

J-PARC 50 GeV Ring の BPM 検出器

外山 毅^{A)}、荒川 大^{A)}、豊川良治^{B)}、中村有夫^{A)†}、林 直樹^{B)}、三浦孝子^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 日本原子力研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

J-PARC (大強度陽子加速器) 50 GeV Main Ring の Beam Position Monitor 検出電極について、設計方針、開発経緯を述べる。検出電極としては、対角線分割・円筒形状の静電型電極を採用し、ビーム位置線形応答を確保した。ベンチテストの結果、特に位置感度の周波数特性が、電極の静電的結合で生じることを示す。

1 はじめに

大強度陽子加速器 (J-PARC) の 50 GeV Main Ring (MR) の特徴は、ビーム強度が大きいこと：平均ビーム電流 = 12.4—12.8 A、ピークビーム電流 = 41.3—220 A、ビームパンチの周波数成分の主要な部分が数 10 MHz 以下にある、ビームサイズが大きい、ということである[1]。ビーム位置モニター (BPM) の検出電極には、ポタン電極、平行分割電極 (ストリップライン電極)、「Nassibian」型電極[2]、対角線分割電極などがあるが、上記の観点から、位置の線形性を重視し、円筒形の対角線分割の静電型電極を採用した。その他の重要な留意事項は、結合インピーダンスである。

本論文では、これらの設計方針について具体的に述べる。そして、ワイヤー法による校正の結果明らかになった、位置感度係数の周波数依存性について述べる。電極間の静電容量の結合の効果を考察することにより、この現象を説明する。

2 BPM の設計

BPM は、ビーム強度モニター、ビームロスモニター[3]と並んで、加速器の調整、運転に必須のビーム診断装置である。ここでは、50 GeV MR のほぼ全ての四極電磁石に隣接して設置される BPM について議論する。主な目的はビームの閉軌道の観測である。その他、1 回通過での軌道観測、RF に対する位置フィードバックも行う。

閉軌道の位置検出の分解能は $\pm 0.1\text{mm}$ を目標としている。閉軌道の歪みの補正データとしての必要分解能、ビームによる BPM 電極位置校正、ビームによる光学系の診断に必要な最低限の値である。

信号処理は、基本的にデジタル処理を行う[4]。RF に対する位置フィードバックについては処理速度の観点から別の処理回路 (アナログ処理) を使う。

設計に関係するビームパラメータを第 1 表に示す。RCS 181MeV 入射時は、RF 周波数が 2 倍になる。

表 1: ビームパラメータ (RCS 400MeV 入射時)
パンチ波形の関数形として $\cos^2 \omega t$ を仮定した。

項目	記号	数量	単位
Peak beam current	I_p	41.3 — 220	A
Average beam current	$\langle I \rangle$	12.4 — 12.8	A
Speed of the beam	β	0.9712 — 0.9998	
Bunch length	τ	360 — 67	ns
Bunching factor	Bf	0.3 — 0.058	
Revolution frequency	f_{rev}	186 — 191	kHz
RF frequency	f_{RF}	1.67—1.72	MHz

ビーム強度 (電流) が大きいので、電流感度は小さくて良い。一方ビームサイズは大きい。電極で検出されるビーム位置分解能を良くするためには、電極からの信号のビーム位置に対する非線形性が十分小さい必要がある。この観点から、採用すべき電極形状は、静電型電極の「Nassibian」型電極、または対角線分割電極とした。

「Nassibian」型電極[2]は、上下左右の電極が対称に設置される。しかしこれらの信号を合計しても位置依存性が消えないので、規格化用電流値 (Σ 信号) としては使えない。別電極が必要となる。さらに、電極形状が曲線で構成されるため製作は複雑になる。試作品としてセラミックパイプにコーティングされた金属面により「Nassibian」型電極を製作したが、最終的には、縦方向結合インピーダンスが大きいことが判明し、不採択とした。

対角線分割電極は、図 1 の通り上下、および左右の電極がそれぞれ対になって構成される。

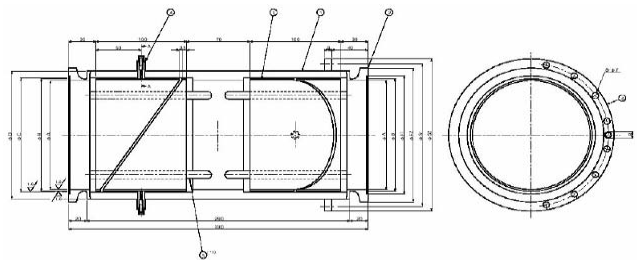


図 1: ビーム位置モニター検出電極。

検出器の長さは 330 mm (フランジ端面間)、電極内径は、ビーム軌道、形状に合致させるために 4 種類: $\phi 130$ 、 $\phi 134$ 、 $\phi 165$ 、 $\phi 200$ mm、とした。電極自体の長さは 100 mm である。電極外径と真空パイプ内径との間隙は 1 mm とした。材質は、電極、真空パイプ、SMA 同軸フィードスルー共に、SUS316L および絶縁部にはアルミナのみを使用した。非磁性の理由は、ほとんど全ての検出器が補正 2 極電磁石の中に設置されるからである。低域遮断周波数の補正は外付けコンデンサにより行うことを考えた。

† 石川島播磨重工業株式会社より共同研究員として滞在。

3 ワイヤー法による位置感度の測定

検出器の両側に内径の等しいパイプを接続し、中に外径 $\phi 0.4 \text{ mm}$ のスズメッキ銅線を張った。両端にはインピーダンス整合用の抵抗を接続した。検出器+パイプはステージに固定され、ワイヤーが $10 \mu\text{m}$ の精度で移動する。Network analyzer (hp8753E) を用いて、ワイヤーから各電極への透過係数 S21 を測定した。ここでは内径 $\phi 130 \text{ mm}$ の試作機 (寸法が少し異なる) について報告する。測定結果を図 2、3 に示す。

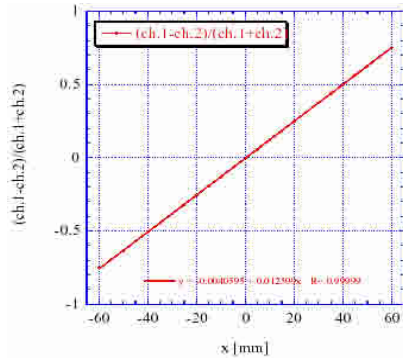


図 2 : ワイヤー法による位置応答測定。

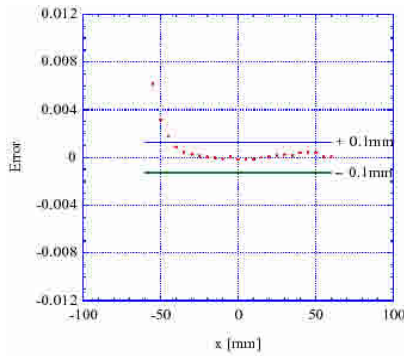


図 3 : 位置応答の直線からのずれ。

$x < 40 \text{ mm}$ で $\pm 0.1 \text{ mm}$ を達成している。 $x = -50 \text{ mm}$ 付近の大きな変位の原因は不明であるが、測定方法の問題、電極の問題の 2 つの観点から考察中である。

4 位置感度の周波数依存性

閉軌道の観測では RF 周波数での検波を行うため、RF 周波数 (f_{RF}) での信号出力、および位置感度が重要である。 f_{RF} の最終的な仕様は、 $1.67\text{--}1.72\text{Hz}$ であるが、当初の RCS 181MeV 入射時は、上記の 2 倍を予定している。

さらに、1 回の通過での軌道観測では、 10 MHz 程度の周波数帯域まで観測するので、この領域も問題となる。

検出器 1 号機について、前節と同様ワイヤー法により、位置感度を測定した。まず、外付け素子なしの検出器単体での測定の結果、図 4 のような結果を得た。

周波数による感度係数 K の変化は数%で、精密な位置測定には影響を与える大きさである ($(L-R)/(L+R)=Kx$)。

原因として考えられるのは、対向電極の静電的結合である[5]。以下で、4 電極を考慮したモデルを述べる。

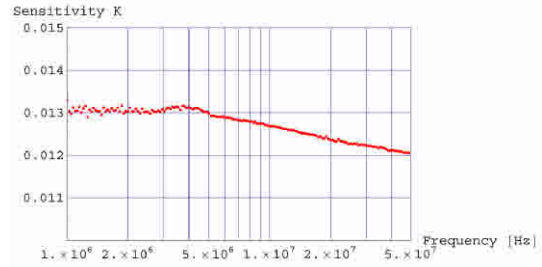


図 4 : BPM 検出器の位置感度の測定値 (外付け素子なし、 50Ω 終端)。

各電極の電位 V_i 、電流 I_i を用いて、各電極の容量係数 q_{ij} 、誘電係数 q_{ij} ($i \neq j$) の定義式を時間微分することにより ($i, j=1, \dots, 4$)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}_C = j\omega \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix},$$

を得る。下付き添字 C は静電容量を流れる電流の意。負荷抵抗 R についてのオームの法則、およびビームによって電極に誘導される電荷の時間微分が電流であることから、以下の式を得る。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}_R = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}_C + \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}_R = j\omega \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix}.$$

ここで ω は角周波数、 λ は誘導電荷である。電流を消去して各電極のビームによる誘導電荷と出力電圧のみの式

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = j\omega \left(j\omega \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} + \frac{I}{R} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix},$$

が得られる。 I は単位行列である。右辺の $(\dots)^{-1}$ は逆行列の意。各電極に誘導される電荷は、円筒対角線分割の場合には以下のようにになると考えられる：

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{x}{a} \\ 1 - \frac{x}{a} \\ 1 + \frac{y}{a} \\ 1 - \frac{y}{a} \end{bmatrix} I_B \frac{g\ell}{v},$$

a : inner radius of the electrode
 I_B : beam current
 $g \cong 0.5$: geometrical factor
 ℓ : electrode length
 v : speed of the beam

従って、各電極の出力電圧が、ビーム位置 (x, y) および周波数の関数として得られる：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = j\omega \left(j\omega \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} + \frac{I}{R} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 + \frac{x}{a} \\ 1 - \frac{x}{a} \\ 1 + \frac{y}{a} \\ 1 - \frac{y}{a} \end{bmatrix} I_B \frac{g\ell}{v}.$$

BPM によるビーム位置の推定値は、

$$x' = a \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}, \quad y' = a \frac{V_3 - V_4}{V_3 + V_4},$$

となる。ここで、実際のビーム位置 (x, y) と BPM による推定値を区別するために (x', y') とした。

上記のモデルを適用するにあたって、内半径 $a=130/2$ mm を使い、対角線分割部分と単純円筒部の比を 0.171 として補正を加えた。 q_{ij} (容量係数、誘電係数) としては、Network analyzer による測定値を使った。Port1, Port2 (50Ω系) を 4 電極のうち 2 つに繋ぎ、他のポートを 50Ωで終端した。その配置で散乱行列を測定し、さらに $[q_{ij}]$ に変換した結果、以下の値を得た。単位は pF である。

$$[q_{ij}] = \begin{bmatrix} 197.535 & -7.457 & -0.004 & -0.018 \\ -7.457 & 205.356 & -0.020 & -0.066 \\ -0.004 & -0.020 & 207.689 & -7.301 \\ -0.018 & -0.066 & -7.301 & 210.604 \end{bmatrix}.$$

図 4 に対応する計算値を図 5 に示す。良い一致が得られている。出力電圧の低域遮断周波数 (@-3dB) : 約 16.5 MHz の一致も良かった。

次に外付け素子を含む計算を行った。図 6、7 に、それぞれ、外付けのコンデンサ 2000 pF、あるいは抵抗 455 Ω を付けた場合についての計算および測定結果を示した。両者の一致は良い。少なくとも 1—50 MHz では、このモデルにより周波数特性を良く説明できることがわかる。

検出器は製作を終了しているので、今後、外付けの素子の検討を行う。コンデンサを外付けすると、電極の静電容量とコネクタのインダクタンスにより 100MHz 付近で共鳴が生じる。これを含めて最適化を行っていく必要がある。

水平 (左右) 電極対と垂直 (上下) 電極対の間の結合についても、上記のモデルで計算でき、小さいことが示された。測定でも Network analyzer の検出感度以下だった。

5 まとめ

J-PARC 50 GeV MR の BPM 検出電極は、ビーム位置線形応答を重視し、円筒形状対角線分割の静電型電極を採用した。各四極電磁石付近の水平・垂直方向の閉軌道を同時測定する予定である。ワイヤー法による位置校正の結果、位置応答の直線性は $|x| < 40$ mm で目標値 ± 0.1 mm 以下を達成した (試作機)。位置感度については周波数特性を持つことが判明した。原因は対向電極の静電的結合のためであった。今後、外付け素子の最適化を行う。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki, eds., Accelerator Technical Design Report for J-PARC, KEK Report 2002-13.
- [2] G. Nassibian, CERN SI/Note EL/70-13 (1970). M.Rabany, Part. Acc. Conf., IEEE NS20 (1973) 656.
- [3] S. Lee *et al.*, 本プロシーディングス.
- [4] 林 直樹 他, 本プロシーディングス.
- [5] R. E. Shafer, AIP Conf. Proc. 249, p.601 に単純な等価回路が示されているが具体的な議論は無い。

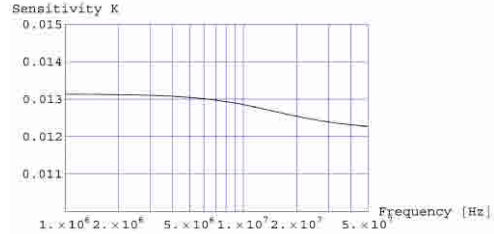


図 5 : BPM 検出器の位置感度の計算値 (外付け素子なし、50Ω終端)。

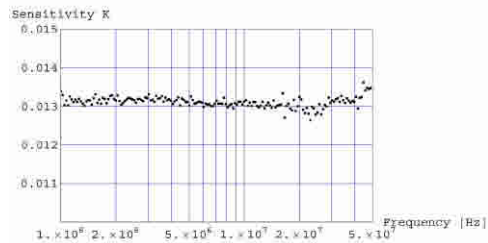
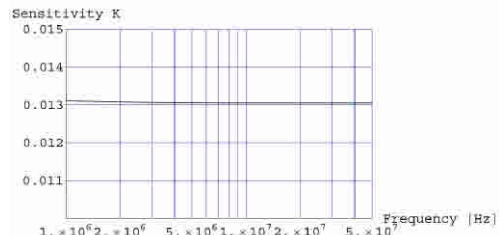


図 6 : BPM 検出器の位置感度の計算値 (上) と測定値 (下) (外付けコンデンサ 2000 pF、50Ω終端)。

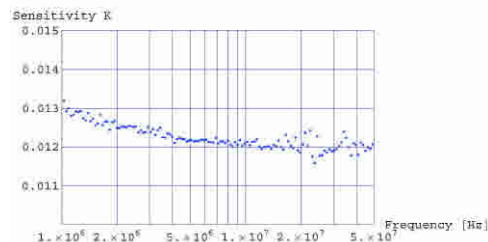
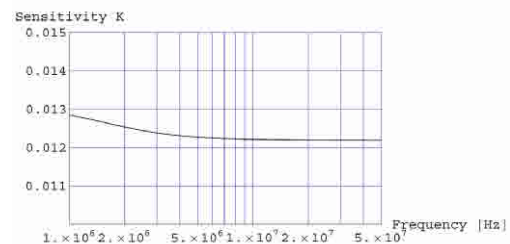


図 7 : BPM 検出器の位置感度の計算値 (上) と測定値 (下) (外付け抵抗 455 Ω、50Ω終端、合計 505 Ω)。