

超高精度 X 線ミラー作製による高分解能硬 X 線顕微鏡の開発
Development of hard X-ray nanoscopy/spectroscopy system
with probe beam size of 10nm order

山内 和人 (Yamauchi Kazuto)
大阪大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

精度 1nm(p-v) をもつ表面形状評価・創成システムを構築して、X 線集光ミラーの作製に応用し、50nm 以下のサイズの硬 X 線集光を波動光学的な回折限界において実現した。蛍光 X 線顕微鏡システムへと発展させ、空間分解能 30nm での多元素マッピングを実現し、医学・生物学との連携によるフィールドテストによって、高い装置性能を実証した。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

工学／機械加工・生産工学・加工学／超精密加工、放射光、光学素子、顕微鏡、ナノマイクロ加工、特殊加工

1. 研究開始当初の背景・動機

SPring-8 等の第 3 世代シンクロトロン放射光源では、高輝度かつ高可干渉性を有する硬 X 線を扱うことが可能になっている。こうした光源を利用すれば、原理的には、X 線をナノメートルスケールで波動光学的な回折限界にまで集光することが可能である。それゆえ、2000 年以降、硬 X 線の集光性能に関する競争が世界中で激化している。当該研究者等は、本研究の申請の以前より、任意の形状をもつ表面に対して原子レベルの平滑性とナノメートルレベルの形状精度を実現する超精密加工・計測技術の開発を推進し、超精密形状創成システムを構築した。そして、これを硬 X 線斜入射ミラーの製作に応用展開し、その時点 (2001 年) での硬 X 線 (15keV) 集光における世界最小記録となる 180nm×120nm 集光に成功した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記成果の発展的な活用と、新たな研究戦略のもとに、さらに高強度かつ微小な集光が可能で大開口数 (NA: Numerical Aperture) の X 線ミラー光学素子の開発に挑戦し、波動光学的な回折限界における集光径が 30nm×50nm レベルの硬 X 線集光ユニットを完成させる。さらに、これをプローブとする X 線顕微鏡システムおよびプロジェクション顕微鏡システムを世界に先駆けて構築し、例えば創薬研究等から強く求められる小器官 (オルガネラ) 内部を空間分解した細胞レベルでの多元素同時マッピングなど、生命・生物科学分野を中心とする異分野への応用展開を図る。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者を含め、6 名の研究分担者と 3 名の博士学生が中心となり、加工、計測技術の開発を進めた。また、SPring-8/理化学研究所の協力の下、優先的な BL29XUL の利用環境を得て研究を推進した。表面加工・計測評価、X 線集光システムの構築、X 線顕微鏡システムの開発の 3 項目について相互に連携させ、研究を推進した。

研究予算は、走査型プローブ顕微鏡など加工、計測法に関する研究開発環境の充実に主に配当した。具体的な加工・計測評価法の構築では、独自の発想に基づき、他に類の無い独創的な装置開発を進め、所期の性能の X 線光学素子の試作を可能にした。

4. 研究の主な成果

(1) 基盤技術開発

波動光学解析により、ミラー表面の形状誤差の集光特性への影響を検討し、硬 X 線の回折限界における Sub-50nm 集光には、2nm (P-V) 以上の精度が必要であることを見出した。ミラーの楕円形状を必要精度で評価する RAD (Relative Angle Determinable) スティッチング干渉計を考案・構築した。加工法の構築においては、EEM (Elastic Emission Machining) 法を応用した縦分解能 Sub-1nm、空間分解能 0.01mm 以上の形状創成システムを開発し、PCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining)、マイクロスティッチング干渉計等、我々が有する既存成果との融合によって、硬 X 線用のミラー作製システムを完成させた。

(2) 硬 X 線ナノビーム形成

K-B ミラー集光光学系において、15keV 時の集光径が 36nm (横方向)、48nm (縦方向) となる楕円ミラーを設計・作製し、集光システムを完成させた。図 1 は得られた硬 X 線ナノビームの横方向の強度分布である。測定値と理論的に予想されるプロファイルが一致していることを示している。ビームウエスト域の強度分布の評価から、この時の集光状態が回折限界における集光であることを世界で始めて確認している。また、継続的に性能向上を図り、研究期間終了時には、当初計画を上回る 30nm×25nm の硬 X 線ナノビーム形成にも成功している。

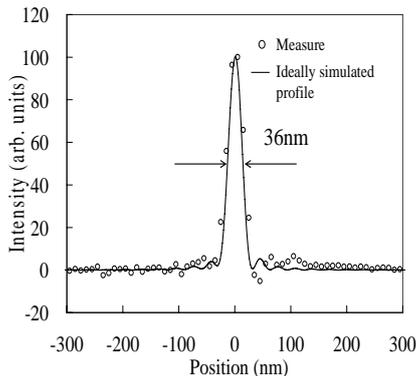


図 1 実現した硬 X 線ナノビームの強度プロファイル (15keV)

(3) 高分解能 X 線顕微鏡

図 2 は開発した走査型蛍光 X 線顕微鏡システムの写真である。エネルギー分散型の蛍光 X 線検出器を用い、1nm 分解能 XY 走査ステージを導入することにより、多元素の同時マッピングが可能なナノ分光イメージングシステムを完成させた。

図 3 は、5nm φ の金ナノコロイドと蛍光色素によってミトコンドリアをラベルし、細胞内の多元素マッピングを行った結果である。この結果から、10nm レベルの分解能と fg レベルの検出感度で生体試料を評価することが可能であることを示した。



図 2 SPring-8 に構築した走査型蛍光 X 線顕微鏡システムの写真

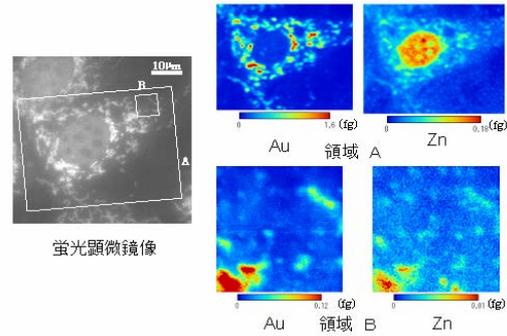


図 3 細胞観察の結果

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

上記に示す本研究の成果により、世界レベルで激化している硬 X 線の集光競争において、No1 の実績を得た。そして、顕微鏡システムの構築を図り、医学・生物学分野を中心とする異分野との連携により、フィールドテストに基づく性能実証を行った。得られた成果は、ナノメートルレベルの表面創成、硬 X 線ナノビーム形成、X 線顕微鏡システムの構築において世界トップとの評価を得た。そして、本研究において得られた新たな知見に基づく研究戦略を提案し、継続して特別推進研究「硬 X 線 Sub-10nm ビーム形成と顕微鏡システムの構築」を推進中である。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

1) S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, Y. Sano, K. Yamamura, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, **K. Yamauchi**, Development of scanning X-ray fluorescence microscope with spatial resolution of 30nm using K-B mirrors optics, Review of Scientific Instruments 77, 103102 (2006).

2) 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).

3) 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**, Relative angle determinable stitching interferometry for hard x-ray reflective optics, Review of Scientific Instruments 76, 045102 (2005).

4) 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, Review of Scientific Instruments 76, 063708 (2005).

ホームページ等

<http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp>