The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	硬X線ナノ集光用ミラー光学素子の開発に関する研究
Author(s)	湯本, 博勝
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/48608
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

【33】

氏　　名	湯　本　博　勝（ゆ もと ひろ かつ）
博士の専攻分野の名称	博　士（工　学）
学　位　記　番　号	第　２２００２　号
学 位 授 与 年 月 日	平成 20 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第４条第１項該当 工学研究科精密科学・応用物理学専攻
学　位　論　文　名	**硬 X 線ナノ集光用ミラー光学素子の開発に関する研究**
論 文 審 査 委 員	（主査） 教　授　山内　和人 （副査） 教　授　安武　　潔　　教　授　森田　瑞穂　　教　授　片岡　俊彦 教　授　桑原　裕司　　教　授　渡部　平司　　教　授　遠藤　勝義

論 文 内 容 の 要 旨

本研究の目的は、硬 X 線ナノ集光用ミラー光学素子の開発と共に、ナノ集光を実現するために必要不可欠な要素技術である波動光学理論に基づく X 線反射強度分布の計算手法、X 線ミラー表面形状の加工法、表面形状計測法、放射光による X 線ミラー評価法の確立にあった。本論文は、これらの技術開発に関する一連の研究結果についてまとめた。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べた。

第 2 章では、X 線ミラー光学素子の設計上に必要となる X 線光学について述べた。理想的な回折限界の集光強度プロファイルのナノ集光を実現するために求められる X 線ミラー光学素子の表面形状精度について、回折積分理論に基づいた波動光学シミュレーターにより検討した。結果、1 nm の形状精度が必要となることを示した。

第 3 章では、EEM（Elastic Emission Machining）加工法について説明した後に、EEM による数値制御加工と自動平滑化作用を含めた加工性能を全空間波長領域について評価した。EEM により形状精度 1 nm、表面粗さ RMS 0.1 nm の表面形状を加工することができ、X 線ミラーの加工法として十分な性能を有することを証明した。

第 4 章では、X 線ミラー光学素子に求められる形状精度を評価可能な X 線ミラー光学素子用の表面形状計測法の開発を目的とし、顕微干渉計走査型 RADSI（Relative angle determinable stitching interferometry）を開発した。本形状計測装置により 1×10^{-8} rad の精度でスティッチング角度を決定でき、X 線ミラーの表面曲率半径 5～20 m に対応した形状を、再現性と確からしさが 2 nm で計測することが可能となった。

第 5 章では、硬 X 線ナノ集光を目的として全反射 X 線集光ミラーの開発を行った。X 線ミラー形状を設計し、EEM と開発した形状計測システムを用い X 線ミラーを作製した。さらに、作製した X 線集光ミラーを SPring-8 の 1 km 長尺ビームラインにおいて評価した。結果、7 keV の X 線で 27 nm 半値幅の X 線集光や、15 keV の X 線で 25nm 半値幅の X 線集光に成功し、理想的な集光強度プロファイルを得るために必要な表面形状精度を満足する X 線ミラー作製プロセスを確立した。

第 6 章では、硬 X 線領域で回折限界集光ミラーを評価するための新しい手法である at-wavelength 表面形状計測法を提案した。X 線集光強度プロファイル計測法と、集光強度情報から形状を回復する手法を確立し、実際に SPring-8 において硬 X 線集光ミラーを評価した。結果、at-wavelength 表面形状計測法の確からしさ 1 nm、波面精度 1/10 λ waves を実現した。

第 7 章では、本論文の総括を行った。

論文審査の結果の要旨

SPring-8 に代表される第３世代シンクロトロン放射光施設の X 線光源が実用に供され、高輝度 X 線源を利用したナノスケール X 線分析は医学・生物学・材料科学など、あらゆる分野の研究の進展に不可欠な存在となっている。このような背景のもと、本論文は、硬 X 線領域におけるナノ分解能顕微鏡のための集光光学素子の開発と光学素子開発に必要となる要素技術の開発を試みた一連の研究成果をまとめたものである。

全反射ミラー光学素子は他の硬 X 線集光光学素子と比較して、大開口、高集光効率、長焦点距離（長作動距離）の確保が可能であるため、顕微鏡応用する上で最も有効である。しかしながら、集光ミラー光学素子の作製に求められる表面形状精度の高さが問題となり、ミラー光学素子が本来持つ性能を十分に発揮できるミラーの作製が従来の技術では困難である。回折限界において硬 X 線集光を実現するためにミラー光学素子に要求される表面形状精度を波動光学理論に基づき解析した結果、1 nm レベルの非常に高い表面形状精度が求められることを示し、このような表面形状精度を満足するために、X 線ミラーの表面形状加工法として、超高精度加工法である EEM（Elastic Emission Machining）を用いた数値制御加工を確立している。これにより形状精度 PV 1 nm 以下、表面粗さ RMS 0.1 nm のミラー表面の創製に成功している。また、ミラー表面形状の評価法として、可視光位相シフト干渉計を用いた形状計測装置（顕微干渉計タイプ RADSI（Relative Angle Determinable Stitching Interferometry））を開発している。これにより、今までは計測が困難だった大きな表面曲率を持つミラー形状を 1 nm の再現性で評価できるようになり、より微小な集光径をもつ X 線集光ミラーの開発を可能としている。さらに、開発した加工システムと形状計測システムを利用して実際に X 線集光ミラーを作製し SPring-8 において評価している。その結果、15 keV の X 線エネルギーにおいて集光強度プロファイルの半値幅で 25 nm の世界最小のミラー光学素子によるナノビームを実現している。これは世界で唯一、ミラー光学系において波動光学的な回折限界における集光を達成したものであり、国内外の関連する研究の中で、世界を先行する研究成果となっている。一方、X 線ミラーのための従来にない新しい表面形状評価法として、インラインで X 線集光ミラーの形状を評価する at-wavelength 形状計測法を考案、実証し、オフラインでは計測が困難な形状に対してもサブナノメートルの高精度な形状計測が可能としている。本研究で開発した顕微干渉計タイプ RADSI や at-wavelength 形状計測法は、1 nm 以下の極限的な表面形状精度が要求される硬 X 線ミラー光学素子の開発ばかりでなく、他の様々な光学素子の評価に応用でき、より広範な科学技術の発展に貢献できるものと期待される。

以上のように本論文は、硬 X 線ナノ集光用ミラー光学素子の開発を行い、sub-30 nm 集光の実現と共に、ミラー光学素子の開発に必要となる波動光学に基づく X 線集光シミュレーション手法、X 線ミラー表面加工法、X 線ミラー表面形状計測法、放射光による X 線ミラー評価法等の確立を行ったものである。本研究で作製が可能となったミラー光学素子は今後、顕微鏡応用され、X 線分析法の高精度化に貢献できるものであり、本論文で開発された技術は精密科学工学への発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。