

2008年7月28日

独立行政法人 理化学研究所
財団法人高輝度光科学研究センター

新しい科学技術を創る小型自由電子レーザー

- 日本発、世界最小の X 線自由電子レーザー (XFEL) 成功に向けた大きな一歩 -

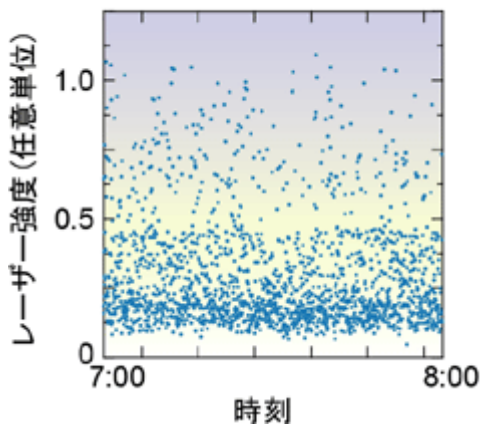
X線自由電子レーザー(XFEL)は、原子レベルの空間分解能とフェムト秒の時間分解能をあわせ持つ新しい光であり、ライフサイエンスやナノテクノロジーに革新をもたらすと大きく期待されています。しかし、SPring-8等の大型放射光施設と比較すると、一度に実験できるビームラインの数は限られます。特に、欧米で提案されたXFELのシステムは、数キロメートルにも及ぶ巨大な規模の装置を必要とするため、多数の施設を建設することは困難です。XFELの利用機会が限定されることが、多様な光科学研究の発展を阻害すると危惧されていました。

理研は、この問題をコンパクトなXFELの開発で解決する事を提案し、その小型試験加速器を建設しました。その後、理研と高輝度光科学研究センターが組織する「X線自由電子レーザー計画合同推進本部」によって装置の改良を進めた結果、今回、波長が50~61ナノメートルの領域で、極紫外線レーザーを高い出力で安定して発振させることに成功しました。すなわち、出力100メガワット以上のパワーを、強度変動10%以下という安定な状態(飽和状態)で1日中使用できるようになりました。

今回の実験結果により、2010年に完成する世界最小のコンパクトなXFELが非常に高い性能を有するという期待が高まりました。また、試験加速器の、大強度極紫外光源としての本格的な利用が可能となりました。



a 2007年8月30日



b 2008年2月19日

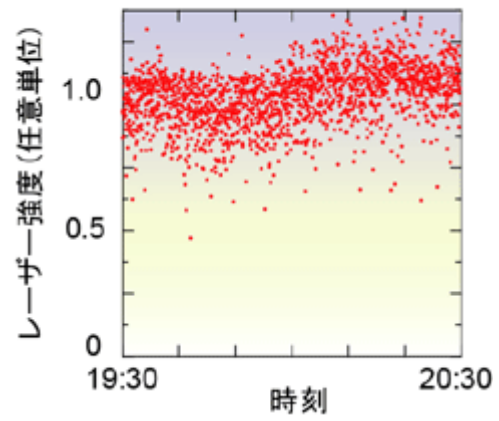


図 SCSS 試験加速器 (上) とレーザー強度の
時間依存性の比較 (下)

2008年7月28日

独立行政法人 理化学研究所
財団法人高輝度光科学研究センター

新しい科学技術を創る小型自由電子レーザー

- 日本発、世界最小の X 線自由電子レーザー (XFEL) 成功に向けた大きな一歩 -

◇ポイント◇

- ・ 小型試験加速器が高出力で安定した極紫外線レーザーを持続的に発振
- ・ 日本独自技術を駆使した小型加速器の高い性能を実証
- ・ 2010 年度に完成する X 線自由電子レーザーに大きな期待

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）と財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI、吉良爽理事長）が共同で組織する「X線自由電子レーザー計画合同推進本部（藤嶋信夫本部長、以下「合同本部」）」は、X線自由電子レーザーの小型試験加速器において、極紫外線^{*1}レーザー（波長 50～61 ナノメートル^{*2}）を 100 メガワット以上の高いパワーで安定して出力させることに成功しました。

XFEL (X-ray Free Electron Laser) は、オングストローム^{*3}の空間分解能とフェムト秒^{*4}の時間分解能で物質を照らす新しい光です。世界中の科学者が、XFELを利用することで、がんやエイズなどの難病に対する特效薬の開発や、持続的発展に必要な新エネルギーシステムの研究など、ライフサイエンスやナノテクノロジーの分野が大きく発展すると期待を寄せています。

XFELの発生装置の開発は、日米欧 3 カ所で進められていますが、既存の技術をベースとした欧米の提案は、全長数キロメートルにもわたる巨大な規模の装置を必要としています。これに対し、日本では、理研、JASRIが中心となって、欧米とはまったく異なる新たな発想に基づくコンパクトなXFELの開発に取り組んできました。2005 年には、このコンパクトなXFELの原理検証実験を行うためのプロトタイプ機として、小型のSCSS^{*5}試験加速器を建設しました。2006 年、極紫外線レーザーの出力を初めて確認し(2006年6月22日プレスリリース：X線自由電子レーザー (XFEL) 試験加速器からレーザー光の発振に成功)、その後もさまざまな研究や装置の改良を行ってきました。

この結果、今回、合同本部は、極紫外線レーザーを高い出力で発振させることに成功しました。波長 60 ナノメートルにおいて、パルスエネルギー30 マイクロジュール^{*6}、パワー100 メガワット以上と、前回の報告と比べ 1,000 倍以上の強度を達成しました。また、レーザー出力のパルスごとの強度変動を 10%以下に抑制し、「飽和」と呼ばれる安定したレーザー発振状態を初めて実現しました。この飽和状態は長時間にわたり継続され、試験加速器を本格的な光利用研究に供することが可能となりました。さらに、日本独自の技術を駆使して開発された、レーザーを作り出す源である電子ビームの性能（規格化エミッタンス^{*7}）が、従来の想定よりはるかに優れていることを明らかにしました。

これらの成果は、2010 年度完成に向けて、合同本部が播磨科学公園都市内の大型放射光施設 SPring-8^{*8}キャンパスで建設を進めている世界最小のXFEL (図 1) の高い性能を予見するとともに、将来のさらなるXFELの小型化への道も開きます。

本研究成果は、英国の科学雑誌『Nature Photonics』掲載に先立ち、オンライン版（7月27日付け：日本時間7月28日）に発表されます。

1. 背景

20世紀後半に誕生したレーザーは、半世紀を経た今なお、科学技術に大きな変革をもたらし続けています。通常のレーザーがカバーする波長範囲は、赤外線から可視光に限られますが、近年、この制約を解き放つ手法として自己増幅自発放射型

(SASE: Self Amplified Spontaneous Emission)の自由電子レーザー(FEL: Free Electron Laser)が大きく注目されています。このレーザーの発生原理は、真空中で加速された自由な電子を、周期的な磁場(アンジュレータ^{*9})に通すことで、通常では起こりえないレーザー波長間隔の電子の「群れ」を作り出し、そこから位相のそろった光を取り出すというものです。動作波長の原理的な制限がないため、特に、紫外線から軟X線、硬X線といった、これまで不可能であった短波長レーザーを実現する切り札として期待されています。

電子の「群れ」を効率よく作るためには、高エネルギーかつ高密度の電子ビームを生成することが必要です。このためのキーテクノロジーとして、1990年代、当時大きく発展を遂げた高エネルギー物理学実験のための線形加速器技術に注目が集まりました。特に、アメリカのスタンフォード線形加速器センター(SLAC)とドイツのドイツ電子シンクロトロン(DESY)において集中的な検討が行われ、この技術を転用することでXFELの実現が可能であるという見通しが得られたことから、両施設はXFELの開発に着手しました。

しかし、この議論の帰結として、両施設の計画は巨大な線形加速器施設を前提とするものとなってしまいました。具体的には、SLACの計画(LCLS)では既存の約3 kmの線形加速器の一部をそのまま用い、またDESYの計画(European XFEL)では新たに約3 kmの直線トンネルを掘削して装置を設置することとなっています。このような発生装置を数多く建設することは、その規模の大きさから極めて困難です。大型の加速器を利用した光源としては、SPring-8に代表される第3世代シンクロトロン放射光施設^{*10}もあげられますが、両者の大きな違いは、同時に利用できるビームラインの本数です。シンクロトロン放射光施設では、円周の接線方向に数10本以上のビームラインを引き出して並行して実験を行うことが可能であるのに対し、線形加速器ベースのXFELではせいぜい数本に限定されます。このままでは、素晴らしい性能をもつXFELを利用する機会に限られ、光科学研究の多様な発展の可能性が阻害されると強く危惧されてきました。数多くのXFELが建設可能になるよう、発生装置を小型化することが緊急の課題となっていました。

2. 研究開発手法

約10年前、コンパクトで低コストなXFELの実現に向けた検討が、日本において開始されました。FELの発生原理に立ち戻ると、電子を蛇行させるアンジュレータ磁石の周期長を短くすると、電子ビームのエネルギーを低く抑えても短波長のレーザーを発生させることが可能です。この結果、線形加速器の全長を大幅に短縮でき、XFELの発生装置全体が非常にコンパクトに仕上がります。この目的に合致するテクノロジーとして、合同本部の北村英男グループディレクターらが、高エネルギー加速器研究機構(KEK)とSPring-8で開発し、世界の放射光利用者から高い信頼を得ている「真空封止アンジュレータ」が非常に有効であることが知られていました。

しかし、FEL理論^{*11}によると、低エネルギーの電子ビームにより短波長XFELを

発生させるためには、電子ビームの密度を高くし、かつ平行度を高める必要があります。このために、合同本部の新竹積グループディレクターらが非常に平滑な表面をもつセリウム 6 価ボロン (CeB₆) 単結晶を用いた熱電子銃の開発を進め、電子ビームの拡がりを表す規格化エミッタンスという指標で 0.6 mm.mrad という極めて小さい値を達成しました。

この熱電子銃と真空封止アンジュレータに、多段階ビーム圧縮システムと高勾配 Cバンド加速管を組み合わせることで、ビームの加速エネルギーを 8 GeV (欧米の半分)、装置の全長を 700m (欧州の 4 分の 1 以下) に留めながら、最短波長 0.06 ナノメートルという X線領域のレーザーが実現可能となります。この日本独自のコンパクトな XFEL の構想に基づき、合同本部は、SPring-8 における XFEL 建設プロジェクトを、2006 年度から 2010 年度の 5 年間にわたり進めています。このプロジェクトは国により「国家基幹技術」の 1 つと位置づけられています。

一方で、コンパクトな XFEL の実験的な動作検証のために、XFEL の 32 分の 1 の加速エネルギー (250 MeV) をもつ全長 60m の SCSS 試験加速器を 2005 年に建設し、試験研究を行ってきました (図 2)。2006 年には、波長 49 ナノメートルにおいてレーザー増幅を観測しましたが (2006 年 6 月 22 日プレスリリース : X線自由電子レーザー (XFEL) 試験加速器からレーザー光の発振に成功)、さらに性能を高めるために、その後も技術開発を継続してきました。特に、線形加速器を安定に動作させるための改良を徹底して行い、加速管の温度制御の精度を 0.1°C から 0.01°C に改善しました。また、アンジュレータ内部の磁場の不均一性を修正するため、磁石列の設計変更と交換を行いました。このような改善の結果、最終的には装置のチューニングを高精度で狙い通りに行うことが可能となりました。

3. 研究開発の成果

本研究では、アンジュレータの対向する磁石間隔を変化させて磁場強度を変えながら、レーザーパルスの放射強度を計測しました。FEL 理論によると、アンジュレータの磁場をゼロから徐々に大きくしていくと、電子ビームの蛇行が強まるとともに、レーザーの出力強度も急激に増大します。このとき、レーザー光の波長は少しずつ長波長側にシフトしていきます (図 3(a)赤丸)。磁場が非常に小さい波長が 30 ナノメートルのときと比べ、40 から 50 ナノメートルになるように磁場を強くしていくと、レーザー強度は 1 万倍以上に増幅されます。最終的に、波長 60 ナノメートルにおいて、1 パルス当たりのレーザー強度は最大で 30 マイクロジュールに達し、他の光源では到達できない 100 メガワット以上の非常に高い出力を達成しました。

波長に対するレーザー出力の増加率をよく観察すると、波長 50 ナノメートルを境にして、長波長側では強度の増加が抑制されているのがわかります (図 3 (a))。このとき同時に計測したパルス毎の強度の変動は、上記の波長領域に入ると 10% 程度まで急激に減少し、非常に安定したレーザー出力が得られています (図 3 (b))。このような高出力・高安定の動作は、自由電子レーザーが「飽和」と呼ばれる状態に達したことを示します。

FEL 理論によると、レーザー出力の飽和は、非常に高密度で平行性の高い電子ビームを強い磁場中で蛇行させたときに初めて達成されるものです。すなわち、レーザー出力と電子ビームの規格化エミッタンスは密接な関係があります。この相関を

さらに詳しく調べるために、計算機シミュレーションを行い、電子ビームの規格化エミッタンスを $0.7 \text{ } \mu\text{mm.mrad}$ と仮定した場合に実験結果と非常によく一致することがわかりました (図 3(a))。この結果は、電子銃における電子ビーム発生時のエミッタンス ($0.6 \text{ } \mu\text{mm.mrad}$) が、ビーム加速や圧縮によってほとんど劣化していないことを意味しています。実は、電子ビームのエミッタンスを精密に計測することは、これまで非常に難しい課題であり、従来の XFEL のシミュレーションでは暫定的に $1 \text{ } \mu\text{mm.mrad}$ という値を用いてきました。今回得た値は、これよりはるかに小さく、SCSS 試験加速器のシステムが理想的な状態で機能していることを、レーザー光特性の計測を通して初めて実証することができました。

この SCSS 試験加速器は、実用面においても優れた特性をもっています。装置の起動から飽和状態を再現するまでの調整時間はわずか 1 時間程度であり、一旦飽和に達すると、調整なしで長時間の安定した動作が可能となっています (図 4)。これまで、線形加速器ベースの自由電子レーザーを自在に制御し、安定に動かすことは困難であると考えられてきました。しかし、「コンパクト」を追求したシステムデザインは、常識を覆す「操作性」と「安定性」をも賦与したのです。

4. 今後の展望

今回の成功は、2010 年度に完成予定の XFEL の性能に対して非常に明るい見通しを与えます。XFEL の加速器システムとしては、試験加速器をベースとしながらさらにバンチ圧縮部に改良を加えたものを採用する予定であり、極小エミッタンスを維持しながら電子ビームの密度を劇的に高めることが可能となります。この結果、極めて高い出力で XFEL が発振することが期待されます。

また、SCSS 試験加速器は、大強度かつ安定な極紫外線光源としても大きな一歩を踏み出しました。世界においても、同種の光源は DESY の FLASH しか存在せず、高い競争力が期待されます。FEL 利用研究の充実を図るため、理研は、2008 年 2 月に第 1 回の利用実験の公募を行いました (2008 年 1 月 30 日プレスリリース：国家基幹技術「X 線自由電子レーザー」試験加速器 (プロトタイプ機) の利用課題を公募、合同本部利用グループホームページ：<http://xfeluser.riken.jp/>)。国内外の大学や研究機関の研究グループが実験を開始し、既に成果も出始めています (2008 年 4 月 17 日プレスリリース：<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2012/>)。今後、光科学研究の発展に大きく貢献することが期待されます。

(研究内容・XFEL 計画についての問い合わせ先)

X 線自由電子レーザー計画合同推進本部

企画調整グループ

Tel : 0791-58-2849 / Fax : 0791-58-2862

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

<補足説明>

※1 極紫外線

波長領域 30 ナノメートルから 100 ナノメートル程度の電磁波。

※2 ナノメートル

10 億分の 1 メートルが 1 ナノメートル。

※3 オングストローム

100 億分の 1 メートルが 1 オングストローム。

※4 フェムト秒

1000 兆分の 1 秒が 1 フェムト秒。1 フェムト秒は、光の速さ（秒速約 30 万キロメートル）でも 0.3 ミクロンしか進むことができないほどの極短時間。

※5 SCSS

SPring-8 Compact SASE Source の略。SASE は自己増幅自発放射 (Self Amplified Spontaneous Emission) を意味する。

※6 ジュール

ジュールはエネルギーの単位の 1 つ。ジュールは 1 ボルトの電位差の中で 1 クーロンの電荷を動かすのに必要なエネルギー。

※7 規格化エミッタンス

ビームの断面積と広がりを掛けた値で、電子ビームの性質を表す指標の 1 つ。エミッタンスが小さい場合はシャープで良質なビームが得られる。

※8 大型放射光施設 SPring-8

理研が所有する、兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高輝度の放射光を生み出す施設。SPring-8 の名前は **S**uper **P**hoton **ring-8**GeV に由来する。放射光（シンクロトロン放射光）とは、荷電粒子が磁場の中で加速されるとき放射される光の 1 種である。

※9 アンジュレータ

加速された電子の直線軌道上に沿って磁極を上下に配置して、その間を通り抜ける電子を周期的に小さく蛇行させて、明るい光を作り出す装置。合同本部が XFEL 用に開発したアンジュレータは、磁極の周期が 18mm で、1 台の長さが約 5m。

※10 第3世代シンクロトロン放射光施設

シンクロトロン放射光施設は、円形加速器で荷電粒子を加速させて放射光を発生させる施設。第1世代は放射光の専用施設ではなく、素粒子物理学研究用として放射光利用を行ったものを指し、第2世代は放射光専用施設だが、偏向磁石からの放射光利用が主流。第3世代は専用施設かつ、アンジュレータが挿入光源として主流になっている施設を指す。

※11 FEL 理論

電子ビームと光（レーザー）の相互作用を電磁気学と特殊相対論を用いて記述する理論。この理論を用いると、アンジュレータ中を蛇行する電子ビーム密度の時間的変化（密度変調）とそれと一体で進むレーザー場の強度増大（レーザー出力の増大）の様子を正確に予測できる。レーザー出力がどのように増大するかは、電子ビームの条件（電子の加速エネルギー、規格化エミッタンス、ピーク電流値等）やアンジュレータの条件（磁極の周期、磁場の強さ、磁石列の上下のギャップと永久磁石カバーの材質など）によって決まる。



図1 SPring-8におけるXFEL施設

右の円形の施設がSPring-8。周長約1.5キロメートルの施設の中に現在49カ所のビームラインを有する。左側の細長い施設がXFEL施設の完成イメージ。写真左から右に向かって電子が加速され、一番下流の実験棟に5本のビームラインを建設する予定。



図2 SCSS 試験加速器

写真手前の電子銃から奥に向かって電子ビームが発射される。

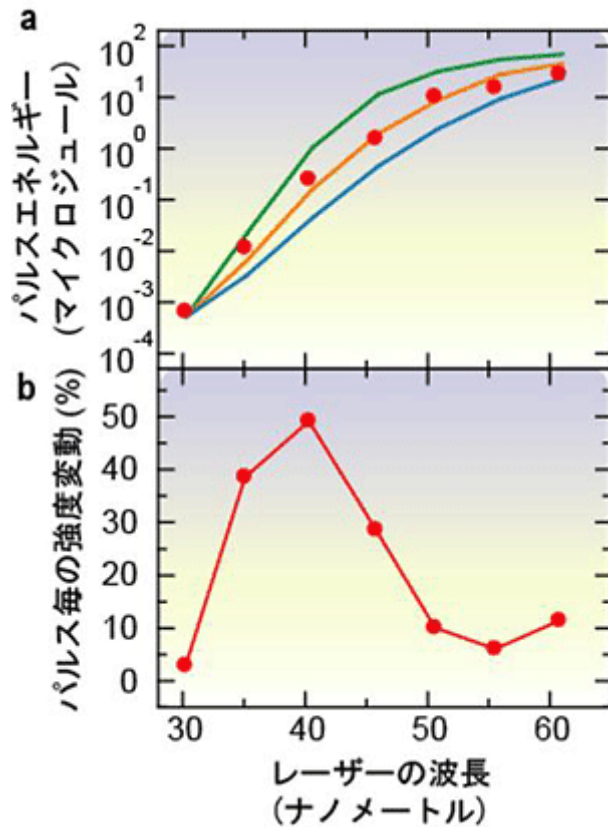


図3 レーザーの波長に対するパルス強度(a)およびパルス毎の強度変動(b)

(a) の緑、オレンジ、青の実線は、電子ビームの規格化エミッタンスをそれぞれ 0.5、0.7、0.9 mm.mrad としたときのシミュレーション結果を示す。赤丸は実験値を示す。

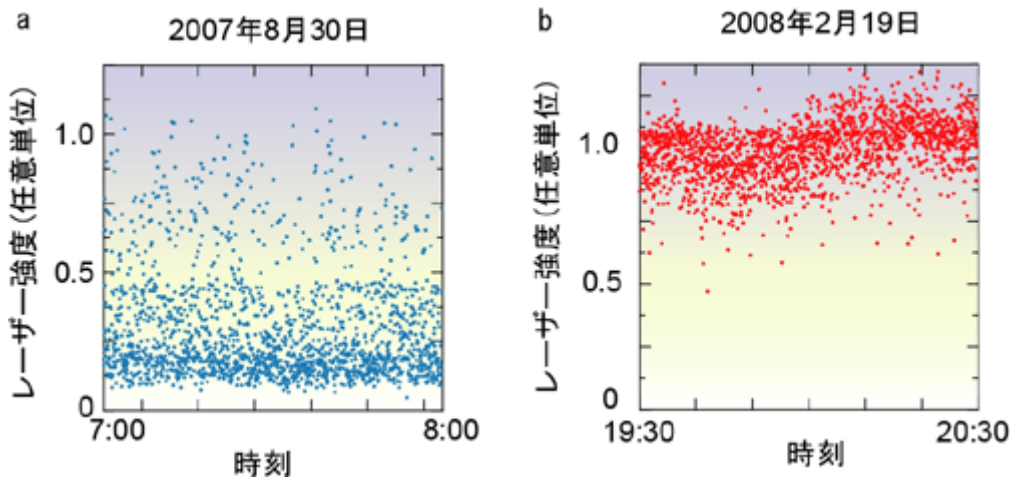


図4 レーザー強度の時間依存性

- (a) 従来：強度変動はバースト状に大きくばらついている。
- (b) 今回：安定して高い出力が得られた。