

Title	高精度形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光光学系の開発
Author(s)	中森, 紘基
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61778
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (中森紘基)

論文題名

高精度形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光光学系の開発

論文内容の要旨

第1章では本論文の背景および目的について述べ、アダプティブ光学素子である形状可変ミラーの現状について述べた。

第2章では、従来の光学素子における問題点を示し、形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光光学系の設計について述べた。また、波動光学シミュレーションを用いた可変集光の実現可能性を検討した。形状可変ミラーの形状修正に用いる計測方法を検討し、ペンシルビームスキャンを採用することを決定した。

第3章では、アダプティブ集光光学系の光学素子である圧電素子駆動型の高精度形状可変ミラーの開発について述べた。高精度に変形可能な形状可変ミラーの構造の検討と、圧電素子上電極の最適化を行った。また、キネマティックにミラーの支持と電圧印加用電極の接触を行うためのミラーホルダの開発も行い、干渉計を用いた形状フィードバック制御を用いて形状可変ミラーの性能評価を行った。

第4章ではアダプティブ集光実験で用いる装置の開発について述べた。まず波動光学シミュレーションを用いて光学系の許容アライメント誤差を求め、装置設計の指針を得た。設計指針に基づきミラーのアライメントを行うマニピュレータや、焦点位置に設置するビームモニタ・サンプルステージを搭載したスキャンユニットを設計・製作した。ペンシルビームスキャンを高精度に行うため、ビームモニタを開発し、性能評価により形状可変ミラーの形状誤差を計測するための性能を満たしていることを確認した。

第5章では、SPRING-8において、これまでに開発した形状可変ミラーおよび集光システムを用いて行った3種類の集光実験について述べた。2枚の形状可変ミラーを用いたアダプティブKBミラー集光光学系を構築し、ペンシルビームスキャンの計測結果に基づき各ミラーの形状誤差を修正した。その結果、ほぼ回折限界の集光径が得られた。また、2種類のアダプティブ二段一次元集光実験を行い、二段光学系の調整手順を確立し、また二段光学系において波面補償が有効に機能することを示した。以上のことより、二段アダプティブ集光光学系による可変集光実験を行うための手順を確立した。最後に、これまでに発表されている論文を引用し、4枚の形状可変ミラーを用いた二段アダプティブ集光実験について紹介した。

第6章では、本論文の総括を行った。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (中森紘基)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	山内和人
	副 査	教授	遠藤勝義
	副 査	准教授	佐野泰久
	副 査	教授	安武潔
	副 査	教授	森田瑞穂
	副 査	教授	桑原裕司
	副 査	教授	森川良忠

論文審査の結果の要旨

放射光X線を光源としたX線顕微鏡は、高精度な集光光学素子と組み合わせることで数ナノメートルの分解能を達成している。各種集光光学素子のなかで、とくにX線集光ミラーは高集光効率・長作動距離・大開口といった優れた特徴をもち、X線顕微鏡に多く用いられている。X線集光ミラーは表面に非球面形状を高精度に作り込むことで回折限界集光を可能としているが、集光径や焦点距離などの光学パラメータは固定されており、その使用には制限がある。X線顕微鏡のさらなる発展には、光学パラメータ可変なアダプティブ集光光学系が必要不可欠である。近年、反射面の形状を変形することで光学パラメータを変化させる形状可変ミラーが研究されているが、その変形性能は回折限界集光を可能とするレベルには達していない。

本論文はX線領域におけるアダプティブ光学を開拓し、回折限界条件下でアダプティブ集光の実現を目指すものであり、光学系設計、光学素子と装置の開発、ミラー調整、集光手順をまとめたものである。

X線顕微鏡に適用するアダプティブ集光光学系は、焦点距離を変えずに回折限界条件下で集光径を変更できることが望ましい。それを実現するため、一次元で2枚の形状可変ミラーを用いた二段光学系を提案している。本光学系では、100 nmから1.5 μm まで集光径を変化させることが可能である。

本光学系において回折限界集光を達成するには、形状可変ミラーの表面形状を4 nm以上の精度で制御する必要がある。形状可変ミラーの駆動源は圧電素子であり、集光のために非球面形状に変形するには、分布を持った電圧を印加する必要がある。そこで圧電素子上に多数の電極を配置した構造を提案し、各電極に印加する電圧を制御することで、2 nmというこれまでにない高精度で非球面形状に変形可能な形状可変ミラーを開発している。

X線集光実験には高いアライメント精度が必要とされるため、波動光学シミュレーションによる許容アライメント誤差の検討を行い、その結果に基づき実験装置の開発を行っている。また、形状可変ミラーの形状計測にはAt-wavelength形状計測法の一つであるペンシルビームスキャン法を採用し、回折限界集光が可能な計測精度を持つシステムの構築を実現している。これらシステムを用い、2枚の形状可変ミラーを用いた二次元アダプティブ集光実験を行い、形状可変ミラーを用いた最小集光かつ世界初の回折限界集光を達成している。また、二段一次元アダプティブ集光実験を行い、二段光学系の調整手順を確立し、また、波面補償機能も有効に機能するシステムの構築に成功している。

以上のように、本論文は回折限界集光を可能とする高精度形状可変ミラーを開発し、アダプティブ集光光学系の構築を行い、その調整・集光手順の確立を行ったものである。本光学系は、X線顕微鏡の発展だけでなく、次世代光源であるX線自由電子レーザーや、既存の第3世代放射光のユーザーフレンドリー化に大いに貢献すると期待されており、本論文は精密科学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。