

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20103

研究課題名(和文)大開口回転体ミラーとマルチスライス法による厚い試料の3次元軟X線イメージング

研究課題名(英文)Three-dimensional soft X-ray imaging of a thick specimen using an ellipsoidal mirror and multi-slice approach

研究代表者

鈴木 明大 (Suzuki, Akihiro)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号：20781850

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：計算機シミュレーションによって、タイコグラフィ測定系における、照明光学系に利用する回転体ミラーの開口数と観察像の空間分解能の相関を調べた。その結果、同じ入射光子数であっても、NAが大きくなるほど空間分解能が改善する可能性が示された。さらに、SPRING-8において、大開口数回転体ミラーを照明光学系に用いて、磁性薄膜のタイコグラフィ測定を実施した。測定したおよそ2000枚の回折パターンに位相回復計算を適用することで、透過X線画像では見えなかったナノ磁区構造を可視化できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気材料を高空間分解能で観察できる本計測手法は、通信機器の省消費電力化、高速化などへの貢献が期待されるスピントロニクスデバイス開発につながる。また、本手法は磁気材料のみがターゲットではなく、同じシステムで、環境化学や宇宙科学と関連した酸化物・窒化物ナノ粒子の元素識別観察も可能である。X線と回転体ミラーの特長を活かして、現状の顕微鏡技術よりも優れた空間分解能で試料内部の磁気・化学状態を非破壊観察できるようになれば、様々な分野で新しい知見をもたらす。

研究成果の概要(英文)：We numerically simulated the correlation between the numerical aperture (NA) of an ellipsoidal mirror used in the illumination optics and the spatial resolution of the reconstructed images in the ptychographic geometry. The results showed that the spatial resolution improves as the NA increases for the identical incident photons. Furthermore, we carried out ptychographic measurements of magnetic thin films at SPRING-8 using a large-numerical-aperture ellipsoidal mirror as the illumination optics. By applying the phasing method to the measured dataset (approximately 2,000 diffraction patterns), we could visualize magnetic nanodomain structures, which were not visible in the simple transmission image.

研究分野：X線イメージング

キーワード：タイコグラフィ 回転体ミラー 軟X線 磁気イメージング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

軟 X 線とは、およそ 100 eV から 2 keV の光子エネルギーをもつ電磁波であり、炭素、酸素、窒素といった生体分子や高分子材料にとって重要な元素や、鉄、コバルトなどの強磁性を示す元素の吸収端をカバーする。そのため、吸収端付近での分光測定による、元素、官能基、価数といった化学状態の高感度計測や、スピン状態に起因する磁気構造のイメージングに利用されている。一方で、入射する X 線のサイズで決まる実質的な空間分解能は、集光素子の作製精度限界から数 10 nm~100 nm 程度で頭打ちとなっており、さらなる技術革新が求められていた。

空間分解能の限界を突破する可能性をもつ手法がタイコグラフィ¹ある。走査型で、試料後方で得られる 2 次元のコヒーレント回折パターンに反復的位相回復法を適用し、複素屈折率として試料像を再構成する(図 1)。入射プローブサイズや、結像レンズ性能ではなく、回折パターンの最大空間周波数が空間分解能に直結する。しかしながら、回折パターン強度は空間周波数の 4 乗に反比例するため、微弱な回折信号の取得は現在の放射光光源であっても難しく、結局、空間分解能は数 10 nm~100 nm 程度となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、SPring-8 BL25SU 軟 X 線ビームラインにおいて、高スループット、色収差がない、大きいワーキングディスタンス、大開口数(大 NA)という特長をもつ回転体ミラー(図 2)を利用した軟 X 線タイコグラフィシステムの立ち上げと実証である。

3. 研究の方法

(1) 計算機シミュレーションによる NA と空間分解能の関係探索

構造化照明による像質の改善は、X 線タイコグラフィに限っても、いくつかの先行研究が存在する。例えば、試料の上流に波面変調器を設置したり²、照明光学素子として利用するフレネルゾーンプレートを理想形状からずらして作製したり³することで、空間分解能や位相回復計算の収束性が改善する例があげられる。本研究で利用する回転体ミラーによる集光ビームも、回折限界集光径に相当する大きさをもつ多数のスパイク形状をもつ。この構造を生かして、高い空間分解能を達成できないか、計算機シミュレーションを実施した。具体的には、入射光子数は揃えた上で、回転体ミラーの NA と、回折面における明視野の内径/外径(図 3)をパラメータとした。

(2) 磁気イメージングへの展開

本実験では、開発したタイコグラフィ装置と X 線磁気円二色性(XMCD)測定を組み合わせることで、ナノスケールの磁区構造を可視化することを目的とし、試料には、スパッタリング法によって作製した白金・コバルト多層膜を用いた。SPring-8 BL25SU での XMCD-タイコグラフィ測定の前に、作製した試料を磁気力顕微鏡で測定し、~100 nm 程度の磁区構造を事前に確認した。

4. 研究成果

(1) 照明光学素子の NA 化による空間分解能の向上

再構成したタイコグラフィ像とモデル画像の Fourier ring correlation⁴を計算したところ、試料に入射する光子数が同じであっても、NA が大きいほどタイコグラフィ像の空間分解能が優れていることが分かった。さらに、内径/外径の値を大きくし、実際回転体ミラーのように、検出器面上で明視野がドーナツ状になったとしても、NA が大きいことのメリットは失われないことも

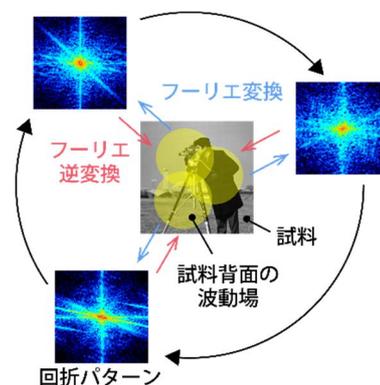


図 1. タイコグラフィの模式図。照射領域が重なるように試料を走査させ、複数の回折パターンを取得し、計算機によって像を再構築する。

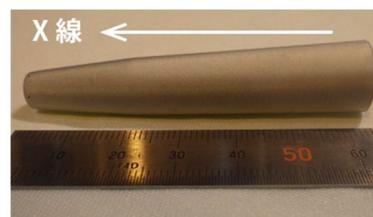


図 2. 回転体ミラーの写真。

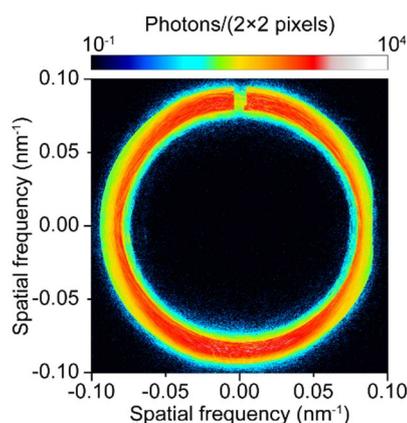


図 3. 回転体ミラーを照明光学系に用いたときの回折パターンの例。ドーナツ状の明視野が現れる。中心からドーナツ状強度の内側までを内径、外側までを外径と呼んでいる。

確かめた。

(2) Pt/Co 多層膜試料の高分解能イメージング
タイコグラフィデータ計測と同時に得られる透過 X 線画像 (図 4) では磁区を確認できなかったが、およそ 2000 枚の回折パターンにフーリエ反復法を適用することで、 $\phi 7 \mu\text{m}$ 程度の視野で迷路状の磁区を可視化できた。再構成画像中のエッジ構造を利用して空間分解能を見積もると、磁壁厚さと同等程度と見積もられた。また、同時に再構成された入射 X 線の波動場から、回転体ミラーの収差を定量的に評価できた。

参考文献

- [1] F. Pfeiffer, Nat. Photonics, 12, 9 (2018).
- [2] A. M. Maiden *et al.*, Nat. Commun., 4, 1669 (2013).
- [3] M. Odstrčil *et al.*, Opt. Express, 27, 14981 (2019).
- [4] N. Banterle *et al.*, J. Struct. Biol., **363**, 183 (2013).

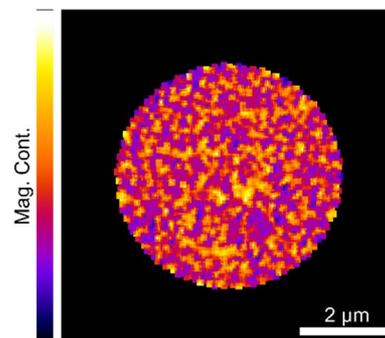


図 4. 透過 X 線画像。磁区は観察できない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木 明大
2. 発表標題 回転体ミラーによる軟X線ナノビームを用いた磁区構造解析技術
3. 学会等名 ISSP Workshop 2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 明大
2. 発表標題 SPring-8/SACLAを利用したコヒーレント回折イメージング
3. 学会等名 第12回 日本放射光学会 若手研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap https://researchmap.jp/akihiro.suzuki
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------