

SIMULATION STUDY ON LONGITUDINAL BEAM PROFILE MEASUREMENT BY USING RF CHOPPER AT J-PARC LINAC

Tomofumi Maruta^{*A)}, Masanori Ikegami^{B)},

^{A)}J-PARC center, JAEA

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Ibaraki, 319-1195

^{B)}J-PARC center, KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We propose to measure the longitudinal rms beam size by existing apparatuses in MEBT1 at J-PARC linac. The RF chopper cavity horizontally deflects beam particles at the frequency of 324 MHz, which is the same frequency as other accelerator cavities. By setting an adequate driving phase of the chopper, a horizontal deflection is proportional to relative phase difference from the beam center. Then, the deflected beam distribution is measured by a wire scanner monitor. It is also possible to measure the longitudinal rms emittance by varying the amplitude of a buncher upstream. In this paper, we confirm the feasibility of the measurement scheme with particle simulation.

J-PARC リニアックにおける RF チョッパーを使用した 縦方向ビームプロファイル測定への検討

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、来年夏にフロントエンド部（イオン源から RFQ）を改修し、運転可能なビーム電流を 30 mA から 50 mA に増強する計画である。3 MeV Radio Frequency Quadrupole（RFQ）と 50 MeV Drift Tube Linac（DTL）間にあるビーム輸送系（MEBT1）へ入射されるビームの縦方向エミッタンスは、ビーム電流増加に従って増加する。シミュレーションによると、最大定格の 50 mA では、現在と比較して 20 % 以上エミッタンスが増加すると予想している。我々はこの MEBT1 に RF チョッパーシステムに設置し、時間軸方向のビーム構造を下流の 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron（RCS）の RF 周期（0.938 MHz）に合わせた櫛状に整形している。RF チョッパーシステムのビーム除去能力は、位相方向ビーム幅が広がるに依り低下するため、ビーム電流増加に伴うエミッタンス増加に応じて、RF チョッパーシステムの増強を検討しなければならない。そのためには現在の位相方向ビーム幅を適切に理解しておくことが不可欠である。しかしながら現在 MEBT1 には縦方向ビーム分布を測定できるモニターが存在しない。また MEBT1 には既に様々な機器が高密度に設置されており、新たなモニター設置スペースを確保するのは困難な状況にある。

そこで我々は、MEBT1 に既設の機器のみを使用し、縦方向ビームプロファイルを測定する手法を考案した。またその測定方法を 3D Particle-in-Cell シミュレーションコード（IMPACT^[1]）により評価した。本論文では測定手法と IMPACT シミュレーションの結果について報告する。

2. MEBT1

MEBT1 は図 1 に示したように、RFQ と DTL 間に設置された長さ約 3 m のビーム輸送系である。MEBT1 の主目的は二つある。一つは RFQ から引き出された 3 MeV 負電荷水素イオン（ H^- ）ビームを DTL1 に輸送する過程で、縦・横方向ビーム形状を DTL アクセプタンスに整合させることである。そのために Q 磁石 8 台（図中 Q1～Q8）およびバンチャ空洞 2 台が設置されている。また図 1 には記載していないが、MEBT1 各所には輸送途中のビームの状態をモニターするため、電流モニター（CT）、ビーム位置モニター（BPM）、ワイヤースキャナーモニター（WSM）が設置してある。MEBT1 のもう一つの目的は、ビームパルス構造を RCS の RF 周期に同期した櫛状に整形することである。そのため MEBT1 中盤には、RF チョッパー空洞とスクレーパから構成される RF チョッパーシステムを設置している。スクレーパは図 1 に示したとおり、チョッパー空洞中央から約 0.8 m 下流のビームから見て左側に設置してある。不要なビームはチョッパー空洞でスクレーパ方向に偏向を与え、除去している。

2.1 チョッパー空洞

一般的にチョッパーには slow-wave キッカー^[2]を採用する事が多い。しかし J-PARC リニアックはその代わりに RF Deflector（RFD）を採用している^[3]。この RFD は TE11 モードで励振し、共鳴周波数は RFQ および DTL と同じ 324 MHz である。ギャップ電界の設計値は 22 kW 入力時に 1.6 MV/m であり、その時ビームに与える偏向角は 1 ギャップあたり 6 mrad である。チョッパー空洞はこの RFD 2 台を RF ギャップ間隔 $3\beta\lambda$ で接続した構造になっている。ここで β はビームの運動量を全エネルギーで割った量、 λ は RF 波長である。現在は一台の半導体増幅器から各 RF ギャップに電力を供給するため、各ギャップ間を長さ $2\beta\lambda$ の同軸間で直列に接続してい

* tmaruta@post.j-parc.jp

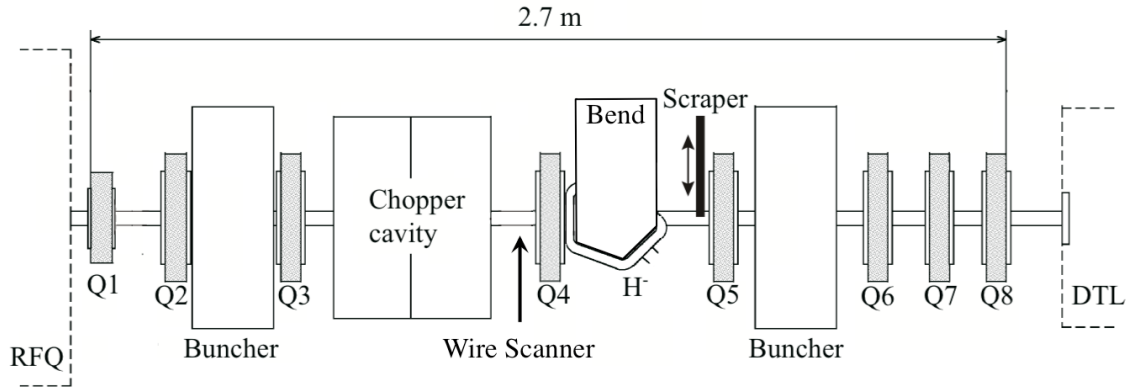


図 1: MEBT1 の概要。ビームは左から右に向かって進む。測定に使用するのはチョッパー、バンチャ2 台のうち上流側の空洞、および Q4 とチョッパー間にあるワイヤスキャナーである。

る。この場合、RF ギャップ毎に半導体増幅器から供給する場合と比較して、RF の立ち上がりが遅く、また RF ギャップ間の位相差に不確かさがあつた。これらを改善すべく、今夏の加速器停止期間中に半導体増幅器を一台増設し、ギャップ毎に半導体増幅器を割り当てる構成に変更する。これにより、各ギャップの振幅・同期位相の詳細な調整が可能となり、位相差の不確かさが解消する。現在使用している半導体増幅器は 35 kW まで安定的に動作し、これはギャップ電界 2.0 MV/m に相当する。さらにビーム電流増加による縦方向エミッタンス増加に対応するため、来年夏に 60 kW (ギャップ電界 2.6 MV/m に相当) まで供給可能な構成に変更予定である。

3. 測定方向

縦方向ビーム幅の測定方法について説明する。測定には MEBT1 に設置されたチョッパー、チョッパー下流の WSM、上流側のバンチャーを用いる。測定は 2 つの段階に分かれている。一つ目の段階は位相方向ビーム幅の測定、これにはチョッパーと WSM を使用する。次に、このビーム幅測定にバンチャー振幅の自由度を加えることにより、縦方向エミッタンスおよび $twiss$ パラメータを測定する。この測定は Q 磁石と横方向分布測定モニターによるエミッタンス測定 (Q スキャン) と原理的に近い。

3.1 位相方向測定

チョッパーで各粒子にビーム重心からの位相差に比例した偏向を与えることにより、ビームバンチを $x' - \phi$ 平面上で回転させる。回転により変化する x 方向分布を WSM によって測定する。 x 方向ビームエミッタンスが非常に小さい場合、偏向後の x 方向ビーム分布から位相方向分布を求められる。しかし、MEBT1 のビームは有限のエミッタンスがあるため、分布測定は困難である。その代わり、チョッパーが ON と OFF の場合の二乗平均平方根 (rms) を求め、その差から位相方向 rms ビーム幅 (σ_ϕ) を求める。

加速器運転中、チョッパーの同期位相はビームバンチに最も偏向を与える位相に設定している。これは図 2(a) に示すように、RF が最大になるタイミングを、ビーム

バンチ重心が RF ギャップ中央に到達するタイミングに一致させているに他ならない。この場合、ビーム粒子が重心の位相からずれると RF は減衰するため、偏向角は重心からの位相差に応じて小さくなる。しかし減衰量は位相差の符号に関係無く絶対値で決まるため、偏向後の x 方向分布測定から位相方向ビーム幅を求めるのは困難である。

一方、同期位相を最大偏向を与える位相から $-\pi/2$ シフトさせた場合、チョッパー空洞内のビームバンチの振舞いは図 2(b) の状態になる。この場合、ビームバンチの重心は RF がゼロ交差位相の時に RF ギャップを通過するため、偏向を受けない。しかし重心からずれた位相の粒子は、ゼロ交差位相から離れたところで RF ギャップを通過するため、偏向を受ける。その偏向量は位相差の相対値に比例するため、バンチが $x' - \phi$ 平面上で回転する。図 2(b) の例では、バンチの先頭側の粒子は位相差に比例して RF ギャップから正の電場を受けて上方に偏向し、逆に後尾側粒子は負の電場により下方に偏向する。重心からの位相差を $\Delta\phi$ 、偏向角を θ とすると、ギャップから距離 D の x 方向 rms は、

$$\langle (x + D\theta\Delta\phi)^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + (D\theta)^2 \langle (\Delta\phi)^2 \rangle \quad (1)$$

となる。したがってチョッパーが ON・OFF の場合の rms を測定し、その二乗差から位相方向ビーム幅を求めることができる。

この位相方向の測定方法は元々 KEK の内藤氏により提案された^[6]。しかしこの方法では、ビーム重心を RF のゼロ交差位相に精度良く一致させる必要があるが、2 ギャップ直列接続ではギャップ間の RF 位相差が明確ではない等課題があった。今夏の半導体増幅器増設によってこの課題が克服できるので、この方法による測定が可能となった。

3.2 エミッタンス測定

チョッパー上の σ 行列 (σ^C) は、バンチャー上の σ 行列 (σ^B) とその間のビーム輸送行列 (R) から、 $\sigma^C = R\sigma^B R^T$ である。我々が測定するチョッパーの位相方向ビーム幅は、 σ^C の (5, 5) 要素の平方根に等しいので、この要素について計算する。またバンチャーの σ 行列

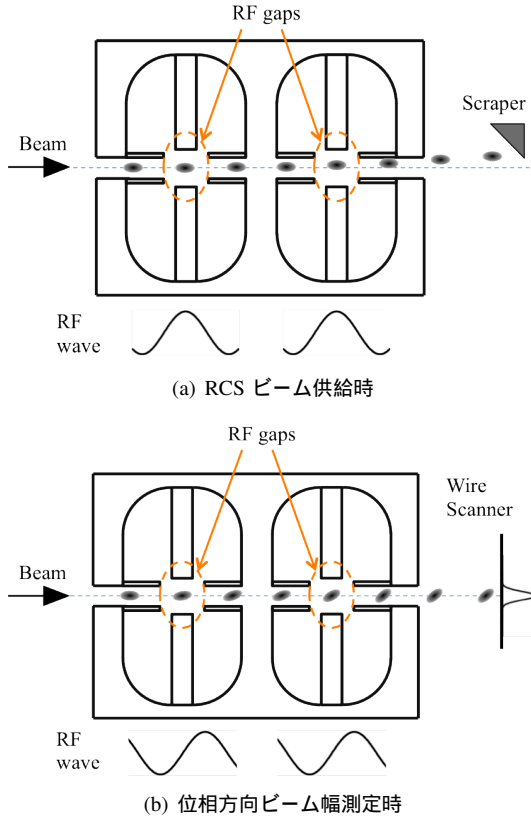


図 2: RCS へのビーム供給時 (a) および測定時 (b) における RF 位相設定、およびビームパンチの振舞い。

の要素と、twiss パラメータおよびエミッタンスの関係は、 $\sigma_{55}^B = \beta^B \varepsilon$ 、 $\sigma_{56}^B = -\alpha^B \varepsilon$ 、 $\sigma_{66}^B = \gamma^B \varepsilon$ なので、

$$\sigma_{55}^C = \varepsilon (\beta^B R_{55}^2 - 2\alpha^B R_{55} R_{56} + \gamma^B R_{56}^2) \quad (2)$$

が得られる。バンチャーからチョッパーまでのラティス (RF Gap + Quadrupole + Drift) について、空間電荷効果が無い場合の R 要素を計算すると、 $R_{55} = 1 + kL/\beta\gamma^3$ 、 $R_{56} = L/\gamma^2$ である。ここで k はバンチャーの電界、 L はバンチャーからチョッパーまでの距離、 β はビーム重心の運動量と全エネルギーの比、 γ は重心の静止エネルギーと全エネルギーの比である。これらを (2) 式に代入し、さらに k に着目して変形すると、

$$\sigma_{55}^C = \frac{\varepsilon \beta^B L^2}{\beta^2 \gamma^6} \left(k + \frac{\beta \gamma^3}{L} - \frac{\alpha^B}{\beta^B} \beta \gamma \right)^2 + \varepsilon^2 \frac{L}{\gamma^2} \frac{1}{\varepsilon \beta^B} \quad (3)$$

である。従って、チョッパーの位相方向ビーム幅は k の 2 次関数である。またバンチャー電界と位相方向ビーム幅の相関を測定し、その結果に最小値がある場合、その最小値は $\varepsilon^2 L / \gamma^2 \varepsilon \beta^B$ に等しい。 $\varepsilon \beta^B$ は、 k^2 項の係数から求める事ができるので、最終的にエミッタンスが得られる。twiss パラメータは (2) 式から求めることができる。チョッパー電界を変えると、(2) 式の R 行列要素も変わり、独立した式となる。従ってこの式の自由度 (2、エミッタンスが分からない場合は 3) よりも多くのバンチャー電界について位相方向ビーム幅を測定すれば、エミッタンスと twiss パラメータを求めることができる。

4. シミュレーション

シミュレーションには 3 次元 Particle-in-cell コードである IMPACT を使用し、RFQ 出口から WSM までのビーム粒子の時間発展を計算した。粒子の初期分布には、PARMTEQM^[7] による RFQ シミュレーションで生成した。ビーム電流は現在の運転電流と同じ 15 mA である。この測定法の鍵である RF チョッパー空洞内の電磁場分布は、有限要素法による 3 次元電磁界解析コードである Micro Wave Studio (MWS) により求めた^[8]。MWS では RFD1 台のモデルを作成し、324 MHz の高周波が入力した場合の電磁場分布を計算、その結果から電磁場マップを作成した。

IMPACT のチョッパー空洞がどの程度再現するか検証するため、ビーム偏向量の測定結果とシミュレーション結果を比較した。チョッパーを 4 つのギャップ電界 (0.33、0.50、0.95、2.0 MV/m) に励振し、WSM により x 方向ビーム分布を測定した。その分布からビーム重心を求め、チョッパーを OFF にした場合の重心位置との差から偏向量を求めた。測定結果を図 3 に示す。青点が重心の測定結果、赤が IMPACT の結果である。1 MV/m より低い電界では、IMPACT は測定結果とよく再現している。一方、一番高い電場では、測定結果が IMPACT より 0.5 mm 程度大きくなっているが、この電場ではビームの一部がチョッパー空洞のアパーチャに衝突しているため、偏向量を正しく評価できない事が原因だと考えている。

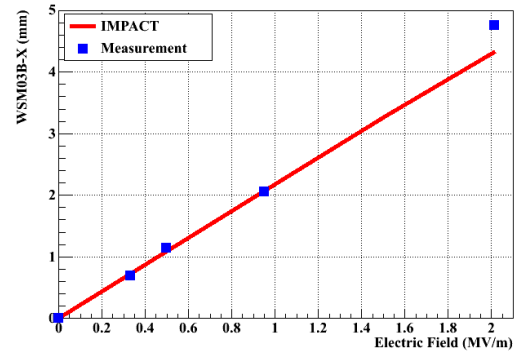


図 3: チョッパー電界と WSM 上のビーム重心変位の関係。赤が IMPACT シミュレーション、青が測定結果である。

図 4 にバンチャー 1 の $E_0 TL$ を 0 から 0.28 MV/m まで増加させた時の WSM における位相方向ビーム幅の変化を示す。赤がチョッパー空洞の上流側 RF ギャップ (#1) 上のビーム幅、青が下流側 RF ギャップ (#2) 上のビーム幅である。(3) 式によると、ビーム幅が最小になる電界は、 L に比例して低くなる。図 4 においても確かによりバンチャーから遠いギャップ #2 の方が、低い $E_0 TL$ (0.19 MV) で最小になっている。しかしながらバンチャー 1 の最大 $E_0 TL$ は 0.17 MV であり、0.19 MV で励振するのは困難である。(3) 式によると、最小値を与える電界は、 L に加えて α^B/β^B にも依存している。もしバンチャーのビーム分布がシミュレーションと異なっていれば、バンチャー 1 が励振可能な $E_0 TL$ に最小値のある可能性がある。

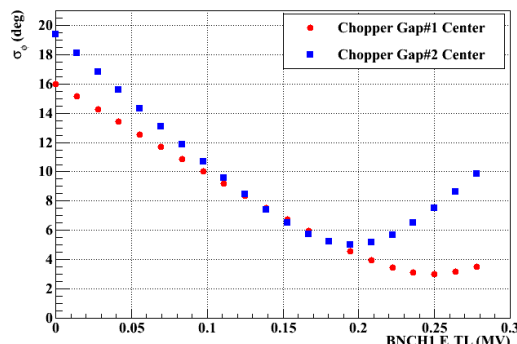


図 4: パンチャー 1 の E_0TL と、各 RF ギャップにおける RMS ビーム幅の関係。

次に twiss パラメータを求めるために、パンチャー 1 の E_0TL を 0 から 0.17 MV (最大) まで変化させた位相方向ビーム幅の測定から、twiss パラメータを導出した結果を図 5 に示す。位相方向ビーム測定には、上流側の RF ギャップを使用した。パンチャー 1 の E_0TL を 0 (赤)、0.085 (マゼンタ)、0.17 MV (青) に設定し、チョッパーの位相方向ビーム幅を測定。それを Trace3D^[9] で計算した R により、パンチャー 1 上の境界線を求めた。一方、緑は IMPACT で計算したパンチャー 1 の楕円分布である。各境界線が楕円とよく接しており、パンチャー 1 からチョッパー間のエミッタンスグロースの影響はほとんど無いと考えられる。

現在パンチャー 1 の半導体増幅器の増強を検討しており、増強後は図 4 における位相方向ビーム幅の最小値測定、および図 5 の楕円により厳しい制限をかけることが可能となる。

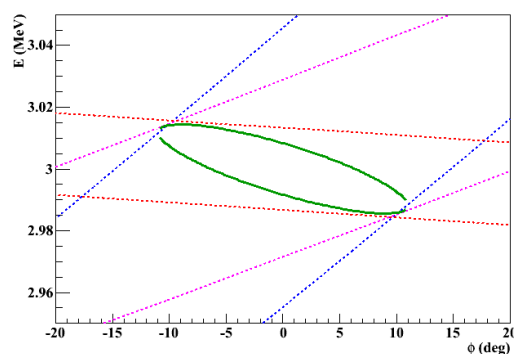


図 5: パンチャー上の ϕ - E 位相空間上の分布。破線はチョッパーギャップ#1 による位相測定より求めた境界線。緑の楕円は IMPACT の計算結果である。

5. まとめと今後の予定

今夏の RF チョッパー用半導体増幅器の増設により、位相方向ビーム幅の測定が可能となった。この位相方向ビーム幅測定にパンチャーを組み合わせる事により、エミッタンスおよび twiss パラメータの測定も可能である。9 月終わりから 10 月頭にかけてコミショニング

が予定されており、その期間中にデータを収集する計画である。それにより測定方法の実証、および縦方向ビームプロファイル導出を目指す。また、現在チョッパーとパンチャー用半導体増幅器の増強を検討している。増強後はより精度のよい測定が可能になると期待される。

参考文献

- [1] J. Qiang, R.D. Ryne, S. Habib, V. Decyk, " An object- oriented parallel particle-in-cell code for beam dynamics simulation in linear accelerators ", J. Comput. Phys. 163 (2000) 434-451.
- [2] A. Aleksandrov, "Overview and Future Demands of Fast Choppers", Proceedings of the 25th International Linear Accelerator Conference (LINAC10), Tsukuba, Japan, September 12-17, 2010. pp. 689-693.
- [3] S. Fu and T. Kato, "RF-chopper for the JHF proton linac", Nucl. Instr. and Meth. A 440 (2000) 296-306.
- [4] Y. Yamazaki ed., KEK Report. 2002-013 (KEK, 2003) .
- [5] A. Miura, et al., " Operational Performance of Wire Scanner Monitor in J-PARC Linac ", Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC10), Kyoto, Japan, May 23-28, 2010. pp. 1008-1010.
- [6] F. Naito, " Longitudinal Bunch Shape Monitor Using the Beam Chopper of the J-PARC ", Proceedings of the 22nd International Linear Accelerator Conference (LINAC2004), Lübeck, Germany, August 16-20, 2004. pp.806-808
- [7] K.R. Crandall et al., " RFQ design codes ", LA-UR-96-1836 Revised December 7, 2005, Los Alamos National Laboratory (1996) .
- [8] Y. Kondo, et al., "Simulation Study of the RF Chopper", Proceedings of the 25th International Linear Accelerator Conference (LINAC10), Tsukuba, Japan, September 12-17, 2010. pp. 911-913.
- [9] http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_trace.phtml.