

Title	波面補償システムを導入したKirkpatrick-Baezミラー光学系によるSub-10nm分解能硬X線顕微鏡の開発
Author(s)	木村, 隆志
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/58330">https://hdl.handle.net/11094/58330</a>
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、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

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

Osaka University

【64】

氏名	木村隆志
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第24549号
学位授与年月日	平成23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	波面補償システムを導入したKirkpatrick-Baezミラー光学系による Sub-10nm分解能硬X線顕微鏡の開発
論文審査委員	(主査) 教授 山内 和人 (副査) 教授 森田 瑞穂 教授 安武 潔 教授 桑原 裕司 教授 森川 良忠 教授 渡部 平司 教授 遠藤 勝義

### 論文内容の要旨

本論文は、X線ミラーを使用した10nm分解能を有する走査型硬X線顕微鏡の構築と、その実現及び高性能化に不可欠な波面補正システムの開発のために行われた、一連の研究成果についてまとめたものである。以下に本論文の構成と、その要旨を記す。

以下に本論文の構成を示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、二枚のX線ミラーを使用して集光を行うKirkpatrick-Baez(K-B)ミラー光学系について、その一般的な特徴についての説明を行い、K-Bミラー光学系に必要なアライメント精度及び表面形状精度の検討を行った。その結果を受けて、K-Bミラー光学系によりSub-10nm集光プローブを形成するために、必要不可欠になると考えられる波面補正システムについて、その概説及びシミュレーションによる実現可能性の検討を行った。

第3章では、硬X線波面補正システムを構築するために必要となる、高い変形精度を実現する形状可変ミラーの開発を行った。形状可変ミラーの変形機構として、ミラー基板と圧電素子を貼りあわせたモノモルフ構造を採用

し、その構造が硬X線波面補正光学系に求められるような高い変形精度を満たせるか、シミュレーション及び変形試験によって検討を行った。その結果をもとに作製した形状可変ミラーを使用して20keV硬X線集光ビームの波面制御実験を行った結果について述べた。

第4章では、硬X線集光ビームの波面誤差計測方法として、集光ビームの集光点近傍の強度プロファイルを元に、数値計算により波面誤差を求める手法の開発を行った。まず、波面誤差算出についてその特徴を述べた後に、集光点近傍の複数枚の強度プロファイルを元に波面誤差を算出するアルゴリズムについて述べた。最後に、実際に放射光を利用してSub-10nm集光ビームの評価実験を行い、波面誤差の算出精度について検討した結果を示した。第5章では、第3章で作製した高精度形状可変ミラーと、第4章で開発した硬X線集光ビームの波面誤差算出法を組み合わせた硬X線波面補正システムについて述べ、SPring-8 BL29XUL 1km長尺ビームラインでの、硬X線集光ビームの波面補正実験の結果を示した。

第6章では、二枚の多層膜集光ミラーを使用してK-Bミラー光学系を構築し、二次元Sub-10nm集光プローブ形成実験を行った結果について述べた。まず、現在X線集光ビームの評価法として使用している暗視野ナイフエッジ計測法が、二次元集光プローブの評価にも適応可能であるか、波動光学シミュレーションにより検討を行った。続いて、集光実験に使用するK-Bミラーマニピュレータについて説明を行い、二次元集光実験を行った結果を示した。そして、最後に形成した二次元Sub-10nm集光プローブを用いた走査型顕微鏡を構築し、その分解能の評価及び二次元集光プローブの波面誤差の算出を行った。

第7章では、本論文の総括をおこなった。

## 論文審査の結果の要旨

高分解能・高感度なX線分析技術を実現するためには、高精度なX線光学素子の存在が不可欠である。本研究では、X線集光ミラー光学系に、形状可変ミラーを使用した波面補償システムを導入することにより、集光ミラー単体では実現が困難な数nmサイズへの硬X線集光の実現と、形成した集光プローブを用いての顕微鏡への応用を行っている。

まず10nm以下のサイズのX線集光プローブを形成するために、Kirkpatrick-Baez (K-B)ミラー光学系によるX線集光光学系の設計を行い、二枚のミラーに必要な形状精度及びアライメント精度について、Fresnel-Kirchhoff回折積分理論に基づく波動光学計算を行うことにより明らかにしている。その結果、集光ミラーには表面形状精度P-V 1nmという非常に高い値が求められることが示し、形状可変ミラーを用いた波面補償システムをミラー集光光学系に導入することにより、形状誤差・アライメント誤差が原因で生じる収差を補正でき、理想的な集光ビームを形成可能であることを明らかにしている。

また、この波面補償システムを構築するために、硬X線集光光学系において使用可能な高精度形状可変ミラーと波面誤差算出法の開発を行っている。形状可変ミラーは、シリコン基板と圧電素子を貼りあわせたモノモルフ構造のものを作製しており、硬X線の波面制御を行う上で十分なサブナノメートルの精度で、ミラーの表面形状を制御することに成功している。また、波面誤差算出法としては、集光点近傍の複数の強度プロファイルを利用した位相回復計算法を採用することにより、大NAかつ短波長の硬X線集光ビームの波面を検出可能であることを、実際の多層膜集光ミラーの強度プロファイルを使用し、波面誤差を算出することにより示している。

さらに、これらの形状可変ミラーと波面算出法を組み合わせ、SPring-8 1km長尺ビームラインにおいて硬X線集光ビームの波面補正実験を行っており、光学系に存在するP-V 6rad波面誤差を補正するように形状可変ミラーを変形させることにより、半値幅で7nmの硬X線集光ビームを形成することに成功している。

そして最後に、集光ミラーを二枚組み合わせてK-Bミラー光学系を構築し、二次元で10nm以下のサイズを有する集光プローブの形成に成功している。形成した集光プローブを使用しての走査型顕微鏡の構築も行っており、吸収コントラスト・蛍光X線などにより10nmの構造物を識別可能なことを実証している。

以上のように、本論文は硬X線光学系に波長以下の精度での波面制御が可能なシステムを提案し、世界で最小の半値幅7nmの硬X線集光ビームを実現し、なおかつ集光ビームを用いて10nm以下の分解能を有する顕微鏡を構築したものであり、硬X線光学や硬X線分析技術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。