

# Measurement of coupling between the reference and the sensor cavity

Y.Honda, Y.Inoue

2005/8/9

## 概要

KEK cavity BPM includes a reference cavity in each BPM block. Since the distance between the reference and the sensor cavity is small, there might be a contamination of signal from the leakage of reference cavity modes. We measured the transmission from the reference cavity's port to the sensor cavity's ports and phase relation of the transmitted signal of the ports. It seems that TM<sub>010</sub> mode of the reference cavity couples to the TM<sub>110</sub> mode of the sensor cavity due to the imperfect symmetry of the fabrication. Calculating the beam induced signal in the cavities, we estimated that the amount of the contamination corresponds to 30  $\mu\text{m}$  position signal in the sensor cavity.

## 1 目的

KEK の cavity BPM は、reference 空洞と sensor 空洞が一体化した構造をしている (図 1)。2 つの空洞の距離が近いために、reference 空洞内に励振された RF が sensor 空洞に影響している可能性がある。reference 空洞の信号がどのように (大きさ、位相) sensor 空洞の読みだしに影響しているか調べる。

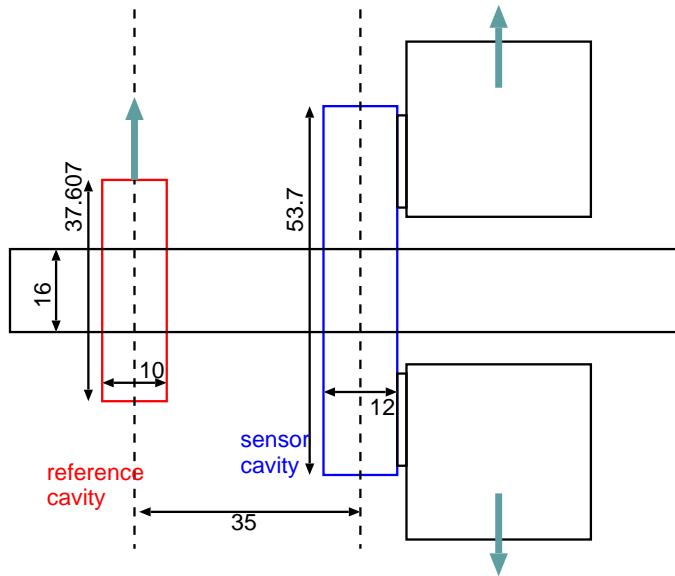


図 1: KEK cavity BPM の構成。

## 2 Reference-Sensor 間の結合の測定

### 2.1 Reference-Sensor 間の透過率の測定

ネットワークアナライザを用いて、Reference-Sensor 間の透過率を測定した。ネットワークアナライザのポート 1 を Reference 空洞の SMA コネクタに、ポート 2 を Sensor 空洞の 4 つの SMA コネクタ (up, left, down, right) のうちのひとつに接続し、S21 の測定を行った。6.55 GHz 付近に共鳴のピークが見られるのでそのピークの高さを測定した (表 1)。-53 dB から -77 dB の透過があることが分かった。また、up と down、left と right がそれぞれ同じような値であることが見て取れる。reference 空洞が sensor 空洞の dipole モードに結合しているように思われる。

表 1: Reference-Sensor 間の S21

cavity	up	left	down	right
1	-67 dB	-53 dB	-67 dB	-53 dB
2	-68 dB	-56 dB	-68 dB	-56 dB
3	-77 dB	-58 dB	-77 dB	-57 dB

### 2.2 結合信号の位相の測定

Reference 空洞の信号が Sensor 空洞から出て来ることが分かったが、さらに sensor 空洞の各コネクタから出力される信号の位相関係をみることで、sensor 空洞内のどのようなモードに対して結合しているのか調べることが出来る。空洞 BPM 用の回路モジュールと発振器を使用し、図 2 のセットアップで各ポートの相対的な位相を測定した。発振器で共鳴周波数の信号をつくり、それを 2 つに分け、片方は基準として用いるためそのまま、もう片方を空洞を経由することによる位相の影響を受けるようにした。それらを共通の L.O. で 2 段階にダウンコンバートして 1.5MHz 程度まで周波数を落としたものをオシロスコープで観測した。基準の経路の信号にたいして空洞経由の経路の信号の相対的な位相を測定した結果を表 2 にまとめる。

表 2: 各ポートの相対的な位相

cavity	up	left	down	right
1	-139.9 deg.	81.7 deg.	56.4 deg.	-98.5 deg.
2	153.8 deg.	47.8 deg.	-2.0 deg.	-140.7 deg.
3	73.9 deg.	91.2 deg.	-102.1 deg.	-98.8 deg.

up と down、left と right は 180 度の位相差を持って信号が出て来ることが見て取れる。これは、sensor 空洞内で TM<sub>110</sub> モードが励振されていることを意味すると思われる。構造が完全に対称ならば、reference 空洞の TM<sub>010</sub> 信号が sensor 空洞の横方向に依存性のあるモード (TM<sub>110</sub>) に結合することはできないはずなので、二つの空洞が偏芯していると考えられる。

## 3 空洞の結合の評価

2.1 で測定したのはコネクタからコネクタへの透過率である。しかし、最終的に知りたいのは、ビームによって reference 空洞が励振され、それが空洞間の結合によって sensor 空洞をどれだけ励振させ

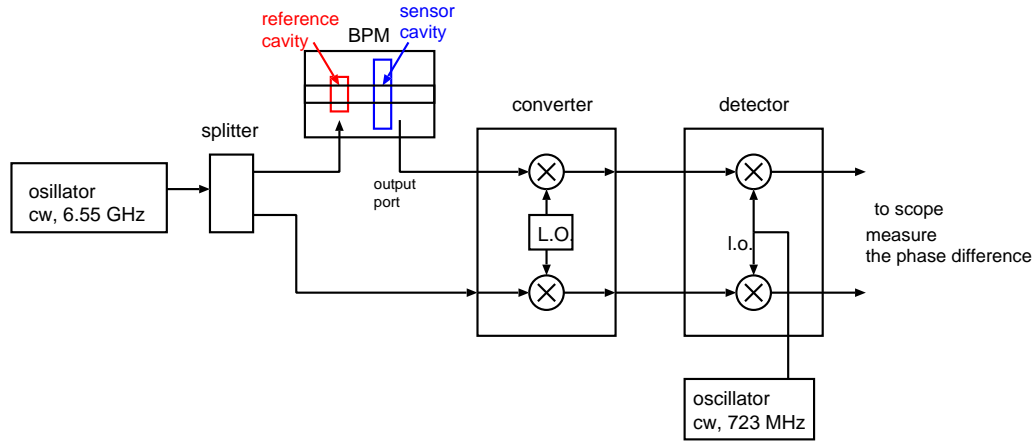


図 2: 位相測定の設定アップ。発振器で空洞の共鳴周波数である 6.55 GHz の信号をつくり、二つに分け、片方はそのまま converter モジュールへ入力する。もう一方は、BPM の reference 空洞から sensor 空洞を経由した後に converter モジュールの別のチャンネルに入力する。converter 内部で共通の L.O. を用いて IF にダウンコンバートし、detector モジュールで約 1.5 MHz の信号にさらにダウンコンバートする。detector モジュールには外部から 723MHz を reference 入力に与えた。

てしまうかである。reference 空洞に、ある量のエネルギーが蓄積しているときに、sensor 空洞はどれだけ励振するかを調べれば良い。まず、2.1 の測定時のセットアップで各空洞内に蓄積している RF のエネルギーの比を評価する。

### 3.1 reference 空洞内の蓄積エネルギー

reference 空洞の SMA コネクタからパワーを入力した時、共振時に reference 空洞に蓄積するエネルギーを評価する。空洞の  $Q$  値とアンテナのカップリング ( $\beta$ ) が分かればこれを求めることが出来る。reference 空洞の反射 (S11) 測定の結果によると、典型的に図 3 の左図に示したような共鳴がネットワークアナライザで観測される (別途レポート予定)。これから、

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} = 6500 \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} = 0.11 \quad (2)$$

共振時の蓄積エネルギー ( $U$ ) と入力パワー  $P_{in}$  の関係は、

$$U[\text{J}] = \frac{(1 + \beta)Q_L}{\beta} \frac{1 - \Gamma^2}{2\pi f_0} P_{in}[\text{W}] = 1.5 \times 10^{-6} P_{in}[\text{W}] \quad (3)$$

### 3.2 sensor 空洞内の蓄積エネルギー

sensor 空洞の反射 (S11) 測定の結果 (図 4) を用いて同様に sensor 空洞の一つのポートから入力した場合について計算できる。

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} = 8125 \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} = 0.07 \quad (\text{coupling of one port}) \quad (5)$$

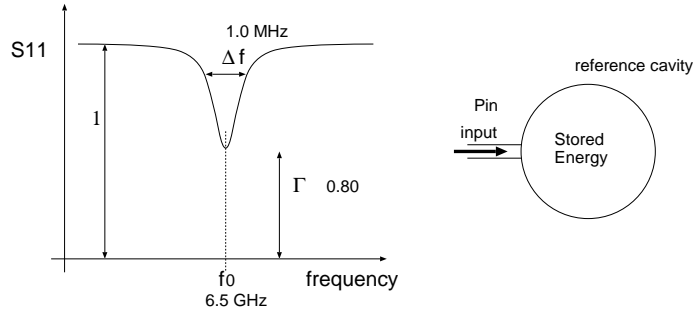


図 3: reference 空洞の反射測定の結果

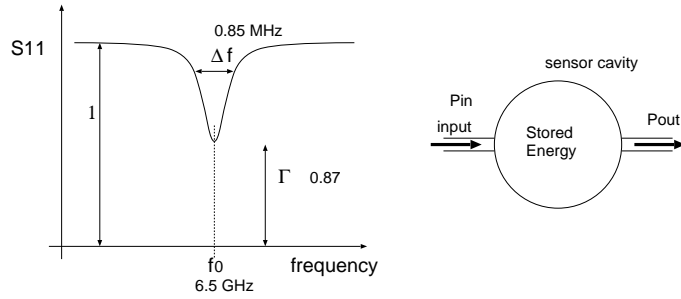


図 4: sensor 空洞の反射測定の結果

共振時の蓄積エネルギー ( $U$ ) と入力パワー  $P_{in}$  の関係は、

$$U[\text{J}] = \frac{(1 + \beta)Q_L}{\beta} \frac{1 - \Gamma^2}{2\pi f_0} P_{in}[\text{W}] = 3.0 \times 10^{-6} P_{in}[\text{W}] \quad (6)$$

となる。また、ネットワークアナライザを用いた sensor 空洞の対面ポートの透過率の測定 ( $S_{21}$ ) の結果は -25dB である。つまり、入力エネルギー ( $P_{in}$ ) と対面ポートからの出力エネルギー ( $P_{out}$ ) の関係は、

$$P_{out} = 10^{\frac{-25[\text{dB}]}{10}} \times P_{in} = 0.0032 \times P_{in} \quad (7)$$

であり、空洞内の蓄積エネルギー ( $U$ ) と  $P_{out}$  は

$$U[\text{J}] = 0.9 \times 10^{-3} P_{out}[\text{W}] \quad (8)$$

と表される。

### 3.3 reference 空洞内と sensor 空洞内のエネルギーの比

reference 空洞のポートから sensor 空洞のポートへの透過率は、2.1 によると -53 dB から -77 dB である。reference 空洞のポートからの入力パワーを  $P_{rin}$ 、sensor 空洞のポートからの出力パワーを  $P_{sout}$  とし、それぞれの空洞に蓄積されているエネルギーを  $U_r$ 、 $U_s$  とする。

ここではまず、 $S_{21}$  が -77 dB の場合について計算する。

$$P_{sout}[\text{W}] = 10^{\frac{-77[\text{dB}]}{10}} \times P_{rin}[\text{W}] = 1.9 \times 10^{-8} \times P_{rin}[\text{W}] \quad (9)$$

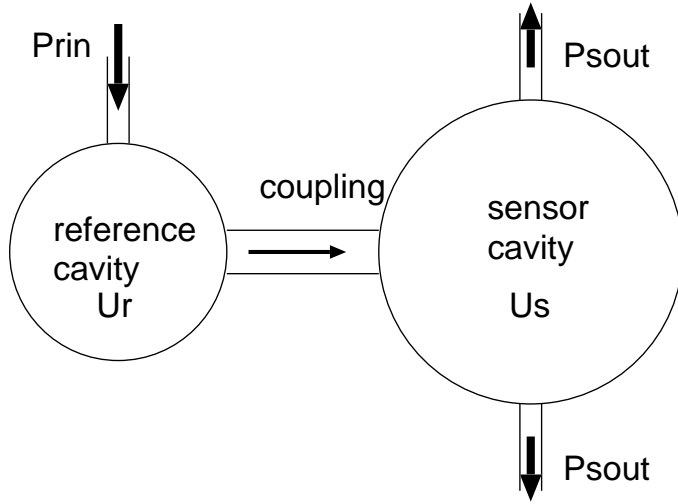


図 5: reference 空洞から入力、sensor 空洞からの出力の関係

これまでの議論から、

$$U_r[\text{J}] = 1.5 \times 10^{-6} P_{rin}[\text{W}] \quad (10)$$

$$U_s[\text{J}] = 0.9 \times 10^{-3} P_{sout}[\text{W}] \quad (11)$$

の関係があるので、 $U_s$  と  $U_r$  の比は、

$$\frac{U_s}{U_r} = 1.1 \times 10^{-5} \quad (12)$$

となる。

## 4 ビームによって空洞内に誘起されるパワーの見積り

ビームが空洞を通過したときに空洞内に誘起される RF について評価する。ビームによって空洞に誘起される RF パワー ( $U$ ) は、ビームの電荷 ( $q$ )、空洞の各モードにたいする規格化シャントインピーダンス ( $R/Q$ )、各モードの角周波数 ( $\omega$ ) を用いて、

$$U = \frac{\omega}{4} \left( \frac{R}{Q} \right) q^2 \quad (13)$$

と表される。いま興味があるのは、reference 空洞の TM010 モード (6.55 GHz) 及び sensor 空洞の TM110 モード (6.55 GHz) である。 $q$  と  $\omega$  に関しては同じなので、 $R/Q$  を求めて比較すればよい。MAFIA を用いて空洞の固有モード解析を行い、 $R/Q$  を求めた。

### 4.1 Reference 空洞の $R/Q$

図 1 に示されている reference 空洞部の形状を入力した。読みだしのアンテナ等は省略し、単にビームパイプ (16 mm dia.) がついたピルボックス空洞 (38 mm dia., 10 mm gap) である。固有モード解析を行い、最低次のモード (TM010) について空洞内の全エネルギー ( $U$ )、中心軸に沿った電場の積分 ( $V$ ) を求め、以下の式から  $R/Q$  を導出した。

$$R/Q = \frac{V^2}{\omega U} = \frac{|\int E_z \exp(i\omega z/c) dz|^2}{\omega \frac{\epsilon_0}{4} \int |E|^2 dV} \quad (14)$$

その結果、reference 空洞の TM010 モードの  $z$  軸上のビームについて  $R/Q$  は  $101 \Omega$  と求まった。

## 4.2 Sensor 空洞の $R/Q$

同様に、図 1 に示されている sensor 空洞部の形状を入力した。読みだしのアンテナや導波管部等は省略し、単にビームパイプ (16 mm dia.) がついたピルボックス空洞 (54 mm dia., 10 mm gap) である。固有モード解析を行い、TM110 モードについて今回は中心軸から 3mm オフセットがついた直線に沿っての電場の積分 ( $V$ ) を求めた。その結果、sensor 空洞の TM110 モードの 3mm オフセットのビームについての  $R/Q$  は  $12.4 \Omega$  と求まった。 $V$  はオフセットに比例するため、 $R/Q$  はオフセットの自乗に比例する。1 mm のオフセットの場合は  $1.4 \Omega$ 、100  $\mu\text{m}$  のオフセットの場合は  $0.014 \Omega$  となる。

## 5 reference 空洞からの信号の混ざり込みの位置読みだしへの影響

3.3 で reference ポートから sensor ポートへの  $S_{21}$  が  $-77\text{dB}$  の場合について、

$$\frac{U_s}{U_r} = 1.1 \times 10^{-5} \quad (15)$$

と求まった。これを用いて計算すると、4.1 で求めた reference 空洞の  $R/Q$  に対して、sensor 空洞内に reference 空洞起源で誘起される RF について (こういう言い方が正しいか分からないが、) 実効的な  $R/Q$  は reference 空洞の  $R/Q$  ( $101\Omega$ ) に対して  $\frac{U_s}{U_r}$  倍になると見積られる。即ち、sensor 空洞内に励振する嘘の信号の  $R/Q$  は  $1.1 \times 10^{-3}\Omega$  相当である。

これは、100  $\mu\text{m}$  の真の位置信号に対して、 $10^{-1}$  の大きさである。 $R/Q$  はオフセットに自乗で依存するので、この大きさはオフセットにすると 30  $\mu\text{m}$  相当である。ビーム位置に依存せずに 30  $\mu\text{m}$  相当のダイポールモードが励振する。

## 6 結論

reference 空洞のポートから sensor 空洞のポートへの透過率を測定した結果、 $-77\text{dB} \sim -53\text{dB}$  という値が得られた。また、透過モードの位相の測定から、reference 空洞の信号が sensor 空洞のダイポールモードに結合して、それが slot、wave guide を通って透過してくると思われる。空洞の  $Q$  値と  $\beta$  の測定値を基にしてこのときの reference 空洞と sensor 空洞のエネルギー比を見積もり、実際にビームによってどれだけのエネルギーが各空洞に励振するかを計算した値と比較し、reference 空洞起源で sensor 空洞に励振されるダイポールモードの大きさを求めた。この大きさはオフセットにすると 30  $\mu\text{m}$  相当である。