



Title	回折限界条件を満たすX線アダプティブ集光光学系の開発
Author(s)	後藤, 拓実
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69553
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名(後藤拓実)	
論文題名	回折限界条件を満たすX線アダプティブ集光光学系の開発
論文内容の要旨	
<p>X線自由電子レーザー施設が稼動したことに加え、第三世代放射光施設の改良計画が進められていることから利用可能なX線光源は高輝度化されつつある。これらの優れたX線光源を最大限活用するために重要な技術であるのがX線集光技術であり、高感度・高分解能な分析をおこなうためには欠かすことができない。近年の精密計測、精密加工技術の発展に伴い、非常に高性能な集光光学素子が開発され、回折限界と同等サイズのX線の集光ビームの形成を行うことが可能となった。しかし、既存の集光光学素子は、用途に合わせて設計作製されたものであるため、汎用性にかける。そのため、試料の大きさに合わせたサイズの集光ビームの照射や、さまざまな分析手法を同一の光学系で行うことはできない。本論文は、多機能な集光光学素子として高精度に形状を変形することが可能な形状可変ミラーを新たに作製し、それらを用いて、装置構成を変えることなく回折限界条件を維持しながらビームサイズを変更することが可能なX線アダプティブ集光光学系の開発を行った成果についてまとめたものである。</p> <p>第1章では、研究の背景および目的について述べた。</p> <p>第2章では、本研究の開発目標であるアダプティブ集光光学系として二段開口数可変光学系を提案し、そのビームサイズ可変の原理について述べた。</p> <p>第3章では、二段開口数可変光学系を構成する光学素子である圧電素子一体型形状可変ミラーの変形原理を述べた。また開発した圧電素子駆動型形状可変ミラーを干渉計により構成された形状変形システムを用いて変形試験を行ったところ回折限界条件を満たす変形精度を有していることを確認した。</p> <p>第4章では、開発した形状可変ミラーの時間安定性の向上に関する研究について述べた。干渉計を用いたミラー形状のドリフト計測の結果、圧電素子への印加電圧の大きさに応じてドリフトの総量は比例して大きくなるが、ドリフトの収束時間は印加電圧に依存しないことが示された。また、目標電圧印加前に超過電圧を適切な時間印加することで電圧印加後から100分以降は回折限界条件を満たす精度で形状を安定させることに成功した。</p> <p>第5章では、最終的な変形精度を決定する高精度at-wavelength形状計測システムの開発について述べた。計測手法としてX線ペンシルビームスキャン法を採用し、必要精度を満たすための設計指針を得るために1次元の波動シミュレーションを行った。得られた設計指針に基づきX線ビームモニターを開発した。X線ビームモニターの性能評価実験の結果、回折限界条件を満たす精度で、集光ミラーの計測を行えることを確認した。</p> <p>第6章では、開発した形状可変ミラーを用いて二段階口数可変光学系を構築し行ったX線の集光実験およびコリメート光形成実験の結果について述べた。ミラーの開口数を制御することで、水平方向で108 nm ~ 560 nm、垂直方向で165 nm ~ 1434 nmという3つの異なるサイズの回折限界に近いサイズの集光ビームの形成に成功した。</p> <p>第7章では、長尺形状可変ミラーの開発を目指し、新たなX線アダプティブ集光システムの設計検討を行った結果について述べる。X線アダプティブ集光システムは、機械曲げ機構と長さ400 mmの圧電駆動型ミラーによる2つの変形機構を有しており、まず機械曲げ機構により大きな形を変形させた後、残った短周期形状の誤差を圧電駆動型ミラーによって修正する。開発したX線アダプティブ集光システムを用いて変形試験を行った結果、回折限界条件を満たす精度で目標形状へと変形させることに成功した。</p> <p>第8章では、開発したX線アダプティブ集光システムを用いてX線の集光実験を行った結果について述べた。2つの異なる入射角を持つ光学系を設計し、一次元集光実験をおこなった。集光実験の結果回折限界条件を維持しながら127 nmと253 nmという異なるサイズの集光ビームを形成することに成功した。また2台のX線アダプティブ集光システムをKirkpatrick-Baez配置をすることで二次元集光実験を行い両方向とも理想集光サイズに近い集光ビームの形成に成功した。集光性能の確認後、タンタルのスターチャートパターンを操作型顕微法により測定したところ、最小構造の100 nmの構造を分解できることに加えて、1時間の測定でも非常に明瞭な像を取得することができ、安定したX線ビームの供給を行うことができることを確認した。</p> <p>第9章では、本論文の総括を行っている。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名(後藤拓実)	
論文審査担当者	(職) 氏名
	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 山村 和也
	副査 教授 萩 博次
	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

放射光施設や、X線自由電子レーザー(XFEL)などのX線光源を最大限活用するために必要不可欠な技術がX線集光技術である。しかし、既存のX線集光光学素子は、それぞれの用途に合わせて設計・作製されているため、集光径は固定されており、汎用性がないため、光学系の利用には制限がある。そこで、今後のX線集光光学系の発展のために、実験系に応じて任意に集光径を変更できるX線アダプティブ集光光学系の構築がもとめられている。本論文は、回折限界条件を維持しながら、可変集光を実現可能なX線アダプティブ集光光学系を目指すものであり、光学系設計、光学素子の開発、ミラー調整手法、集光性能の評価についてまとめたものである。

開発を行った集光光学系は、一次元に2枚、計4枚の形状可変ミラーを用いた二段の光学系であり、ミラーの開口数を制御することで焦点位置を変えることなく、回折限界条件を維持しながら、集光径を変更することができる。この集光光学系を構成する光学素子として圧電素子駆動型ミラーの開発を行い3 nmの精度で非球面形状の創成に成功している。また、圧電素子のドリフト現象により生じるミラー形状の時間安定性の悪化について調査を行い、目標電圧を印加する前に、一定時間超過電圧を印加することで、ミラー形状を2 nm以下の精度で安定させる手法を確立している。次に、形状可変ミラーのビームライン中の形状調整法として、X線ペンシルビームスキャン法による形状計測結果に基づく形状修正法を提案し、波動光学シミュレーションに基づく計測精度の検討を行い、その結果から、X線の位置決めを行うビームモニターの開発を行うことでPV 1nmの計測精度を持つ形状計測システムの構築を実現している。そして、放射光施設 SPring-8において、集光光学系を構築し、集光実験を行い、その結果、ミラーの開口数を制御することで、108 nm～1434 nmの回折限界と同等サイズの可変集光に成功している。さらに、X線アダプティブ集光光学系の更なる応用展開のために、ミラーの長尺化かつ時間安定性の向上を目指し、機械曲げ機構と圧電素子駆動型ミラーを組み合わせたハイブリット変形機構をもつ形状可変ミラーの提案を行い、回折限界条件を充分に満たすミラーを開発している。また、ハイブリット変形機構をもつ形状可変ミラーを用いて、SPring-8にて集光性能の評価を行い、回折限界と同等サイズの集光径の形成を実現している。

以上のように、本論文は回折限界条件を満たす精度で動作可能な、形状可変ミラーの開発と、それらを用いてX線アダプティブ集光光学系の構築および、その調整手法の確立を行い、回折限界を満たす条件での可変集光を実現可能な集光光学系の開発に世界で始めて成功している。今回構築したアダプティブ集光光学系は、実験装置の構成を変更することなく、測定条件や、試料サイズに最適な集光径を選択供給したX線分析装置の構築が可能となる。これにより、次世代の高輝度放射光源における新たなX線分析法の開拓や、XFELのようなビームライン数の少ない施設での利用・応用展開に大きな貢献が期待でき、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。