

## 論文の内容の要旨

論文題目 回転楕円ミラーによる軟X線レーザー集光システムの開発

氏名 本山 央人

本学位論文は、回転楕円ミラーを用いた軟X線レーザー集光技術開発に関連して行った一連の研究をまとめたものである。

軟X線とは、波長1~30 nmの光のことを指し、短波長性・高エネルギー性を利用して、分野を問わず重要な分析ツールの一つとして認識されている。2000年代に入り、X線をレーザー化するいくつかの技術が成熟し、現在ではコヒーレントX線を利用した実験の実施が可能となった。アト秒パルスを発振する高次高調波軟X線レーザーや、高輝度軟X線を発振するX線自由電子レーザーが、その代表例である。

軟X線分析において、軟X線をサンプルに照射した際に発生する光電子や透過光を検出することで、物質の内部構造や電子状態を解析することができる。分析手法の空間分解能向上・広波長帯域集光・SN向上を目的として、軟X線は集光素子によりビームサイズを微小化した状態でサンプルに照射される。

軟X線を集光するための素子には、反射を利用するKirkpatrick-Baez ミラーや部分楕円ミラーが、回折を利用するものとしてゾンプレートが、多層膜反射を利用するものとしては多層膜放物面ミラー等が、それぞれ実用化されている。しかしながら、いずれの集光素子を利用したとしても、先に示した分析技術の向上に関連した3要求をすべて満たすことは困難であった。

本論文では、高い集光性能を有する軟X線集光素子として、回転楕円ミラーに着目し

た。開口が大きいため微小集光が可能であり、また反射を利用するため集光性能は波長に依存せず広波長帯域で使用することができる。また、ビーム受光面積も広いため、ビーム利用効率も高い。これらの性質から、空間分解能の向上・広波長帯域集光・SN向上が、回転楕円ミラーを利用することで可能となる。

本論文では、近年技術開発が急速に進められている、高精度回転体ミラー製作プロセスにより製作された回転楕円ミラーを利用する。本プロセスでは、回転楕円ミラーの母型となる石英製のマンドレルを高精度に加工し、マンドレル形状をミラー材料へと精密に転写することで、高精度回転体ミラーの製作を実現している。形状精度100 nm以上の、極めて形状精度の高い回転楕円ミラーの製作に成功している。

コヒーレント軟X線光源と高精度回転楕円ミラーを組み合わせることで、軟X線ビームを波長と同レベルの領域にまで回折限界集光可能であることが数値計算により示唆されている。本研究は、回転楕円ミラーによる軟X線回折限界集光ビームを形成し、軟X線利用技術を大幅に高度化することを目的として行われたものである。

第2章では、回転楕円ミラーの集光性能を回折積分で計算する波動光学シミュレータを開発した。ミラー表面あらわれる形状誤差の影響を考慮した集光性能の評価が可能であり、形状精度と集光性能の関係を定量的に解析した。実際の回転楕円ミラーの形状精度と解析結果を比較し、ミラー面上の軟X線照明領域を制限することで、回転楕円ミラーによる軟X線集光が可能であるとの結論を得た。また、回転楕円ミラーの実利用を想定し、ミラーの必要設置精度を波動光学シミュレータで解析した。その結果、市販のアライメント調整機構を用いることで、回折限界集光に必要な回転精度を満足することができるとの結論を得た。第2章全体を通して、回転楕円ミラーによる軟X線集光の実現に対して、理論的根拠を与えた。

第3章では、回転楕円ミラーによる軟X線レーザー集光システムを開発した。波長800 nm、パルス幅 $\sim$ 40 fsの高強度フェムト秒レーザーをヘリウムガス雰囲気中に集光し、波長10 $\sim$ 20 nmの帯域において軟X線レーザーを発生する。半無限ガスセル方式を採用することで、強度変動を数%以下に抑えた、安定な軟X線レーザービームラインを整備した。ビームライン最下流にはパルスステージで構成した回転楕円ミラーアライメントユニットを配置し、入射した軟X線の集光調整を実施した。集光調整の結果、反射型素子を用いた高次高調波集光としては世界最小である、420  $\times$  400 nmの集光サイズを計測した。また、ミラーに起因するパルス幅のチャープ量は13 as程度と見積もられ、パルス幅が50 asに迫る先端高次高調波レーザーの微小集光に回転楕円ミラーが非常に適しているとの知見を得た。

第4章では、日本のX線自由電子レーザー施設SACLAにおいて、軟X線自由電子レーザー集光システムを開発した。施設にインストールされているKBミラーと回転楕円ミラーから構成される二段集光配置を考案し、コンパクトかつ高効率な軟X線微小集光システムを設計した。回転楕円ミラーの製作に先立ち、ミラー材料の自由電子レーザー照射耐性

を調査した。調査結果にもとづき回転楕円ミラーを設計・製作し、軟X線自由電子レーザービームラインの実験ハッチにおいて、集光システムを構築した。実験の結果、光子エネルギー100 eVの軟X線を540 × 500 nmの領域に集光し、 $10^{16}$ W/cm<sup>2</sup>を超える集光強度密度を生成することに成功した。また、回転楕円ミラーによる集光ビームを利用することで、Siの軟X線可飽和吸収を初めて観測した。

第5章では、回転楕円ミラーの中空形状に起因する、光軸付近の光を反射することができない、という課題を解決するための新たな集光光学系を提案した。入射した軟X線をリング集光ミラーと呼称する非球面ミラーで反射することで、リング状強度分布を有する軟X線ビームを形成する。その後、回転楕円ミラーと類似の形状をもつ準回転楕円ミラーと呼称する回転体ミラーにより、軟X線を集光する。いずれのミラーも、一般的なものではないため、光線追跡をベースとした光学設計手法を独自に考案し、ミラー形状を導出した。また、具体的な軟X線光源としてSACLAの軟X線自由電子レーザーを想定し、実験スペースを考慮した集光光学系を設計した。光線追跡・波動光学計算の両方の光学シミュレーションを行うことで、提案した集光システムを用いることで、軟X線の高効率微小集光が実現可能であることを示した。

第6章では、回転楕円ミラーの全面形状を高精度化するための、回転体ミラー内面成膜プロセスを開発した。回転体ミラーの内側に先端を斜めにカットしたロッド状ターゲットを挿入し、ミラー外側から照射したイオンビームでターゲットをスパッタすることで、ミラー内面にスパッタ成膜を施す。平面基板上へのイオンビームスパッタ成膜実験を行うことで、スパッタ成膜の基本的な性能を確認した後、回転体ミラー内面成膜セットアップを構成した。実験を実施した結果、想定取りミラー内面に成膜を施すことに成功し、さらに成膜領域を円周方向にスキャンすることで、円周方向に任意の形状を成膜加工することに成功した。これらの結果をふまえて、回転体ミラーの円周形状修正実験を行った結果、形状精度をPV 160 nmからPV 80 nmに改善することに成功した。

以上、本学位論文では、回転楕円ミラーを用いた軟X線レーザー集光に関する研究を行った。回転楕円ミラーの集光性能を数値計算により定量的に明らかにした。その後、回転楕円ミラーのもつ高い軟X線集光性能を、高次高調波・軟X線自由電子レーザー集光実験により示した。また、リング集光ミラーと準回転楕円ミラーから構成される新規集光システムを考案し、回転楕円ミラーの中空形状に起因する軟X線照明方法の問題を解決した。最後に、回転楕円ミラーの形状を高精度化するための回転体ミラー内面成膜プロセスを開発した。

本研究の成果は、軟X線利用研究・軟X線光学の発展に大きく貢献するものである。