

## 補償光学系を駆使した多段光学系による X 線自由電子レーザー のナノメートル集光

Adaptively controlled multistage nanofocusing system  
For x-ray free electron laser

山内 和人 (YAMAUCHI KAZUTO)

大阪大学・大学院工学研究科・教授



### 研究の概要

X 線領域での波動光学を駆使し、スペックルフリー光学素子、X 線照射耐性を有する多層膜ミラー、集光波面のシングルショット計測法、2 段集光光学系(開口数変換・集光系)の開発と、上流ミラーの形状補正による補償光学を実現することによって、X 線自由電子レーザーのシングルナノメートル集光を実現するとともに、強光子場物理学への展開を行う。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：精密加工、精密計測、X 線光学

### 1. 研究開始当初の背景

X 線自由電子レーザー(X-ray Free Electron Laser: XFEL)、SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser) は、波長 1 Å、ビーム径 200 μm、完全な空間コヒーレンス性などの特徴をもち、ピーク強度が SPring-8 光の 10 億倍の極短パルスレーザーである。従来の X 線の特性を超越した「夢の光」とされ、これによって、結晶化を必要としない究極の回折法である単分子構造解析や、高強度光子場を利用した X 線非線形光学など、新たな学問領域の開拓が期待されている。しかし、これらの目的を真に実現するためには、集光技術の確立が急務である。

### 2. 研究の目的

本研究では XFEL のシングルナノメートル(目標 5nm)集光技術の確立を目指す。XFEL のナノ集光には斜入射光学系を用い、光学系の開口数(Numerical Aperture: NA)が  $10^{-2}$  以上である必要がある。このとき、光軸方向に 200mm 以上の領域を占める斜入射光学系では、開口が最低でも 2mm 以上必要であり、ビーム径 200 μm の光をそのまま用いても、所定の集光を実現できない。これは、レーザー光源では光源のサイズと発散角に回折限界の関係があり、波長の短い X 線では光源発散角が極めて小さくなるためである。この特徴を考慮し、全反射ミラーによるビーム径拡大光学系と、大きな NA の多層膜ミラーによる集光系から成る 2 段光学系「NA 変換・集光光学系」を XFEL のナノ集光を可能にする唯一の光学系として提案する(図 1)。そして、At-wavelength ホログラフィーによって集光波面を

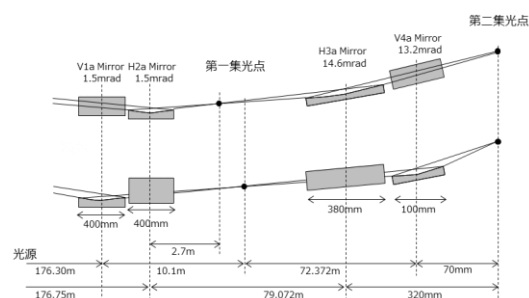


図 1 SACLA のシングルナノメートル集光光学系。ビーム拡大と最終集光光学系の 2 段光学系で構成

On-site 計測し、前段ミラーの形状を最適化する補償光学によって目標を達成する。すべての要素に途轍もなく高い精度が求められる XFEL のナノ集光を実現する唯一の道と考えられる。

### 3. 研究の方法

上記の目標を達成するため、本研究のアプローチは、(1) 高精度ミラーの開発、(2) X 線反射多層膜の設計・開発、(3) 光学系設計・開発、(4) At-wavelength 波面計測技術開発の基本 4 項目に加え、(5) 実現された高強度光子場による新規学問領域の開拓、(6) 成果の SACLA ユーザーへのフィードバックから成っている。基本 4 項目を達成する過程で、NA 変換・集光光学系の実証と問題点の抽出のために、3 年目を目標に 50nm 集光実現をマイルストーンとしている。研究の性格から、成果はその都度 SACLA の利用研究に展開する必要があると考えており、このための項目として、当初より、(5)と(6)をフィールドテストとして挙げている。

#### 4. これまでの成果

研究方法の(1)から(4)の項目に沿って、(5)(6)の観点も含めて、以下に示す。

##### (1) 高精度集光ミラー開発

EEM(Elastic Emission Machining)[Yamauchi et al., RSI (2003)]と MSI (MicroStitching Interferometry)[Yamauchi et al., RSI (2006)], RADS(I) (Relative Angle Determinable Stitching Interferometry) [Mimura, et al., RSI (2007)]で構成されるディタミニスティック形状創成プロセスの対応空間波長域を短縮することによって、反射光中のスペックル発生を抑制できる形状精度を達成した(図 2)。

##### (2) X線反射多層膜の設計と開発

主に Pt/C 系多層膜を検討し、反射率の向上に有効な膜界面粗さ低減には、Pt 層への微量な C 原子の添加が有効であることを見出し、多層膜周期 3nm(必要最小周期)であっても RMS 0.2nm 以下を実現できることを示した[1]。また、先行して進めていた SACLA の 1 $\mu$ m 集光システムを利用して照射損傷の閾値を厳密に評価し、想定できるミラー上のフルエンスは、反射率の低下が始まるフルエンスより数 10 倍小さいことを明らかにした。励起状態の緩和が、吸収領域よりはるかに広い領域で起こることが原因であり、極めて重要な知見となっている。

##### (3) 光学系設計・開発

目標とする多段光学系(NA 拡大・集光光学系)の可能性実証と問題点の抽出のため、同種の光学系が必要な 50nm 集光を先行して進めた。シングルナノメートル集光光学系に比べて NA が小さく、斜入射角が小さいことから、多層膜反射ではなく全反射光学系を用いることができるため、多層膜の開発と切り分けて、先行実施した。その結果、図 3 に集光プロファイルを示すように、30nm $\times$ 55nm 集光に成功した[2]。これによって、ピークパワー $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>を達成し、高度な非線形光学研究が可能な環境を世界で初めて実現した。デモ実験では、Ge の K 殻 2 光子吸収現象を世界で初めて観測することにも成功した[3]。

##### (4) At-wavelength 波面計測技術開発

XFEL では、集光ビームの状態をショット・バイ・ショット評価する必要がある。このために、グレーチング干渉計を提案し、その有効性を実証した。SPring-8 の BL29-XUL を使い、17nm 集光系において、形状可変ミラーにより積極的に波面誤差を与え、これを測定した。その結果、我々が既に開発し、実績のある位相回復法による測定との差が $\lambda/10$ 以下であり、Rayleigh 基準である $\lambda/4$ を十分に上回る精度の計測が可能であること

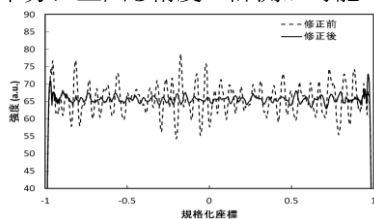


図 2 最終処理前後のスペックルの発生状況 (横軸は発散後のビーム幅で規格化)

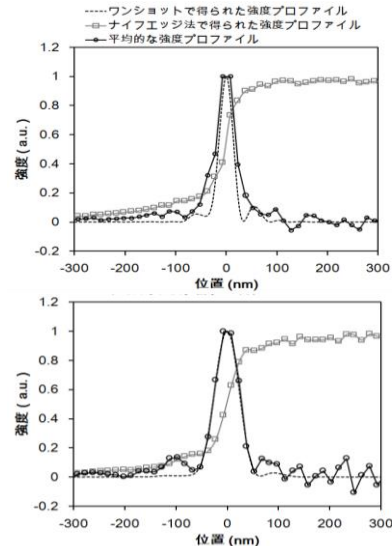


図 3 Sub-50nm 集光結果(上: 水平、下: 垂直)

を示した[4]。その後、SACLA の 50nm 集光ビームの評価にも適用し、図 3 の破線のように振動の影響のない、所期の集光プロファイル(30nm $\times$ 55nm)が得られることも確認した[2]。

#### 5. 今後の計画

最終目標であるシングルナノメートル集光では、補償光学の適用が不可欠である。既の実現した集光波面誤差のその場計測法を更に高度化するとともに、多層膜反射率の更なる向上などを行う。また、ミラー基板のオフラインでの事前評価の際の精度は、最終的に必要な Rayleigh 基準の数倍程度が求められる。RADS(I)における相対角度決定精度を高めた新しい形状測定装置を立ち上げつつあり、これらの実施によって目標を達成する。

#### 6. これまでの発表論文等

- [1] J. Kim, H. Yokoyama, S. Matsuyama, Y. Sano, and K. Yamauchi, Improved reflectivity of platinum/carbon multilayers for X-ray mirrors by carbon doping into platinum layer, *Curr. Appl. Phys.* 12, S20 (2012).
- [2] H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, T. Koyama, K. Tono, Y. Inubushi, T. Togashi, T. Sato, J. Kim, R. Fukui, Y. Sano, M. Yabashi, H. Ohashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Generation of  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> Hard X-ray Laser Pulses with Two-Stage Reflective Focusing System, *Nature Commun.*, accepted.
- [3] K. Tamasaku, E. Shigemasa, Y. Inubushi, T. Katayama, K. Sawada, H. Yumoto, H. Ohashi, H. Mimura, M. Yabashi, K. Yamauchi, and T. Ishikawa, X-ray two-photon absorption competing against single and sequential multiphoton processes, *Nature Photonics*, published online (2014).
- [4] S. Matsuyama, H. Yokoyama, R. Fukui, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, W. Yashiro, A. Momose, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Wavefront measurement for a hard-X-ray nanobeam using single-grating interferometry, *Opt. Express* 20, 24977 (2012).

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