

博士論文（要約）

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

武井 良憲

加工や計測の分野において、光は広く用いられている。加工や計測の分解能は、使用する光の波長程度であるので、性能向上のために、波長の短い X 線領域の光の利用研究が精力的に行われている。例えば、次世代半導体露光法の EUV リソグラフィーでは、波長が 13.6 nm の Extreme ultraviolet lithography(EUV)光を用いて、さらなる集積回路の微細化を目指している。また、SPring-8 等の放射光施設においては、波長 10 nm 以下の X 線を用いて物質の構造、組成、化学状態を解析している。

これらの性能向上のためには、光学素子の開発が重要である。X 線を集光により高強度化することで、様々な分析を行う際の検出限界の向上や観察時間の短縮を図ることができる。また、対象への照射領域を小さくすることで、分析の空間分解能を向上させられる。X 線・EUV 領域では、集光強度や色収差の観点から、反射型光学素子であるミラーが主に用いられる。光の波面を乱すことなく光源性能を十分に引き出すためには、ミラー表面において波長と同程度の形状精度が必要である。

回転体形状のミラーは、軟 X 線顕微鏡への利用が強く期待されている光学素子である。ミラー内面を必要精度に直接計測・加工することは困難であるため、ミラーの反転形状を持つマスターマンドレルを準備しその表面を転写するという 2 段階の工程で作製される。しかしながら、そのマンドレルは急峻な非球面形状であり、波長と同程度の精度で計測することも加工することも困難である。これまでに十分な作製精度は報告されていない。

本研究の目的は、軟 X 線集光用回転体ミラー作製の根幹であるマンドレルの急峻な非球面を、これまでに達成不可能であった Root Mean Square(RMS) 2 nm の形状精度で作製が可能な加工と計測のシステムを構築することである。そして、その実証として、形状精度 RMS 2 nm のマンドレルを実現することである。そのために、1 nm 単位で除去量を制御可能な超精密加工システムを開発した。また、マンドレルの周方向と長手方向それぞれを標準偏差平均 1 nm (σ)の再現性で計測可能なシステムを開発した。その結果、マンドレル表面の形状誤差を 0.1 nm の空間分解能で目標と同程度の精度で作製した。さらに、その表面を転写することで、軟 X 線を 200 nm の領域に集光可能な回転楕円ミラーを実現した。

本論文は全 7 章により構成されている。

第 1 章「序論」では、非常に高い形状精度が要求される X 線集光ミラーに関して述べ、その作製のための計測技術及び加工技術に関して述べた。また、急峻な非球面形状に対して同程度の精度で作製することが困難であることを述べた。そして、本研究の目的を述べた。

第 2 章「超精密加工システムの開発」の研究目的は、マンドレルの急峻な非球面を RMS 2 nm の形状精度で加工するための、数値制御加工システムを開発することである。まず、マンドレルの形状修正加工のための加工装置を開発した。加工手法はノズル型 EEM を利用しており、物理的なダメージを導入することなく、非接触に、長時間安定したレートで加工が可能である。次に、マンドレルを対象とした、数値制御による形状修正加工システムを開発した。ノズル滞在時間分布は、単位時間当たりの加工量分布とマンドレルの形状誤差から、

逆畳込み計算を行うことで算出される。その分布に従ってマンドレルを走査することで、除去加工可能な空間周波数成分に関しては、計測の再現性にまで、マンドレル表面の形状誤差が改善される。さらに、開口や構造の異なる複数のスリットノズルを作製し、加工特性を評価した。また、異なる吐出条件における加工特性を評価した。マンドレルの形状修正加工の際には、ノズルの開口を、除去対象の表面凹凸の周期に応じて選択する。最後に、微細穴ノズルを開発し、100 μm の微小領域のみの EEM 加工を可能とした。また、長期間継続的に加工が可能であることを実験的に確認した。これにより、マンドレル表面の 0.1 mm 程度の周期の表面凹凸の除去も可能となった。

第 3 章「マンドレル周方向の計測と加工」の研究目的は、周方向の形状プロファイルの高精度計測技術を超精密加工に応用し、そのプロファイルを RMS 2 nm の精度で作製可能なシステムを構築することである。まず、真円度測定機にレーザー変位計を導入し、マンドレル表面を非接触で計測可能とした。計測された周方向形状プロファイルに含まれる温度ドリフトの影響を、1 周後の計測プロファイルが等しいという拘束条件を用いて補正した。そして、複数回測定の平均処理を行うことで標準偏差を低減し、周方向形状プロファイル測定において繰り返し性 $< 1 \text{ nm}$ (σ) を達成した。さらに、反転法を用いて、回転ステージの運動誤差の影響は 7.6 nm (P-V) であることを確認した。この誤差プロファイルを、周方向形状プロファイルから除去した。また、第 2 章で述べた形状修正加工システムを用いて、計測された形状誤差プロファイルに基づいた形状修正加工を 2 回行うことで、対象の真円度 9.6 nm (P-V) (RMS 2.7 nm) を達成した。

第 4 章「マンドレル長手方向の計測と加工」の研究目的は、ステージの運動誤差や外乱の影響を受けにくい計測装置を開発し、その計測結果に基づいてマンドレルの長手方向の形状を RMS 2 nm 精度に改善可能なシステムを構築することである。まず、マンドレルと参照面を同時に計測する、3 本の変位計を走査方向と垂直に配置した装置を開発した。ステージの運動誤差や温度ドリフトや振動などの外乱の影響を受けにくい計測が可能であることを実証した。また、超平坦ミラーを利用することで、参照面の形状誤差が計測結果に及ぼす影響を補正可能であることを確認した。マンドレル計測において、0.14 nm (σ) の十分に高い繰り返し性が得られた。また、計測装置上でマンドレルの設置位置を変えて再計測したところ、0.41 nm (σ) の精度で同じプロファイルが得られた。このように、本装置を用いることで、マンドレル長手方向の急峻な非球面形状を高い再現性で計測可能となった。さらに、第 3 章で開発したマンドレル加工システムを利用して、計測結果に基づくマンドレル長手方向の形状修正加工を行った。形状誤差を RMS 6.1 nm から RMS 1.8 nm に改善することに成功し、高精度マンドレル作製における本計測システムの有用性を示した。

第 5 章「回転楕円ミラーの作製および集光性能評価」の研究目的は、マンドレルの表面形状を高精度に作製することで、軟 X 線を 100 nm レベルの大きさに集光可能な回転楕円ミラーを作製することである。回折限界集光可能なミラー作製のためには、まず、そのマスターとなるマンドレルをシングルナノメートル精度で作製する必要がある。長手方向に複数ラ

イン計測した結果に基づいて、微細穴ノズルを用いた高分解能な形状修正加工を行った。その結果、1 mm 以上の周期の表面凹凸の除去に成功し、形状偏差精度 RMS 3.3 nm を達成した。次に、Ni 電鍍法を用いてマンドレル表面を高精度に転写した。転写プロセスでは、高い転写精度を達成するために、室温の環境下における Ni 電鍍を行った。内部応力が小さくなるように陰極の電流密度を低く設定し、10 日間かけて電析を行った。そして、温水中で材料間の熱膨張係数の違いを利用して、ミラー-マンドレルを分離した。最後に、作製されたミラーの集光実験を、SPring-8 BL25 SU において行った。マンドレルの形状修正加工によって、ミラー内面の表面凹凸の程度が低減されており、反射する軟 X 線の強度変動が良く軽減していることを確認した。集光サイズは、鉛直方向（ミラーの長手方向に相当）は半値全幅 218 nm ・水平方向（ミラーの周方向に相当）は半値全幅 240 nm を達成した。これは、従来のミラーでは達成困難であった値であり、本研究の高精度形状修正加工システムの成果である。

第 6 章「マンドレル 3 次元形状偏差の計測と加工」の研究目的は、マンドレル表面の 3 次元形状誤差 RMS 2 nm を達成可能なシステムを確立することである。まず、マンドレルの周方向形状プロファイルと長手方向形状プロファイルの両方を計測可能とする装置を開発した。これにより、長手方向形状プロファイルを計測する際に置き直す必要がなくなり、光学素子としての非点収差の原因となる長手方向プロファイルの相対位置誤差が生じなくなった。次に、開発した装置を利用して、マンドレルの周方向形状プロファイルおよび長手方向形状プロファイルを要求精度で計測可能であることを示した。そして、温度ドリフト等の外乱の影響を受けないマンドレル 3 次元形状偏差分布の作成手法を考案し、実践した。最後に、計測されたマンドレル 3 次元形状偏差分布の形状修正加工を行った。初期の形状誤差 RMS 72.7 nm を RMS 4.6 nm に改善し、マンドレルの 3 次元形状偏差計測システムの有用性を示した。

第 7 章「総括」では、第 2 章から第 6 章までに得られた知見を要約して本論文の結論を述べた。本研究では、回転体マンドレルの高精度計測システムと加工システムを確立した。今後、高精度回転楕円ミラーの実現、ミラー内面計測システムへの応用、ウォルターミラーなどのマンドレルへの適応や工学基準の評価技術への応用が期待される。本研究の成果は、超精密加工・計測分野においては急峻な自由曲面形状を対象としたナノ精度加工・計測を実現可能とし、X 線光学分野においては従来にない理想的な集光ミラーを提供するなど、両分野に大きく貢献するものである。