



研究課題名 伝播波面の精密制御によるコヒーレント X 線のナノビーム形成

大阪大学・大学院工学研究科・教授

やまうち かずと
山内 和人

研究課題番号： 21H05004

研究者番号： 10174575

研究期間： 令和3年度～令和6年度 研究経費（期間全体の直接経費）： 118,600千円

キーワード： X線光学、補償光学、精密加工学、精密計測学

【研究の背景・目的】

急速な高度化が進む放射光 X 線源において、第3世代蓄積リング型光源のアップグレードや、X 線自由電子レーザー (XFEL: X-ray Free Electron Laser) の更なる高性能化が計画されている。前者では、リング内電子ビームの収束性が限界まで高められ、リング型光源でも「完全なコヒーレント X 線」が利用可能になる。後者では、電子ビームの高度な制御によって、更なる高出力化や光の質の向上が進んでいる。これらの次世代光源は、集光性能の理論限界を飛躍的に高め、ナノビームの形成によって、超強光子場物理学や超高分解能 X 線顕微鏡科学など、未踏の X 線科学を拓くものと期待されている。本研究は、我々がこれまでに蓄積した成果の高度化に加えて、新たにコマ収差の抑制が可能なる新規集光光学系の構築と補償光学にもとづく波面の精密制御法の開発により、完全なコヒーレント X 線のサブ 10nm ビームを「実用に供し得るロバスト性を有する光学システム」において実現する。そして、非線型光学の研究者との連携により、XFEL において、高次の非線型光学現象の実証実験を行う。

【研究の方法】

本研究では、水平・垂直の集光をそれぞれ2枚のミラー（凸双曲面(上流側)、凹楕円面(下流側)）によって行う光学系を世界初の試みとして提案している。2回の反射により、ミラーの上流部と下流部で反射した光路間の縮小倍率差が緩和でき、コマ収差の発生を大きく低減できることを見出した。これによって、従来の KB (Kirkpatrick-Baez) 集光光学系では、X 線の入射角度誤差の許容値が 10^{-7} rad レベルであるのに対して、本光学系では 10^{-3} rad 近くまで拡大することができ、有意なロバスト性の獲得が期待できる。また、凸面の導入によって、主面が集光点側に移動するため、拡大倍率の確保に有利であり、極限集光においても大きな

ワーキングディスタンスを確保できる。一方、X 線のサブ 10nm 集光では、反射面の形状精度において 1nm PV が求められる。これをオフラインで補償することは不可能であり、本研究では、波面誤差をその場計測し、補正ミラーによって波面を精密制御する波動光学に基づく補償光学を実現する。

このために実施する研究項目を以下に示す。

- ① 凹面・凸面組み合わせ集光光学系が有する特性の詳細な理解と光学系設計の実施
- ② X 線ビームのコヒーレンスを保存する高精度多層膜ミラーの実現
- ③ 放射光そのものを利用した波面計測法、アライメント誤差評価法の確立
- ④ 形状可変光学素子の開発とその場波面補正光学系の実現

【期待される成果と意義】

X 線光源の高度化によって X 線が完全なコヒーレンスを獲得しつつある現状において、放射光 X 線光学への波動光学の全面的な適用により波面の計測と補正をその場で行う補償光学を硬 X 線領域において実現するものであり、コヒーレント X 線光学の学術的発展に真に貢献するものである。外乱に対して高いロバスト性が期待できる凸凹面複合ミラー光学系の実現によって X 線顕微鏡光学システムの大幅な高性能化が期待でき、X 線分析科学の発展に大きな寄与が期待できる。また、本光学系により、従来の強度を遥かに超える強光子場の形成が可能になり、X 線非線形光学の発展にも大きく貢献するものと言える。日本が得意とするオプティカルファブ리케이션への貢献においても大きな意義がある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Matsuyama, T. Inoue, J. Yamada et al., and K. Yamauchi, Nanofocusing of X-ray free-electron laser using wavefront-corrected multilayer focusing mirrors, *Scientific Reports* **8**, 17440, 2018.
- ・ T. Goto, S. Matsuyama et al., and K. Yamauchi, Nearly diffraction-limited hard X-ray line focusing with hybrid adaptive X-ray mirror based on mechanical and piezo-driven deformation, *Optics Express* **26** (13), 17477, 2018.
- ・ H. Mimura et al., and, K. Yamauchi, Breaking the 10nm barrier in hard-X-ray focusing, *Nature Physics*. **6**, 122-125, 2010.

【ホームページ等】

<http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>

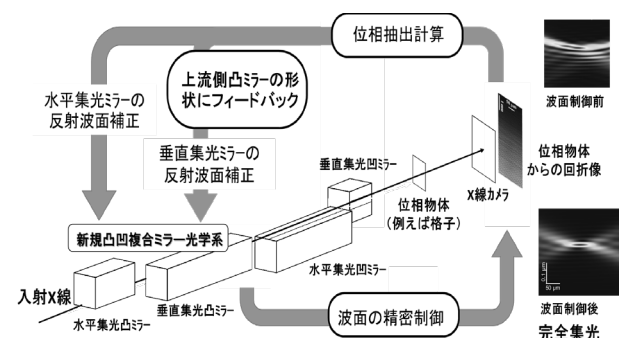


図 1 本研究で実現を目指す凸面凹面組み合わせ集光光学系と補償光学系の模式図