

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分  
平成31年3月15日現在

高精度形状可変ミラー光学系の構築と  
X線自由電子レーザーのアダプティブ集光

Development of zoom condenser system for X-ray free electron laser  
by high precision deformable reflective optics

課題番号：16H06358

山内 和人 (KAZUTO, YAMAUCHI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

X線自由電子レーザーのもつコヒーレント光としての性質を保存できる精密な形状可変ミラーの開発と、これを用いた光学パラメータ可変のアダプティブ Wolter 光学系を実現するとともに、波動光学にもとづく波面収差の評価法を構築し、これらを統合することによって、試料サイズに応じた最適サイズの集光ビームの供給を可能にする X線ズームコンデンサーを実現する。

研究分野：X線光学，精密加工学，精密計測学

キーワード：X線自由電子レーザー，X線集光，補償光学，アダプティブ光学系

1. 研究開始当初の背景

X線自由電子レーザー(XFEL)を用いる実験はレーザーパルス1ショットで完結する。このため、試料上の光子密度を如何に高めるかが実験の質を決める(弱い光を何度もあてて光子数を稼ぐことが出来ない)。このためには、試料サイズに応じた最適なサイズのビームを提供しなければならないが、直線加速器を用いる XFEL の特徴上、様々なビームサイズに対応したビームラインを準備することができない。このため、試料はビームサイズに依存して決めざるを得ず、科学の本質から決めることができない状況にある。

2. 研究の目的

上記の問題を解決する唯一の手段として、ビームサイズ可変光学系(ズームコンデンサー)の構築を目指す(可変パラメータ光学系は電子顕微鏡では数10年も前に実用化されているが、X線顕微鏡の光学系は未だ固定)。

3. 研究の方法

ビームサイズの変更が可能なズームコンデンサー光学系を2段のX線ミラー集光光学系によって実現する。ここでは、後段ミラーの開口数(NA)を可変とすることによって、常に回折限界条件を満足しながら、ビームサイズの連続的な変更を可能にする。このため

の基盤技術研究として、超精密加工・計測技術を開発し、これらを用いて、精密かつ高安定な形状可変ミラーデバイスを開発する。並行してズームコンデンサー光学系の波面収差およびアライメント誤差をオンサイトで評価可能な At-wavelength 計測法を構築し、これらを補償光学を駆使して統合することによって、上記目標のビームサイズ可変光学システムを実現する。

研究項目は以下の3項目に大別できる。

- ① 超精密加工・計測法の高度化
- ② 形状可変ミラーの開発と2段集光光学系の設計および実現
- ③ 集光波面のその場計測法の開発 (At-wavelength 計測法の開発)

4. これまでの成果

研究項目ごとに以下に述べる。

① 超精密加工・計測法の高度化

3次元座標計測機と顕微干涉計を精密に統合し、低空間周波数帯において、繰り返し再現性 $\pm 2\text{nm}$ と確からしさ $\pm 5\text{nm}$ を達成し、 $10\ \mu\text{m}$ レベルの高空間周波数帯において、サブnmの測定精度を実現した。これによって、形状可変ミラーのオフラインでの形状評価が可能になった。また、X線反射面に必要な超平滑面(RMS0.1nm以下)創製法を独自技術である触媒表面基準エッチング法(CARE)の高度化によって確立した。

② 形状可変ミラーの開発と 2 段集光光学系の設計および実現

形状可変ミラーの開発では、機械曲げとピエゾ素子による曲げの複合機構によるデバイスを実現した。機械曲げの併用により、ピエゾ素子の役割は僅かな形状修正のみとなり、最大で 70nm 程度に抑えることができた。これにより、ピエゾ素子のドリフトの影響を無視できるレベルに抑えることに成功した。その結果、回折限界条件を長時間維持可能な形状可変ミラーを世界に先駆けて実現した。

2 段集光光学系では、正弦条件を満たし、中間焦点を虚像としながら、ミラー形状を凸凹から凹凸へと連続的に変化させ、擬似的な Wolter II から Wolter III 光学系へと移行するズームコンデンサー光学系(図 1)を考案し、機能を実証した。正弦条件を満たすことから振動などの外乱に対してロバストであり、中間焦点を虚像化することからコンパクトな光学系を実現した(当初計画の 1/50 程度)。

X 線光学において新規な高機能光学系を考案・実証したものであり、大きな成果である。

③ 集光波面のその場計測法の開発 (At-wavelength 計測法の開発)

ミラー形状に起因する波面誤差と、アライメント誤差による波面誤差の独立抽出を可能にした。前者はピエゾ素子によるミラーの in-situ 形状補正に用いる。グレーチング干渉計を構築し、同時に、計測系のシステムエラーを数学的に除いて最も確からしい測定値(波面誤差)を知るアルゴリズムを構築した。後者はアライメント状態の精密評価が目的である。集光点に置かれたナノ粒子による散乱パターンは、ナノ粒子の電子密度分布にビーム形状に対応する窓関数をかけた関数のフーリエ変換に対応している。このことに着目し、スペックル形状からビームの実形状を回復する方法を構築した。これにより、アライメント誤差に対応した特徴的なビーム形状の変化を捉えることが可能になった。両手法とも SACLA に設置されたナノ集光光学系を利用して性能を評価し、所期の性能を確認した。

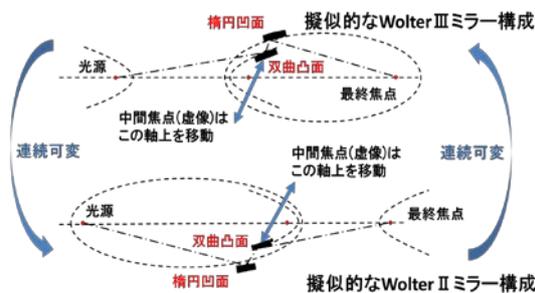


図 1. 形状可変ミラーによって構成されるロバストかつコンパクトなズームコンデンサー光学系。擬似的に Wolter II から Wolter III 光学系へと移行する。

5. 今後の計画

次年度以降、At-Wavelength 波面評価法とアライメント評価法のさらなる高精度化と安定化を図り、新規に考案した 2 段集光光学系を導入することによって、ズームコンデンサー光学系を完成させる。また、バークレー国立研究所の ALS (Advanced Light Source) やアルゴン国立研究所の APS (Advanced Photon Source) との間で、回折顕微鏡用光学系への応用展開を共同で実施する予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] # \*J. Yamada, \*S. Matsuyama, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Compact reflective imaging optics in hard X-ray region based on concave and convex mirrors", *Optics Express* 27(3), 3429-3438 (2019)
- [2] # \*Y. Ichii, H. Okada, H. Nakamori, A. Ueda, H. Yamaguchi, S. Matsuyama, and K. Yamauchi, "Development of a glue-free bimorph mirror for use in vacuum chambers", *Review of Scientific Instruments*, 90, 021702\_1-021702\_5 (2019)
- [3] # \*S. Matsuyama, T. Inoue, J. Yamada, J. Kim, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Osaka, I. Inoue, T. Koyama, K. Tono, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Nanofocusing of X-ray free-electron laser using wavefront-corrected multilayer focusing mirrors", *Scientific Reports* 8, 17440\_1-17440\_10 (2018)
- [4] # \*T. Goto, S. Matsuyama, H. Hayashi, H. Yamaguchi, J. Sonoyama, K. Akiyama, H. Nakamori, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, 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), 17477-17486 (2018)
- [5] # T. Inoue, \*S. Matsuyama, S. Kawai, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Osaka, I. Inoue, T. Koyama, K. Tono, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Systematic-error-free wavefront measurement using an X-ray single-grating interferometer", *Review of Scientific Instruments* 89, 043106\_1-043106\_7 (2018)

7. ホームページ等

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