

## 軟 X 線レーザーナノ集光システムを開発

### —2種類の集光ミラーを組み合わせたハイブリッド型—

理化学研究所（理研）放射光科学研究センタービームライン開発チームの本山中央人客員研究員（東京大学大学院理学系研究科 特任助教）、ビームライン研究開発グループの矢橋牧名グループディレクター、東京大学大学院工学系研究科の三村秀和准教授、高輝度光科学研究センターの大和田成起研究員、大橋治彦主席研究員らの共同研究グループ<sup>\*</sup>は、軟 X 線自由電子レーザー（軟 X 線 FEL）<sup>[1]</sup>を高効率でナノ領域に集光可能なシステムを新たに開発しました。

本研究成果は、軟 X 線非線形光学<sup>[2]</sup>や磁性材料の研究をはじめとした軟 X 線 FEL を使用するさまざまな研究分野の発展に貢献すると期待できます。

今回、共同研究グループは、X 線自由電子レーザー施設「SACLA」<sup>[3]</sup>の軟 X 線ビームライン（BL1）において、KB ミラー<sup>[4]</sup>と回転楕円ミラー<sup>[5]</sup>の二つの集光ミラーを組み合わせた「ハイブリッド型集光システム」を開発しました。集光実験により、従来の集光ミラーでは困難であった軟 X 線 FEL のナノ集光（500×550 ナノメートル（nm、1nm は 10 億分の 1 メートル））に成功しました。また、固体試料に集光ビームを照射したところ、高強度電場中でしか起こらない非線形<sup>[2]</sup>現象が計測され、 $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> を超える高強度軟 X 線電場の形成が可能なことを示しました。開発した集光システムは、SACLA BL1 で発振可能な全ての波長帯域（8～30 nm）で使用することが可能です。

本研究は、英国の科学雑誌『*Journal of Synchrotron Radiation*』の掲載に先立ち、オンライン版（8月5日付け）に掲載されました。

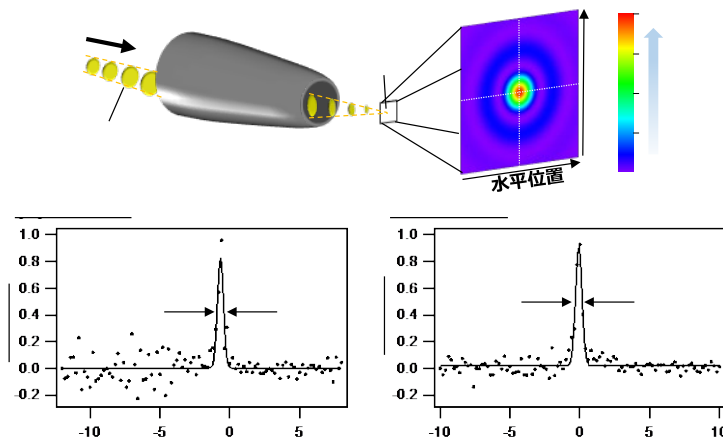


図 軟 X 線自由電子レーザー集光の模式図と集光点における強度プロファイル計測結果

## ※共同研究グループ

理化学研究所 放射光科学研究センター XFEL 研究開発部門

ビームライン研究開発グループ ビームライン開発チーム

客員研究員 本山 央人 (もとやま ひろと)  
(東京大学大学院理学系研究科 特任助教)

ビームライン研究開発グループ

グループディレクター 矢橋 牧名 (やばし まきな)

東京大学大学院 工学系研究科

准教授 三村 秀和 (みむら ひでかず)

博士課程 (研究当時) 久米 健大 (くめ たけひろ)

博士課程 江川 悟 (えがわ さとる)

博士課程 山口 豪太 (やまぐち ごうた)

高輝度光科学研究センター

研究員 大和田 成起 (おおわだ しげき)

主幹研究員 小山 貴久 (こやま たかひさ)

主幹研究員 犬伏 雄一 (いぬぶし ゆういち)

主席研究員 登野 健介 (との けんすけ)

主席研究員 大橋 治彦 (おおはし はるひこ)

## ※研究支援

本研究は、SACLA 大学院生研究支援プログラムによる支援を受けて行われました。

### 1. 背景

波長が1~30 ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) 程度の光は軟 X 線と呼ばれ、試料の電子状態や磁性分布、化学組成などの分析に広く用いられています。そのため軟 X 線分析技術は極めて重要であり、その高度化のために光源の高品質化や軟 X 線光学素子の開発が行われてきました。

軟 X 線はさまざまな方法で発生させることができますが、なかでも X 線自由電子レーザー (XFEL) により発振される軟 X 線は、高強度かつフェムト秒パルス (フェムト秒は 1,000 兆分の 1 秒) という光特性を備えています。この軟 X 線 FEL を集光することにより、単位時間・単位面積あたりの光エネルギーを激増させ、他の光源では実現不可能なほど高強度な軟 X 線光電場を形成することが可能です。軟 X 線領域ではミラーによる集光が主流であり、数マイクロメートル ( $\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$  は 100 万分の 1 メートル) 程度の軟 X 線ビームが実験に利用されてきました。しかしながら、軟 X 線利用実験の高度化のためには、新たな集光システムによるビームサイズのさらなる微小化が必要とされていました。

共同研究グループは、軟 X 線 FEL をナノ領域に集光するための集光システムを提案し、その開発に取り組んできました。

## 2. 研究手法と成果

共同研究グループは、KB ミラーと回転楕円ミラーという 2 種類の集光ミラーを組み合わせた「ハイブリッド型の軟 X 線 FEL 集光システム」を考案しました（図 1）。KB ミラーは、反射面が直交するように配置した 2 枚の楕円面で X 線を反射させることによって X 線を 1 点に集光します。回転楕円ミラーは、1 枚の回転楕円面で X 線を反射させることで X 線を 1 点に集光します。

それぞれのミラーは「受光できる光のサイズ」と「集光サイズ」において、反対の特徴を持っています。すなわち、KB ミラーでは、大型化が可能なことから受光できる光のサイズは大きいものの、軟 X 線の集光サイズは数  $\mu\text{m}$ にとどまります。反対に、回転楕円ミラーでは、 $1\mu\text{m}$  以下の微小集光ができる一方で、ミラーが小型のため受光できる光のサイズは KB ミラーよりも小さくなります。そこで、互いの欠点を補い、それぞれの利点を生かすために、KB ミラーで軟 X 線 FEL を受光・集光してビームを小さくした後、回転楕円ミラーで再び集光するという二段集光光学系を設計しました（図 1）。なお、回転楕円ミラーの表面材料はニッケルであり、SACLA BL1 における発振波長である  $8\sim 30\text{ nm}$  において高い反射率を示します。

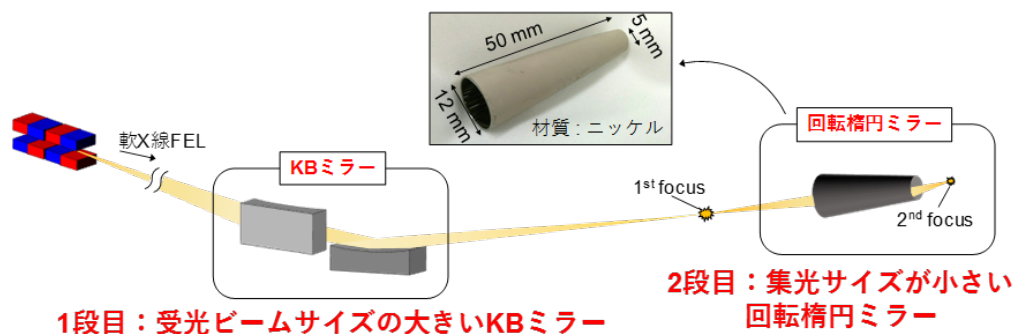


図 1 ハイブリッド型の軟 X 線 FEL 集光システム

まず、軟 X 線 FEL を受光サイズが大きい KB ミラーで受光・集光してビームを小さくした後（1 段階）、集光サイズが小さい回転楕円ミラーで再び集光する（2 段階）。これにより、二つのミラーの欠点が補われ、利点が生かされる。

そして、X 線自由電子レーザー施設「SACLA」の軟 X 線ビームライン BL1 で実際に集光システムを構築し、集光実験を行いました。波長  $10\text{ nm}$  前後の軟 X 線を  $500 \times 550\text{ nm}$  の領域に集光し（図 2）、 $1 \times 10^{16}\text{ W/cm}^2$  を超える極めて高強度な軟 X 線光電場を形成することに成功しました。

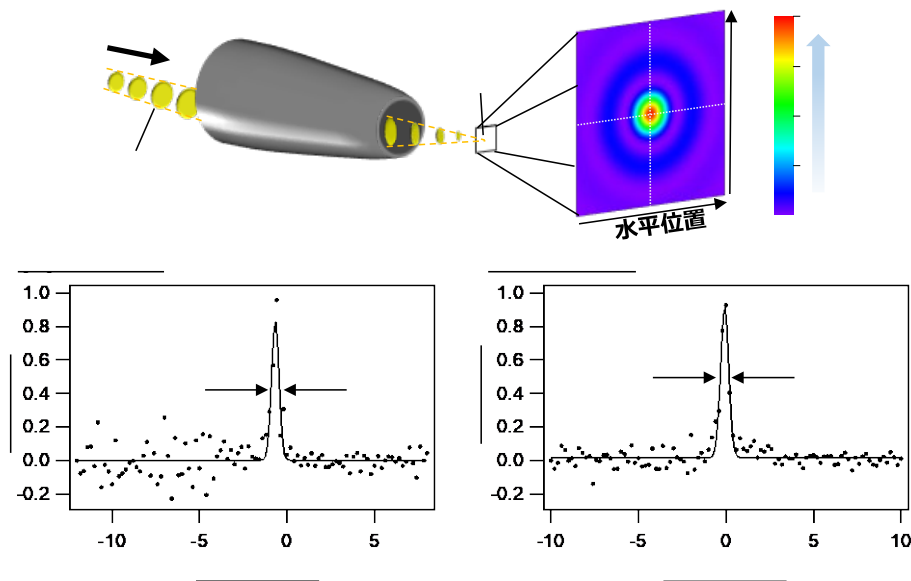


図2 回転楕円ミラーで軟X線FELを集光の様子と、集光点における強度プロファイル  
鉛直方向 500 nm、水平方向 550 nm の微小領域に、軟X線FELを集光することに成功した。

次に、形成した高強度集光ビームを用いて、可飽和吸収<sup>[6]</sup>と呼ばれる非線形光学現象の観測を行いました。集光点に窒化ケイ素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) の薄膜を設置し、透過率の集光強度依存性を計測しました。その結果、強度 10<sup>15</sup> W/cm<sup>2</sup> を境に、可飽和吸収の特徴である急激な透過率上昇が見られました (図3)。これは、高強度な軟X線電場が形成されている証拠です。

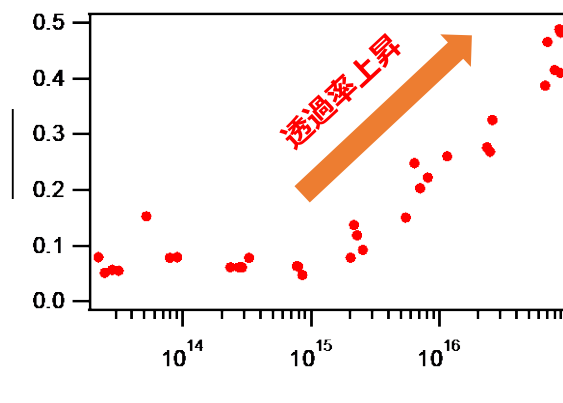


図3 窒化ケイ素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) に対する軟X線FELの透過率と集光強度の関係

集光強度 10<sup>15</sup> W/cm<sup>2</sup> を境に Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> に対する透過率が急激に上昇したのが分かる。これは高強度な軟X線電場が形成されている証拠である。

### 3. 今後の期待

今回開発したハイブリッド型集光システムを用いることにより、非線形軟 X 線光学の研究に必要な高強度軟 X 線電場を、広い波長帯域で形成できるようになりました。

今後、集光ビームの小ささを生かして、微細構造分析への応用も考えられます。今回実施した可飽和吸収計測以外にも、既にいくつかの応用実験が実施、計画されており、今後の利用拡大が予想されます。ハイブリッド型集光システムによるナノ軟 X 線 FEL ビームを利用することで、材料科学や非線形軟 X 線光学など多岐にわたる分野への波及効果が期待できます。

### 4. 論文情報

<タイトル>

Intense sub-micrometre focusing of soft X-ray free-electron laser beyond  $10^{16}$  W  $\text{cm}^{-2}$  with an ellipsoidal mirror

<著者名>

Hiroto Motoyama, Shigeki Owada, Gota Yamaguchi, Takehiro Kume, Satoru Egawa, Kensuke Tono, Yuichi Inubushi, Takahisa Koyama, Makina Yabashi, Haruhiko Ohashi, Hidekazu Mimura

<雑誌>

*Journal of Synchrotron Radiation*

<DOI>

10.1107/S1600577519007057

### 5. 補足説明

#### [1] 軟 X 線自由電子レーザー（軟 X 線 FEL）

軟 X 線は波長が 1~30 nm の範囲にある光で、軟 X 線自由電子レーザーは軟 X 線領域におけるレーザーのこと。従来の半導体や気体を発振媒体とするレーザーとは異なり、真空中を高速で移動する電子ビームを媒体とする。ほぼ完全な空間コヒーレント光であり、超短パルス光である。FEL は Free Electron Laser の略。

#### [2] 非線形光学、非線形

非線形とは、出力（応答）が入力に比例しない現象。非線形光学は、光に関する非線形な現象、つまり、光に対する応答がその強さに比例しない現象を扱う。応答が光の強さの 2 乗（3 乗）で強くなる場合、2 次（3 次）の非線形光学過程と呼ぶ。

#### [3] X 線自由電子レーザー施設「SACLAL」

理化学研究所と高輝度光科学研究センターが共同で建設した日本ではじめての XFEL 施設。2011 年 3 月に施設が完成し、Spring-8 Angstrom Compact free electron Laser の頭文字を取って SACLAL と命名された。2011 年 6 月に最初の X 線レーザーを発振、2012 年 3 月から共用運転が開始され、利用実験が始まった。大きさが諸外国の同様

の施設と比べて数分の1とコンパクトであるにもかかわらず、0.1 nm以下という世界最短波長のレーザーの生成能力を持つ。高い空間コヒーレンス、短いパルス幅、高いピーク輝度を備えたX線領域のレーザーを発生させる。

#### [4] KB ミラー

反射面が直交するように配置した2枚の楕円面でX線を反射させることで、X線を1点に集光するデバイス。

#### [5] 回転楕円ミラー

1枚の回転楕円面でX線を反射させることで、X線を1点に集光するデバイス。

#### [6] 可飽和吸収

ある試料に対する光の透過率が、光の強度に依存して非線形に変化する現象。

## 6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 放射光科学研究センター XFEL 研究開発部門

ビームライン研究開発グループ ビームライン開発チーム

客員研究員 本山 央人 (もとやま ひろと)

(東京大学大学院理学系研究科超高速強光子場科学研究センター 特任助教)

TEL : 03-5841-0270 FAX : 03-5841-0270

E-mail : motoyama[at]chem.s.u-tokyo.ac.jp

ビームライン研究開発グループ

グループディレクター 矢橋 牧名 (やばし まきな)

東京大学大学院工学系研究科

准教授 三村 秀和 (みむら ひでかず)

高輝度光科学研究センター

研究員 大和田 成起 (おおわだ しげき)

主席研究員 大橋 治彦 (おおはし はるひこ)

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

東京大学 大学院理学系研究科・理学部 広報室

<SPring-8/SACLA に関すること>

高輝度光科学研究センター 利用推進部 普及情報課