



# 展 TENBO 望

## X線自由電子レーザーの可干渉性を可視化



**井上伊知郎**  
*Inoue Ichiro*  
(国研)理化学研究所



**登野 健介**  
*Tono Kensuke*  
(公財)高輝度光科学研究センター



**雨宮 慶幸**  
*Amemiya Yoshiyuki*  
(東京大学)



**矢橋 牧名**  
*Yabashi Makina*  
(国研)理化学研究所

### 1 はじめに

2つの光が空間的に重なったとき、重ねあわせの原理によって、ある時刻における光の電磁場はそれぞれの光の電磁場の和になる。すなわち、瞬間・瞬間で2つの光は“干渉している”といえる。ところが、光の電磁場は非常に早く振動しているため、我々はこの光の重なりの様子を時々刻々と見ることは出来ない。光の干渉が目に見える形で現れるためには、2つの光の電磁場の重なりの様子が時間的に変わらないこと、すなわち電磁場の時間的な揺らぎが相関を持っている必要がある。この相関の程度のことをコヒーレンス度、あるいは可干渉性という。

可干渉性が高い光源の代表例がレーザー光である。レーザーでは、特定の空間プロファイル（空間モード）を持つ光のみが共振器中の光の増幅条件を満たす。同じ空間モードに含まれる光の間には完全な相関関係があるため、単一の空間モードの光のみを取り出すことによって高い干渉性が実現されている。

波長が0.1 nm程度の電磁波であるX線の領域では適切なレーザー媒質や共振器用の鏡が無いためにレーザー光が実現できず、高い干渉性を持つ光源は存在しなかった。しかし、2009年に米国のStanford国立加速器研究所のLinac Coherent Light Source、次

いで2011年に日本の理化学研究所のSPring-8 Angstrom Compact free-electron LAser (SACLA)が稼働したことによって、X線領域のレーザー光の利用が可能になった。さらには、韓国、スイス、ドイツなどでX線レーザー施設の建設や調整が現在進められている。これらのレーザーは“自由電子レーザー”と呼ばれるタイプのもので、光速近くまで加速した高品質の電子ビームを、アンジュレータと呼ばれる磁石列によって多数回蛇行させることでレーザーを発振させている。後述のように、X線自由電子レーザー(X-ray free-electron laser; XFEL)では、複数の空間モードが混在してレーザー発振しているため、光はビーム全体に渡って可干渉ではない。このXFELの可干渉性は、電子ビームのエミッタンス(ビーム広がりや角度発散の積)や発振に寄与するアンジュレータの長さなどのパラメータによって敏感に変化することが知られている。そのため、XFELの可干渉性の情報は、高い空間コヒーレンスを必要とする実験のデザインや解釈やX線光学系の設計はもちろんのこと、高コヒーレンスな光源開発やコヒーレンスをもとにした電子ビーム診断にとっても非常に重要な情報である。このようにXFELの可干渉性はXFELの上流部の加速器や光源から下流部のビームラインや実験までのさまざまな要素に関係している光の本質的なパラメータの1つ

であり、その特性を精確に評価・理解することは極めて重要である。

本稿では、X線自由電子レーザーの発振原理とそのコヒーレンス特性について述べた後に、最近筆者らのグループによって行われたSACLAの可干渉性を測定した実験について紹介する。

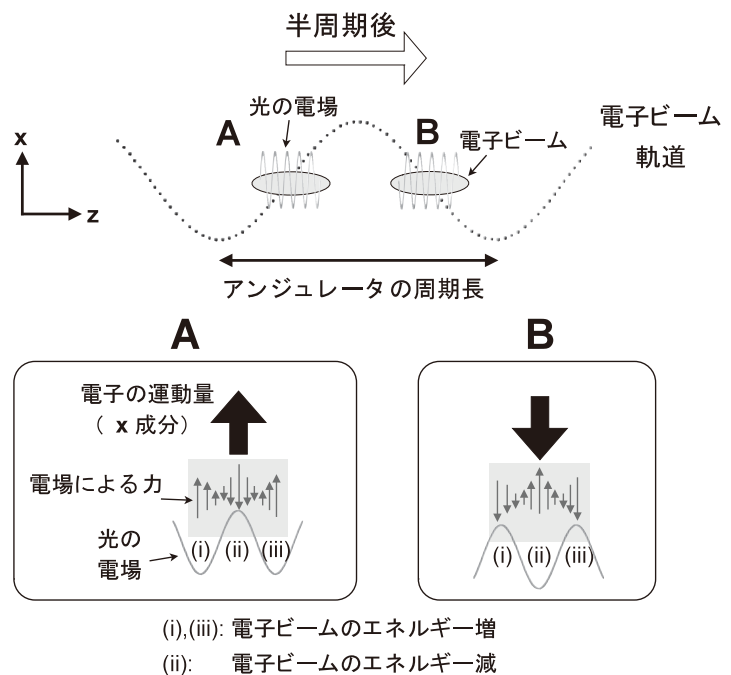
## 2 X線自由電子レーザーの発振原理とコヒーレンス特性

“自由電子”という語句が含まれていることから分かるように、XFELでは、物質中に拘束されている固有のエネルギーを持つ電子ではなく、真空中で任意のエネルギーに加速された自由電子を用いて、そのビームをアンジュレータに通すことで、X線レーザーを発振させる。SPRING-8などの放射光施設でもアンジュレータを用いて電子ビームからX線を発生させているが、XFELを実現するには、(1)電子ビームのエミッタンスが小さく、かつ電子密度が大きいこと、(2)アンジュレータが十分に長いこと、の2つの条件を満たさなければならない。逆にいえば、これらの条件が最近になって達成されたからこそXFELが実現できたといえよう。

ここではXFELの発振原理についての定性的な説明を述べる。詳しい定量的な説明は他の文献<sup>1-3)</sup>を参照されたい。電子ビームがアンジュレータによって、周期的に曲げられながら進行している図1の状況を考える。電子ビームの進行方向を座標のz軸方向にとり、電子ビームがアンジュレータの磁場によってx軸方向の力を受けているとしよう。この場合、x方向に電場を持つ光がz軸方向に放射される。図1の下部の図は、図中の点Aと点Aからアンジュレータの半周期ずれた点Bに電子ビームが達した際の電子ビームと放射されたX線の重なりについて模式的に拡大図を描いたものである。点Aを電子ビームが通る時、電子ビーム内の電子はすべて+x方向の運動量を持つ。このとき、光の半波長ごとに電子ビームを区切った拡大図の(i)、(ii)、(iii)の領域についてそれぞれ見てみると、(i)と(iii)の領域の電子は、光の電場によって+x方向の力を受けるため、

光からエネルギーを受け取る。一方で(ii)の領域の電子は、電場によって-x方向の力を受けてエネルギーを失う。次に点Bにおける電子ビームと光の関係を見てみよう。電子から放射された光の位相は点Aでの光の位相からちょうど $\pi$ ずれたものになる。一方で、各電子は点Bにおいて-x方向の運動量を持つ。このとき、(i)と(iii)の領域の電子は光からエネルギーを受け取り、(ii)の電子はエネルギーを失う。以上のように、アンジュレータ中を通過するに伴って(i)、(iii)の領域の電子は常にエネルギーを得て、(ii)の領域の電子はエネルギーを失うことで、電子ビームにX線の波長周期のエネルギーの変調が生じる。エネルギーを得た電子は、相対論的質量が重くなることで磁場による蛇行の振幅が小さくなり、アンジュレータを進行する速度が早くなる。これらの電子は、電子ビームにおけるその相対的な位置を進行方向の前方側へと移動させていく。一方で、エネルギーを失った電子は、その相対的な位置を進行方向の後方側へと移動させていく。このようにして、電子ビーム中に光の波長周期の密度変調が誘起される。これによって、各電子が位相を合わせてX線を放射するようになり、レーザー発振が実現される。

XFELの増幅過程とそれに伴う可干渉性の成長を



(i),(iii): 電子ビームのエネルギー増  
(ii): 電子ビームのエネルギー減  
図1 アンジュレータを通過する電子ビームと放射される光の空間的な重なり

わかりやすく示すために、FELのシミュレーションコードであるSIMPLEX<sup>4)</sup>を用いて、SACLAにおけるFEL発振過程をシミュレーションした結果を図2に示す。図2(a)は、電子ビームがアンジュレータの各位置を通過する際のXFELのパルスエネルギーを示したものである。アンジュレータの入り口付近の(i)の領域では、電子ビームから位相がバラバラの自発光が放出され、光の強度はアンジュレータを電子が通過した距離に比例する。この領域はレーザー発振が起こらない不活性な領域である。電子ビームがアンジュレータを進むに従って、(ii)の領域では、電子ビームに光の波長周期のエネルギー変調、次いで密度変調が誘起されてレーザー発振が起こり、強度が指数関数的に増加する。一方で、電子ビームからの光放出は電子ビームの質の劣化を引き起こし、最終的にアンジュレータを電子が通過してもほとんど光が増幅しないレーザー発振の飽和を迎える((iii)の領域)。

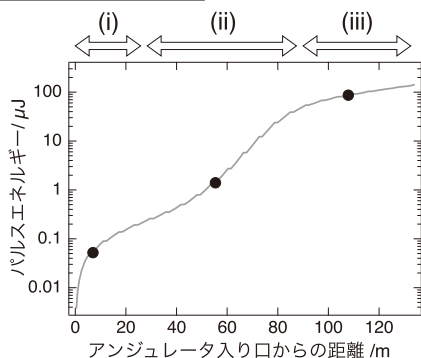
レーザー増幅に伴うコヒーレンス特性の変化を見ていくために、図2に示した(i)、(ii)、(iii)の増幅曲線中の丸印の位置におけるX線ビームプロファイルを見てみよう。まず、アンジュレータの入り口付近の(i)の領域では、多数のスポット状の強度ピークがビームプロファイルの中に見られる。これは、さまざまな空間モードが混在していることを意

味している。(ii)や(iii)の領域では、X線プロファイルはなめらかなものになっている。XFELでは各空間モードはそれぞれ異なる増幅率を持つ。そのため、電子ビームがアンジュレータを通過するにつれて、最も増幅率が高い空間モード(基本モード)の強度の割合が大きくなっていく。基本モードは、節を持たないGaussian-likeな強度プロファイルをしているため、図2の(ii)や(iii)のビームプロファイルがなめらかなものになっているのである。このように、XFELでは単一の空間モードが主成分になるために高い可干渉性を持っている。しかし、基本モード以外の空間モードの寄与も無視できず、完全な可干渉性を持っているわけではない。これは従来の共振器を用いたレーザー発振とは異なるXFELならではの特徴である。

### 3 拡張型ヤングの実験による可干渉性の可視化

XFELの可干渉性を評価するために、筆者らは“拡張型ヤングの実験”と名付けた計測法を考案した<sup>5)</sup>。この計測法のポイントは次の3点にある。1点目は、従来のヤングの実験で用いられているスリットの代わりに球状粒子2つを用いることにある。この球状粒子2つの散乱波の干渉の様子から可干渉性(コヒーレンス度)を評価する。2点目のポ

(a) レーザー増幅曲線



| 電子ビームパラメータ                        | アンジュレータパラメータ             |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Electron energy: 8 GeV            | K value: 1.9             |
| Bunch length: 7 $\mu\text{m}$     | Periodic length: 18 mm   |
| Bunch charge: 180 pC              | Length per segment: 5 m  |
| Bunch shape: Gaussian             | Segment interval: 6.15 m |
| Emittance (x): 1 mm $\cdot$ mrad  |                          |
| Emittance (y): 1 mm $\cdot$ mrad  |                          |
| Energy spread: $5 \times 10^{-5}$ |                          |
| beta_ave (x): 25 m                |                          |
| beta_ave (y): 25 m                |                          |
| Energy chirp: 0                   |                          |

(b) ビームプロファイル

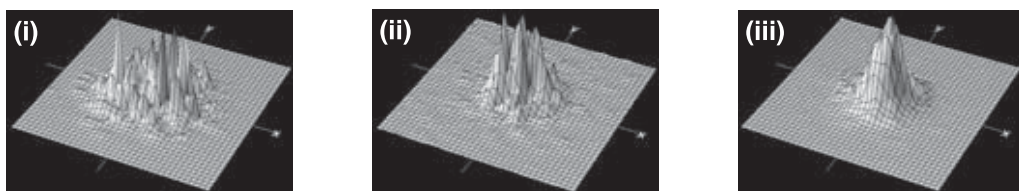


図2 SACLAのパラメータを用いたXFEL増幅過程のシミュレーション結果



イントは、X線を球状粒子の懸濁液に照射することである。懸濁液中の粒子位置はランダムなので、様々な粒子間距離の散乱像を測定することが出来る。これによってXFELの可干渉性をビーム中の2点間の距離の関数として評価することが可能になる。3点目のポイントは、異なる大きさの球状粒子による散乱像を可干渉性の評価に用いることである。それぞれの粒子からの散乱振幅の大きさは散乱角によって大きく変わる。そのため、2粒子からの散乱波干渉によって生じる干渉縞のコントラスト(visibility)も散乱角に応じて変化する。XFELの2つの粒子からの散乱波の経路差がXFELの時間コヒーレンス長よりも十分に短い場合、visibilityはそれぞれの粒子からの散乱X線の振幅が等しいときに最大値をとり、その値はコヒーレンス度と一致する。この性質を利用すると、散乱像のみから他の情報を必要とせず、可干渉性の評価が可能になる。これは、可干渉性の評価にスリット位置での光強度の情報を必要とする通常のヤングの実験と比較して、実験配置の簡素化や実験データ解析の容易化をもたらす、拡張型ヤングの実験の重要な特徴である。

SACLAで行なった拡張型ヤングの実験によるコヒーレンス計測の実験配置を図3に示す。光子エネルギー6 keVのXFELをX線ミラーによって半値全幅で $1.8 \mu\text{m}$  (水平方向)  $\times$   $1.3 \mu\text{m}$  (垂直方向)のサイズに集光し、粒子直径100 nmと150 nmの金コロイドの混合溶液を液体ジェットによって集光点の位置に導入した。そしてXFELの各パルスごとの試料からの散乱像を8 m下流の2次元検出器(Multiport CCD検出器)によって測定した。得られた多数の散乱像の中から、画像処理によって大きさが異なる2つの粒子からの散乱像のみを抽出して可干渉性の評価に用いた。図4(a)は大きさが異なる2粒子からの散乱像の例及び、そのvisibilityの散乱ベクトル依存性を示している。visibilityは特定の散乱ベクトルの付近で明瞭なピーク構造を示しており、このピーク値が空間コヒーレンス度の絶対値に対応している。

各散乱像では、干渉縞の間隔から2粒子間の距離を求めることが出来る。図4(b)は、XFELの可干渉性をビームの2点間の距離の関数として可干渉性を可視化したものである。この図で $d_x$ ,  $d_y$ はそれぞれ2点間の水平、垂直方向の距離を表している。

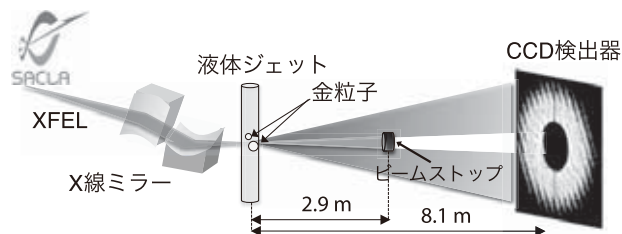


図3 拡張型ヤング実験によるXFELのコヒーレンス計測の実験配置

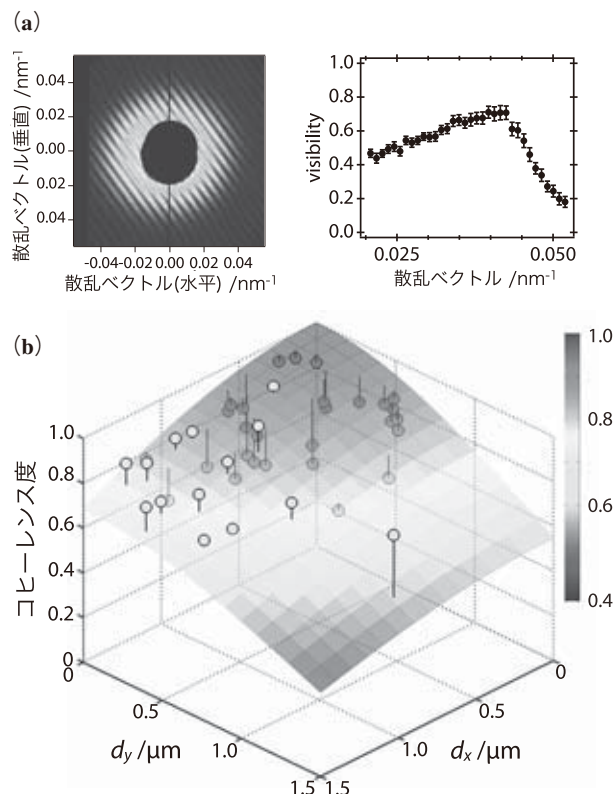


図4 (a) 大きさが異なる2粒子による散乱像とそのvisibility。(b) 拡張型ヤングの実験によって求めた可干渉性(丸印)とガウス関数によるフィッティング結果(曲面)

可干渉性 $\gamma$ の距離依存性はガウス関数 $\gamma(d_x, d_y) = \exp(-d_x^2/2l_x^2 - d_y^2/2l_y^2)$ でよく表すことができ、可干渉性が空間的に保たれる長さを表す空間コヒーレンス長は、水平・垂直方向( $l_x, l_y$ )でそれぞれ $1.7 \pm 0.2 \mu\text{m}$ ,  $1.3 \pm 0.1 \mu\text{m}$ と見積もられた。この実験の結果からXFELの空間コヒーレンス長はビームサイズとほとんど等しいことが分かった。このことはXFELがビームの大部分に渡って可干渉であることを意味している。さらに集光ビームサイズと空間コヒーレンス長の比が水平方向と垂直方向でほとんど等しい。非集光のXFELは等方的なビームプロファイル

を持つため、実験の結果は非集光の XFEL がビーム光軸に垂直な平面において等方的なコヒーレンス特性を持っていることを示している。

## 4 今後の期待

XFEL のコヒーレンス特性は、その重要性にも関わらず、測定の高難しさから定量的な測定はほとんど行われていないのが現状である。今回筆者らが提案した方法やその発展版が、XFEL の特性を評価する“ものさし”の1つとなって XFEL のサイエンスを支える基盤となることを期待したい。

### 謝辞

本研究は、日本学術振興会特別研究員制度、理化

学研究所 SACLA 大学院生プログラムの支援のもとで行われたものです。実験をサポートしていただいた SACLA エンジニアリングチーム・運転員の皆様に感謝します。

### 参考文献

- 1) C. Pellegrine, A. Marinelli and S. Reiche, *Rev. Mod. Phys.* **88**, 015006 (2016)
- 2) E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller, and M.V. Yurkov, *The Physics of Free Electron Lasers*, Springer (2000)
- 3) 田中隆次, X線自由電子レーザー概論, 高エネルギー加速器セミナー OHO'13 (2013)
- 4) T. Tanaka, *Proc. FEL 2004*, 435 (2004)
- 5) I. Inoue *et al.*, *IUCrJ* **2**, 620 (2015)