



5. SACLA における $1\ \mu\text{m}$ コヒーレント集光装置の開発

三村秀和¹, 湯本博勝², 小山貴久², 大橋治彦², 石川哲也³, 山内和人⁴

¹東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

²高輝度光科学研究センター

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

³理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

⁴大阪大学大学院工学研究科

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

要旨 SPring-8と大阪大学による高精度 X 線ミラーの開発がスタートし、2011年で10年目をむかえた。この10年目、大きな目標の一つであった SACLA における XFEL 光の $1\ \mu\text{m}$ 集光に成功した。レーザー発振の報の約 1 カ月後の2011年 7 月である。本稿では、XFEL 集光に関して、これまでの開発経緯、XFEL 集光光学系の設計、XFEL 集光結果およびその性能について報告する。

5.1 XFEL 用集光ミラー作製技術の確立

高輝度 X 線光源は、その明るさとともに空間および時間コヒーレンスの向上をもたらした。それに伴い、その優れた特性を有効に活用可能な X 線ミラーが強く求められるようになる。2001年から、大阪大学と理化学研究所/SPring-8 との X 線ミラーに関する共同研究がスタートし¹⁾、大阪大学におけるミラー作製において、SPring-8 の 1 km 長尺ビームライン BL29XUL における X 線ミラー評価結果をフィードバックすることにより、従来の EEM (Elastic Emission Machining)²⁾などの超精密加工技術に加えて、MSI (Microstitching Interferometer)³⁾、RADSI (Relative Angle Determinable Stitching Interferometer)⁴⁾といった X 線ミラー形状評価技術を確立した。スペックルフリーの反射特性をもつ平面ミラーの開発にとどまらず硬 X 線集光用非球面ミラーの開発を進め、作製した高精度集光ミラーを用いた Kirkpatrick-Baez 光学系により、理想的な回折限界での硬 X 線ナノ集光を実現した⁵⁾。

その後、X 線集光サイズの微小化、顕微鏡システムの開発を行ったが、最近では、硬 X 線集光において補償光学系の導入を進め、位相回復による X 線波面計測とアダプティブミラーによる X 線波面制御法を完成させ、波面誤差を In-situ で補正することにより、Sub-10 nm 硬 X 線集光を実現している⁶⁾。また、4 枚の光学系による X 線ミラーによる結像光学系など、高精度 X 線ミラーを武器に、次世代の X 線光学システムの開発に取り組んでいる⁷⁾。

このような流れの中で XFEL 用集光ミラーの開発を開始したのは、2006年秋である。文部科学省「X 線自由電

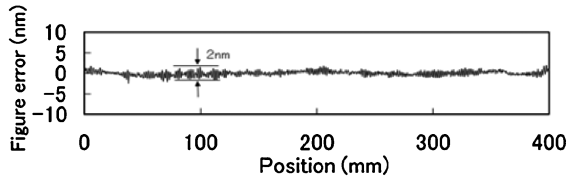
子レーザー利用推進研究課題」の下、約 5 年間に亘って精力的に XFEL 用の集光ミラーの開発と集光光学系の開発に取り組んだ。SPring-8 のようなリング光源から発せられる放射光と XFEL 光との大きな違いは、完全な空間コヒーレンス性と短パルスでピーク強度が強烈であることである。SLAC/LCLS のグループが様々な理論的な検討を行っていたが、XFEL 光に対するミラー表面の照射耐性は十分とは言い難いものであった⁸⁾。

その頃の判断は、

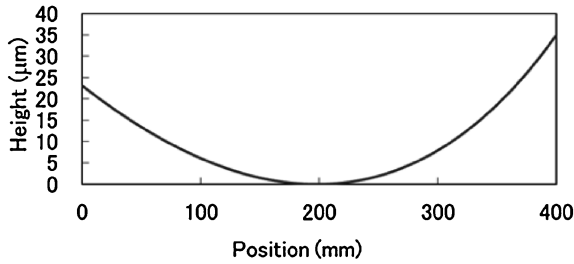
1. XFEL 用ミラーの表面はカーボンなどの軽元素表面とし、入射角度を臨界角度よりも十分小さくすることで、反射率を100%近くにミラーの照射耐性を上げる。
2. XFEL 光をすべて受け止めるため、長さ400 mm の大型の集光ミラーを用いる。

ここで問題となるのは 2 である。2006年当時の X 線ミラーの作製では、長さ100 mm のミラーの作製が限界であった。ミラーの長さを100 mm から400 mm にすることは、「言うは易く行うは難し」である。X 線ミラーの作製では、高精度に X 線ミラーの表面形状を測定し、そのデータを元に設計形状との差である形状誤差を修正する。特に長尺の X 線ミラーの計測技術の開発が課題であった。長さ400 mm の非球面形状をもつ X 線ミラーを 1 nm の精度で測定する必要がある、長さ100 mm の X 線ミラーの形状計測とは難しさが半端ではない。

そこで、SPring-8、大阪大学、株式会社ジェイテックが共同で、長さ400 mm の大型 X 線集光ミラーの形状測定法の開発に取り組んだ。MSI、RADSI における大型ミ



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Figure error and (b) figure profiles of a fabricated 400 mm-long focusing mirror.

ラスステージの開発では、参加者のあらゆる知識と知恵を導入し活発な議論を行った。その結果、開発した超高精度・超安定ミラーステージにより、400 mm 長の大型集光ミラーの計測が可能になった^{9,10)}。加工技術では、理化学研究所基幹研究所の大森グループが開発した ELID 研削を EEM 前加工プロセスへ導入し加工時間を短縮させた。その結果、長さ400 mm で P-V (Peak-to-Valley) 2 nm の精度をもつ X 線集光ミラーの作製を可能にした。Fig. 1 は、2007年に作製した X 線集光ミラーの形状と形状誤差である。本ミラーを使用し SPring-8 の 1 km 長尺ビームライン BL29XUL において集光特性の評価を行い、15 keV において集光サイズ75 nm (半値幅) の理想的な回折限界集光を確認している¹¹⁾。

長さ400 mm の X 線集光ミラーへの挑戦によって、計測技術を確立しただけでなく、X 線ミラーの作製プロセスが効率的となり短時間でのミラー作製が可能となった。また、本成果は、XFEL 用集光ミラーが実現したことを意味するだけではなかった。X 線集光ミラーの長尺化は集光光学系における設計の自由度を大きく広げ、SPring-8 などの放射光施設の様々なビームラインにおいて最適なミラー集光システムの構築が可能となった^{12,13)}。その結果、SPring-8 における高精度 X 線ミラーを用いた集光光学系の普及促進に貢献し、本研究成果の波及効果は非常に大きなものとなっている。

5.2 1 μm コヒーレント集光装置の開発

SACLA の建設がスタートし、ビームラインのデザイン、予想される XFEL の光源性能が固まり始めた2008年の春、SACLA に導入する XFEL 集光システムの光学デ

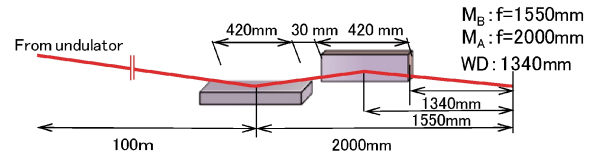


Fig. 2 Optical system of 1 μm XFEL focusing system.

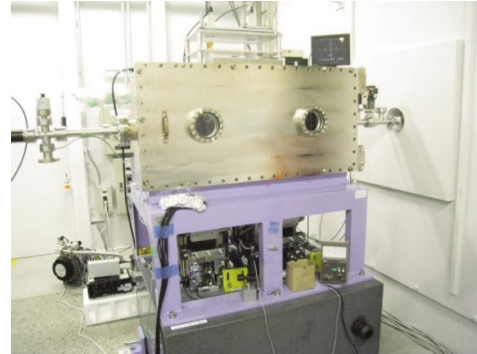


Fig. 3 Mirror manipulator for alignment of XFEL focusing mirrors in vacuum.

ザインの検討を開始した。XFEL 施設側のメンバー、XFEL 集光の応用の一つである X 線回折顕微鏡のグループのメンバーが大阪大学に集まり議論を行い、初めに導入する集光システムの光学系を決定した。初期に導入する光学系は、汎用性が求められるため、以下の方針で開発を行なうことが確認された。

1. 集光サイズを扱いやすい 1 μm 程度とする。
2. 1 m 以上の長ワークディスタンスとし、集光点周りに設置する装置の自由度を上げる。
3. XFEL 光をすべて受け止める。

焦点距離と集光サイズは比例の関係であるため、ワークディスタンスが長ければ自然と集光サイズは大きくなる。SACLA の予測された光源の大きさ (アンジュレータ最下流を光源位置と想定)、光源から集光システムまでの距離、ミラーサイズを考慮すると、ワークディスタンスが約 1 m において、集光サイズは 1 μm ~ 2 μm (10 keV) となる。Fig. 2 に設計した光学系を示す。入射角度は 1.5 mrad であるが、XFEL 集光用ミラーは 400 mm の長さがあり、600 μm 四方の開口であるため、SACLA の XFEL 光をすべてミラーにより受け止め集光することができる。また、ミラー表面材料をカーボンとすると 10 keV の X 線の理論反射率は 99% 以上である。理論的にもミラー表面は十分な XFEL 照射耐性を持つ。

長い焦点距離を有するため、ミラーの入射角度がわずかに変動しても集光点が大きく移動する。理論計算からも、ミラーの入射角度調整には 0.1 μrad レベルの制御性と安定性が必要である。また、XFEL 光が通る空間は高真空の必要がある。KB ミラー用のマニピュレータは、SPring-8 の BL32XU への集光ミラーの導入にあたって開発された

マニピュレータの経験をもとに設計された (Fig. 3)。本装置には、SPring-8の実験で判明した不具合点が改善されるなど、マニピュレータ開発においても放射光での経験が活かされている。

本光学システムについては文部科学省「X線自由電子レーザー利用推進研究課題」の下、開発を行い、2011年3月末には、X線集光ミラー、ミラーマニピュレーターに加えて集光プロファイル測定装置などすべての必要機器の整備を完了した。

5.3 SACLA への導入と XFEL 集光実験

集光光学系は、非集光時に比べ XFEL 光のピーク強度を桁レベルで向上させる。そのため、多くの XFEL ユーザーが、XFEL 集光を前提に実験を計画しているため優先開発課題の一つであった。当初、2011年度7月に自発光の X 線を用いて機器のテストを行う計画で、SACLA 第3実験ハッチ (名称: コヒーレント集光ステーション) への集光システムの導入を進めた。準備を進めていた6月に SACLA 発振の報が流れ、XFEL 光を用いた実験を計画した。

Fig. 4 は、実験ハッチに導入した集光システムである。入射側から、スリット、透過型 XFEL 強度モニター、KB ミラー、集光ビームプロファイル計測装置、XFEL 用 Si PIN フォトダイオード型ディテクター¹⁴⁾および CCD カメラの構成となっている。KB ミラーによる集光では、2枚のミラーを高精度にアライメントする必要がある。今回、初めての実験であったため、

1. 空気中で XFEL 光をミラーに照射させない。
2. 自発光により可能な限りミラーのアライメントを行い、その後、アッテネーターで弱めた XFEL 光により最終的なアライメントを行う。

の方針で、慎重にミラーアライメントを進めた。自発光によるアライメントは、SPring-8 での実験と同様である。この段階でアライメントはほぼ終了する。XFEL 光によるアライメントの際は、ミラーの上流に Si ウエハを挿入し十分に強度を弱めることで、ワイヤスキャン時のワイヤ

損傷を防いでいる。

Fig. 5 に得られた集光 XFEL ビームの強度プロファイルを示す。1点50ショットの積算で、ワイヤスキャンを4回を行い、得られた4本の強度プロファイルを平均化したものである。9.835 keVにおいて、集光サイズ $0.9\ \mu\text{m} \times 1.1\ \mu\text{m}$ (半値幅) が得られた。集光効率は少なくとも87%以上であり、一枚当たりの反射率は97%以上であることを確認している。また、当時の1パルスあたりのパワーは $0.4\ \mu\text{J}/\text{pulse}$ であった。Fig. 6 は、水平方向の位置安定性を評価したものであり、2時間で $1\ \mu\text{m}$ 程度のドリフトである。垂直方向は、100 nm レベルでの位置安定性を確認している。

これらの実験結果から

1. 集光ミラーは XFEL 光に対して十分な照射耐性があり、長時間の使用が可能である。

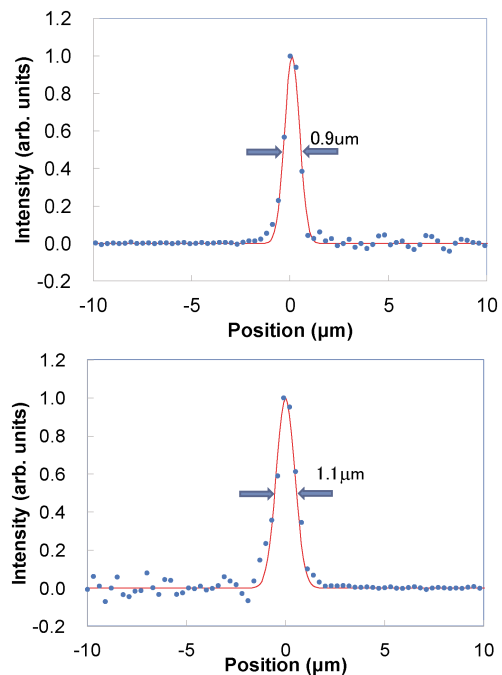


Fig. 5 Intensity profiles of XFEL focusing beam at 9.835 keV in horizontal direction (a) and vertical direction (b).

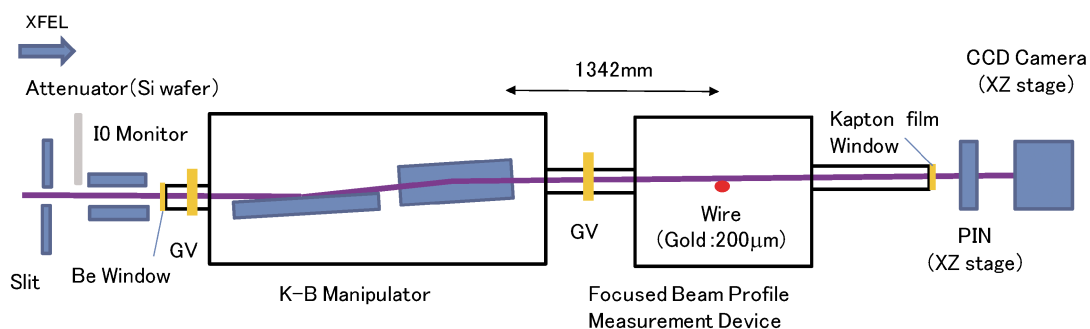


Fig. 4 XFEL focusing system installed in the experimental station 3 of SACLA.

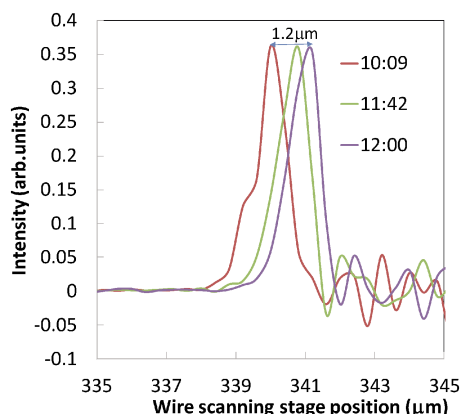


Fig. 6 Pointing stability of an XFEL focused beam in horizontal direction.

2. 集光 XFEL ビームは通常のワイヤスキャン法で評価が可能。
3. 積算しても評価可能であることから XFEL 光のパルス毎の方向のばらつきは十分に小さい。
4. 集光効率の結果から開発した集光光学系はほぼすべての XFEL 光を受け止めている。
5. 長時間の集光位置安定についても 2 時間で 1 μm 程度であり、集光 XFEL ビームは各種実験に十分使用できる。

様々な状況を予想し、準備、実験を行ったが、このように初回の実験において XFEL 光の 1 μm 集光を実現することができ、当初の設計性能通りの特性を得た。本実験での大きな成果は、XFEL 光をミラーにより集光可能であることを証明できたことである。実現した後では、当たり前のように見えるが、未知な光 XFEL を理想的に集光できるかどうか？ アライメントなどにおいて、これまでの経験を適応可能であるかどうか？ は実際に実験をするまでわからなかった。

これまで、本研究グループは X 線集光ミラーに関する研究成果を蓄積しており、それを XFEL に積極的に活用していく。現在、SPring-8 において、硬 X 線 Sub-10 nm 集光に関する研究を精力的に進めており、XFEL 光の Sub-10 nm レベルの極限集光、集光 XFEL ビームによる究極の強光子場形成などへの道が開けたと言える。

7 月に実施した初回の集光調整以後数回の実験を重ね、2012年12月の時点で XFEL 光源の調整の進展とともに、1パルスあたり平均 40 μJ/pulse の照射強度を確認している。また、本研究グループでは、集光 XFEL ビームによる金属薄膜のダメージ評価を進めている。Fig. 7 は、金薄膜上の 1 パルスの照射で得られた照射痕であり、XFEL 光を集光することにより、1 パルスで金が除去される現象を確認した。これらの成果および詳細な考察は、今後、論文として発表予定である^{15,16)}。

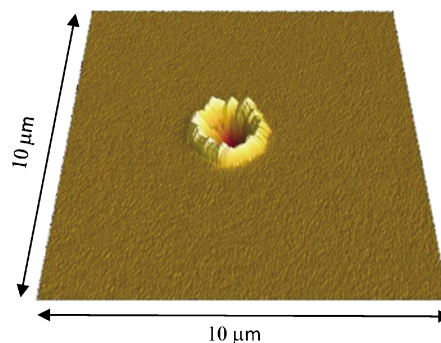


Fig. 7 An AFM image of gold thin film after exposure of single-shot XFEL focused beam.

5.4 おわりに

当初の計画通り、XFEL 発振にあわせて、2011年7月に XFEL の集光に成功した。現在、すでに集光 XFEL ビームの使用が始まっている。更に集光 XFEL ビームを小さくすることは、XFEL の応用を格段に広げるためにも必須であり、すでに、理化学研究所の「SACLA 利用装置提案課題」の下、さらなる集光光学系の開発を精力的に進めている。XFEL は新しい光源であるが、集光 XFEL ビームも、また、新しい光である。XFEL 集光の研究は新しい光を生み出していくことと同等であり、新しい光は次々に新しいサイエンスを生み出していく。それを目の当たりにできる研究環境にいることに感謝したい。

本研究推進にあたり、著者ら以外に多くの研究者が携わっている。X 線ミラーの作製は、大阪大学松山智至氏、北海道大学木村隆志氏、大阪大学山内研究室の多くの在学生、卒業生、および、理化学研究所基幹研究所、大森整氏、八須洋輔氏と共同で行った。SACLA 導入に至っては、矢橋牧名氏、登野健介氏、犬伏雄一氏、佐藤堯洋氏をはじめとする SACLA のスタッフの協力を得ている。また、XFEL 集光ミラーの開発研究は、SPring-8 の BL29XUL で実施しており、玉作賢治氏、香村芳樹氏に協力を頂いている。

本研究は、平成18年10月～平成23年3月における文部科学省「X線自由電子レーザー利用推進研究課題」により実施された。また、大型ミラー用形状計測装置の開発は、平成18年度兵庫県 COE プログラム推進事業「放射光用ナノ形状精度の大型ミラー製造技術の開発」により実施された。そして、SACLA での集光システムの設置および実験は、理化学研究所「SACLA 利用装置提案課題」の下、実施された。

参考文献

- 1) Y. Mori *et al.*: Proc. of SPIE 4501, 30-42 (2001).
- 2) K. Yamauchi *et al.*: Rev. Sci. Instrum. 73, 4028-4033 (2002).

- 3) K. Yamauchi *et al.*: Rev. Sci. Instrum. 74, 2894-2898 (2003).
- 4) H. Mimura *et al.*: Rev. Sci. Instrum. 76, 045102-1-6 (2005).
- 5) K. Yamauchi *et al.*: J. Synchrotron Rad. 9, 313-316 (2002).
- 6) H. Mimura *et al.*: Nature Physics 6, 122-125 (2010).
- 7) S. Matsuyama *et al.*: Opt. Lett. 35, 3583-3585 (2010).
- 8) Linac Coherent Light Source LCLS, SLAC Conceptual Design Report, No. R593, 2002 unpublished see also <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/cdr>.
- 9) H. Ohashi *et al.*: Proc. of SPIE 6704, 670405 (2007).
- 10) T. Kimura *et al.*: Nucl. Instrum. Methods A, 616, 229-232 (2010).
- 11) H. Mimura *et al.*: Rev. Sci. Instrum. 79, 083104 (2008).
- 12) H. Yumoto *et al.*: Proc. of SPIE 7448, 74480Z (2009).
- 13) T. Koyama *et al.*: Proc. of SPIE 8139, 81390I (2011).
- 14) K. Tono *et al.*: Rev. Sci. Instrum., submitted.
- 15) H. Yumoto *et al.*, to be submitted.
- 16) Koyama *et al.*, to be submitted.

● 著者紹介 ●



三村秀和

東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻 准教授

E-mail: mimura@edm.t.u-tokyo.ac.jp

専門: 生産加工学, 精密加工, 計測

【略歴】

2002年3月, 大阪大学大学院工学研究科, 博士課程修了, 博士(工学)。同年4月より, 同大学, 特任講師, 2003年4月より, 同大学, 助手/助教。2006年10月~2009年3月 JST さきがけ研究員(兼務)。2011年1月より現職。現在, 理化学研究所客員研究員(2003年~), 米国ロチェスター大学光学研究所客員研究員(2011年~)を兼務。



湯本博勝

財高輝度光科学研究センター 研究員

E-mail: yumoto@spring8.or.jp

専門: 精密加工, 精密計測, X線光学

【略歴】

2008年3月大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻博士課程修了, 博士(工学)。同年4月より現職。



小山貴久

財高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 光学系グループ 研究員

E-mail: koyama@spring8.or.jp

専門: X線光学

【略歴】

2007年3月兵庫県立大学大学院物質理学研究科物質科学専攻博士後期課程修了。博士(理学)。同年4月より同大学特任助教。2010年4月より現職。



大橋治彦

財高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 光学系グループリーダー 副主席研究員

E-mail: hohashi@spring8.or.jp

専門: ビームライン建設, 光学技術

【略歴】

1992年3月, 豊橋技術科学大学大学院博士課程単位修得退学, 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所を経て1996年11月より(財)高輝度光科学研究センター。2007年8月より現職。現在, 理化学研究所客員研究員(2001年~), 東京大学物性研究所嘱託研究員(2002~2004, 2006年~)を兼務。博士(理学)(1996年総合研究大学院大学・構造分子科学専攻)。



石川哲也

理化学研究所 播磨研究所 所長

E-mail: ishikawa@spring8.or.jp

専門: X線干渉光学

【略歴】

1982年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了, 工学博士。同年, 日本学術振興会特定分野(光子物理学)奨励研究員, 1983年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設測定器研究系助手, 1989年東京大学工学部物理工学科助教授, 1995年理化学研究所マイクロ波物理学研究室主任研究員, 1997年理化学研究所播磨研究所X線干渉光学研究室主任研究員, 2005年理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター・副センター長兼務, 2006年同センター長。2003年から SPIE Fellow。2010年4月より現職。



山内和人

大阪大学 大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 教授

E-mail: yamauchi@prec.eng.osaka-u.ac.jp

専門: 超精密加工, 特殊加工, 表面物性

【略歴】

1984年, 大阪大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程中退。同年, 同大学助手。1992年, 同大学助教授。2003年より現職。工学博士。

5. Development of 1 μ m XFEL focusing system at SACLA

Hidekazu MIMURA¹, Hirokatsu YUMOTO², Takahisa KOYAMA²,
Haruhiko OHASHI², Tetsuya ISHIKAWA³, Kazuto YAMAUCHI⁴

¹Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-8656

²JASRI, Kouto 1-1-1, Sayo-gun, Sayo-chou, Hyogo, 679-5198

³RIKEN/SPring-8, Kouto 1-1-1, Sayo-gun, Sayo-chou, Hyogo, 679-5198

⁴Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka, 565-0871

Abstract An XFEL focusing system with ultra-precise K-B mirrors was developed and installed to SACLA. The first experiment was carried out in July 2011. This overview reports the history of the development and performances of the XFEL focusing system at SACLA.
