

Stripline BPM at the J-PARC MR

Takeshi Toyama^{#A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Kotoku Hanamura^{B)}

^{A)} KEK, J-PARC

2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-0045

Abstract

In the J-PARC MR the regular BPMs are installed at almost all the quadrupole magnets. They have a limited band width $f < 10$ MHz. In order to observe a beam position variation in wider frequency range such as $f > 500$ MHz, two stripline BPMs are designed and installed. The pickup consists of four metal rods whose characteristic impedance is 202Ω and connected to the upstream 50Ω terminal and the downstream short circuit.

J-PARC MR におけるストリップライン BPM

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Complex) MR に設置した 186 台の BPM (Beam Position Monitor) システムは、処理回路を含めると周波数帯域 < 10 MHz である。これらは、バンチ毎の位置、閉軌道を観測することが目的である[1]。一方、電子雲、高周波インピーダンス源の引き起こすマイクロウェーブ周波数領域のビーム位置を観測する要求もある。このため広周波数帯域 BPM を製作、設置し、ビームテストを行なっている。

通常のストリップラインでは周波数特性(モノポール・モード)の伝送インピーダンスの変動が大きい。これを解決するため、ストリップラインの特性インピーダンスとして、信号伝送ケーブルの特性インピーダンス 50Ω と異なる値: $\sim 200 \Omega$ を採用し、平坦な周波数特性を得た[2]。ここでは J-PARC での呼称に従い SPM (single-pass monitor) と呼ぶ。基本設計、ワイヤー測定、“Microwave studio”によるシミュレーション結果、およびビームに対する応答

の測定結果について述べる。

2. 設計

文献[3]より、ストリップライン検出器として、例えば、上流端で 50Ω 、下流端でショート、ストリップラインの特性インピーダンスを 200Ω とすると平坦な周波数特性が得られることがわかる。

J-PARC MR の広帯域周波数 BPM としては、低域遮断周波数は周回周波数 (~ 190 kHz) あるいは RF 周波数 (~ 1.7 MHz) 以下、高域遮断周波数は、電子雲不安定性が起きるとされる周波数 ($600 - 800$ MHz) [4] をカバーしたい。一方で信号強度は、設計電流値の $1/10$ 程度から数 100 mV 程度の出力が、SN を考慮すると望ましい。

今回は以下のようなパラメータで設計製作した。

ロッド径	$\phi 3$ mm
位置	$\phi 134$ mm 上の上下左右
長さ	180 mm
パイプ内径	$\phi 184$ mm

図 1 に設計図および検出器の写真を示す。

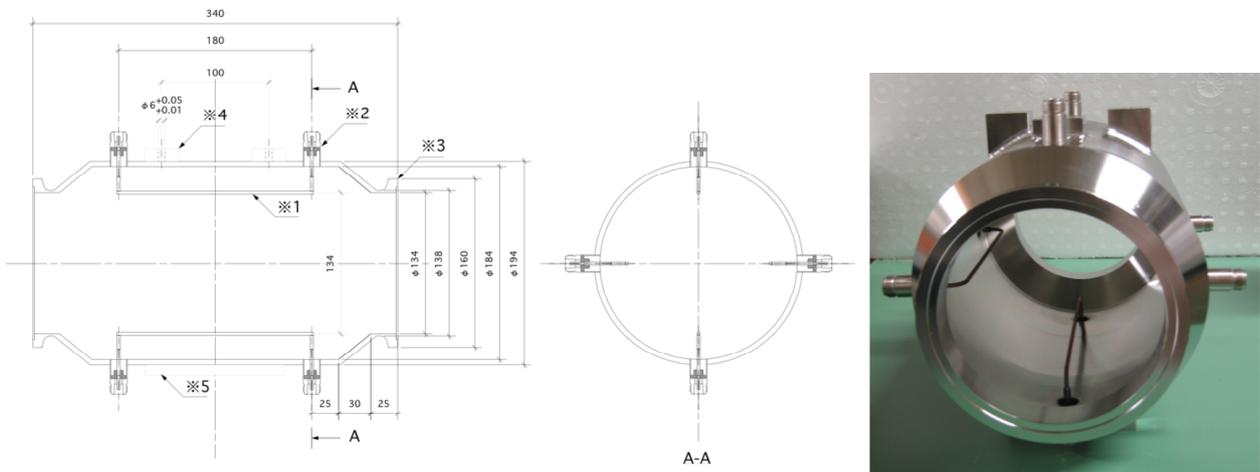


図 1 : ストリップライン BPM

[#] takeshi.toyama@kek.jp

ビームパイプとロッドによって構成される伝送線路の特性インピーダンスは 202Ω である。上記のパラメータで周波数特性を求めた結果を図 2 に示す [2]。低周波で位置感度は、ロッド半径 $a = 92\text{ mm}$ 、パイプ内半径 $b = 65\text{ mm}$ を使って、

$$\kappa = \frac{x}{\left(\frac{\Delta}{\Sigma}\right)} = \frac{\ln\frac{b}{a}}{\frac{b}{a} - \frac{a}{b}} \cdot a \approx 45\text{ mm}$$

を得る。

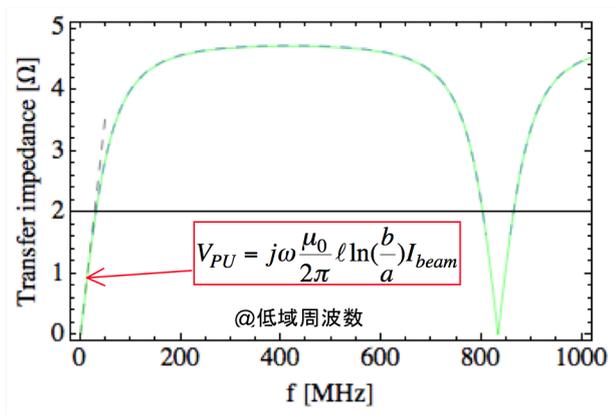


図 2 : 周波数特性

3. ワイヤー測定

検出器の性能を確認するために、ワイヤーによる校正を行った。銅コーティング・ピアノ線（直径 $\phi 260\mu\text{m}$ ）を張ってこれに電流を流し、このワイヤー位置と、出力電圧の関係をネットワークアナライザ（Rohde & Schwarz, ZVT8）により測定した。両端に $\sim 2\text{m}$ および $\sim 2.5\text{m}$ のパイプを取り付けた。一旦時間領域に変換し、端部での反射の影響を除去するために、反射時間以前の信号のみを切り出して、再び周波数領域に戻した [5]。5mm おきにワイヤーを移動した場合の水平方向の Δ/Σ ($= (L-R)/(L+R)$) の計算結果を図 3 に、位置感度係数を図 4 に示す。

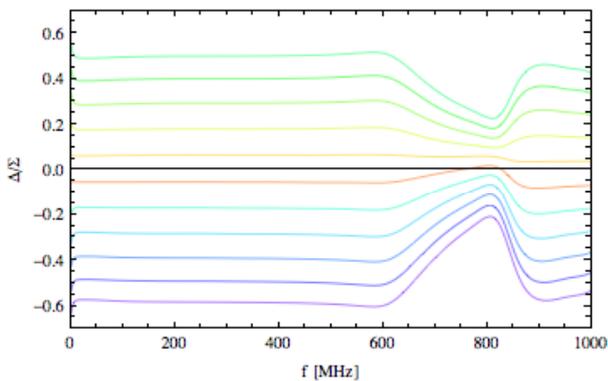


図 3 : 水平に変位させたワイヤーに対する応答

縦方向（longitudinal）の伝送インピーダンスは、図 5 の赤線の通りで、650M-700MHz でピークを持つことがわかった。

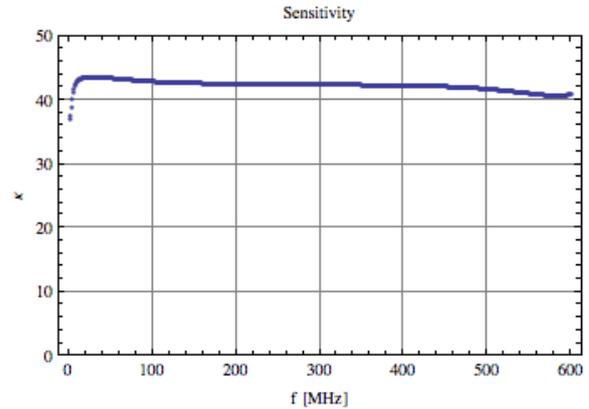


図 4 : 位置感度係数の周波数特性

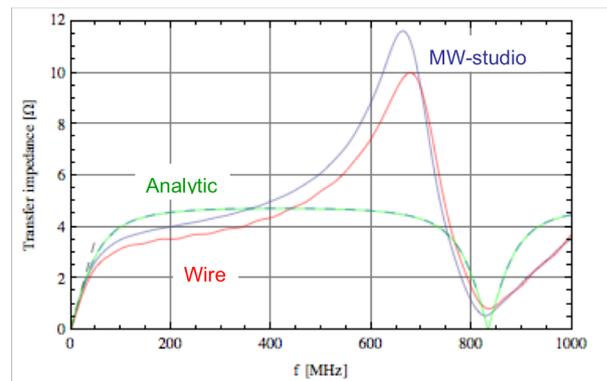


図 5 : 縦方向の伝送インピーダンス

赤線：ワイヤー測定の結果、
青線：CST STUDIO SUITE によるシミュレーション結果、
緑線：解析的計算（上流端 50Ω 、下流端 ショート）。

4. “CST STUDIO SUITE” による電磁場解析

上記の結果を検証するために、電磁場シミュレータ “CST STUDIO SUITE” [6] の PARTICLE STUDIO により、縦方向にガウシアン分布を持った 30GeV 陽子線の発生する信号を求めた。3次元計算モデルの形状は図 6 の通りである。周波数応答を高周波まで求めるために、ガウシアン分布は、パンチ長 $\sigma = 0.5\text{ ns}$ と実際のビームより短くした。得られた出力信号波形は図 7 の通りである。入力と出力の周波数スペクトルの比をとることにより、検出器の伝送インピーダンスを算出した。結果を図 5 に青線で示した。

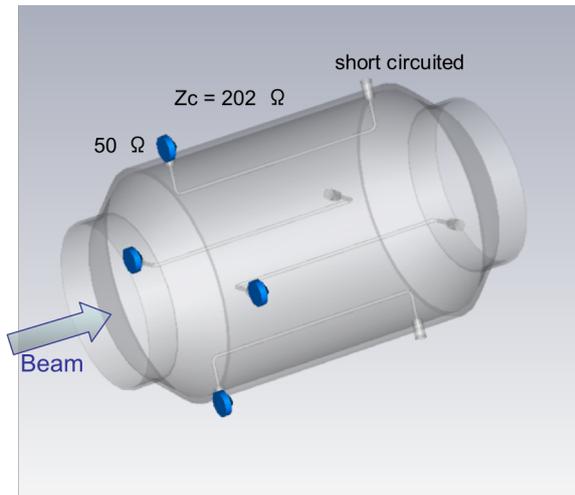


図 6 : シミュレーションのモデル

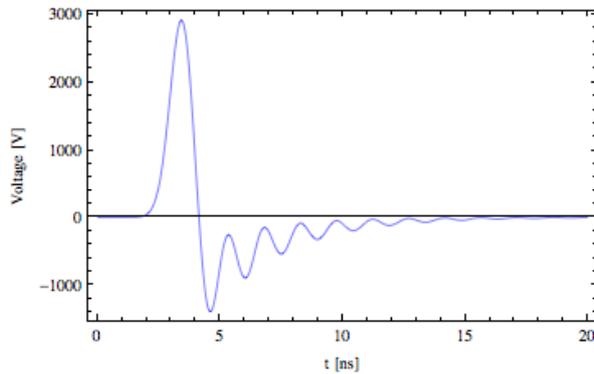


図 7 : シミュレーション結果
50 Ω 終端に発生する電圧。

5. ビームに対する応答

検出器の応答を検証するために、ビームに対する応答を測定した。ビームの時間構造は WCM (Wall Current Monitor) によって測定した。測定データの信号ノイズ比を改善するために 59 バンチ分のデータの平均値をとった結果を図 8 に示す。

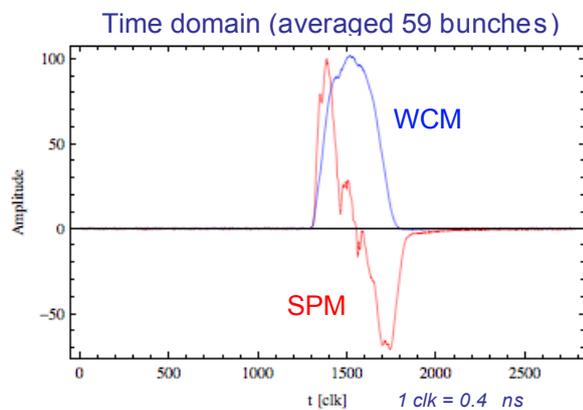


図 8 : ビームに対する応答

この時間領域のデータに対応する周波数スペクトルを図 9 に示す。WCM 検出器、ケーブル、およびバッファアンプの周波数特性は補正してある。SPM 検出器のケーブルの周波数特性の補正は未実施である。これから得られた縦方向の伝送インピーダンスを図 10 に示す (縦軸の校正は未実施)。本検出器を使って測定した、入射エラーに起因するバンチ内振動の測定例を図 11 に示す。

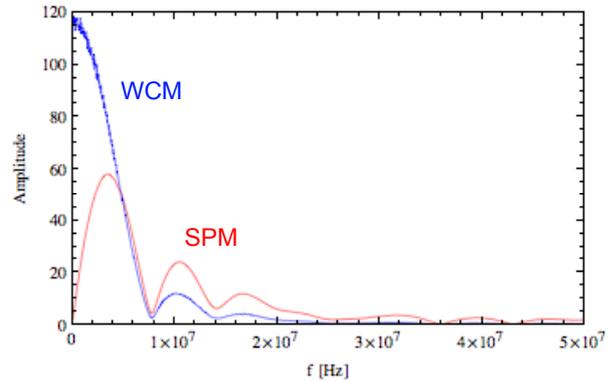


図 9 : ビームに対する周波数応答

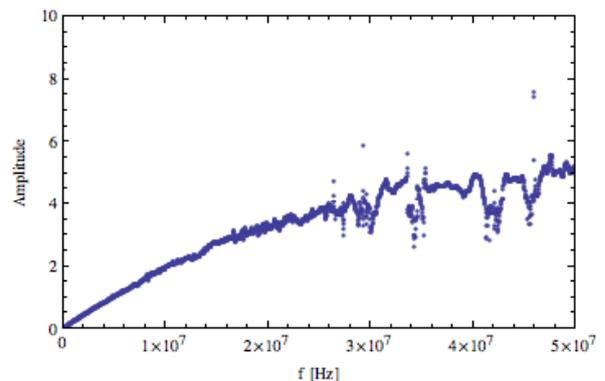


図 10 : ビームによって求めた伝送インピーダンス

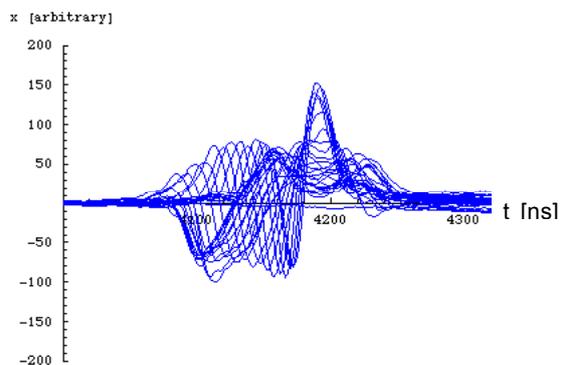


図 11 : 入射エラーによるバンチ内振動

図 1 1 は、SPM 左右電極からの信号を積分（周波数領域での微分特性の補正）、差をとり、MR 入射直後から 20 ターン（ $\sim 108\mu\text{s}$ ）毎に 500 ターン（ $\sim 2700\mu\text{s}$ ）までを重ね書きしたものである。バンチ内振動の詳細な解析は今後の課題である。

6. 議論

平坦な周波数特性を持つと期待されるストリップライン BPM を設計製作し、応答特性を測定した。当初の理想的なモデルによる解析計算とは異なり、ワイヤー校正およびシミュレーション計算結果により、650M - 700MHz でピークをもつことが判明した。この周波数は、ロッドの長さ、またはパイプ外壁の窪みの長さによる共振周波数に対応すると考えられた。そこで、ストレートな外壁のパイプの場合のシミュレーション計算を行ったが、結果は同じであった。一方、解析計算において、ショート端を 0Ω とせず、 $j\omega L$ ($L = 0.03\mu\text{H}$) としたところ、図 1 2 の緑線のように、シミュレーション結果とほぼ同じ結果を得た。このことから、下流端のショート接続が、実際にはインダクタンスとして働いてしまい、図のようなピークを持ってしまったと推測される。

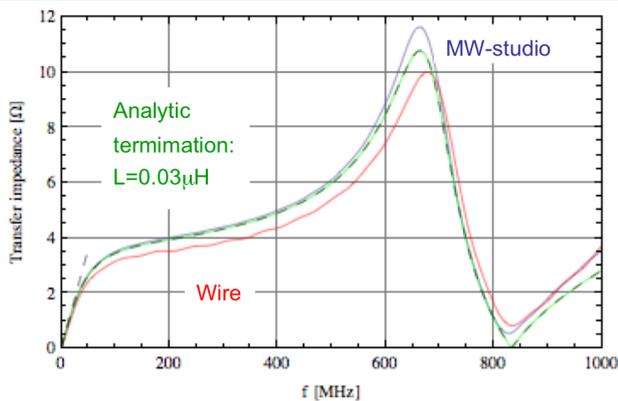


図 1 2 : 水平に変位させたワイヤーに対する応答
下流端を $j\omega L$ ($L = 0.03\mu\text{H}$) とした場合。

ビームによる校正も試みた。今回はバンチ長が長く、 $\sim 30\text{MHz}$ を超える高周波側の特性が測定できなかった。ショートバンチでの測定を試みたい。また、SPM に接続したケーブルの補正をする必要がある。

縦方向伝送インピーダンスの周波数特性改善の課題として、

- (1) $f = 650\text{M} - 700\text{MHz}$ のピークを減らす、
- (2) 平坦な周波数帯域を広げる、
- (3) 高域遮断周波数を増やす、

が考えられる。(1)に関しては、下流端のインダクタンスを減らすことが考えられる。(2)の平坦な周波数帯域の拡大は、ロッドの特性インピーダンスを増やす、上流端のインピーダンスを減らす、が効果を持つ。(3)についてはロッド長を減らすことで実現できる。これらにより、現在、平坦度 約 600MHz 以

下に制限されている位置感度係数の周波数特性の改善がなされるかも検討する必要がある。今後、伝送インピーダンス減少の得失を考慮しながら、伝送インピーダンスおよび位置感度係数の平坦度が 1 GHz 程度の検出器を目指して、最適化設計を行っていきたい。広帯域周波数ストリップライン検出器としては、指数関数の形状の電極を採用したストリップライン検出器[7]と比較して、本検出器は構造の単純さは有利な点であると考えられる。

また、今回の信号処理はロングメモリ搭載の高速デジタルオシロスコープ（LeCroy WavePro 715Zi [8]）によったが、スタンドアロンに近いシステムであった。J-PARC 制御システム（EPICS）のフレームワークに組み込むことも今後の課題である。

参考文献

- [1] T. Toyama et al., “Performance of the Main Ring BPM during the Beam Commissioning at J-PARC”, proc. of IPAC2010.
- [2] T. Toyama, “Analysis of Stripline Pickups using A Multiconductor-transmission-line Model”, Proc. of the 6th Annual Meeting of Part. Acc. Society of Japan (2009) p.253 (Japanese).
- [3] W. Barry, “A general analysis of thin wire pickups of high frequency beam position monitors”, NIMA301 (1991) 407-416.
- [4] T. Toyama, “ELECTRON CLOUD BUILD-UP AND BEAM INSTABILITIES IN THE KEK-PS AND J-PARC”, Proc. of the 1st Annual Meeting of Part. Acc. Society of Japan (2004) p.625 (Japanese).
- [5] “Time (domain) gating” と呼ばれる手法。各メーカーの解説書、例えば、Agilent technology, “Time Domain Analysis Using a Network Analyzer”, Application Note 1287-12.
- [6] CST STUDIO SUITE™, http://www.cst.com/Content/Products/CST_S2/Overview.aspx.
- [7] R. de Maria et al., “ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF THE SPS EXPONENTIAL COUPLER STRIPLINES USING BEAM MEASUREMENTS AND SIMULATION DATA”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan (2010) 2812.
- [8] LeCroy WavePro 715Zi, アナログ周波数帯域 1.5 GHz, サンプリング速度 10/20 GS/s (4ch 時/2ch 時), <http://www.lecroy.com/japan/products/scopes/WavePro-7Zi/default.asp>.