

Title	Advanced Kirkpatrick-Baezミラーを用いた高分解能X線結像光学系の開発
Author(s)	山田, 純平
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/72370">https://hdl.handle.net/11094/72370</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。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

## 論文内容の要旨

氏名 ( 山田 純平 )

論文題名 Advanced Kirkpatrick-Baezミラーを用いた高分解能X線結像光学系の開発

## 論文内容の要旨

本論文は、X線の優れた特性を真に引き出すイメージング手法の実現を目的とし、Advanced Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー光学系を用いた高分解能X線結像光学系の開発のために行った研究についてまとめたものである。目的とするX線顕微鏡の実現ために要求されるX線光学系を深く考察し、今までにない凹・凸面鏡組み合わせに基づく新規X線結像ミラー光学系を提案した。新たなX線結像光学系の光学設計、理論的考察、そして根幹となる光学素子作製技術といった基礎研究をつぶさに行った。作製した結像ミラーにより、提案した新規X線結像ミラー光学系の原理実証を行い、高分解能X線結像光学系の構築へと展開した。さらに空間分解能向上のための多層膜ミラーによるX線結像技術の検討と実証を行った。以下に本論文にて得られた結果を述べる。

第1章では本研究の背景について述べ、その目的および意義を明確にし、本論文の構成について述べた。

第2章では結像型X線顕微鏡の基礎概念について説明した。硬X線領域にて一般に用いられる集光・結像素子について説明したのちに、X線顕微鏡について、走査型・レンズレス型・結像型の3手法に大別して議論した。これらの議論に基づき凹・凸面鏡組み合わせに基づく新規X線結像ミラー光学系の提案を行い、開発を目指すX線結像光学系の概要について述べた。

第3章では、凹・凸面鏡組み合わせに基づく新規Advanced KBミラー光学系の設計を行った結果について説明した。その後、本光学系の結像特性について、収差論、幾何光学および波動光学の観点から評価を行った結果について述べた。

第4章ではX線結像ミラーを高い形状精度且つ平滑な表面粗さのもと作製するためのイオンビーム加工システムの開発について述べた。イオンビーム加工法の概要について述べた後に、数値制御イオンビーム加工システムの開発結果について説明した。最後に、開発したシステムによる結像ミラー作製結果についてまとめた。

第5章では、作製した結像ミラーを用いて行った新規Advanced KBミラー光学系の実証実験について説明した。大型放射光施設SPring-8にて行った1次元縮小結像実験の実験配置について述べた後に、凹・凸面鏡の相対配置アライメントに関して説明した。また得られる空間分解能の評価と波面計測法を用いた視野の評価及び像面湾曲収差に対する評価結果を述べた。

第6章では、実用的なX線結像光学系として、新・旧型Advanced KBハイブリッド結像光学系を新たに設計し、これを用いた2次元拡大結像実験を行った結果について述べた。また結像ミラーの設計および光学素子開発結果について述べた後に、SPring-8にて実施した2次元拡大結像実験結果について述べた。

第7章では多層膜ミラーによるX線結像光学系の空間分解能向上を目的として、原理検証および実証実験を行った結果について説明した。全反射ミラーにおける空間分解能の限界および多層膜反射の利用による色収差への影響について考察した後に、Advanced KBミラーを用いた多層膜結像の実証実験結果について述べた。

最後に、第8章では本論文を総括し、将来展望について述べた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 山 田 純 平 )			
	(職)	氏	名
論文審査担当者	主 査	教授	山内 和人
	副 査	教授	桑原 裕司
	副 査	准教授	佐野 泰久
	副 査	教授	安武 潔
	副 査	教授	山村 和也
	副 査	教授	遠藤 勝義

## 論文審査の結果の要旨

X線顕微鏡は、厚い試料の内部構造を高い空間分解能で観察可能な技術である。加えて、散乱X線、蛍光X線、透過X線などのX線分析技術を応用することにより、試料の化学状態や元素組成までも高空間分解能に観察することが可能である。これらの点でX線顕微鏡は、光学顕微鏡や電子顕微鏡などの他の顕微観察技術に比べて傑出した可能性を秘めている。しかしながら、X線光学素子の高精度な作製の困難さから、X線顕微鏡の開発には大きな障壁があった。近年の超精密加工技術の発展と共に、要求精度を満たすX線光学素子の利用が可能となってきたが、未だその開発は途上段階であり、それらを用いるX線顕微鏡のための光学技術も可視光分野の後塵を拝している。

本論文は、X線の優れた特性を真に引き出す顕微手法として、X線ミラー光学素子を用いた結像型X線顕微鏡の構築を目的とし、そのために超精密加工技術によるミラー光学素子の開発から、新たなX線結像光学系の光学設計および原理実証、高分解能X線結像光学系の構築に関する結果をまとめたものである。

X線光学素子及びX線顕微鏡に対する理解のもと、現状の問題を解決し得る「小型かつ大拡大倍率を実現する凹・凸面鏡組み合わせに基づくAdvanced Kirkpatrick-Baezミラー光学系」を提案している。本光学系では、従来のミラー光学素子の常識にとらわれることなく、凸面鏡や2枚の鏡の対向配置といった概念を導入し、光学系の実効焦点距離を短くするという着想に基づいている。幾何光学・波動光学シミュレーションにより、新たな光学系の性能予測を綿密に行うことで、優れた光学性能と高い実現可能性を示している。

ミラー光学素子の作製は、自ら開発した数値制御イオンビーム加工システムを用いて行っている。本加工システムでは、イオンビームの特性を活かすことで、高加工精度・高加工能率が実現されている。これにより、新たな光学系のためのミラー光学素子を、表面の形状精度2nm PV以上という非常に高い精度で作製することに成功している。

作製したミラー光学素子を用いて行われた、新たな光学系の実証実験では、波動光学計算による性能予測に基づきシングルグレーチング干渉計によるX線波面計測を駆使したアライメント調整を実現している。その結果、2mというコンパクトなセットアップの内に半値幅42.7nmのほとんど回折限界分解能を実証可能であることを示した。また、拡大結像実験においては、全長2mという高い汎用性、高い時間安定性、色収差無しといった優れた性能のもと、15 $\mu$ m以上の広い視野で最小線幅50nmを解像することに成功している。

以上のように本論文は、超精密加工技術によるミラー光学素子の開発から、新たなX線結像光学系の光学設計および原理実証、X線ミラー光学素子を用いた結像型X線顕微鏡の構築に成功したものである。開発したX線顕微鏡及びX線光学系は、高分解能多元素同時分析や厚い試料の3次元元素マッピングなどに役立つと期待されており、様々な化学分野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。