

# CONTINUOUS EXCITATION FOR A SPECIFIC BUNCH USING A PHASE-LOCKED LOOP AND OSCILLATION DETECTION

Takao Ieiri<sup>#</sup>, Hitoshi Fukuma, Kazuhito Ohmi, Yuuji Seimiya, Masaki Tejima, and Makoto Tobiyama,  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

KEKB is a double-ring collider that consists of 8 GeV electron and 3.5 GeV positron beams. The optics parameters such as horizontal and vertical dispersions, beta-functions and X-Y coupling are important to achieve high performance of the collider. The optics measurements are carried out at a low beam current without the collision, because the measurements need an excitation or a large orbit change of the beam and would have risks of damage in the collision detector (Belle) and vacuum components. However, the optics might change with the beam current and by the collision. In order to measure the optics parameters around the collision point in-situ, a continuous excitation of a specific bunch using a phase-locked loop and detection for the bunch were carried out with a gated method during the collision. The hardware of the bunch excitation and oscillation detection is presented.

## PLLを用いた特定バンチの連続励振と振動検出

### 1. はじめに

KEKB加速器<sup>[1]</sup>は、電子と陽電子ビームを蓄積する周長3kmの2つのリングを持ち、1500個以上のバンチを衝突させている。衝突性能を高めるためにオプティクス診断は重要な役割を担っている<sup>[2,3]</sup>。オプティクス診断するためには、軌道変位やバンチへの強制振動が必要とされる。軌道変位や振動励起を大電流での衝突状態で行うと、真空機器や衝突検出器に被害を与えるおそれがあるので、オプティクス測定は、低電流か単バンチで行われている。しかし、大電流衝突状態と低電流単バンチとは、ウェイクや衝突効果でオプティクスに違いが生じるであろう。そこで、通常の衝突状態でもオプティクス測定が行えるために、ゲート回路を用いて1バンチのみを励振することを試みた。ビーム励振と振動測定とを非同期で行えるように、Phase-Locked Loop(PLL)を用いて特定バンチを連続的に励振した。KEKBのオプティクスとして最も重要な衝突点周りの両側にあるビーム位置モニターにゲート回路を付けてベータトロン振動を検出した。これにより、衝突点でのオプティクス・パラメータを衝突状態でも測定できるようになる<sup>[4]</sup>。このゲート回路を用いた方式は、ゲートのタイミングを調整することにより測定バンチを変えることができるので、ウェイク効果やビーム・ビーム効果も測ることができるであろう。

### 2. バンチ励振と振動検出

#### 2.1 励振系システム

励振と振動検出システムの概要を図1に示す。励振用のデフレクターは、衝突点とリング対面にあるバンチ毎横方向フィードバックシステム<sup>[5]</sup>のストリ

ップライン電極を利用している。ボタン電極で取出されたバンチ列信号は、ゲート回路で特定の1つのバンチ信号が取出され振動検出器に入れられる。この振動検出器は、実時間でターン毎のビーム位置を得ることができる。そのビーム位置信号がPLLの参照信号として用いられる。PLLの動作を助けるために、中心周波数を変えることができるバンドパスフィルター(BPF)をPLLの入力段に挿入し、ベータトロン振動以外のノイズをカットしている。ベータトロン振動にロックしたPLLの出力信号は、回転周期に同期したパルスで変調され増幅された後、ストリップライン電極でゲートされたバンチを共鳴的にキックする。励振されたバンチに対しては、横方向フィードバックはオフになっているので、フィードバック効果は、励振されたバンチに影響を与えない。

PLL技術は、各種の通信機器や制御機器に応用されているが、加速器では、加速周波数の制御やベータトロンチェーンの連続測定に使われている。励振系で主要な役割を演じるPLLは、雑音を含んだビーム信号から目的とするベータトロン振動だけを取り出すことができる狭帯域フィルターの特性を持っている。PLLの基本構成は、図2に示すように、位相比較器(Phase Comparator)、ローパスフィルター(LPF)とVCO(Voltage Controlled Oscillator)からなる。VCOの出力と入力信号の位相比較により、出力は入力信号の位相に固定した信号になるが、位相比較器の出力にDCオフセットを与えることにより、入力位相に対する出力位相を変えることができる。この位相変位は、周波数に依存しない特性をもつ。表1に実験に使われたPLLの特性を示す。ロックレンジは、KEKBのベータトロン振動の基本周波数に合わせている。PLLの過度応答速度はローパスフィルターの時定数でほぼ決まる。

<sup>#</sup>Email:takao.ieiri@kek.jp

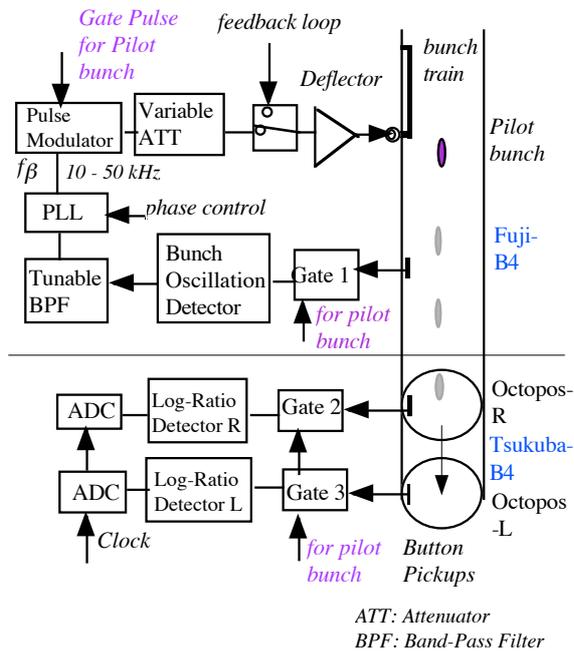


図 1 : システム概要。

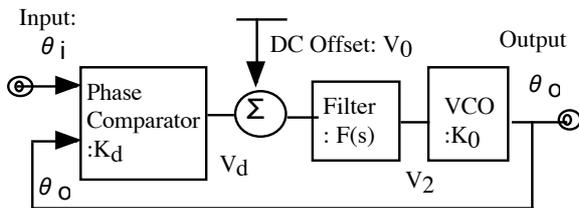


図 2 : PLL (Phase-Locked Loop)の基本構成。

表 1 : PLLとBPFの特性

Lock Range	10 k to 50 kHz
Lock-up Time*	3 ms
Lock-in Time**	10 to 45 ms
Phase Control	0 to 360°
Center Frequency	1 k to 159 kHz
Q Value	15

\*)Lock-up time: 入力周波数が変化した時、変化に追従する時間。

\*\*)Lock-in time: 無入力の状態から信号が入った時、ロックするまでの時間。

## 2.2 振動検出系

衝突点でのオプティクス・パラメータを測定するために、衝突点に最も近いOctopos<sup>[6]</sup>と呼ばれるビーム位置モニターが使われた。4個のボタン型電極からのビーム信号が側室に導かれる。各電極からのビーム信号は、ゲート回路で1バunch信号が取出され、ログアンプでビーム信号が検波される。検波されたパルス信号のピーク値がターン毎にサンプルされる。衝突点周りのビーム軌道と位置モニターの配置を図3に示す。陽電子ビームは右側から、電子

ビームは左側からやってくる。電子と陽電子ビーム軌道は水平方向に22 mradの角度で衝突している。この有限角衝突をクラブキックでバunchの前後に11mradの傾きが付けられているので、バunchは正面衝突する。Octoposは、電子と陽電子バunchの両方を検出するので、衝突点から $\Delta L$ 離れた場所で衝突バunchを観測すると、右側モニターでは、電子バunchが $2\Delta L/c$  (cは光速)の時間遅れてやってくる。逆に、左側モニターでは、陽電子バunchが遅れて現れる。

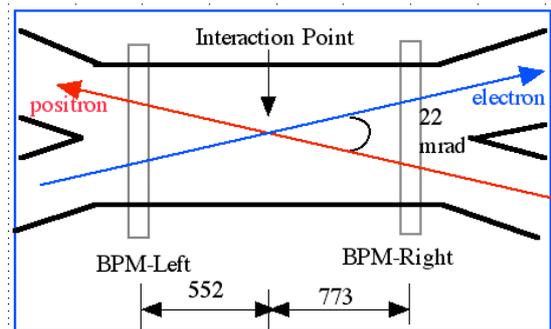


図 3 : 衝突点周りのビーム軌道と位置モニターの配置を上から見た、縦横の尺度は異なる。

図4に衝突点右側のOctoposで観測したバunch列信号を示す。このモニター (Octopos-R) は、衝突点から773mm離れているため、陽電子バunchに比べ、電子バunchが5.2ns遅れてやってくる。遅れてやってくる電子バunchが検出したいトレイン最後の陽電子バunchに接近し、ゲート回路の妨げにならないように、対応する電子バunchを取り除いている。トレイン最後の電子バunchは、他のバunchと充分離れているので、問題なくゲートできる。

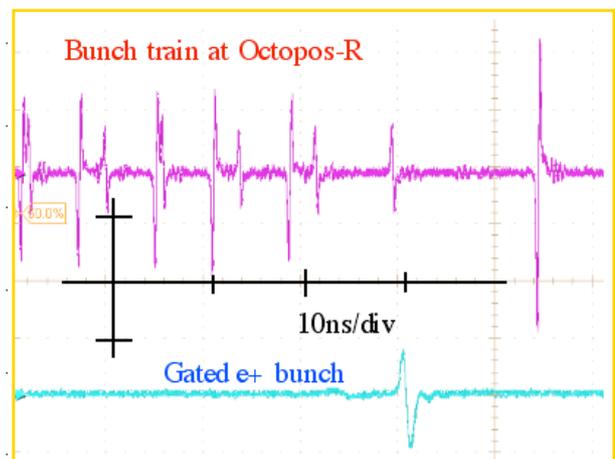


図 4 : (上) : 右側モニターで観測したトレイン最後のバunch波形、1V/div、マイナスから振れるのが電子バunchで、プラスに振れるのが陽電子バunch (下) : 右側モニターでトレイン最後の陽電子バunchをゲートした波形、500mV/div。

### 3. ビームテスト

ビームに外部から  $Fe^{j\omega t}$  の力で励振させた時、 $\omega = \omega_\beta$  の共振状態で、ベータatron振動の定常的な振幅は、

$$A = \frac{F}{2\alpha_d \omega_\beta} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\omega_\beta$  はベータatron振動の角周波数、 $\alpha_d$  はダンピングレートで、クロマチシティとパンチ電流に依存する。したがって、ベータatron振動振幅は、外部のキック力だけでなく、ビームのパラメータにも依存する。

PLLでビームを励振する場合、PLLは自動的にビーム振動にロックしようとするが、ビームが安定でコヒーレント振動の種がないと、ロックすることができない。又、ベータatron振動以外の振動成分があると、誤った周波数にロックしようとするので、ビームを励振することができない。目的とするベータatron周波数は、スペクトルアナライザを用いた測定でわかっているので、その周波数の近くにPLL入力のBPFの中心周波数を設定すると、PLLの出力周波数はベータatron振動数に近くなる。しかし、これだけでは、まだロックできなかつた。PLLの位相を調整する必要があつた。図5に位相オフセットに対するロック状態でのベータatron振動の振幅を示した。位相が $120^\circ$  付近でロックしたベータatron振動振幅が最大となつた。この最適位相からおおよそ $35^\circ$  ずれると、ビームの振動振幅は、3dB 減少した。位相調整の有効範囲はほぼ $100^\circ$  であつた。PLL位相がそれ以上ずれると、ビームロックが困難であつた。この結果から、ビーム検出系、PLLとデフレクターがビームを含んだ正帰還ループでビーム励振を継続していることがわかる。

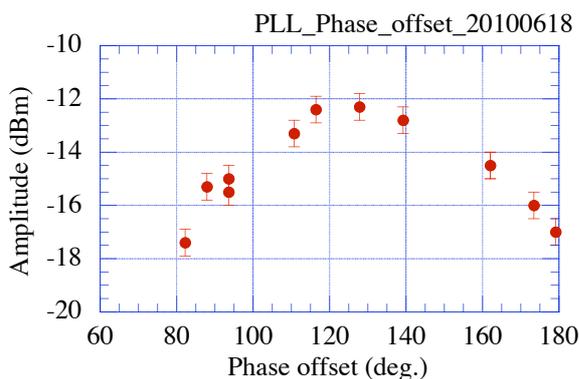


図5：位相のオフセットを変えた時のベータatron振動の振幅の変化。振動振幅 -10 dBmは、Fujiにある位置モニター ( $\beta_x = 21\text{m}$ ) で見て、0.8 mm の振幅に相当。

図6に衝突点の両側にある位置モニターで観測した陽電子バンチの水平振動を示す。ビームの平衡位置が衝突点両サイドで大きく違うのは、軌道が水平方向に傾いているからである。バンチはおよそ1.5 mm の振幅で安定に振動している。楕円の形から

ベータatron振動の位相差が約 $60^\circ$  であることがわかる。これは、オプティクス計算値と一致する。これらの振動を解析することにより、衝突点でのX-Yカップリングとオプティクス・パラメータを求めることができる<sup>[2,4]</sup>。

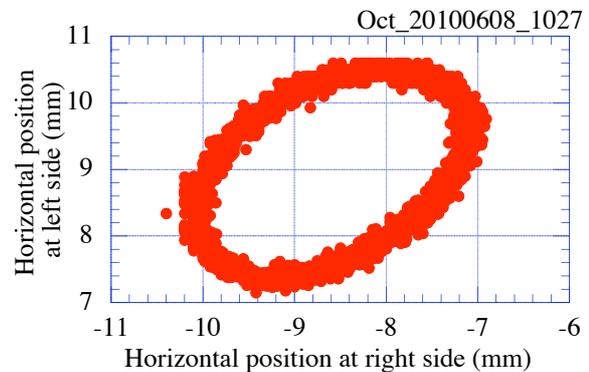


図6：衝突点の両サイドにある位置モニター ( $\beta_x \approx 1.5\text{m}$ ) で観測した2000ターンの水平振動の軌跡。横軸が右側モニター、縦軸が左側モニターで観測した水平位置、ビームセンター位置は (-8.62, 8.96) mm。

### 4. まとめ

- PLLの位相とBPFの中心周波数を調整することにより、ビームを安定に励振することができた。
- この励振は、衝突実験に影響与えることなく、行うことができた。
- チューンの連続測定が可能となつた。ただし、読み出し系を準備しなければならない。
- 今後、SuperKEKBで利用するために、励振のための制御を整備し、垂直方向への励振もできるようにする。

### 参考文献

- [1] K. Akai et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 499, p.191 (2003).
- [2] Y. Ohnishi et al., Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 12, 091002 (2009).
- [3] A. Morita et al., PAC07, Albuquerque, NM, USA p.3321 (2007).
- [4] K. Ohmi et al., IPAC'10, Kyoto, TUPEB012 (2010).
- [5] M. Tobiya and E. Kikutani, Phys. Rev. ST Accel. Beams 3, 012801 (2000).
- [6] M. Tejima et al., EPAC02, Paris, p.1980 (2002).