

# ANALYSIS OF LASING DYNAMICS OF AN X-RAY FEL OSCILLATOR AT FUTURE ERL LIGHT SOURCES

Ryoichi Hajima\*, Nobuyuki Nishimori  
ERL Development Group, JAEA, Tokai, Ibaraki 319-1195 Japan.

## Abstract

X-ray Free-Electron Laser Oscillator (XFEL-O) has been proposed to produce hard X-ray radiation having spatial and temporal coherence. The X-FELO consists of a pair of Bragg mirror of high-reflectivity and focusing elements such as compound refractive lenses or grazing-incidence ellipsoidal mirrors. Electron beams required for driving the X-FELO must have repetition rate matching to the oscillator length,  $\sim 1$  MHz, and emittance as small as the diffraction limit of the X-ray. Energy-Recovery Linac (ERL) is a suitable device to satisfy the above requirement. In this paper, principle and light source performance of the X-FELO are presented.

## ERL 放射光源における共振器型 XFEL の発振特性

### 1. はじめに

原子力機構では、超伝導リニアック高出力自由電子レーザー研究の一環として、エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) の開発を行い、そのすぐれた特徴 (高輝度電子ビームを大電流で加速可能) を実証し、その後、ERL 技術に基づく光源として、X 線放射光源 [1]、大強度 X 線源 [2] などの提案を行ってきた。さらに、JAEA、KEK を中心として、これら ERL 光源に必要な要素技術の開発を国内の複数の研究機関で実施する体制が構築され、総合的な技術実証のための試験施設 = コンパクト ERL [3] の建設に向けた取り組みを開始している。

ERL の低エミッタンス、高繰り返し電子ビームを用いることで、共振器型の X 線自由電子レーザー (XFEL-O) が実現できるとの提案がなされている [4]。X 線自由電子レーザーは、SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) の原理に基づく方式で、世界の 3 箇所で建設が進んでおり、SLAC-LCLS では  $1.5\text{\AA}$  の発振に成功している。XFEL-O は SASE とは異なる方式で、X 線自由電子レーザーを得るものである。また、XFEL-O に必要な電子ビームのパラメータは、ERL 型 X 線放射光源とほぼ同一であるので、ERL 型 X 線放射光源の一部として建設可能である。

本稿では、共振器型 XFEL の原理、発振特性の解析結果を述べ、将来の ERL 放射光源との両立性について議論する。

### 2. XFEL-O の構成と原理

XFEL-O は、赤外 FEL と同様に、電子ビーム、アンジュレータ、共振器の 3 つの要素から構成される。

完全結晶 (格子欠陥や不純物のない結晶) による Bragg 回折は、入射波と回折波の相互作用を含めた動力的回折の理論で記述できる。ダイヤモンド、サファイア、シリコンなどの完全結晶は、硬 X 線に対して直入射の構成で高い反射率 (95% 以上) を実現できる。XFEL-O の共

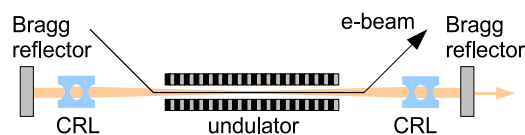


図 1: 共振器型 X 線自由電子レーザーの構成

振器は、このような Bragg ミラーと収束光学系 (屈折型のコンパウンドレンズ=CRL、または、反射型の湾曲ミラー) からなる。X 線を取り出す側の Bragg ミラーは、薄い結晶を用いて X 線の一部を透過して取り出す。取り出しを含めた共振器の全損失は 10% 程度となる。

電子ビーム、アンジュレータは、小信号ゲインが共振器の全損失を上回るようなパラメータを選ぶ必要がある。後に示すように、ERL 型 X 線放射光源の電子ビームパラメータを用いれば、 $1\text{\AA}$  領域の X 線発振が可能な FEL ゲインを得ることができる。

図 1 の XFEL-O は発振波長が Bragg 反射条件で決まる値に固定であるが、ミラーの枚数を増やすことで波長可変の構成とできる [5]。

### 3. XFEL-O の小信号ゲインの計算

ERL 型 X 線放射光源の一部として設置することを念頭において、XFEL-O の装置パラメータを表 1 のように選んだ。電子ビームエネルギーは、5GeV、7GeV の 2 通りとし、発振波長が  $1\text{\AA}$  となるように、アンジュレータのパラメータを選んだ。

発振シミュレーションを行う前に、小信号ゲインを計算した。ここでは、電子ビームと X 線ビームの空間的な重なりを、フィリングファクタ [6] として評価した上でゲイン計算を行った。バンチ長を ERL 型 X 線放射光源の標準的な運転モード 2ps (rms) とし、バンチ電荷を 19-40 pC とし、規格化エミッタンスの関数としてゲインの計算を行った結果を図 2 に示す。回折限界の条件 ( $\epsilon_n/\gamma < \lambda/4\pi$ ) は、5GeV に対して 0.078 mm-mrad、7GeV に対して 0.11 mm-mrad である。エミッタンスが

\* E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp

回折限界を越えると、ゲインが大きく低下してしまうのがわかる。表1のパラメータでは、20%のゲインを確保するためには、5 GeVで40 pC、7 GeVで19 pCの電荷量が必要である。

表1: XFEL-Oのパラメータ

電子ビーム			
エネルギー	5 GeV	7 GeV	7 GeV
パンチ長 (rms)	2 ps	→	→
パンチ電荷	40 pC	→	19 pC
$\sigma_E/E$	$10^{-4}$	→	→
$\varepsilon_n$ (rms)	0.1 mm-mrad	→	→
アジュレータ			
$a_w$	0.59	1	→
周期	1.43 cm	1.88 cm	→
周期数	3000	→	→
FEL (Å)			
small-signal gain	28%	43%	21%

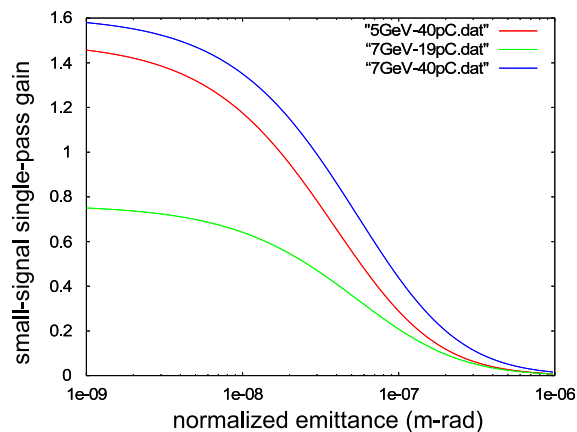


図2: XFEL-Oの小信号ゲインをエミッタンスの関数として計算した結果

#### 4. Bragg ミラーのモデル

XFEL-Oでは、硬X線領域で高い反射率を持つミラーとして、完全結晶のBragg反射を利用する。XFEL-Oの発振特性を解析するためには、Braggミラーのモデルを計算コードに取り込む必要がある。

完全結晶のBragg反射は動的X線散乱の原理に従い、X線エネルギーの関数として反射率をプロットすると、Darwin curveと呼ばれる特徴的な曲線を示す(図3)。完全結晶のBraggミラーでは狭帯域で高い反射率が得られるが、帯域の中で反射光の位相が反転することに注意が必要である。

反射光の位相が光の波長(エネルギー)の関数であることは、すなわち、エネルギー分散が存在することに等しい。位相シフトが波長の一次関数である場合、光パ

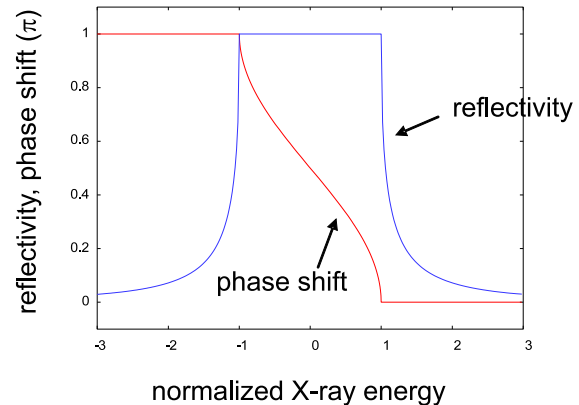


図3: 完全結晶によるBragg反射の反射率と位相シフト(Darwin curve)

ルスの群遅延と等価であり、光共振器長をわずかに調整する(detuning)で補償できる。Darwin curveの分散は、図3に示すように、線形分散(群遅延)に非線形分散が重なった形をしている。以下のシミュレーションでは非線形分散の効果も含めて解析を行った。

#### 5. XFEL-Oの発振シミュレーション

XFEL-Oの発振特性の解析を行うため、FELシミュレーションを実施した。SASE-FELのシミュレーションでは、電子パンチの一部(スライス)を対象にして周期境界条件を設定することが多い。このような手法は、計算時間の節約に便利であるが、光パルス全体に渡る時間コヒーレンスを調べることができない欠点がある。ここでは、光パルス全体を取り扱う手法(時間依存シミュレーション)を採用し、XFEL-Oの発振特性を解析する。

解析には、われわれグループが過去に開発した1次元FELコードを用いる。共振器型FELでは、光の横方向モードが共振器の境界条件で決まり、また、ゲインが小さいためにゲインガイディング(電子ビームに光ビームが閉じ込められる効果)も弱い。したがって、共振器FELの発振特性は、1次元コードで精度良く再現できる。同コードを用いて行った原研FEL(赤外)の解析では、single super-mode、limit cycle、spiking modeなどの発振特性について、実験結果をよく再現している[7]。狭帯域Braggミラーは、FFTによるバンドパスフィルターとしてFELシミュレーションに組み込んだ[8]。

XFEL-Oがショットノイズから立上り飽和に至るまでの様子を1次元時間依存シミュレーションで調べた。FEL波長1Å、small-signal gain 27%、アンジュレータ周期数3000、パンチ長2ps(三角形、FWHM)とし、Braggミラーは先に示したDarwin curveの反射率と波長分散を用い、帯域を10meV、帯域内での損失を10%とした。また、Darwin curveの群遅延を補償するため共振器長のdetuningを行った。

図4は、FELパワー(intra cavity)の成長を示したものである。約300往復で飽和に至ることがわかる。図5

に、成長に伴う X 線パルス波形の変化を示す。立ち上り (N=1) では、インコヒーレントな自発放射光である。100 往復後 (N=100) には、X 線パルス波形は徐々になめらかになり、400 往復後 (N=400) では、パルス全体が滑らかなエンベロープを持つ。すなわち、時間コヒーレンスが確立される。

飽和後の X 線パルスはガウシアンに近い波形を示し、パルス長  $\sigma_t = 0.77$  ps、周波数帯域  $\sigma_\omega = 2.5$  meV となった。取り出し側の Bragg ミラーの透過率を 4% と仮定すると、共振器から取り出される X 線光子数は  $10^9$  / pulse であり、1 – 100 MHz で動作する XFEL-O の平均輝度は、 $10^{26} - 10^{28}$  ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1% となる。

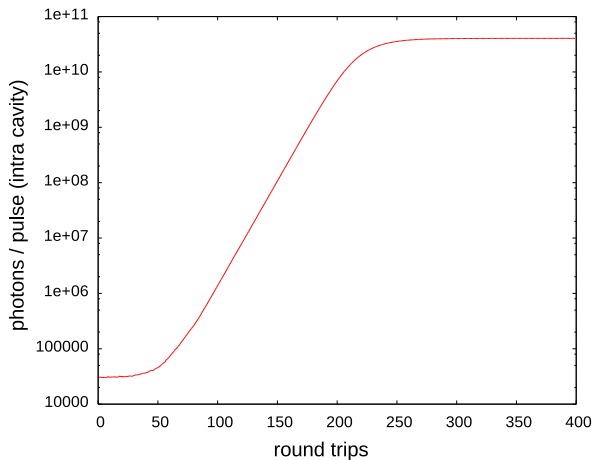


図 4: XFEL-O の発振：ショットノイズから飽和にいたるまでの様子

## 6. まとめ

時間依存シミュレーションコードを用いて、共振器型 X 線自由電子レーザーの発振特性を調べた。FEL の成長とともに狭帯域化が起り、飽和後にはガウシアンに近い時間波形の X 線パルスが得られることが確認できた。1Å(12 keV) の X 線 FEL では、2.5 meV の狭帯域レーザー光が得られ、パルスあたり光子数と平均輝度は、それぞれ、 $10^9$ 、 $10^{26} - 10^{28}$  (1-100 MHz) となる。可視・赤外の共振器レーザーが科学・産業で広く用いられているように、X 線の共振器レーザーが実現すれば、その波及効果は極めて大きなものになるだろう。

現在設計中の ERL 型 X 線放射光源は、5 GeV(または、2.5 GeV、2 ループ) の装置である。XFEL-O を 5 GeV-ERL 周回軌道に組み込んで動作させる時、FEL 発振で生じる電子バンチ内のエネルギー広がりには ERL 動作に影響しない大きさであり、他の X 線ビームラインと両立できる。また、XFEL-O は、小さな平均電流 (20 pC、1 MHz で 20μA) で運転されるので、エネルギー回収は必須でなく、ERL 周回軌道と別に single-end で設置することもあり得る。2.5 GeV、2 ループの構成では、3 回加速で 7.5 GeV の電子を使うことも可能であり、さまざまな方法で、XFEL-O を ERL 型 X 線放射光施設に併設

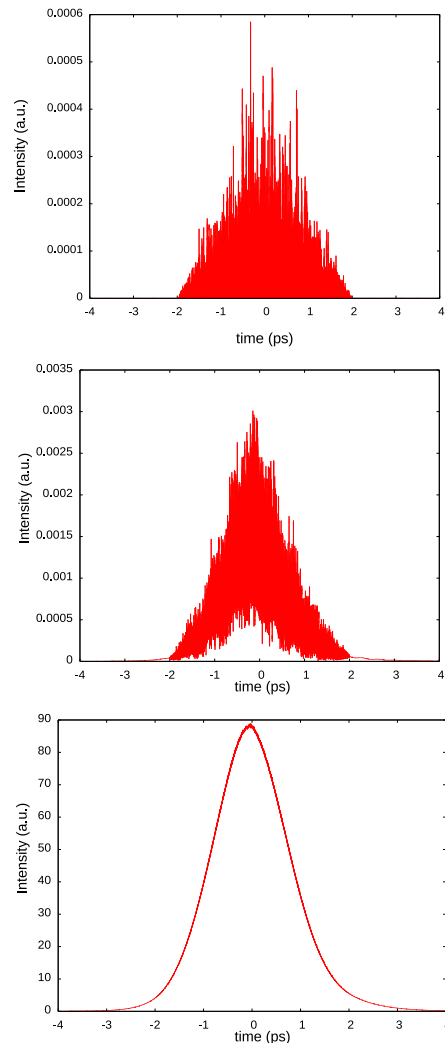


図 5: ラウンドトリップ (N) によるパルス波形の変化: (上)N=1、(中)N=100、(下)N=400。

することができる。

今後は、5 GeV-ERL に XFEL-O を組み込むための電子ビーム軌道の最適化、Bragg ミラー材料の選定、ミラーの高精度アラインメント手法の検討を進める必要がある。X 線光学素子の専門家を含めて研究体制を整えたい。

永井良治、坂中章悟、尾崎俊幸、平野馨一の各氏には有益なコメントをいただいた。感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] R. Hajima, Proc. APAC-07, pp. 11–14.
- [2] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. **45**, pp. 441–451 (2008)
- [3] “コンパクト ERL の設計研究”, 羽島 他 (編), KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-023.
- [4] K-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 244802.
- [5] K-J. Kim et al., Phys. Rev. ST-AB **12** (2009) 070702.
- [6] D. Iracane et al., Phys. Rev. E **49** (1994) 800–814.
- [7] R. Nagai et al., Nucl. Instrum. Meth. **A483** (2002) 129–133.
- [8] R. Hajima et al., Proc. FEL-2008, 87–89.