

2007 年度加速器夏期実習用テキスト：ビーム位置計測

諏訪田 剛¹

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

1. はじめに

加速器において、ビームの性質を知ることは重要である。ビームの性質を計測することをビーム計測、ビーム診断、或いはビームモニタリングと呼び、計測装置自身をビームモニター（単にモニター）と呼んでいる。ビーム計測には、ビームにできるだけ小さな摂動を与えビームの応答を計測する方法（非破壊型計測）とビームそのものを大きく破壊する方法（破壊型計測）があるが、できるだけ非破壊でビームを計測することがビームを安定に制御する観点から言って望ましい。

電子・陽電子線型加速器においては、ビームは、 10^{10} 個程度の電子（陽電子）が1つの塊（バンチと呼ぶ）となって、幾つかのバンチ列（パルス）又は、単バンチとしてパルスの電子銃から発生し、加速・輸送される。バンチは、ラグビーボールのような形状（実際はもっと複雑である）と考えると理解しやすい。

本実習では、電子・陽電子線型加速器における非破壊型モニターであるビーム位置モニターについてその原理を理解し、実習を通してビームを操る、計測する、制御する、といった観点からビームの挙動をあたかも目で見ているような体験をして頂ければと思っています。

2. ビーム位置を計測する

ビーム位置とは、ビームの進行方向に垂直な平面上の通過する位置のことをいい、通常、[mm]や[μm]を使って二次元座標上の点で表す（加速器の専門用語では、この平面を横方向といい、また、ビームの進行方向を縦方向という）。

高エネルギービーム($\gamma \gg 1$)が高真空中に保たれた円筒形の金属パイプの中心軸を走行する場合を考えてみる。荷電粒子の集まりであるビームは、電場を伴うが、実験室系では、相対論的効果で磁場も伴うようになる（図1(a)）。ビームから出る電気力線は、パイプ壁面に垂直に入る。一方、磁力線は、電気力線を取り囲むようにループ状に発生する。今度は、ビームが変位してパイプを走行する場合を考えてみる。電気力線は、パイプ壁面に垂直に入る、磁力線と電気力線は直行する、という条件で描いてみると、図1(b)のようになる。図に示すように、電気力線

と磁力線の双方にゆがみが生じ、変位が大きいほどゆがみも大きくなる。特に、電気力線に着目すると、ビームに近い壁面ほど、電気力線の密度が濃く、遠い壁面では薄くなっていることがわかる。

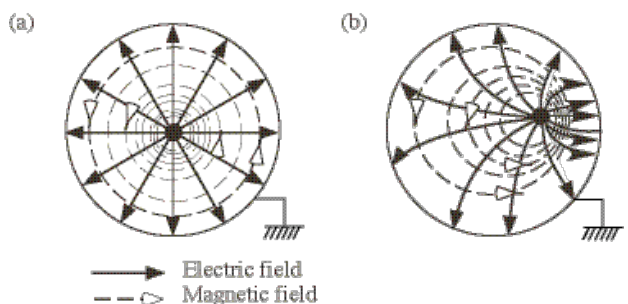


図1：ビームパイプ内を運動する荷電粒子（正電荷）により誘起された電磁場の様子。(a) ビームがパイプ中心を通過する場合、(b)ビームがパイプ中心から変位して通過する場合。

このように、壁面上の電気力線の密度（壁面上には鏡像電荷が誘起される）は、ビーム位置に依存することが容易に推測できる。もし、壁面近くに小さな電極を多数埋め込んだとして、各電極に誘起される鏡像電流（又は電圧）を測定するならば、ビーム位置を算出することができる。

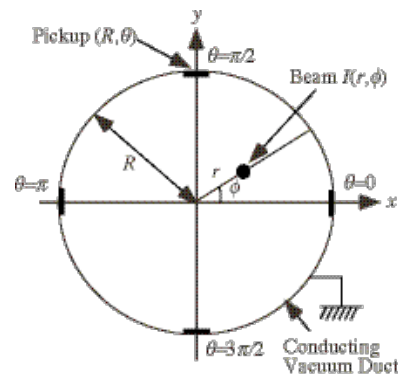


図2：金属パイプ内に変位して通過するビームの座標と4電極の座標。

実際の位置モニターでは、図2に示すように必要最小限の4つの電極を配置しビーム位置を測定する。

電極には、鏡像電流が流れるが、加速器ではこれを壁電流と呼んでいる。電極の幅が十分小さいとす

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

ると、ビーム位置と各電極の位置に依存して、壁電流密度は、以下の公式で表すことができる。

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

ここで、 $I(r, \phi)$ 、 $j(r, \phi, R, \theta)$ は、それぞれ、ビーム電流及び壁電流密度を表す。ここで注意したいのは、壁電流密度は、 $1/R$ に比例することである。壁電流の検出には、パイプ径を出来るだけ小さくし電極をビームに近づけることで感度が上げることができる。

図3に、ビーム位置を変化させたときの4電極に誘起される壁電流密度の変化を示した。このように、ビーム位置検出は、壁電流密度の変化を検出することで行われる。

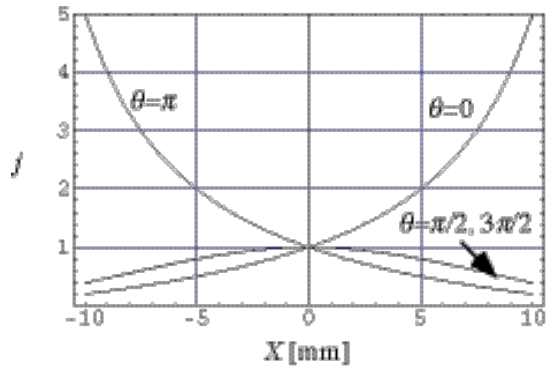


図3：ビーム位置 ($X, Y=0, R=15\text{mm}$) を X 軸方向に変化させたときに4電極に誘起される壁電流密度の変化。

ビーム位置を算出するには、4電極の各出力値を用いて以下のように演算すると都合がよい。すなわち、対向する電極の壁電流密度の差 (Δ) と和 (Σ) の比 (Δ/Σ 、デルタオーバースムと読む) を計算してみると以下のようにビーム位置の変位に対し近似的に線形となる測定量を得ることができる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta}{\Sigma}\right)_x &= \frac{j_1(r, \phi, R, \theta_1) - j_3(r, \phi, R, \theta_3)}{j_1(r, \phi, R, \theta_1) + j_3(r, \phi, R, \theta_3)} \\ &= \frac{r \cos \phi}{R/2} = \frac{x}{R/2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta}{\Sigma}\right)_y &= \frac{j_2(r, \phi, R, \theta_2) - j_4(r, \phi, R, \theta_4)}{j_2(r, \phi, R, \theta_2) + j_4(r, \phi, R, \theta_4)} \\ &= \frac{r \sin \phi}{R/2} = \frac{y}{R/2} \end{aligned} \quad (3)$$

これらの式が、ビーム位置計測の基本原理を与える。これをグラフにすると図4のようになる。

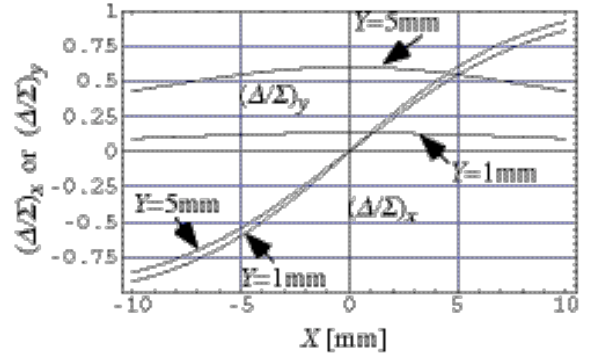


図4：ビーム位置 ($X, Y=1, 5\text{mm}, R=15\text{mm}$) を変化させたときの $(\Delta/\Sigma)_x$ 及び $(\Delta/\Sigma)_y$ の変化。ただし、(1)式を用いて計算した。

ここで特徴的なことは、ビーム位置の変位が余り大きくない中心領域では、 $(\Delta/\Sigma)_x$ はほぼ線形に変化することがわかる。また、 $(\Delta/\Sigma)_y$ の変化は緩やかであることを示している。実際の位置モニターでも、このような演算を計算機上で高速で行いビーム位置を算出している。

図5に、実際のストリップライン型の電極をもつビーム位置モニターを、図6に検出されるモニター信号波形を示しておく。

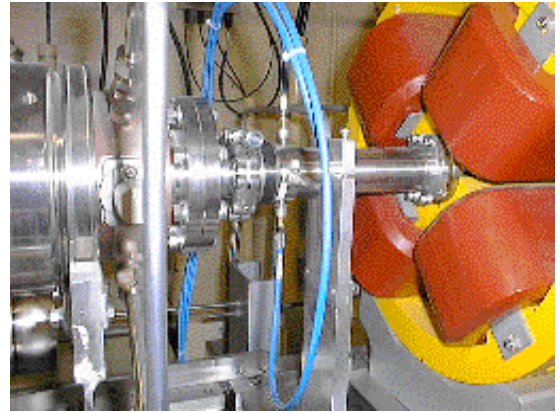


図5：ビーム位置モニター。4電極の各信号は、同軸ケーブルで検出回路まで伝送される。

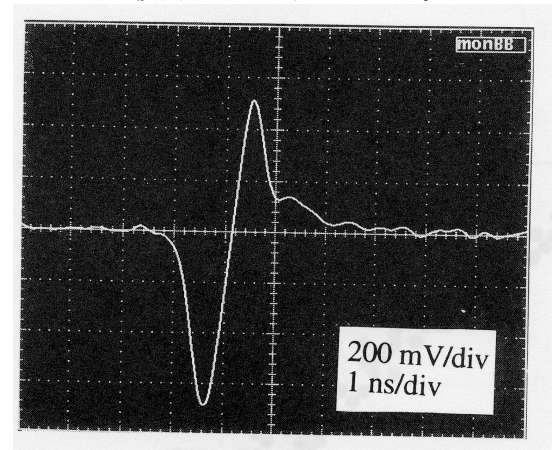


図6：単バンチ電子ビーム（バンチ長 10ps、電荷量 1nC/bunch）による信号波形の観測。