

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間	2021～2024
課題番号	21H05004
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
研究代表者氏名（ローマ字）	山内 和人 (YAMAUCHI Kazuto)
所属研究機関・部局・職	大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号	10174575

研究の概要：

ミラー光学系による放射光 X 線の集光において問題となるコマ収差の発生を極めて効果的に抑制できる凸凹面複合ミラー光学系を提案し、波動光学を駆使した補償光学に基づく波面の精密制御を行うことによって、コヒーレント X 線の極限サイズ（10nm 以下）での集光を実験に供し得るロバスト性を有する光学系において実現し、X 線領域における高次非線形光学現象の観察や単分子構造解析への展開を試みる。

研究分野：生産工学

キーワード：X 線光学、補償光学、精密加工、精密計測

1. 研究開始当初の背景

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。

当該研究グループは、この様な中で、集光ミラーの開口数に応じた回折限界条件での X 線集光に世界で初めて成功している。例えば、25nm ビーム@SPring-8 (Appl. Phys. Lett. (2007))、多層膜ミラーによる 7nm 集光(Nat. Phys. (2010))、SACLA の 50nm 集光 (Nat. Commun. (2014))などを達成している。

2. 研究の目的

本研究は、当該グループ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って、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、非線形光学の研究者との連携により、XFEL において、高次の非線形光学現象の実証実験を行う。

3. 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 回の反射によって、ミラー上の異なる位置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、極限集光であっ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 Sub-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。研究方法全体の構成は図 1 に示すとおりである。

具体的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
- ⑤ 集光システムの構築と強光子場実験の実施

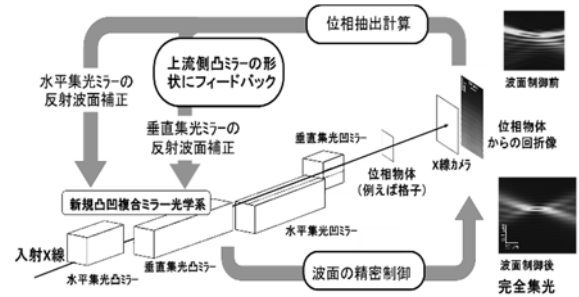


図 1 本研究で実現を目指す凸面凹面組み合わせ集光光学系と補償光学系の模式図

4. これまでの成果

(1) 凹面・凸面光学系の詳細特性の理解と光学系の設計

凹面・凸面光学系の詳細解析に基づき、各軸の必要精度を詳細に検討し、ミラーマニピュレーターを設計・製作した。大気環境下での組み込みを完了した。ステージその他は真空仕様であり、早々に真空下での光学系の構築を完了する予定である。

(2) コヒーレントX線照射時にスペックルが発生しないミラー基板の実現

ミラーの形状創製におけるミラー形状の計測法に反射波面のAt-wavelength計測を用いることを検討した。リング光源ながら、ほぼフルコヒーレントの照明が可能なSPring-8のBL29-XULを用い、シャーリング干渉計(グレーチング干渉計)の構成によってミラー形状の評価を行った。計測された波面位相はミラー形状に変換可能であり、このデータを用いて、差分成膜法によるミラーの形状修正を行った。図2に示す様に、初期状態において、 2λ (12 rad) (λ はX線の波長)あった波面位相誤差が修正後 $\lambda/4$ 以下に低減され、ミラー形状として、所期の回折限界性能を実現することに成功した。

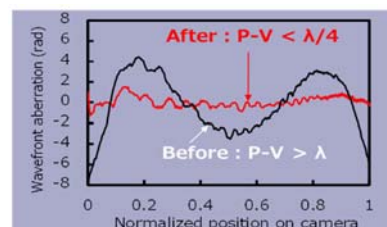


図2 波面誤差の差分成膜法による修正。波面誤差を $\lambda/4$ 以下に低減

(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

シャーリング干渉計によって集光波面を精度 $\lambda/10$ レベルで行うことを可能にした。SACLAでの集光X線の波面位相を評価し、測定波面のルジャンドル関数による展開係数が、各軸のアライメント誤差に効果的に対応することを見出し、At-wavelength波面計測による簡便なミラー姿勢の制御手法を確立した。図3にSACLAのsub-10nm集光の現状を示す。左は集光波面の位相分布、中央と右が焦点近傍での水平および垂直方向のX線強度分布である。サイドローブの無いプロファイルを得ており、集光サイズ7nm \times 7nmを達成している。ピーク強度は 10^{22} W/cm 2 以上であり、極限のX線強光子場が形成できたことを示している。

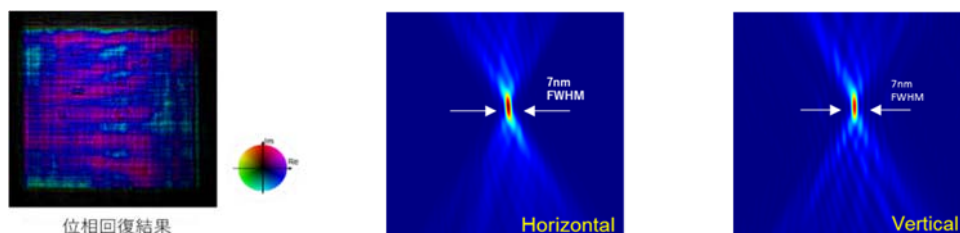


図3 SACLAのsub-10nm集光の現状。左は集光波面の位相誤差分布、中央と右が位相分布から解析された焦点近傍での水平および垂直方向のX線強度分布。集光サイズ7nm \times 7nmを達成している。

(4) 形状可変光学素子の開発と波面のその場補正光学系の実現

ピエゾアクチュエーターと機械曲げ機構を有する形状可変ミラーを開発し、At-wavelength波面計測と形状補正から構成される補償光学のためのミラー形状制御アルゴリズムを構築した。ミラー形状のその場補正法(真の補償光学)の確立を目指す段階にある。

(5) 集光システムの構築と強光子場実験の実施

強光子場実験については、理研播磨研究所のX線非線形光学研究グループとの連携により、X線3光子吸収やコヒーレントラマン散乱などを対象に、シグナル強度の理論予測を開始している。単分子回折においても、光子場強度と回折強度の関係を実験によって明らかにする(理論予測はあるが実証されていない)。

5. 今後の計画

7nm \times 7nm ビーム形成の目途をすでに得ており、令和5年度内に利用に供し得るレベルで光学系を完成し、X線非線形光学の理論研究グループとの共同による実証研究へと進める予定である。また、現在のミラー形状制御は、放射光を使ったAt-wavelength波面計測に基づいて形状評価を行い、オフラインでの形状修正加工を行っている。非線形光学や単分子回折などへの応用展開に対して、光学系の性能は十分な成果が期待できる状況に達しつつあるが、形状可変機能を持つミラーによる完全なオンライン補償光学へと光学系の高度化を進める。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

Optimal deformation procedure for hybrid adaptive X-ray mirror based on mechanical and piezo-driven bending system, T. Inoue, Y. Nishioka, S. Matsuyama, J. Sonoyama, K. Akiyama, H. Nakamori, Y. Ichii, Y. Sano, X. Shi, D. Shu, M. D. Wyman, R. Harder, Y. Kohmura, M. Yabashi, L. Assoufid, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Rev. Sci. Instrum., 査読有, 92, 123706-1, 2021

7. ホームページ等

研究室ホームページ <http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>