

# Angle sensitivity of Cavity BPM

Y.Honda, Y.Inoue

2006/5/19

## 概要

If the beam orbit has an angle with respect to the cavity, a cavity BPM produces its dipole mode signal even if the beam orbit is at the electrical center of the cavity. We measured the angle sensitivity by introducing a mechanical tilt in the BPM support. The result was that  $100\mu\text{rad}$  angle produced same amount of signal as  $1\mu\text{m}$  beam position.

## 1 はじめに

空洞 BPM のビーム軌道角度に対する感度について調べる。特に IP-BPM では、角度感度を落とすことが重要であり、既存のものに比べて空洞を薄くするという方針で設計を行っている。はじめに空洞の厚みと角度感度の関係の導出をまとめる。既存の井上 BPM を使用してビーム実験で角度感度を測定し、計算で求めた値と比較する。

## 2 角度感度の計算

平行オフセットのビーム位置信号と比較して、ビーム角度信号の強度を計算する。

### 2.1 簡単な関係式の導出

簡単な為、ここでは transit time の効果やバンチ長の効果は考えないで計算を進める。我々の空洞の場合、transit time の影響は 10%程度なのでそんなに気にしなくて良い。

空洞の長さを  $L$ , ダイポールモードの角周波数を  $\omega$  とする。まず、図 1(a) のようにビームが空洞中心から平行に  $x$  だけオフセットを持って通過する場合を考える。ビームによって空洞に発生するエネルギーは空洞長  $L$  に比例すると考えられるので、信号の振幅としては  $\sqrt{L}$  に比例する。また、振幅は当然  $x$  に比例する。そのほかの係数はひっくるめて  $A$  とすると、発生する信号の振幅は、

$$\text{position signal} = Ax\sqrt{L}\sin(\omega t) \quad (1)$$

と書ける。

次に、図 1(b) のように空洞の中心を通過するが軌道が角度  $x'$  を持っている場合を考える。この状況を図 1(b-1) のようにモデル化できる。つまり、ビームが空洞の前半、後半を平行軌道でジグザグに進むと考え、 $\pm x'L/4$  のオフセットを持った軌道 2 つに分解する。ただし、2 つに分解した信号の間にはビームが通過する時間に対応した位相差を考慮する必要がある。さらにモデル化を進めて図 1(b-2) のように考える。 $L/2$  の長さを持った独立な 2 つの空洞に  $\pm \frac{L}{4c}$  のタイミングでビームが通過した信号を後段で合成したのが全体の信号である。すると、

$$\text{angle signal} = Ax'\frac{L}{4}\sqrt{\frac{L}{2}}\sin\left(\omega t + \frac{L}{4c}\right) - Ax'\frac{L}{4}\sqrt{\frac{L}{2}}\sin\left(\omega t - \frac{L}{4c}\right) \quad (2)$$

$$= Ax' \frac{L}{2} \sqrt{\frac{L}{2}} \sin\left(\frac{\omega L}{4c}\right) \cos(\omega t) \quad (3)$$

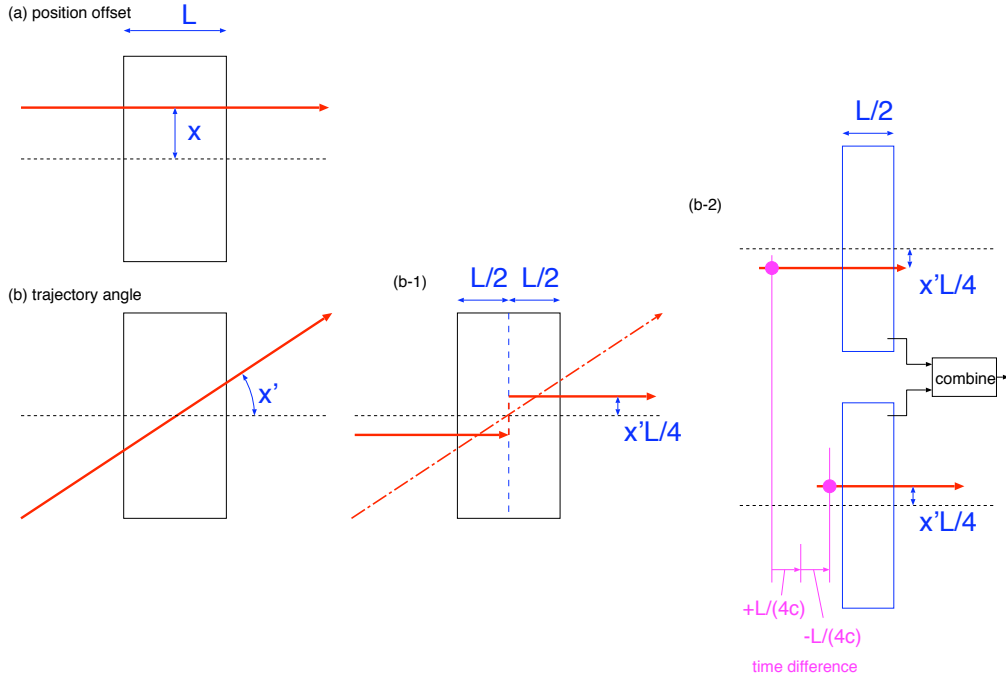


図 1: 軌道角度の効果のモデル化

よって、位置信号と角度信号の振幅比は、

$$\frac{\text{angle signal}}{\text{position signal}} = \frac{L}{2\sqrt{2}} \sin\left(\frac{\omega L}{4c}\right) \frac{x'}{x} \sim \frac{\omega L^2}{8\sqrt{2}c} \frac{x'}{x} \quad (4)$$

角度感度は  $L$  の自乗に比例する。また、位置信号と角度信号は位相が 90 度異なる。

## 2.2 具体的な計算

空洞の機械的な形状を図 2 中に示す。空洞の長さは 12mm であるが、モードの電場は多少長手方向に洩れる。ここでは、実効的な長さをダイポールモードの電場の大きさが空洞中心での値の半分になるまでの全幅で定義することにする。MAFIA を用いて固有モード計算をし、ダイポールモードの中心軸から 1mm オフセットの位置での電場の様子を求めた結果が図 2 である。この結果より、実効長を 13.6mm とした。また、井上 BPM の周波数は 6.55GHz である。これらを用いて式 4 に数値をいれると、 $\text{angle signal [1 } \mu\text{rad] / position signal [1 } \mu\text{m]} = 0.0022$  であった。即ち、 $450 \mu\text{rad}$  の軌道角度が  $1 \mu\text{m}$  の位置信号と同じだけの信号を発生する。

## 3 測定

ビーム軌道に傾きをつけられるのはせいぜい 1mrad 程度である。今回は最初の測定であり、はっきりと角度の効果を見てみたいのでより大きく角度を付けて観測したい。そこで、空洞をビームラインに対して傾けて測定を行った。10mrad 程度の傾きをつけたので、ビームの角度ジッターや、ステアリングで振ったときに付く軌道角度は無視できる。

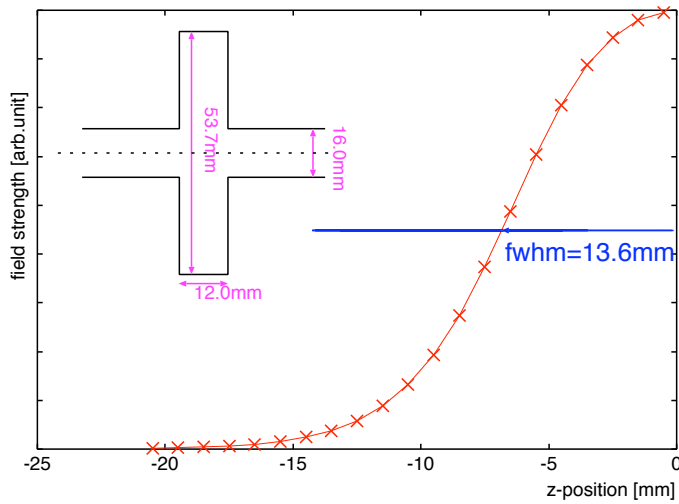


図 2: ダイポールモードの電場分布 ( $x=1.0\text{mm}, y=0.0\text{mm}$ )

### 3.1 セットアップ

#### 3.1.1 空洞

用いたのは3台ある井上BPMのうち、最上流のもの。内部のレファレンス空洞は金属のフォイルで塞いである。ビーム強度をモニターするため、上流にある6.55GHzのレファレンス空洞も使用した。

#### 3.1.2 空洞の設置

図3に示すように空洞が設置されているVブロックに厚み1mmあるいは2mmのスペーサーを挟むことによって空洞を傾けた。Y方向の角度に対応する。X方向には傾けていない。Vブロックの斜面が45度、BPMのブロックの全長は100mmであることから、厚み1mmのスペーサーの場合で14.1mrad、厚み2mmのスペーサーの場合で28.3mradの傾きになる。ビームの下流側に挟むときを正、上流側に挟むときを負の傾きと定義する。

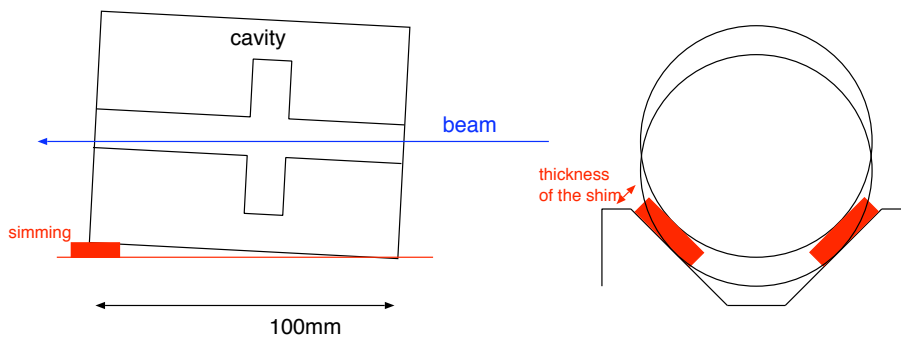


図 3: 空洞の傾け方

### 3.1.3 検出回路系

今回は位相検出はせず、ダイオード検波による振幅のみの測定である。回路系を図4に示す。Xポート、Yポート、Referenceについて同様のスキームで検出した。図5は回路系全体 (combiner の出力の位置から ADC の値) のキャリブレーションのデータである。これを用いて ADC の値を空洞の出力信号のパワーに変換する。

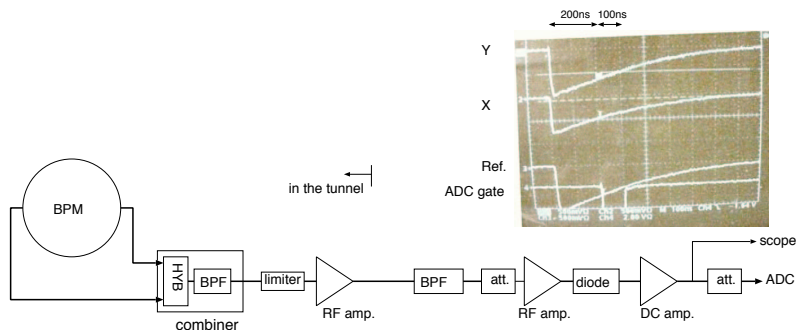


図 4: 回路系のセットアップ

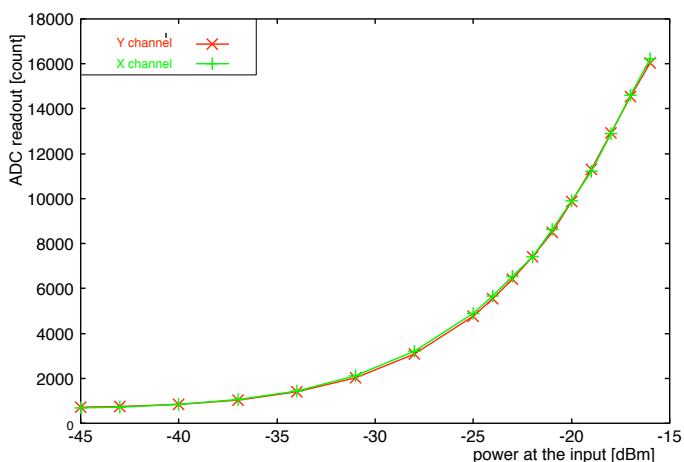


図 5: 回路系のキャリブレーション

## 3.2 測定手順と結果

### 3.2.1 測定手順

ステアリング (ZV8X, ZH5X) を用いてビーム軌道をスキャンし、BPM の信号出力を測定した。Y 方向の測定を行うときは、はじめに X ポートの信号が最小になるように X 軌道を調整した後、Y 軌道のスキャンを行った。X 方向の測定についても同様。使用する空洞 BPM のすぐ上流、下流にあるストリップライン BPM (ML12X, ML13X) を用いて軌道をモニターし、内挿によって空洞 BPM の位置でのビーム位置を求めた。ビーム強度はレファレンス空洞を用いてモニターしておいたが、シフト中、概ね安定に  $0.6 \times 10^{10}$ /bunch であったので、特に解析に使用してはいない。

空洞の傾きのセットアップを変えるごとに Y 方向、X 方向の測定をおこなった。4セットの空洞の傾き (28.3mrad, 14.1mrad, 0.0mrad, -14.1mrad) についてデータを採った。

### 3.2.2 結果

図 6,7 がそれぞれ Y 方向、X 方向についての測定結果である。空洞の傾きを変えると Y 方向の位置もシフトするが、このプロットでは中心を一致させるようにあわせて表示した。縦軸は図 5 のデータを用いて ADC の読み値を信号パワーに変換し、 $50\Omega$  の負荷に対する電圧に直したものの。

傾きを付けていない場合は空洞中心で信号がほぼゼロまで下がっているのに対し、傾き量に応じてオフセットがつくことが分かる。スロープの傾きから位置感度を評価できるので、オフセットがどれだけの位置信号に対応するかを計算出来る。 $100\ \mu\text{rad}$  の角度信号が  $1\ \mu\text{m}$  の位置信号と同等の強度であると読みとることが出来る。

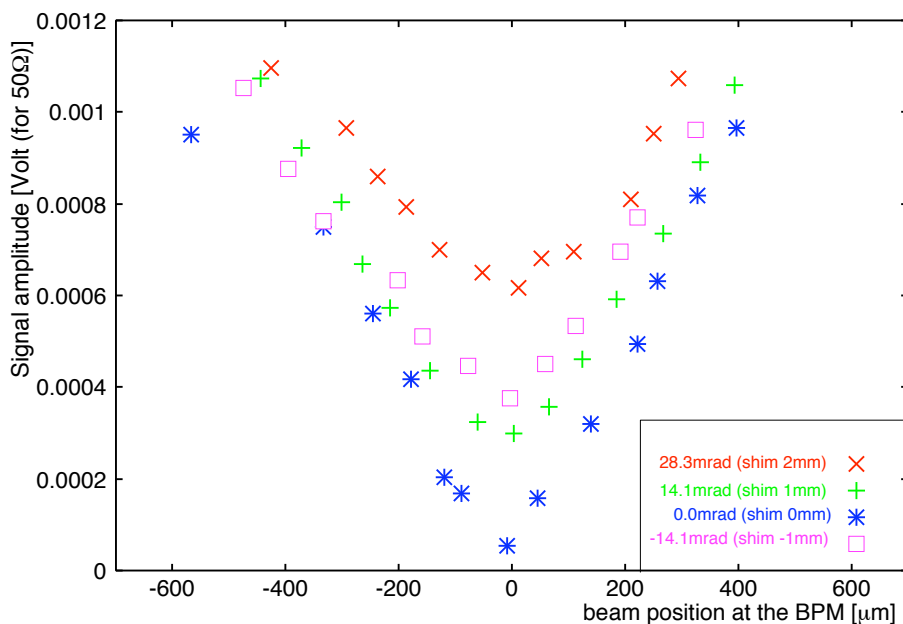


図 6: Y 信号の結果

## 4 まとめと考察

空洞を傾けたときのビーム信号を測定することにより、角度感度を測定した。 $100\ \mu\text{rad}$  の角度信号が  $1\ \mu\text{m}$  の位置信号と同等の強度であると測定された。簡単なモデルによると、 $450\ \mu\text{rad}$  の角度信号が  $1\ \mu\text{m}$  の位置信号と同等と計算されたのに対し、4 倍程度の差があった。モデル化が簡単すぎることや空洞の実効長の取扱い方などを考慮すると、この程度の違いはあっても不思議ではないと思われる。

ちなみに今の IP-BPM の設計では空洞の実効長が  $6.4\text{mm}$  である。角度と位置の感度比が  $L$  の自乗に比例するとすると井上 BPM に対して角度感度が  $1/5$  になっているつもりである。

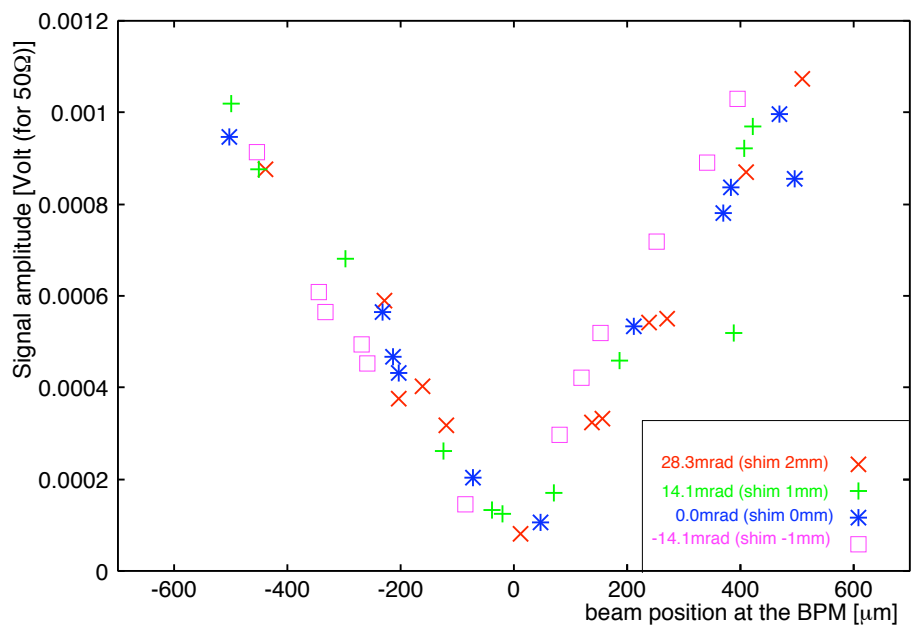


図 7: X 信号の結果