

[F16p31]

## MEASUREMENTS OF THE COHERENT RADIATION FROM AN ELECTRON BUNCH AND THE EVALUATION OF THE SHAPE OF THE BUNCH

S. Okuda, K. Yokoyama, M. Nakamura, R. Kato and T. Takahashi\*

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University  
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

\*Research Reactor Institute, Kyoto University, Kumatori, Sennan, Osaka 590-0494, Japan

### ABSTRACT

Study was made for the coherent radiation from the multibunch electron beam. The spectrum of the coherent synchrotron radiation from the beam was measured at wavelengths of 1 to 2 mm. At 1 mm the intensity of radiation is  $6 \times 10^5$  times that of the incoherent radiation. The intensity nearly agreed with that obtained by calculation for the triangular shape of the bunch. The intensity of spontaneous emission at a wavelength of 40  $\mu\text{m}$  from the multibunch beam passing through a wiggler was also measured. For the charge of electrons in a bunch above 0.39 nC the radiation was enhanced from the incoherent spontaneous emission. The intensity in the enhanced part was approximately proportional to the square of the charge per bunch, which was attributed to the coherence effects.

### 電子バンチからのコヒーレント放射の計測とバンチ波形の評価

#### 1. はじめに

高エネルギーの電子バンチからの放射過程において、バンチ長と同程度かより長い波長（サブミリからミリ波領域）で著しく強度が増加するコヒーレント放射が観測される。われわれはこれまで、産研38 MeV Lバンド電子ライナック[1]からの高強度単バンチビームを用い、コヒーレント放射の計測と新しい光源の確立のための開発研究を行ってきた[2]。コヒーレント放射の測定は、電子バンチの形状を評価する新しい計測手段として期待されており、この基礎研究も行った[3]。また産研では、遠赤外自由電子レーザー (Free-Electron Laser, FEL) の研究を行っているが[4]、増幅過程におけるコヒーレント放射の役割は重要である。

本研究では、マルチバンチビームのバンチ形状に関する情報を得るために、偏向磁石からのコヒーレントシンクロトロン放射のスペクトルを測定した。またこのビームを用いてウィグラーからの自発放射の強度を測定し、コヒーレント放射の強度の評価を行った。

#### 2. コヒーレントな放射とバンチ形状

電子バンチから連続スペクトルを持って放射が観測される種々の過程において、コヒーレントな放射を含む全放射強度は、比較的単純なモデルにより次式のように表される。

$$P(\lambda) = p(\lambda) N [1 + (N-1)f(\lambda)] \quad (1)$$

ここで $\lambda$ は放射の波長、 $p(\lambda)$ は1個の電子からのインコヒーレントな放射の強度、 $N$ はバンチ内の電子の個数である。また $f(\lambda)$ はバンチ形状因子と呼ばれ、次式で表される。

$$f(\lambda) = \left| \int S(x) \exp i(2\pi x/\lambda) dx \right|^2 \quad (2)$$

ここで $x$ は電子ビームの軸上の距離、 $S(x)$ は規格化された電子の密度分布である。

(1)式より、十分短い波長で $f(\lambda) \sim 0$ となるインコヒーレントな放射に対し、1に近い値を持つミリ波領域では、全放射がコヒーレントになり、前者の $N$ 倍の強度となる。例えば産研ライナックの単バンチビームでは、 $N$ は最大 $5 \times 10^{11}$ である。中間的な波長でのコヒーレント放射の強度は $f(\lambda)$ の値で決まるが、これは(2)式により、バンチの形状に依存する。このことから、 $P(\lambda)$ が電子のバンチ形状の情報を与えることがわかる。ただしバンチ形状を求めるには、各波長における光の位相の情報が必要である。電子ライナックでは、三角形に近いバンチ形状が観測されており、放射のスペクトルの短波長成分が比較的強くなることが予想される。

#### 3. 電子ビームのバンチ形状の評価

本実験において使用したウィグラーおよび電子

ビームの条件を表1に示す。波長40  $\mu\text{m}$ でのFELの発振実験に用いるビーム条件である。このビームを加速管からまっすぐに輸送してビーム窓から取り出し、空気中を通過する際に放射されるチェレンコフ光をストリークカメラで測定した。測定の時間分解能は約5 psである。バンチ列の内の1個の

表1 本実験におけるウィグラーとマルチバンチ電子ビームの条件

<u>Wiggler</u>	
Magnet	Nd-Fe-B
Length	1920 mm
Period	60 mm
<u>Electron Beam</u>	
Energy	17 MeV
Micropulse Spacing	9.2 ns
Charge/Micropulse	2 nC
Peak Current/Micropulse	50 A
Micropulse Length	30 - 40 ps
Macropulse Length	1.8 $\mu\text{s}$
Energy Spread	1.8%

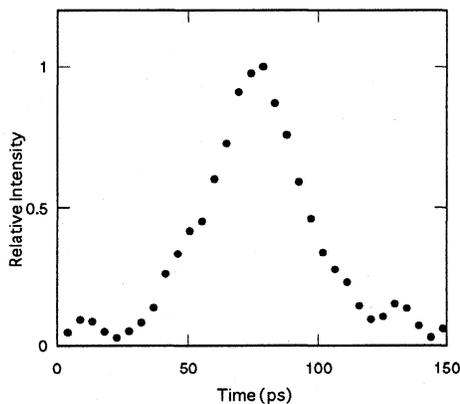


図1 マルチバンチビーム内のマイクロバンチ形状のストリーク測定の結果

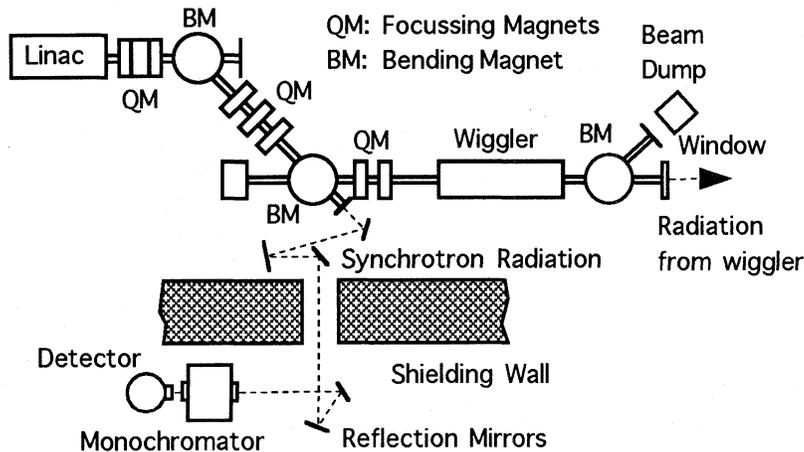


図2 コヒーレント放射の測定配置

バンチについて得られた結果を図1に示す。この図から、バンチの時間幅は約40 ps (FWHM)であることがわかる。バンチ形状は三角形に近い。このような形状は、電子ライナックにおけるバンチの圧縮過程の計算によっても得られている。

本研究におけるコヒーレント放射測定のための実験配置を図2に示す。偏向磁石からのシンクロトロン放射を加速器室外に導き、そのスペクトルを測定した。分光器には回折格子を用い、光検出器として、液体ヘリウム冷却シリコンボロメータを用いた。上流の偏向磁石からの放射の影響は、観測強度の1%以下と推定される。また電子のエネルギー広がり起因した偏向によるバンチ内電子の相対位置の変化は、5 ps以下と推定される。

得られた放射のスペクトルを図3に示す。放射強度は、計算によって得られるインコヒーレントな放射に比べ著しく高い。破線および点線は、それぞれ半値幅40 psのガウス分布および三角形のバンチ形状に対するコヒーレント放射のスペクトルの計算結果である。バンチの半値幅は12 mmで、観測波長はそれより約1桁短い。三角形のようにバンチ形状に先鋭な部分があると、スペクトルは短波長側に伸びる。実験結果は点線の結果に近く、これはストリークカメラによる計測結果とも一致する。より広い波長範囲での計測が課題である。

また産研では、サブピコ秒の単一電子バンチの発生研究を行っているが、この形状を評価するため、コヒーレント遷移放射の測定を行っている。

#### 4. ウィグラーからのコヒーレント放射の測定

ウィグラーを1回通過したマルチバンチビームからの自発放射の強度の測定を行った。図2に示すように、FEL輸送系の下流側の共振器鏡を除き、マルチバンチ電子ビームからの放射を加速器室外に導いて、その強度を測定した。ビームの条件は表1に示したものと同一で、バンチ当りの電荷量を0.04~3.4 nCの範囲で変化させた。電荷量0.09 nC以下では、

ライナックのサブハーモニックプリバンチャーを動作させないマルチバンチビームを利用した。より大きい電荷量では、それらを動作させた。光取りだし窓 (KRS-5) のウィグラーの中心からの立体角は、 $10^{-5}$  srである。光検出器として、液体ヘリウム冷却Ge:Be検出器を用いた。光強度は、窓や光輸送路の損失を補正して得られた。この結果を図4に示す。

電荷量0.25 nC以下では、計算によって得られたインコヒーレントな自発放射の強度 (実線) と一致した。この強度は電荷に比例して増加する。それ以上の電荷量では、実線

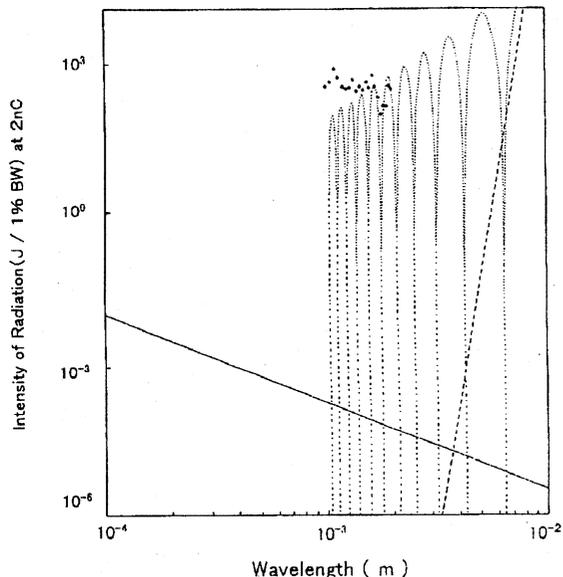


図3 バンチ当りの電荷2 nCのマルチバンチビームからのコヒーレントシンクロトロン放射のスペクトルの測定結果 (実線はインコヒーレントな放射の計算結果、破線と点線はそれぞれ半値幅40 psのガウス分布および三角形の分布を仮定したスペクトルの計算結果)

を上まわる放射強度が観測された。この放射強度のうちコヒーレント放射の成分を求めるために、(1)式に基づき、全放射強度から実線で表される光の強度を差し引いたものが三角で表された点である。これらは破線で示すように、ほぼ電荷量の2乗に比例して増加する。この依存性は、(1)式で示されるように、コヒーレント放射の性質と一致する。電荷量を変えた場合、バンチ形状は必ずしも一定ではない。本実験では、エネルギー広がり最小となるようにビーム調整を行ったが、この条件ではマイクロ波上の加速位相がほぼ同じとなり、バンチ形状が電荷量によらず大きく変化しなかったと推定される。図3では、短波長側へのスペクトルの伸びが観測された。図4で観測されるコヒーレント放射は、三角形に近いバンチ形状によるものと推定される。

## 5. まとめ

産研ライナックからのマルチバンチ電子ビームからのコヒーレントシンクロトロン放射のスペクトルを測定することにより、バンチ形状に関する情報が得られた。これはストリークカメラによる結果と定性的に一致した。また同じマルチバンチビームによるウィグラー1回通過による自発放射光の測定においてコヒーレント放射が観測された。

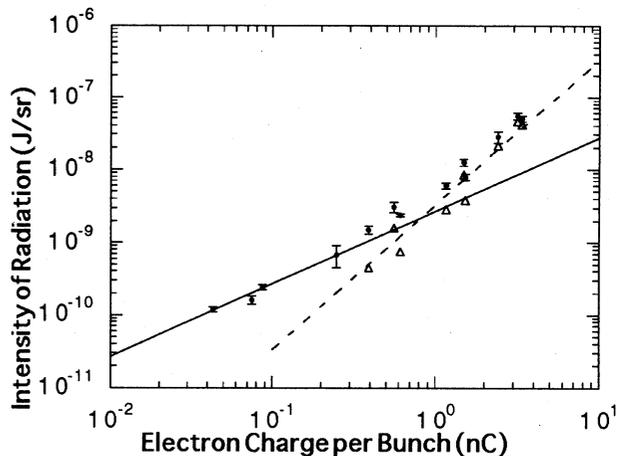


図4 ウィグラーからの自発放射の1個の電子バンチ当りの強度 (黒丸)、インコヒーレントな放射の強度の計算結果 (実線)、(1)式に基づいて計算したコヒーレント放射の強度 (三角)、および電荷に対する2乗依存性 (破線)

## 参考文献

- [1] S. Okuda, Y. Honda, N. Kimura, J. Ohkuma, T. Yamamoto, S. Suemine, T. Okada, S. Takeda, K. Tsumori and T. Hori, Nucl. Instr. and Meth. A358 (1995) 248.
- [2] K. Yokoyama, Y. Miyauchi, S. Okuda, R. Kato and T. Takahashi, Proc. 20th Linear Accelerator Meeting (1997) 290.
- [3] Y. Shibata, T. Takahashi, T. Kanai, K. Ishi, M. Ikezawa, J. Ohkuma, S. Okuda and T. Okada, Phys. Rev. E 50 (1994) 1479.
- [4] R. Kato, S. Okuda, Y. Nakajima, G. Kondo, Y. Iwase, H. Kobayashi and G. Isoyama, Nucl. Instr. and Meth. A (in press).