

OPTIMIZATION OF FOUR-BUTTON CONFIGURATION OF LOW-GAP BPM FOR NEW INSERTION DEVICE AT PHOTON FACTORY

Kaiichi Haga

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The configuration of four-button beam position monitor (BPM) for 15mm low-gap ID vacuum chamber is optimized. The induced electric charges on each button electrode are calculated using boundary element method in 2-D transverse plane. The relative positions of the buttons and their diameter are chosen in order to maximize the position sensitivities both for vertical and horizontal directions. This low-gap BPM will provide stable position signals and will be used in local beam line position feedback loop near future.

PFでの新挿入光源用ローギャップBPMのボタン電極配置の最適化

1. はじめに

PF2.5GeVリングに2008年1月に設置予定の新アンジュレータ (#16) 部に設置する予定のビーム位置モニター電極部分を最適化した。BPM部の断面形状は挿入光源の真空ダクトに合わせてあるので、上下方向の幅が15mmとなる。

2. 計算方法

真空ダクト中を電子ビームが通過すると、真空ダクト内面に正電荷が誘起される。真空ダクトから電氣的に絶縁されているBPMのボタン電極それぞれにも正電荷が誘起され、4つの電極に誘起された電荷量の比から、電子ビームの位置情報が得られる。

この誘導電荷は電子ビームの電場によって生じるので、BPMの感度を計算するにはこの電場を計算すればよいことになる。

ここで、高エネルギーの電子ビームの作る電場はローレンツ収縮によって平面電磁波 (TEM波) になっており、真空ダクト内では同軸ケーブル内の電場と同じである。この電場は、光速で進む以外は、静電場と同じであって、ラプラス方程式を解くことによって求めることができる。

また、BPMの感度計算において必要なのは、真空ダクトに誘起される電荷なので、ビームの作る電場もこの真空ダクト上でだけわかればよく、真空ダクト内部の電場の情報は必要ない。したがってラプラス方程式を、有限要素法ではなく境界要素法を使って計算することとした。

3. 境界要素法

境界要素法では境界である真空ダクト内面をN個の要素に分解し、各要素内の誘導電荷量 (σ) が均一であると仮定する。境界各要素でのポテンシャル (Φ) は、電子ビームの作るポテンシャルと、他の境界要素が作るポテンシャルとの和で与えられる。

境界条件として、真空ダクト上のポテンシャルが0であることを使って誘導電荷量を求める。図1に境界要素法の概略を示す。

新挿入光源用の真空ダクトの断面形状は図2のとおりで、電極を設置する中央部分のうち15mmであり、この内面をN=220の境界要素に分割した。

境界要素法の概略

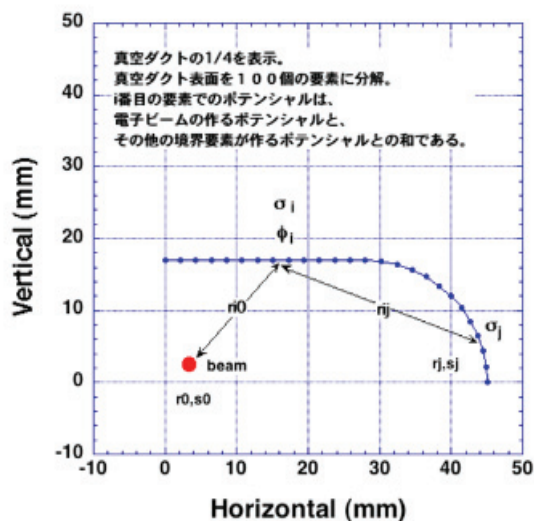


図1：境界要素法の概略

4. 最適化の指針

今回設計する新挿入光源用BPMでは、真空ダクトの縦幅が15mmと電極位置がビームに近く信号強度が十分に得られるので、ボタン型の電極を上下に4個設けることとした。そこで設計の最適化の指針として以下の3点を考慮した。

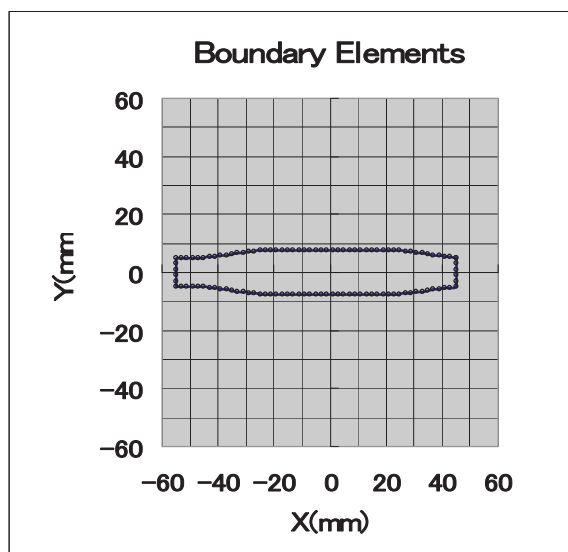


図2：真空ダクトの断面形状と境界要素

(1) 水平・垂直両方向のBPM位置計測感度を揃える

垂直方向の感度は良好になると予想されるので、垂直方向の計測感度を垂直方向に揃える事を目標とした。またBPM設置後は、挿入光源ビームラインにおいて放射光ビームの安定化を目指すローカルフィードバックシステムの建設が予定されており、水平・垂直両方向のビーム安定化を行う上でも、両方向での感度の一致が望ましい。

(2) 信号強度の確保

今回のBPMはPFリングの直線部に設けられるが、他の通常型のBPMとの検出部の互換性も確保するために、他の直線部BPMとその信号強度が揃うことを目指す。

(3) 製作時誤差による電氣的オフセットの見積り

ボタン電極の製作時に発生する製作誤差は主に溶接時のひずみ等が主であるが、この製作誤差により4電極の位置関係がくずれ、電子ビーム位置測定時の電氣的オフセットを生じさせる。今回の設計ではこれらのオフセット量を見積り、製作方法や製作時誤差の許容量などを検討したい。

5. 計算結果

5.1 水平・垂直方向の位置計測感度

電極の直径 (D) を、および上側 (下側) 2 電極間の間隔 (L) に関して、数種類の値を仮定して計算を行った。電極径と電極間隔のそれぞれの場合において、ビーム位置を1mmステップで両方向に変化させ、各条件のもとでの誘起電荷量を計算した。

BPM各電極での誘起電荷量をQ1~Q4とすると、電子ビームの原点付近の位置POS(X),POS(Y)は以下

のような無次元量U,Vを使って、

$$U = \frac{(Q1 + Q2) - (Q3 + Q4)}{Q1 + Q2 + Q3 + Q4},$$

$$V = \frac{(Q1 + Q3) - (Q2 + Q4)}{Q1 + Q2 + Q3 + Q4}$$

$$POS(X) = kx \cdot U, \quad POS(Y) = ky \cdot V$$

とあらわせる。

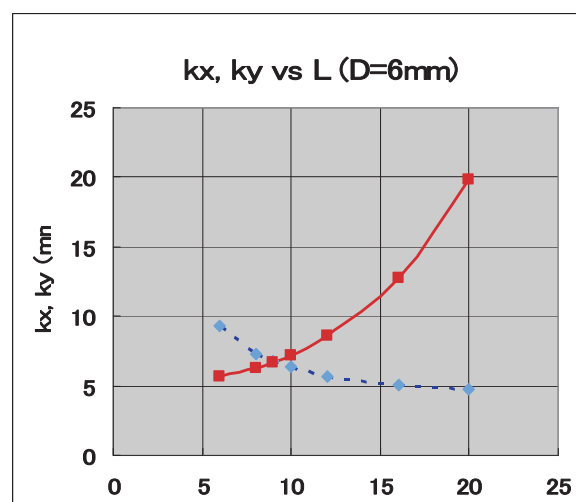


図3：電極径6mmの場合での位置感度の電極間距離依存性。実線、点線はそれぞれ垂直、水平方向。

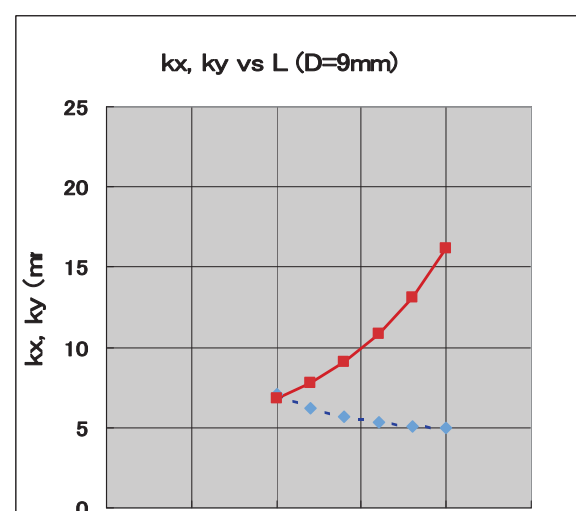


図4：電極径9mmの場合での位置感度の電極間距離依存性。実線、点線はそれぞれ垂直、水平方向。

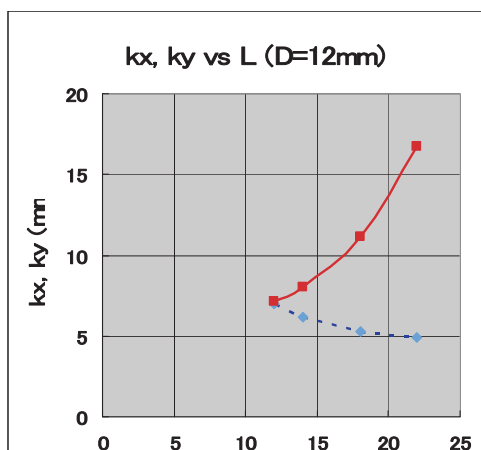


図5：電極径12mmの場合での位置感度の電極間距離依存性。実線、点線はそれぞれ垂直、水平方向。

ここで k_x , k_y は感度の逆数で単位はmmである。 k_x , k_y の値が小さいほど感度が高くなる。電極径と電極間隔のそれぞれの場合において、ビーム位置を1mmステップで水平・垂直方向に変化させ、各条件下で4電極の電荷量から係数U, Vを求める。原点近辺での線形な領域において、このビーム位置を再現するように k_x , k_y を定める。

計算結果の一例として、電極径 $D=6, 9, 12$ mmの場合について、 k_x , k_y の値が、電極間隔 L に伴って変化する様子を図3～5に示す。この図からわかるように、電極間隔 L が広がるにつれて k_y が大きくなり、垂直方向の感度が下がっていくのがわかる。電極径 $D=6$ mmの場合は電極間隔 $L=9$ mm付近で、 k_x と k_y の値がほぼ等しくなり、両方向の感度が揃う位置であることがわかる。同様に、電極径 $D=9$ mmでは $L=12$ mmが最適となる。

これらの計算結果から、電極製作メーカーとの協議の結果、製作可能性を考慮して、電極径 $D=9$ mm、電極間隔 $L=12$ mmを最終形状とした。このときの感度を、これまでのPFでのBPMと比較したものを表1に示す。今回のLow-gap BPMの感度の良さが見て取れる。

5-2 信号強度

上記感度計算と同じ設定で、各電極への誘起電荷

	k_x (mm)	k_y (mm)
旧PF (6電極)	22.3	21.8
PF高輝度化(アーク部)	17.4	35.3
PF-AR高度化	11.8	27.3
PF直線部	17.4	16.7
新ID用BPM($D=9, L=12$)	6.2	7.8

表1：BPM位置感度の比較

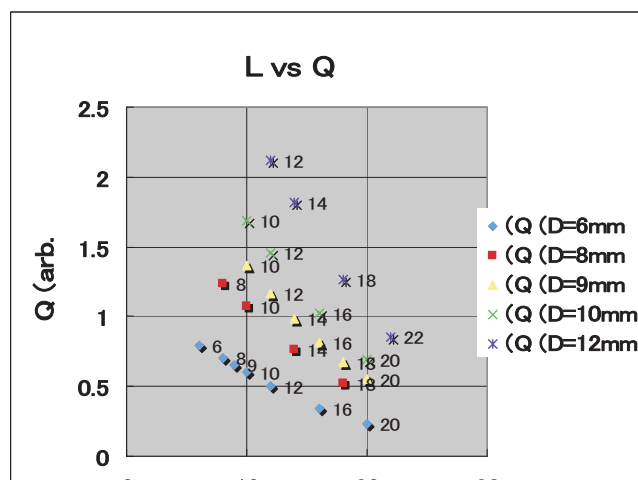


図6：誘起される電荷量の比較

量を計算した。結果を図6に示す。電極径が大きくなるに従い、また電極間隔が近づくに従って電荷量が増えている。現在PFリング直線部に設置されているBPMでの電荷量は $Q=0.7$ (arb.) で $D=8$ mm以上であれば十分な信号強度が得られることがわかる。

5-3 製作時エラーによる電氣的オフセットの見積り

製作時のエラーにより電極の取り付け位置が変わることによって、BPMに電氣的なオフセットが生じる。今回の設計では、真空ダクトの上面と下面それぞれの2電極を一体で製作することで、水平方向の電極位置のばらつきを少なくすることができるとともに、溶接箇所がなくなることにより、電極間隔も短くすることが可能となる。

ただし、一体型2電極の場合、溶接による真空ダクトへの取り付けがずれた場合は、2電極が揃ってずれてしまうために、その影響を計算した。上面の2電極が揃って変位 d (mm)を持った場合に、どれくらいの電氣的なオフセットが生じるかを同様に境界要素法で計算した。計算結果から電氣的オフセット ΔY は、変位 d に比例しており、その量は変位量の約半分であることがわかった。

6. まとめ

PF2.5GeVリングの新挿入光源用のLow-gap BPMの電極配置を最適化した。電子ビームが真空ダクト上に作る電場を境界要素法で計算し、水平・垂直両方向の位置計測感度が揃う形状として、電極径 $D=9$ mm、電極間隔 $L=12$ mmを決定した。また、この形状での信号強度が充分であることを確認した。さらに電極は上下に2電極ずつ一体型で製作することとし、その製作誤差が生み出す電氣的オフセット量についても見積もった。