

審査の結果の要旨

論文題目：

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

氏名 山口 豪太

本論文は、高精度銅電鍍プロセスの開発とそのX線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。

第1章では、X線顕微鏡・望遠鏡の高性能化におけるX線回転体ミラーの役割について説明し、その製造プロセスの課題から研究目的を設定している。

X線回転体ミラーが高精度を要求する電鍍製品の中でも最たるものとして位置づけられる理由を述べ、X線回転体ミラーを実現するためにこれまで開発された高精度電鍍プロセスの概要を説明している。今後の課題としてニッケルの強磁性がX線回転体ミラーの応用を妨げていること、電鍍転写の精度向上が次世代X線望遠鏡開発に不可欠であることを挙げ、この二つの解決を本研究の目的としている。

第2章では、汎用性の高いX線回転体ミラーを実現する方法として非磁性体である銅を用いた高精度電鍍プロセスを提案し基礎検討を行っている。

高精度ニッケル電鍍プロセスをベースとして銅の物性の観点から最適化された工程を構築し、詳細な精度評価を実施している。その結果、ニッケル電鍍と比較して銅電鍍では、より大きな転写誤差が発生しさらに銅電鍍において得られる面粗さも電析条件に敏感であることを明らかにしている。X線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、転写精度向上が不可欠であると結論づけている。

第3章では、第2章を受け、電析物の微細構造観察に基づく電析条件の最適化を行い銅電鍍プロセスの転写精度向上を行っている。電鍍プロセスにおける形状誤差・面粗さの原因として残留応力の不均一性を挙げ、それが電析物の微細構造に由来する可能性があることを述べている。この着眼点から、銅電鍍およびニッケル電鍍の電析物の微細構造と電着応力の関係を詳細に調査し、その結果に基づき様々な電析条件を試験している。その結果、結晶粒径が小さいほど高い形状転写精度と良好な表面粗さを得られることを明らかにしている。結晶粒径が小さい条件では、粒径の不均一性に由来するミクロな応力のむらが平均化され、マクロな応力の不均一性が低減した結果、形状転写誤差・面粗さが小さくなったと推察している。一方で、電鍍殻厚が大きいほど高い形状転写精度が得られることも実験的に示している。これは、電鍍殻の厚さが増加したことで、外側の応力の安定した領域が増えた結果、もしくは粒径の不均一性に由来するミクロな応力の

むらがより平均化された結果、あるいはその両方により、形状転写精度が向上したと考察している。

一連の研究の結果、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 形状転写誤差と、軟 X 線ミラーのスループットに与える影響を無視できるほど平滑な RMS 0.6 nm の転写面粗さを得ることが可能な銅電析条件を見出している。また、この高精度化のアプローチはニッケル電鍍プロセスにおいても有効としている。

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銅電鍍プロセスを用いて、実際に軟 X 線集光用回転楕円ミラーを作製し、軟 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ている。

RMS 8.4 nm の形状転写精度で回転楕円ミラーを作製することに成功し、集光実験の結果、光子エネルギー 100 eV の軟 X 線を 400 nm × 370 nm の領域に集光することに成功している。さらに理想値にほぼ等しいスループットが得られている。

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 線回転体ミラーを作製できる十分な転写性能を有していることを示している。開発した高精度銅電鍍プロセス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ている。

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 型ミラーの作製が可能なプロセスを開発している。

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電鍍殻厚増加による高精度化のアプローチを適用している。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の実現が可能であることを示している。

X 線回転体ミラーは X 線顕微鏡・望遠鏡の中核をなすデバイスであり、本研究により達成された高精度電鍍プロセスの高度化が X 線光学の発展に与える影響は大きく、一連の成果は、精密工学分野と X 線光学分野の発展に大いに貢献するものである。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。