

## 精密加工・精密転写技術を組み合わせ 回転体型の高精度 X 線ミラーの製造技術を確立

### 1. 発表者：

三村 秀和（東京大学大学院工学系研究科 准教授）

夏目 佳春（夏目光学株式会社 代表取締役社長）

### 2. 発表のポイント：

- ◆開発した回転体型ミラーにより軟 X 線（注1）の高効率な集光に成功しました。
- ◆精密加工・精密転写技術を組み合わせ、従来にない超高精度な回転体型 X 線ミラー（注2）を実現し、軟 X 線分析法の性能が大幅に向上しました。
- ◆新技術「電鋳法」（注3）により、ミラー製造の低価格化と量産化が可能になり、高性能な X 線分析機器や半導体製造・評価装置用の光学素子等への展開が期待されます。

### 3. 発表概要：

目に見える可視の光を反射するミラーは容易に作れますが、レントゲン等で用いる目に見えない X 線を反射するミラーは簡単には作ることができません。東京大学大学院工学系研究科（以下、東京大学）の三村秀和准教授、夏目光学株式会社（以下、夏目光学）の夏目佳春社長らは共同で軟 X 線（注1）を微小に集光可能な、従来にないタイプの高精度回転体 X 線ミラー（注2）の開発に成功しました。このミラーは、チューブ形状をしており内側が X 線を反射する面になります。

本研究では、ミラー形状と反転形状を持つ型を高精度に作製し、同じ精度で形状をコピーすることでミラーを作製する方法を開発しました。夏目光学の超精密ガラス加工技術と東京大学の超精密転写技術を組み合わせることで開発に成功し、大型放射光施設 SPring-8 において高効率な理想的な軟 X 線集光性能を確認しました。

本研究成果である高精度回転体 X 線ミラーを使うことにより、未知の物質内部の構造や元素を高い分解能で観察することが可能になります。このミラー製造技術は、X 線用のミラーに限らず、情報通信や半導体機器用のミラーの製造にも展開が可能であり、日本の精密ものづくり分野に貢献することが期待されます。

本研究成果は、2019年3月13日～15日に東京電機大学（東京都足立区）で開催される2019年度精密工学会春季大会にて発表されます。

### 4. 発表内容：

#### <研究の背景と目的>

病院でのレントゲン撮影で用いられる X 線は、医療におけるレントゲン撮影だけでなく、最先端の科学技術において、物質の構造、組成、化学状態の分析するための不可欠な「光」です。X 線は、1898年にレントゲンにより発見されて以降、多くの研究者の努力により、X 線光源およびその X 線光源を利用した分析技術が進展し、生体細胞を含む様々な未知の物質の内部構造をナノメートルの分解能で観察することが可能になりました。

SPring-8 に代表される大型の放射光施設は、極めて明るい X 線の利用が可能な施設です。ここでは、未知の蛋白質の結晶構造解析や電池に使用される触媒材料の分析など、世界最先端の研究が多く行われています。X 線による観察の成否は、物質に照射する X 線の強度が大きく影響します。X 線の照射強度が強いと物質に照射した際に発する信号が強くなります。そのた

め、国内外において、SPring-8のような大型な放射光施設において、日々X線の強度の向上が行われています。その強度向上に不可欠なのがX線ミラーです。

このX線ミラーには極めて高い精度が必要ですが、波長が1nm以上の軟X線領域のミラーは未だ実現されていませんでした。その理由は、軟X線ミラーは非球面という特殊形状かつ大きく湾曲しており、今までミラーの作製技術が確立していないことにありました。

本研究において、東京大学と夏目光学株式会社は、7年という歳月をかけ、新しいタイプの「軟X線」用集光ミラーの開発に成功し、SPring-8の放射光によりその性能を確認いたしました。

### <研究内容と成果>

新しいタイプのX線集光ミラーはチューブ形状をしており、図1に示すように、ミラー内面をX線が反射し集光します。このミラーは「回転楕円ミラー」と呼ばれており、楕円関数を一回転した形状になります。波長の短いX線は、ミラー表面にわずかな凸凹があると、きれいに反射してくれません。このミラーの内側の表面にも、極めて高い精度が要求されます。しかしながら、このミラーの内側を精密に加工することは、工具が入らないこともあり、現在のあらゆる加工技術を用いても不可能です。

そこで東京大学の三村准教授は、精密なコピー（転写）技術による作製を提案しました。形状をコピーする「電鋳法」（注3）という手法は、金型の作製など工業的に多く利用されていますが、従来の方法の転写精度はX線ミラーに必要な精度には到底およびませんでした。今回、東京大学における長年の研究により転写精度が10倍～20倍向上し、ミラーの作製が可能になりました。

X線ミラーの作製プロセス（図2）では、作製したいミラーの反転形状を持つマンドレルと呼ばれる「型」を作製し、その表面に1mm程度の厚さになるまで金属をめっきします。金属とマンドレルを分離した結果、マンドレルと同等の精度をもった回転楕円ミラーが実現します。「型」の高精度化も重要であり、夏目光学株式会社の超精密ガラス加工技術を高度化することで実現しました。

ミラーの精度を測るための精度評価の指標の一つである真円度により、マンドレルと回転楕円ミラーの転写精度を比較したところ、10nm程度の精度で一致しており、従来にない極めて高い転写精度であることがわかりました（図3）。

本研究グループは新しく開発した回転体ミラーの性能を評価するため、兵庫県西播磨にある大型放射光施設SPring-8 BL25SUで、波長4nmの軟X線の1 $\mu$ m以下のサイズの集光を確認いたしました。直径約10mmの大きさの軟X線を直径1 $\mu$ mサイズに集光しており、集光ビームの強度は非集光に比べて1万倍となりました。

### <今後の展開>

今回の結果は、高精度なものづくりとX線集光の両方の面で大きな成果になります。

ものづくりの観点からは、極めて高い精度の部品がコピー技術の一つである電鋳法により実現したことです。これまで、こうしたコピー技術で作製された部品の精度はマイクロメートルオーダーとされており、その常識を覆しました。労力とコストが必要な超精密な部品製造において、本研究により低価格化と量産化が可能となりました。

X線集光の観点からは、軟X線においては、回転体ミラーによるサイズ1 $\mu$ m以下の集光方法が実用化されたこととなります。軟X線は、車や自動車などに不可欠な電池材料やハードディスクで使用される磁気材料などの分析に重要な光です。実現した軟X線集光技術により、こうした材料の分析において、より細かく、より感度高く観察ができるようになります。

現在、回転楕円ミラーを評価したSPring-8 BL25SUでは、SPring-8-IIなどの次世代放射光

光源に向けた X 線光学素子、光学系の開発が精力的に進められています。実際、この回転楕円ミラーは、東北地方で建設が計画されている「次世代軟 X 線放射光施設」での利用が強く期待されています。紹介した回転楕円ミラーのような回転体型タイプのミラーは最先端の軟 X 線の光源性能を最大限に活かすことができます。

## 5. 発表：

2019年3月13日（水）～15日（金）に東京電機大学（東京都足立区）2019年精密工学会春季大会にて詳細が発表されます。

[http://www.jspe.or.jp/event/jspe\\_meeting/2019-03spring/](http://www.jspe.or.jp/event/jspe_meeting/2019-03spring/)

## 6. 問い合わせ先：

<研究内容に関すること>

東京大学大学院工学系研究科 精密工学専攻  
准教授 三村 秀和（みむら ひでかず）

夏目光学株式会社 テクノロジーセンター  
所長 橋爪 寛和（はしづめ ひろかず）

<報道担当>

東京大学大学院工学系研究科 広報室

夏目光学株式会社  
管理本部長 本田英則

## 7. 用語解説：

注1：軟 X 線

X 線は、波長が短い光である。波長が1オングストローム近傍の X 線を「硬 X 線」、波長が1nm 近傍の X 線を「軟 X 線」という。軟 X 線は、材料の中でも酸素、炭素、などの軽元素の分析に良く使われる。

注2：回転楕円ミラー

楕円関数において、その長軸を中心に回転楕円関数を1回転して得られる立体形状を持つミラー。楕円関数の二つの焦点の一つを光の光源点とすると、もう一つの焦点に光が集まる。楕円関数の性質から光源からの光線はすべて焦点に集光されることになる。

注3：電鋳法

めっき技術を応用した形状転写手法。目的とする形状の反転形状を持つ型の表面に、金属を厚くめっきし、それを分離し目的とする製品を得る方法。ニッケルや銅がめっき材料として用いられる。金型製造などにおいて不可欠な技術の一つ。

8. 添付資料

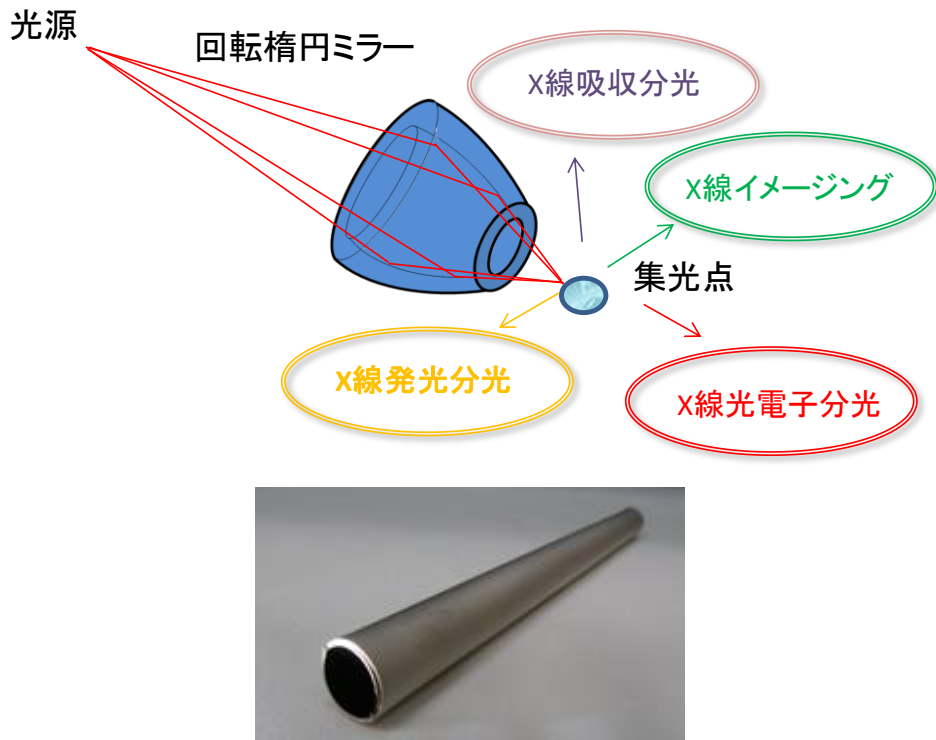


図1 回転楕円ミラーによる軟X線集光  
表面転写技術である電鍍により作製された超高精度ミラー

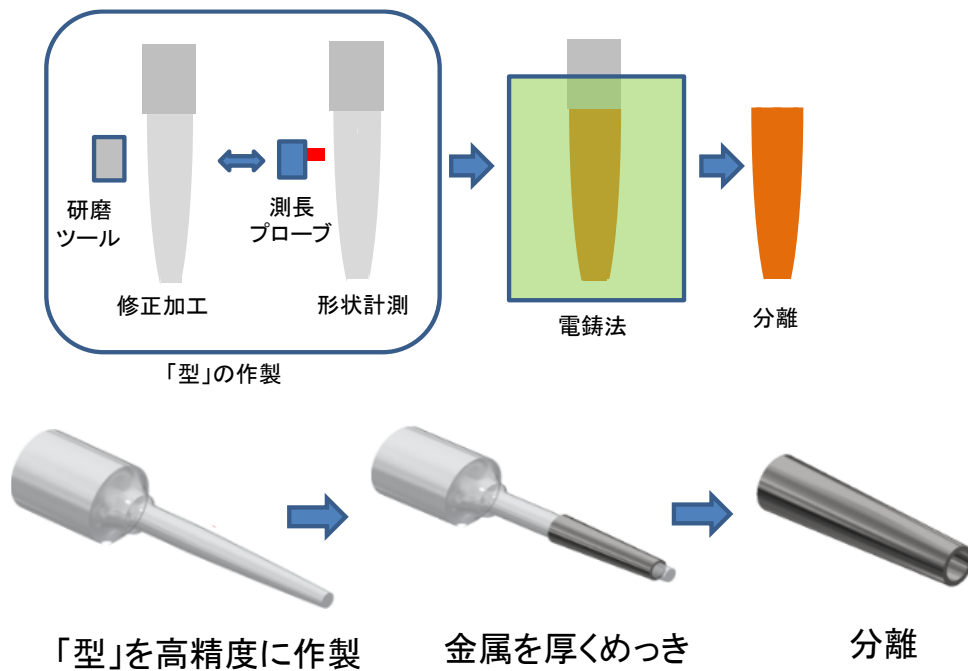


図2 回転体ミラーの超精密製造プロセス。  
反転形状の「型」を作製し、超精密な電鍍法により形状転写を行い、回転体ミラーを作製。

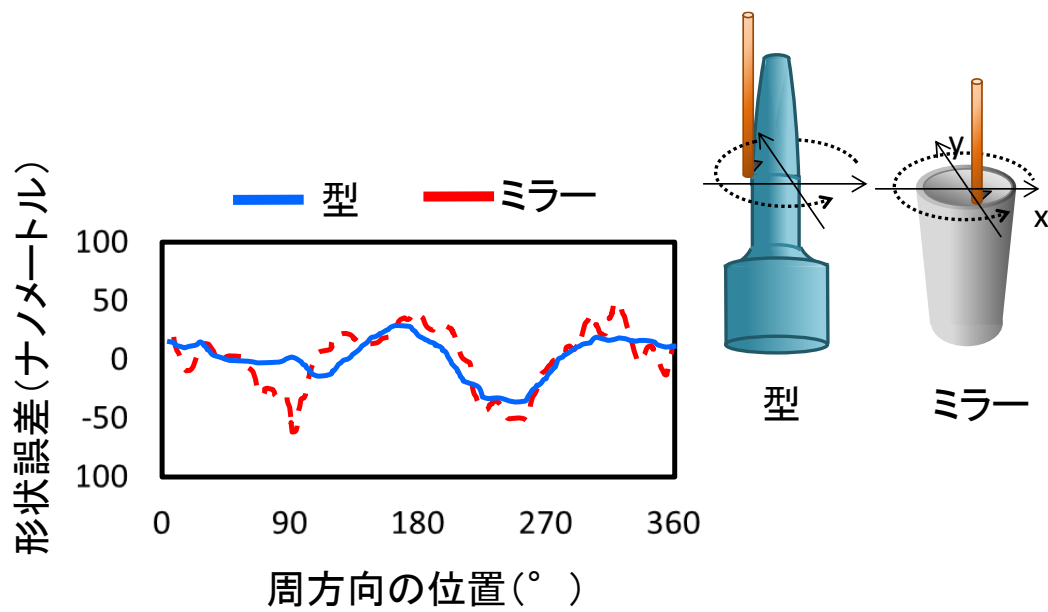


図3 回転楕円ミラーを作製するために開発された電鍍法の転写精度 10 nm レベルの形状転写精度を実現している。

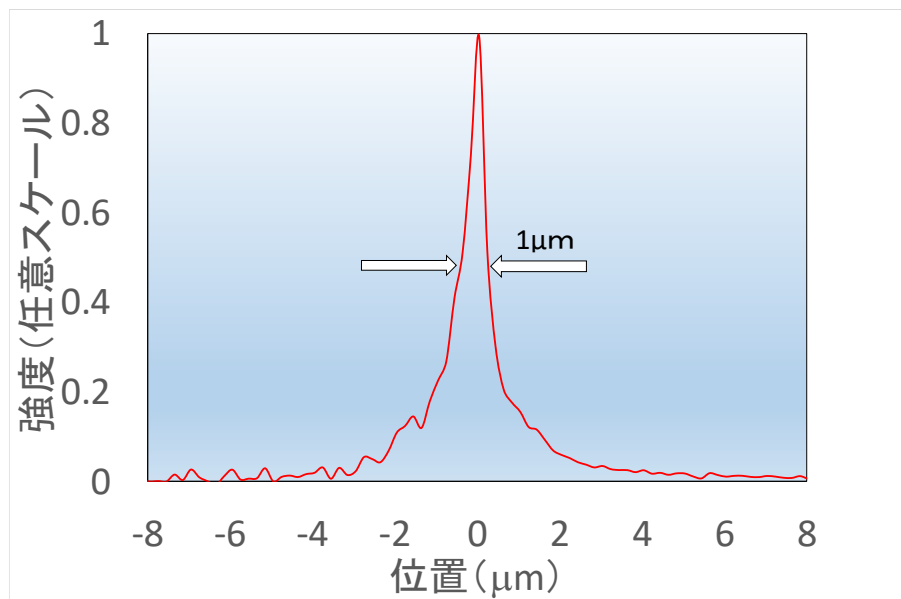


図4 回転楕円ミラーにより集光された波長 4nm の X 線ビームの強度プロファイル例 大型放射光施設 SPring-8 で確認された。軟 X 線の強度が非集光に比べて 1 万倍に向上可能。