

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22686017

研究課題名（和文）In-situ 軟 X 線集光ミラー形状修正システムの構築

研究課題名（英文）In-situ surface figure correction system for soft X-ray mirrors

研究代表者

三村 秀和 (Hidekazu Mimura)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30362651

研究成果の概要（和文）：

本研究では、将来の軟 X 線集光ビームの実現に向け、最も有望である回転楕円ミラーの作製に関する研究を実施した。形状設計および理論予測シミュレータ、マンドレル加工プロセス、位相回復による形状計測法、電鍍法による形状転写法を確立した。最終的に、それらのプロセスを統合させ、高精度な回転楕円ミラーを作製することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Ellipsoidal mirror is the most promising optical device to realize soft X-ray nanobeam. In this project, a method for designing the shape was constructed. Then, fabrication process consisting on machining, measurement and replication were completed. From these results, highly accurate ellipsoidal mirrors could be fabricated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2011 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2012 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	20,100,000	6,030,000	26,130,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、生産工学・加工学

キーワード：X 線ミラー、軟 X 線、超精密加工、計測

### 1. 研究開始当初の背景

21 世紀に入り急速に発展している光学分野に X 線光源の進歩が挙げられる。世界的に見た第 3 世代放射光施設の建設ラッシュであり、X 線自由電子レーザーなど大型 X 線発生施設が開発されている。一方、ラボベースの光源に目を向けると高次高調波軟 X 線光源、レーザープラズマ光源などの開発も進められている。

こうした X 線光源を最大限に活用するためには、X 線光学素子が重要となる。X 線光源は発散角度が多いため、特に X 線を集めることができる X 線集光光学素子が重要となる。

X 線の中でも波長が一桁ナノメートルの軟 X 線領域は軽元素の吸収端に相当することか

ら、材料分析に重要な波長領域である。現在、用いられている光学素子は、ゾーンプレートであるが、色収差、集光効率の観点で、ミラータイプの軟 X 線光学素子が望まれていた。

しかし、従来の精密加工技術では高精度なミラーは実現しておらず、理想的な性能を有する軟 X 線集光ミラーを作製するためには、新たな製造プロセスが必要となる。

### 2. 研究の目的

回転楕円 X 線集光ミラーは、X 線を色収差なく、高効率に集光可能であることから、理想的な光学素子である。しかしながら、形状が非球面形状であること、必要な形状精度が高いことから、その作製は極めて困難である。

本研究では、回転楕円軟 X 線集光ミラーの作製のために、新規の形状加工、形状転写、形状計測法を開発し、本ミラーの高精度製造プロセスを完成させる。

### 3. 研究の方法

回転楕円 X 線集光ミラーでは、図 1 に示すように、回転体形状の内面を反射し集光される。このような形状の内面を直接加工することは困難である。本研究では、回転楕円形状を反転させた形状であるマンドレルを高精度に作製し、電鍍法により同レベルの精度で反転形状を作製する方法を提案している。

この 3 年に亘って、マンドレル作製プロセス、高精度電鍍プロセス、そして最終的に作製された回転楕円形状の評価方法について研究開発を実施した。

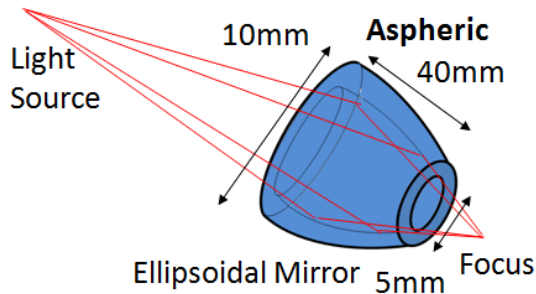


図 1 回転楕円軟 X 線集光ミラー

### 4. 研究成果

#### (1) 回転楕円ミラー用マンドレルの作製

マンドレルの作製装置として、図 2 に示す 3 次元回転体形状修正加工装置を開発した。本装置には、XYZφステージが搭載されており、回転体の形状表面の形状修正加工が可能である。加工方法としては、加工液を加工表面に噴射させ加工するノズル型 EEM(Elastic Emission Machining)を採用した。

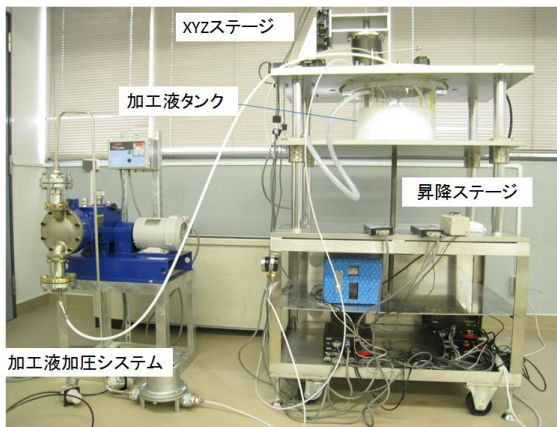


図 2 マンドレル加工装置

図 3 に作製したマンドレルの写真を示す。本

マンドレルは、夏目光学株式会社の協力ので作製した。

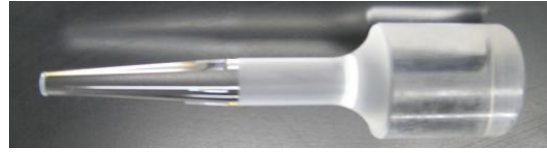
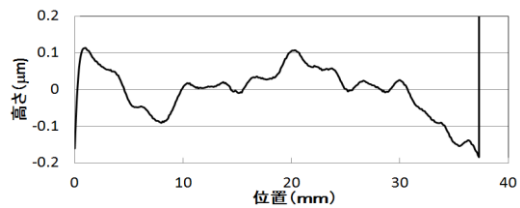
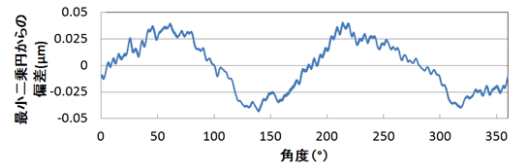


図 3 作製したマンドレル

図 4 に真円度測定機によりマンドレルの精度の評価を行った結果を示す。長手方向のプロファイルにおいて 200nm、真円度は 50nm レベルの非常に高精度なマンドレルの作製に成功した。



(a) 長手方向



(b) 円周方向

図 4 作製したマンドレルの形状誤差

(2) 回転楕円ミラー用転写プロセスの構築  
高精度に作製されたマスターは電鍍法により形状転写を行う。

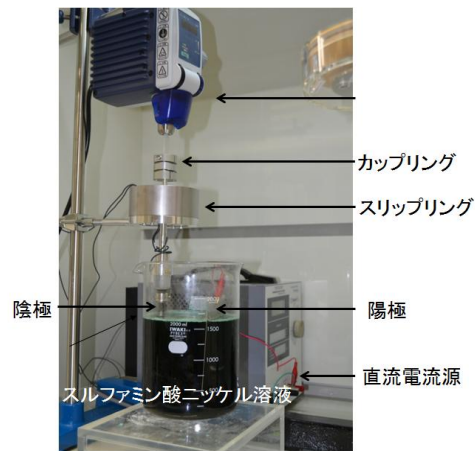


図 5 回転楕円ミラー用電鍍装置

回転体形状の電鍍を行うために、図 5 に示す

電鍍装置を開発した。回転対象であることを利用し、マンドレルを回転させながら電析が可能である。

本装置を用いて、スルファミン酸ニッケル溶液を用いた電析条件の検討を行った。内部応力と電位の関係を精密に調査し、内部応力が発生しない電析条件を見出した。

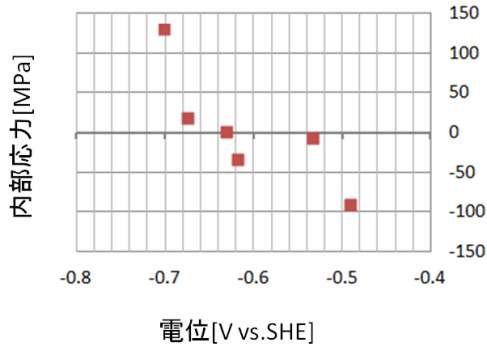
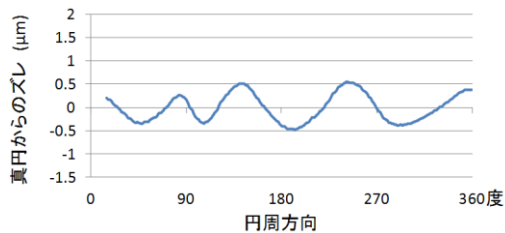


図6 内部応力と電位の関係

本条件を用いて、図4のマンドレルの形状転写を行った。図7に転写により完成した回転楕円ミラーを示す。真円度測定器による評価を行い、転写精度は  $1\mu\text{m}$  (p-v) であることを確認した。



(a) 写真



(b) 真円度評価

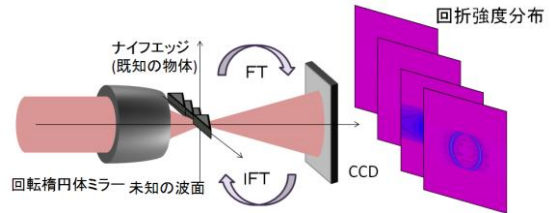
図7 転写により実現した回転楕円ミラー

### (3) 位相回復法による回転楕円ミラー計測システムの開発

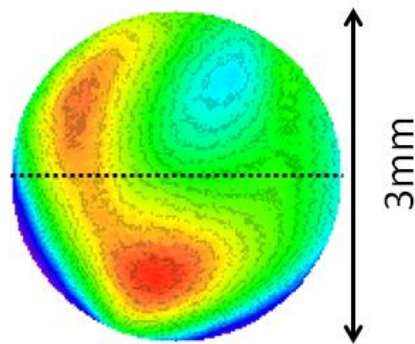
回転楕円ミラーを高精度に完成させるためには、内面の形状計測が不可欠である。そこで、光を回転楕円内面に照射し、集光する光の波面誤差を位相回復法により計測する。図8にその概要を示す。本計測システムでは、

集光点近傍において、ナイフエッジを挿入し散乱した回折強度分布を CCD により測定している。その複数枚の回折強度データを利用し、位相回復計算により波面分布を求める。

635nm He-Ne レーザーによる光学系を構築し、波面計測を行った結果、 $\lambda/200$  の従来にない精度での波面計測を実現した。



(a) 計測システム



(b) 計測された波面

図8 位相回復法による波面計測法

### (4) 本研究のまとめと今後の課題

本研究では、将来の回転楕円 X 線集光ミラーの実現に向けて基盤技術の開発を行った。得られた成果は以下の通りである。

1. 回転楕円ミラー作製のための EEM による高精度マンドレル作製プロセスを完成させた。200nm (p-v) レベルの精度で高精度に作製することが可能となった。
2. 高精度電鍍プロセスを開発し、高精度転写により回転楕円ミラーを作製した。1  $\mu\text{m}$  (p-v) の精度を確認した。
3. 作製した回転楕円ミラーの形状を評価するための位相回復法による波面計測システムを完成させた。 $\lambda/200$  での高い精度での波面計測法を完成させた。

今後の予定としては、高精度に作製された回転楕円ミラーの内面の形状修正法の確立、実際の軟 X 線 (高次高調波軟 X 線) による回転楕円ミラーの評価を実施する予定である。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

1. Y. Takei, H. Mimura, Effect of Focusing flow on Stationary Spot Machining Properties in Elastic Emission Machining, Nanoscale Research Letters, to be published.

2. T. Saito, Y. Yoshinori, H. Mimura, Development of Surface Profile Measurement Method for Ellipsoidal X-ray Mirror using Phase retrieval, Proc. SPIE, 8501, 850103

〔学会発表〕(計19件)

1. 武井良憲、久米健大、三村秀和、回転楕円X線集光ミラー用高精度マンドレル作製プロセスの開発、第26回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋大学、名古屋市、2013年1月12日～1月14日、14P016

2. 久米健大、武井良憲、三村秀和、高精度電鍍法による回転楕円X線集光ミラーの作製、第26回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋大学、名古屋市、2013年1月12日～1月14日、14P015

3. 斎藤貴宏、本山央人、三村秀和、回転楕円X線集光ミラーの形状計測法の開発、第26回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋大学、名古屋市、2013年1月12日～1月14日、14P014

4. 本山央人、斎藤貴宏、三村秀和、回転楕円ミラーを用いたX線集光システムの光学設計、第26回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋大学、名古屋市、2013年1月12日～1月14日、14P013

5. 久米健大、武井良憲、三村秀和、回転体X線ミラーのための高精度電鍍プロセスの開発、2013年精密工学会春季大会、東京工業大学、2013年3月13日～3月15日、2013年度精密工学会春季大会学術講演論文集 p.199-p.200.

6. 斎藤貴宏、本山央人、三村秀和、回転楕円X線集光ミラーのための位相回復による波面計測法の開発、2013年精密工学会春季大会、東京工業大学、2013年3月13日～3月15日、2013年度精密工学会春季大会学術講演論文集 p.197-p.198.

7. 本山央人、斎藤貴宏、三村秀和、大開口・回転体ミラーによる軟X線集光システムの光

学設計、2013年精密工学会春季大会、東京工業大学、2013年3月13日～3月15日、2013年度精密工学会春季大会学術講演論文集 p.195-p.196.

8. T. Saito, H. Mimura, Feasibility study for measuring figure error profile of ellipsoidal mirror using phase retrieval with ptychography, 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, Osaka, Japan, 22-24 October, 2012.

9. Y. Takei, H. Mimura, Control of Shape of Stationary Spot Profile in Nozzle-type Elastic Emission Machining, 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, Osaka, Japan, 22-24 October, 2012.

10. T. Saito, Y. Takei, H. Mimura, Development of Surface Profile Measurement Method for Spheroidal X-ray Mirror using phase retrieval, 2012 Optics + Photonics, San Diego, USA, 12-16 August, 2012.

11. 三村秀和、ナノ精度表面製造プロセスの構築とX線ミラーへの展開、第63回ELID研削研究会、2012年7月27日

12. 三村秀和、ステッチング干渉計および位相回復法によるX線集光ミラーの超精密形状計測、オプトメカトロニクス協会、光部品生産技術部会、2012年5月28日

13. 三村秀和、ナノ精度表面製造プロセスの構築と次世代X線ミラーの開発、静岡大学「第27回GRL浜松セミナー」静岡大学、浜松市、2012年5月14日

14. 三村秀和、超高精度X線ミラーの開発と硬X線ナノビーム形成、財団法人光産業技術振興協会、平成23年度多元技術融合光プロセス研究会第5回研究プログラム「最先端計測・モニタリング技術の現状と将来展望」、産業技術総合研究所 臨海副都心センター別館、2012年、2月16日

15. Y. Takei, H. Mimura, Improvement of Spatial Resolution of Figuring in Elastic Emission Machining, nanoMan2012 (The International State-of-the-art in nano Manufacturing), Wako, Japan, 25-27 July, 2012.

16. 斎藤貴宏、三村秀和、位相回復法によ

る回転体型軟X線集光ミラーの形状計測 - 光学設計と理論的検討、2012年度精密工学会春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス、八王子市、2012年、3月14日～3月16日、2012年度精密工学会春季大会学術講演論文集 p.1157-p1158.

17. 武井良憲、三村秀和、ノズル型EEM(Elastic Emission Machining)における加工特性の向上、2011年度精密工学会春季学術講演会首都大学東京南大沢キャンパス、八王子市、2012年 3月14日～16日、2012年度精密工学会春季大会学術講演論文集 p.1159-p1160.

18. 武井良憲、斎藤貴宏、大森整、三村秀和、回転体型軟X線集光用高精度マンドレルの作製、第25回日本放射光学会年会、放射光科学シンポジウム、鳥栖市民文化会館、鳥栖市、2012年、1月6日～1月9日

19. 斎藤貴宏、武井良憲、J. R. Fienup、三村秀和、回転楕円体型軟X線ミラーの光学設計と形状計測法の開発、第25回日本放射光学会年会、放射光科学シンポジウム、鳥栖市民文化会館、鳥栖市、2012年、1月6日～1月9日

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称：集流型ノズルを用いたEEM加工方法及びその装置

発明者：武井良憲、三村秀和、岡田浩巳、津村尚史

権利者：三村秀和、株式会社ジェイテック

種類：特許

番号：特願 2013-15930

出願年月日：平成 25 年 5 月 20 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.edm.t.u-tokyo.ac.jp/7MimuraGr/MimuraGr.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三村秀和 (MIMURA HIDEKAZU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30362651