

## BPMの感度最適化シミュレーション AN OPTIMIZATION OF BPM SENSITIVITY BY SIMULATION

清宮 裕史, 諏訪田 剛, 佐藤 政則, 宮原 房史, 飯田 直子  
Y. Seimiya\*, T. Suwada, M. Satoh, F. Miyahara, N. Iida  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

In SuperKEKB, a damping ring (DR) is used for low emittance positron beam. A positron beam passes through a transport line from Linac to the DR (LTR). Elliptical like beam pips are incorporated in the LTR since horizontal beam size is spread by dispersion, and BPMs in the LTR also have elliptical like shape. Thus, installation location of SMA terminal in the BPM has an arbitrariness. An optimization of the SMA terminal location to maximize BPM sensitivity is performed by three dimensional charged particle motion analysis using tracking particles in LTR.

### 1. 導入

SuperKEKBではデザインミノシティがKEKB[1]の40倍に設定されている。これを実現するには、ビームの低エミッタンス化が必要となるため、Damping Ring (DR) によって陽電子ビームの低エミッタンス化が行われる。KEKのLinacは、Fig. 1のようにセクターA, BとARC, セクター15から成る。セクターAの熱電子銃から生成された10nCの電子ビームをセクター1のタングステン陽電子生成用ターゲットに衝突させて陽電子を生成する。生成された陽電子はFlux Concentrator (FC)とLarge Aperture S-band structure (LAS)[2]によって効率よく捕獲され、その後LinacからDRへの輸送路であるLTRを介してDRに輸送される。DRでは、1.1GeVの陽電子ビームのエミッタンスが $1.4\mu\text{m}$ から水平方向42.9nm, 垂直方向3.12nmまで減衰させる[3]。その後、陽電子はDRからLinacセクター3に輸送され、セクター5まで通過後、SuperKEKBのメインリングまで輸送される。

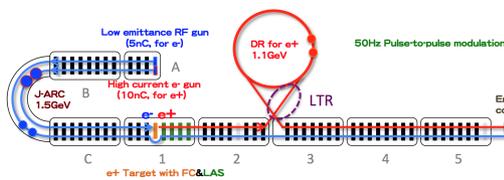


Figure 1: Schematic layout of KEK Linac.

LTRでビームは偏極磁石によって曲げられるため、ビームダクトは横長の楕円のような形をしており、それに合わせるためBPMの形も楕円のような形になっている。そのため、一般的にLinacで用いられている円形のBPM[4]と違い、ビームから信号を受け取るSMA端子の設置場所に任意性が生まれる。本レポートでは、GPT[5]、SAD[6]によるトラッキングシミュレーションから得られたLTR輸送路でのビーム分布を使い、ストリップライン型BPMの感度が最大となるような端子設置場所の最適化シミュレーションをCST PARTICLE STUDIO[7]の3次元荷電粒子運動解

析を用いて行った結果を報告する。

### 2. BPM感度計算法

LTRにおけるビームパイプサイズは決まっているため、ここではBPMの形状はFig. 2のようになる。本

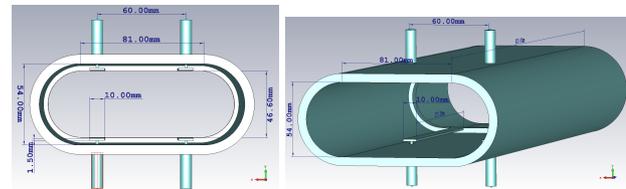


Figure 2: A candidate of BPM design at LTR. In this figure, horizontal distance between BPM center and SMA position is 30mm.

レポートのBPMの感度最適化とは、いくつかのビーム分布に対して、左右のSMA端子間の距離を変化させてBPMの感度が最大となる場所を探すことである。このとき、SMA端子の上下の位置は一致させることとする。通過電子としては、単粒子、ガウス分布、非対称ガウス分布、テイル型分布(トラッキングデータ)の3種についてシミュレーションを行う。また、ビーム位置は以下のように表される。

$$x = \frac{1}{S_x} \frac{TL + BL - TR - BR}{TL + BL + TR + BR} \equiv \frac{1}{S_x} \frac{\Delta_x}{\Sigma}, \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{S_y} \frac{TL + TR - BL - BR}{TL + BL + TR + BR} \equiv \frac{1}{S_y} \frac{\Delta_y}{\Sigma}. \quad (2)$$

ここで、 $S_{x,y}$ は感度係数、 $TL, BL, TR, BR$ はそれぞれFig. 2の左上、左下、右上、右下のBPMの電極信号のピークピーク値を表す。感度係数は、ビーム位置をBPM中心からオフセットさせたときの $\Delta/\Sigma$ の傾きから求めることができる。

$$S_x = \frac{\partial \Delta_x}{\partial x \Sigma}, \quad (3)$$

$$S_y = \frac{\partial \Delta_y}{\partial y \Sigma}. \quad (4)$$

\*seimiya@post.kek.jp

### 3. シミュレーション結果

#### 3.1 点電荷とガウス分布との比較

単一の電子が BPM を通過する場合について BPM の感度が最大となる SMA 端子の最適場所を探す。Fig. 3 は電子が BPM の中心を通過した際の電極の信号を表しており、横軸が時間 (ns)、縦軸が電極の電圧 (V) を表す。ただし、オシロスコープでの測定を想定し 1GHz のローパスフィルターを通した後の値となる。赤、緑線が BPM 中心と SMA 端子との距離がそれぞれ 10mm, 35mm の際の信号である。BPM の中心と SMA 端子との距離が増えることで、電子と端子との距離が離れるため信号の強度が減少することがわかる。

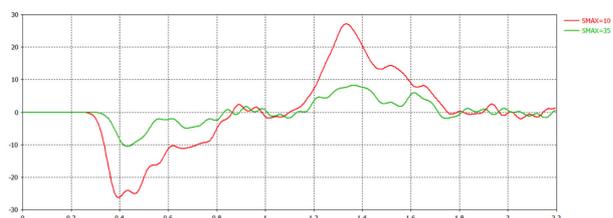


Figure 3: BPM electrode signal generated by beam wake field after the signal is cut by 1GHz band pass filter. Horizontal and vertical axis show time (ns) and voltage at the BPM electrode (V), respectively. Red line shows the signal in case of 10mm horizontal distance between BPM center and SMA position, and green line shows the signal in case of 35mm horizontal distance in the same manner.

Fig. 3 のような得られた信号のピークピーク値を用いて、それぞれ BPM 中心と SMA 端子間距離が 6mm, 9mm, ..., 36mm での  $\Delta/\Sigma$  をグラフ化したものが Fig. 4, 5 であり、これらは BPM を通過する電子の位置をそれぞれ水平、垂直方向にオフセットさせた時の  $\Delta/\Sigma$  を表している。また、プロットの青から赤の変色は SMA 端子位置は 6mm から 36mm の位置変化に対応している。図の線形フィッティングは BPM 中心に最も近い 5 点 (原点を含む) をフィッティングしており、この傾きが感度係数となる。これらの図は点電荷の場合の  $\Delta/\Sigma$  を表している。

同様に、多粒子のガウス分布、非対称ガウス分布の場合の  $\Delta/\Sigma$  から感度係数がわかる。ガウス分布は、 $\sigma_x = 10.5\text{mm}$ 、非対称ガウス分布は Fig. 6 のように  $\sigma_{xL} = 10.5\text{mm}$ 、 $\sigma_{xR} = 3.1\text{mm}$ 、両分布で  $\sigma_y = 1.5\text{mm}$  であり、相対的エネルギー分散  $\delta$  は 5%、水平ディスパージョンは 0.2m である。このように水平方向に広がった分布を仮定するのは、LTR 部でビームが曲げられ水平ディスパージョンが生じることでビームが広がるためである。それぞれの SMA 端子位置での感度係数を、点電荷、ガウス分布、非対称ガウス分布についてプロットしたものが Fig. 7 になる。黄、紫は点電荷の際の垂直、水平方向の感度、橙、青紫は非対称ガウス分布の際の垂直、水平方向の感度、赤、青はガウス分布の際の垂直、水平方向の感度を表す。

水平方向の感度は、SMA 端子が近すぎるとビームの位置変化に対して左右の端子の値の差が鈍くなってしまいうため、Fig. 7 のように端子と BPM 中心間の

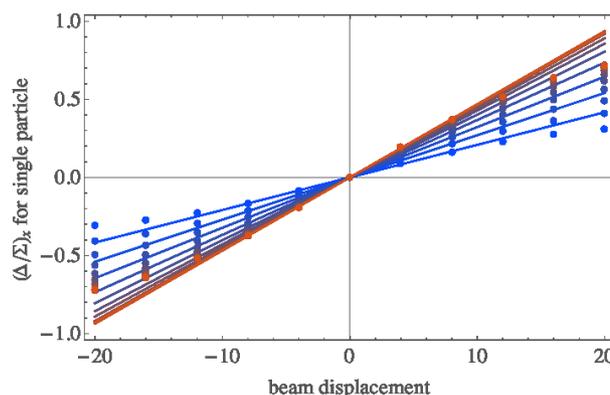


Figure 4: Horizontal beam displacement from the BPM center (mm) vs.  $\Delta_x/\Sigma$ . Distance between BPM center and SMA terminal increase from the blue to red, 6mm, 9mm, ..., 36mm. Line fitting is performed using 5 point, which are most nearest to the BPM center.

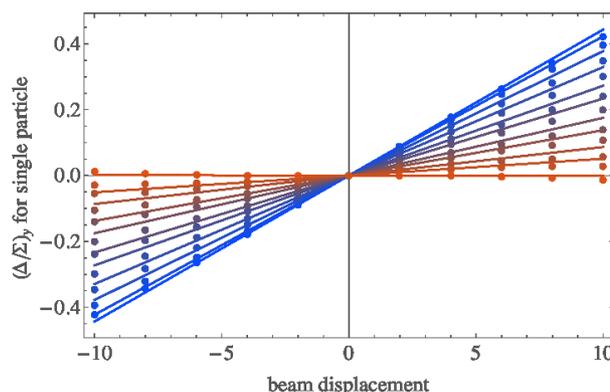


Figure 5: Vertical beam displacement from the BPM center vs.  $\Delta_y/\Sigma$ . This plot configuration is the same as Fig. 4.

距離が小さくなると水平方向の感度は悪化すると考えられる。また、ビームの分布が水平方向に広がると相対的に SMA 端子間距離が近づくため、分布が広がるほど感度が悪化すると考えられる。事実、単粒子の場合が最も水平方向の感度が良く、ビームが広がるにつれて感度が悪化する結果が得られている。また、SMA 端子間距離が大きくなると、ビーム分布の広がりによる水平方向の感度への影響が小さくなるため、水平方向の感度は分布によらない一定の値に近づくと考えられる。垂直方向の感度は、構造上ビームの垂直方向の広がりが垂直端子間の距離を越えないため、水平方向の感度のように端子間距離が縮まることで端子の値がほぼ同じになり感度が悪化する効果と、端子間距離が縮まることで粒子と電極間の距離が縮まり、感度が改善する効果の 2 つのバランスで感度が決まると考えられる。Fig. 7 からわかるように、垂直方向の感度は後者の影響が大きく、分布によらず端子間距離が縮まると感度が上昇する。単粒子の場合、他の分布と比べて端子間距離が小さい時には垂直方向の感度は最も高く、逆に端子間距離が大きい時には最も悪い。これは、端子間距離が小さくとも単粒子で

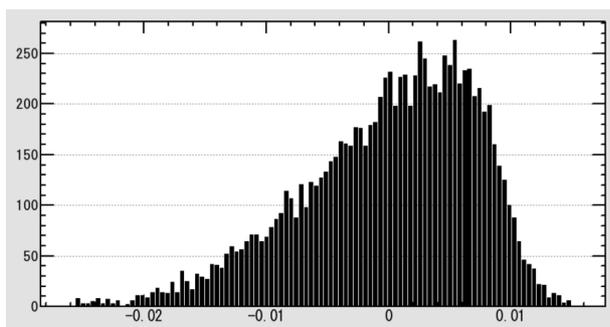


Figure 6: Asymmetry gaussian beam.

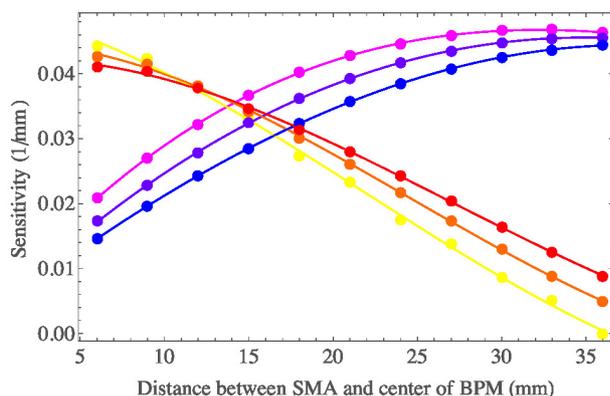


Figure 7: Sensitivity as a function of horizontal distance between terminal and center of BPM. Yellow and purple show vertical and horizontal sensitivity with single electron, respectively. Orange and blue purple show vertical and horizontal sensitivity with asymmetry gaussian beam, respectively. Red and blue show vertical and horizontal sensitivity with gaussian beam, respectively.

あれば感度が得られること、分布が広がると相対的端子距離が縮むことから理解できる。また、垂直方向の感度には分布に依らない点が存在することがわかる。この点は、後述するエネルギー分散を変化させた分布においても1点で交わることがわかる。これは、上記の2つの効果を合わせた影響が分布によらず一定となる条件が存在することを示唆している。非対称ガウス分布は、空間的広がりがない点電荷とガウス分布の中間であるため、感度も中間の値となっている。水平、垂直感度の積が最大となるときの感度が最適感度とすると、Fig. 7での水平と垂直感度曲線の交点が端子距離の最適場所となる。

Fig. 8は、非対称ガウス分布に対して相対的エネルギー分散 $\delta$ を変化させた時の感度を示している。また、それぞれの水平と垂直感度曲線が交わるときの端子距離をFig. 9に示す。Fig. 9の曲線は2次関数でフィットしたものであり、端子距離が $\delta$ の二乗に比例することがわかる。今の場合、ビームの水平広がりには $\delta$ にほぼ線形で増加するため、ビームサイズに対しても同様のことがいえる。

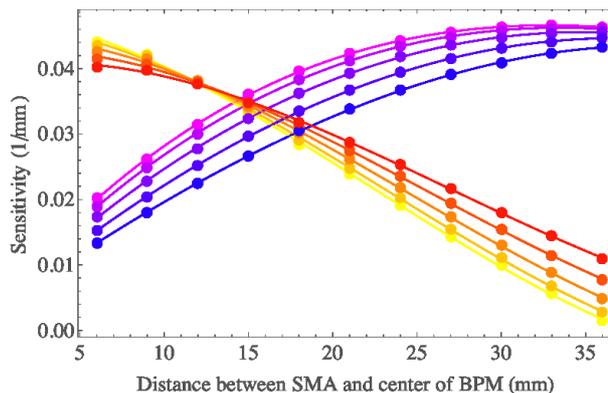


Figure 8: Sensitivity as a function of horizontal distance between terminal and center of BPM. Yellow and purple show vertical and horizontal sensitivity with  $\delta=1\%$ , respectively. As  $\delta$  is increasing, yellow and purple change red and blue, respectively.

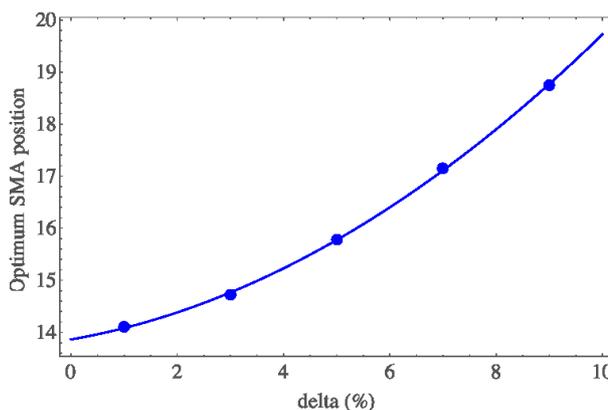


Figure 9: Optimum terminal position as a function of  $\delta$ .

### 3.2 2次元と3次元シミュレーションの比較

点電荷がBPMを通過する際の2次元と3次元シミュレーションの結果を比較する。2次元シミュレーションは、境界要素法をベースとした電荷シミュレーション法で行った[8, 9, 10]。このとき電磁場は、静電場のみである。Fig. 10は、それぞれの次元で計算された感度係数をグラフ化したものである。赤、青点が、それぞれ2次元シミュレーションで求めた垂直、水平方向の感度であり、黄、紫点が、それぞれ3次元シミュレーションで求めた感度である。それぞれを見比べると、曲線の形状はほぼ一致しているが、2次元より3次元の方が感度が低いことがわかる。これは、3次元の計算が2次元の静電場計算と比べて複雑な構造体内部の電磁場計算であるために、ビームのwakeが反射されることによる信号強度の変化が感度に影響すると考えられる。

### 3.3 テイル型分布

ここまで、ビーム分布として理想的な分布を考えてきたが、より現実に近いシミュレーションを行うため陽電子生成ターゲットから生成された陽電子をGPTとSADを用いてLTRまでトラッキングシミュ

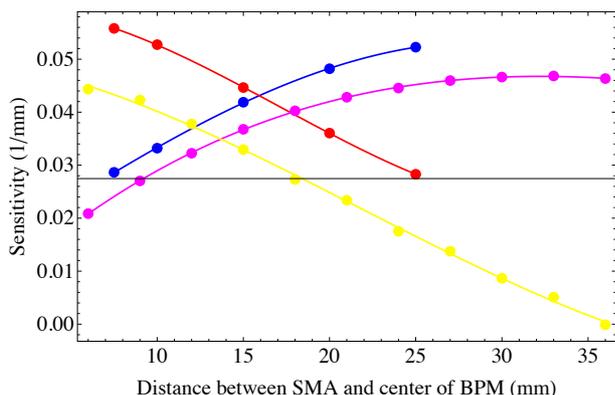


Figure 10: Sensitivity as a function of horizontal distance between SMA terminal and BPM center. Red and blue show vertical and horizontal sensitivity on 2 dimensional simulation, respectively. Yellow and violet show vertical and horizontal sensitivity on 3 dimensional simulation, respectively.

レーションを行い、その分布について感度計算を行った。LTR 通過する際は後のビームロスを防ぐために予めコリメータで  $\delta=5\%$  以上の粒子をロスさせる。また、LTR におけるビームの水平分布は Fig. 11 のようにガウス分布ではなく、テイルを引いた形をしている。このテイル型分布について感度計算を行った結果を Fig. 12 に示す。赤、青がテイル型分布の際の垂直、水平方向の感度であり、比較のために橙、紫のガウス分布の際の垂直、水平方向の感度をプロットした。ガウス分布では、ビームの裾が  $\delta=5\%$  となるように調整した分布を用いたため、テイル型分布の方がビームの広がりが大きい。そのため、最適な端子距離もガウス分布より大きくなったと考えられる。

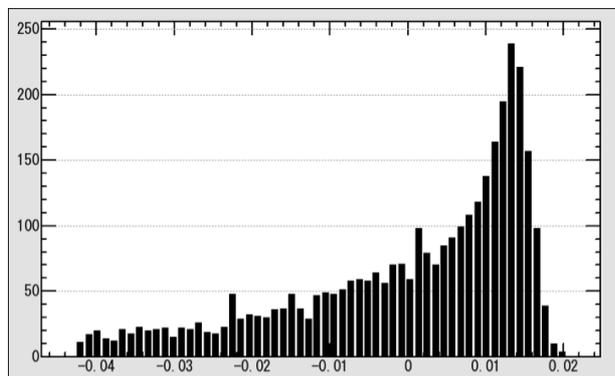


Figure 11: Tail type beam at LTR. This is a distribution after  $\delta=5\%$  cut.

LTR には BPM は 1 つではなく、それぞれの場所でビーム分布も変化するため、最適な端子距離もそれぞれ違ったものになる。しかし、コスト的に何種類も BPM を作成することは難しいためそれぞれの感度(水平と垂直感度の積)の和が最大となる端子距離を求めた。その結果を Fig. 13 に示す。曲線は 2 次関数でフィットしたものである。この結果から、LTR の

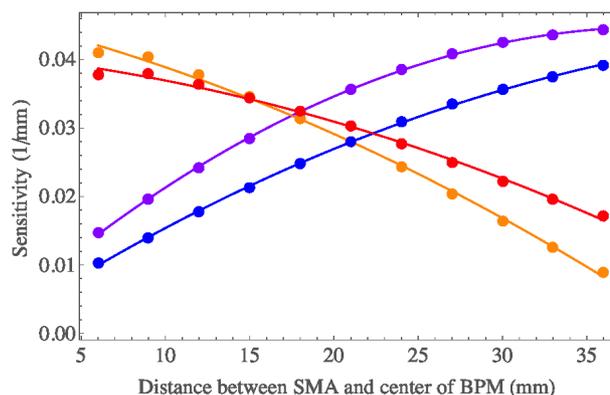


Figure 12: Sensitivity as a function of horizontal distance between SMA terminal and BPM center. Red and blue show vertical and horizontal sensitivity with tail type beam, respectively. Orange and violet show vertical and horizontal sensitivity with gaussian beam, respectively.

BPM における水平方向の端子と BPM 中心との距離はおよそ 30mm (端子間距離は 60mm) がよいことがわかる。

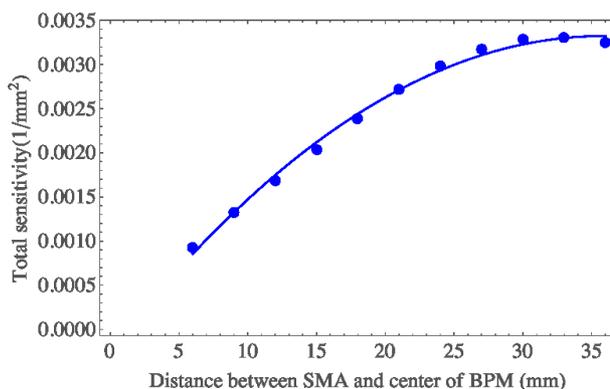


Figure 13: Sum of the BPM sensitivities at LTR as a function of horizontal distance between SMA terminal and BPM center.

#### 4. まとめ

DR への入射路における BPM の端子設置場所を通過するビームの分布に対して最適化することで、それぞれの分布において感度最大となる BPM の設計を行った。点電荷、ガウス分布(非対称含む)、テイル型分布について調査し、分布の広がりが大きいほど、最適な端子間距離も広がることがわかった。現実に近いテイル型分布において、端子間距離が 60mm 程度が最適であることがわかった。また、従来の 2D と 3D 計算を比較すると、2D の方が感度がよい。これは、2D 計算が静電場であるのに対し 3D 計算は電磁波を扱うため、BPM 構造体内部の wake の反射といった影響を無視できるためと思われる。

## 参考文献

- [1] KEKBDesignReport,KEKReport95-7.
- [2] T. Kamitani *et al.*, Proc. IPAC2014, MOPRI004.
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. (2013), 03A011.
- [4] T. Suwada, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40 (2001) pp. 890-897.
- [5] General Particle Tracer (GPT) home page;  
<http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [6] Strategic Accelerator Design (SAD) home page;  
<http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [7] CST PARTICLE STUDIO home page;  
<https://www.cst.com/products/cstps>
- [8] T. Suwada, IEEE Trans.Nucl.Sci. 61 (2014) no.2, 808-816.
- [9] H. Singer, H. Steinbigler, and P. Weiss, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 5, pp. 1660-1668, 1974.
- [10] N. H. Malik, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 1, pp. 3-20, 1989.