

# KEK-PS 主リングにおける横方向四極モードの測定

三浦孝子、五十嵐進、白形政司、外山毅

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

KEK 12-GeV PS で横方向の RMS ビームサイズを非破壊で測定することを目的とし、四極モードモニターシステムを構築した。ビームを使って四極モードに対する感度を校正し、実際にビームサイズの変動の測定を行った。

## 1 序論

ビームサイズの測定は、ビームを損失することなくビームの強度を上げるのに重要なパラメータであり、ビームダイナミクスの研究においても興味深いものである。KEK 12-GeV PS 主リング(MR)では、非破壊のビームサイズモニターとして、フライングワイヤー[1]と残留ガスモニター[2]が設置されている。特にフライングワイヤーは、ビームサイズを精度良く測定できるが、時間的に速い変化を測定することが難しく、また、ビーム強度が上がるとワイヤーが切れるといった問題がある。一方、現在インストールされている残留ガスモニターは、ビームサイズの変動は確認できるが、ビームサイズの絶対値に関しては不明瞭なものとなっている。本研究では、応答が速く、非破壊で RMS ビームサイズの絶対値を測定するための四極モードモニターシステム(Q モニター)を構築することとした。

四極モードを用いたビームサイズの測定は、主に電子加速器では以前から行われている。ピックアップには主としてストリップラインなどの電磁場カップリング[3-4]のものとアンテナ方式の磁場カップリング[5]のものがある。磁場カップリングの場合、選択的に四極成分を取り出すことができ、二極成分の影響をなくすることができるといったメリットがあるが、絶対値に直すときに、Q モニターの近くにある Fast CT を用いて規格化を行う必要がある。本研究では KEK-PS MR での初試験として、既にインストールされている静電型および壁電流型 BPM を利用した Q モニターの試験を行う。

## 2 BPM による四極モードの測定原理

BPM による四極モードの測定原理は、1983 年に Miller ら[3]によって示され、実験が行われている。ビームの横方向の分布をガウス分布と仮定し、水平、垂直方向に RMS サイズ  $\sigma_x, \sigma_y$  を有すると、円形 BPM の電極に誘起される誘導電流は(1)式のように表される。ここで、 $x, y$  はビーム重心の位置、 $R$  は BPM の半径、 $I$  はビーム電流である。2 次以上の項で、サイズ  $\sigma_x, \sigma_y$  が現れるが、高次になるにつれ、信号の大きさは次数  $n$  に対して  $R^n$  に従い急激に小さくなる。(1)式において、信号の四極成分を大きくするには、電極中心を  $\theta=0, 2/\pi, \pi, 3/2\pi$  にとり、 $\pi/2$  の幅を持つ四分割型の電極が望ましいと考えられる。KEK-PS MR では、既にこのサイズの電極を持つ BPM がインストールされているため、それを応用して測定を行うこととした。

$$\int J(R, \theta) R d\theta = \frac{I}{2\pi} \left[ \begin{aligned} & \{\theta \dots \text{monopole} \\ & + \frac{2}{R} [(x \sin \theta - y \cos \theta)] \dots \text{dipole} \\ & + \frac{2}{R^2} [((\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + (x^2 - y^2)) \frac{\sin 2\theta}{2} - xy \cos 2\theta] \dots \text{quadru.} \\ & + \frac{2}{R^3} [x(3(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + (x^2 - 3y^2)) \frac{\sin 3\theta}{3} \\ & \quad - y(3(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + (3x^2 - y^2)) \frac{\cos 3\theta}{3}] \dots \text{sextupole} \\ & + \text{higher orders} \end{aligned} \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (1)$$

上下左右の電極からの信号を U, D, L, R とすると、ビーム位置は、(2), (3)式を使って与えられ、(4)からは、四極モードを得ることができる。

$$J_{dipole} \Big|_x = \frac{L - R}{U + D + L + R} = \frac{2\sqrt{2}x}{\pi R} \left\{ 1 + \frac{3(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + (x^2 - 3y^2)}{3R^2} \right\} \quad (2)$$

$$J_{dipole} \Big|_y = \frac{U - D}{U + D + L + R} = \frac{2\sqrt{2}y}{\pi R} \left\{ 1 - \frac{3(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + (3x^2 - y^2)}{3R^2} \right\} \quad (3)$$

$$J_{quadrupole} = \frac{(L + R) - (U + D)}{U + D + L + R} = \frac{4}{\pi R^2} \{ (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + (x^2 - y^2) \} \quad (4)$$

四極モードに対しては、 $(x^2 - y^2)$  を差し引くことで、

$$m = \sigma_x^2 - \sigma_y^2 \quad (5)$$

を決定できる。しかし、これだけではビームサイズを決定できない。 $\beta$ 関数が異なる二箇所での測定結果、 $m_1, m_2$  を得ることで、次式の様にビームのエミッタンスを得ることができ、ビームサイズを求めることができる。

$$\epsilon_x = \frac{m_1 \beta_{y2} - m_2 \beta_{y1}}{\beta_{x1} \beta_{y2} - \beta_{x2} \beta_{y1}}, \quad \epsilon_y = \frac{m_1 \beta_{x2} - m_2 \beta_{x1}}{\beta_{x1} \beta_{y2} - \beta_{x2} \beta_{y1}} \quad (6)$$

## 3 四極モードの測定

ビームサイズを精度良く測定するには、(5)式に示す  $m$

の値が大きくなる四極電磁石 QF, QD の近傍で測定することが望ましい。ディスページョンが小さく、QF, QD の近傍にある BPM を用いて同時測定を行うこととした。ここで、ビームが BPM の中心を通った場合の典型的な四極モード  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$  の信号の大きさを(1)式を用いて見積ったところ、BPM からの出力電圧 600 mV の信号に対してそれに含まれる四極モードは QF で  $\sim 30$  mV, QD で  $\sim 7.5$  mV 程度であることから、S/N 良くデータを取得する必要がある。そのため、減衰の少ないケーブルを使い、ノイズも少なくするように 4 芯ケーブルとして、そのまわりもさらにシールドされてあるケーブルを用いた。

実験は、QF, QD の下流側の近くに設置してある壁電流型 BPM と静電ピックアップ型 BPM を使用した。また、四極モードの測定は、ビーム位置の変動によって大きな誤差を受けることから、ビームが MR へ入射後、ベータatron 振動がダンプした状態で測定を行った。測定は、二つの BPM からの信号を二台のオシロスコープで同時に取得した。また、オシロスコープの分解能は 8 ビットであるため、分解能を上げるため、PC 上で  $\sim 260 \mu\text{s}$  分のデータについて FFT を行い、MR 入射時の RF 周波数に近い 6 MHz のデータを用いて 4 極モードの計算を行った。また、水平方向にバンプ軌道を作ってビーム軌道をスキャンすることによって、

$$\frac{(L+R)-(U+D)}{L+R+U+D} = K_Q \{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + (x^2 - y^2)\} \quad (7)$$

で表される四極モードの感度係数  $K_Q$  を測定した。チューンを通常の場合 ( $\nu_x=0.164$ ) と、整数に近づけた場合 ( $\nu_x=0.058$ ) についても測定を行った。ビーム強度は、入射時で  $5.3 \times 10^{11}$  protons/pulse であった。

#### 4 測定結果

図 1, 2 に  $J_{quadrupole}$  の測定結果を示す。入射のバラツキが予想されるので、それぞれ 5 回ずつ測定を行い、平均値をとった。x だけを変化させているので、x の二次曲線になる。それぞれの結果をフィットすると、 $x^2$  の係数は、壁電流型と静電型 BPM の違いにかかわらず近い値をとり  $1.09 \times 10^{-4}$  程度となった。ただし、この値は(4)式で示される幾何学的な値  $4/(\pi R^2)$  に比べてほぼ 1/2 の大きさであった。そのため、測定に使用しものと同等の BPM で、ワイヤスキャンによるキャリブレーションを行った。ワイヤは、 $\phi 0.4$  mm のもので行った。その結果  $x^2$  の係数、つまり感度係数  $K_Q$  は  $1.13 \times 10^{-4}$  となり、実験結果を支持する結果となった。幾何学的数値とほぼ 2 倍も異なることについては、まだ理由が明らかではない。また、ワイヤを中心を持ってきた場合には  $J_{quadrupole}$  はゼロになるべきだが、オフセットが見られた。これは、電極やそれについているトランスのばらつきなどによって生じるものと考えられ、個々の BPM で違う値をもつと考えられる。 $K_Q$  が非常に小さい値なので、 $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$  を求める場合、信号のずれが小さくとも大きな誤差を生むと考えられる。

$J_{quadrupole} K_Q + y^2$  として  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + x^2 (+\Delta_{offset})$  を導出した結果を図 3, 4 に示す。本来、二次曲線の最小値が  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$  を与え

るべきものである。しかし、特に QF のところでは通常  $\sigma_x$  が  $\sigma_y$  よりも大きく偏平した形状をとるため、正の値をとるはずであるが、測定結果はマイナスになっているため、 $J_{quadrupole}$  にオフセットが含まれていると考えられる。キャリブレーション時にこの値を測定していればある程度は補正が可能であったが、今回は、既にインストールされている BPM を使用したため、それがなされておらず、絶対値を出すことは難しい。

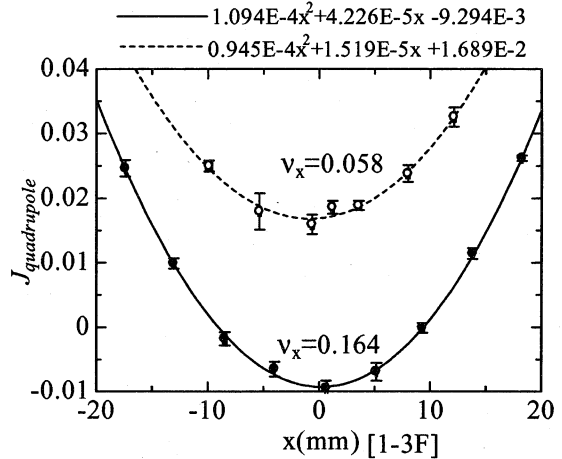


図 1 : x 方向にスキャンしたときの QF における  $J_{quadrupole}$  の測定結果。線は 2 次関数フィットの結果。

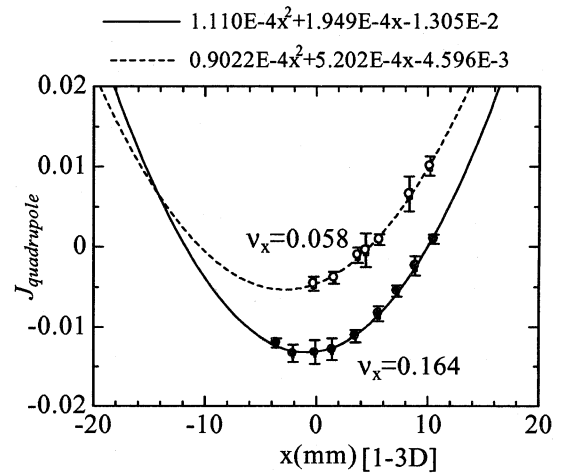


図 2 : x 方向にスキャンしたときの QD における  $J_{quadrupole}$  の測定結果。線は 2 次関数フィットの結果。

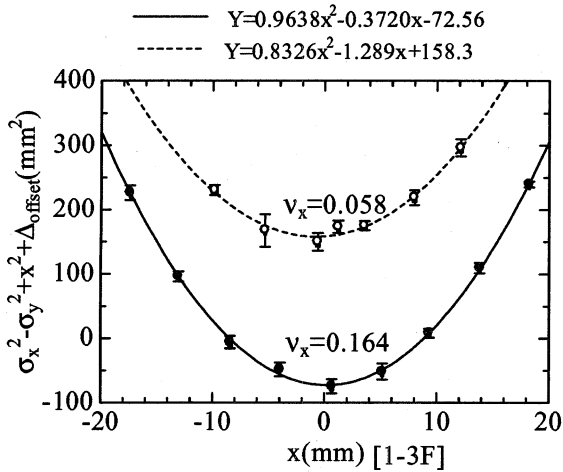


図 3: QF における  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + x^2 + \Delta_{offset}$  の測定結果。線は 2 次関数フィットの結果。

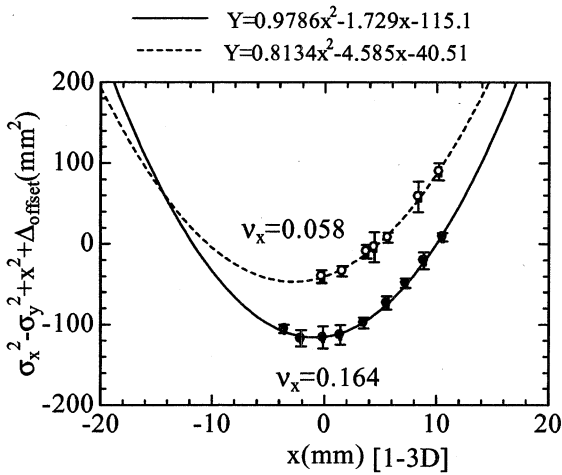


図 4: QD における  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + x^2 + \Delta_{offset}$  の測定結果。線は 2 次関数フィットの結果。

次に、チューンを変化させたときの測定結果について言及する。PS のフライングワイヤーを用いたビームプロファイルの測定により、ビームサイズのビーム強度およびチューンによる依存性が確認されている[6]。KEK-PS MR では、チューンを整数に近づけるとビームサイズが大きくなることから、チューンを通常の場合 ( $\nu_x=0.164$ ) と、整数に近づけた場合 ( $\nu_x=0.058$ ) の測定を行った。その結果、図 3,4 からわかるように、QF、QD の両方の位置で、x 方向のサイズが大きくなる方向に曲線の移動が見られた。ここで、 $\sigma_x$  だけが大きくなったとすると、測定結果から

$$\text{QF: } \Delta\sigma_x^2 = \Delta\epsilon_x \beta_{QF} \cong 230.86$$

$$\text{QD: } \Delta\sigma_x^2 = \Delta\epsilon_x \beta_{QD} \cong 74.59$$

となり、 $\Delta\epsilon_x$  を求めると  $14.90 \pi \text{ mm mrad}$  と  $17.54 \pi \text{ mm mrad}$  の結果が得られた。これらは 18% の差となる。少々誤差が大きいが、まだキャリブレーションが不十分であり、今のところ、BPM が多少サイズなど異なっているのに対

して同じ感度係数をかけて計算しているため、まだ改善の余地はあると期待できる。

## 5 まとめ

KEK 12-GeV PS で横方向の RMS ビームサイズを非破壊で測定することを目的とし、電氣的なピックアップをもつ BPM を利用した四極モードモニターシステムを構築し、試験を行った。ビームを使って四極モードに対する感度を較正し、ワイヤーキャリブレーションによる結果とほぼ同じ値が得られた。ただし、感度係数が非常に小さいため、小さな電氣的バランスの違いも拡大されて誤差の大きな値となる恐れがある。4 電極のバランスの違いによって生じる四極モードのオフセットのキャリブレーションがなされていないため、絶対値の導出には到らなかった。チューンを変化させた場合の測定では、既にフライングワイヤーで確認されている結果と同様なビームのサイズ変動 (エミッタンス変動) が確認できた。今後は、他のモニターで規格化を行うなどの較正を行い、絶対値測定を行いたい。また、将来的には、1 ターン毎のサイズ変動の測定も行いたい。また、ダイボールの運動による誤差の混入を小さくするため、磁場カップリングのものとの比較検討を含め、モニターの改良を目指す。

## 謝辞

KEK の諏訪田剛氏、佐藤政行氏、手島昌己氏の御協力、御助言に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Susumu Igarashi, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **482** (2002) 32-41.
- [2] Tadamichi Kawakubo, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **302** (1991) 397-405.
- [3] R. H. Miller, *et al.*, *12th Int. Conf. on High Energy Accelerators, Batavia* (1983) 602-605.
- [4] T. Suwada, *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* vol.6, 032801 (2003)
- [5] A. Jansson, D. J. Williams, *Nucl. Instrum. Methods A* **479** (2002) 233-242.
- [6] Susumu Igarashi, *et al.*, *PAC2003, Portland, WPPG009*