

令和3年度 博士論文（要約）



高精度銅電鍍プロセスの開発と X線用回転体ミラーへの応用

指導教員 三村 秀和 准教授

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

学生証番号 37-187041

山口 豪太

本学位論文は、高精度電鍍プロセスの開発とその X 線用回転体ミラーへの応用に関して行った一連の研究をまとめたものである。

近年、光学素子や金型の分野では、加工物の形状精度として数～百 nm、加工面の粗さとしてサブ nm を目標とする超精密加工技術が利用されている。ダイヤモンド旋削や Elastic Emission Machining はその代表例である。一般的な超精密加工技術では、刃物や砥石、ノズルなどの工具を工作物表面に接触あるいは近接させた状態で加工を行う。このため、工具が届かない中空形状や、工具から受ける加工力で変形してしまう薄肉形状の高精度な加工は一般的に難しいとされる。工具を用いた直接加工が難しい中空・薄肉形状をもつ製品の作製では、製品の反転形状をもつ母型を転写する手法がしばしば用いられる。転写技術の中でも特に高精度なものとして、電鍍が位置づけられる。

電鍍は、電気めっきにより母型表面に形成した金属膜を剥離することで製品を得る手法である。作製精度の高さから、光学素子の作製にも電鍍は用いられてきた。光学素子に要求される精度は対象波長に依存し、波長の短い X 線用の光学素子では要求される形状精度は nm オーダになる。X 線用回転体ミラー（以下、回転体ミラーと呼ぶ）と呼ばれる光学素子は、中空・薄肉形状をもつため、しばしば電鍍により作製されてきた。回転体ミラーは、高精度を要求する電鍍のアプリケーションの中でも最たるものであるため、その作製を目的として、超精密加工技術による母型作製と、従来よりも高精度な電鍍転写技術を組み合わせた高精度電鍍プロセスと呼ばれる加工体系が開発されてきた。高精度電鍍プロセスは、サブ百 nm の形状精度で回転体ミラーを作製するための、現状唯一の手法である。電鍍により作製された回転体ミラーは、X 線顕微鏡・望遠鏡のキーデバイスとして用いられてきた。

従来の高精度電鍍プロセスでは、高精度を得る上で有利な優れた機械的性質と耐食性をもつニッケルが材質として用いられてきた。ニッケルが強磁性体であるため、ニッケル製回転体ミラーは試料周辺の磁場に影響しやすく、また逆に影響されやすい。この性質から、X 線顕微鏡分野の一部の用途、例えば X 線光電子分光法や磁性研究への電鍍製回転体ミラーの利用は難しいとされてきた。汎用性の高い回転体ミラーを実現するため、非磁性材料を用いかつ高精度な作製プロセスの開発が求められている。しかし、ニッケルやニッケル合金以外の電鍍を回転体ミラーの作製に用いた例はない。そこで本研究では、ニッケル電鍍を用いた従来法に代わる手法として、非磁性体でありかつ厚付けめっきが容易な銅を材質に用いた高精度銅電鍍プロセスの開発を目的とした。

第 2 章では、合成石英製母型から銅製回転体ミラーを作製する一連の工程を構築した。ニッケルと比較して劣る銅の機械的性質・耐食性が回転体ミラーの作製精度に与える影響を抑制したプロセスを開発した。プロセスの精度を評価した結果、ニッケル

電鍍と比較して銅電鍍ではより大きな形状誤差が発生し、さらに銅電鍍において得られる面粗さが電析条件に敏感であることを明らかにした。回転体ミラーの作製手法として銅電鍍がニッケル電鍍を代替するためには、電析条件の最適化による転写精度の向上が必要であるとわかった。

第3章では、形状誤差・面粗さ生成のメカニズムを調査し、電析条件を最適化することで銅電鍍プロセスの転写精度を向上させた。まず、銅電鍍およびニッケル電鍍において得られる皮膜の結晶形態と残留応力を調査した結果から、形状誤差・面粗さが、不均一な結晶形態に由来する不均一な残留応力分布に起因する可能性を指摘した。次に、結晶粒微細化および電鍍殻厚増加が、不均一な残留応力分布の影響を抑制し、精度向上に寄与することを明らかにした。一連の高精度化の取り組みの結果、高精度ニッケル電鍍プロセスと同等の 10 nm オーダの小さな RMS 形状転写誤差を得ることが可能な銅電析条件を見出した。

第4章では、第2章と第3章の取り組みにより構築された高精度銅電鍍プロセスを用いて軟 X 線用回転体ミラーを作製し、X 線自由電子レーザー施設 SACLA においてその集光性能を評価した。軟 X 線実験の結果、光子エネルギー 100 eV の光を、ニッケル電鍍製回転体ミラーによる実績値と同等の 400 nm×370 nm の領域に集光することに成功した。さらに、理想値にほぼ等しいスループットが得られた。以上の結果から、本研究において開発した高精度銅電鍍プロセスが、実用的な軟 X 線用回転体ミラーを作製できるだけの十分な転写性能を有していることが示された。高精度銅電鍍プロセスでは、高精度ニッケル電鍍プロセスと同等の集光性能をもち、かつ非磁性体材料製ゆえに汎用性の高い回転体ミラーを作製できると結論づけた。

以上、第2章から第4章の取り組みにおいて、高精度ニッケル電鍍プロセスを代替し、より汎用性の高い X 線顕微鏡用回転体ミラーを実現する技術として、非磁性体である銅を用いた高精度銅電鍍プロセスを確立した。一方、高精度銅電鍍プロセスの開発において得られた高精度化の指針は、従来手法であるニッケル電鍍プロセスにおいても有効であることがわかった。そこで、本学位論文では、高精度銅電鍍プロセスの開発において得られた成果を、X 線望遠鏡の主鏡として用いられる大口径な回転体ミラーの作製のための高精度ニッケル電鍍プロセスの開発に発展させた。

第5章では、X 線顕微鏡用の小型な回転体ミラー作製に用いられてきた高精度ニッケル電鍍プロセスを大型化することで、X 線望遠鏡の主鏡として用いられるウォルター I 型ミラーの高精度な作製が可能なプロセスを開発した。顕微鏡用ミラーと比較して数十倍大きな表面積をもつウォルター I 型ミラーを安定にかつ高精度に作製するため、従来よりも強力な気泡痕防止手法を開発するとともに、高精度銅電鍍プロセスの開発において見出した高精度化のアプローチを適用した。太陽観測用ウォルター I 型ミラーを作製し、その結像性能を光線追跡シミュレーションにより見積もった結果、

先行する欧米の研究グループと並ぶ、10 秒角オーダの高い角度分解能を得られることが示された。

以上のように、本学位論文では、従来よりも高度な高精度電鋳プロセスの開発と、X 線顕微鏡・望遠鏡の中核をなすデバイスである回転体ミラーへの応用に関する一連の研究を実施した。電鋳における形状誤差・面粗さ生成のメカニズムについて定性的な説明を与え、さらに高精度化のための方針を示した本研究は、電鋳技術全般の高精度化に寄与するものと考えられる。本学位論文の一連の成果は X 線光学と生産加工技術の両分野の発展に資するものである。