

ストリップライン多電極を用いたビームサイズ計測への応用

諏訪田 剛¹、佐藤政則、古川和朗
 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

KEKB 入射器[1]では、90 台のストリップライン型ビーム位置モニター (BPM) を用いて入射ビームの軌道安定化を行っている。BPM を用いたビーム軌道安定化は、今では KEKB 運転上欠くことのできないものとなり、計算機制御下のフィードバックを通して安定に動作している。一方、この BPM を用いて、ビームサイズ、エネルギー拡がりと言った物理量を非破壊で計測できれば、同様なフィードバックを通してビーム位相空間の安定化が可能となる。本報告は、BPM をビームサイズ及びエネルギー拡がり計測に応用するための原理と実証実験についてまとめたものである。

1. はじめに

BPM を利用したビームサイズ非破壊計測のアイデアは、過去に SLAC の R.Miller[2]により報告されているが、その原理実証は余り明確ではなかった。筆者等は、入射器の BPM に対しこの方法の適用可能性を調べ、原理実証を行うことによりオプティクス診断やエネルギー拡がり計測による分解能がどれくらい見込めるのかをビームテストにより評価した。

2. ビームサイズ計測の原理

円形金属パイプ内に無限に長い線電荷を置いたときパイプ内壁に誘起される鏡像電荷密度は、静電場問題で解くと以下の式で与えられる。

$$j(r, \varphi, R, \varphi) = \frac{I(r, \varphi)}{2\pi R} \frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2 - 2rR \cos(\varphi - \varphi)} \quad (1)$$

ここで、パイプ半径 R 、線電荷量 $I(r, \varphi)$ 、パイプ内壁上の電極位置を (R, φ) とする。パイプ内を光速で走行するビームの誘起する電磁場は、相対論的に横方向にブーストされバンチ長さ程度に圧縮されている。このような電磁場を解析する場合、よく使われる方法が(1)式である。ビーム (線電荷) 変位 r が小さいとして(1)式右辺を展開すると

$$j(r, \varphi, R, \varphi) = \frac{I(r, \varphi)}{2\pi R} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^n \cos n(\varphi - \varphi) \right] \quad (2)$$

となる。ここで、線電荷に対し横方向の電荷分布を導出し鏡像電荷密度との積をパイプ断面内で積分するとパイプ周方向の鏡像電荷分布が得られる。この辺の議論は、文献[3,4]に詳しい。

$$J(R, \varphi) = \frac{I_b}{2\pi R} \left[1 + \frac{2}{R} (\cos \varphi \cos \varphi + \sin \varphi \sin \varphi) + \frac{2}{R^2} [(\cos^2 \varphi \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \sin^2 \varphi) \cos 2\varphi + 2 \cos \varphi \sin \varphi \sin 2\varphi] + \text{higher orders} \right] \quad (3)$$

ここで、記号 J は、電荷分布の重みを付けた積分を、 I_b はビーム電荷量を表す。各展開項は、電荷拡がりのモーメントを表し多重極モーメントと呼ぶ。第1項は全電荷量 (0次)、第2項は1次モーメント (*dipole*)、第3項は2次モーメント (*quadrupole*) を表す。BPM の測定原理は、*dipole* モーメントを利用する。ビームサイズ計測は、*quadrupole* モーメントを利用すればよい。展開項を取り出すには、各電極に誘起される電圧 (V_i [$i=1, N$]) を使って以下のような演算を行えばよい。x 方向の *dipole* モーメントは、

$$J_{d,x} = \frac{\cos \varphi}{R} = \frac{\int_0^{2\pi} J(R, \varphi) \cos \varphi d\varphi}{\int_0^{2\pi} J(R, \varphi) d\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cos \varphi}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (4)$$

となり、2次モーメントに対し、

$$J_{quad} = \frac{\int_0^{2\pi} J(R, \varphi) \cos 2\varphi d\varphi}{\int_0^{2\pi} J(R, \varphi) d\varphi} = \frac{2}{R^2} (\cos^2 \varphi \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \sin^2 \varphi) = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cos 2\varphi}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (5)$$

$$J_{sext} = \frac{\int_0^{2\pi} J(R, \varphi) \sin 2\varphi d\varphi}{\int_0^{2\pi} J(R, \varphi) d\varphi} = \frac{2}{R^2} (\cos \varphi \sin \varphi) = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \sin 2\varphi}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (6)$$

となる。ただし、2次モーメントはビームサイズに関係する \cos の項と xy カップリングに関係する \sin の項に分けて、それぞれ *quadrupole* モーメント、*skew* モーメントと呼ぶ。注意したいのは、全電極の電圧和で規格化しておけばビーム電荷の変動に対し各モーメントの変動が打ち消されること、*quadrupole* モーメントはビーム位置にも依存するのでビームサイズを取り出すには位置補正が必要とすることである。また、 xy 各ビームサイズの絶対値はこの方法では計測できない。これは、パイプ内に誘起された鏡像電荷の分布が、ビームサイズの二乗差 $\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi = \text{const}$ を満たす限り電気力線が変化しないからである。

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

3. ビームサイズ計測への応用

3.1 100ビーム位置モニター

BPM として用いる四電極ストリップライン型モニターの設計パラメータを表1に示す。BPM の電極配置には二種類あり直線部では、図1に示すような90度の電極配置をもつBPM (90°BPM)を、一方ビーム周回部や偏向部では、エネルギーのずれた電子や放射光の電極への直接照射を避けるために45度傾いた電極配置のBPM (45°BPM)を設置している。このように45°BPM は、水平方向の電極間隙を少し大きくとっている。

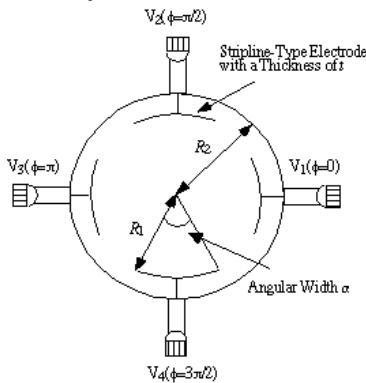


図1：90°BPM の電極構造。

表1：BPM の設計パラメータ

Parameter	90°BPM	45°BPM
R_1 [mm]	13.55	16.0
R_2 [mm]	18.5	20.0
α [deg]	60	34
t [mm]	1.5	1.5

ビームの電荷分布をガウシアンと仮定すると2次モーメント(J_{quad})及び3次モーメント(J_{sext})は、以下のようにビーム位置とサイズの関数として具体的に導出できる[3]。90°BPM に対し2次モーメントは、

$$J_{quad} = 2 \left(\frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2}{R^2} + \frac{x^2 \sigma_y^2}{R^2} \right) \quad (7)$$

となる。ただし、 σ_x, σ_y は、 x, y 方向のビームサイズ(1 σ)を表す。一方、45°BPM の2次モーメントは原理的にゼロとなり、3次モーメントにより初めてビームサイズが現れる。これは、 xy 方向のサイズの変化に対し45°BPM は感度が悪いことを示す。45°BPM に対する3次モーメントを以下に示す。

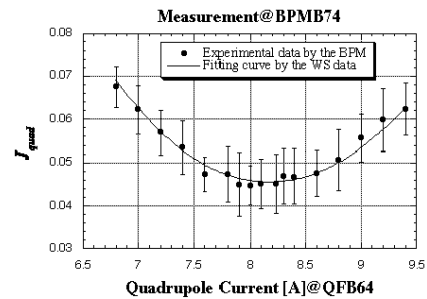
$$J_{sext} = \frac{2}{\sqrt{2}R} \left[\frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2}{R^2} + \frac{4(x^2 \sigma_y^2)}{R^2} \right] \quad (8)$$

3.2 ビームサイズ計測

KEKB 入射用単バンチ電子ビーム (~1nC/bunch) を用い180度周回部直前のエネルギーが1.7GeVに位置するBPMでテストした。ビームサイズは、手前に位置するQ電磁石の印加電流を変化させること

で調整した。図2(a), (b)は、45°BPM、90°BPM に対する実験結果をそれぞれ示す。図中(黒丸)BPM データは、20回平均とその標準偏差を示し、実線はBPM 近くのワイヤスキャナ(WS)によるビームサイズ校正曲線を示す。WSによる校正は、独立に取得した xy サイズからその二乗差を計算、オプティクスによるBPM位置でのサイズに変換、(7),(8)式によるモーメントの計算、最小自乗法による2次曲線フィットという一連の解析により得られたものである[3]。どちらの結果もビームウエストを明確に測定し多重極モーメントによるビームサイズ計測とのよい一致を示す。ここで、ビーム変動に起因すると思われる1ショットごとのサイズ変動は結構大きいことがわかる。

(a)



(b)

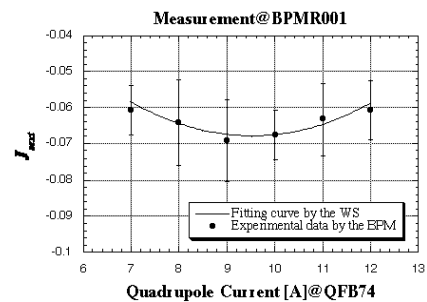


図2：Q電磁石の印加電流に対する電子ビームの(a)2次モーメントの変化(90°BPMによる)及び(b)3次モーメントの変化(45°BPMによる)。

4. エネルギー拡がり計測への応用

この方法を拡張することによりエネルギー分散を通じたエネルギー拡がりの計測が可能となる。ただし、エネルギー拡がりの絶対値は、何らかの方法で校正してやる必要があるが、一般的には相対変化のみで十分であろう。

4.1 100エネルギー拡がりモニター

ビームサイズ計測の分解能を上げるためストリップラインを8電極としエネルギー拡がりモニター(ESM)を設計した。表2に設計パラメータを、図4にESM断面図をそれぞれ示す。前節の議論と同様に水平方向の電極間隙を大きくしたいので、電極開口角は、15度とBPMに比べ小さくした。開口角は、信号S/N比が十分であれば問題なく、むしろ開口角拡がりから来る電極位置の不定性が小さくなり多重極モーメントの算出には有利である。

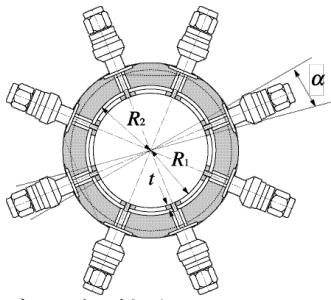


図4：エネルギー拡がりモニターの断面図。

表2 ESM の設計パラメータ

Parameter	ESM
R_1 [mm]	20.6
R_2 [mm]	23.4
α [deg]	15
t [mm]	1.5

4.2 エネルギー拡がりの計測

実験は KEKB 単バンチ電子ビーム ($\sim 1\text{nC}/\text{bunch}$) と陽電子生成用 1 次電子ビーム ($\sim 8\text{nC}/\text{bunch}$) を使い、180 度周回部中央の ESM を用いてテストした。ビームエネルギーは、同じく 1.7GeV である。初めに ESM 手前にある偏向磁石を用いてビーム位置に対する応答を調べた。これは、(5)式でのビーム位置依存性を調べるものである。測定結果を図5に示す。この結果は、(5)式におけるビーム位置補正が正しいことを示している。

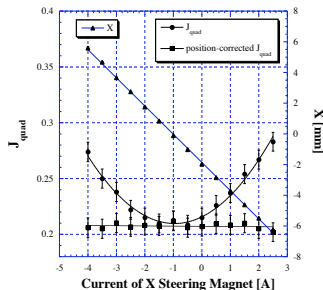


図5：偏向磁石印加電流に対するビーム位置、ビーム位置補正が有／無による 2 次モーメント (J_{quad}) の変化。

図6は、周回部前のブースタークライストロン (サブブースター) の位相変化に対する 2 次モーメント (J_{quad}) の応答を示す。図中、左右の曲線は、8nC/1nC 電子ビームの測定結果をそれぞれ示し、どちらも位相の変化に対し 2 次の変化を示している。1nC 電子ビームに対しては、近くのスクリンモニター (SC) の画像を処理したビームサイズ校正結果も同時に示す。図に示すように、周回部中央でのビーム電荷分布はガウシアンよりむしろ放物線分布とした方がよくフィットすることがわかる。エネルギー拡がり (σ_E/E) は、オプティクスパラメータを用いた以下の式で変換 (校正) できる。

$$\sigma_x^2 = \sigma_{x0}^2 + (\sigma_E/E)^2 \left(\frac{dx}{dx_0} \right)^2 + g \quad (9)$$

ここで、 σ_x 、 σ_{x0} は、それぞれエミッタンス、ベータ関数、エネルギー分散を表す。ただし、 σ_{x0} はゼロと

した。 g は ESM 各電極のゲインのバラツキから来る補正係数で、SC による校正から実験的に決めることができる。(9)式を用いて電子/1 次電子ビームに対しエネルギー拡がりを計算すると最小点ではそれぞれ $0.150 \pm 0.007\%$ 、 $0.264 \pm 0.004\%$ を得た。最小点は極値点となるのでその付近では、分解能は悪くなるが、それでも 10^{-3} 程度の精度が得られ、入射器のビーム制御には十分である。

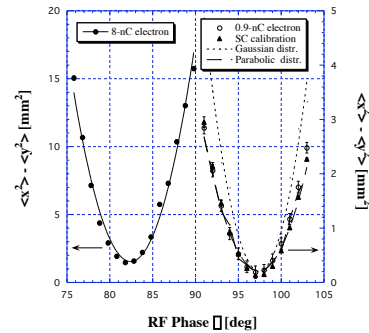


図6：サブブースターの位相に対する 2 次モーメント (J_{quad}) の変化。

図7に ESM で測定した 2 次モーメントとサブブースター位相の同時計測による時間変動 (約 6 時間) をそれぞれ示す。ここで ESM データは全てのショット (50Hz) をプロットしている。エネルギー拡がりの変動は、サブブースター位相の変動によく相関しているのが見てとれる。

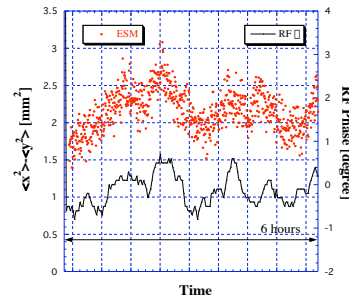


図7：ESM による 2 次モーメント (J_{quad}) とサブブースター位相の時間的変動 (~ 6 時間の計測)。

5. まとめ

ストリップライン電極による位置モニターを用いて電子ビームの多重極モーメント (3 次まで) が計測できることを実証した。この方法を 8 電極型モニターへ拡張しエネルギー拡がり計測に応用した結果 10^{-3} の分解能で計測可能であり、運転に使用できることを示した。2003 年 2 月 20 日からデータ収集[5]を始め現在まで順調に稼働している。近々フィードバックの試験を行う予定である。

参考文献

- [1] I.Abe *et al.*, NIM A499, (2003) pp.167-190.
- [2] R. H. Miller *et al.*, HEAC'83, Fermilab, 1983, pp.602-605.
- [3] T.Suwada, Jpn.J.Appl.Phys. 40 (2001) pp.890-897.
- [4] T.Suwada M.Satoh and K.Furukawa, Phys.Rev. ST Accel. Beams 6 032801 (2003).
- [5] 佐藤政則、諏訪田剛、古川和朗, "非破壊型ビームエネルギー広がりモニターのデータ収集.....", 本予稿集.