

# GAIN EVALUATION WITH TEMPORAL EVOLUTION OF FEL POWER

Masaki Fujimoto<sup>#,A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Akinori Irizawa<sup>A)</sup>, Keigo Kawase<sup>A)</sup>, Sho Hirata<sup>A)</sup>, Jie Shen<sup>A)</sup>,  
Fumiyoshi Kamitsukasa<sup>A)</sup>, Hiroki Osumi<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>B)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University  
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

<sup>B)</sup> Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University  
1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi, 982-0826

<sup>C)</sup> Institute of Materials Structure Science, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

We are conducting experiments on free-electron laser (FEL) physics using the THz-FEL based on the L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. The FEL gain is one of the essential properties of FEL and it can be evaluated by temporal evolution of FEL power. We have developed a new technique to measure the FEL power evolution over the wide range by varying the electron pulse length or the number of FEL amplifications. The FEL gain was derived from the pulse shape of the FEL light measured with a Ge-Ga semiconductor detector, which has the time resolution of about 10 ns, but it turned out that the FEL gain measured with the Ge-Ga detector was incorrect due to the non-linear response to the input light intensity. We have developed a novel technique to measure temporal evolution of FEL power using a Si bolometer, which has a linear response in the wide range. As the Si bolometer has the time resolution of about 200  $\mu$ s, we measured energy of FEL pulses by changing the pulse duration of the electron beam or the number of FEL amplification and derived the FEL power evolution. Although errors are not small, the FEL gain was derived from the power evolution and was analyzed with Rigrod theory<sup>[1]</sup>. The measured gain variation with the number of amplifications is consistent with the theory.

## FEL パワーの時間発展による増幅率の評価

### 1. はじめに

我々は、大阪大学産業科学研究所の L バンド電子ライナックを用いた THz 自由電子レーザー (FEL) の研究開発を行っている。FEL 実験では、電子銃でパルス長 8  $\mu$ s の電子ビームを発生して、サブハーモニックバンチャーシステムで 9.2 ns 間隔のバンチ列変換し、加速管で約 15 MeV まで加速した後、周期長 6 cm で 32 周期のウィグラーに入射し、光共振器を用い FEL 発振を得る。

FEL 増幅率は、FEL の特性や性能を表す重要な指標の一つであり、パルス動作をする FEL のパワーの時間発展を測定することにより求めることができる。これまで、約 10 ns 程度の時間分解能をもつ Ge-Ga 半導体型検出器を用いて FEL 光を測定して、その出力波形の立ち上がりの傾きから共振器損失を含んだ FEL 増幅率、立下りの傾きから共振器の損失率を求めた。しかし、検出器のダイナミックレンジが 2 桁余に限られるためにパワー飽和に近い高出力領域の増幅率のみが測定可能である。

FEL パワー発展の広い範囲を測定するために電子ビームのパルス長を変えることにより増幅回数を制限する手法を開発した。この手法により増幅回数を変えて Ge-Ga 検出器で FEL パワーの時間発展を広い領域で測定した結果を図 1 に示す。横軸の時間は

増幅回数に比例して、1 回の増幅に相当する 36.8 ns 単位で電子ビームのパルス長を変える。

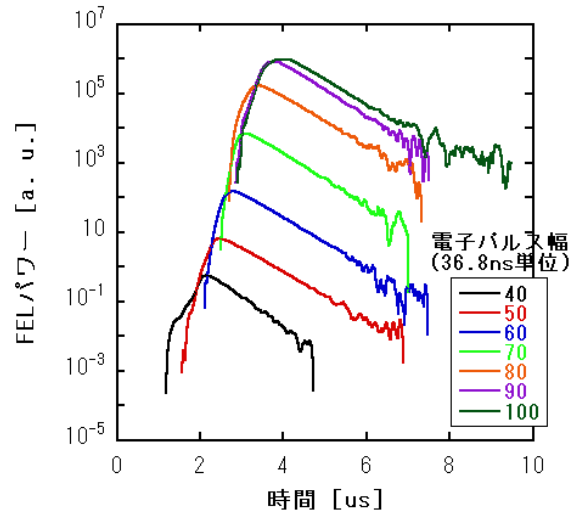


図 1 : Ge-Ga 検出器による FEL パルスの時間発展の測定。増幅回数を変えて測定した各波形の立ち上がりが重ならない。

<sup>#</sup> mfimoto25@sanken.osaka-u.ac.jp

この結果、出力波形の立ち上がり为重ならず、正しい増幅率が得られないことが分かった。Ge-Ga 検出器の応答に線形性がないことが原因であると考えられる。

そこで、FEL パルスの時間発展を直接測定できる時間分解能はないが、高い線形応答性をもつ Si ボロメータを用いて FEL ゲインを測定する新しい手法を開発している。

## 2. Si ボロメータによる測定

### 2.1 測定の概要

熱型検出器である Si ボロメータの時間分解能は約 200  $\mu\text{s}$  程度であり、検出器の出力波形のピーク値から FEL パルスのエネルギーを測定することができる。パワーはエネルギーの時間微分で与えられることから、増幅回数を変えて FEL パルスのエネルギーを測定し、増幅回数についての差分を求めることで FEL パワーの時間発展を評価することができる。

今回の実験で用いたパラメータを表 1 に示す。

表 1：実験パラメータ

電子ビームのピークエネルギー	14.96 MeV
ウィグラーギャップ	30 mm
発振 FEL のピーク波長	105 $\mu\text{s}$
Detuning 位置	-0.04 mm
共振器損失率 <sup>[2]</sup>	0.07
テフロンブロックによる減衰	5.53 mm で強度半減
共振器内の電子ビーム先頭の欠損幅	2 $\mu\text{s}$

光共振器の detuning 位置は FEL の増幅が起こる領域をより広く評価するために、飽和パワーが最大となる位置に調整した。光強度の大きな FEL を測定する際に、検出器飽和を避けるための光減衰材としてテフロンブロックを使用する。その減衰率は同じ波長の FEL 光を用いて評価した。このとき、FEL パルスの強度変動の影響を補正するためにワイヤグリッドを用いて分光器の出力光を二分し、片側を参照光として同時に 2 台の Si ボロメータで測定した。また、ビームローディングの影響により電子ビームの先頭のエネルギーは後続のビームエネルギーと異なるため、共振器内に入らない。この欠損したパルス幅については、加速管出口とウィグラー入口のコアモニターで測定した電子ビームの時間構造を比べて評価した。

### 2.2 FEL エネルギーの測定

Si ボロメータをとテフロンブロックを用いて増幅回数が 5 回から 165 回までの FEL パルスのエネルギーを測定して求めた時間発展を図 2 に示す。

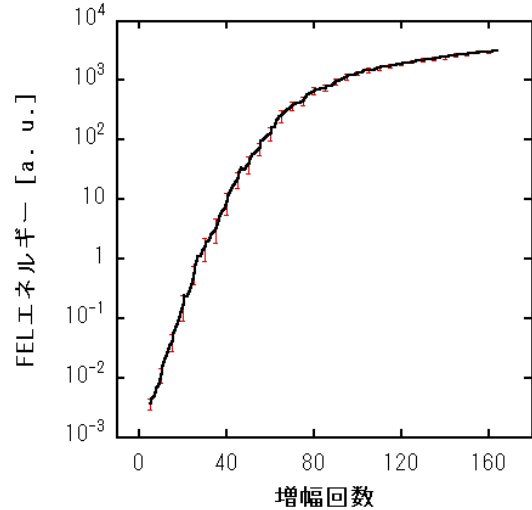


図 2：Si ボロメータによる FEL エネルギーの時間発展の測定。増幅回数が 5 回未満については検出器信号が微弱なためにノイズに埋もれてしまい、測定ができない。

各増幅回について 50 回測定して、平均値と誤差を求めた。FEL 強度の大きな領域ではテフロンブロックの厚みを変えながら減衰した光を検出し、後に減衰を補正した。

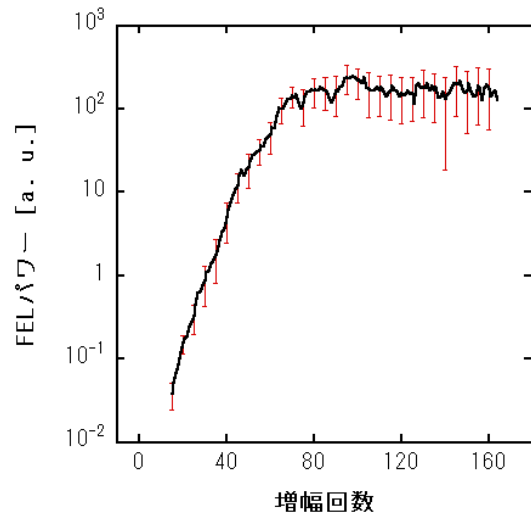


図 3：FEL パワーの時間発展。相対誤差を小さくするために、FEL エネルギーの発展から増幅回数が 10 回毎の差分を求めた。

### 3. Si ボロメータによる測定

得られたエネルギーの発展から、増幅 10 回毎の FEL パワーの差分を求めた。FEL パワーの時間発展を図 3 に示す。増幅回数が 15 回から 60 回前後まで約 4 桁にわたって FEL パワーは指数関数的に発展した。また、60 回を超えた後、FEL パワーの増大は見られなくなり、増幅が飽和に達したことがわかる。

FEL パワーの時間発展から求めた共振器損失を含む増幅率の時間変化を図 4 に示す。

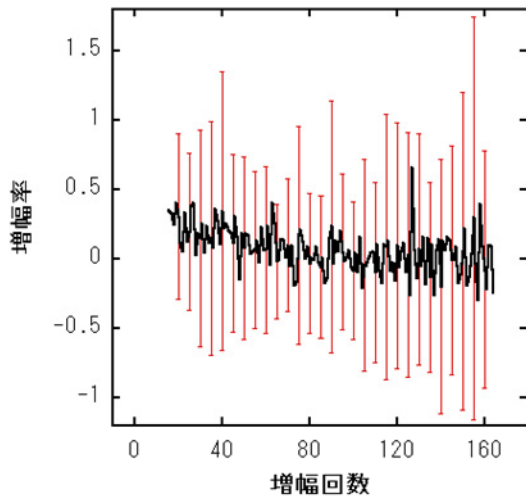


図 4：増幅率の時間変化。変動、誤差がともに大きい。

増幅回数が大きくなるにつれて増幅率は減少し、やがてゼロへと収束することが、変動が大きいながらもわかる。しかし、誤差が大きいため、適当な fitting 関数を用いて増幅率の時間変化を解析することができない。このため、FEL 増幅のモデルを用いて評価を行う。

### 4. 増幅モデルを用いた評価

4.1 FEL パワーの時間発展共振器から発振される FEL 増幅のモデルを計算する。

$n$  回増幅後の FEL パワーを  $I_n$  とすると回増幅時の増幅率  $g_n$  について、

$$g_n = \frac{0.85g_0}{1 + I_{n-1}/I_s - 0.14I_{n-1}/I_s \left(1 - I_{n-1}/I_s\right)}$$

が成り立つ<sup>[1]</sup>。ここで、

$g_0$ ：小信号増幅率、  
 $I_s$ ：飽和パワー  
 である。

また、FEL パワー  $I_n$  は、

$$I_n = (1 + g_n)(1 - \alpha)I_{n-1} \\ = (1 + g_1) \cdots (1 + g_n)(1 - \alpha)^n I_0$$

をみだす。このとき、

$\alpha$ ：共振器損失率

$I_0$ ：自発放射パワー

である。

ここで、

- $g_0 = 0.35$

- $I_s = 1.0 \times 10^2$

測定値から増幅回数が 65 回ときの FEL パワーを参照。

- $\alpha = 0.07$

- $I_0 = 0.0027$

測定値からパワー発展の増幅回数が少ない領域のみに指数関数で fitting を行い、外挿値を算出。

として、上の二式から FEL パワーの時間発展を計算した。測定値との比較を図 5 に示す。

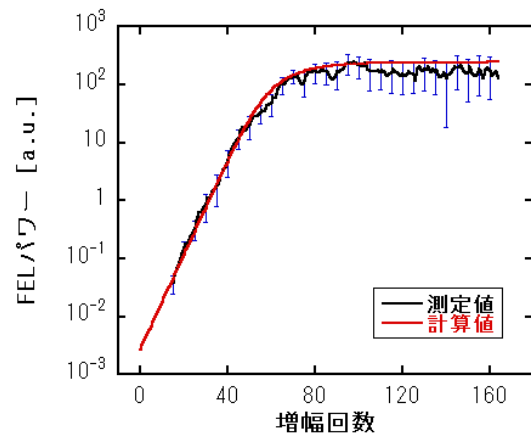
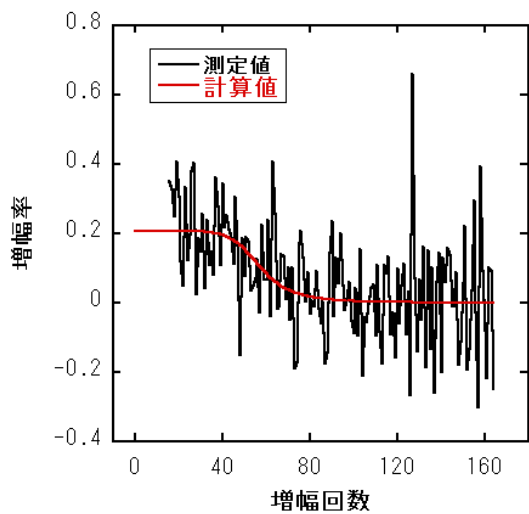


図 5：測定値と計算値の比較（FEL パワーの時間発展）。

計算値が測定値の誤差以内におさまることから、計算による FEL パワーの時間発展は今回の測定結果に近似していると考えられる。

4.2 増幅率の時間変化上式を用いて評価した増幅率の時間変化を図 6 (a) に示す。計算値は測定値の変動以内におさまり、測定値の変化を反映している。共振器損失を含めない増幅率の変化を図 6 (b) に示す。共振器損失を含めない増幅率、すなわち FEL の電子バンチによる増幅率は、増幅回数が 40 回前後まで 30% 程度であり、その後下降して 100 回を超えたあたりで再び一定になる。このとき、増幅率は共振器損失率に近い値へと収束しており、飽和に達したことがわかる。

(a)



増幅率は下降し、100 回を超えたあたりで増幅が飽和に達したと見積もることができた。FEL 発振の安定化については課題とする。

また、今後はロックインアンプを用いて増幅回数の少ない領域での FEL パワーの時間発展を評価するとともに自発放射光の測定についても考察を重ね、FEL の発振から飽和までの増幅プロセスの解析を目指したいと考えている。

### 参考文献

- [1] G. Dattoli, et al., “Simple model of gain saturation in free-electron lasers”, IEEE J. Quantum Electron; Phys. Rev. A 44 (1991)
- [2] G. Isoyama et al., “Upgrade of the ISIR-FEL at Osaka University and oscillation experiments in the sub-millimeter wavelength region”, Nucl. Instr. and Meth. A 429 (1999)

(b)

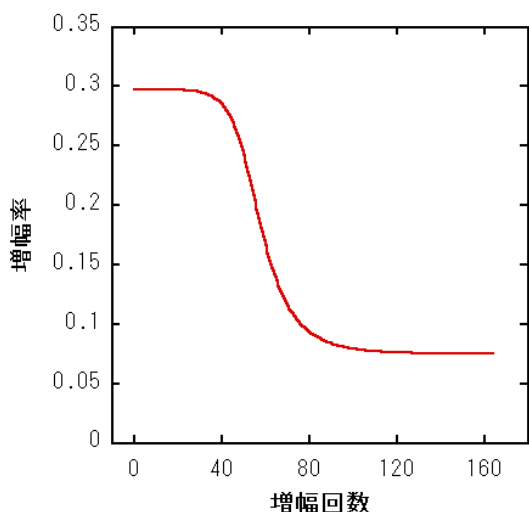


図 6

(a) : 測定値と計算値の比較 (共振器損失を含めた増幅率の時間変化)

(b) : 共振器損失を含めない増幅率の時間変化 (計算値)

## 5. まとめ

現在、阪大産研では Si ボロメータにより FEL パワーの時間発展を約 4 桁の範囲にわたって評価している。今回の測定では FEL の発振が不安定であることから、FEL パワーの時間発展を増幅モデルによって近似することで増幅率を評価した。結果として、増幅回数が 40 回前後まで約 30%で増幅した後