

## MEASUREMENT OF SYNCHROTRON DAMPING TIME WITH STORAGE RING FREE ELECTRON LASERS

Norihiro Sei, Kawakatsu Yamada, and Hiroshi Ogawa

Research Institute of Instrumentation Frontier, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,  
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

### Abstract

We have developed a measurement method of synchrotron damping time with storage ring free electron lasers. The synchrotron damping time of the electron bunch was evaluated by applying the evolution of the energy spread to an expression based on the one-dimensional theory of bunch heating. The synchrotron damping time evaluated at five electron-beam currents was in accord with that calculated by computer simulation.

## 蓄積リングFELを用いたシンクロトロンダンピング時間測定

### 1. はじめに

蓄積リングFELでは、ミリ秒程度のスケールで周期的なマクロパルス発振をすることが観測されている。<sup>[1,2]</sup> 周期的な発振には二つのタイプがあり、その一つは、外的な要因により電子ビームもしくは光共振器が周期的に揺らぐことによる。この現象は本質的にQスイッチと同等であり、発振の周期は揺らぎの周期に依存しており、比較的長い周期で現れる。もう一つのタイプは、電子バンチと光共振器内の光パルスとの微小なディチューニングによるもので、シンクロトロンダンピング時間よりも著しく短い周期で現れるという特徴がある。この自然発生的なマクロパルスについては研究が進められており、発振が平衡へ収斂する場合には、一次元のバンチ加熱理論で記述できることが知られている。<sup>[3]</sup> しかし実際のマクロパルス発振は平衡には達せず、周期的に繰り返すため、良く知られている表式は不十分であった。

そこで我々は、近似の精度を上げることで周期解に対応できるようにその式を修正し、FEL強度の時間発展についてバンチ加熱理論に基づいて行ったシミュレーションの結果を良く記述できる表式を与えた。<sup>[4]</sup> 一般に、安定な発振よりも周期的な発振の方が、発振プロセスに係わる物理情報を引き出せることを期待できる。修正された表式を利用すれば、マクロパルス発振時のシンクロトロンダンピング時間やFEL利得と共振器損失のずれを導出できることがわかった。

<sup>[5]</sup> ここでは、まず一次元バンチ加熱理論に基づいたFEL利得と電子バンチのエネルギー拡がりの表式について概説し、FELのマクロパルス発振時に測定したバンチ長の時間発展を基に評価したシンクロトロンダンピング時間がシミュレーションにより計算した値と一致していることを示す。この結果は、蓄積リングFEL発振中のシンクロトロンダンピング時間測定が可能であるこ

とを示すであろう。

### 2. 蓄積リングFELマクロパルスの時間発展理論

蓄積リングFELのマクロパルスの時間発展は、一次元のバンチ加熱理論によって良く記述できることが知られている。この理論では、FELが電子バンチの内部構造に与える影響については無視しており、FEL強度に応じて電子バンチのエネルギー拡がりが増加するとみている。一方でエネルギー拡がり $s_y$ は放射ダンピングにより回復する。そこで、エネルギー拡がりに対し、FEL強度 $I_F$ を用いて次の微分方程式が成立する。

$$\frac{ds_y^2}{dt} = -\frac{2}{t_s}(s_y^2 - s_g^2) + \frac{a_s}{T_0} I_F, \quad (1)$$

ここに $\tau_s$ はシンクロトロンダンピング時間、 $T_0$ は電子バンチの周回時間、 $a_s$ はFELの飽和条件によって与えられる定数を表している。添字の $i$ は増幅が始まる以前の状態を表現している。実は、FELが電子バンチの内部構造に影響を与える時は、 $\tau_s$ は変化すると考えられる。<sup>[5]</sup> しかし、ここでは内部構造の変化は無視しているため、 $\tau_s$ は一定として良い。FELマクロパルス強度の時間発展は、FEL利得 $G$ の時間発展によって与えられる。

$$\frac{dI_F}{dt} = \frac{[G - l_c]}{T_0} I_F + I_s, \quad (2)$$

ここで $I_s$ は自発放出光の強度を、 $l_c$ は共振器損失を意味している。FEL利得 $G$ は発振前の初期値 $G_i$ を用いて、エネルギー拡がりの依存性を顕わにすることができる。従って、式(1)と(2)は $s_y$ と $I_F$ についての連立微分方程式であり、これらを解くことによってFELの時間発展を記述できる。

FEL発振が周期構造を持つ場合について考察す

る。この場合、エネルギー拡がりは、その平衡値と周期的な変動部に分けることができる。

$$S_g = S_{g,e} + \Delta S_g, (3)$$

添字eはFEL発振の平衡状態を表している。ここで、 $\Delta\sigma_\gamma \ll \sigma_{\gamma,c}$ であることを仮定する。実際に、 $T_0 \ll \tau_s$ である通常の蓄積リングFELでは、この仮定は正しい。この関係式を式(1)と(2)に適用し、時間について一次までの近似を行えば、 $\Delta\sigma_\gamma$ について次式が与えられる。<sup>[4]</sup>

$$\Delta S_g = S_1 \tanh(w_t t) - \frac{S_{g,e}}{a_g} g_0 - S_2 t, (4)$$

ここに $S_1$ と $S_2$ は正の係数で、 $w_t$ はFELの立ち上がり時間に関する変数である。 $a_g$ は挿入光源のパラメータと $\sigma_{\gamma,c}$ で与えられる定数、 $g_0$ は共振器損失と平均的なFEL利得との相対的な差を意味しており1よりもはるかに小さい値である。 $I_{f,c}$ で規格化したFEL強度 $I_N$ は、

$$I_N = \frac{I_1}{\cosh^2(w_t t)} + I_2, (5)$$

と表現できる。ここに $I_1$ と $I_2$ は正の係数である。式(4)と(5)において係数の $S_2$ 及び $I_2$ 項は周期性を表現するための付加項である。導出過程は割愛するが、式(3)と(4)及び(5)を式(1)に代入すると、各係数間に次の近似式が得られる。<sup>[4]</sup>

$$S_1 w_t = \frac{S_g^2 - S_g^2}{S_g t_s} I_1, (6)$$

$$S_2 = \frac{S_g^2 - S_g^2}{S_g t_s} (1 - I_2), (7)$$

式(4)を利用すると、エネルギー拡がりの微分から次式を得ることができる。

$$\frac{d}{dt} \Delta S_g \Big|_{t=0} = S_1 w_t - S_2, (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} \frac{d}{dt} \Delta S_g = -S_2, (9)$$

実際の実験では、周期的なエネルギー拡がりの変動に対して無限遠の時間での値を得ることはできない。しかし、NIJI-IVのFELについて計算したシミュレーションによると、十分に強い発振に対しては、周期の境界点との差は無視して良いことがわかっている。従って、実験により式(8)及び(9)の値を求め、シミュレーションから計算できる $I_2$ の値を利用すれば、式(6)よりシンクロトロンダンピング時間を測定できることになる。<sup>[5]</sup>

### 3. 電子バンチ長測定

FEL発振時の電子バンチのエネルギー拡がりは、電子バンチ長の時間発展を測定することで求め

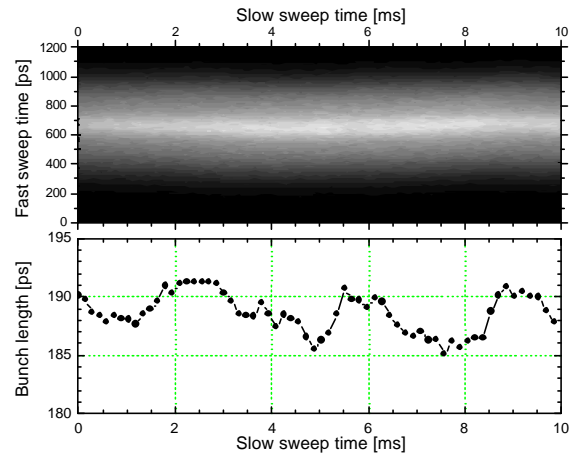


図1 NIJI-IV FELがマクロパルスモード発振している時のバンチ長の時間発展。蓄積電流値は21.4mAである。

ることができる。電子バンチ長測定は、電子ビームエネルギーが310MeVで、波長300nmのFELがマクロパルスモードで発振している時に測定された。測定時の電子ビーム電流は15.8-24.8mAであり、電子バンチ長は107-134psであった。この時の名目上の最大FEL利得は4.4-4.6%であり、発振の閾電流値から評価した共振器損失は2.0%であった。バンチ長測定には時間分解能2psの2軸掃引ストリークカメラを使用した。マクロパルスの時間発展を捉えるために、遅い掃引時間は10msとしたが、この時間軸の分解能は約0.1msであった。バンチ長測定に使用された偏向磁石からの放射光は、発光点から約9mの距離を大気中で輸送され、ストリークカメラの10cm前に設置された集束レンズで集光される。レンズの収差を無視できるように、中心波長300nmで半値幅10nmのバンドパスフィルターを輸送路に使用している。

蓄積リングFELがマクロパルスモードで発振している場合には、電子バンチ長にも周期的な変動が観測される。図1は蓄積電流が21.4mAの時に観測された典型的なバンチ長の時間発展である。NIJI-IV電子ビームには電源ノイズに起因する100Hzの縦方向の振動があるために、マクロパルスの強度が揃っていない。その影響で、図1が示すように、バンチ長の変動にも振幅や周期に変調が生じている。バンチ長 $s_t$ とエネルギー拡がりの関係は光クライストロンの自発放射光スペクトルを使用して実測されており、FEL発振時のエネルギー拡がりは次式を用いて評価できる。<sup>[6]</sup>

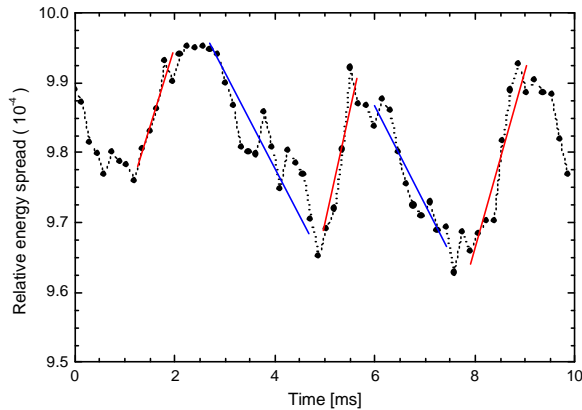


図2 図1から評価した電子バンチのエネルギー拡がりの時間発展。

$$s_{g,e} = s_{g,i} \left[ \frac{s_{l,e}}{s_{l,i}} \right]^{1-d}, \quad (10)$$

指数に含まれている定数 $\delta$ は-0.06であった。図2はこの関係式を用いて評価したエネルギー拡がりの時間発展である。エネルギー拡がりの平衡値は、マクロパルスモードで測定したエネルギー拡がりの値と比較すると、因子 $g_0$ に起因するある微量だけ大きくなる。先に述べたシミュレーションによると、その差は1%程度と評価できるので、平衡値はその分を補正して利用する。<sup>[5]</sup>

#### 4. シンクロトロンダンピング時間の評価

図2で得られたようなFEL発振時のエネルギー拡がりの時間発展に対し、変曲点の傾きを計算することで、シンクロトロンダンピング時間を評価できる。NIJI-IV FELでは、100Hzの電子ビーム振動に起因する変調がエネルギー拡がりにも観測されているので、変曲点におけるエネルギー拡がりの傾きを求める時には、データを平均化して使用する必要がある。幾つかの電流値において測定したエネルギー拡がりの時間発展から評価したシンクロトロンダンピング時間を図3に示す。エネルギー拡がりの傾きの評価には、フィッティングに比較的大きな誤差を含むため、誤差範囲は $\pm 10\%$ 以上に及んだ。しかしながら、各電流値におけるシンクロトロンダンピング時間の評価値は、TRACY2<sup>[7]</sup>を用いたコンピュータシミュレーションによる値である40.3msと矛盾がない。この一致は、蓄積リングFELのマクロパルスモード発振を利用した新しいシンクロトロンダンピング時間評価が可能であることを明示している。

図3で示されている破線は、ビーム電流値に

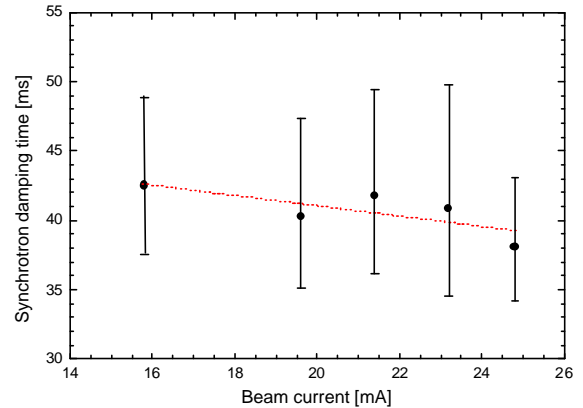


図3 評価したシンクロトロンダンピング時間の電流依存性。

対して、評価したシンクロトロンダンピング時間の移動重心を線形近似で表現したものである。40ms付近でほとんど変化はないのだが、ビーム電流が増大するほど、シンクロトロンダンピング時間が短くなる傾向があるようにも見える。今回観測した電流域では、FEL利得にはあまり変化はなく、FEL強度は電流値にほぼ比例していると考えられる。実際に、シンクロトロンダンピング時間が変動することがあるのか、またその変動にFEL発振が関与しているのかについては、さらに詳細な実験が必要である。<sup>[5]</sup>

#### 5. まとめ

蓄積リングFELがマクロパルスモード発振を行う時のFELと電子ビームの時間発展を記述する近似式を導出し、電子ビームパラメータを計測できることを発見した。その関係式を用いて実験データからシンクロトロンダンピング時間を評価し、シミュレーションと一致していることを示した。こうして、蓄積リングFELのマクロパルスモード発振を利用したシンクロトロンダンピング時間の評価法を確立した。実験結果はFEL発振がダンピング時間の変化に影響する可能性を示唆しており、さらなる研究を予定している。

## 参考文献

- [1] M. Billardon *et al.*: Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 1652.
- [2] K. Yamada *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. A **483** (2002) 162.
- [3] P. Elleaume: J. Physique. **45** (1984) 997.
- [4] N. Sei *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) 577.
- [5] N. Sei *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 074501.
- [6] N. Sei *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 5848.
- [7] Rewritten from TRACY by J. Bengson. For original reference, see H. Nishimura: LBL Report 25236 ESG-4, 1988.