

ウォルターミラーを利用した 軟 X 線タイコグラフィ装置の開発

木村隆志¹, 竹尾陽子^{1,2}, 櫻井 快³, 古谷 登³, 江川 悟⁴, 山口豪太⁵,
松澤雄介⁶, 久米健大⁶, 三村秀和⁷, 志村まり^{5,8}, 大橋治彦^{2,5}, 松田 巖¹,
原田慈久¹

¹東京大学物性研究所 〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

²高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

³東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

⁴理化学研究所 光量子工学研究センター 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

⁵理化学研究所 放射光科学研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

⁶夏日光学株式会社 テクノロジーセンター 〒399-2431 長野県飯田市川路1200-29

⁷東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

⁸国立国際医療研究センター 〒162-8655 東京都新宿区戸山 1-21-1

要旨

全反射ウォルターミラーを照明光学系として利用した、新たな軟 X 線タイコグラフィシステムを開発した。SPring-8 の BL07LSU に設置した本タイコグラフィシステムは、全反射光学系の持つ無色収差性の特徴を活かし、ビームラインで利用可能な 250 eV ~ 2 keV の全波長域でシームレスに 50 nm 分解能でのイメージングが可能である。本トピックス記事では、開発したタイコグラフィシステムの光学系などの詳細に関して述べるとともに、実試料として計測した哺乳類細胞のイメージングの結果を紹介する。

1. はじめに

高い分解能と数多くの物性分析手段を併せ持つ X 線での顕微イメージングは、生物学や材料科学などの分野を問わず、幅広い領域で活用が可能である。なかでも新しい X 線顕微イメージング手法であるタイコグラフィでは、コヒーレントな回折パターンからの位相回復計算による試料像の再構成を行うことで、結像光学素子の作製精度・光学系のアライメント精度という従来の限界に影響されない、極めて高い空間分解能を実現することができる¹⁻⁵⁾。

生物や高分子材料といった軽元素が多く含まれる不均一な構造の物性を調べるとき、こうしたタイコグラフィと軟 X 線分光分析の組み合わせは大きな力を発揮する。例えばこれまでに X 線吸収分光と組み合わせ、磁性細菌中ナノ粒子の化学状態マッピング⁶⁾や、Li イオン電池材料の劣化メカニズムの可視化⁷⁾といった成果も報告されており、電子顕微鏡による観察では試料の厚さや損傷が問題になる対象に対して大きな有用性が見出されている。

様々な軽元素の吸収端に対応した軟 X 線タイコグラフィを行ううえで、全反射ミラー光学系は波長に応じて光路が変わらない、無色収差という最適な特性を有している。軟 X 線での全反射ミラーの集光ビームサイズは現状 200 nm 程度^{8,9)}であり、ゾーンプレートの 10 nm 程度^{10,11)}と比

較して大幅に大きい。しかし、タイコグラフィの再構成計算で得られる試料像の分解能は集光ビームサイズと独立している¹⁻³⁾ため、全反射ミラーの使用も大きな障壁にはならない。加えて、ミラー光学系の作動距離が長いという点は、試料の回転を要するトモグラフィ計測や、周囲環境の精密な制御を必要とする in-situ/operando 計測への応用にも適している。

そこで本トピックス記事では、軟 X 線タイコグラフィ用の全反射ウォルターミラー光学系を新たに開発し、実試料として哺乳類細胞の微細構造計測にも利用可能であることを実証した結果¹²⁾について報告をする。テストパターンによる評価では、ビームラインで利用可能な幅広い波長領域において 50 nm 程度の分解能を実現できることを確認し、光学系の長作動距離を活かしたステレオイメージングも試みている。なお、タイコグラフィやウォルターミラー、軟 X 線ミラーの作製手法に関しては、放射光誌においても優れた解説記事¹³⁻¹⁶⁾が既に執筆されているため、詳細はそちらを参考にされたい。

2. 全反射ウォルターミラーによる軟 X 線タイコグラフィシステム

本装置は SPring-8 の東京大学物質科学ビームライン

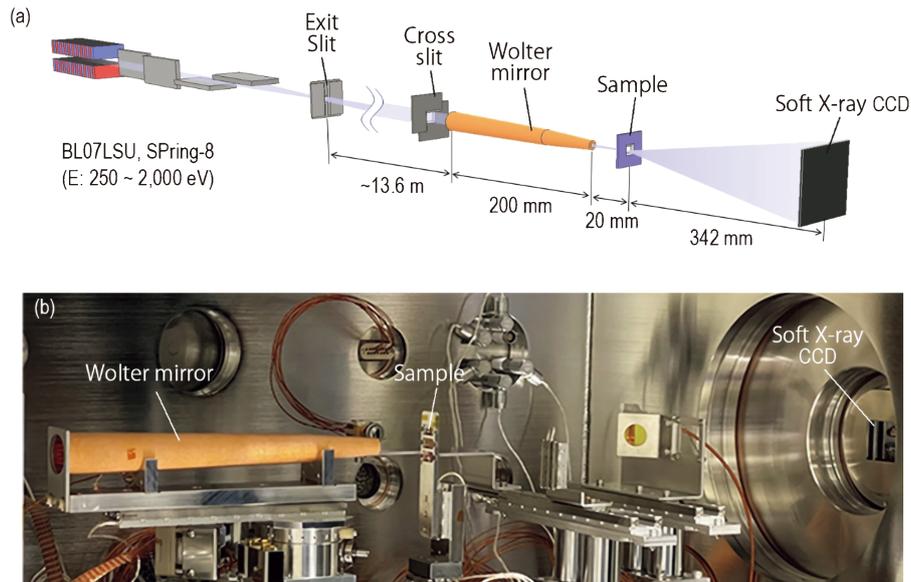


Fig. 1 (Color online) Soft X-ray ptychography system at BL07LSU of SPring-8. (a) Schematic illustration of the optics. (b) Photograph of the vacuum chamber for the ptychography system.

BL07LSU^{17,18)}に構築した。本ビームラインでは軟 X 線の 250 eV~2000 eV の幅広い領域を利用することができる。X 線吸収分光を行う場合、K-edge を利用した計測では炭素からケイ素までの軽元素を計測可能である。

Fig. 1(a)に開発した軟 X 線タイコグラフィシステムの概略図を示す。本システムの特徴は、冒頭で述べたように照明光学系として全反射ウォルターミラーを採用している点である。全反射光学系を利用する利点には大きく無色収差性と長作動距離があり、本システムはその利点を活かした設計をしている。また、一般的な全反射楕円ミラー光学系と比較して、ウォルターミラー光学系は高い結像特性とプローブの安定性を有しており、タイコグラフィ計測を行う上で理想的な照明プローブを得ることができる。ちなみに硬 X 線領域では、タイコグラフィ用のウォルターミラー光学系は、Kirkpatrick-Baez ミラー光学系に類似した複数の非球面ミラーを組み合わせて実現されている (Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー光学系)^{19,20)}。しかし Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー光学系は、より長い波長の軟 X 線での利用に十分な開口数を有しておらず、複数のミラーに精密なアライメントを必要とすることも、超高真空環境下での軟 X 線実験には適していない。そこで本研究では、軟 X 線タイコグラフィシステムに、一枚のミラーで二次元の集光が可能な円筒形状を有したウォルターミラーを採用した。

ウォルターミラーの形状は、作動距離、光源と焦点間の距離、ミラーの長さ、ウォルターミラーの楕円面部分と双曲面部分それぞれの視射角の 5 つの設計変数によって決定される。本研究では、将来的なトモグラフィ計測と in-situ/operando 測定を行うために十分な値として 20 mm の作動距離を選択し、光源から焦点までの距離は

Table 1 Parameters of the Wolter mirror optics.

Distance between light source and sample	13.8 m
Working distance	20 mm
Mirror length	200 mm
Grazing angle (Ellipsoidal part)	22.1 mrad
Grazing angle (Hyperboloidal part)	42.5 mrad

BL07LSU の実験ステーションの構成から 13.8 m に設定している。また、ミラー面の視射角を約 22.1 mrad (楕円面部分) と 42.5 mrad (双曲面部分) とし、Au を X 線反射面としたときに、1000 eV 以下の軟 X 線領域で 30% 以上の反射率を確保している。ミラーの長さは、現在の製造プロセスの制限により 200 mm となっている。以上を踏まえ、Table 1 に示すパラメータでウォルターミラーを設計・作製した。

鏡面反射を利用して集光を行う全反射ミラーの場合、利用する波長によりこの作動距離と集光点位置は変化しない。そのため、試料位置は照明波長によらず常に同一に保つことが可能である。こうした長作動距離・試料位置の安定性は、X 線の透過力を活かしたトモグラフィや in-situ/operando 計測を行う上で、試料周りの安定性・自由度を大幅に高めることができる。実際の計測時、試料はミラー 20 mm 下流の集光点から更に 300 μm デフォーカスした位置に配置している。これは試料に対する照明領域を広げて、タイコグラフィ像の視野を広げるためである。Fig. 1 (b) にシステムの写真を示す。試料下部には三軸のリニアステージと 1 軸の回転ステージがあり、タイコグラフィに必要な試料走査やトモグラフィ計測が可能なシンプルな構成になっている。タイコグラフィでは、試料から二次元

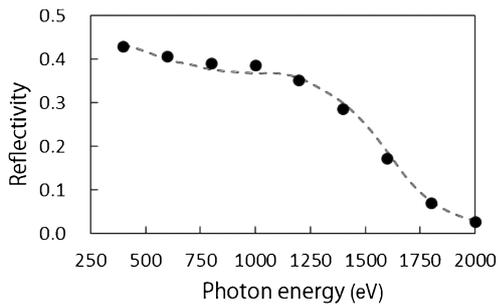


Fig. 2 Reflectivity curve of the mirror optics. The dotted line and circles show the theoretical and experimental reflectivity, respectively.

検出器までの最大散乱角によって、再構成された画像のピクセルサイズが決まるが、今回使用した軟X線二次元検出器 (Princeton Instruments, PIXIS-XO: 2048B) と試料の間の距離は342.5 mm であり、この光学配置で再構成された画像のピクセルサイズは、250 eV から2000 eV の光子エネルギーで61.4 nm から7.68 nm の範囲になる。

本システム用のウォルターミラーは精密電鍍プロセス²¹⁾を用いて作製しており、将来的な磁場印加を考慮して、これまで一般的に採用してきたニッケルではなく、電鍍に用いるミラー母材として銅²²⁾を選択している。X線反射層として厚さ50 nm の金を銅のミラー母材上に配置している。金は2000 eV 以下に吸収端を持たないため、BL07LSU で利用可能な全波長領域において吸収端に影響されないシームレスな反射率曲線を得ることができる。

Fig. 2 に示す本ミラーの250 eV ~ 2000 keV の反射率曲線では、ミラーの内面の表面粗さによる悪化は見られず、ほぼ理論通りのシームレスな値が得られていることが分かる。

3. テストパターンによる分解能評価

まず構築した軟X線タイコグラフィシステムの分解能評価のために、窒化ケイ素薄膜上に作製したテストパターンの計測を行った。**Fig. 3(a)** のテストパターンは200 nm

厚の窒化ケイ素薄膜を70 nm 程度掘り込んで作製しており、最内周での線間隔は50 nm となっている。光軸に直行した二軸方向におよそ500 nm のピッチで試料を走査しながら、11×11点のコヒーレント回折パターンを計測した。121点の画像計測にはおよそ8分程度の時間を要しており、これは主に軟X線検出器のデータ読み出しによるものである。

Fig. 3(b-k) は、400 eV から2000 eV のX線光子エネルギーで計測したテストパターンの吸収像と位相像を示している。再構成計算は照明プローブと試料構造の持つ複素波動場の情報を反復的な位相回復計算により導出する、一般的な extended Ptychographical Iterative Engine アルゴリズム^{2,13)}のみによって行っている。全てのエネルギーで100~50 nm 程度の分解能が得られていることが判別できる。また、内周の50 nm の線間隔が縦方向には分解されて、横方向には分解できていないことが分かる。現状、本タイコグラフィ装置周囲の振動を加速度センサーで計測したところ、最大で数百 nm の横方向への揺れが存在していることが分かっている。試料からの最大散乱角から求められる再構成像のピクセルサイズはそれぞれ38.4 nm から7.68 nm となるが、波長に依存しない分解能の悪化は、こうした試料とミラーの振動の影響が主な原因であると考えている。

またこの他、各エネルギーでの見え方に、吸収像と位相像に大きな違いがあることが分かる。X線領域において一般的に複素屈折率の実部は虚部よりも大きな値を持つ。そのため、複素屈折率の実部を反映する位相像は、虚部を反映する吸収像と比較してより感度の高い計測を行うことができる。これは細胞のような透過性の高い試料を計測する場合、軟X線タイコグラフィの大きな利点の1つになる。

4. 軟X線タイコグラフィによる哺乳類細胞イメージング

本タイコグラフィシステムの顕微鏡アプリケーションの

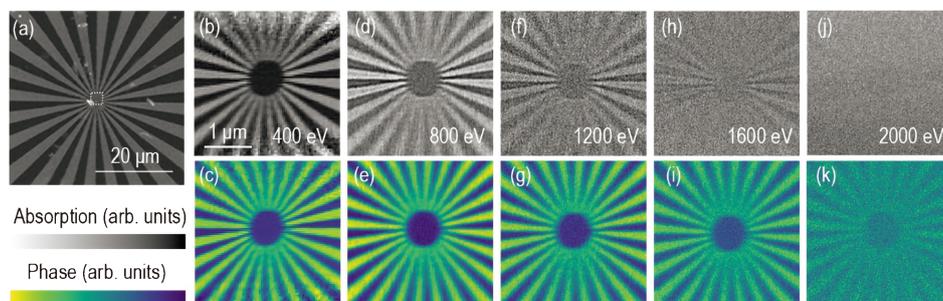


Fig. 3 (Color online) Evaluation of the spatial resolution of the ptychography system. (a) Scanning electron microscope image of the test pattern. The dotted rectangle area was observed with soft X-ray ptychography. (b-k) Reconstructed absorption (b, d, f, h, j) and phase (c, e, g, i, k) images at 400 eV, 800 eV, 1200 eV, 1600 eV, and 2000 eV.

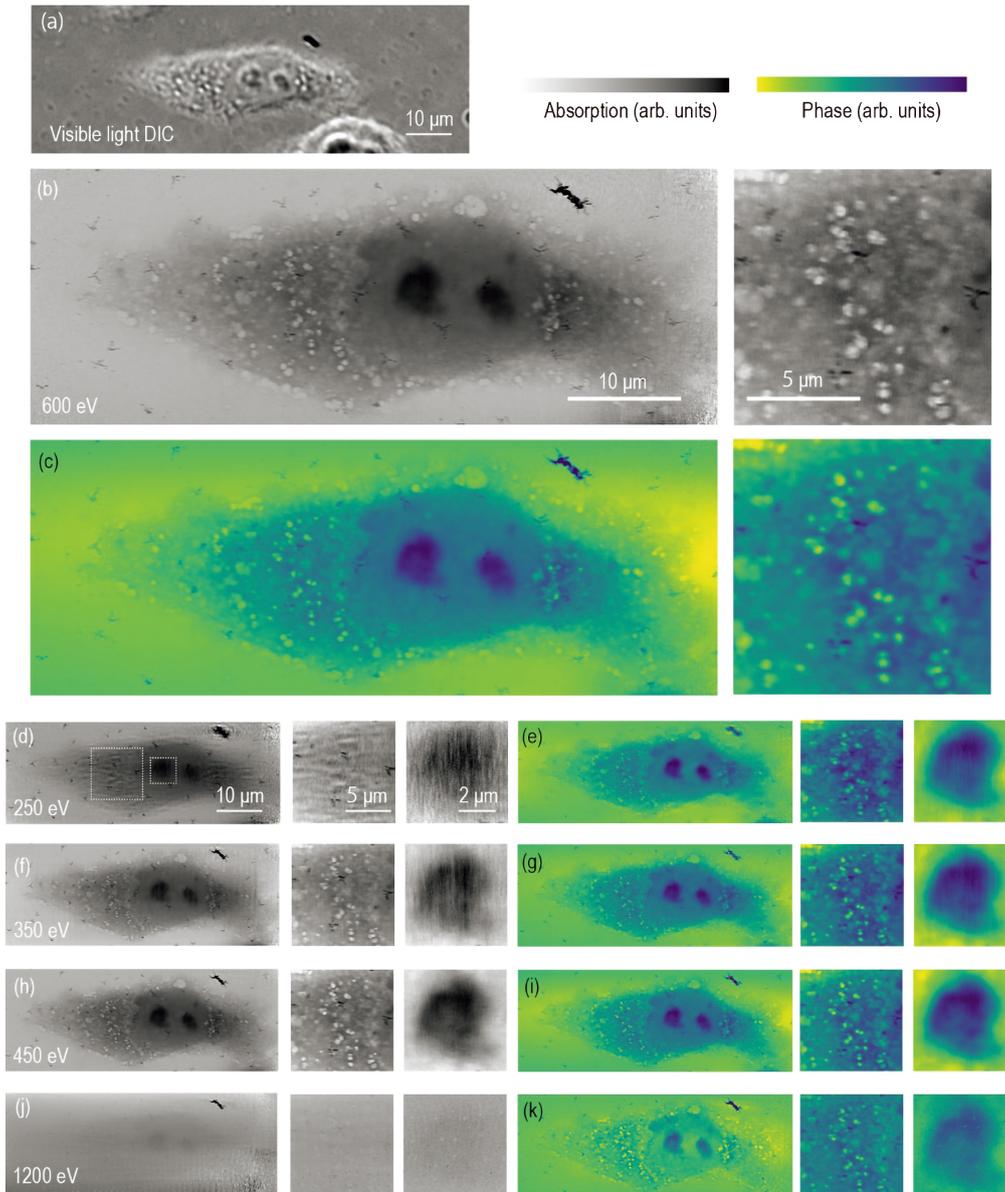


Fig. 4 (Color online) Soft X-ray ptychography image of a mammalian cell. (a) Visible light differential interference contrast image. (b–k) Reconstructed absorption (b, d, f, h, j) and phase (c, e, g, i, k) images at 600 eV, 250 eV, 350 eV, 450 eV, and 1200 eV. The magnified images to the right of the main images are taken from areas corresponding to the dotted rectangles shown in (d).

機能を実証するために、ビームラインで利用可能な複数の波長で細胞試料の計測を行った。計測試料には、チャイニーズハムスター卵巣がん由来細胞（CHO-K1）を200 nmの窒化ケイ素薄膜上で培養した後に、パラホルムアルデヒドで化学固定処理を行ったものを利用した。Fig. 4(a)に可視光微分干渉顕微鏡で観察したCHO-K1細胞像を示す。細胞の厚さはおよそ5 μm程度あり、電子顕微鏡によって内部の透過観察を行うことが一般的に困難な厚さである。軟X線はこうした軽元素主体の試料と程よく相互作用を行うため、試料を薄片化することなくそのまま透過観察が可能である。

細胞に含まれる炭素、窒素、酸素の吸収端などをまたいで、250 eV, 350 eV, 450 eV, 600 eV および1200 keVの光子エネルギーで計測を行った結果をFig. 4(b–k)に示す。波長に依存せず、細胞試料を微細な内部構造を含めてシームレスに観察できていることが分かる。各元素吸収端において複数の波長でイメージングを行い、各ピクセルの吸収スペクトルを取得することで、今後こうした微細構造の局所的な元素分布や化学結合の状態を知ることが可能になる。またタイコグラフィの再構成試料像からは、吸収端での吸光度の変化だけでなく位相のシフトも同様に検知することができる。

この際、タイコグラフィ走査に必要な走査以外に試料は光軸方向には全く移動させず、同一位置を保ったままでの計測を行っている。なお、試料交換時の大気開放も含めた実験期間の5日に亘ってミラーの再アライメントは必要とせず、細胞観察中の分解能の悪化も見られず安定した環境での観察が可能であった。こうした安定性は将来的なビームラインでの実用などにも十分耐えるものであると考えている。

また、ミラー光学系の長作動距離を活かして、細胞内の微細構造を立体的に観察するためにステレオイメージングも試みた。Fig. 5に細胞の付着した窒化ケイ素薄膜を $\pm 45^\circ$ 傾けて計測した結果を示す。細胞を傾けて計測したことで、ミトコンドリアや小胞体、ゴルジ体といった細胞内小器官が密に集まった核膜領域の隆起構造が明瞭となった。なお、Fig. 5(b)において試料ホルダが若干傾いているのは、ウォルターミラーで反射されたX線が元々の光軸に対して 7° 程度傾いていることを示している。 $\pm 90^\circ$ まで回転可能な本装置は将来的なトモグラフィへの応用も可能であり、こうした細胞内の微細構造を詳細に三次元解析することも期待できる。

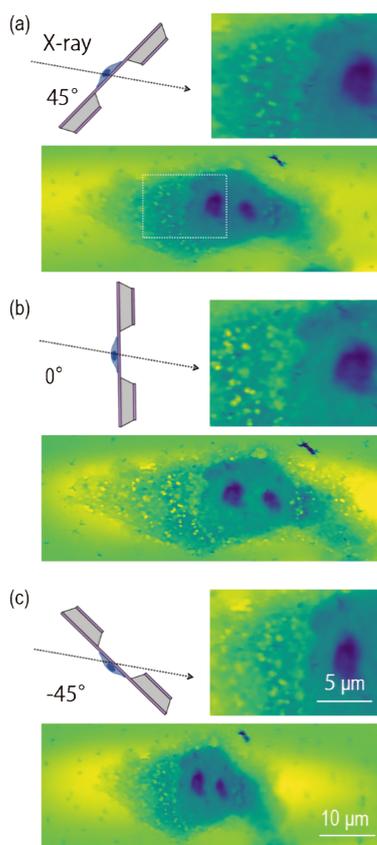


Fig. 5 (Color online) Stereo imaging of CHO-K1 cell using the soft X-ray ptychography system. The images were taken by tilting the sample holder by 45° (a), 0° (b), and -45° (c). The magnified images to the upper right are taken from areas corresponding to the dotted rectangles in the center image of (a).

5. 結論と将来の見通し

本研究では、全反射ウォルターミラーを用いることで、無色収差・長作動距離といった特徴を持った軟X線タイコグラフィシステムを新たに開発した。テストパターンを観察により数10 nm 分解能を確認するとともに、デモンストレーションとして哺乳類細胞を炭素・窒素・酸素といった軽元素の吸収端をまたいで計測し、細胞内構造を幅広い波長域で様々に観察可能であることを示した。

こうした本軟X線タイコグラフィシステムの特徴は、複雑な組成・三次元構造を持つ生物や材料試料の解析に最適である。本記事では、単純に特定波長でのイメージング結果を紹介したが、吸収端での複数波長を利用した分光計測を組み合わせることで、細胞内の化学状態マッピングも同様に可能であることを確認している。またこの他、X線磁気円二色性を利用した薄膜中磁区構造の高分解能可視化にも成功している。

今回実現された分解能は、装置の幾何学的配置から実現可能な値と比較して、数倍悪化したものになっていた。原因の1つと考えられる周囲環境の振動に関しては、ビームライン周辺の不要な真空ポンプを停止することで1/10以下に大きく改善できることを確認している。加えてマルチモード解析などの再構成アルゴリズムの改善を行うことにより、光学配置から達成可能な10 nm 前後の空間分解能の実現を目指している。

また本研究では、哺乳類細胞中の様々な微細構造を軟X線タイコグラフィにより高分解能観察可能であることを示した。こうした細胞構造の詳細を理解する上では、既に多くの知見が得られている可視光での観察手法との比較が重要である。ここまで我々は主に軟X線でのタイコグラフィ計測に焦点をあてて実験を行ったが、全反射ミラー光学系は軟X線だけでなく、可視光も利用した多波長同時計測も可能である。ウォルターミラーは結像光学素子であるため、可視光顕微鏡の対物レンズと同じように利用でき、例えば本研究に利用したミラー設計の場合、倍率200倍、開口数0.15の対物レンズとして扱うことが可能であり、X線と同軸で可視光を照明した蛍光顕微鏡、ラマン顕微鏡のような光学系を組むことも可能である。また、可視光の拡大光学系は、単純に試料のアライメント手段としても有効である。この他、光化学反応を観察するためのポンププローブ実験系と組み合わせる利用も想定される。

軟X線を利用した顕微イメージング技術自体は既に古い歴史をもっており、様々な応用研究が盛んに報告されている。そうした中において、今回開発した軟X線タイコグラフィシステムは分解能や感度だけでなく、装置のシンプルさとそれに依る安定性・拡張性・応用性の高さで多くの利点を有している。既に様々な分野の研究者との議論も開始しており、トモグラフィ計測や様々なin-situ/operando計測技術と組み合わせることで、今後軟X線顕微イ

メーシングの応用を大きく押し広げられるものと期待している。

謝辞

本研究の遂行にあたって多くのサポート・助言を頂いた、理化学研究所 矢橋牧名グループディレクター、夏目光学株式会社テクノロジーセンター 橋爪寛和所長、平栗健太郎氏、北海道大学 鈴木明大准教授に深く感謝致します。また本研究は日本学術振興会科研費（20H04451, 21K20394）、科学技術振興機構 さきがけ（JPMJPR1772）、東京大学物性研究所の共同利用課題（提案番号2021A7402, 2021B7402, 2022A7402）、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業、および東京大学卓越研究員制度の支援を受けて実施されました。

参考文献

- 1) M. Guizar-Sicairos and J. R. Fienup: *Opt. Express* **16**, 7264 (2008).
- 2) P. Thibault, M. Dierolf, A. Menzel, O. Bunk, C. David and F. Pfeiffer: *Science* **321**, 379 (2008).
- 3) A. M. Maiden and J. M. Rodenburg: *Ultramicroscopy* **109**, 1256 (2009).
- 4) F. Pfeiffer: *Nat. Photonics* **12**, 9 (2018).
- 5) M. Hirose, N. Ishiguro, K. Shimomura, D. N. Nguyen, H. Matsui, H. C. Dam, M. Tada and Y. Takahashi: *Commun. Chem.* **2**, 50 (2019).
- 6) X. Zhu, A. P. Hitchcock, D. A. Bazylinski, P. Denes, J. Joseph, U. Lins, S. Marchesini, H. W. Shiu, T. Tyliczszak and D. A. Shapiro: *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113**, E8219 (2016).
- 7) T. Sun, G. Sun, F. Yu, Y. Mao, R. Tai, X. Zhang, G. Shao, Z. Wang, J. Wang and J. Zhou: *ACS Nano* **15**, 1475 (2021).
- 8) Y. Takeo, H. Motoyama, T. Shimamura, T. Kimura, T. Kume, Y. Matsuzawa, T. Saito, Y. Imamura, H. Miyashita, K. Hiraguri, H. Hashizume, Y. Senba, H. Kishimoto, H. Ohashi and H. Mimura: *Appl. Phys. Lett.* **117**, 151104 (2020).
- 9) H. Motoyama, S. Owada, G. Yamaguchi, T. Kume, S. Egawa, K. Tono, Y. Inubushi, T. Koyama, M. Yabashi, H. Ohashi and H. Mimura: *J. Synchrotron Radiat.* **26**, 1406 (2019).
- 10) W. Chao, J. Kim, S. Rekawa, P. Fischer and E. H. Anderson: *Opt. Express* **17**, 17669 (2009).
- 11) B. Rösner, S. Finizio, F. Koch, F. Döring, V. A. Guzenko, M. Langer, E. Kirk, B. Watts, M. Meyer, J. Loroña Ornelas, A. Späth, S. Stanescu, S. Swaraj, R. Belkhou, T. Ishikawa, T. F. Keller, B. Gross, M. Poggio, R. H. Fink, J. Raabe, A. Kleibert and C. David: *Optica* **7**, 1602 (2020).
- 12) T. Kimura, Y. Takeo, K. Sakurai, N. Furuya, S. Egawa, G. Yamaguchi, Y. Matsuzawa, T. Kume, H. Mimura, M. Shimura, H. Ohashi, I. Matsuda and Y. Harada: *Opt. Express* **30**, 26220 (2022).
- 13) 高橋幸生: *放射光* **31**, 111 (2018).
- 14) 青木真雄: *放射光* **23**, 156 (2010).
- 15) 松山智至: *放射光* **31**, 22 (2018).
- 16) 本山央人, 三村秀和: *放射光* **33**, 19 (2020).
- 17) S. Yamamoto, Y. Senba, T. Tanaka, H. Ohashi, T. Hirono, H. Kimura, M. Fujisawa, J. Miyawaki, A. Harasawa, T. Seike, S. Takahashi, N. Nariyama, T. Matsushita, M. Takeuchi, T. Ohata, Y. Furukawa, K. Takeshita, S. Goto, Y. Harada, S. Shin, H. Kitamura, A. Kakizaki, M. Oshima and I. Matsuda: *J. Synchrotron Radiat.* **21**, 352 (2014).
- 18) J. Miyawaki, S. Yamamoto, Y. Hirata, M. Horio, Y. Harada and I. Matsuda: *AAPPS Bull.* **31**, 25 (2021).
- 19) S. Matsuyama, N. Kidani, H. Mimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *Opt. Express* **20**, 10310 (2012).
- 20) S. Matsuyama, Y. Emi, H. Kino, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *Opt. Express* **23**, 9746 (2015).
- 21) T. Kume, Y. Takei, S. Egawa, H. Motoyama, Y. Takeo, G. Yamaguchi and H. Mimura: *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 021718 (2019).
- 22) G. Yamaguchi, H. Motoyama, S. Owada, Y. Kubota, S. Egawa, T. Kume, Y. Takeo, M. Yabashi and H. Mimura: *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 123106 (2021).

著者紹介



木村隆志

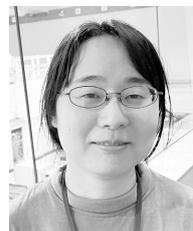
東京大学物性研究所 准教授

E-mail: tkimura@issp.u-tokyo.ac.jp

専門: X線光学, X線イメージング, 超精密加工

【略歴】

2011年3月大阪大学大学院精密科学・応用物理学専攻博士後期課程修了。2011年4月北海道大学電子科学研究所助教。2017年10月JST さきがけ研究員。2020年7月より現職。



竹尾陽子

東京大学物性研究所 助教

E-mail: takeo@issp.u-tokyo.ac.jp

専門: X線光学, X線イメージング, 超精密加工

【略歴】

2021年3月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻博士後期課程修了。2021年4月より現職。

Development of soft X-ray ptychography system using Wolter mirror

Takashi KIMURA¹, Yoko TAKEO^{1,2}, Kai SAKURAI³, Noboru FURUYA³,
Satoru EGAWA⁴, Gota YAMAGUCHI⁵, Yusuke MATSUZAWA⁶, Takehiro KUME⁶,
Hidekazu MIMURA³, Mari SHIMURA^{5,8}, Haruhiko OHASHI^{2,5},
Iwao MATSUDA¹, Yoshihisa HARADA¹

¹The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8581, Japan

²Japan Synchrotron Radiation Research Institute, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

³Department of Applied Physics, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

⁴RIKEN Center for Advanced Photonics, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198, Japan

⁵RIKEN, SPring-8 Center, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

⁶Technology Center, Natsume Optical Corporation, 1200-29 Kawaji, Iida, Nagano 399-2431, Japan

⁷Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

⁸Research Institute, National Center for Global Health and Medicine, Tokyo 162-8655, Japan

Abstract We have developed a new soft x-ray ptychography system using a total-reflection Wolter mirror as an illumination optics. This new system, installed at BLO7LSU of SPring-8, provides seamless imaging with a half-period resolution of 50 nm in the wavelength range of 250 eV to 2 keV available at the beamline by taking advantage of the achromatic property of the total-reflection optics. In this article, we describe the details of the optics of the developed ptychography system and introduce the imaging results of mammalian cells measured as a demonstration sample.