

# Output power from KEK Cavity BPM

Y.Honda

2005/9/23

## 概要

The resolution of a cavity BPM is limited by its output signal power. We calculated the expected signal power with the existing cavity design and the beam parameter. The absolute power measured in the past experiment was estimated by calibrating the sensitivity of the detection system. It was found that the output voltage was factor 5 smaller than expected.

## 1 目的

空洞 BPM の分解能は原理的には信号強度と熱雑音の比によって制限される。KEK 空洞 BPM から出力される信号の強度の絶対量について以前の測定の結果をもとに調べ、計算値と比較する。

## 2 出力パワーの計算

### 2.1 計算式の導出

ビーム通過によって空洞に発生する RF エネルギー ( $U$ ) は、

$$U = \frac{\omega}{4}(R/Q)q^2 \quad (1)$$

$q$  はバンチ電荷、 $\omega$  は空洞モードの角周波数。

バンチ長 ( $\sigma$ ) の効果を入れると、

$$U = \frac{\omega}{4}(R/Q)q^2 e^{-\frac{\omega^2 \sigma^2}{c^2}} \quad (2)$$

$Q_{ext}$  の定義から、 $P_{out}$  をポートから出力されるパワーとすると、

$$P_{out} = \frac{\omega U}{Q_{ext}} \quad (3)$$

$$= \frac{\omega^2 q^2}{4Q_{ext}}(R/Q)e^{-\frac{\omega^2 \sigma^2}{c^2}} \quad (4)$$

出力インピーダンスを  $Z$  とすると、電圧 ( $V$ ) とパワーには

$$P_{out} = \frac{V^2}{Z} \quad (5)$$

の関係があるから、

出力信号の電圧は、

$$V = \frac{\omega q}{2} \sqrt{\frac{Z}{Q_{ext}}(R/Q)} e^{-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2c^2}} \quad (6)$$

となる。

## 2.2 具体的な計算

ビーム軌道が 1mm のオフセットを持った場合の信号強度を式 6 に従って具体的に計算する。パンチ長を ATF での典型的な大きさ 8mm とし、測定時の状況と合わせてビーム電荷を  $0.9 \times 10^{10}$  e/bunch とする。

MAFIA による R/Q の計算の結果、ダイポールモードの中心から 1mm オフセットをもった軌道に対する R/Q は  $1.4 \Omega$  である。ポートのカップリングを  $\beta = 0.07$ 、 $Q_0 = 8700$  とすると、 $Q_{ext} = Q_0/\beta = 120000$  となる。取り出しのインピーダンスを  $Z = 50 \Omega$  とする。 $\omega = 2\pi \times 6.554$  GHz、 $q = 1.44$  nC ( $0.9 \times 10^{10}$  e/bunch )

式 6 に代入した結果、このときポートから出て来る電圧は 393 mV である。これをパワーに換算すると、3.08 mW (= 4.9 dBm)

## 3 ビームによる測定

2005/2/18 に行ったダイオード測定による空洞の感度測定を思い出す。上流のステアリングでビーム軌道を動かしながら 3 つの BPM から出力信号の振幅を測定した。同時に近くの strip-line BPM で測定したビーム位置からそれぞれの空洞 BPM の位置でのビーム位置をモニターした。

### 3.1 セットアップ

図 1 に検出回路を示す。BPM から出力をトンネル内で BPF, アンプ等を通しダイオードで検波した後トンネル外へ送り、charge ADC で信号強度を測定した。アンプは、converter モジュールの中に入っているものを流用した。BPF 等は combiner モジュールのものを流用した。

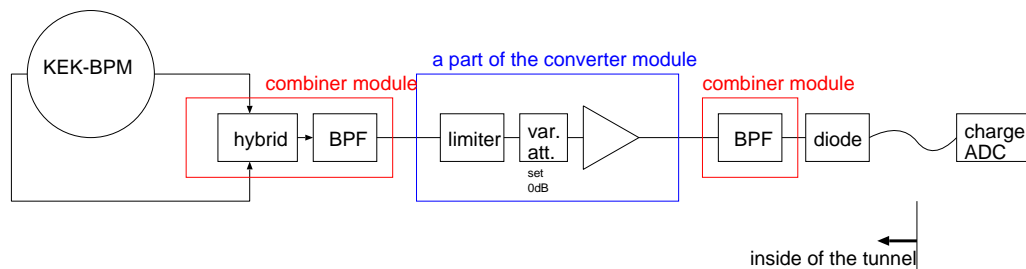


図 1: 検出回路のセットアップ。

### 3.2 ビーム測定

charge ADC に入る信号を図 2 に示す。ADC のゲート幅は 300 nsec であるが、信号が始まるのはゲートが開いた少しあと。また信号は時間とともに減衰することを考慮して、ここでは簡単のため、実効的なゲート幅を 200 nsec で、この間信号強度は一定と考えて以降の計算することにする。

図 3 は信号強度の位置依存性の測定結果。このグラフから感度は、約 10 count /  $\mu\text{m}$  と読み取れる。このときのビーム電荷は  $0.9 \times 10^{10}$  e/bunch であった。

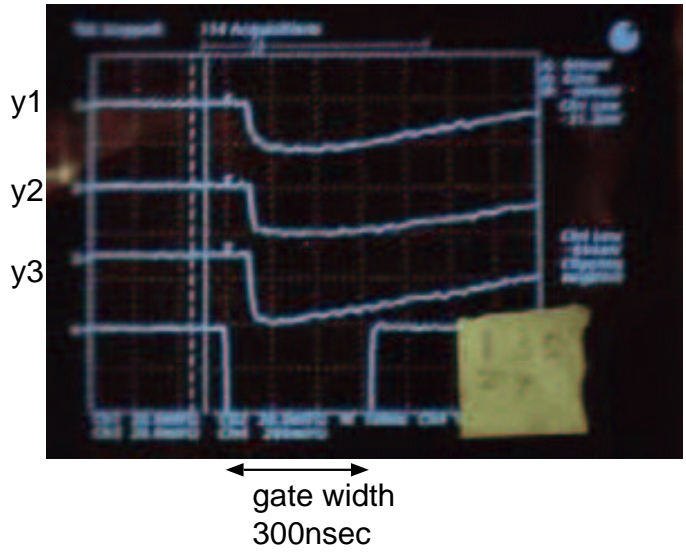


図 2: ADC への入力信号。

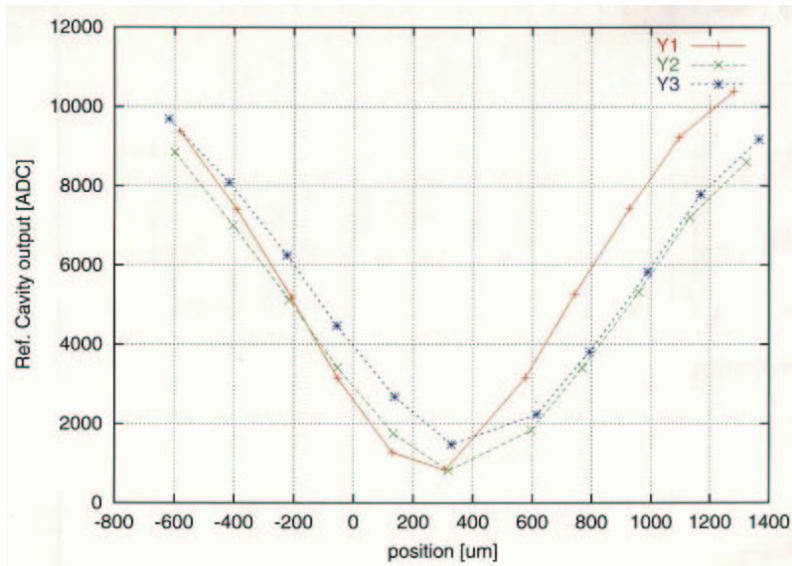


図 3: 位置感度測定の結果。

### 3.3 キャリブレーション

#### 3.3.1 ADC

charge ADC のキャリブレーションを行った。DC 電圧を ADC に入力して、300 nsec のゲート幅で積分した。図 4 の結果から、ADC の感度は  $0.36 \text{ nC}/14\text{bit}$  と計算された。

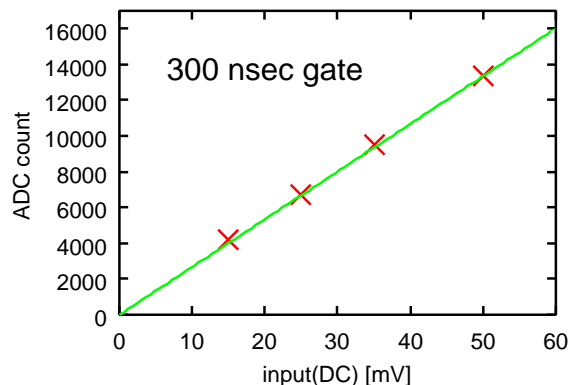


図 4: ADC のキャリブレーション。

#### 3.3.2 回路系

図 1 の回路をキャリブレーションする為に、図 5 のように発振器からの信号を入力し、ダイオードの出力電圧を測定した。スペアナで測定した入力パワーと  $50\Omega$  インピーダンスで測定したダイオードの出力が図 6 のように得られた。

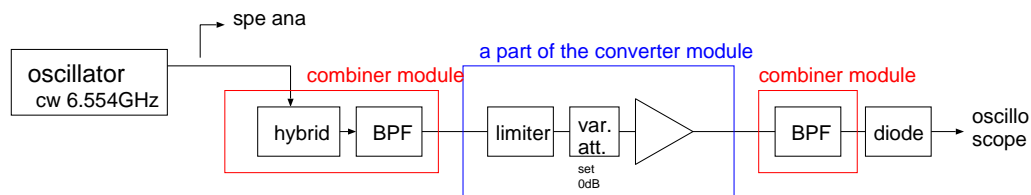


図 5: 検出回路系のキャリブレーションのセットアップ。

### 3.4 結果

実効ゲート幅 200 nsec で  $10 \text{ count}/\mu\text{m}$  であるから、 $15 \text{ count}/\mu\text{m}/300\text{nsec}$  である。これは、ADC のキャリブレーション結果を用いて ADC 入力電圧に換算すると、 $50\Omega$  インピーダンスの場合、 $56 \text{ mV}/\text{mm}$  ( $0.9 \times 10^{10} \text{ e}/\text{bunch}$ ) と計算される。

さらに、図 6 の結果を用いて空洞出力でのパワーに換算すると  $-11 \text{ dBm}/\text{mm}$  ( $0.9 \times 10^{10} \text{ e}/\text{bunch}$ ) となる。

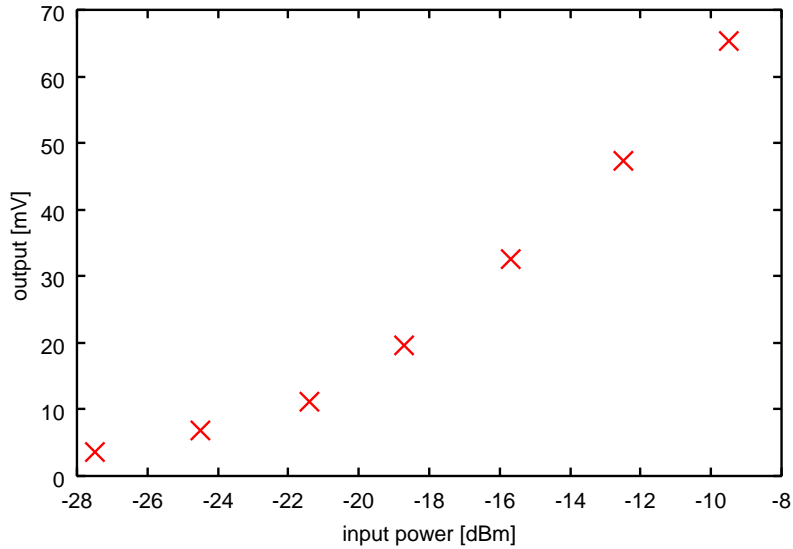


図 6: 検出回路系のキャリブレーションの結果。

## 4 考察

### 4.1 計算値と実測値の比較

ビーム測定時の条件にあわせて計算されたパワー (4.9 dBm/1mm) とビーム測定時のパワー (-11 dBm/1mm) を比較すると、16 dB の違いがある。BPM ポートから combiner までのケーブルで 2dB の減衰があるとすると違いは 14dB。これは、出力電圧にしてファクター 5 の違いである。

### 4.2 BINP 空洞との比較

BINP 空洞 (SLAC 使用) の場合、 $\beta = 0.4$  として計算すると、 $Q_{ext} = 21000$  である。式 6 をみて分かるように信号電圧は  $Q_{ext}$  の  $-1/2$  乗に依存する。BINP 空洞は KEK 空洞に対して信号電圧は 2.3 倍程度になるはずである。図 7 に KEK 空洞と BINP (SLAC) 空洞の相対的な信号強度を測定した結果を示す。信号電圧の比が 2.3 倍という計算はだいたい合っている。

### 4.3 信号立ち上りの影響

BPF、アンプ、ダイオードなどのパルス信号に対する立ち上がりが遅いために信号強度が小さく見えている可能性はないか、実験的に確かめた。図 5 の発振器をパルス RF で出力し、ダイオードで検波後の信号の立ち上がりをオシロスコープで観測した。図 8 に示す。発振器の立ち上がり込みで約 10nsec で定常状態の信号に達する。空洞内の信号は約 400nsec (振幅 1/e) 続くので、信号が十分立ち上がらない為に信号が小さく見えているわけではない。

確認のため、400MHz の BPF に空洞の信号を入力したときの立ち上がりを Spice でシミュレーションした。400 nsec (振幅 1/e) で減衰していく 6.5GHz の信号 (図 9(a)) を BPF に入力し、その出力 (図 9(b)) を調べた。出力の立ち上がり部分を拡大したのが図 9(c) である。10 nsec 以下でほぼ入力と同じレベルまで立ち上がることが確認された。

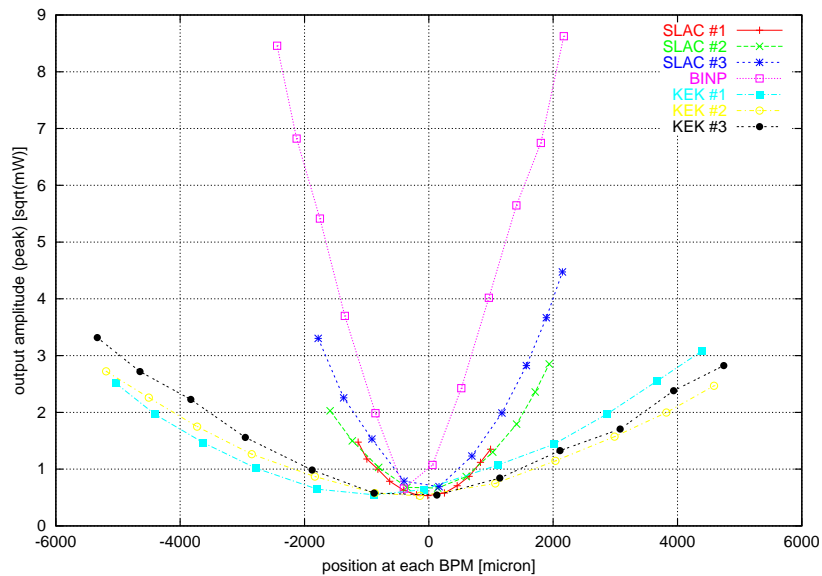
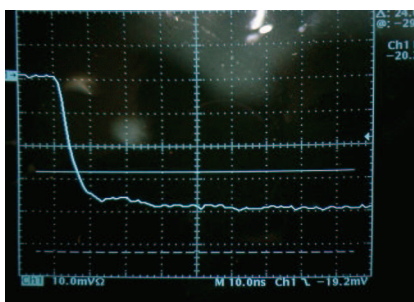


図 7: BINP 空洞との相対的な信号強度の測定結果。



BPF+AMP+BPF+Diode



Diode only

図 8: パルス RF に対する信号の立上り。発振器で 6.55GHz パルス状の RF を出力し、それを検出した信号。左図が使用した検出回路全体。右図がダイオード単体。いずれも発振器の立ち上がり込みで 10nsec 程度で立ち上がる。

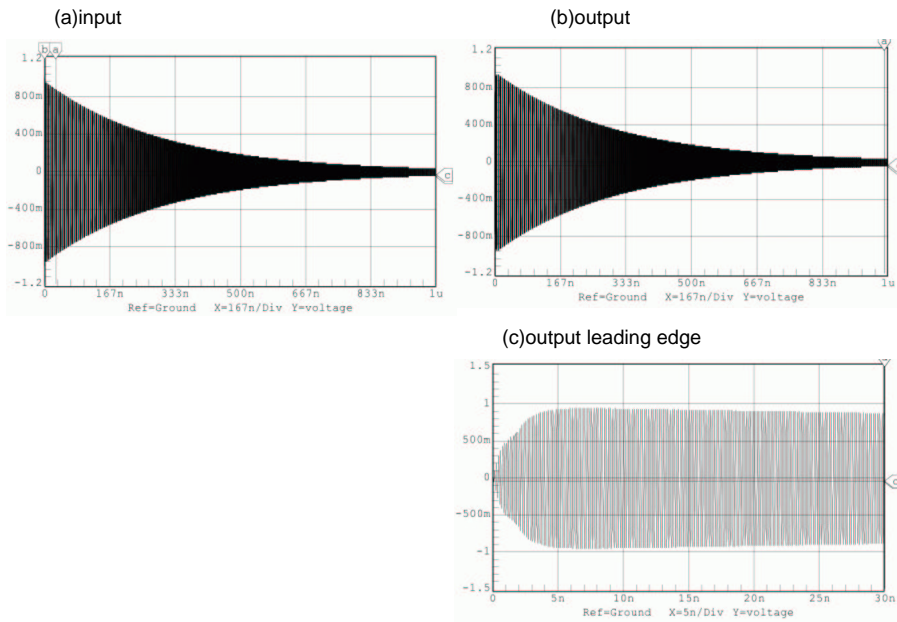


図 9: 信号の立上りのシミュレーション。

## 5 結論

空洞からの出力電圧が計算値より 5 倍程度少ない。