

## A NON-DESTRUCTIVE MOMENTUM SPREAD MEASUREMENT WITH A 4-STRIPLINE BEAM POSITION MONITOR IN THE J-PARC LINAC

S. Lee<sup>A)</sup>, Z. Igarashi<sup>A)</sup>, T. Ohkawa<sup>B)</sup>, S. Sato<sup>B)</sup>, F. Hiroki<sup>B)</sup>, T. Tomisawa<sup>B)</sup>, A. Ueno<sup>B)</sup>, Y. Kondo<sup>B)</sup>,  
M. Ikegami<sup>A)</sup>, J. Kishiro<sup>B)</sup>, H. Yoshikawa<sup>B)</sup>, T. Toyama<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> KEK, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan  
<sup>B)</sup> JAERI, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195, Japan

### Abstract

A non-destructive beam momentum spread monitor using a 4-stripline pickups has been developed in order to measure and control the momentum spread of J-PARC linac beams. The momentum spread of less than 0.1% is required for 3GeV rapid cycling synchrotron (RCS) injection to avoid uncontrolled beam losses. The 4-stripline monitor has to be mounted on a L3BT beam line of large dispersion to compare the difference of horizontal and vertical beam size (m value). In this paper, momentum spread measurement for J-PARC linac is examined. Preliminary results of beam size and m value measurement with quadrupole mode of the signal of 4-stripline BPMs in the KEK MEBT1 are also discussed.

### J-PARC LINACにおける4電極モニターを用いた非破壊型 $\Delta P/P$ 測定

#### 1. はじめに

J-PARC linacでは、RCSにおける入射条件の1つとして運動量拡がり $\Delta P/P=0.1\%$ を維持、監視する必要がある。入射直線部に分岐ラインを設け、偏向磁石によるエネルギーアナライザーを設置するなどの方式が考えられているが、高コストであることに加え、エネルギー分解能やメンテナンス性など、より詳細な検討やR&Dが必要である。Linacのビームコミッションが予定される2006年9月に運動量中測定を開始する為には、低コストかつ非破壊に測定可能な手法の開発が急務である。このような状況を鑑み、4電極モニターを用いた、非破壊型運動量拡がり測定の検討をJ-PARC L3BTの設計ラティスに対して行った。またこの測定法の基礎となる、4電極モニターによるビームサイズ測定をKEK MEBT1において試験した。本論文では実験結果の一部を示し、その精度や安定性についても議論する。

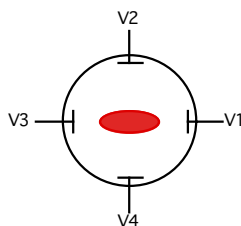


図1. J-PARC LINACのBPM電極配置。

#### 2. 運動量拡がり測定の原理

L3BT下流部の運動量分散関数 ( $\eta$ ) が大きい場所に4電極モニターを設置する。4極モードを観測す

る為には、図1のように電極配置を0、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3/2\pi$ に配置するのが望ましく、L3BTのBPM電極が利用可能である。以下のような信号から4重極モードは得られる[1]。

$$Q = \frac{(V_1 + V_3) - (V_2 + V_4)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} = \frac{C}{R^2} (\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + x_0^2 - y_0^2) \quad (1)$$

ここで、

C: 1~2程度の定数 (電極形状による)

R: 電極半径

$\sigma$ : ビームサイズ

$x_0, y_0$ : ビーム位置

である。

水平、垂直のビーム位置は通常のBPMとして信号を処理する事で得られる。すると

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

の項を測定から求める事で

$$\sigma_x^2 = \left(\eta \frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \epsilon_x \beta_x \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \epsilon_y \beta_y$$

の関係から

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\eta} \sqrt{m - (\epsilon_x \beta_x - \epsilon_y \beta_y)} \quad (4)$$

が得られ、 $\Delta P/P$ が観測可能となる。このうち、(3)式の右辺第一項が(4)式右辺の第二項と同等かそれ以上に大きい場所が $\Delta P/P$ の測定に適した配置となる。ベータ関数や分散関数には計算値を用いるが、エミッタンスについては測定できる可能性がある。すなわち、(5)式分母が0でなく、かつディスパーションフリーな2つの場所のBPMを利用して、以下の関

係式からrmsエミッタンスが得られる[2].

$$\varepsilon_y = \left( \frac{m_1 \beta_{x2}}{\beta_{x1} \beta_{y2}} - \frac{m_2}{\beta_{y2}} \right) / \left( 1 - \frac{\beta_{y1} \beta_{x2}}{\beta_{x1} \beta_{y2}} \right)$$

$$\varepsilon_x = \frac{m_1 + \varepsilon_y \beta_{y1}}{\beta_{x1}} \quad (5)$$

### 3. L3BTにおける運動量拡がり測定

図2にL3BTのベータ関数と分散関数を示す。Linacではアーク部やRCS入射ラインを除き、分散関数はゼロとなる。またRCSへの入射条件を監視する為には下流部の方が望ましく、L3BTビームラインの150m~180mにモニターを設置する。

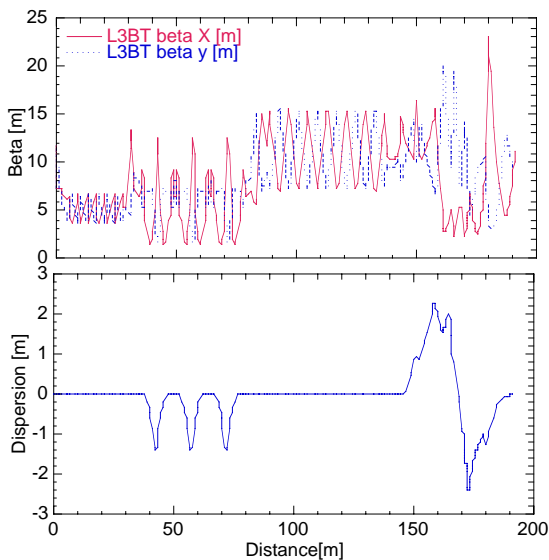


図2. J-PARC L3BTのベータ関数と分散関数。

図3に分散関数と運動量拡がりに関する項  $(\eta \cdot \Delta P/P)^2$  とベータ関数を表わす項  $\varepsilon \beta_x - \varepsilon \beta_y$  の比較を示す。ベータ関数やエミッタンスの寄与が

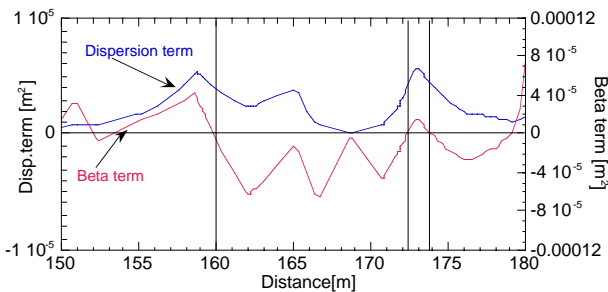


図3. 運動量拡がりとはベータ関数を表す項の比較。

小さく、運動量拡がり測定に適した場所は160m, 172m及び174m付近の3箇所が考えられる。運動量拡がりの絶対値測定の為には、分散関数の無い位置で同様の測定を行い、ビームサイズ変動を参照することが望まれる。172m付近で測定を行った場合、リファレンスに適した168.5mでの測定結果と比較しや

すく、より高精度な評価が可能となる。図4は172m~174m付近を拡大した図である。ベータ関数とエミッタンスの項はBPMの軸方向長さ~0.2mの範囲で変化するが、 $(\eta \cdot \Delta P/P)^2$ の項よりは小さい。また近傍の四重極磁石Q5に±1.0%のエラーを入れ、計算してみたが各項に大きな変化は見られない(実際のQ磁石のエラーは±0.1%程度以下と見積もられている)。さらに空間電荷の効果を入れた計算を行い、補正等に反映する必要がある。

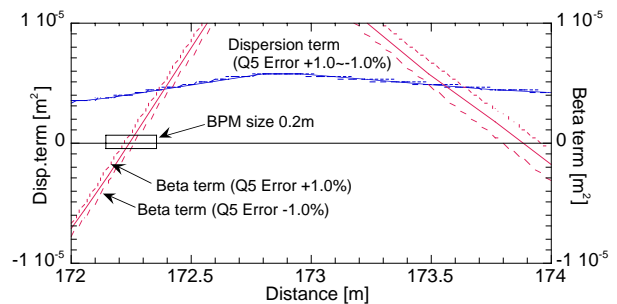


図4. Q磁石のエラーに対する各項の変化。

運動量拡がりが0%~0.3%の範囲で変化した場合、ビームサイズは160m, 172m, 174m付近において約 $\Delta x \sim 2.5\text{mm}$ 程度変化する(図5)。これはm値に換算すると約 $30\text{mm}^2$ 程度の変化分に相当する。この1/10程度の分解能と安定度を確保することがモニター性能に対する目標値となる。

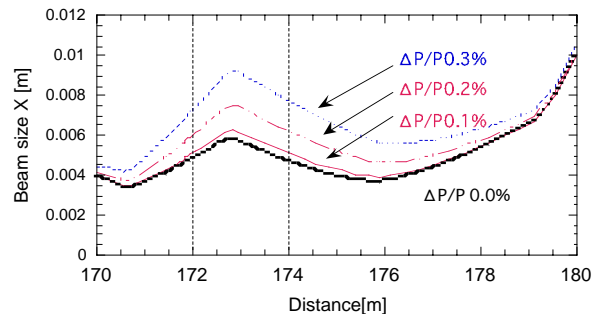


図5. 運動量中が変化した場合のビームサイズの変化。

### 4. MEBT1における4重極モード測定

L3BTと同じ電極配置をもつBPMは、既にMEBT1において試作機を製作し、ビームテストを開始している[3]。ログアンプ出力を8bit ADCで処理するため、12bit ADCを使用する実機に比べ、分解能や精度は低い。しかしながら現状のノイズレベルに対し、どの程度の信頼性や精度が得られるかテストすることは量産機の開発に対し有用である。さらにプログラム開発等先行して行うことが出来るため、J-PARCのビームコミッショニングに対し、初期の段階から運動量拡がり測定を行うことが可能となる。

MEBT1では8台のQ磁石の磁極内にBPMを配置している。各磁場中心に対する設置精度はビームを用

いたキャリブレーションにより約±0.3mm以内であることが確認されている[4] (図6)。

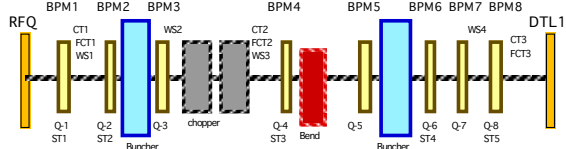


図6. MEBT1のモニター配置。

隣り合う2つのBPMのm値を用いることで、(5)式からrms エミッタンスが求まる。すると計算で与えられるベータ関数からビームサイズが評価可能となる。図7に4電極モニターによる測定結果とTRACE3Dによる計算から得られる水平・垂直方向のrmsビームサイズを示す。垂直方向のビームサイズがやや計算値より大きいのが、両者の値と傾向は概略一致している。また補正磁場を励磁しビーム位置に変位を与えた場合の測定を行い、位置変動そのものはビームサイズ測定に影響しない事を確認した。さらにQ磁石の電流値を変化させ収束力を変えた場合についても測定を行い、計算で予想されるビームサイズの変動と矛盾しない観測結果を得た。

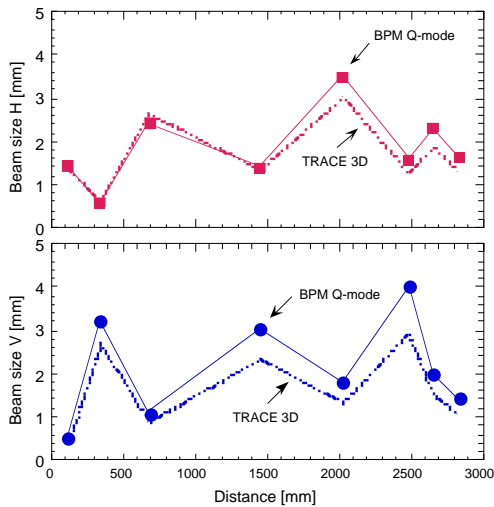


図7. ビームサイズ測定の結果とTRACE3Dによる計算結果の比較。ビーム電流は約5mA。

運動量拡がり測定では、4電極の出力信号からm値を直接測定する。運動量中の相対変化はベータ関数などが変化しないという仮定の下で求められるが、分散が無い位置での測定と比較することで、運動量中の絶対値をも評価できる可能性がある。m値の精度と安定度は運動量中の測定精度に最も大きく寄与する。図8にMEBT1ビーム試験で得られたm値とTRACE3Dによる計算結果との比較を示す。また、各観測点におけるm値の長時間運転に対する安定度を示す。測定はビーム試験の途中、約30分毎に5回行った。m値の大きさに依らず、約0.5mm<sup>2</sup>程度の安

定度を保っている事が確認された。L3BTではMEBT1に比べビームサイズが2~3倍程度に大きくなる為、ばらつきが大きくなる恐れはあるが、現状のビーム試験の結果からは、 $\Delta P/P=0.1\%$ 程度の運動量中測定に対し、十分な分解能と安定度が期待される。

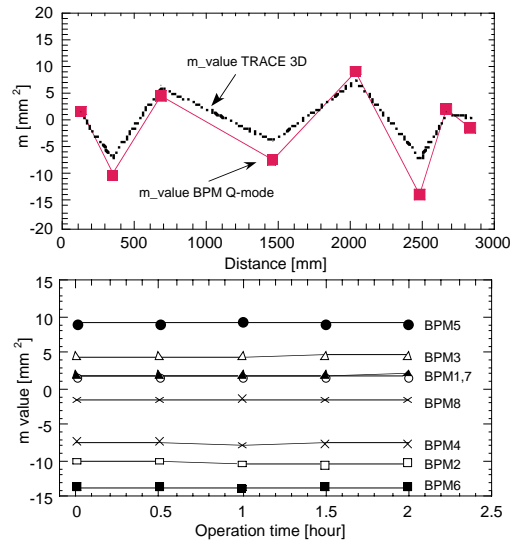


図8. 4電極モニターで測定したm値とTRACE3Dによる計算結果との比較。

## 5. まとめ

Linacビームの運動量拡がりを低コストで簡便、かつ非破壊に観測可能な4極モードモニターの検討を行った。L3BTの設計ラティスに対し、モニターに必要な精度と安定度 ( $m < 3\text{mm}^2$ ) を見積もった。一方で、MEBT1 BPM試作機によるm値及びビームサイズ測定を行い、TRACE3Dの計算結果と大きく矛盾しないこと、2時間程度の運転に対して十分な精度と安定度 ( $m < 0.5\text{mm}^2$ ) が得られていること、などを実験的に評価することができた。今後は電極形状の最適化と空間電荷効果及び、電磁石のエラー評価を行い、より高精度かつ安定度の高いビーム運動量拡がり測定を目指す。さらにプログラム開発を進め、J-PARCにおけるコミッショニングの初期段階から信頼性の高い測定が可能となるよう、測定機器の整備を進める。

## 参考文献

- [1] R.H.Miller *et al.*, HEAC'83, Fermilab,1983,pp.602
- [2] R.Assmann *et al.*, Proc. EPAC2000,p1693
- [3] T.Tomisawa *et al.*, "Development of 4 Strip Line Beam Position Monitor of J-PARC LINAC SDTL," These proceedings
- [4] S.Sato *et al.*, "Systematic Calibration of Beam Position Monitor at J-PARC Linac," These proceedings