東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

Press Release

2026 年 11 月 12 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学

ナノテラスで 10 nm を切る X 線イメージングに成功
—X 線タイコグラフィで約 7 nm の分解能を実証—

【発表のポイント】

- NanoTerasu（ナノテラス）（注１）を活用し、テンダーX 線（注２）による X 線タイコグラフィ（注３）で、10 nm を切る 7.4 nm の空間分解能を実現しました。
- 電池・触媒材料、半導体デバイスなどの内部構造を、より細かく可視化する技術への展開が期待されます。

【概要】

X 線タイコグラフィは、非破壊かつ高解像度の観察が可能な手法として注目されています。これまで、軟 X 線や硬 X 線では 10 nm を下回る高分解能イメージングが実現されてきましたが、その中間に位置するテンダーX 線領域では、高分解能化が困難でした。

東北大学大学院工学研究科の佐々木雄平大学院生、東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センターの石黒志准教授、高橋幸生教授（多元物質科学研究所、金属材料研究所 兼務）らの研究チームは、3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu のビームライン BL10U を活用し、4.5 keV のテンダーX 線を用いた X 線タイコグラフィにおいて、10 nm を切る 7.4 nm の投影空間分解能を達成しました。NanoTerasu では 2025 年 11 月に蓄積電流が定格の 400 mA に到達しており、本研究は 400 mA 運転下で実施されました。

本研究では、Advanced Kirkpatrick–Baez 全反射集光ミラー（注４）と高速積分型 X 線画像検出器 CITIUS（注５）を用い、複数の検出器位置で取得した回折データを統合して像再構成を行いました。その結果、金ナノキューブの微細構造を明瞭に可視化することに成功しました。本成果は、今後、硫黄やリンなどの吸収端を利用した電池材料や触媒材料の高分解能な元素・化学状態イメージングに加え、半導体デバイスの微細構造解析への展開も期待されます。

本研究成果は、2026 年 11 月 12 日に国際結晶学連合の学術誌「Journal of Synchrotron Radiation」に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

ナノメートルスケールで物質の構造や化学状態を可視化することは、電池や触媒、半導体などの先端材料の研究開発において重要です。X 線タイコグラフィは、X 線の回折パターンから試料像を再構成することで、非破壊かつ高解像度の観察を可能にする手法です。これまで軟 X 線や硬 X 線では 10 nm を下回る高分解能イメージングが実現されてきましたが、その中間に位置するテンダーX 線領域では、高輝度光源や高性能な分光器、高感度な X 線画像検出器が必要となるため、高分解能化が困難でした。テンダーX 線は、軟 X 線より試料内部まで透過しやすく、硬 X 線より強い位相・吸収コントラストが得られます。また、硫黄やリンなどの吸収端を含むため、元素分布や化学状態の解析にも有用です。

今回の取り組み

ナノテラスでは 2025 年 11 月に蓄積電流が定格の 400 mA に到達し、より高強度の放射光を利用できるようになりました。本研究では、この 400 mA 運転下のビームライン BL10U において、Advanced Kirkpatrick-Baez（AKB）全反射集光ミラーと高速積分型 X 線画像検出器「CITIUS（シティウス）」を用い、4.5 keV のテンダーX 線による高分解能 X 線タイコグラフィ測定を行いました。微細構造から生じる回折信号を取得するため、試料と検出器の距離を一定に保ったまま CITIUS の位置を変え、同一の試料領域を 5 つの検出器位置で測定しました。複数の回折データを統合して像再構成することで、広い空間周波数領域の情報を取得しました。金ナノキューブを用いて性能を評価した結果、約 100 nm の粒子形状や粒子間の狭い隙間を明瞭に可視化し、粒子エッジの解析から 10 nm を切る 7.4 nm の投影空間分解能を得ました。

今後の展開

今回の成果は、高分解能化が難しかったテンダーX 線領域において、10 nm を下回る X 線イメージングが可能であることを示したものです。今後は、より広い散乱角を一度に計測できる大面積 X 線画像検出器の導入を検討するとともに、測定安定性を改善し、測定の高効率化と、より低い X 線エネルギーでの高分解能化を進めます。さらに、X 線吸収分光と組み合わせることで、電池や触媒材料における元素分布・化学状態の高分解能イメージングや、半導体デバイス内部の微細構造、界面、欠陥の非破壊観察への展開が期待されます。材料内部の反応や劣化、微細構造をナノメートルスケールで理解し、エネルギー材料や機能性材料、半導体デバイスの研究開発への貢献を目指します。

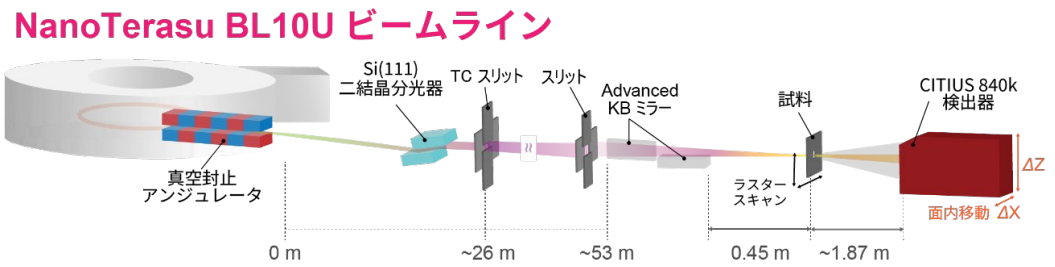


図 1. NanoTerasu BL10U ビームラインでのタイコグラフィ測定レイアウト。

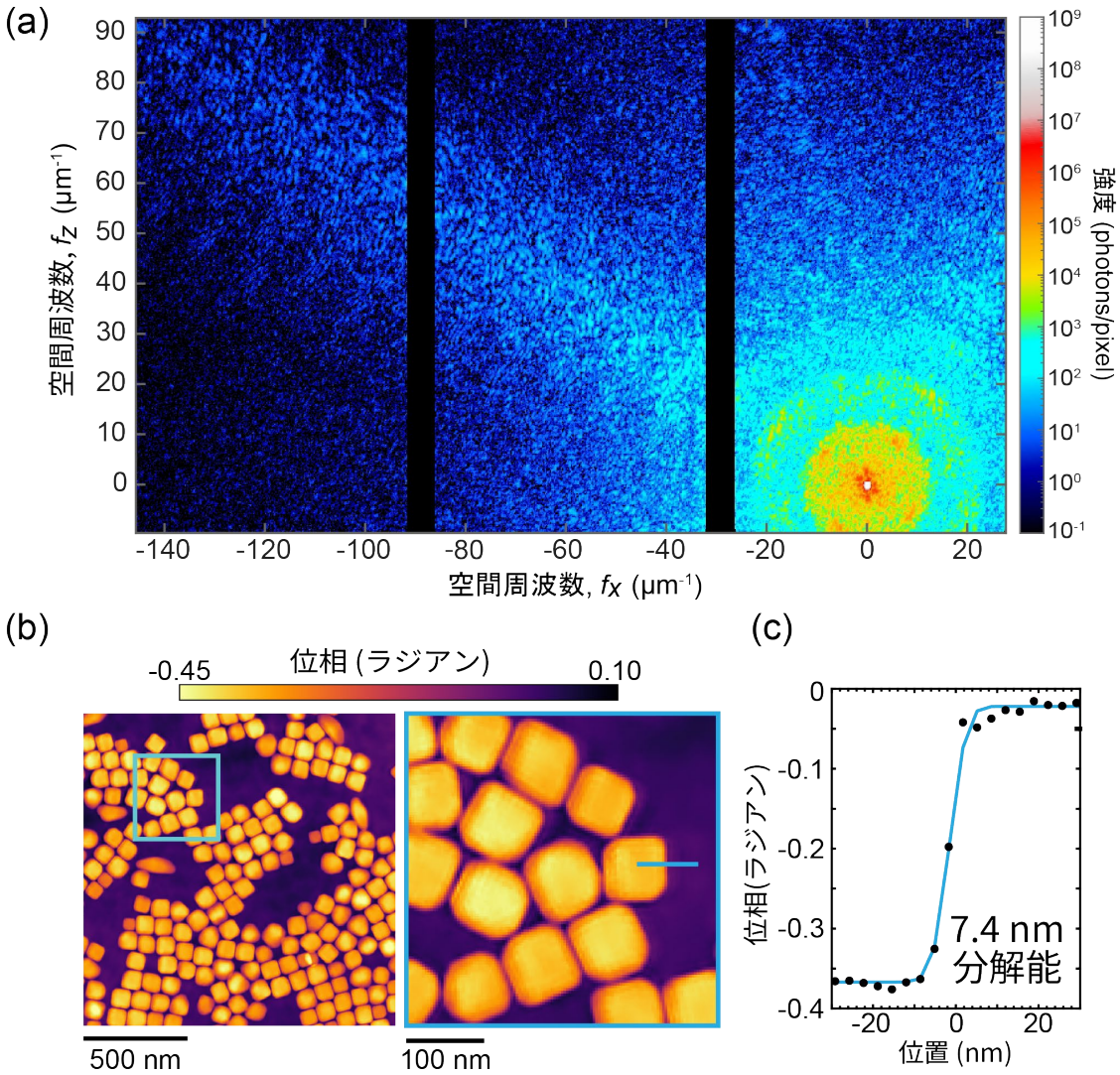


図 2. 4.5 keV のテンダーX 線で取得した金ナノキューブの測定結果。
(a) 回折強度パターン。高空間周波数領域まで回折信号が観測された。
(b) 再構成した金ナノキューブの位相像（全体像と拡大像）。
(c) 粒子エッジのラインプロファイル。(b) の拡大像中の水色線に沿ったラインプロファイルを解析した結果、7.4 nm の投影空間分解能が得られた。

【謝辞】
本研究における放射光実験は、一般財団法人光科学イノベーションセンター（PhoSIC）のコアリション制度の下、NanoTerasu BL10U にて実施されました。
本研究は、JSPS 科研費特別推進研究（JP23H05403 研究代表者：高橋幸生）、JSPS 科研費特別研究員奨励費（JP26KJ0535 研究代表者：佐々木雄平）の助成を受けて行われました。また、本成果に関する論文は『東北大学 2026 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業』の支援を受けました。

【用語説明】

注1. NanoTerasu（ナノテラス）：

宮城県仙台市 東北大学青葉山新キャンパス内にて整備が進められ、2024 年 4 月に稼働を開始した中型放射光施設。国の主体機関である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（QST）と一般財団法人光科学イノベーションセンター（PhoSIC）を代表機関とする宮城県、仙台市、国立大学法人東北大学、一般社団法人東北経済連合会からなる地域パートナーで構成され、費用負担も含めた役割分担の元で整備が進められている。

注2. テンダーX 線：

X 線はそのエネルギーに応じて「軟 X 線」「テンダーX 線」「硬 X 線」に分類される。テンダーX 線はおおよそ 2〜5 keV 程度のエネルギー領域にあり、硬 X 線は 5 keV 以上の高エネルギー領域にある。

注3. X 線タイコグラフィ：

コヒーレント X 線回折イメージングの手法のうちの一つ。試料にコヒーレント X 線を照射する際、試料面上で X 線照射領域が一部重複するように試料を二次元走査し、各走査点において回折強度パターンを取得する。得られた複数の回折強度パターンに対して位相回復計算を実行することで、一枚の試料像を取得する。

注4. Advanced Kirkpatrick–Baez（AKB）全反射集光ミラー：

X 線を集光するための全反射ミラー。全反射を利用するため、X 線エネルギーを変えた際の焦点位置のずれ（色収差）が小さく、また、特殊なミラー配置によってコマ収差を抑えた高精度な X 線集光が可能である。

注5. 高速積分型 X 線画像検出器 CITIUS：

理化学研究所らが開発した、高フレームレートと高ダイナミックレンジを兼ね備えた次世代の X 線画像検出器システム。

【論文情報】
タイトル：Extending high-resolution ptychography into the tender X-ray regime at NanoTerasu BL10U
著者：Yuhei Sasaki*, Nozomu Ishiguro, Masaki Abe, Shuntaro Takazawa, Naru Okawa, and Yukio Takahashi*
*責任著者：
東北大学大学院工学研究科　大学院生　佐々木雄平
東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター　教授　高橋幸生
掲載誌：Journal of Synchrotron Radiation
DOI：10.1107/S1600577526011549
URL：https://doi.org/10.1107/S1600577526011549

【問い合わせ先】
（研究に関すること）
東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター
教授　高橋幸生
TEL: 022-217-5166
Email: ytakahashi@tohoku.jp

（報道に関すること）
東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター
TEL: 022-752-2331
Email: sris@grp.tohoku.ac.jp