

審査の結果の要旨

論文題目： 軟 X 線回転楕円ミラー用マスターマンドレルの超精密加工計測プロセスの開発

氏名 武井良憲

X 線光電子分光、X 線吸収分光などの多くの X 線分析法において、X 線集光は、試料照射強度の増大と高い空間分解能での観察のために不可欠である。ミラーによるナノ集光技術が確立された硬 X 線領域と比べ、軟 X 線領域ではミラーによる集光技術は確立していない。その中で、回転楕円ミラーは、理論的に 70%以上の高効率で軟 X 線のナノ集光が可能であるため、理想的な集光素子として考えられている。しかし、可視領域ではミラーによる理想集光は容易であるが、波長が短い軟 X 線領域では、表面粗さ、形状、それぞれ 2nm(RMS)、0.2nm(RMS)レベルの極めて高い精度、平滑性が必要なため、実用可能な回転楕円ミラーは実現されていない。現在、回転楕円ミラーは、反転形状を有するマスターマンドレルを高精度に形状転写し作製する手法が提案されている。近年、転写技術の精度向上により、回転楕円ミラーの精度はマスターマンドレルの精度で決定されることが明らかになってきている。

本学位論文は、こうした背景の下実施された、軟 X 線の回転楕円ミラー用マスターマンドレルの超精密加工計測プロセスの開発に関する一連の研究をまとめたものである。

第 1 章では、X 線集光ミラーに関する従来研究と比較し、回転楕円ミラーの特徴、マスターマンドレル作製の重要性について述べている。形状の特徴から、マスターマンドレルの精密計測法と精密加工法の開発方針を述べている。加工法としてノズル型 EEM(Elastic Emission Machining)を採用している。計測法として、高分解能の変位計を測定表面上で走査する手法を採用している。

第 2 章では、回転楕円ミラーのマスターマンドレルの表面の高精度加工システムについて述べている。ノズル型 EEM の加工原理、開発した加工装置、基本的な加工特性、マンドレル表面の形状を修正加工するためのアルゴリズムを説明している。本研究では、様々な構造をもつ加工ヘッドノズルを作製し、加工特性を調査している。ノズル噴流の流体解析により噴流特性と加工痕形状の関係を理解し、マンドレル加工に合わせた加工条件を検討している。一連の研究の結果、本研究は、微細穴ノズルの採用により、従来にない $\phi 100 \mu\text{m}$ の微小スポット形状を実現した。そして、マンドレルの長手方向の位置と回転制御によるマンドレル形状修正加工装置を完成させた。

第 3 章では、マンドレルの周方向を計測するための形状測定システムについ

で述べている。高精度回転ステージと分光干渉計方式の高分解能の変位センサーを採用し、測定データの平均化と運動誤差の反転法による補正により、 $1\text{nm}(\sigma)$ 以上の測定精度を実現している。さらに、本研究では、計測データに基づき $\phi 10\text{mm}$ の円柱マンドレルに形状修正加工を実施し、 $9.6\text{nm}(\text{p-v})$ の形状精度を達成している。

第4章では、マンドレル長手形状の計測法を開発している。測定手法は、同変位計を測定面上において1軸走査する方法である。回転楕円であるマンドレル形状に合わせたアライメント方法、測定手法を確立し、4つの変位計を利用することで、測定データに影響する走査ステージの運動誤差を大幅に低減させ、 $0.41\text{nm}(\sigma)$ の高い再現性を実現している。異なる条件での比較計測を行い、約 5mm 以下の空間波長領域において、同レベルの絶対的な精度を確認している。さらに、本研究は、円錐マンドレルの長手方向、長さ 30mm の1軸形状修正加工により、空間波長 1mm 以上において、 $1.83\text{nm}(\text{RMS})$ の精度を達成した。

第5章では、SPring-8軟X線ビームラインBL25SUにおける軟X線集光実験のための回転楕円ミラーを作製している。形状転写も含めた回転楕円ミラー作製プロセスと集光実験のための光学系、ミラー形状について述べている。第2章、第4章で開発した加工、計測システムを用いたマンドレル加工工程と最終的な形状精度を示している。本研究は、マンドレル上長さ 30mm 幅 1mm の領域において $3.2\text{nm}(\text{RMS})$ を実現した。このマンドレルを用いて回転楕円ミラーを作製し、SPring-8で 300eV の軟X線による集光実験を行っている。その結果、縦方向横方向それぞれ、半値幅 218nm 、半値幅 240nm の2次元集光サイズを確認している。この集光サイズは、ミラーによる軟X線集光において世界最小である。さらに、本研究は、マンドレルの加工領域、未加工領域が転写された2つの領域のX線反射像を比較し、加工領域のミラー表面においてX線反射像の強度変動の大幅な改善を確認した。これらの結果は、開発した加工計測システムが軟X線回転楕円ミラー作製に有用であることを証明している。

第6章では、第3章と第4章の計測システムを発展させ、1台でマンドレルの周方向プロファイルと長手方向プロファイルの両方を計測可能な装置を開発している。それらを組み合わせてマンドレル表面の3次元形状偏差分布の作成に成功している。さらに、第2章の加工システムを用いて、計測結果に基づいた3次元形状修正加工に成功している。本研究は、マンドレル表面の3次元形状誤差においても、 $2\text{nm}(\text{RMS})$ を達成可能なシステムを完成させた。

以上のように、本研究は、軟X線集光用回転楕円ミラー用マスターマンドレルの加工計測プロセスを完成させ、SPring-8での評価においてその有用性を証明した。本研究成果は、精密加工計測分野、X線光学分野に大きく貢献する。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。