

Orbit Measurement by Changing the Strength of Quadrupole Magnets in ATF BT Line

T. Okugi^A, K. Kubo^B, J. Urakawa^B and M. Takano^C

^ADepartment of Physics, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University

1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi, Tokyo-to, 192-03, Japan

^BHigh Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

^CDepartment of Physics, Faculty of Science, Toho University

2-2-1 Miyama, Funabashi-shi, Chiba-ken, 275, Japan

Abstract

ATF BT (Beam Transport) line, which has the length of about 50m, consists of 26 quadrupole magnets, 13 bending magnets and some kinds of monitors. The transmission efficiency in ATF BT line was about 50% for some reasons. One of the reasons was why there were not enough amount of BPMs in ATF BT line for orbit tuning. Therefore, the orbit measurement utilizing modification of the current for quadrupole magnets was carried out. The results are consistent with the read-out positions of BPMs except for a few BPMs located at the end of BT line and show that the electron beam has the maximum horizontal offset of 6mm and the vertical of 2.5mm.

ATF BT ラインにおける 4 極電磁石の磁場変調を利用したビーム軌道測定

1. はじめに

ATF BT ラインは図 1 に示されるような 26 個の 4 極電磁石と 13 個の偏向電磁石からなる全長約 50m のビーム輸送ラインである。この ATF BT ラインのビーム診断系は 12 個のビーム位置モニター (BPM; 軌道調整用の 11 個のストリップライン型およびボタン型 BPM [1,2] と 1 個のエネルギーフィードバック用 BPM)、4 個のビームプロファイルモニターおよび 2 個のビーム電流モニターであり、ビーム調整のためには必ずしも十分な量であるとはいいがたい。そのためビームの調整が難しく、現在のところビーム輸送効率は 50% 程度とあまり良くはない。ビーム輸送効率改善のためには正確なビーム軌道調整が必要であり、正確な軌道調整をおこなうためにはより多くの位置でのビーム軌道に関する情報が必要となる。そこでより多くの位置でビーム軌道に関する情報を得るために 4 極電磁石の磁場変調を利用したビーム軌

道変位測定をおこなった。

2. ビーム光学系のモデル化

実際のビーム光学系は計算から求められる理想的なビーム光学系との間に差異を生じる。その原因として、例えば 4 極電磁石の場合は磁場誤差や有効磁極長の評価誤差およびビーム軸方向の設置位置誤差等が挙げられる。これらのすべての誤差を 4 極電磁石の k 値の誤差という一つの変数でモデル化し、軌道補正用電磁石の偏向角度変化に対するビーム軌道応答を調べるることにより、このモデル化された k 値の誤差を ATF BT Line の全ての 4 極電磁石に対して評価した[3]。

2.1 測定原理

$R_{12}(M_i, Z_j)$, $R_{34}(M_i, Z_j)$ をそれぞれ j 番目の軌道補正用電磁石の偏向角変化量に対する i 番目の BPM の水平方向および鉛直方向の読み出し位置変化係数 (転送行列の 1 行 2 列成分および 3 行 4 列成分) とする。つまり、

$$x_i = R_{12}(M_i, Z_j) x'_j \quad (1)$$

$$y_i = R_{34}(M_i, Z_j) y'_j \quad (2)$$

とする。ここで x_i, y_i は i 番目のビーム位置モニターの読み出し位置の変化量、 x'_j, y'_j は j 番目の軌道補正用電磁石による偏向角度の変化量を表す。また $R(M_i, Q_m)$, $R(Q_m, Z_j)$ をそれぞれ m 番目の 4 極電磁石から i 番目の BPM までの転送行列、 j 番目の軌道補正用電磁石から m 番目の 4 極電磁石までの転送行列とすると、4 極電磁石の k 値にそれぞれ Δk_m の微小な誤差があるとき転送行列 R_{12}, R_{34} は、

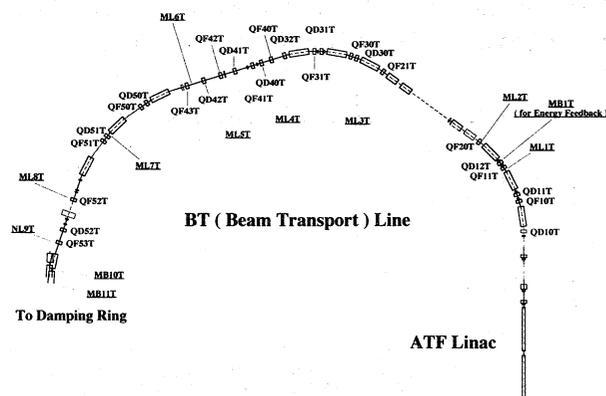


図 1 ATF BT Line の配置図

$$R_{12}(M_i, Z_j) \approx R_{12, \text{mod}}(M_i, Z_j) - \sum_m R_{12}(M_i, Q_m) R_{12}(Q_m, Z_j) \Delta k_m \quad (3)$$

$$R_{34}(M_i, Z_j) \approx R_{34, \text{mod}}(M_i, Z_j) + \sum_m R_{34}(M_i, Q_m) R_{34}(Q_m, Z_j) \Delta k_m \quad (4)$$

と近似できる。さらにビーム位置モニターの位置感度係数誤差および軌道補正用電磁石の偏向角度誤差をそれぞれ $\Delta B_{x,i}$, $\Delta B_{y,i}$, ΔS_j とおき、軌道補正用電磁石の偏向角度およびビーム位置モニターの読み出し位置を

$$x'_j = (1 + \Delta S_j) x'_{j, \text{mod}} \quad (5)$$

$$y'_j = (1 + \Delta S_j) y'_{j, \text{mod}} \quad (6)$$

$$x_i = (1 + \Delta B_{x,i}) x_{i, \text{mod}} \quad (7)$$

$$y_i = (1 + \Delta B_{y,i}) y_{i, \text{mod}} \quad (8)$$

と表すとき、j 番目の軌道補正用電磁石の偏向角度に対する i 番目のビーム位置モニターの読み出し位置変化は誤差が微小であるとき

$$x_{i, \text{mea}} = \{R_{12, \text{mod}}(M_i, Z_j) + \Delta R_{12}(M_i, Z_j)\} x'_{j, \text{mod}} \quad (9)$$

$$y_{i, \text{mea}} = \{R_{34, \text{mod}}(M_i, Z_j) + \Delta R_{34}(M_i, Z_j)\} y'_{j, \text{mod}} \quad (10)$$

$$\Delta R_{12}(M_i, Z_j) \approx - \sum_m R_{12}(M_i, Q_m) R_{12}(Q_m, Z_j) \Delta k_m + (\Delta S_j - \Delta B_{x,i}) R_{12, \text{mod}}(M_i, Z_j) \quad (11)$$

$$\Delta R_{34}(M_i, Z_j) \approx \sum_m R_{34}(M_i, Q_m) R_{34}(Q_m, Z_j) \Delta k_m + (\Delta S_j - \Delta B_{y,i}) R_{34, \text{mod}}(M_i, Z_j) \quad (12)$$

と表せる。ここで全ての (i, j) の組に対する $\Delta R_{12}(M_i, Z_j)$, $\Delta R_{34}(M_i, Z_j)$ を最小にするように変数 Δk_m , $\Delta B_{x,i}$, $\Delta B_{y,i}$, ΔS_j を決めることにより誤差の評価ができる。

2.2 測定結果

測定は 1.295 GeV のビームエネルギーにおいて ATF BT ライン上の全ての軌道補正用電磁石および偏向電磁

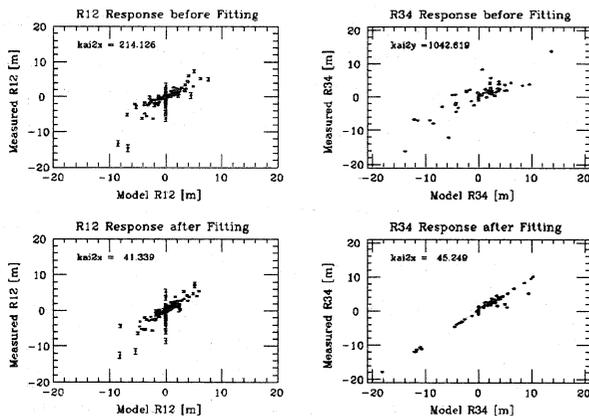


図2 ビーム光学系から計算された R_{12} , R_{34} のデザイン値に対する測定値の相関。上部は最小二乗法によるフィッティング前の相関、下部はフィッティング後の相関を表す。また左図は水平方向、右図は鉛直方向の相関を表す。

石の補助コイルに +1.0 A, 0 A, -1.0 A の3段階の電流を流すことによりおこなった。この 1.0 A という電流値は測定に使用したビームエネルギーでは約 0.78 mrad の偏向角度に相当する。さらにそれぞれの電流値に対する測定値には 25 回の測定から得られた値の平均値を用いた。また実際の最小二乗法によるフィッティングにはデザイン軌道からのエネルギーの偏差を加えおこなった。結果を図2に示す。上部はフィッティングをおこなう前の、下部はフィッティングをおこなった後のビーム光学系から計算された R_{12} , R_{34} のモデル値に対する測定値の相関を示している。モデルと実際の光学系とが等しいときこれらは1対1の相関を示すことになる。またこれらのフィッティングから推定される4極電磁石のk値の誤差を図3に示す。最大で約10%程度のk値の誤差をモデルに組み込んだときの R_{12} , R_{34} が実験値と最も良い一致を示した。しかしながら最小二乗法によるフィッティング後も図2の R_{12} の測定値がモデルとあまり良く一致しておらず、この原因としてエネルギージッター、x-y カップリングおよびBT Line 後半でのビーム損失等が考えられる。水平方向のエラーバーが鉛直方向に比べて大きいことは測定の際のエネルギージッターに起因しており、x-y カップリングによる効果は図2の R_{12} のモデル値が0における測定値に表れている。この測定値は鉛直方向の軌道補正用電磁石および偏向電磁石の補助コイルに電流変化を起こしたときの水平方向の軌道変化量を意味している。測定値は垂直方向偏向電磁石の補助コイルに電流変化を与えたときに特に大きい値を示しているため、カップリングを引き起こしている源は垂直方向偏向電磁石の設置角度誤差であると考えられる。またBT Line 後半にあるBPMにおいてモデルと測定値との間に特に大きな差異が生じているが、これはBT Line 後半でのビーム損失が起因していると考えられる。

3. 4極電磁石の磁場中心に対するビーム軌道測定

3.1 測定原理

ビームが m 番目の4極電磁石の磁場中心から水平方向および鉛直方向にそれぞれ $x_{\text{offset}, m}$, $y_{\text{offset}, m}$ だけ偏差がある時ビームが受ける軌道変化は近似的に、

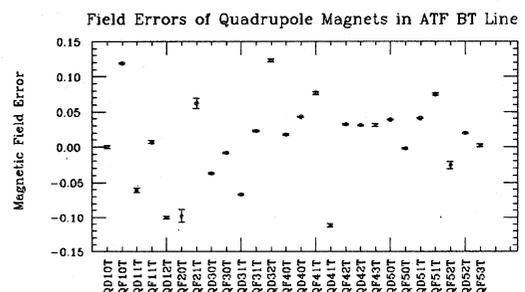


図3 フィッティングから推定される4極電磁石のk値の誤差

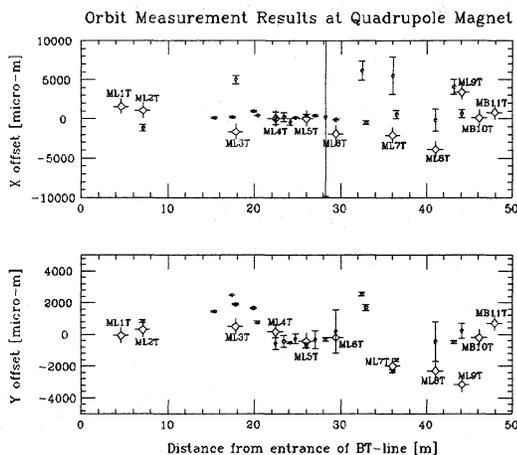


図4 4極電磁石の磁場中心に対するビーム軌道変位。エラーバーをもつ丸が4極電磁石におけるビーム軌道変位を表し、菱形がBPMにより測定されたビーム位置を表す。

$$x'_{Q_m} \approx -k_m x_{\text{offset},m} \quad (13)$$

$$y'_{Q_m} \approx k_m y_{\text{offset},m}$$

と表せる。ここで k_m は m 番目の4極電磁石の k 値であり、 x'_{Q_m} , y'_{Q_m} はそれぞれ m 番目の4極電磁石におけるビーム軌道の蹴り角を表す。

ここで4極電磁石の k 値を意図的に Δk_m だけ変化させたとき、その後のBPMにおいて軌道は

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= R_{12}(M_i, Q_m) \Delta x'_{Q_m} \\ &\approx -R_{12}(M_i, Q_m) \Delta k_m x_{\text{offset},m} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_i &= R_{34}(M_i, Q_m) \Delta y'_{Q_m} \\ &\approx R_{34}(M_i, Q_m) \Delta k_m y_{\text{offset},m} \end{aligned} \quad (15)$$

だけ変化する。この軌道変化から4極電磁石の磁場中心に対するビーム軌道の変位を測定することができる。

3.2 測定結果

4極電磁石を変化させたときのBPMより得られたビーム位置変化から最小二乗法により式(14), (15)の $x_{\text{offset},m}$, $y_{\text{offset},m}$ を決めた。その際最小二乗法に使われた R_{12} , R_{34} は2節のモデル化で計算された4極電磁石の k 値の誤差を含めて計算された値である。また今回の測定はエネルギーフィードバック [4] を利用してビームエネルギーを 1.295 GeV に固定しておこなったため、エネルギーフィードバックに使用したBPM (MB1T) 以後の4極電磁石での測定に限った。測定に使用した4極電磁石の電流変化量は +1.0A, 0A, -1.0A の3段階で、これらは k 値の変化量に換算すると 0.01 ~ 0.03 m^{-1} に相当する。測定結果を図4に示す。図中には4極電磁石の磁場中心に対するビーム軌道変位およびBT Lineの全てのBPMによるビーム位置測定の結果が示されている。この測定値はBT Lineの後半部分の4極電磁石以外では4極電磁石直前のBPMによる軌道測定の値とよい一致を示し、その変位量は水平方向で最大約6mm、鉛

直方向で最大約2.5mmと非常に大きな値であることがわかった。しかしながらML6T以後の4極電磁石においてはビーム軌道変位の測定結果の誤差も大きく4極電磁石直前のBPMの読み値との間にもあまり良い一致を示していない。これは4極電磁石とその下流のBPM間でのビーム損失が原因であるとみられる。ビーム損失は軌道変位による場合とビームプロファイルの非収束による場合があり、今回の測定は4極電磁石の磁場変調を利用した変位測定法が後者によるビーム損失箇所の同定の可能性があることを示唆している。

また今回測定した変位量は4極電磁石の磁場中心からの変位であり、4極電磁石の設置位置誤差の分だけビーム軌道の幾何学的中心との間に差異を生じる。しかしながらBT Lineの4極電磁石の設置位置精度は100 μ m程度と今回測定された4極電磁石でのビーム軌道変位量に比べてあまり大きくはないため現段階では無視できる。

このように4極電磁石の磁場変調を利用した軌道変位測定を利用することにより、ビーム軌道に対する情報およびビーム損失箇所に関する情報など今後のビーム調整に必要な多くの情報を得ることができるとわかった。

4. まとめと今後の課題

4極電磁石の磁場変調を利用したビーム軌道の変位測定をおこなった。測定の結果、BT Line後半の4極電磁石を除き4極電磁石直前のBPMによる測定位置との一致を示し、軌道調整に利用できるとわかった。またBT Line後半の4極電磁石に関してはビーム損失のためあまりよい一致を得られなかった。

今後は2節のモデル化の際に指摘した鉛直方向偏向電磁石の再アライメントをおこなった後、この4極電磁石の磁場変調を利用したビーム軌道変位測定を使い、ビーム軌道調整および4極電磁石のアライメントを進める予定である。

謝辞

今回の発表にあたって協力していただいたAIFグループの方々に厚く感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Hayano et al., "BPM System of ATF Linac", Proc. of 21th Linear Accelerator Meeting in Japan, 105 (1996)
- [2] F. Hinode et al., "A CONVENTIONAL READ-OUT ELECTRONICS FOR THE BOTTOM-TYPE BPM IN THE ATF DAMPING RING", Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conference (1997)
- [3] K. Kubo et al., "TEST OF OPTICS DIAGNOSTICS IN ATF", Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conference (1997)
- [4] H. Hayano et al., "Beam Energy Feedback of ATF Linac", in this meeting