

## J-PARC RCS における入射ビームの twiss parameter マッチング

### TWISS PARAMETER MATCHING OF THE INJECTION BEAM FOR THE J-PARC RCS

岡部晃大<sup>#,A)</sup>, 丸田朋史<sup>B)</sup>, 發知英明<sup>A)</sup>, Saha Pranab<sup>A)</sup>, 吉本政弘<sup>A)</sup>, 三浦昭彦<sup>A)</sup>, 劉勇<sup>B)</sup>, 金正倫計<sup>A)</sup>  
Kota Okabe<sup>#,A)</sup>, Tomofumi Maruta<sup>B)</sup>, Hideaki Hotchi<sup>A)</sup>, Pranab Saha<sup>A)</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>A)</sup>, Akihiko Miura<sup>A)</sup>,  
Yong Liu<sup>B)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

In a high power proton accelerator such as the 3-GeV rapid cycle synchrotron (RCS), small ratio of the beam loss such as beam halo can cause serious radiation dose. The suppression of the transverse beam halo is a key issue to provide high intensity beam for routine user operation at the RCS. The RCS adopts the charge exchange multi-turn injection for the phase space painting. If the transverse twiss parameter of the injection beam is not matched to the RCS optics, it will generate beam halo during the multi-turn injection. In order to suppress such beam halo, twiss parameters and dispersion matching are performed at the RCS injection point. In the beam matching process, we use the rms envelope equation solver with space charge effect to predict high intensity beam behavior. And the quadrupole magnets at the Linac-RCS beam transport line (L3BT) are used as knobs of twiss parameter matching. The beam profile measurement is done with wire scanner monitors at the downstream of the L3BT as well as multi-wire profile monitors at the RCS injection section. In this presentation, we introduce the transverse twiss parameter matching scheme at the RCS injection points.

#### 1. 序論

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の 3GeV シンクロトロン (RCS) は、繰り返し 25Hz で設計出力 1 MW の陽子ビームを加速する周長約 350m のシンクロトロン加速器である[1]。RCS では 2009 年から本格的な大強度ビームのコミッションングが始まり、2015 年 1 月には設計性能である 1MW に相当するビームの加速、取り出しに成功した。現在、1MW ビーム定常利用運転の実現に向けた精力的な研究開発が進められているが、その最も大きな障害として、RCS 内でのビーム損失が原因となる加速器機器の放射化が懸念されている。

RCS のような大強度陽子加速器では、わずかな割合のビーム損失ですら高レベルな機器の放射化を引き起こし、加速器のメンテナンス性を著しく悪化させる。結果として、機器放射化による作業員の被ばく線量を許容値以下に抑えるため、利用可能なビーム強度が制限されることになる。このように RCS の大強度化に伴うビーム損失の増大は、J-PARC 施設の安定的な長期間運転に大きな障害となる。

一般的に大強度陽子加速器では、ビームを構成する粒子同士の反発力に起因する空間電荷効果と呼ばれる現象がビームの挙動に対して支配的になり、様々なビーム不安定性が現れることが知られている。特に、空間電荷効果の一つであるビームハローの形成はビーム損失に直結するため、J-PARC のみならず世界各地の大強度加速器にて問題視されている。ビームハローとはビームの中心 (コア部) 周辺に生成される低密度且つ大きな振幅を持つ粒子雲のことであり、大強度加速器ではこの部分のビーム損失でさ

え顕著な放射化の要因となる。

ビームハローの形成条件についてはこれまで主に多粒子シミュレーションを用いた研究がなされており、それらの結果から、大強度ビームが外部収束系に整合していない(ミスマッチしている)場合、ビームハローが形成されることが判明している[2]。すなわち、RCS におけるビームハローの形成を抑制するためには、前段加速器(linac)から輸送された入射ビームを RCS のビーム収束系に整合(マッチング)する必要がある。

ビーム出力の増強に伴い、RCS では 2014 年よりビーム入射過程におけるハロー生成を抑制するため、入射ビームの twiss パラメータマッチング調整を行い、ビーム損失の低減に成功した。本稿では、RCS における入射ビームマッチング調整の手法と、それに伴うビーム損失の低減に関する実験結果について紹介する。

#### 2. 大強度陽子ビームの twiss パラメータ調整方法

##### 2.1 L3BT 及び RCS 荷電変換入射の概要

RCS ではビーム入射方式として荷電変換によるペイント入射を採用し、位相空間内の粒子密度を調整することによって空間電荷効果の抑制を図っている。Linac で 400MeV まで加速された H-イオンビームは、linac-RCS 間のビーム輸送ライン(L3BT)を経由して、RCS 入射点である荷電変換フォイルまで導かれる[3]。Figure 1 は L3BT 下流スクレーパ部から RCS 入射部にかけての概要図である。L3BT は直線部、アーク部、スクレーパ部、および RCS 入射部から構成されており、RCS 入射点での運動量広がりや中心

<sup>#</sup> kota@post.j-parc.jp

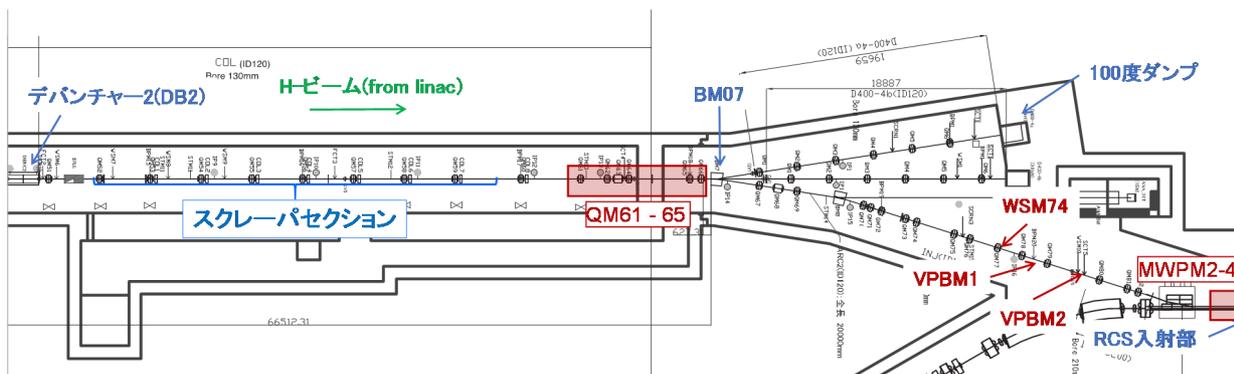


Figure 1: Schematic layout of the L3BT downstream.

エネルギーを調整するために2台の加速空洞(デバンチャー)が設置されている。図1において、スクレーパ部上流に設置されているデバンチャー2(DB2)は主に入射ビームの運動量広がり調整のために使用される。H-ビームは偏向電磁石(BM07)によって偏向され、RCS入射部にて荷電変換される。スクレーパ部に設置された荷電変換型スクレーパにてH+イオンとなったビームハロー部は入射ビームと逆向きに偏向されることで100度ダンプに打ち込まれる。

L3BTでは各所にシングルワイヤー型ワイヤースキャナモニタ(WSM)を設置し、各位置でのビームプロファイル測定することによって、ビーム調整を行っている。RCS入射部では広範囲RCSのアパーチャーを短時間で測定することが要求されるため、4台のマルチワイヤープロファイルモニタ(MWPM)を用いてプロファイル測定し、入射ビームの調整を行っている。

また、垂直方向のペイント入射を実現するため、L3BT下流部には2台の垂直ペイントバンパ電磁石(VPBM)が設置されており、入射点におけるビームの位置と傾きの調整に使用されている。入射ビームのtwissパラメータがデザイン値と異なっていた場合、想定したペイント入射ができず、大きなビームハロー部を生成する可能性が高い。

## 2.2 エンベロープ方程式を用いたビーム調整

Linacからの入射ビームは空間電荷効果の影響が顕著に表れる。そのため、プロファイル測定結果からビームの挙動を正確に把握するためには、空間電荷効果を考慮した解析が不可欠となる。空間電荷効果が支配的なビームの振る舞いは、厳密に言えば、多粒子シミュレーションを用いて解析する必要がある。しかし、時間が限られているビーム調整時に、計算時間のかかる多粒子シミュレーションを行うことは現実的でない。従って、LinacやL3BTにおけるビーム調整では、大強度ビームを理論的にモデル化(三次元エンベロープ方程式)し、短時間で解析が可能なビーム調整用ツール(JCE-Xal)を使用している[4]。

空間電荷効果を考慮したエンベロープ方程式とは、大強度ビームの二乗平均半径が輸送過程でどのように変化していくかを記述するものである[5]。近年、エンベロープ方程式を用いたビーム調整は大強度線

形加速器ではスタンダードとなりつつあるが、その適用に関してはいくつかの条件を満たす必要がある。一つは想定するビームの位相空間分布が楕円対称性を持つこと、もう一つはrmsエミッタンスが一定、もしくはその時間変化があらかじめ判明していることである。

L3BTにおけるビーム試験の結果、DB2をデバンチャーではなくバンチャーとして使用した場合、縦方向のオーバーフォーカスが原因と考えられる横方向rmsエミッタンスの増大が確認された。この現象はビームの大強度化に伴い、より顕著になる可能性が高いため、twissマッチング調整時や利用運転時にはDB2はデバンチャーモードで使用している。

## 2.3 入射ビームtwissパラメータ調整手法

RCS入射点におけるtwissパラメータマッチングでは以下の手順でビーム調整を行っている。

(1) RCS入射点にて、dispersion関数とその傾きがゼロであることを確認

Figure 2はL3BTスクレーパセクションからRCS入射点までのdispersion関数の測定結果と計算結果を比較したものである。デバンチャー1(DB1)を用いて、ビームの中心エネルギーを変化させ、下流のビームポジションモニタ(BPM)にてビームの軌道変化を測定、その結果からBPM各位置でのdispersion関数を

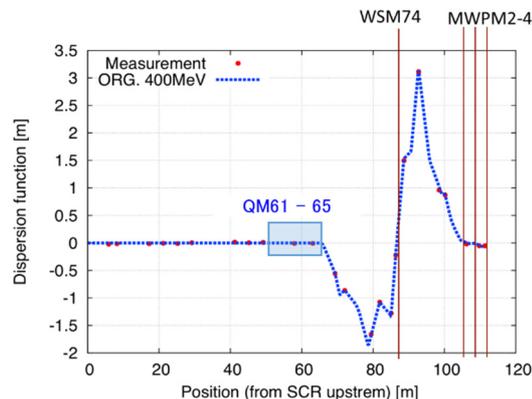


Figure 2: Dispersion function around the L3BT downstream. Red dots are measurement results, blue line is a calculation result.

算出している(赤点)。青線は SAD による計算結果である[5]。L3BT のアーク部はアクロマティックなラティスとなっているため、その下流部であるスクレーパセクションでは dispersion 関数はゼロとなっている。図より測定結果と計算結果を比較すると、RCS 入射点での dispersion 関数とその傾きはおおよそゼロとなっており、RCS のラティス関数のそれとほぼ一致していることが分かる。マッチング調整の過程において入射点での dispersion 関数が変化しないように、BM07 以降の四極電磁石(QM)の収束力は固定にし、それより上流の QM を調整に用いることとした。

(2) WSM74 と MWPM2-4 を用いたビームプロファイル測定

WSM74 と MWPM2-4 を用いて、入射ビームの横方向プロファイルを測定する。測定したプロファイルデータについて gauss 分布関数にてフィッティングを行い、得られた標準偏差( $\sigma$ )を rms ビームサイズとみなしてエンベロップ方程式による解析を行う。

(3) 入射部での twiss パラメータを測定結果から算出し、DB2 上流までエンベロップ方程式を逆算

(2)で測定したビームサイズを再現するように JCE-Xal 上で横方向のビームエンベロップをフィッティングする(Fig. 3 (a))。その結果から、DB2 上流までエンベロップ方程式を逆算し、新たな twiss パラメータの初期値として設定する。ただし、縦方向のビームエンベロップ(twiss パラメータ)は現状では測定できないため、シミュレーションによるデザイン値を使用している。

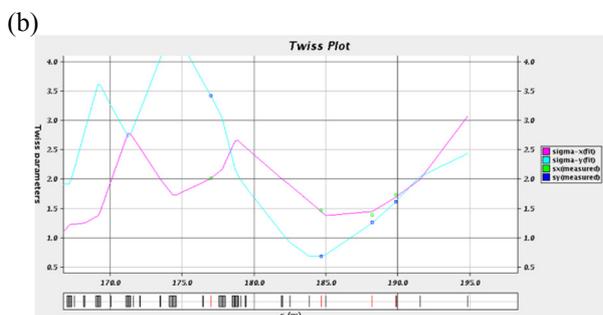
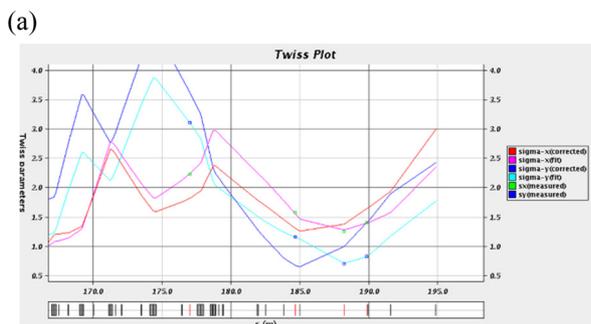


Figure 3: (a) Fitting results of the transverse envelope equation before twiss parameter matching. (b) Beam envelopes around the injection point of the RCS after twiss parameter matching.

(4) 入射点で twiss パラメータがマッチするように QM61-65 の収束力を変更し、ビームプロファイル測定による確認

前述した通り、BM07 より上流の四極電磁石(QM61-65)を用いてマッチング調整を行う(Fig.1)。目標となる RCS 入射点での twiss パラメータは Table 1 に記している。目標値に一致するように計算機上で 3 次元エンベロップ方程式を計算し、四極電磁石の収束力を変更する。計算結果をもとに、QM61-65 の設定電流値を変えて、再度、ビームプロファイル測定を行う(Fig. 3 (b))。

(5) (2)-(4)をイタレーションし、入射ビーム twiss パラメータを目標値に近づける

現状では最大でも 3 回のイタレーションで、入射ビームの twiss パラメータは目標値におおよそ一致するようになる。

### 3. RCS 入射ビームマッチング実験結果

#### 3.1 垂直ペイントバンパ電磁石(VPBM)のビームダクト形状

L3BT 下流部には、入射ビームの twiss パラメータ調整時にフィジカルアパーチャーと成り得る箇所が存在する。Figure 4 は垂直ペイントバンパ電磁石(VPBM)に設置されているセラミックダクトの模式図である。ペイント入射時には入射ビームは VPBM によって図中上方向に偏向される。この真空ダクトは、設置当時、扁平型のセラミックダクトを作成することが技術的に困難であったため、Fig. 4 に示されているようにダクト中心を上方にオフセットして設置されている。しかしながら、垂直方向下部のアパーチャーが 27mm しかなく、この位置での垂直方向ビームサイズがマッチング時に比較的大きくなることから、VPBM 用ダクトがビームロスポイントとなる可能性がある。

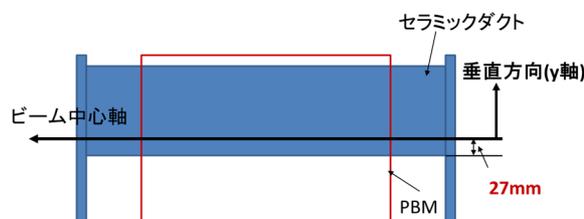


Figure 4: Schematic view of the vertical paint bump magnet and its vacuum chamber at the L3BT.

#### 3.2 Twiss パラメータマッチング結果

VPBM 用セラミックダクトのアパーチャーを考慮し、以下の 3 つのマッチング試験用 QM パラメータセットを作成した。

**Case 1:** それまでの利用運転時のパラメータ

この QM パラメータでは垂直方向のマッチングを無視して、VPBM でのビームサイズを最小化している。Figure 5 (a)にビームプロファイル測定結果と入射点付近のビームエンベロップをプロットしている。

また、VPBM1-2 の近傍にビームロスモニタ(BLM)を設置し、ビーム入射時の信号波形を確認した(Fig. 5 (a))。この時、BLM の信号波形には明確なビームロスの兆候は見られなかった。Figure 5 (a) の図中 VPBM の位置でのビームサイズは  $1\sigma$  で 2.8mm 以下である。WSM の測定結果からビームハローはおおよそ  $6\sim 7\sigma$  の位置まで存在することが確認されており、それを勘案しても十分余裕をもってダクトを通過していることが予想できる。

**Case 2:** 垂直ペイントバンパでのビームサイズを無視して、完全に垂直方向マッチングを施したパラメータ

Case 2 では VPBM におけるビームロスを見逃して、ほぼ完全に入射ビームの twiss パラメータを RCS にマッチングした結果である(Fig. 5 (b))。この時には BLM の信号波形から VPBM において有意なビームロスが発生していることが確認できる。

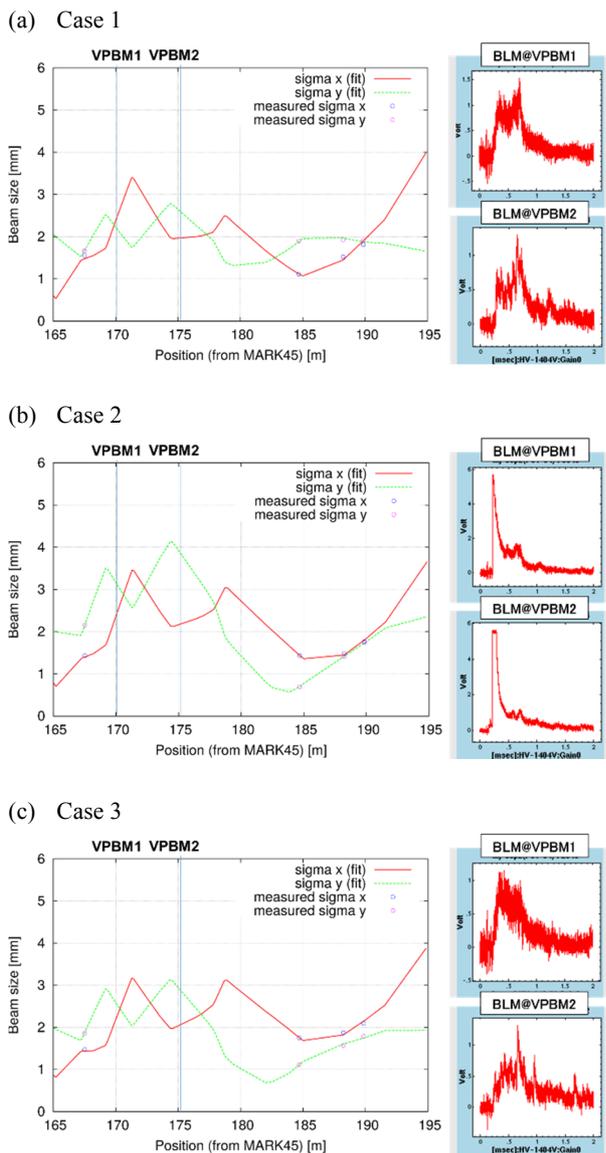


Figure 5: Transverse beam envelope around the RCS injection point. And BLM signals at the VPBM1-2.

**Case 3:** case1 と case2 の中間

BLM の信号から VPBM でビームロスがないことを確認しつつ、マッチングを行った(Fig. 5 (c))。垂直方向に関しては、入射点での twiss パラメータの目標値とのズレが case 2 よりも大きくなっている。しかしながら、case 1 に比べて RCS の収束系に twiss パラメータが整合しており、且つ、BLM の信号から VPBM の位置で有意なビームロスは発生していない。

それぞれ 3 つのパラメータセットについて、エンベロープ方程式のフィッティング結果から得られた入射点での twiss パラメータを Table 1 にまとめた。

### 3.3 Twiss パラメータマッチングによる RCS ビームロスの減少

Figure 6 はビーム入射時から 3ms までの RCS におけるコリメータ付近に設置された BLM の信号をマッチング前後で比較したものである。上図が case 1、下図が case 2 に対応しており、線色はそれぞれ RCS のビームの出力に対応している。0.5ms までは入射過程における荷電変換フォイルによる多重散乱が原因となるビームロスが見えており、それ以後は周回ビームがフォイルを躲すにつれて、徐々にビームロス量が減少している。

Figure 6 から twiss パラメータ調整によって、RCS 内のビームロスが全体的に減少したことが明らかとなった。すなわち、ビーム入射過程におけるハロー部分の形成が抑制されたものと解釈できる。また、利用運転時には VPBM の放射化を抑制するため、case 2 のパラメータセットを使用している。

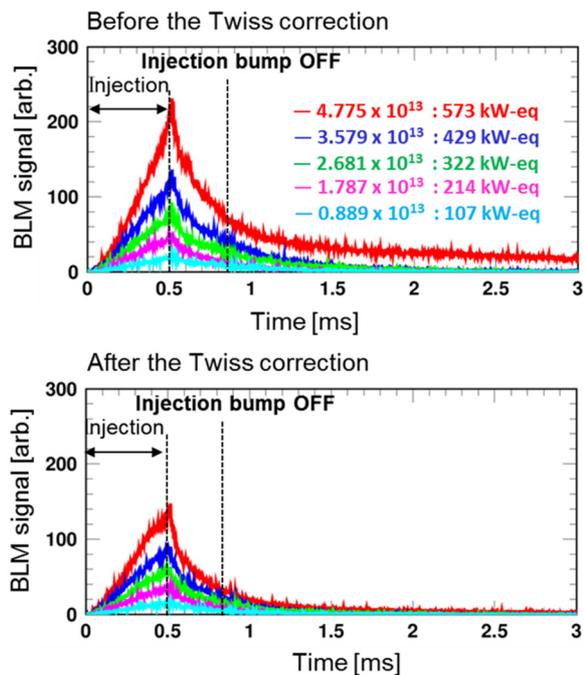


Figure 6: Plots of the BLM signals at the RCS collimator over the first 3 ms in the low energy region. Above figure is BLM signals before twiss matching (case 1), below one is after twiss matching (case 2).

Table 1: Twiss Parameters at the Injection Point of the RCS

	$\beta_x$ [m]	$\alpha_x$	$\beta_y$ [m]	$\alpha_y$
Target	10.226	-1.252	8.995	-1.822
Case 1	11.872	-1.820	8.634	0.1937
Case 2	8.963	-1.201	15.01	-1.729
Case 3	11.18	-1.126	13.46	-0.7146

#### 4. まとめと今後

J-PARC 3-GeV RCS では、ビーム出力増強を目指し、ビーム損失の抑制に取り組んでいる。Linac で加速された入射ビームの twiss パラメータを RCS 収束系に整合させるため、2014 年から RCS 入射点での twiss パラメータ調整を開始した。空間電荷効果を考慮した 3 次元エンベロープ方程式を用いて調整をおこなった結果、RCS おけるビーム損失の減少が確認できた。

利用運転時に、より正確な twiss パラメータマッチングが実行できるように、2015 年夏メンテ時においてビームロスを生じるアパーチャーとなっている VPBM 真空ダクトの大型化を計画している。また、L3BT 下流部に新たな WSM をインストールして、マッチング調整の精度をさらに向上させる予定である。

#### 参考文献

- [1] S. Nagamiya, Nucl. Phys. A, 774, 895 (2006).
- [2] M. Ikegami, Nucl. Instrum. Meths. A, 435, 282 (1999).
- [3] H. Hotchi et al., PRST-AB, **15**, 040402 (2012).
- [4] H. Ikeda et. al., 日本加速器学会プロシーディングス集, 524 (2009).
- [5] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>