

# SACLA におけるコヒーレント遷移放射光を利用したマイクロバンチング不安定性の特性評価

## EVALUATION OF MICROBUNCHING INSTABILITY USING COHERENT OPTICAL TRANSITION RADIATION AT SACLA

渡川和晃<sup>#,A)</sup>, 原徹<sup>A)</sup>, 田中均<sup>A)</sup>, 松原伸一<sup>B)</sup>

Kazuaki Togawa<sup>#,A)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>A)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> JASRI

### Abstract

The x-ray free electron laser facility, SACLA, makes a high-density electron bunch with a peak current of more than 3 kA using three magnetic bunch compressors. At the final bunch compressor, microbunches with a longitudinal scale of visible light wavelength grow rapidly in the bunch. Since it generates extremely strong coherent optical transition radiation (COTR) when the bunch hits a screen, it introduces difficulties in measuring the precise beam profile. Generation of the COTR is one of the microbunching instability phenomena, and it is very important to make clear the mechanism of microbunch generation. In order to evaluate the properties of the microbunch, the experiment to wash out the microbunches using a quadrupole magnet was conducted. The quadrupole magnet was located at the dispersive point of the final bunch compressor. The microbunches smear by the quadrupole field since the path lengths in the bunch compressor change for different horizontal positions and angles. In the experiment, the intensity of COTR decreased with increasing the quadrupole field as we expected. The smearing length estimated theoretically agreed with the wavelength of the COTR. In this paper, evaluation of microbunching instability using COTR at SACLA is described.

### 1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA<sup>[1]</sup>では、XFEL 光を生成する為に、複数の電子バンチ圧縮装置を使ってピーク電流が 3 kA 以上の高密度電子ビームを作り出している<sup>[2]</sup>。SACLA では、最終バンチ圧縮の段階でバンチの内部に可視光波長程度の密度変調（マイクロバンチ）が急成長し、これが原因でビームプロファイル測定の際に強力なコヒーレント遷移放射光（COTR）が発生して、正確なプロファイル測定に困難をもたらしている。COTR の発生はマイクロバンチ

ング不安定性現象の一部であるが、マイクロバンチの発生機構を物理的に解明することは非常に重要で、世界的にも精力的に研究がなされている<sup>[3]</sup>。今回、このマイクロバンチの特性を評価する為に、四極電磁石を使ってマイクロバンチを消滅させる実験を行った。本稿では、SACLA における COTR を利用したマイクロバンチング不安定性の特性評価について報告する。

### 2. SACLA における COTR の発生状況

SACLA 加速器におけるバンチ圧縮システムの概要を Figure 1 に示す。低エネルギーの入射器では、

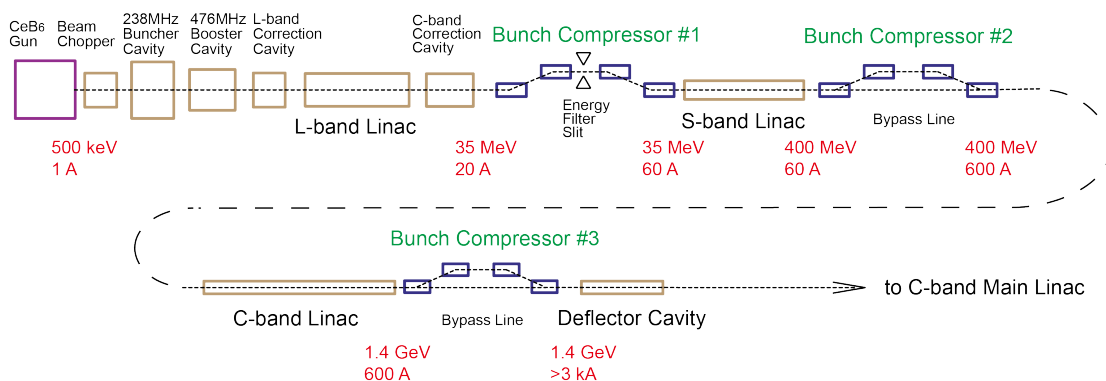


Figure 1: Bunch compression system of the SACLA.

<sup>#</sup> togawa@spring8.or.jp

電子銃で発生したピーク電流 1 A のナノ秒パルスを速度変調バンチングによって数十ピコ秒まで圧縮する。その後、3 台の磁気シケイン型バンチ圧縮器を使ってビームを加速しながら徐々にバンチを圧縮し、最終的にエネルギー 1.4 GeV、ピーク電流 3 kA 以上の高密度バンチを作り出し、C-band 主加速器に入射する。

SACLA における COTR 発生の特徴は以下の通りである。エネルギーが 400 MeV の第 2 バンチ圧縮器入口までは COTR は全く発生しない。第 2 バンチ圧縮器を通過した後は、圧縮パラメータによって COTR が発生する場合もあるが、強度は非常に微弱である。COTR の強度が急激に増加するのが第 3 バンチ圧縮器である。第 3 バンチ圧縮器前後の OTR スクリーンモニタの画像を Figure 2 に示す。入口では正確なビームプロファイルが測定できているが、出口では、大強度の COTR によって CCD カメラが完全に飽和してしまっている様子がわかる。Table 1 に SACLA における COTR 発生状況をまとめる。

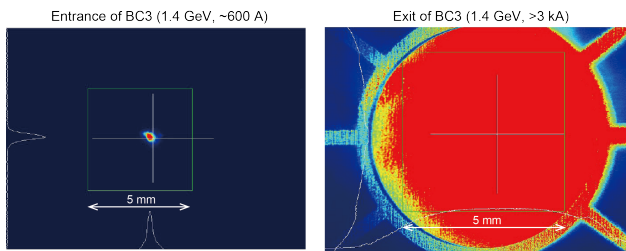


Figure 2: OTR images at the entrance and exit of the third bunch compressor.

Table 1: COTR status at SACLA.

	After BC1	After BC2	After BC3
Beam Energy	35-400 MeV	400 MeV-1.4 GeV	1.4-8 GeV
Peak Current (Bunch Length)	~60 A (~2 ps)	~600 A (~200 fs)	>3 kA (30-70 fs)
COTR Status	No COTR	No COTR or Sometimes Weak	Strong COTR

さて、SACLA のプロトタイプ機である SCSS 試験加速器（エネルギー 250 MeV、ピーク電流 300-700 A）では、通常の運転パラメータで COTR は発生しない。SCSS 試験加速器のビームパラメータは、SACLA の第 1 バンチ圧縮器と第 2 バンチ圧縮器の間に相当するため、これらの実験事実は矛盾していない。

### 3. SACLA における COTR の特性

COTR の特性評価として、まず、COTR 発光のゲインを測定した。ゲインは、マイクロバンチが形成されていない同じ電荷量のバンチから発生するインコヒーレントな OTR の発光量に対する、COTR の発光量で定義する。測定は、エネルギー 3.4 GeV の

地点の OTR モニタを用いた。インコヒーレントな OTR の発光量は、第 2、第 3 バンチ圧縮器をバイパスした長いバンチを使用して測定した。結果、ゲインは 6100 であり、相当強力な COTR が発生していることが定量的にわかった。

次に、COTR のスペクトルを測定した。測定は第 3 バンチ圧縮器の出口で行った。分光器にはグリズムを使用し、広帯域のスペクトルを測定するために、COTR の輸送ミラーにはアルミを使用した。測定結果を Figure 3 に示す。長波長側はグリズムの分光帯域で制限されているが、短波長側は発光スペクトルをカバーしており、短波長のエッジが約 400 nm であることがわかる。また、スペクトル全体に渡ってスパイクが存在しているが、これはバンチ内部にマイクロバンチが形成されていることの証拠である。

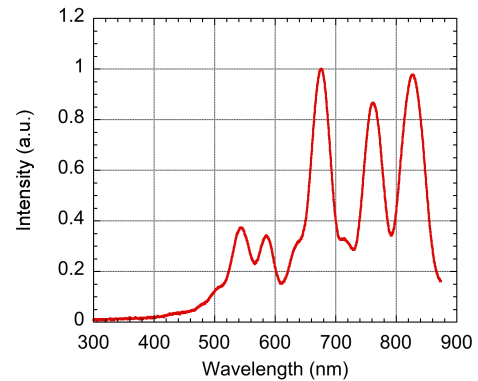


Figure 3: Spectrum of the COTR.

### 4. 四極電磁石による COTR の消滅実験

SACLA におけるマイクロバンチは第 3 バンチ圧縮器で急成長するのであるが、このマイクロバンチを四極電磁石によって消滅させる実験を行った。四極電磁石は、第 3 バンチ圧縮器の分散部（軌道がオフセットした直線部）に設置しているものを使用した（Figure 4）。この四極電磁石の励磁によってビームエンベロープが変化するのであるが、C-band 主加速器のエンベロープが変化しないように、第 3 バンチ圧縮器と C-band 主加速器の間に設置している複数の四極電磁石の強度を調整した。COTR の強度はエネルギー 3.4 GeV の地点に設置している OTR モニタを使用した。四極電磁石の励磁電流に対する COTR の強度を Figure 5 に示す。分散部の四極電磁石の強度を強めることで COTR の発光強度が減少し、最大励磁電流（磁場積分 0.123 T）において 10 分の 1 から 100 分の 1 まで減衰していることがわかる。

この COTR 強度の減衰は、電子ビームの水平方向の空間広がり、発散角の広がり、エネルギー偏差の広がりに応じてバンチ圧縮器の飛行距離が変化することに起因する。即ち、バンチスライスが滲むことによって、マイクロバンチが拡散消滅すると考えられる。これを理論的に理解するために、四極電磁石によるバンチ圧縮器の飛行距離の変化を幾何学的

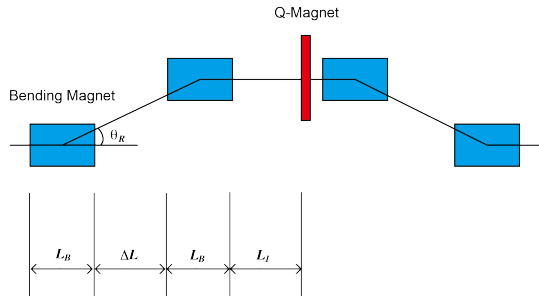


Figure 4: Layout of the third bunch compressor.

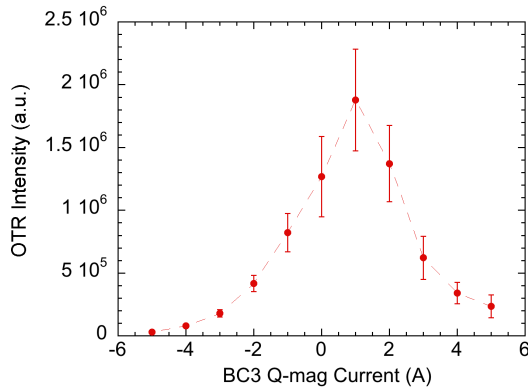


Figure 5: Variation of COTR intensity as a function of the quadrupole magnet strength.

に計算した<sup>[4]</sup>。第3バンチ圧縮器入口の水平位置を  $x$ 、水平角度を  $x'$ 、エネルギー偏差を  $\delta$  とすると、バンチ圧縮器出口における基準粒子に対する進行方向座標の変化  $\Delta z$  は、

$$\Delta z = R_{51}x + R_{52}x' + R_{56}\delta \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R_{51} &\approx -\theta_R(L_B + \Delta L)A \\ R_{52} &\approx -\theta_R(L_B + \Delta L)(L_1 + \Delta L - 2L_B)A \\ R_{56} &\approx -2\theta_R^2\left(\frac{2}{3}L_B + \Delta L\right) + \theta_R^2(L_B + \Delta L)^2A \\ A &= -\int Kdz = -\frac{1}{B\rho} \int \frac{\partial B_y}{\partial x} dz \end{aligned}$$

と表される。第3バンチ圧縮器の幾何形状パラメータの定義は Figure 4 に示した通りである。また、 $A$  は四極電磁石の  $K$  値の積分である。パラメータの具体的な数値としては、

$$\begin{aligned} \theta_R &= 2.46 \times 10^{-2} \text{ rad} \\ L_B &= 0.4 \text{ m} \\ \Delta L &= 5.9 \text{ m} \\ L_1 &= 2.1 \text{ m} \\ A &= -0.0265 \text{ m}^{-1} \text{ (最大励磁時)} \\ R_{51} &= 4.11 \times 10^{-3} \\ R_{52} &= 2.94 \times 10^{-2} \text{ m} \\ R_{56} &= -8.10 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

である。

さて、進行方向座標の平均的な拡散量は次式で与えられると考えられる。

$$\langle \Delta z \rangle \approx |R_{51}\sigma_x| + |R_{52}\sigma_{x'}| + |R_{56}\sigma_\delta| \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_{x'}$ 、 $\sigma_\delta$  は第3バンチ圧縮器入口の水平位置、水平角度、エネルギー偏差の平均的な広がり（標準偏差）を表す量である。 $\sigma_x$  と  $\sigma_{x'}$  については、ビームシミュレーションで得られた設計値を用い、バンチスライスエネルギー広がりを 1 keV と仮定すると、

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 1.35 \times 10^{-4} \text{ m} \\ \sigma_{x'} &= 2.70 \times 10^{-6} \text{ rad} \\ \sigma_\delta &= 7.10 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

であるので、これらを式(2)に代入すると、

$$\langle \Delta z \rangle \approx 640 \text{ nm}$$

となる。この値は、Figure 3 に示される COTR 光の波長とかなりの精度で一致している。

## 5. まとめ

今回、SACLA において COTR 発生の原因となっているマイクロバンチの特性を評価する為に、COTR の発光ゲイン測定とスペクトル測定を行った。さらに、四極電磁石によってマイクロバンチを消滅させる実験を行い、四極電磁石の励磁量に応じて COTR の強度が減衰することを確認した。理論計算で得られた四極電磁石によるマイクロバンチの平均的な拡散距離が COTR の波長と一致することから、SACLA の電子ビーム内に可視光波長スケールのマイクロバンチが形成されていることは確実であると考えられる。

さて、マイクロバンチは、電子ビームの shot noise が種となり、空間電荷によるエネルギー変調が分散部において密度変調に変換されて増幅するといった説明が主流となっている。SACLA では、強力な COTR が第3バンチ圧縮器で発生するのであるが、これはマイクロバンチが第3バンチ圧縮器において急成長していることを示唆するものである。しかし、SACLA におけるマイクロバンチの発生メカニズムについてはまだ明確になっていない。これを明らかにすることが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] T. Ishikawa, et al., "A Compact X-ray Free-electron Laser Emitting in the Sub-angstrom Region", Nature Photonics 6, 2012, pp. 540-544.
- [2] K. Togawa et al., "Electron-bunch Compression Using a Dynamical Nonlinearity Correction for a Compact X-ray Free-electron Laser", Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 2009, 080706
- [3] 5th Microbunching Instability Workshop, May 2013, PAL, Korea, <http://pal.postech.ac.kr/ubi2013/>
- [4] D. Ratner, et al., "Three-dimensional Analysis of Longitudinal Space Charge Microbunching Starting from Shot Noise", Proceedings of FEL08, Gyeongju, Korea, 2008, pp. 338-341.