

# ウェーク場の測定とバンチ圧縮に関する研究

井合 哲也<sup>1</sup>、猪坂 智、大西 徹、古川 真一、  
加藤 龍好、磯山 悟朗  
大阪大学産業科学研究所  
〒567-0047 大阪茨木市美穂ヶ丘 8-1

## 概要

我々は阪大産研 L バンドライナックを用いて、単一通過型自由電子レーザー (Self-Amplified Spontaneous Emission : SASE) の研究開発を行っている。<sup>[1]</sup>SASE に利用する電子ビームは電荷量が最大 91nC という大強度シングルバンチであり、これが加速管内を通過するときに誘起されるウェーク場 (wakefield) の影響は無視できない。ウェーク場はバンチ形状と電荷量に依存し、加速 RF 電場を歪め、電子バンチのエネルギースペクトルに大きな影響を及ぼす。二つの異なる RF 位相に乗ったビームのエネルギースペクトルから、加速管内に誘起されているウェーク場とバンチの電荷分布を推定する方法が SLAC の研究者によって提案されている。<sup>[2]</sup>この理論を産研 L バンドライナックに応用する事を試みる。また、実際に電子バンチの加速位相を変えながらエネルギースペクトル、バンチ長を測定した結果を報告する。

## 1. はじめに

加速管通過後の電子バンチの最終エネルギーは、RF 電圧、バンチ長及びウェーク場によって決まる。もし電子バンチの加速位相が RF の波頭から十分離れており、なおかつウェーク場が無視できるほど小さければ、バンチ内の位置と最終エネルギーの間には 1 対 1 の関係が成り立つ。この場合、エネルギースペクトルを一度だけ測定することにより中心軸方向の電荷分布を知ることができる。一方ウェーク場が無視できない場合は、十分に離れた 2 つの位相でエネルギースペクトルを測定することにより、バンチの電荷分布とウェーク場の両方を再現することができる。ただし、産研 L バンドライナックはシングルバンチ運転時のバンチ当たり電荷量が最大 91 nC

と極めて大きいため、この理論をそのまま応用できるかどうかについては検討が必要である。また、加速管入射前の SHPB 等の調整によるバンチ形状の操作と加速管入射後の RF 位相の選択により、バンチ長の圧縮に適したエネルギースペクトルを作り出すことができる。この試みは以前にも為されているが<sup>[3]</sup>、ここではこの理論を用いて、より効率的にバンチ圧縮を行う方法を研究する。本論文ではその理論の紹介と、解析の前段階として行ったエネルギースペクトルとバンチ長の測定結果についての報告を行う。

## 2. 理論

電子が加速管を通過する場合を考える。電子バンチ中心の RF 波頭に相対的な位相を  $\phi = 0$  とする。このときの、RF による電子の最大エネルギーゲイン (RF の振幅) を  $E_a$  とする。  $\phi$  が負となる方向が、バンチの前方である。また加速管通過前の初期エネルギー  $E_0$  は通過後の平均エネルギー  $E_f$  に対して  $E_f / E_0 \gg 1$  という条件を満たし、バンチ内における  $E_0$  の変動は無視できるものとする。電子バンチ内の位置とエネルギーの座標を  $(z, \delta(z))$  とする。  $E_f$  で規格化した相対的なエネルギースペクトル  $\delta(z)$  は次の式で表される。

$$\delta(z) = \frac{[E_0 + E_a \cos(k_{rf}z + \phi) + eV_{ind}(z)]}{E_f} - 1, \quad (1)$$

ここで  $k_{rf}$  は RF の波数である。またバンチ中心の位置を  $Z = 0$  とする。  $V_{ind}(z)$  は加速管を通過する電子バンチによって誘起される電圧 (ウェーク場) で、次式で表される。

$$V_{ind}(z) = -eN \int_0^{\infty} W_z(z') \lambda_z(z-z') dz', \quad (2)$$

$W_z(z)$  はウェークポテンシャル、  $\lambda_z(z)$  は規格化された

<sup>1</sup> E-mail: igo25@sanken.osaka-u.ac.jp

軸方向の電荷分布である。

式(1)、(2)より電荷分布 $\lambda_z(z)$ とバンチ内の位置 $z$ にある電子の最終エネルギー $\delta(z)$ がわかれば、電子バンチのエネルギースペクトル $\lambda_\delta(\delta)$ がわかる。逆に $\lambda_\delta(\delta)$ と $\delta(z)$ がわかれば $\lambda_z(z)$ を計算することができる。ただし、 $z$ と $\delta(z)$ が1対1の対応となるようにするため、位相は波頭から十分に離れていることが必要となる。 $\lambda_z(z)$ と $\lambda_\delta(\delta)$ の関係は次のようになる。

$$\lambda_z(z) = \lambda_\delta(\delta(z)) \left| \delta'(z) \right|, \quad (3)$$

$\delta'(z)$ は $\delta(z)$ の微分で、

$$\delta'(z) = \frac{-E_a k_{rf} \sin(kz + \phi) + eV'_{ind}(z)}{E_f}, \quad (4)$$

上式より、もし誘起されたウェーク場 $V_{ind}(z)$ が無視できるほど小さければ、 $\lambda_\delta(\delta)$ の一度の測定で電荷分布 $\lambda_z(z)$ を求めることができる。

次に $V_{ind}(z)$ が無視できない場合を考える。測定を異なる二つのRF位相 $\phi^a, \phi^b$ で測定を行い、それぞれのエネルギースペクトル $\lambda_\delta^a, \lambda_\delta^b$ から電荷分布 $\lambda_z$ を求めると、それぞれ次のようになる。

$$\lambda_z(z) = \frac{\lambda_\delta^a \left| E_a k_{rf} \sin(kz + \phi^a) - eV'_{ind}(z) \right|}{E_f}$$

$$\lambda_z(z) = \frac{\lambda_\delta^b \left| E_b k_{rf} \sin(kz + \phi^b) - eV'_{ind}(z) \right|}{E_f}, \quad (5)$$

式(5)を $V_{ind}$ について解く。

$$eV'_{ind}(z) = \frac{E_a k_{rf}}{\lambda_\delta^a \pm \lambda_\delta^b} \left[ \lambda_\delta^a \sin(kz + \phi^a) \pm \lambda_\delta^b \sin(kz + \phi^b) \right], \quad (6)$$

この式は $z$ と $V_{ind}$ の1次の非線形微分方程式であり、 $\lambda_\delta^a, \lambda_\delta^b$ から $V_{ind}$ を数値的に求めることができる。この結果を式(5)に代入すると、バンチの電荷分布 $\lambda_z(z)$ を求めることができる。

$$\lambda_z(z) = \frac{E_a k_{rf} \lambda_\delta^a \lambda_\delta^b}{E_f \left| \lambda_\delta^a \pm \lambda_\delta^b \right|} \left| \sin(kz + \phi^a) - \sin(kz + \phi^b) \right|, \quad (7)$$

### 3. 実験

#### 3.1 測定体系

ビームラインの配置と測定体系を図1に示す。エネルギースペクトルの測定には、270°偏向電磁石

を用いる。電磁石内のホール素子で磁場強度を測定し、これをビームエネルギーに換算する。また、バンチ長の測定は、ビームライン上に45°の角度で設置されたアルミ版を通過するときに発生する遷移放射光(Optical Transition Radiation : OTR)を鏡により測定室まで導き、ストリークカメラで測定をする。

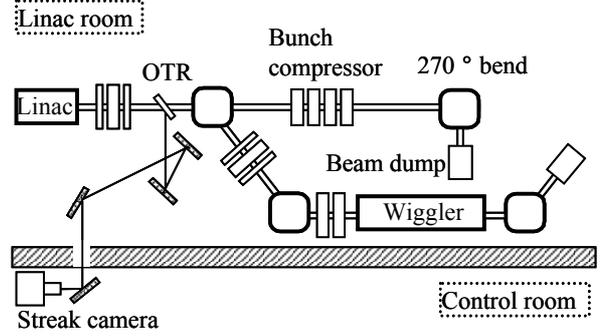


Fig. 1. Schematic arrangement of the bunch length measurement experiments with a streak camera and energy spectra measurement.

#### 3.2 エネルギースペクトル

電子ビームは、ピークエネルギーが最大になるように調整した。このときのRFフェイズシフターの値は78.0°、バンチあたりの電荷量は37 nCであった。エネルギースペクトルの測定は、この位相から2°ずつ変化させて行った。位相変化に対する電子バンチの平均エネルギーの変化を図2に示す。また、エネルギースペクトル形状の変化を図3に示す。

図より、平均エネルギー、ピークエネルギー共に

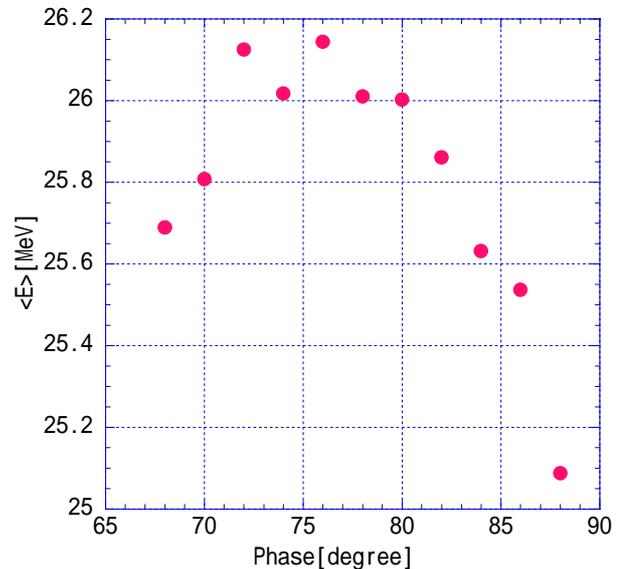


Fig. 2. Average energy

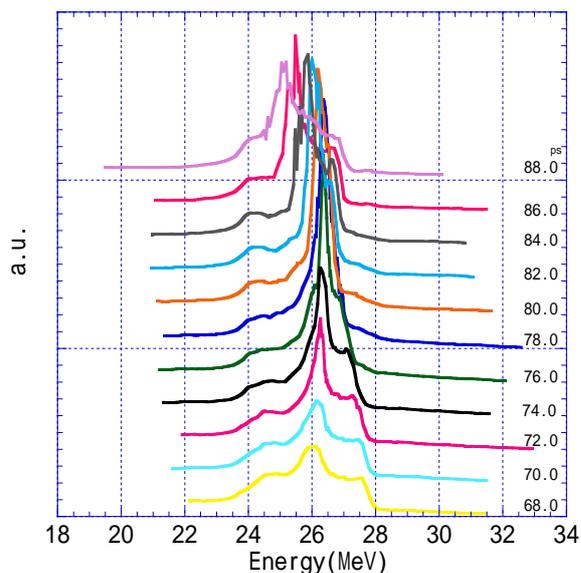


Fig. 3. Energy spectra

位相と共に変化していることがわかる。またビーム強度も位相の変化と共に大きく変化している。

### 3.3 バンチ長の測定

バンチ長の測定はRFの波頭付近の位相から、位相を後方にずらした3つの位相で行った。測定位相はフェイズシフターの表示で78, 83, 88である。また同時にバンチの電荷量の測定を行った。これらの結果は表1に示す。

位相がずれたところでは、バンチ長が増大している。また電荷量も大きく減少している。これはエネルギー

Table 1. Bunch length and charge

Phase	Bunch length [ps]	Charge [nC]
78	29.4	37.1
83	50.2	18.3
88	48.2	12.6

ースペクトルの変化に伴い、ビーム輸送路のエネルギーパッチャーからはずれた電子が失われているためである。

## 4. まとめ

阪大産研 L バンドライナックのウェーク場の影響を調べるための理論応用と予備実験を行った。エネルギースペクトル、バンチ長、電荷量共に、RF 位相に関して大きく変化している。今後このデータを元に、加速管内のウェーク場とバンチ形状を求める。また、これを利用したバンチ圧縮の実験を行う。結果は本発表で行う予定である。

## 参考文献

- [1] R. Kato, et al, "Wavelength spectrum of self-amplified spontaneous emission in the far-infrared region", Nucl. Instr. And Meth., A 475, 2001, 334.
- [2] K.L.F. Bane, et al, "Measurement of the Longitudinal Wakefield and the Bunch Shape in the SLAC Linac", SLAC-PUB 7536, 1997
- [3] R. Kato, et al, Proc. Of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology 476, 1999