

# GATED BEAM-POSITION MONITOR AND ITS APPLICATION AT KEKB

Takao Ieiri, Hitoshi Fukuma, Yoshihiro Funakoshi, Kazuhito Ohmi and Makoto Tobiyama,  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

A gated beam-position monitor (GBPM) that is capable of measuring the beam phase and transverse position of a specific bunch has been developed. This GBPM can be used for beam dynamics measurements at KEKB, a double-ring electron/positron collider. First, the monitor is used to measure a beam-beam kick by comparing the beam position of a colliding bunch with that of a non-colliding bunch. The monitor estimates the effective horizontal beam size at an interaction point (IP) from a linear part of the beam-beam kick and revealed the effect of the crab cavities on the beam-beam kick. Next, the beam phase and transverse positions are measured along a bunch train. A horizontal orbit displacement was found under the crabbing collision. The horizontal displacement is caused by an asymmetric kick of the crab cavities, which is based on the transient beam loading. The technique using a gate has the advantage of diagnosing a beam anytime without disturbing other bunches.

## ゲート制御型ビーム位置モニターとKEKBでの応用

### 1. はじめに

KEKB<sup>[1]</sup>は2つのリングを持ち電子と陽電子ビームをリングの1カ所で衝突させる加速器である。電子ビームのエネルギーは8GeV、陽電子は3.5GeV、それぞれのリングはHER、LERと呼ばれている。衝突は水平方向に22mradの角度付きでなされていたが、昨年クラブ空洞が設置され、有限角もった軌道で実効的な正面衝突させることを世界で最初に実現した<sup>[2]</sup>。このクラブ空洞は、ビームの重心軌道は変えないでバンチを水平方向に回転させることができる。クラブ空洞は各リングに1台ずつ設置されているので、クラブ空洞によるバンチの水平方向傾き効果を全周で観測することができる。しかし、衝突状態の変化を直接観測することは難しい。一方、ゲート制御型ビーム位置モニターはバンチ毎にビーム軌道を測定することができる。このモニターを用い、衝突バンチと非衝突バンチの軌道差から、衝突点でのビーム・ビームキックを測定することができる。ビーム・ビームキック力の違いから、クラブ空洞による衝突効果を観測することができるであろう。又、加速空洞でのビーム負荷により、ビーム位相がバンチ毎に違っていることが観測されている<sup>[3]</sup>。この位相変動がクラブ空洞の下でどのような影響を受けるであろうか。さらに、ゲート制御型ビーム位置モニターは、個別バンチの振動を測定することができる。この測定は、他のバンチを乱すことがないので、KEKBのような多数バンチで運転している加速器で、常時ビーム診断に応用できるであろう。

### 2. モニターシステム

ゲート制御型ビーム位置モニターはある特定バンチを選択しそのバンチ信号をリングの回転周期以内の時間で処理する。複数個のバンチデータを測定し

た差分は、モニター内でのエラーやグローバルな軌道補正の影響をキャンセルするであろう。図1にモニターシステムのブロック図を示す。ボタン電極でピックアップされたバンチ信号は8 ns 幅のパルスでゲートされる。そのパルス信号は加速周波数で動作するIQ(In-phase and Quadrature phase)回路で検波されその出力パルスのピーク値がADC内でサンプルされる。IQ検波を用いているので、水平垂直軌道と同時にビーム位相も測定できる<sup>[4]</sup>。このモニターの特性は表1に示される。平均化法を用いれば、数ミクロンの分解能で軌道を測定できる。

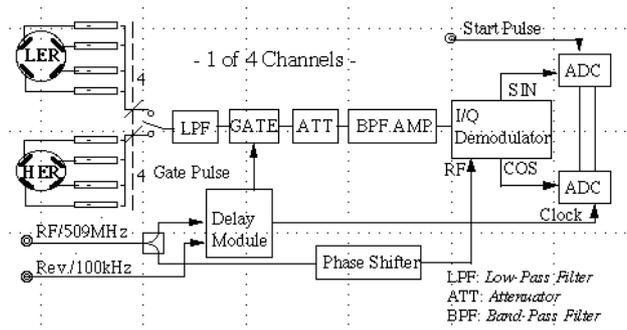


図1：ゲート制御型位置モニターの概略

表1 モニターの性能

Pick-up Electrode	Button
Detector Bandwidth	509+/- 30 MHz
Resolution of Position	20 $\mu\text{m}$ @ turn-by-turn 3 to 5 $\mu\text{m}$ @ average
Resolution of Phase	0.3 deg. @ turn-by-turn 0.10 deg. @ average
Isolation of Gate	> 50 dB @ 2GHz 40 dB @ 6 ns spacing

### 3. 応用例

#### 3.1 ビーム・ビームキックの測定

電子と陽電子バンチの軌道がずれた状態で衝突すると、お互いの電磁力によりバンチはキックされる。その結果、両ビームの軌道変位が全周に現われる。今、衝突点からのベータatron位相進み  $\Delta\varphi_d$  の場所で検出される軌道変位  $\Delta X_{det.}$  は

$$\Delta X_{det.} = \frac{\sqrt{\beta_{det.}\beta^*}}{2\sin(\pi\nu)} \theta_{bb} \cos(\pi\nu - |\Delta\varphi_d|) \quad (1)$$

となる。ここで、 $\beta_{det.}$  と  $\beta^*$  は検出器と衝突点でのベータatron関数で、 $\nu$  はベータatronチューン、 $\theta_{bb}$  は衝突によるキック角である。 $\sqrt{\beta_{det.}\beta^*}$  はダイナミックビーム・ビーム効果を考慮してもほぼ一定であるので、観測される軌道変位はビーム・ビームキック角に比例する。一般に衝突点での軌道変位に対するビーム・ビームキックは非線形曲線になるが、軌道変位が極小さい領域においては、直線で近似することができる。その勾配はビームビームパラメータに比例し、実効的なビームサイズを推定することができる。

ビーム・ビームキックを測定するために、衝突点での電子と陽電子ビームの相対的な軌道を変えながら陽電子ビームの衝突バンチと衝突していないバンチの軌道差を測定した。図2にはほぼ同じバンチ強度の下で測定した軌道差を衝突点での水平軌道変位の関数として示し、クラブ空洞電圧がオンの場合とオフの場合とで比較している。クラブ空洞によりビーム・ビームキック力が増加し、中心付近での勾配が約2倍増加していることがわかる。これは、実効的な水平方向サイズが  $1/\sqrt{2}$  倍に縮んだことを意味している。

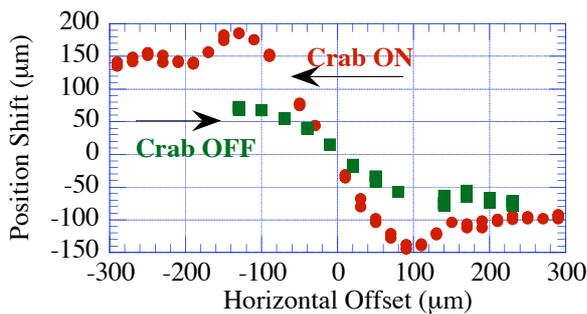


図2：衝突点での両ビームの水平方向相対的位置変位に対するモニター地点での水平軌道変位、赤丸がクラブ空洞電圧オン、緑がクラブ電圧オフ。

#### 3.2 バンチトレインに沿った軌道及び位相の変化

KEKBのビームの回転周期は  $10\mu\text{s}$ 、ハーモニック数は5120であるが、全バケットにバンチが入っているわけではない。バンチは3ないし4バケット間隔の繰返し周期で並んでいる。これをバンチトレインと呼んでいる。又、バンチトレインの後には、ビームを瞬時にダンプさせるための空きバケット領域がある。これは、回転周期の5%を占めている。この空きバケット領域があるために加速空洞のビーム負荷

が変わり、ビーム位相が回転周期内で変わる Transient Beam Loading 現象が観測されている<sup>[1]</sup>。ビーム位相の変化はほぼシミュレーション結果と合っているが、トレイン先頭部ではシミュレーションと合っていない。我々はLERのトレイン先頭部でビーム位相変化を観測した。図3に水平方向軌道とビーム位相をバケット番号の関数として示す。ビーム位相は、先頭から40バケットまで急激に増加した後、平坦部を経て140バケット付近でジャンプする。その後直線的に増加している。位相の変化量は、(b)の方が大きい。これは(a)(b)とも同じビーム電流であるが、(b)の方が空きバケット領域が大きいためである。直線的なゆっくりした位相増加はシミュレーション結果と一致するが<sup>[1]</sup>、トレイン先頭での急激な位相変化を説明することができない。このステップ応答的な位相変化は、おそらく縦方向ウェーク場に関係したものと推測している。次に、水平方向の軌道変化はクラブ電圧オンとオフで全く違う振る舞いを示している。クラブ電圧がオフの場合、水平軌道は  $50\mu\text{m}$  以内に収まっているのに対し、クラブ電圧をオンにすると水平方向軌道が位相変化に対応して変化するのがわかる。その変化量はおよそ  $33\mu\text{m}/\text{deg}$ 。これはクラブキック電圧波形の位相に対しビーム位相がずれると、クラブキックがバンチ前後で非対称になり、キック力の差分がバンチ重心の軌道変位を作るためである。軌道変位の測定値と計算値はほぼ合っている。

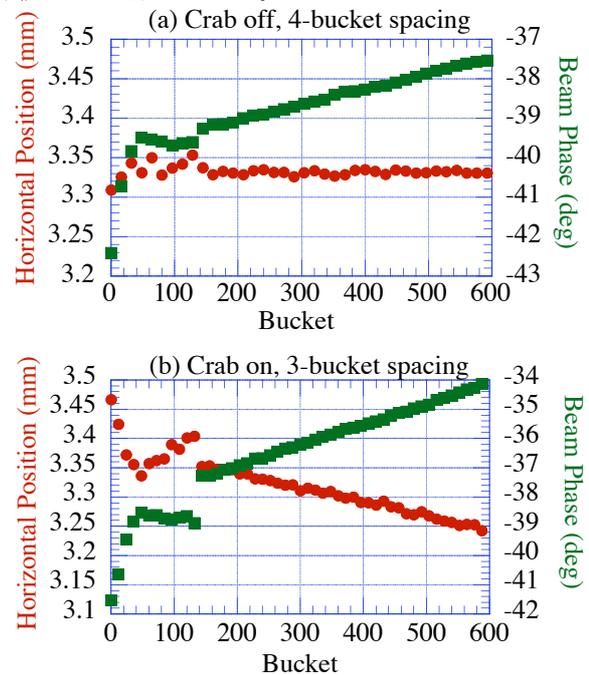


図3：陽電子バンチの水平方向位置（赤）とビーム位相（緑）のトレイン先頭部での変化、(a)クラブ空洞オフ、4バケット間隔、(b)クラブ空洞オン、3バケット間隔、バンチ電流は共に  $1.1\text{mA}$ 。

我々はLERのトレイン先頭部で、水平軌道とビーム位相の急激な変位を観測した。このトレイン先頭部はビーム損失が起こり易い領域でもある。図4に

垂直方向ビーム軌道をバケット番号の関数として示す。この領域で垂直方向の軌道変位を観測した。垂直方向変位は、先頭から100バケットまでに60~100 $\mu\text{m}$ 変化し、その後はほぼ一定となっている。ビーム電流の縦方向線密度が高い程、垂直方向軌道変位が大きい。一方、バンチトレイン先頭部で、電子雲によりベータatronチューンが急激に変化する現象が観測されている<sup>[5]</sup>。おそらくこの軌道変位も電子雲の生成と関係するであろう。電子雲が形成される過程で何らかの非対称な電子雲の分布が生じるために起きたものと推測している。

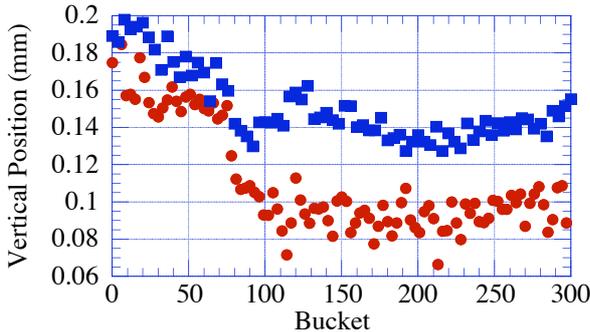


図4：クラブ空洞及び電子雲除去用ソレノイドを切った状態で陽電子バンチの垂直方向軌道をバケット番号の関数として測定、赤が3バケット間隔、青が4バケット間隔のバンチトレインで測定、共にバンチ電流は0.5mA。

### 3.3 個別バンチの振動測定

ゲート制御法を使ったモニターはベータatronチューンの常時測定に使われている。このゲートチューンモニターで特定バンチをキックするために、スペクトルアナライザのトラッキング(Tracking Generator)出力信号を数ナノ秒のパルス幅でパルス変調している。この励振信号を位置モニターのデータ取得と同期させれば、個別バンチの振動をターン毎にモニターすることができるであろう。図5にトレイン先頭バンチを水平方向に連続的にキックした時、その振動を2カ所の位置モニターで観測した例を示す。このように通常の衝突状態でバンチ振動が観測できることは、ダイナミック効果によるオプティクス変化に対応したビーム診断が可能になるであろう。

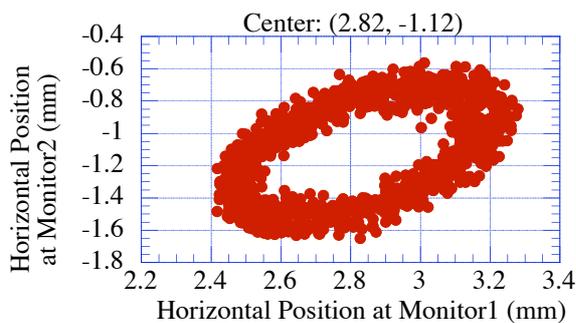


図5：あるバンチを連続的に水平方向にキックした時、およそ90°離れた2カ所の位置モニターを使ってその振動を表示。

## 4. 議論

図3と図4に示したグラフはバンチが等間隔に並んだ状態での測定である。これに対し、図5は、ほとんど3バケット間隔であるが、一カ所4バケット間隔に変わった場所がある。バンチ間隔が変わる前後で水平及び垂直軌道に50~60 $\mu\text{m}$ の変化が現れた。この変化量がバンチ電流にほとんど依存しないことから、おそらく、この変化はビーム軌道の変化でなく、モニターシステムに関係したエラーであると推定している。実際、ボタン電極からのビーム信号は数GHzのリングングを持ちながら長いテールを引いている。したがって、ゲートによる測定は前のバンチ信号の影響を受けるであろう。図1に示したモニターシステムで、ゲートの前にカットオフ周波数1.5GHzを持つローパスフィルターを挿入したところ、そのリングングを小さくすることができた。その結果、バンチ間隔が変わるところでの見かけ上の軌道変化も小さくなった。又、測定タイミングをバケット毎に移動しながら、ビーム強度を測定した。バンチありなしでの強度比は、3バケット間隔以上で約40dBであったが、その強度比はバケット間隔に依存した。さらなるゲートのアイソレーション強化が必要であろう。

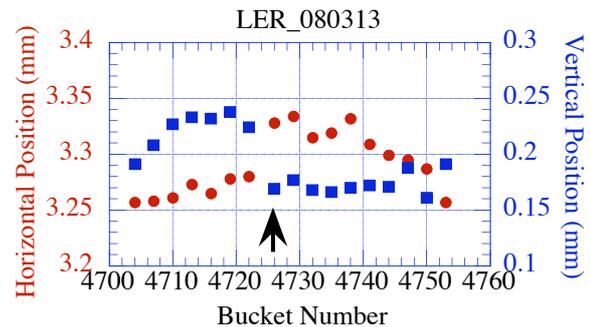


図6：トレイン内のある領域での水平(赤)及び垂直(青)方向軌道、矢印はバケット間隔が3から4に変わった場所を示す。

## 参考文献

- [1] K. Akai et al., "Commissioning of KEKB", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 499, p.191 (2003).
- [2] K. Oide et al., "Compensation of the crossing angle with crab cavities at KEKB", Proc. of PAC07, Albuquerque, USA, p.27 (2007).
- [3] K. Akai et al., "Bunch-by-bunch phase measurement", Proc. of PAC01, Chicago, USA, p.2432 (2001).
- [4] T. Ieiri and T. Kawamoto, "A four-dimensional beam-position monitor", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 440, p.330 (2000).
- [5] T. Ieiri et al., "Measurements of wake effects due to electron cloud at KEKB", Proc. of ELOUD'07, Daegu, Korea, 152 (2007), [http://chep.knu.ac.kr/ecloud07/upload/ECloud07\\_Proc\\_v2.pdf](http://chep.knu.ac.kr/ecloud07/upload/ECloud07_Proc_v2.pdf).