

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H01073

研究課題名(和文) X線結像ミラーを用いた次世代X線結像顕微鏡の開発

研究課題名(英文) Development of next-generation full-field X-ray microscope based on X-ray mirrors

研究代表者

松山 智至 (Matsuyama, Satoshi)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10423196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、キーデバイスであるAdvanced Kirkpatrick-Baez結像ミラーを世界に先駆けて開発することで、高性能な結像型X線顕微鏡の実現を目指した。様々な観点から結像ミラーを設計・シミュレーションし、最適化したものを試作した。多層膜コーティングをすることで8keVのX線に対応した反射型レンズを開発した。SPring-8にてX線顕微鏡を構築しその性能を評価したところ、20nm構造を解像することができた。結像ミラーを用いたX線顕微鏡において世界最小分解能を達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高分解能なX線顕微鏡を開発できた点と、さらなる高分解能化のための足掛かりを得ることができた点が、本研究の主要な成果である。本研究がさらに進むことで、これまででは見ることができなかった試料や現象を高精細に可視化・分析し、その理解を深めることで新しい科学を拓くことが可能となる。例えば、昨今注目されている電池や触媒の挙動を詳細に可視化・分析することで、その性能を飛躍的に高めるなどが期待される。

研究成果の概要(英文)： In this study, we aimed to realize a high-performance full-field X-ray microscope by developing the world's first reflective X-ray lens (Advanced Kirkpatrick-Baez imaging mirror), which is a key device to improve efficiency and spatial resolution.

The reflective lens was designed and simulated from various perspectives, and an optimized prototype was fabricated. The reflective lens was developed by coating it with multilayer for 8 keV X-rays. Its performance was evaluated by constructing an X-ray microscope at SPring-8, and it could resolve a 20 nm structure. The world's smallest resolution was achieved in an X-ray microscope using a reflective lens.

研究分野：X線光学

キーワード：X線 X線顕微鏡 X線結像ミラー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線顕微鏡は透過力が高いため、電子顕微鏡が不得意とする厚い試料の内部観察が可能であり、また、その短波長性から可視光顕微鏡よりも高分解能が期待される。しかし、すでに実用化されている回折レンズや屈折レンズは、効率が低くまた強い色収差を有しているため、高性能かつ高分解能なX線用レンズの開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、これらの問題を解決するために、高性能な反射レンズを開発し、これまでよりも高効率かつ高分解能なX線顕微鏡の開発を目指した。ここで蓄積された知識・経験・技術を基にさらに高分解能かつ高性能なX線顕微鏡を実現するための足掛かりを得ることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

研究・開発は計画に従って以下の順に進めた。すべてのX線の実験はSPring-8 BL29XUにて実施した。計画の後半には将来を見据えた様々な新しい検討も進めた。

- (1) 波動光学シミュレーションに基づいた光学設計と性能予測
- (2) 多層膜反射レンズの試作
- (3) SPring-8における性能評価実験
- (4) X線顕微鏡の構築と性能評価
- (5) 位相イメージング法の開発
- (6) X線顕微鏡に特化した波面計測法の開発
- (7) 像面湾曲補正光学系の提案

4. 研究成果

(1) 波動光学シミュレーションに基づいた光学設計と性能予測

Wolter型とWolter型に基づいたハイブリッド型の反射レンズ(Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー)の設計を行った。Wolter型の設計において、主面の位置を焦点側にシフトさせることで、顕微鏡の全長を約2mとすることができた。また、Wolter型の主面の位置を正確にWolter型の主面の位置に一致させることで縦横の倍率を一致させた(32倍)。波動光学シミュレーションによって性能を予想したところ、8keVのX線において回折限界15nm、視野14(縦)×36(横) μm であった。

(2) 多層膜反射レンズの試作

シリコン単結晶基板を用いて、楕円凹面+双曲凹面(Wolter型)、楕円凹面+双曲凸面(Wolter型)のミラーを作製した。形状誤差を評価したところ約1~2nmであり、目標性能を達成した。また、これらにグレーディッド多層膜を成膜することで、多層膜反射レンズを完成させた。

(3) SPring-8における性能評価実験

SPring-8 BL29XUにて、反射レンズを精密に構築・調整した。初めに縮小結像配置の下、8keVのX線を使ってX線格子干渉計にて波面収差を評価した。波面収差はおよそ $\lambda/4$ であり、ほとんど理想的であった。クロスチェックとしてタイコグラフィを使って波面計測を実施した。格子干渉計で得られた結果と矛盾のない波面収差が得られ、性能評価実験が正しく実施できていることを確認した。

(4) X線顕微鏡の構築と性能評価

光学系を拡大結像配置に変えて、試料(テストチャート)の拡大結像イメージを取得した。8keVのX線を試料に照射して、反射レンズとX線カメラで撮像した。露光時間9秒で明瞭なテストチャートの像を取得することができた。本テストチャートの最小構造である20nm線幅を解像することができ、高い空間分解能を持つことを確認した(図1)。反射レンズを用いたX線顕微鏡において世界最小の空間分解能を達成した。

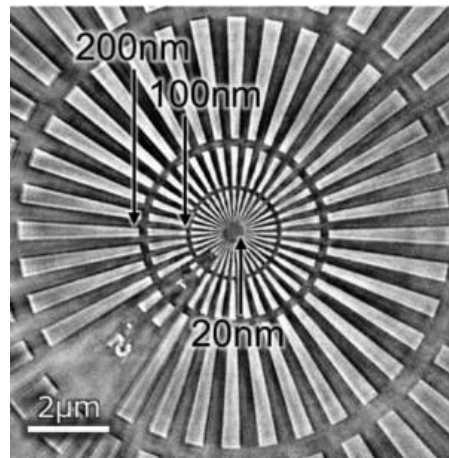


図1 テストチャートのX線像(8keV). 露光時間9秒. フラットフィールド補正後.

(5)位相イメージング法の開発

硬X線を使うX線顕微鏡において、吸収の少ない(もしくは薄い)物体を可視化することは難しい。一般的には、Zernike型やTalbot型の位相コントラスト法を用いるが、これらの手法は反射レンズとは相性が悪く、容易には実施できない。この問題を解決するために、コヒーレント照明下で試料を光軸方向にシフトさせながら撮像し、これら複数の画像群から位相回復計算によって試料の複素透過関数を再構成する手法を開発した。SPring-8にてデモンストレーション実験を実施したところ、50nm構造を持つテストチャートや6μmのポリスチレン球の位相像を15keVのX線で取得することに成功した。また、本手法をうまく適用することで、撮像後であっても像面湾曲収差を補正することも可能である。実際に像面湾曲収差の補正をデモンストレーションしたところ、これらの収差をうまく補正することができ、視野の拡張に成功した。

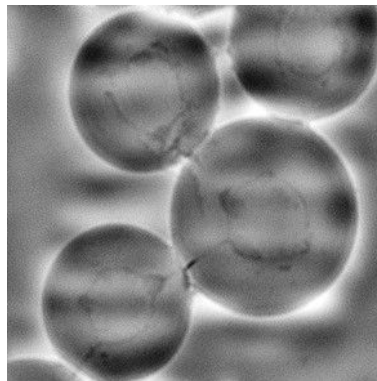


図2 6μmポリスチレンの再構成位相像

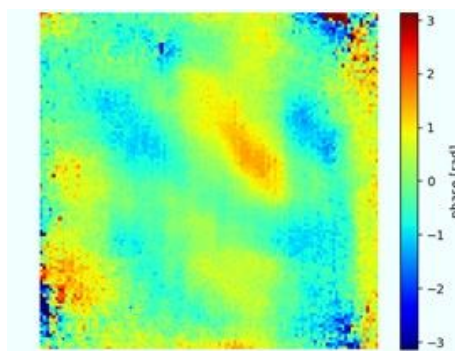


図3 微小点を用いた手法で決定した波面収差の例。
微小点(50nm径)はFZPによって形成した。

(6)X線顕微鏡に特化した波面計測法の開発

上記(3)において様々な波面計測を用いて開発した反射レンズを評価したが、一方で、これらの方法は顕微鏡配置では実施できず、わざわざ反射レンズを顕微鏡から取り外し、別の光学系を

構築する必要があった。このような手法では、反射レンズの持ち運び・再セットアップ時に別の波面収差が生じる恐れがある（さらに大開口数反射レンズでは影響は甚大）。顕微鏡配置の状態で in-situ に波面を計測する手法の開発の必要である。そのため、新しく微小点を用いる方法とレンズを傾ける方法を検討した。微小点を用いる方法では、微小点を光軸に沿ってシフトさせながら結像した複数像（Focal stack）を集めた。これに位相回復法を適用することで、波面収差を決定した（図 3）。低開口数反射レンズでは、本手法によって比較的簡単に波面収差を得られたが、大開口数反射レンズではより小さい微小点が必要となるため、実際の応用にはまだ課題がある。レンズを傾ける方法では、レンズを傾けながら複数の試料像を撮像し位相回復法によって波面収差を再構成する。SPring-8 にて試みたところ、試料とレンズの位置関係を正確に固定することができず正しく位相回復計算を実行することができなかった。精度を向上させるためには装置構成の洗練が必要であることが分かった。

(7) 像面湾曲補正光学系の提案

本課題進行中に像面湾曲収差を直接補正できる光学系を提案した。Wolter 型光学系（特に型）では像面湾曲収差によって視野が制限される。Wolter 型ミラーに新しいミラーを追加することで像面湾曲を補正できる光学系をシミュレーションにて検討した。いくつかの設計に対して像面湾曲を計算したところ、追加したミラーによって像面湾曲が抑制されていた。約 100 μm の視野まで設計することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Yamada Jumpei, Inoue Takato, Nakamura Nami, Kameshima Takashi, Yamauchi Kazuto, Matsuyama Satoshi, Yabashi Makina	4. 巻 20
2. 論文標題 X-Ray Single-Grating Interferometry for Wavefront Measurement and Correction of Hard X-Ray Nanofocusing Mirrors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 7356 ~ 7356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20247356	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuyama Satoshi, Yamada Jumpei, Kohmura Yoshiaki, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 27
2. 論文標題 Full-field X-ray fluorescence microscope based on total-reflection advanced Kirkpatrick?Baez mirror optics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 18318 ~ 18318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.018318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Jumpei, Matsuyama Satoshi, Hirose Raita, Takeda Yoshihiro, Kohmura Yoshiaki, Yabashi Makina, Omote Kazuhiko, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 7
2. 論文標題 Compact full-field hard x-ray microscope based on advanced Kirkpatrick?Baez mirrors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 367 ~ 367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTICA.386012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Takato, Matsuyama Satoshi, Yamada Jumpei, Nakamura Nami, Osaka Taito, Inoue Ichiro, Inubushi Yuichi, Tono Kensuke, Yumoto Hirokatsu, Koyama Takahisa, Ohashi Haruhiko, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 27
2. 論文標題 Generation of an X-ray nanobeam of a free-electron laser using reflective optics with speckle interferometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 883 ~ 889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577520006980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuyama Satoshi, Maeshima Kazuhiro, Shimura Mari	4. 巻 35
2. 論文標題 Development of X-ray imaging of intracellular elements and structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Analytical Atomic Spectrometry	6. 最初と最後の頁 1279 ~ 1294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0JA00128G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Nami, Matsuyama Satoshi, Inoue Takato, Inoue Ichiro, Yamada Jumpei, Osaka Taito, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 27
2. 論文標題 Focus characterization of an X-ray free-electron laser by intensity correlation measurement of X-ray fluorescence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 1366 ~ 1371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577520009868	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Takato, Matsuyama Satoshi, Kawai Shogo, Yumoto Hirokatsu, Inubushi Yuichi, Osaka Taito, Inoue Ichiro, Koyama Takahisa, Tono Kensuke, Ohashi Haruhiko, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 89
2. 論文標題 Systematic-error-free wavefront measurement using an X-ray single-grating interferometer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 043106 ~ 043106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5026440	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuyama Satoshi, Yamada Jumpei, Hata Kentaro, Kohmura Yoshiki, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 24
2. 論文標題 High-Resolution Full-Field X-ray Microscope for 20-keV X-rays with Multilayer Imaging Mirrors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 288 ~ 289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618013764	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Jumpei, Matsuyama Satoshi, Hata Kentaro, Hirose Raita, Takeda Yoshihiro, Kohmura Yoshiki, Yabashi Makina, Omote Kazuhiko, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 24
2. 論文標題 Reflective Imaging Optics Using Concave and Convex Mirrors for a Compact and Achromatic Full-field X-ray Microscope.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 276 ~ 277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618013715	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuyama S., Inoue T., Yamada J., Kim J., Yumoto H., Inubushi Y., Osaka T., Inoue I., Koyama T., Tono K., Ohashi H., Yabashi M., Ishikawa T., Yamauchi K.	4. 巻 8
2. 論文標題 Nanofocusing of X-ray free-electron laser using wavefront-corrected multilayer focusing mirrors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-35611-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Jumpei, Matsuyama Satoshi, Sano Yasuhisa, Kohmura Yoshiki, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 27
2. 論文標題 Compact reflective imaging optics in hard X-ray region based on concave and convex mirrors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3429 ~ 3429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.003429	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Jumpei, Matsuyama Satoshi, Yasuda Shuhei, Kohmura Yoshiki, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto, Sano Yasuhisa	4. 巻 10386
2. 論文標題 Development of concave-convex imaging mirror system for a compact and achromatic full-field x-ray microscope	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 103860C
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2272904	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計67件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 37件）

1. 発表者名 N. Nakamura, J. Yamada, S. Matsuyama, T. Inoue, T. Osaka, H. Yumoto, T. Koyama, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Precise wavefront measurement using grating interferometer for sub-10 nm focusing system
3. 学会等名 5th International Conference on X-ray Optics and Applications 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Inoue, J. Yamada, S. Matsuyama, N. Nakamura, T. Osaka, H. Yumoto, T. Koyama, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Ultraprecise fabrication of X-ray mirrors for XFEL sub-10 nm focusing system based on Wolter type III geometry
3. 学会等名 5th International Conference on X-ray Optics and Applications 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nishioka, H. Yamaguchi, S. Matsuyama, J. Sonoyama, K. Akiyama, H. Nakamori, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, L. Assoufid, K. Yamauchi
2. 発表標題 Adaptive x-ray zoom condenser system based on concave and convex mirrors
3. 学会等名 5th International Conference on X-ray Optics and Applications 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Inoue, J. Yamada, S. Matsuyama, N. Nakamura, T. Osaka, H. Yumoto, T. Koyama, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Development of x-ray mirrors for XFEL sub-10 nm focusing system based on Wolter type III geometry
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Inoue, J. Yamada, S. Matsuyama, N. Nakamura, T. Osaka, H. Yumoto, T. Koyama, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Development of ultraprecise X-ray focusing mirrors based on Wolter geometry
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Nakamura, J. Yamada, S. Matsuyama, T. Inoue, T. Osaka, H. Yumoto, T. Koyama, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Precise wavefront measurement using grating interferometer for sub-10 nm XFEL focusing system
3. 学会等名 5th International Conference on X-ray Optics and Applications 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nishioka, H. Yamaguchi, S. Matsuyama, J. Sonoyama, K. Akiyama, H. Nakamori, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi
2. 発表標題 Development of X-ray adaptive focusing optics with four mirrors deformable between concave and convex shapes
3. 学会等名 5th International Conference on X-ray Optics and Applications 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上陽登, 山田純平, 松山智至, 中村南美, 田中優人, 大坂泰斗, 湯本博勝, 小山貴久, 大橋治彦, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 Wolter 型Advanced KBミラーを用いたX線自由電子レーザー-sub-10 nm集光システムの開発 (第3報)
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中優人, 松山智至, 井上陽登, 中村南美, 山田純平, 香村芳樹, 矢橋牧名, 表和彦, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 結像型 X 線顕微鏡における in-situ 波面計測手法の開発
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田純平, 松山智至, 井上陽登, 中村南美, 田中優人, 大坂泰斗, 井上伊知郎, 犬伏雄一, 湯本博勝, 小山貴久, 大橋治彦, 山内和人, 矢橋牧名
2. 発表標題 Wolter III 型 advanced KBミラーによる XFEL sub-10 nm 集光光学系の開発
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上陽登, 松山智至, 一井愛雄, 山田純平, 佐野泰久, 山内和人
2. 発表標題 X線ミラーを用いたsub-5nm集光システムの開発
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村南美, 松山智至, 山田純平, 井上陽登, 井上伊知郎, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 コヒーレントX線散乱を用いたXFELナノビーム強度プロファイルの再構成
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上陽登, 松山智至, 田中優人, 二村浩平, 一井愛雄, 山田純平, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 圧電素子駆動型形状可変ミラーを用いたX線sub-5nm集光システムの開発
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中優人, 松山智至, 井上陽登, 中村南美, 山田純平, 香村芳樹, 矢橋牧名, 表和彦, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 像型X線顕微鏡における波面計測手法の開発
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松山智至, 波多健太郎, 山内和人
2. 発表標題 複数の凸面鏡を持つ?度な硬 X 線結像光学系の開発 (第?報)
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Matsuyama
2. 発表標題 High-Resolution Full-Field X-Ray Microscope Based on Multilayer Advanced Kirkpatrick-Baez Mirror Optics
3. 学会等名 XOPT2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Inoue, S. Matsuyama, N. Nakamura, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Koyama, T. Osaka, I. Inoue, K. Tono, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Precision KB mirror alignment using new nanobeam diagnosis
3 . 学会等名 XOPT2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, T. Inoue, N. Nakamura, T. Osaka, I. Inoue, Y. Inubushi, K. Tono, H. Yumoto, T. Koyama, H. Ohashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, and M. Yabashi
2 . 発表標題 Development of XFEL sub-10 nm focusing system based on Wolter III-advanced KB optics
3 . 学会等名 XOPT2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Hagiwara, J. Yamada, S. Matsuyama, Y. Sano, R. Hirose, Y. Takeda, Y. Kohmura, M. Yabashi, K. Omote, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Reflective imaging device using concave-convex mirrors for compact full-field X-ray microscope
3 . 学会等名 XOPT2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Nakamura, S. Matsuyama, T. Inoue, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Koyama, T. Osaka, I. Inoue, K. Tono, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Nanobeam diagnosis for XFEL sub-10nm focusing system
3 . 学会等名 XOPT2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Inoue, S. Matsuyama, N. Nakamura, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Koyama, T. Osaka, I. Inoue, K. Tono, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Precision focusing mirror alignment at SACLA using new nanobeam diagnosis
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Matsuyama
2. 発表標題 Development of high-resolution full-field X-ray microscope based on multilayer advanced Kirkpatrick-Baez mirrors
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nakamura, S. Matsuyama, T. Inoue, I. Inoue, T. Osaka, Y. Inubushi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Beam size measurement for XFEL nanobeam using intensity interferometer of X-ray fluorescence
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, T. Inoue, N. Nakamura, T. Osaka, I. Inoue, Y. Inubushi, K. Tono, H. Yumoto, T. Koyama, H. Ohashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, and M. Yabashi
2. 発表標題 Development of XFEL sub-10 nm focusing mirrors: wavefront-corrected multilayer KB system and upgrade to advanced KB system
3. 学会等名 X RIAO-XIII OPTILAS-MOPM 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Matsuyama
2. 発表標題 High-resolution full-field X-ray microscope with multilayer advanced Kirkpatrick-Baez mirror optics
3. 学会等名 The 15th Symposium of Japanese Research Community on X-ray Imaging Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Matsuyama
2. 発表標題 Fabrication, metrology, and alignment of the newly-developed ML advanced KB mirror for sub-10 nm focusing
3. 学会等名 APS-U Metrology Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松山智至, 山田純平, 井上陽登, 表和彦, 廣瀬雷太, 武田佳彦, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 多層膜結像ミラーを用いた高分解能 X 線顕微鏡の開発 (第二報)
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口浩之, 松山智至, 園山純生, 秋山和輝, 中森紘基, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 凹・凸面形状可変ミラーを組み合わせたX線ズームコンデンサの開発
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上陽登, 松山智至, 山田純平, 中村南美, 大坂泰斗, 湯本博勝, 小山貴久, 大橋治彦, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 Wolter 型Advanced KBミラーを用いたX線自由電子レーザー-sub-10 nm集光システムの開発
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村南美, 松山智至, 井上陽登, 井上伊知郎, 大坂泰斗, 山田純平, 湯本博勝, 小山貴久, 大橋治彦, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 X線自由電子レーザーナノ集光システムの開発 (第2報)-蛍光X線の強度干渉現象を利用したビーム径計測手法の実証-
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松山智至
2. 発表標題 AKBミラーこの10年 これから何をしなくてはならないか?
3. 学会等名 X線ナノ集光技術研究会 10周年記念研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松山智至, 山田純平, 井上陽登, 表和彦, 廣瀬雷太, 武田佳彦, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 多層膜結像ミラーを用いた高分解能結像型X線顕微鏡の開発
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上陽登, 松山智至, 山田純平, 中村南美, 大坂泰斗, 湯本博勝, 小山貴久, 大橋治彦, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 Wolter 型AdvancedKBミラーを用いたX線自由電子レーザー-sub-10nm集光システムの開発(第2報)高反射率多層膜の作製と差分成膜による形状修正
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Yamada
2. 発表標題 Hard-X-ray imaging mirrors for compact and high-resolution full-field microscopy
3. 学会等名 HeKKSaGOn WG5 one-day preconference discussion meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Compact and large-magnification full-field X-ray microscope using concave-convex imaging mirrors
3. 学会等名 International Conference on X-ray Optics and Applications 2018 (XOPT2018) in OPIC2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hata, J. Yamada, S. Matsuyama, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Development of high-resolution X-ray imaging optical system using multilayer imaging mirrors
3. 学会等名 International Conference on X-ray Optics and Applications 2018 (XOPT2018) in OPIC2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Development of reflective imaging optics using concave and convex mirrors
3 . 学会等名 The 6th International Workshop on X-ray Optics and Metrology Satellite Meeting of SRI 2018 (IWXM 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Hard-x-ray imaging mirror optics using concave and convex mirrors
3 . 学会等名 The 13th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Matsuyama
2 . 発表標題 Full field imaging and focusing with advanced mirror based optics
3 . 学会等名 The 13th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Yamada
2 . 発表標題 Reflective Imaging Optics using Concave and Convex Mirrors for A Compact and Achromatic Full-field X-ray Microscope
3 . 学会等名 14th International Conference on X-ray Microscopy (XRM2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Matsuyama
2. 発表標題 High-resolution full-field X-ray microscope for 20-keV X-rays with multilayer imaging mirrors
3. 学会等名 14th International Conference on X-ray Microscopy (XRM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田純平, 松山智至, 波多健太郎, 萩原拓, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 小型かつ色収差の無い高分解能結像型X線顕微鏡の開発
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 廣瀬雷太, 武田佳彦, 香村芳樹, 矢橋牧名, 表和彦, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 凹・凸面鏡を用いた結像型X線顕微鏡の開発
3. 学会等名 第32回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 萩原拓, 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 矢橋牧名, 表和彦, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 X線波面計測法を用いた結像ミラーの評価
3. 学会等名 第32回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 萩原拓, 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 X線波面計測法を用いた結像ミラーの評価 タイコグラフィを用いたシングルグレーチング干渉計のクロスチェック
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Matsuyama, J. Yamada, S. Yasuda, Y. Kohmura, H. Okadam, Y. Sano, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Achromatic and High-Resolution Full-Field X-ray Microscope and its Applicaiton
3. 学会等名 International conference on X-ray optics and applications 2017 (XOPT'17) in OPIC2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Inoue, S. Matsuyama, S. Kawai, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Koyama, K. Tono, H. Ohashi, T. Katayama, S. Goto, T. Ishikawa, M. Yabashi, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Development of calibration method for X-ray single-grating interferometry
3. 学会等名 International conference on X-ray optics and applications 2017 (XOPT'17) in OPIC2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Kawai, S. Matsuyama, T. Inoue, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Osaka, T. Koyama, K. Tono, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2. 発表標題 Development of a multilayer KB mirror system for sub-10nm XFEL focusing
3. 学会等名 International conference on X-ray optics and applications 2017 (XOPT'17) in OPIC2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, S. Yasuda, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 High-magnification X-ray imaging mirror system consisting of elliptical concave and hyperbolic convex mirrors
3 . 学会等名 International conference on X-ray optics and applications 2017 (XOPT'17) in OPIC2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Matsuyama, J. Yamada, S. Yasuda, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Development of full-field x-ray fluorescence microscope using total-reflection mirrors
3 . 学会等名 SPIE Optics+Photonics2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, S. Yasuda, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Development of concave-convex imaging mirror system for a compact and achromatic full-field x-ray microscope
3 . 学会等名 SPIE Optics+Photonics2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, S. Yasuda, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Development of an X-ray imaging optical system consisting of concave and convex mirrors
3 . 学会等名 The 24th Congress of the International Commission for Optics, X-ray and High-energy Optics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Matsuyama, S. Yasuda, J. Yamada, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Full-field X-ray fluorescence imaging based on total-reflection imaging mirrors
3 . 学会等名 The 24th Congress of the International Commission for Optics, X-ray and High-energy Optics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Yamada, S. Matsuyama, S. Yasuda, Y. Sano, and K. Yamauchi
2 . 発表標題 Fabrication of X-ray imaging mirror for an achromatic and high-resolution full-field X-ray microscope
3 . 学会等名 The 32nd Annual Meeting of American Society for Precision Engineering (ASPE2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Matsuyama
2 . 発表標題 Wavefront sensing for nano-focusing characterization
3 . 学会等名 9th Hard X-ray FEL Collaboration Meeting (5-way meeting 2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Yamada
2 . 発表標題 High performance X-ray focusing system using advanced KB mirror
3 . 学会等名 9th Hard X-ray FEL Collaboration Meeting (5-way meeting 2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 波多健太郎, 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 山内和人
2. 発表標題 多層膜結像ミラーを用いた高分解能X線顕微鏡の実現可能性の検討
3. 学会等名 精密工学会関西支部 2017年度関西地方定期学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松山智至
2. 発表標題 高分解能かつ色収差のないX線顕微鏡
3. 学会等名 学振145委員会 第154回研究会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 波多健太郎, 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 多層膜結像ミラーを用いた高分解能X線結像光学系の開発
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田純平, 松山智至, 波多健太郎, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 小型かつ高拡大倍率が実現可能なX線結像光学系の開発(第3報)-凹・凸面鏡を用いた新規光学系の実証と一体型素子化の検討-
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松山智至
2. 発表標題 全反射ミラーを用いた色収差のない結像光学系の開発
3. 学会等名 第14回X線結像光学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田純平, 松山智至, 波多健太郎, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 小型かつ高分解能な結像型 X 線顕微鏡の開発
3. 学会等名 第14回X線結像光学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 波多健太郎, 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 多層膜結像ミラーを用いた高分解能X線顕微鏡の実証
3. 学会等名 第14回X線結像光学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田純平, 松山智至, 波多健太郎, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 小型かつ大倍率が実現可能なX線結像ミラーの開発
3. 学会等名 第31回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川合篤吾, 松山智至, 井上陽登, 湯本博勝, 犬伏雄一, 小山貴久, 大坂泰斗, 大橋治彦, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 大開口数多層膜集光ミラーを用いた sub-10nm 集光システムの開発
3. 学会等名 第31回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松山智至
2. 発表標題 超精密X線ミラーが拓く次世代X線集光・結像
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第38回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 波多健太郎, 山田純平, 松山智至, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 多層膜結像ミラー光学系による高空間分解能なX線顕微鏡の開発
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 X線光学装置	発明者 松山智至	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-183795	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

名古屋大学松山研究室
<https://x-ray.mp.pse.nagoya-u.ac.jp/>

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
研究協力者	山田 純平 (Yamada Jumpei)	理化学研究所・放射光科学研究センター・研究員 (82401)	
研究協力者	表 和彦 (Omote Kazuhiko)	株式会社リガク・X線研究所・所長	
研究協力者	坂尾 太郎 (Sakao Taro)	宇宙航空研究開発機構・太陽系科学研究系・准教授 (82645)	
研究協力者	志村 まり (Shimura Mari)	国立国際医療研究センター・難治性疾患研究部・室長 (82610)	
研究協力者	井上 陽登 (Inoue Takato)	大阪大学・工学研究科・学生 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	田中 優人 (Tanaka Yuto)	大阪大学・工学研究科・学生 (14401)	
研究協力者	波多 健太郎 (Hata Kentaro)	大阪大学・工学研究科・学生 (14401)	
研究協力者	中村 南美 (Nakamura Nami)	大阪大学・工学研究科・学生 (14401)	

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