

重イオンビーム用ビーム位置モニター的设计検討

DESIGN STUDY OF BEAM POSITION MONITOR FOR HEAVY-ION BEAM

足立泰平^{#, A)}, 渡邊環^{A)}, 西隆博^{A)}, 上垣外修一^{A)}

Taihei Adachi^{#, A)}, Tamaki Watanabe^{A)}, Takahiro Nishi^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina-centre

Abstract

We are designing a Beam Position Monitor (BPM) as a part of development to increase intensity of heavy-ion beam in RIKEN Nishina-center. The objective beam of the BPM has non-relativistic speed ($\beta=0.15$), and the beam width might be over 20 mm in the duct diameter of 60 mm. There for it is difficult to apply some approximation, which is applied to calculations for conventional BPMs, to our case. For such beam, we designed a spiral-shaped BPM and a calculation method which use second order integral. In simulation using finite element method, it shows good linearity in wide region.

1. はじめに

理化学研究所 仁科加速器科学研究センターの RI ビームファクトリー(RIBF)[1]では、複数の加速器を組み合わせて使用することで、水素からウランに至るまで様々なイオンを加速して実験に供給している。

重イオンビームは、その質量が大きいため、加速を経ても非相対論的速度に留まることがある。また、低速なビームは空間電荷効果を受けやすく、その緩和の為に大きなビーム径でのビーム輸送が必要となることもある。このようなビームに対してのビーム位置モニター(BPM)[2]の応答は、電子ビームなどで一般的なビームが十分早い($\beta \sim 1$)という条件や、ビームの横幅 σ が電極間距離 D にたいして十分に小さい($\sigma \ll D$)という条件が成り立たない為に、特別な検討が必要となる。

2. 対角線カット等に発生するオフセット

電極間の広い領域で線形性が高い BPM として、対角線カット型[2]や $\cos^2 \theta$ 型(2次モーメント用)[3]といったものがある。しかし、これらの BPM においても、我々のビーム条件に対しては補正無しには正確な測定ができない。

具体例を示す。Figure 1 は、計算に用いた対角線カット型の BPM のモデルと CST Studio [4]を用いた計算によって得られた出力波形である。電極長 50 mm、ダクト内径 40 mm、ビーム長 0.3 ns、 $\beta=0.1$ 、出力インピーダンス 95Ω であり、ビーム位置はダクト中心である。上と下の電極の出力波形が異なり、ピーク値に差異が見られる。位置 y を求める式は、上側電極の信号を V_u 、下側電極の信号を V_d 、変換係数を C_y とすると次式で表される。

$$y(V_u, V_d) = C_y \frac{V_u - V_d}{V_u + V_d} \quad (1)$$

これに Figure 1 の 2 つの異なる波高値を入れると、ダクト中心($y=0$)のビームであるにも関わらずオフセットが現れることになる。

Figure 2 は、理化学研究所の SRILAC (Superconducting RIKEN Linear Accelerator)[5]で用いられている 2 次モーメントを求めることができる BPM と、その測定結果である。こちらでも波高値に差異が見られ、

これを用いて 2 次モーメントを計算すると同様にオフセットが生じる。

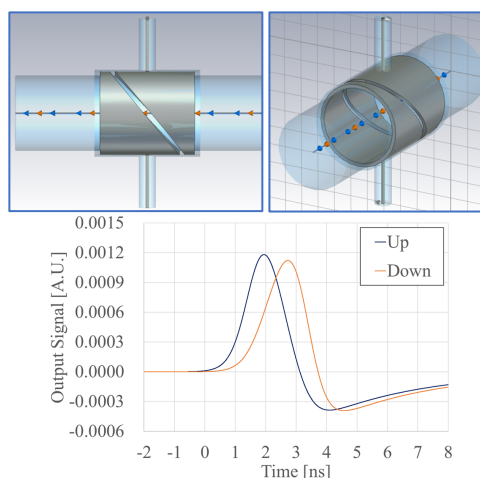


Figure 1: Side view and perspective view of the BPM Model (Top) and output signals of the BPM (Bottom).

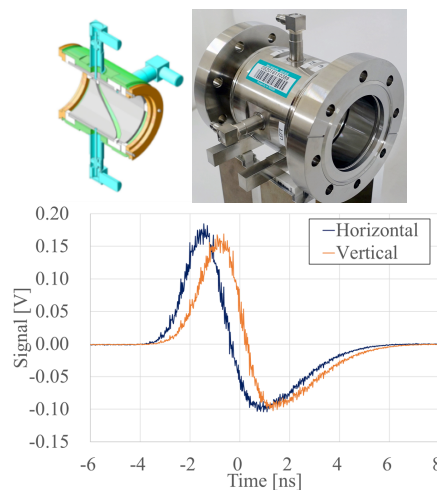


Figure 2: The BPM in the SRILAC (Top) and the signals from the BPM (Bottom).

[#] taihei.adachi@riken.jp

これらのオフセットは、定性的には、電極のビーム軸方向の構造変化が、電極毎に異なる為に発生していると考えられる。電極の構造を無視した場合の時刻 t での出力電圧を $V(t)$ とし、ビーム軸上の位置 l における断面での上側の電極が中心軸を覆う比率を $\phi_u(l)$ と表すと、形状を畳み込んだ上側電極の出力信号は、次式で表せる。

$$V_u(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{\phi(l)}{\langle \phi \rangle} V \left(t - \frac{l}{\beta c} \right) \right) dl \quad (2)$$

ここで L は電極長、 $\langle \phi \rangle$ は平均の被覆率、 βc はビーム速度である。シミュレーションに用いたモデルにおける上下電極の被覆関数 $\phi_u(l)$ 、 $\phi_d(l)$ を Fig. 3 に、形状を無視した場合の信号 $V(t)$ を Fig. 4 に、上下電極の形状を畳み込んだ信号 $V_u(t)$ 、 $V_d(t)$ を Fig. 5 に示す。形状の畳み込みによって、シミュレーションに生じている波形のずれを再現している。

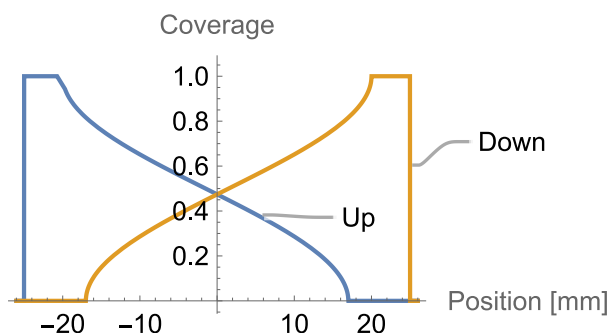


Figure 3: Shape functions of Up and Down electrode.

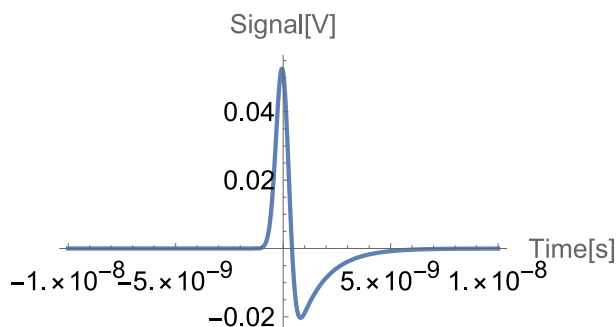


Figure 4: Signal without considering shape-effect.

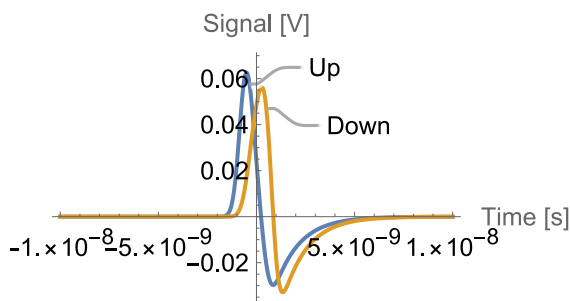


Figure 5: Signals with folding shape functions.

以上のように、このオフセットは、電極のビーム軸方向の構造に起因する。それゆえ、そこを通過するビームが、

これより十分に長い場合は、この効果は無視できると考えられ、オフセットが強く表れるのは、ビームの長さ σ_z が電極長 L より十分に短い場合 ($\sigma_z \ll L$) であると考えられる。

3. スパイラルカット型

3.1 オフセット対策としてのスパイラルカット

スパイラル状のカット概念を Fig. 6 に示す。対角線カット型を半分に切ったものを、180 度回転させて接続した構造となっている。この場合、上下位置の測定に発生するオフセットは、右半分と左半分で打ち消し合うので、中央を通るビームにオフセットは発生しない。

3.2 スパイラルカットの拡張:8 極

通常の対角線カットでは、同じ場所に上下方向と左右方向の BPM を設置することはできず、前後に並べる必要がある。しかしスパイラルカットでは、複数のカットを重ねることができる。Figure 7 に、 $\cos\theta$ 、 $\sin\theta$ 、 $\cos2\theta$ の 3 種のカットを重ねた 8 極タイプの BPM を示す。この BPM では、読み出す電極を組み合わせることで、ビーム強度、水平位置、垂直位置、2 次モーメントの 4 つの情報を得ることができる。Figure 7 下段に、その組み合わせを示した。それぞれのカットは三角関数に沿っているので、良い線形性が期待できる。設計検討を行った 8 極スパイラルカット BPM の諸元を、Table 1 に示す。

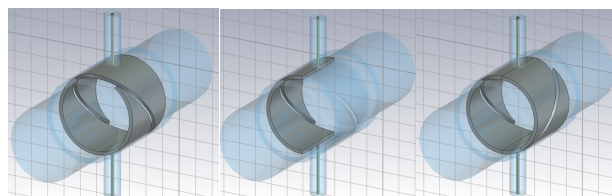


Figure 6: Configuration of the spiral electrode. A diagonal cut model (Left). A half cut of the diagonal cut model (Middle). The spiral cut model which consists of two half cut structures connecting each other with turning 180 degrees (Right).

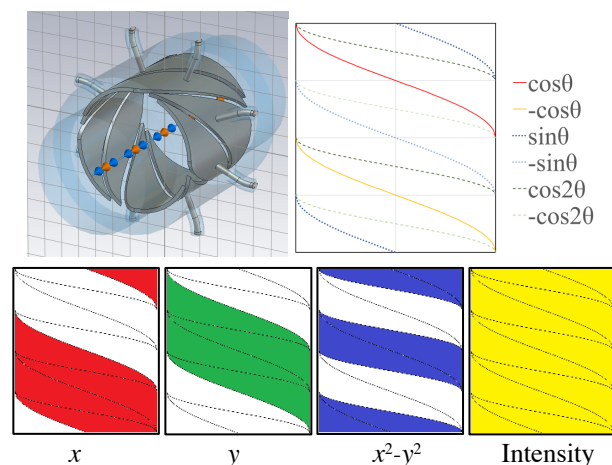


Figure 7: A perspective view of the 8 spiral-electrodes model (Top Left), the net of electrodes (Top Right), and the combinations of electrodes (Bottom).

Table 1: Specifications of the 8-Spiral-Electrode BPM and Its Objective Beam

BPM	Electrode length	60 mm
	Electrode bore	60 mm
	Electrode gap	3 mm
	Output impedance	50 Ω
Beam	Beam speed (β)	0.15
	Beam length	0.37 ns

4. 2階積分による非線形性の低減

4.1 低速ビームで発生する非線形性

対角線カット型では、通常、広い空間で良い線形性が得られる。しかし、低速ビームの場合には、非線形性が現れる。これは、スパイラルカットの場合も同様である。Figure 8 に 8 極スパイラルカット型 BPM について、 $\beta=1$ と $\beta=0.15$ の場合の信号のシミュレーション結果を示す。この計算において、ビーム幅は 0 としている。BPM 信号の波高は、 $\beta=1$ の場合には広い範囲で線形であるが、 $\beta=0.15$ においては非線形となっている。

位置に対して応答が非線形であると、ビームが幅を持っている場合にビーム位置の算出において誤差を生むので問題である。

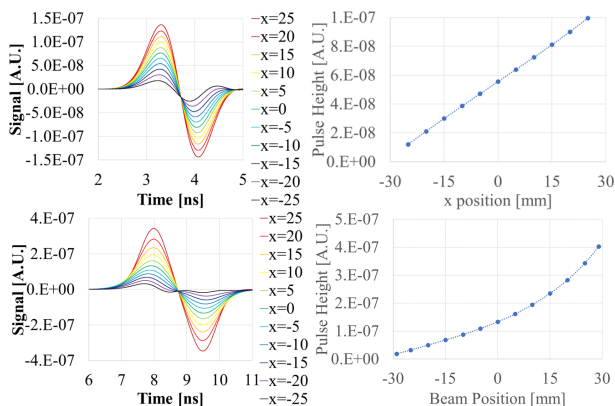


Figure 8: Signals of 8-spiral-electrode BPM. Upper graphs are $\beta=1$. Lower graphs are $\beta=0.15$. Left graphs are their signals and right graphs are pulse height of each signal.

4.2 2階積分による非線形性の低減

Figure 9 に BPM の信号の 1 階および 2 階の積分波形と、それぞれの波高値のグラフを示す。2 階積分した結果は、良い線形性を示している。つまり、2 階積分を用いることで $\beta=0.15$ という低速においても、スパイラル BPM は良い線形性を維持できる。

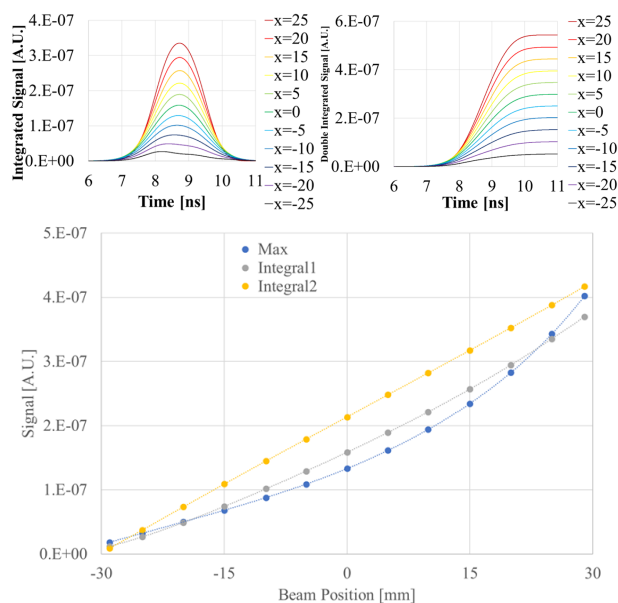


Figure 9: First order integrations of the BPM signals (Top left). Second order integrations of the BPM signals (Top right). Position dependency of the pulse heights from original, 1st order integration, and 2nd order integration of the signal.

5. 8極スパイラルカット型 BPM の性能

8 極スパイラルカット型 BPM に対して、同じビームを Fig 10 (a) に示す位置に通した場合の、それに対する各電極の出力信号をシミュレーションで求め、その波高値、1 階積分の波高値、2 階積分の波高値を用いて、ビーム強度、位置、2 次モーメントに関する計算を行い、結果を Fig. 10 (b), (c), (d) にまとめた。いずれの計算においても、2 階積分は良い線形性を保っている。

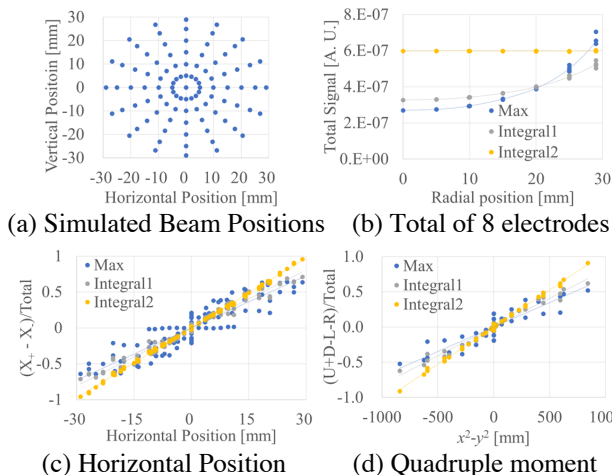


Figure 10: Beam positions which used in simulation (a). Calculated results of beam intensity (b), horizontal position (c), and quadruple moment (d).

太さのあるビームに対する応答を調べる為、まず CST Studio の結果を用いて、ビーム位置(x, y)に対する水平

位置の計算結果 f_x 、垂直位置の計算結果 f_y 、二次モーメントの計算結果 f_q を、5 次の多項式近似で求めた。具体例として f_x に対する式を示す。

$$f_x(x, y) = C_x \frac{V_{x+}(x, y) - V_{x-}(x, y)}{V_{x+}(x, y) + V_{x-}(x, y)} = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 a_{ij} x^i y^j \quad (3)$$

ここで、 $V_{x+(-)}(x, y)$ は、 x 正(負)側の電極群の信号の和の 2 階積分値である。

次に Eq. (3) にガウス分布を畳み込んで、ビーム幅のある場合の水平方向の応答の近似式とした。

$$\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x, y) e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}} dx dy \quad (4)$$

ここで、 x_0 は水平方向のビーム中心、 y_0 は垂直方向のビーム中心、 σ_x は水平方向のビーム幅、 σ_y は垂直方向のビーム幅である。垂直位置、2 次モーメントも同様である。

この Eq. (4) を用いて、各種ビーム位置・幅に対する BPM の応答結果を計算し、それらを用いて元の水平位置を求める為の近似式を次の様に立てた。

$$x = h_x(g_x, g_y, g_q) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^5 c_{ijk} g_x^i g_y^j g_q^k \quad (5)$$

Equation (4), (5) を用いて、元の位置と近似式で求めた位置とを比較することで、ビーム太さがある場合の誤差について評価した。結果、ビーム位置が中心から ± 2 mm の範囲にある場合、ビーム幅が 0 から 15 mm まで変化しても、位置の誤差は ± 0.1 mm に収まることが確認できた。また、2 次モーメント(x^2 - y^2)の誤差は、 ± 0.6 mm² 以下で

Table 2: Definition of Text Styles

	Beam Position	Beam Width (1σ)
CST Studio to Eq. (3)	-29 ~ 29 mm	No width
Equation (4) to Eq. (5)	-29 ~ 29 mm	0 ~ 15 mm
Error Calculation	-2 ~ 2 mm	0 ~ 15 mm

あった。各ステップの計算に用いた位置とビーム幅の範囲を Table 2 に示す。

6. まとめ

重イオンビームは、電子ビームなどと比べると、速度が遅く太いビームである場合があり、これに伴い BPM の応答にオフセットや非線形性などの問題が発生する。

これに対し、スパイラルカット型の BPM を用いるとオフセットが発生しないというメリットがある。さらに、スパイラルカット型では、複数のカットを重ねることができる為、1 か

所で複数の情報を同時に読み出すことも可能となる。

さらに、信号処理として 2 階積分を採用すると、遅いビームに対しても良い線形性が保たれることが確認できた。

設計検討を行った 8 極スパイラルカット型 BPM は、遅くて太い重イオンビームに対して、ビーム強度、水平位置、垂直位置、2 次モーメントの 4 つの情報を精度良く求めることができると考えられる。

謝辞

本研究に関して多くの方に御助力頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。特に高エネルギー加速器研究機構の外山毅先生には、BPM に関して多くを教えて頂き大変感謝しております。

参考文献

- [1] Y. Yano, "The RIKEN RI beam factory project: A status report", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 261, 2007, pp. 1009-1013.
- [2] Robert E. Shafer, "Beam position monitoring", AIP Conference Proceedings, vol. 249, p. 601, 1992. doi:10.1063/1.41980
- [3] T. Watanabe *et al.*, "Calibration for Beam Energy Position Monitor System for Riken Superconducting Acceleration Cavity" Proc. of 2019 International Beam Instrumentation Conference (IBIC 2019), Sept. 2019, pp. 526-529. doi:10.18429/JACoW-IBIC2019-WEPP007
- [4] CST Studio Suite, Dassault systems. <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [5] N. Sakamoto *et al.*, "Development of Superconducting Quarter-Wave Resonator and Cryomodule for Low-Beta Ion Accelerators at RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory", in Proc. SRF'19, Dresden, Germany, Jul. 2019, pp. 750-757. doi:10.18429/JACoW-SRF2019-WETEB1