

## 硬 X 線結像ミラーによる XFEL の極限的集光

大阪大学  
山田純平

高ピーク輝度を有する X 線自由電子レーザー (XFEL) は、ナノメートルスケールの微小領域への集光を行うことで、その強度を飛躍的に高めることが可能となる。我が国の SACLA においても、XFEL を 10 ナノメートル以下 (sub-10nm) の極限的なサイズまで集光することにより、集光ピーク強度は  $10^{22} \text{ W/cm}^2$  を超えると予想されており、その実現は長年にわたり多くの科学分野において待望されてきた。しかしながら、従来 XFEL で広く用いられてきた Kirkpatrick-Baez (KB) 配置に基づく集光ミラーは、いわゆるアッペの正弦条件を満たさず、強いコマ収差 (軸外収差) を有するという課題を抱えていた。このため、10nm 以下の集光径を目指す場合、入射角の僅かなズレにも極めて敏感となり、光源や光学素子の微小な振動によってパルスごとの集光状態が大きく変化してしまう上、長期間にわたり安定した集光条件を維持することが極めて困難であった。

この問題に対し本研究では、楕円凹面ミラーと双曲凸面ミラーを組み合わせた Wolter III 型光学系に基づく AdvancedKB (AKB-III) 配置を独自に提案・開発した[1]。本光学系では、水平および垂直方向それぞれにおいて、双曲凸ミラーと楕円凹ミラーの組み合わせにより集光を行う。2 回反射によりアッペの正弦条件が満たされることでコマ収差が補正され、高い安定性と実用に供し得るロバスト性を備えた集光システムの設計が可能となった。また本光学系に用いる X 線ミラーには、曲率半径 $\sim 3\text{m}$ の湾曲面に対して 0.8 nm PV (peak-to-valley)以上の形状精度が求められる。原子 3-4 個分相当の形状精度もさることながら、非常に小さな曲率半径を持つ急峻な湾曲面の形状計測が課題となる。このために、X 線そのもので形状評価を行う "At-wavelength" 計測法 (X 線格子干渉計) を独自に開発することで、 $\lambda/15 \text{ rms}$  の波面誤差という回折限界性能を実現した。また、XFEL において 7 nm 集光サイズを絶対精度で保証することも困難な課題である。X 線線波面計測法、X 線イメージング法、X 線光子相関分光法をそれぞれ応用した、互いに相補的な三種の集光評価手法を新たに開発・適用することで、 $6.49 \times 6.97 \text{ nm}$  の集光スポット径を実証した。

最終的に得られた集光強度として、ミラー反射率および焦点外へ散乱した強度割合を考慮しても、パルス幅 7 fs の XFEL として  $1.45 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$  を得た。これは X 線領域として世界最高強度を示し、また可視光域を含むレーザー強度としても最高強度に比肩するものである。実際の XFEL 実験にも応用が進んでおり、申請者らのグループでは、個体密度金属 Cr (クロム) 試料から原子線スペクトルであるライマン (Ly) 線の観察に成功した。さらに、高強度焦点での原子線スペクトルの振る舞いから、全ての電子が励起された完全電離状態の生成を示した。

参考文献

- 1) J. Yamada *et. al.*, Nature Photonics 18, 685-690 (2024).

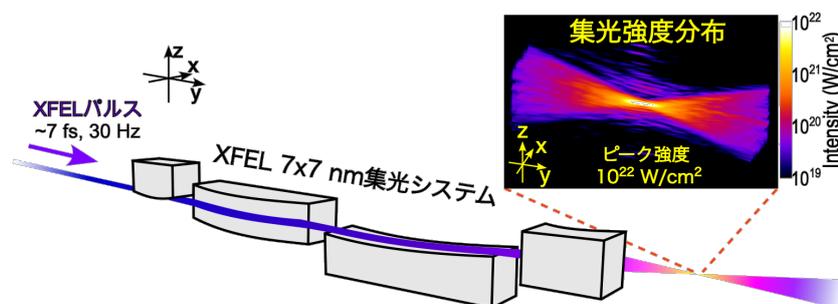


図 1. 開発した AKB-III 配置の概念図と得られた集光強度分布。