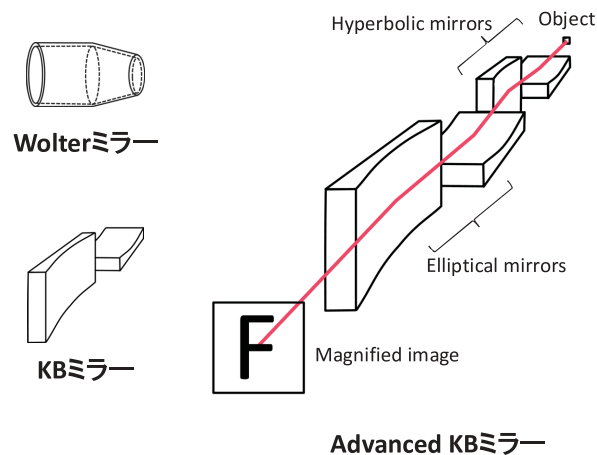


図1 X線結像光学系

ミラー作製の困難さを解決するために、1996年に阪大の児玉氏らによって、Advanced Kirkpatrick-Baezミラー光学系<sup>[2]</sup>（図1）が提案・開発された。本光学系はWolterミラー光学系の構成要素を縦横の次元で切り分けて、2組の1次元Wolterミラーに分担させた光学系と理解できる。ほとんど平坦なミラーのみで構成されているため、Wolterミラーに比べ作製が比較的容易である（比較的容易と言いつつも、形状に要求される精度はナノメートルレベルである）。ちなみに、楕円ミラー2枚を直交するように配置した光学系は、Kirkpatrick-Baez（KB）ミラー光学系<sup>[3]</sup>（図1）と呼ばれ、主にX線集光のために利用されている。

本研究は、このAdvanced KBミラー光学系を高精度に構築することで、高分解能かつ色収差のない結像光学系を実現しようとするものである。本研究を成功させるキーポイントは以下の点である。

高精度非球面ミラーの作製

高精度シミュレータによる光学系の理解

高精度アライメントシステムの開発

X線は波長が短いため（12keVで1 程度）わずかな形状誤差でも意図しない方向へ反射・散乱され分解能の劣化につながる。一般的なX線ミラーに要求される許容形状誤差（理想形状からのずれ）はナノメートルレベルである。また、形状だけでなく、その表面粗さに関してもシリコンウエハレベルに匹敵する高い平滑性が要求される（表面粗さの悪化は反射率の低下につながる）。本研究ではElastic Emission Machining（EEM）<sup>[4]</sup>（図2）とそれをコンピュータ制御することができる加工装置を用いて、ミラー作製の問題を解決した。EEMは、微粒子と被加工物との間で起こる化学反応によって加工を進行させる加工法である。ダメージフリーかつ原子オーダーで平滑な表面が得られるためX線ミラー作製には適している。干渉計の測定で得られた形状誤差と静止加工痕形状（removal function）を、デコンボリューション演算することで、微粒子供給ノズルの滞在時間分布を算出した。これに従って微粒子を被加工面に供給し決定論的に加工することで、精密に非球面形状を作製した。最終的に、楕円ミラー・双曲ミラーともに形状誤差2 nm Peak-to-Valley、表面

粗さ0.2 nm RMS (  $64 \times 48 \mu\text{m}^2$  ) ( 図 3 ) で作製することに成功した。この形状精度は事前の解析で得られた回折限界分解能を実現するための要求精度を満たしている。

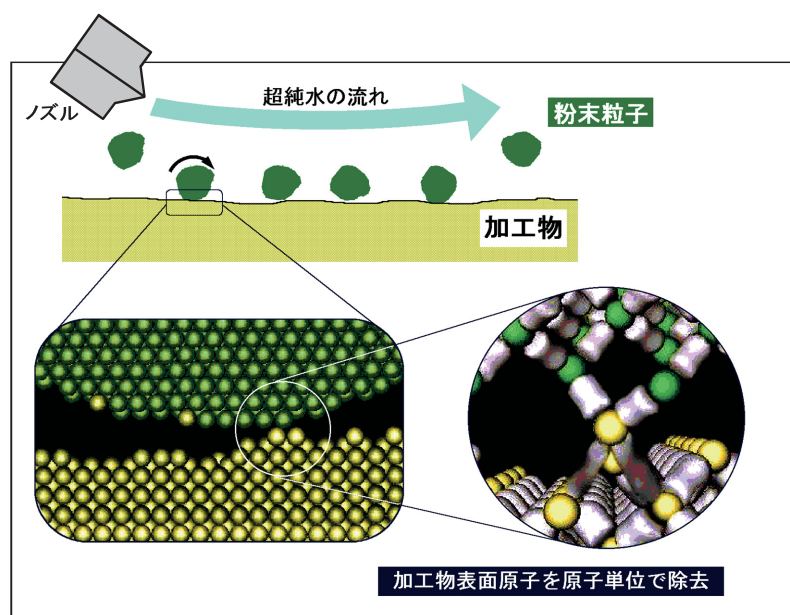


図 2 EEMの加工原理。超純水の流れとともに供給された微粒子が、被加工物表面で化学反応を起こし、被加工物表面の原子が微粒子に吸着した結果、加工が進行する。ちょうど、雪面で雪玉をころがし大きくしていく様子に似ている。

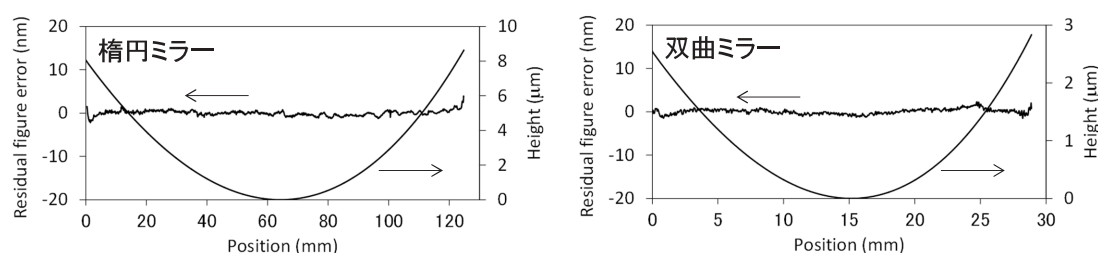


図 3 作製した楕円ミラーと双曲ミラーの形状と形状誤差。残り 2 枚のミラーについても同様の結果が得られている。また、ミラー全域において表面粗さ0.2 nm rms (  $64 \times 48 \mu\text{m}^2$  領域 ) 以下が達成できている。

また、4 枚のX線ミラーを正確に並べるという点も重要である。楕円ミラーのみで構成されているKBミラー光学系でさえそのアライメントは複雑で、通常数日を要する。4 枚のミラーで構成されている本システムは当然KBミラーよりもはるかに複雑で難しい。そのため、Fresnel-Kirchhoff回折積分に基づいた波動光学シミュレータを開発した。このシミュレータを用いることで、4 枚のミラーが持つ誤差（アライメント誤差や形状誤差など）が結像性能にどのような影響を与えるのか詳細に調べることが可能となった。一例として、角度誤差を持つ4 枚のミラーがどのような結像特性を持つのか計算した結果を図 4 に示す。Point Spread Function ( PSF )<sup>\*</sup>がアライメント誤差によ

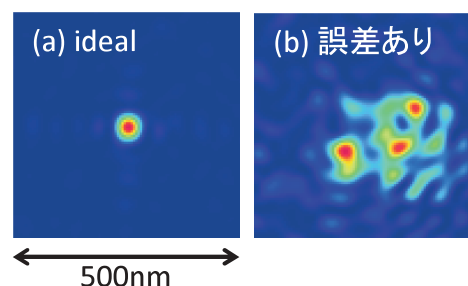


図 4 典型的な計算結果。理想的な状態の光学系にアライメント誤差を与えると像が崩れ、複雑なPSFが得られた。

ってゆがみ、そして、これによって複雑な干渉を引き起こしている様子を見ることができた。

本シミュレータで解析されたアライメント許容誤差を基に、この精度を達成できるミラーマニピュレータを開発した。18の調整軸を持ち、重要な角度調整部においては角度分解能 $0.2\mu\text{rad}$ を達成している。これによって、4枚のミラーを思い通りにアライメントすることが可能となった。

### 3 . SPring-8における性能評価

作製したミラーと開発したアライメントシステムを用いて、SPring-8\*のBL29XULビームラインにて、結像性能の評価を行った。用いたX線エネルギーは11.5 keVであり、これは設計時に想定した最大エネルギーである。図5に示す実験配置を用い、 $10\mu\text{m}$ サイズのスリット像を45 m下流に縮小結像した。本来なら拡大結像でテストすべきであるが、実験の容易さから縮小結像の配置を採用している。正確なアライメントを行った後に、ワイヤースキャン法（ナイフエッジスキャン法の一種で、1次元強度プロファイルを測定可能）にて、縮小された像の強度プロファイルを測定した。この結果、視野中心において半値幅43 nmのPSFが得られた（図6）。また、視野全体にわたって同

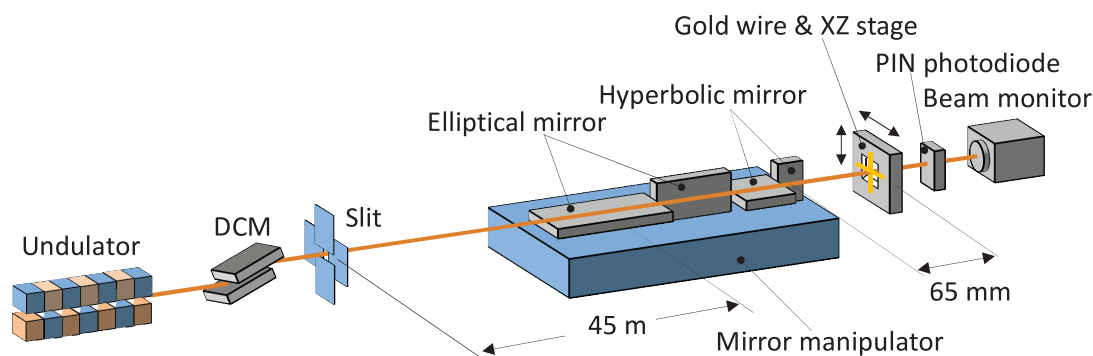


図5 実験配置。アンジュレータから発生したX線をDCMで単色化した。スリット像を45 m下流のAdvanced KBミラーで結像し、これをワイヤースキャン法で評価した。

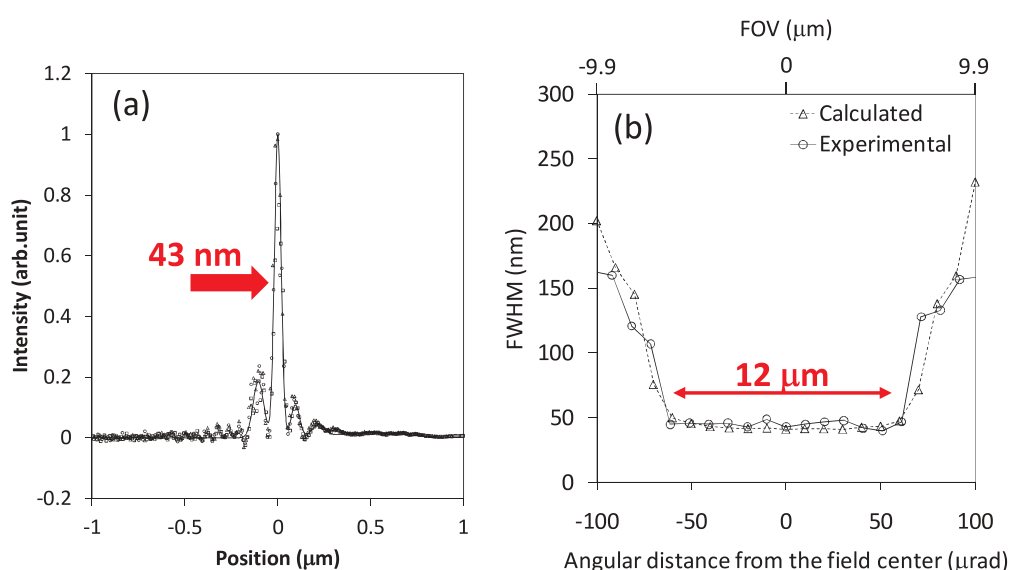


図6 実験で得られた視野中心でのPSF (a) と視野特性 (b)。この結果は1次元結像の結果であり、2次元結像の結果は現在論文にまとめている。2次元結像でも同様の性能を得ている。

様のテストを行った結果、視野12  $\mu\text{m}$ にわたって半値幅50 nmのPSFが達成できていることが分かった<sup>[5]</sup>。これらの結果は、開発した4枚ミラー光学系が結像光学系として正しく動作していることを示している。さらに、本研究で得られた結像性能は、X線ミラーを用いた結像光学系としてこれまで開発された中で最も良い分解能であることが分かっている。

#### 4 . さいごに

現在のところ、目標とする性能の顕微鏡システムの開発は完了していない。しかし、要素技術の確立は完了し、X線を使った結像テストを実行可能な準備が整った。また、最新の実験結果では、あと少しで目標とする顕微鏡システムの構築が可能であるとの手ごたえを得ており、数年のうちにこの顕微鏡によってこれまで誰も目にしたことのない世界を見ることができると確信している。

#### 参考文献

- [ 1 ] H. Wolter, “ Glancing Incidence Mirror Systems as Imaging Optics for X-rays ”, Ann, Phys. 10, 94-114 ( 1952 )
- [ 2 ] R. Kodama, N. Ikeda, Y. Kato, Y. Katori, T. Iwai, K. Takeshi, “ Development of an advanced Kirkpatrick-Baez microscope ”, Optics Letters 21 ( 17 ), 1321-1323 ( 1996 )
- [ 3 ] P. Kirkpatrick, A.V. Baez, “ Formation of Optical Images by X-Rays ”, J. Opt. Soc. Am 38, 766-774 ( 1948 )
- [ 4 ] K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki, Y. Mori, “ Figuring with subnanometer-level accuracy by numerically controlled elastic emission machining ”, Rev. Sci. Instrum. 73 ( 11 ), 4028-4033 ( 2002 )
- [ 5 ] S. Matsuyama, T. Wakioka, N. Kidani, T. Kimura, H. Mimura, Y. Sano, Y. Nishino, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, “ One-dimensional Wolter optics with a sub-50 nm spatial resolution ”, Optics Letters 35 ( 21 ), 3583-3585 ( 2010 )

#### 用語解説

##### Point Spread Function

点光源を結像した際に得られる像で、結像光学系が回折や収差によってどの程度ボケるかを表す関数。

##### SPRing-8

兵庫県の播磨科学公園都市内に位置する大型放射光施設。輝度・エネルギー・指向性などの点で世界最高級のX線を発生させることができる。