

J-PARC MR における空間電荷効果によるチューンシフトの測定

MEASUREMENTS OF TUNE SHIFTS BY THE SPACE CHARGE EFFECT IN J-PARC MR

安居孝晃^{#, A)}, 五十嵐進^{B)}, 佐藤洋一^{B)}, 佐藤健一郎^{B)}, 橋本義徳^{B)}, 大見和史^{B)}, 小関忠^{A, B)}
Takaaki Yasui^{#, A)}, Susumu Igarashi^{B)}, Yoichi Sato^{B)}, Kenichirou Satou^{B)}, Yoshinori Hashimoto^{B)},
Kazuhito Ohmi^{B)}, Tadashi Koseki^{A, B)}

^{A)}The University of Tokyo

^{B)}KEK

Abstract

In J-PARC MR, we observed the space-charge effect by measuring quadrupole oscillations with optical mismatched beam. Unlike dipole oscillations, quadrupole oscillations are influenced by the space-charge forces. Then we succeeded in reconstructing the measurement by the simulation code, Space-Charge TRacker (SCTR). Our study indicates successful benchmark of SCTR which we rely on for the simulations of high intensity beam.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(以下 J-PARC)の主リング(以下 MR)では最大 500 kW の利用運転を行っており、そのときの取り出し粒子数 2.6×10^{14} protons per pulse (ppp) というビーム強度では空間電荷効果の影響が大きい[1]。J-PARC MR では安定に、より大強度の陽子ビーム運転を行う方法を模索している。現在大強度化を妨げているビームロスの要因は空間電荷効果により広がったチューンがいくつかの共鳴ラインにかかってしまうからだと考えられている。そこで J-PARC MR ではより良い動作点の検討が続けられている。

共鳴ラインを避けるためには、チューンスプレッドを知る必要がある。本研究では、Strategic Accelerator Design(以下 SAD)[2]及び Space-Charge TRacker(以下 SCTR)[3]を用いてビームダイナミクスシミュレーションを行っている。SCTR は PIC アルゴリズムによる空間電荷効果を考慮したトラッキングコードである。

SAD と SCTR を用いたシミュレーションによって、J-PARC MR において過去には予測した動作点を実際に実験でもビームロスの低減の実現に繋がった実績がある[4,5]。ただしビームロスは様々な原因で起こるので、実際の測定でのビームロスを定量的にシミュレーションと結びつけて議論するのは難しい。そこでシミュレーションの確度を上げるためにも、実際の測定とシミュレーションが定量的に一致していることを確認できるベンチマークテストが求められている。

本論文では、J-PARC MR において空間電荷効果をより定量的に議論するために、チューンシフトの測定を行った。ビーム強度を変えればチューンシフト量は変わるはずで、それぞれのビーム強度で測定されたチューンシフトを SCTR でうまく再現できるならば、J-PARC MR において空間電荷効果の定量

的な議論が進み、シミュレーションモデルの高度化が図れる。

2. チューンシフト測定

2.1 チューンシフト測定方法

チューンシフトを測定するために、本論文では二極振動と四極振動を測定した。二極振動はターンごとのビームの重心位置の振動を、四極振動はターンごとのビームサイズを観測した。ビームの重心位置の振動はビーム内力である空間電荷力の影響を受けない。一方ビームサイズは空間電荷効果によって収束力が弱くなるので、四極振動から計算されるチューンが小さくなることが知られている。よって二極振動と四極振動から計算されるチューンの差が、空間電荷効果によって生じたチューンシフトだと考えられる。本実験ではこれらの振動を見やすくするために、ビームを入射させる際にあえて入射エラーと光学ミスマッチを作った。

重心の位置とビームサイズは、プロファイルモニタによって得られたビームプロファイルから、水平・垂直方向のそれぞれについてガウシアンフィットすることで導出した。本研究で用いたプロファイルモニタは2つあり、Residual Gas Ionization Profile Monitor(以下 IPM)[6]と Multi-Ribbon Profile Monitor(以下 MRPM)[7]である。それぞれのプロファイルモニタについて独立に測定を行った。IPM と MRPM は共に MR の直線部にあり、ディスパージョンのない領域なので、粒子の運動量の変化によってビームの測定位置は動かないようになっている。

今回の実験における動作点は、利用運転と同じ $(v_x, v_y) = (21.35, 21.43)$ で行った。今回の測定では1点でのターンごとの振動を見ているため、チューンの小数部分の値が見える。

測定はシングルバンチビームで強度を 0.6×10^{12} protons per bunch (ppb) から 4.8×10^{12} ppb まで変えながら行った。利用運転でのビーム強度と比べると 1-2 桁小さい範囲での実験だが、これは利用運転での

[#]tyasui@post.j-parc.jp

ビーム強度では空間電荷効果の影響が強すぎて四極振動がすぐに減衰してしまい、解析ができないからである。またビームのインスタビリティに気をつけながら、クロマチシティを-3~-7の範囲で調整した。

2.2 IPMによる測定

MRに設置されているIPMは、ビームと残留ガスとの電離作用によって生成されたイオン・電子対をマイクロチャンネルプレートで増幅させ、流れる二次電子電流を測定する非破壊型プロファイルモニターである。MRでは水平・垂直方向用のIPMがそれぞれ1台ずつ設置されている。水平・垂直方向用のIPMが設置されている場所のベータatron関数の値は、SADで計算すると、それぞれ $\beta_x = 13.23$ m, $\beta_y = 26.18$ mである。本実験ではイオン収集を利用して測定した。

本実験では、IPMでのデータはゲインの安定した始めの20ターンについて解析を行った。また、信号のばらつきを抑えるために、高強度では20ショット、低強度では40ショットのビームの平均を取った。IPMの問題の一つは空間電荷力がイオン収集軌道に影響し、測定プロファイルが広がってしまうことである。しかし二極振動・四極振動からチューンを計算するという観点のみで考えれば、ビーム重心やビームサイズの相対的な大きさが分かれば良いので大きく影響しないと期待できる。

Figure 1は水平・鉛直方向のIPMの生データで、横軸はそれぞれ水平・鉛直方向の位置、縦軸は時間である。これをターンごとに水平・鉛直方向それぞれについてガウシアンフィットを行った。

Figure 2のプロットはそれぞれIPMによって測定されたターンごとのビームの重心の位置・ビームサイズの一例である。上図は二極振動、下図は四極振動に対応する。そして曲線はそれぞれについてのフィット線で、フィッティング関数は

$$g(x) = A \cos(2\pi f x + \chi) e^{\eta x} + B$$

とした。ここでAは振動振幅、fは振動数、 χ は振動の初期位相、 η は減衰定数、Bは振動中心である。二極振動については、減衰はほぼ無視できるとして $\eta = 0$ に固定した。二極振動から計算されるチューン ν は二極振動の振動数に等しく、

$$\nu_{\text{dipole}} = f_{\text{dipole}}$$

が成り立つ。一方、四極振動からは、

$$\nu_{\text{quadrupole}} = (1 - f_{\text{quadrupole}})/2$$

によって空間電荷効果の影響を受けたチューンが計算できる。1から引いているのはエイリアシングの補正である。

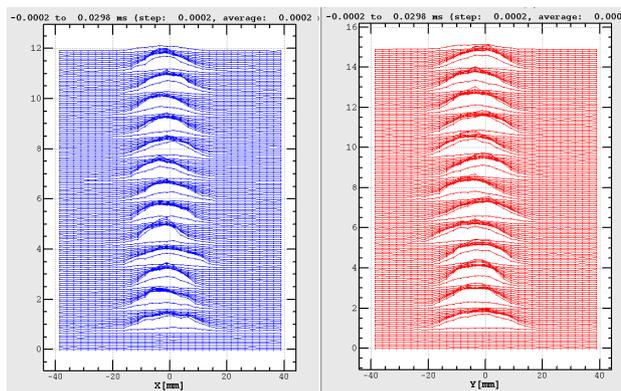


Figure 1: Examples of raw data of IPM (left: horizontal, right: vertical). The pulse height of multi-channel plates as a function of position.

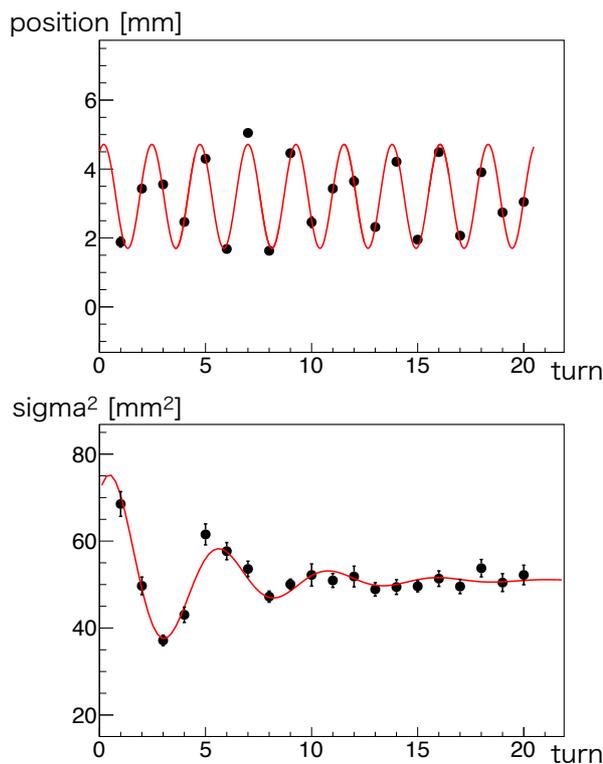


Figure 2: The beam center positions per turn (upper) and the sigma squares of beam profile (lower) measured by IPM.

ν_{dipole} は多少のばらつきはあるものの、ほぼ設定チューンと同じ値である。一方 $\nu_{\text{quadrupole}}$ は空間電荷効果で ν_{dipole} より小さくなる。よってチューンシフト $\Delta\nu$ を

$$\Delta\nu \equiv \nu_{\text{dipole}} - \nu_{\text{quadrupole}}$$

と定義し、ビーム強度との対応関係を見た。

2.3 MRPM による測定

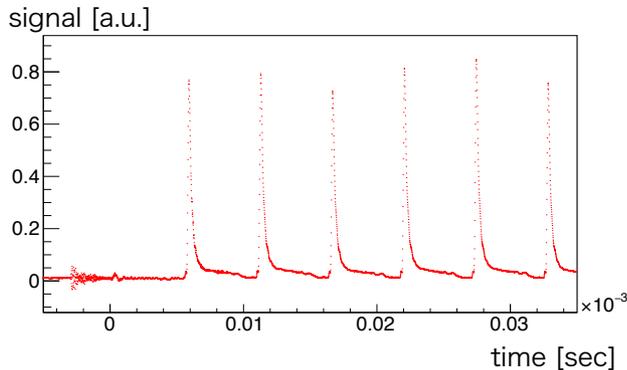


Figure 3: Example of raw signals of one of the ribbons of Inj-MRPM.

MRPM は水平・鉛直方向に並べられた薄い金属のリボンとビームとの衝突によって各チャンネルのリボン表面から放出される二次電子電流を測定することでそれぞれの方向に射影されたプロファイルを得るプロファイルモニタである。本研究では MR へのビーム入射部にある Inj-MRPM を用いた。SAD で計算した Inj-MRPM が設置されている場所のベータatron関数の値は、 $\beta_x = 16.95$ m、 $\beta_y = 15.89$ m である。MR の Inj-MRPM は水平方向と鉛直方向で素材やリボンの形状が異なっている。水平方向は幅 3 mm、厚さ 3 μ m のグラファイトリボンが 4.5 mm ピッチで並んでいて、鉛直方向は幅 1.5 mm、厚さ 1 μ m のチタンリボンが 2.5 mm ピッチで並んでいる。それぞれ 8 チャンネル分を測定している。

IPM と違って Inj-MRPM は破壊型プロファイルモニタであり、多重散乱の効果でターンごとにビームサイズが少しずつ太っていくのが知られている。本研究では Inj-MRPM と IPM の両方でそれぞれ測定を行うことにより、エミッタンス測定のカロスチェックも行った。

Figure 3 は Inj-MRPM の 1 本のリボンの時間ごとの信号である。本実験では、まず得られた各リボンの信号をターンごとに積分し、得られた 8 チャンネルの積分値をターンごとにガウシアンフィットすることでビームの重心の位置とビームサイズをターンごとに求めた。

Figure 4 のプロットはそれぞれターンごとのビームの重心の位置とビームサイズの一例である。フィッティング関数は IPM のデータの解析と同じで

$$g(x) = A \cos(2\pi fx + \chi) e^{\eta x} + B$$

とした。ただし、フィッティングの範囲は二極振動は 100 ターン、四極振動は信号が減衰する 15 ターンまでとした。本測定においても 100 ターンでビームサイズが約 12 mm² 程度増加するのが見られたが、15 ターンまでではその影響は小さいとして考慮していない。また、二極振動も明らかに減衰しているように見えたので、IPM での解析とは異なり減衰項は固定してない。フィットによって二極振動と

四極振動からそれぞれチューンを求め、チューンシフトを計算した。

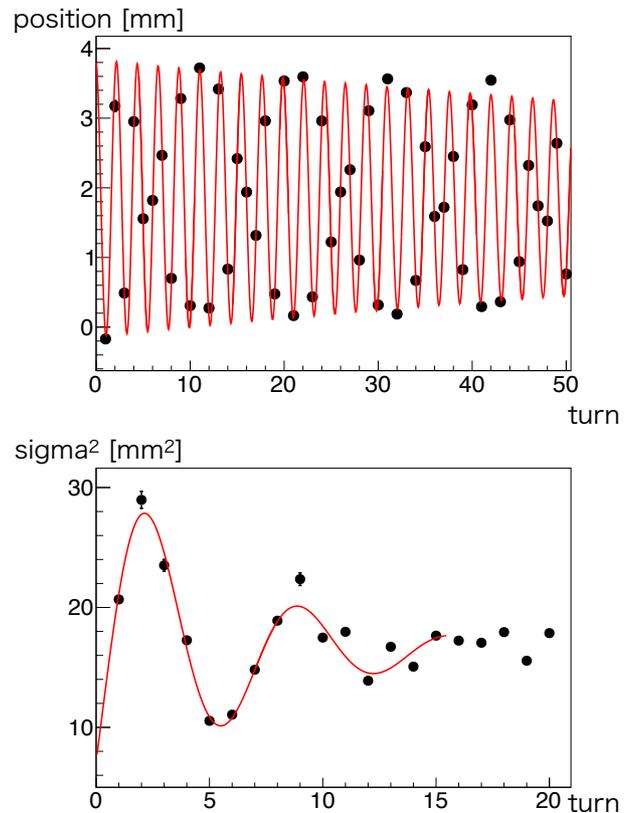


Figure 4: The beam center positions per turn (upper) and the sigma squares (lower) measured by Inj-MRPM.

2.4 シミュレーションコードによる再現

まずは J-PARC MR の光学系を入力して各位置でのビームパラメーターを SAD で計算した。本研究ではチューンシフトの評価を主眼に据えているため、電磁石の設置誤差及び磁場誤差を入れない理想的なラティスマデルを用いた。そして得られたビームパラメーターを入力して、SCTR で各陽子のターンごとの横方向の位置を計算し、そこからビームの重心の位置とビームサイズを導出した。

ビームの強度は実験とほぼ同じ強度でいくつか変えて行った。ただしいずれの強度の場合もシミュレーションのマクロ粒子数を 20 万個にした。

ビームの形状は横方向にはガウシアン分布とした。ビームのエミッタンスは四極振動の振動中心より算出できるが、IPM での測定値は実際よりも大きくなってしまっているので、より信頼できる Inj-MRPM での測定値を採用した。光学ミスマッチについては、四極振動の振幅が実験と同じ程度になるように与えた。

Figure 5 は Wall Current Monitor(以下 WCM)による MR 入射直後のビームバンチの縦方向の分布の測定結果である[8]。Figure 5 のように MR においては縦方向の分布はガウシアン分布よりもパラボラ分布に

近い形をしている。よって本研究では WCM の測定結果をパラボラ分布でフィットして、得られたパラメータを SCTR の入力値に用いた。

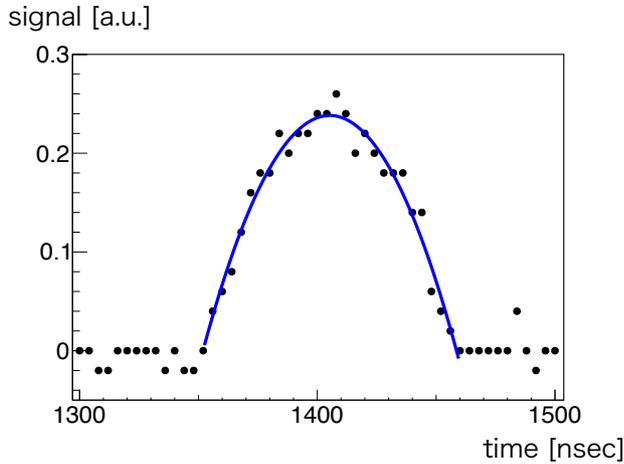


Figure 5: Signals of WCM.

2.5 測定・シミュレーション結果

本測定により、IPM で測定したエミッタンスと

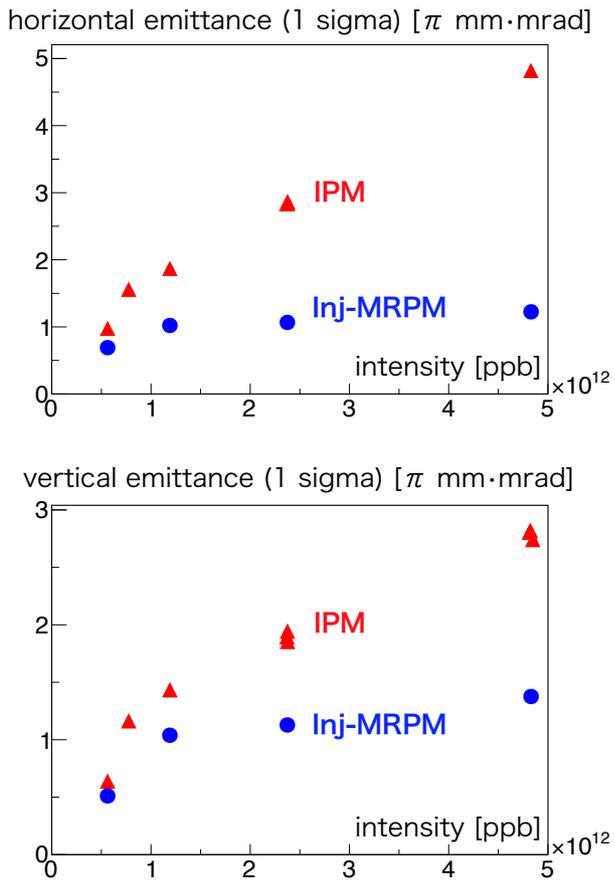


Figure 6: Transverse emittance measured by IPM (red) and Inj-MRPM (blue).

Inj-MRPM で測定したエミッタンスの比較を行った。Figure 6 は IPM と Inj-MRPM で測定したときのエミッタンスの比較図である。このように特に高いビーム強度において IPM で測定されるビームサイズが過大評価される傾向があることがわかる。

Figure 7 はビームの強度を変えたときの水平・鉛直方向のチューンシフトである。赤プロットが IPM での測定結果、青プロットが Inj-MRPM での測定結果、緑プロットがシミュレーション結果である。また破線は、 2.4×10^{12} ppb におけるエミッタンスから計算したチューンシフトである。これを見ると IPM での測定結果と Inj-MRPM での測定結果がよく一致していて、ビーム強度に対してチューンシフトがおおまかに線形に増大することが分かった。理論的には、空間電荷効果によるチューンシフトは、エミッタンス一定の条件では近似的にビーム強度に比例することが知られている。本実験ではビーム強度に対してエミッタンスが不変ではないが、おおまかにチューンシフトがビーム強度に対して線形に変化したということは、確かにチューンシフトが空間電荷効果由来のものである間接的な証拠になるであろう。Figure 7 の 0.56×10^{12} ppb におけるチューンシフトは線形から外れているように見えるが、Figure 6 を見ると、ビーム強度が 0.56×10^{12} ppb のときにエミッタンスが他の強度と比べて著しく小さくなって空間電荷効果が強くなったことと対応している。この効果

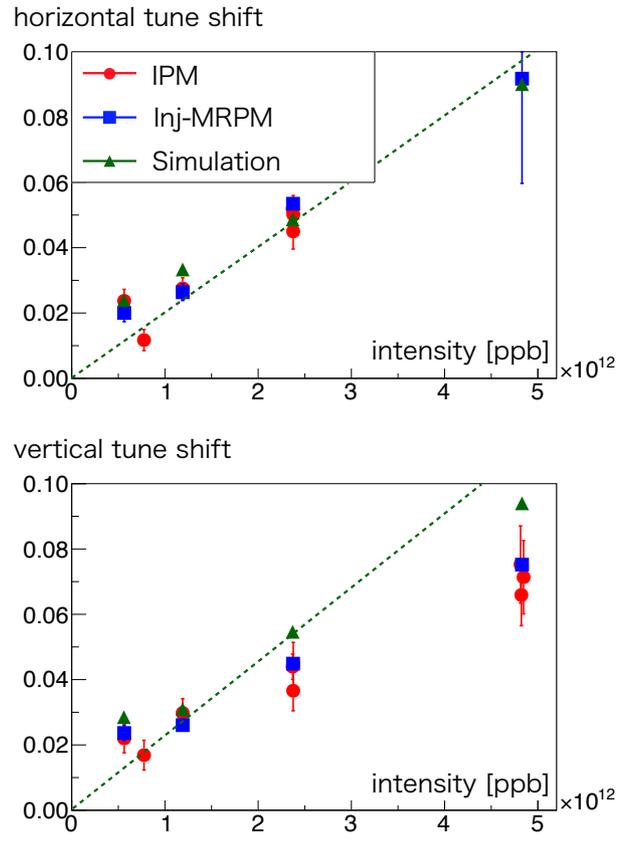


Figure 7: Intensity dependence of tune-shift (upper: horizontal, lower: vertical).

も Inj-MRPM で測定したエミッタンスを入力した SCTR シミュレーションでよく再現されている。

四極振動はビーム強度を上げると減衰が早くなる
ことが測定されている。定性的には SCTR でも再現
されている。定量的評価は今後行う予定である。

pp 429-433, 2010.

[8] Y. Sugiyama, private communications.

3. まとめ

J-PARC MR において空間電荷効果を定量的に扱
いシミュレーションとの比較をするために、空間電
荷効果によるチューンシフトの測定・再現を行った。
チューンシフトの測定は二極振動と四極振動のそれ
ぞれからチューンを導出し、その差を求めた。二極
振動はビームの重心振動、四極振動はビームサイズ
振動によって測定し、振動振幅を大きくして測定精
度を上げるために、あえて MR にビームを入射す
る際に入射エラー・光学ミスマッチを作った。

二極・四極振動を測定するために IPM と Inj-
MRPM という 2 種類のモニタでそれぞれ独立に測定
し、チューンシフトを計算した。これを、ビーム強
度を変えて行い、チューンシフトのビーム強度依存
性を見た。

実験を再現するために、SAD と SCTR という 2 つ
の計算コードを用いた。まずは SAD で各光学系の
位置でのビームパラメータを計算し、その結果や
ビーム分布、ビーム強度などを入力して SCTR でシ
ミュレーションを行うことで実験結果の再現を試み
た。ビーム分布に関しては実際の測定の結果を参照
して、縦方向には WCM で測定されたのと近いパラ
ボラ分布を、横方向には IPM と Inj-MRPM でそれぞ
れ測定されたガウシアン分布を用いた。結果、Inj-
MRPM でのエミッタンスを用いたシミュレーション
が実験と良い一致を示した。また IPM と Inj-MRPM
とでエミッタンスの比較を行った結果、高いビーム
強度では IPM はエミッタンスを大きく測定してしま
うことを確認した。

参考文献

- [1] Y. Sato *et al.*, “HIGH POWER BEAM OPERATION OF THE J-PARC RCS AND MR”, Proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, THYGBF1.
- [2] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [3] K. Ohmi *et al.*, “Study of Halo Formation in J-PARC MR”, Proceedings of the 22nd Particle Accelerator Conf. (PAC’07), Albuquerque, NM, USA, Jun. 2007, paper THPAN040, pp. 3318-3320.
- [4] K. Ohmi *et al.*, “ARTIFICIAL NOISE IN PIC CODES AND CONSEQUENCES ON LONG TERM TRACKING”, Proceedings of HB2014, East-Lansing, MI, USA, WEO2LR03, pp. 259-266.
- [5] Y. Sato *et al.*, “Recent commissioning and prospect of high power beam operation of the J-PARC Main Ring”, PASJ2015, Tsukuba, Japan, WEP031.
- [6] K. Satou *et al.*, “PROFILE MEASUREMENT BY THE IONIZATION PROFILE MONITOR WITH 0.2T MAGNET SYSTEM IN J-PARC MR”, Proceedings of IBIC2016, Barcelona, Spain, pp 811-814, 2016.
- [7] Y. Hashimoto *et al.*, “MULTI-RIBBON PROFILE MONITOR USING CARBON GRAPHITE FOIL FOR J-PARC”, Proceedings of HB2010, Morschach, Switzerland,