



本研究成果は論文掲載先である Nature Photonics から、以下の通り報道解禁設定があります。  
TV・ラジオ・WEB ……3月15日(金)午後7時(日本時間)  
新聞 ……3月16日(土)朝刊(日本時間)

2024年3月15日

分野: 工学系

キーワード: X線自由電子レーザー、X線ミラー、高強度物理、SDGs

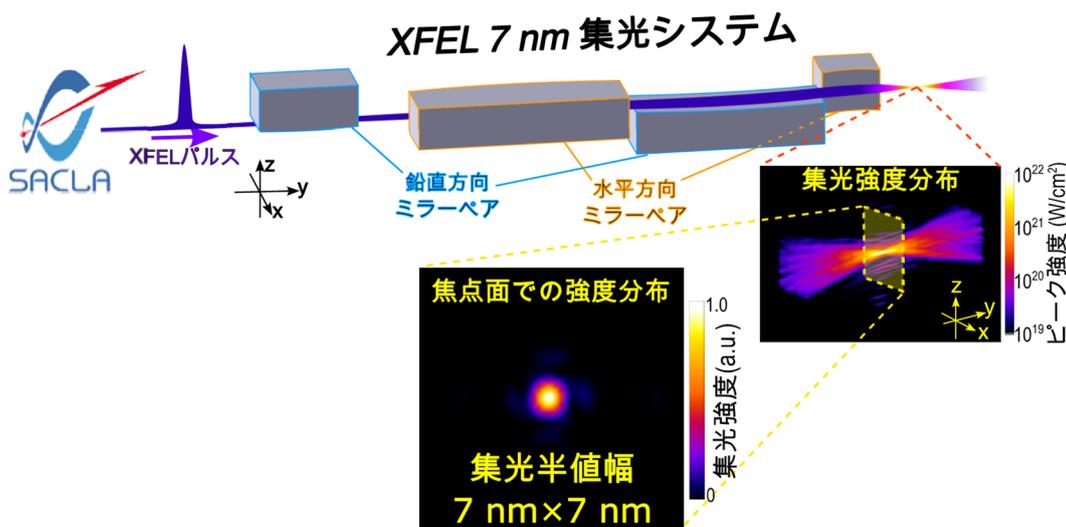
## X線自由電子レーザーの極限的 7 nm 集光を実現 —ピーク強度 $10^{22}$ W/cm<sup>2</sup> に達する世界最高光子密度の X 線レーザー—

### 【研究成果のポイント】

- ◆ X線レーザーを 7x7 nm のスポットサイズに集光してピーク強度  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> を達成
- ◆ 独自の X線ミラーを作製することで、科学計測に真に実用可能な極限的 X線集光ビームが実現
- ◆ 本研究によって実現した高強度 X線レーザー場によって、X線非線形光学などの新たな X線科学の開拓が期待できる

### ❖ 概要

大阪大学大学院工学研究科の山田純平助教、山内和人教授、名古屋大学大学院工学研究科の松山智至准教授、理化学研究所放射光科学研究センターの矢橋牧名グループディレクター、井上伊知郎研究員、高輝度光科学研究センターの大橋治彦主席研究員らの共同研究グループは、X線自由電子レーザー(XFEL:X-ray Free-Electron Laser)\*<sup>1</sup>の極限的 7 ナノメートル(nm)\*<sup>2</sup>のスポット集光を実現し、 $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>のピーク強度\*<sup>3</sup>を達成しました。これはミラーに入射する XFEL の強度を 1 億倍に増幅したことに相当する、世界最高 X線強度です。また、可視光分野も含んだレーザー強度のトップクラスに比肩する値です。



XFEL を集光する際には、高強度の入射 X線レーザーによる集光光学系へのダメージを防ぐために、入

射光を非常に浅い角度にて分散して受け止める楕円形状 X 線ミラーが利用されます(2012 年 12 月プレスリリース<sup>※4</sup>)。これまでに超高精度な X 線ミラーの作製法は確立されてきましたが(2018 年 11 月プレスリリース<sup>※5</sup>)、集光状態の不安定性に大きな課題があり、理論的には達成可能なはずの 10 nm を下回るような集光サイズの実現には至っていませんでした。

今回、研究グループは、凹面と凸面を組み合わせた X 線集光ミラー光学系を新たに開発し、高い安定性のもと XFEL の 7 nm 集光を実現しました。これによって、従来までの X 線強度よりも 100 倍以上高い X 線ピーク強度  $1.45 \times 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> が達成されました。さらに、生成した集光ビームを金属原子(クロム: Cr)に照射したところ、全ての電子を吹き飛ばすほどの劇的な反応が生じていることがわかりました。本研究によって実現された超高強度の XFEL ビームを用いることで宇宙物理、高エネルギー物理や量子光学などの基礎物理分野において、未だ観察されていないさまざまな物理現象の発見が期待されます。また、タンパク質などの立体構造を解明することにも貢献し、医学・創薬に役立つ単分子構造解析技術の開発につながるものと期待されます。

本研究成果は、英国科学誌「Nature Photonics」に、2024 年 3 月 15 日(金)19 時(日本時間)に公開されます。

#### ❖ 研究の背景

波長が短い光である X 線は、物質に対する高い透過性や原子中の内殻電子と相互作用するという特性から、レントゲン撮影、X 線 CT、建物や橋などの内部検査、微小試料の組成分析などに用いられています。通常 X 線を作り出すためには、X 線管や放射光施設が利用されてきましたが、より高い強度を持つ X 線を作り出すために、X 線自由電子レーザー(XFEL: X-ray Free-Electron Laser)がごく最近実現されました。XFEL は X 線とレーザーの性質を併せ持った最先端の光です。XFEL を 10 nm 以下のサイズ(sub-10 nm)にまで集光し、その強度を高めることができれば、今までに発見されていない X 線の非線形な物理現象の観測や、結晶化を必要としないタンパク質の構造解析が可能になると多くの研究者から期待されてきました。

日本の XFEL 光源である SACLA<sup>※6</sup> ではこれまで、日本の得意分野である精密なモノづくりに根ざした X 線楕円ミラー集光システムが精力的に開発されてきましたが、極限的な sub-10 nm 集光の実現には至っていませんでした。特に、光学系の熱的不安定性や振動の観点から安定な集光状態を保証することができず、いつかどこかの瞬間で 10 nm 以下の集光サイズが達成されているかもしれない、というような極めて曖昧な精度でしか集光を行っていませんでした。

#### ❖ 研究の内容

研究グループでは、今までの XFEL sub-10 nm 集光の不安定性が、楕円ミラーのみからなる光学配置が生む収差<sup>※7</sup>に由来していることを見抜き、X 線領域にて安定なミラー型レンズとして作用する新規 X 線集光光学系を開発しました。これは、鉛直・水平の両方向において凹面と凸面組み合わせの X 線ミラーペアから構成されており(図 1)、適切な光学設計により SACLA の XFEL が 7 nm のサイズまで集光可能になります。また、従来問題となっていた収差が大幅に抑制されたため、安定的な集光とそれによる正確な集光評価が可能となります。これまでの研究開発で培われた精密なモノづくり技術を結集して新たな XFEL 7 nm 集光システムを開発し、詳細な X 線波動場<sup>※8</sup>の評価を行なったところ 7 nm × 7 nm の集光サイズが得られ、極限的な XFEL の集光に成功したことが示されました。図 2 に示す複数の XFEL ショットごとの集光径評価結果からは、数百ショットにわたって極めて安定な 7 nm 以下のスポット集光が実現されている様子がわかります。XFEL の高強度集光において、既存の技術を用いる限りは集光サイズの限界が 5 nm 程度とされており、安定性と実用性を考慮すると今回達成された 7 nm 集光はまさに極限

的と言えます。集光された XFEL のピーク強度は  $1.45 \times 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> に到達し、従来の値を 100 倍以上更新する世界最高 X 線強度<sup>※9</sup> を達成しました。

さらに、実現した超高強度 7 nm 集光 XFEL を金属 Cr 箔試料に照射しました。X 線が物質に照射されると、原子中の電子が励起された後に X 線発光(蛍光)を起こします。図 3 は、 $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> のピーク強度を持つ XFEL によって金属中の電子を励起した際に得られる発光スペクトルの計測結果です。通常の低強度での X 線蛍光発光とは大きく異なり、多くの発光ピークが得られました。中でもライマン(Ly)線<sup>※10</sup>と呼ばれる、電子が残り 1 つだけのイオンの生成を表すスペクトルが得られ、強烈な電子励起が起きていることが分かります。興味深いことに、この Ly 線は最も高強度な焦点面において発光強度が弱まっている様子が観測されました。この結果は、束縛電子が全てなくなったために発光が起きなくなった、すなわち固体密度の原子核状態の生成が示唆されました。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

本研究成果により、恒星内部の電離状態の解明に関する宇宙物理学および原子物理学や、超高密度・超高温のプラズマを探求する高エネルギー密度科学といった分野への応用が期待されます。これらの研究には、これまで可視光の高強度レーザーが用いられてきましたが、波長域の全く異なる X 線の利用により、まさに新境地の開拓が予見されます。また、今回実現された高い強度の XFEL は、X 線の非線形光学現象の開拓や、結晶化を必要としないタンパク質の単分子構造解析が可能になる光子密度に相当し、多くの研究分野への波及効果が期待されます。

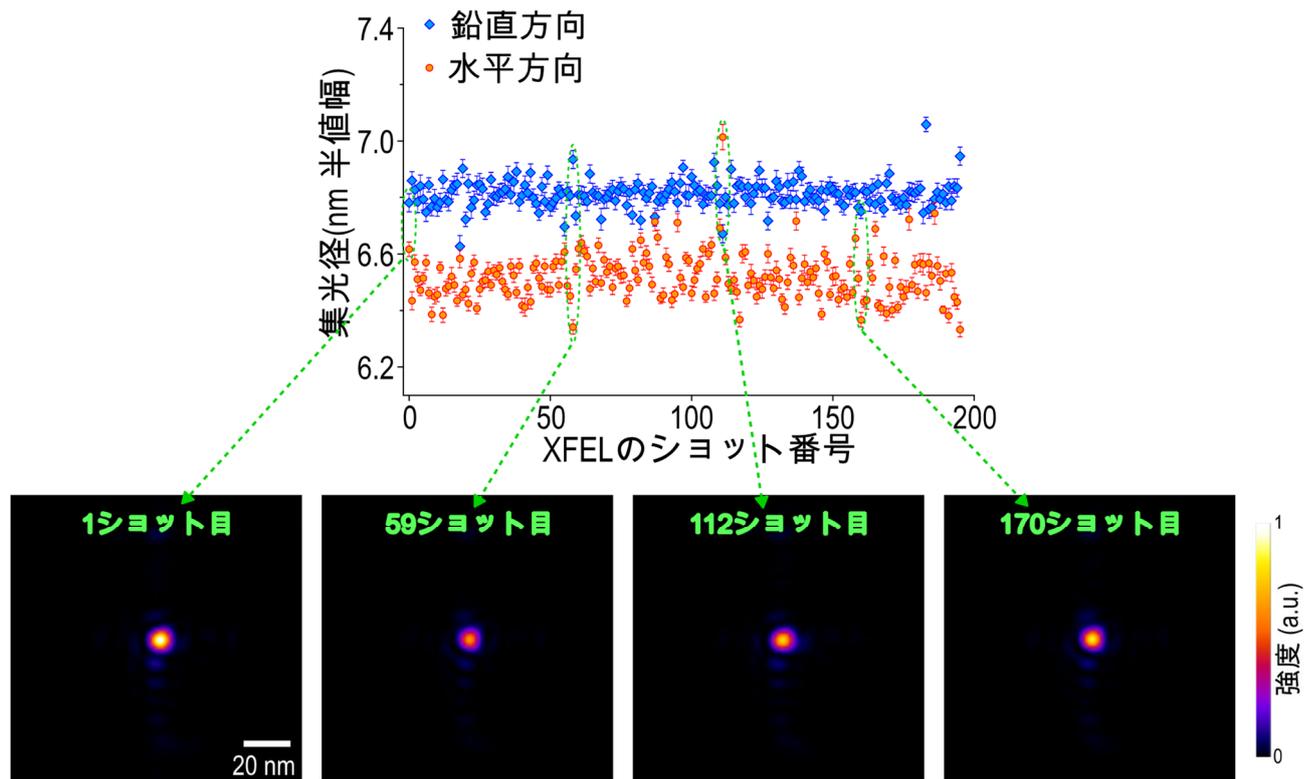
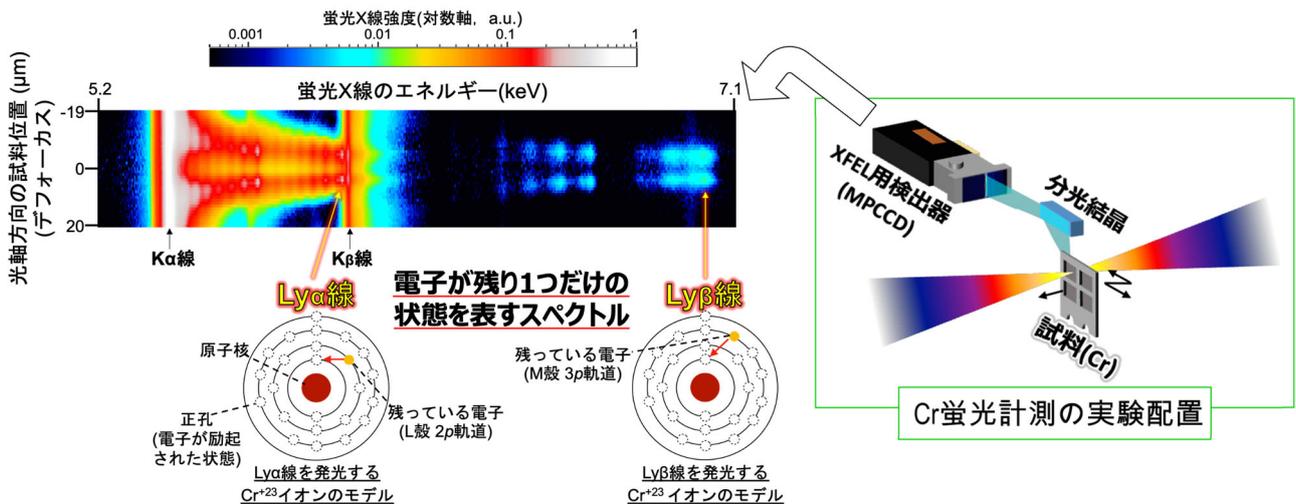


図 2

複数ショットの XFEL 集光サイズ評価結果。任意のショット番号においても安定して 7 nm 以下の集光サイズが実現されている。



超高強度 7 nm 集光 XFEL を使ってクロム(Cr)の蛍光スペクトル計測を行なった結果。通常の蛍光 X 線(図中  $K\alpha$ ・ $K\beta$  線)に加えて多数の発光ピークが見られる。電子が残り 1 つだけの状態を表すスペクトル(図中  $Ly\alpha$ ・ $Ly\beta$  線)とその変化までもが観測されている。

❖ 特記事項

本研究成果は、2024 年 3 月 15 日(金)19 時(日本時間)に英国科学誌「Nature Photonics」(オンライン)に掲載されます。

タイトル: “Extreme focusing of hard X-ray free-electron laser pulses enables 7-nm focus width and  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> intensity”

著者名: Jumpei Yamada, Satoshi Matsuyama, Ichiro Inoue, Taito Osaka, Takato Inoue, Nami Nakamura, Yuto Tanaka, Yuichi Inubushi, Toshinori Yabuuchi, Kensuke Tono, Kenji Tamasaku, Hirokatsu Yumoto, Takahisa Koyama, Haruhiko Ohashi, Makina Yabashi, and Kazuto Yamauchi

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01411-4>

なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 若手研究(23K17149)、基盤研究(S)(21H05004)の一環として行われました。

❖ 用語説明

※1 X 線自由電子レーザー(XFEL: X-ray Free-Electron Laser)

X 線自由電子レーザーとは、X 線領域の波長をもつレーザーのことである。一般的なレーザーとは異なり、物質中から真空中に抜き出された電子(自由電子)を使用してレーザー光を発生させる。XFEL の光の特徴は、次の①から④の全ての性質を同時に備えている点である。①物質を構成する最小単位である原子とほぼ同じ、微小なサイズ(100 億分の 1 メートル)の波長をもつこと(X 線であること) ②光の波が完全にそろっていること(レーザーであること) ③非常に高い輝度をもつこと(放射光 X 線の 10 億倍の明るさ) ④超短パルス光であること(カメラのフラッシュのように光の時間幅が短い(100 兆分の 1 秒)こと)。

※2 ナノメートル(nm)

1 メートル(m)の 10 億分の 1 の大きさを指す。仮に地球の大きさを 1 m まで縮小したときに、パチンコ玉が 1 nm、ゴルフボールが 3 nm、ソフトボール 3 号球が 7 nm の大きさに相当する。また一般的に、水の分子サイズが約 0.4 nm、DNA の幅が約 2 nm とされている。

※3 ピーク強度

レーザーの時空間的なエネルギーの大きさを表す指標として用いられる。レーザーパルス出力(エネルギー)をパルス幅(光の時間幅)と集光サイズ(光の空間領域)で割った値として、 $W/cm^2$ (ワット毎 平方センチメートル)の単位で表される。これまでに、可視光レーザーのピーク強度として量子科学技術研究開発機構関西光量子科学研究所の J-KAREN が  $10^{22} W/cm^2$  の日本記録を、韓国の基礎科学研究所・超強力レーザー科学研究団が  $10^{23} W/cm^2$  の世界記録を報告している。

※4 2012 年 12 月プレスリリース

世界最強 X 線レーザービームが誕生 —原子レベルの精度を持つ鏡により、1 マイクロメートルの集光ビームを実現—

[http://www.spring8.or.jp/ja/news\\_publications/press\\_release/2012/121217/](http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2012/121217/)

※5 2018 年 11 月プレスリリース

X 線レーザーを 10nm 以下まで集光できる鏡を開発 —1nm レベルで精密な多層膜鏡作製技術を確立—

[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20181128\\_3](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20181128_3)

※6 SACLA

SACLA は SPring-8 Angstrom Compact free electron LASer に由来する X 線自由電子レーザー施設の愛称。2012 年 3 月に供用を開始。兵庫県の播磨科学公園都市にあり、理化学研究所が所有する。

※7 収差

レンズなどの光学系において、理想的な集光・結像からのズレを収差と呼ぶ。ここでは特に、X 線ミラーの配置にわずかな角度ずれがあるときに光が一点に集まらない「コマ収差」が問題となっていた。

※8 X 線波動場

X 線の振幅と位相を考慮した複素関数としての表現を波動場と呼ぶ。X 線を含む電磁波は「波」としての性質を持つために、波の振幅と位相の情報が分かればその振る舞いを正確に把握することができる。

※9 世界最高 X 線強度

これまでに、 $10^{20} W/cm^2$  の X 線強度が日本の SACLA と米国の LCLS にて報告されていた。特に日本の SACLA は、実際に最先端の実験に供し得る安定したオペレーションが可能な唯一の環境であった。今回開発されたピーク強度  $10^{22} W/cm^2$  の 7 nm 集光システムも、既に実用的な実験への応用が始まっている。

※10 ライマン(Ly)線

原子線スペクトルとして有名な輝線の名称であり、通常は水素や希ガス元素などの低い原子番号において観察される。今回の Cr の場合、最も内側の軌道(K 殻 1s 軌道)の電子が励起されている 23 価の  $Cr^{+23}$  イオン(水素様 Cr 原子)から発光する。22 価の  $Cr^{+22}$  イオン(ヘリウム様 Cr 原子)からの同様の発光はヘリウム(He)線と呼ばれ、これも今回の測定にて観測されている。

【山田助教のコメント】

10 年来のプロジェクトをここまでの精度で完遂することができて感慨深い思いです。研究当初はいくつかの挑戦的な研究開発に頭を悩ませましたが、家族の支えと共同研究者のサポートのおかげで良い結果を得ることができました。開発した XFEL 7 nm 集光システムを使った実験では、既にいくつかの新しい物理現象の兆候が見え始めています。今後もさらなる飛躍を遂げるために研究を続けて参ります。

❖ SDGs目標



❖ 参考 URL

大阪大学 大学院工学研究科物理学専攻

精密工学コース 超精密加工領域 <http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>