

## J-PARC MR における横方向共鳴とその補正

### TRANSVERSE RESONANCES AND CORRECTIONS IN J-PARC MR

五十嵐進<sup>#</sup>, 大見和史, 佐藤健一, 下川哲司, 山田秀衛  
Susumu Igarashi<sup>#</sup>, Kazuhito Ohmi, Kenichi Sato, Tetsushi Shimogawa, Shuei Yamada  
High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

Transverse resonances have been corrected in the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The corrections are observed to be effective for the beam loss reductions. The primary source of the half integer resonance of  $2\nu_x=43$  is the leak fields of the fast extraction septum magnets. It is corrected with the trim coils of the quadrupole magnets near the septum magnets. The third order resonances of  $3\nu_x=64$  and  $\nu_x+2\nu_y=64$  are corrected with the trim coils of four sextupole magnets. The third order resonance of  $\nu_x-2\nu_y=-21$  is a structure resonance unlike above-mentioned resonances. The correction of the structure resonance is considered with changing the configuration of the sextupole magnets for the chromaticity correction. The correction of fourth order resonance of  $2\nu_x-2\nu_y=0$  is also studied using octupole magnets.

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器研究施設(J-PARC)の主リング(MR)は、陽子を 3 GeV から 30 GeV まで加速しハドロン実験施設およびニュートリノ実験施設に向けて陽子ビームを供給している。ニュートリノ実験のための速い取り出しモードでは  $2.44 \times 10^{14}$  protons per pulse (ppp) の陽子ビームを 2.48 s 周期で取り出し 470 kW のビームパワーで供給している。このとき、ビームロス は 0.13 s の入射期間中に 220 W (0.5 %), 加速開始後 0.12 s の間に 570 W (1.2 %) 程度となっている。MR コリメータの許容限度は 2 kW であり、これに比べると十分小さい量となっているが、更なる大強度化のためにビームロスの低減が必要となる。

現在のオペレーションチューンは (21.35, 21.45) としている。空間電荷チューンシフトは 500 kW のビームパワーの状態では 0.4 程度と考えられる。Figure 1 に空間電荷効果を考慮した粒子トラッキングプログラム SCTR [1] による 200,000 粒子のチューンスプレッドを示す。ビームロスのひとつの原因はオペレーションチューンの近くにある共鳴による力学口径の減少によるものである。

半整数共鳴  $2\nu_y=43$  のエラーソースは、主に速い取り出しセプタム電磁石の漏れ磁場によるものと考えられ、セプタム電磁石の近くの 3 台の四極電磁石の補助コイル励磁により補正している[2]。低いビーム強度でチューンを (22.19, 20.54) として半整数共鳴に近づけたときの  $\beta$  を測定し、四極電磁石の補正コイル励磁により  $\beta$  変調の改善を確認した。さらに大強度で、入射期間および加速初期のビームロスの改善を観測した。

3 次共鳴  $3\nu_x=64$  と  $\nu_x+2\nu_y=64$  のエラーソースは、クロマティシティ補正用六極電磁石のばらつきによるものと考えられ、六極電磁石の補正コイル励磁により補正を行っている[2]。低いビーム強度でチューンをそれぞれの共鳴線上に乗せたときのビームサバイバルが改善するように 2 台の六極電磁石の補正コイル電流値をサーチした。そ

の後 4 台の六極電磁石の補正コイルを使い、2 つの共鳴を補正する解を求めた。この補正により、大強度でビームロスが低減することを観測した。

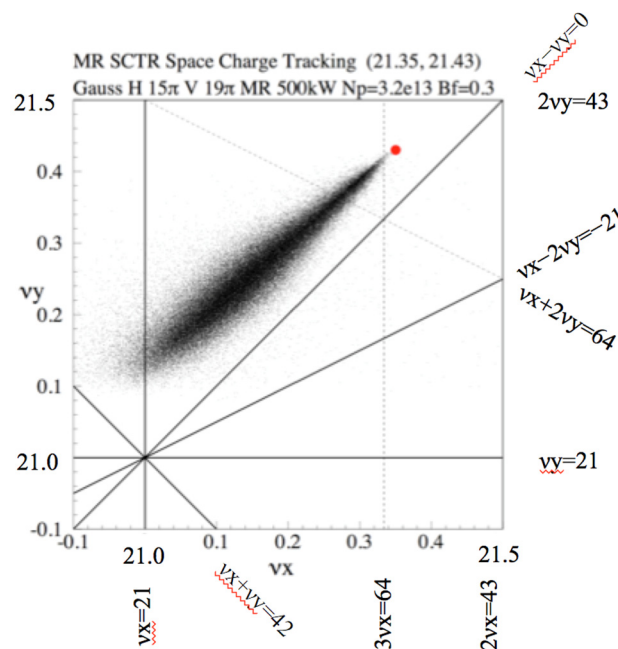


Figure 1: Space charge tune spread for the beam power of 500 kW in J-PARC MR.

#### 2. ダイナミックアパーチャー

SAD[3]を用いて粒子トラッキングを行い、ダイナミックアパーチャーを求めた。テスト粒子として、x 方向と y 方向のそれぞれの Courant-Snyder invariant を  $8.1\pi$  mmmrad から  $8.1\pi$  刻みで、 $81\pi$ までの 10 個の粒子について 1000 ターンのトラッキングを行った。ここでは空間電

<sup>#</sup> susumu.igarashi@kek.jp

荷効果は考慮していない。周回ごとに  $81\pi$  のアパーチャー内にいるかの確認を行い、生き残りの数をスコアとして計数した。チューンを 21.04 から 21.46 まで 0.01 毎に変えて、スコアを計算した(Fig. 2)。ここでは電磁石のばらつき、設置誤差を入れていない。構造共鳴の  $v_x-2v_y=-21$  が明確に現れており、広い範囲で影響を及ぼしていることが分かった。また、4 次の共鳴である  $2v_x-2v_y=0$  の影響も見えている。4 次の共鳴は強い六極電磁石が多数あることから高次の効果として現れている。ビーム不安定性を抑制するためにクロマティシティの補正を弱くしており、入射期間では 75 %と設定されている。この補正を強くすると、3 次、4 次共鳴ともに強くなり、弱くすることができれば、共鳴は弱くすることができる。ただし、六極電磁石のための電源の設定上、75 %以下で安定に電流値を下げるできない。

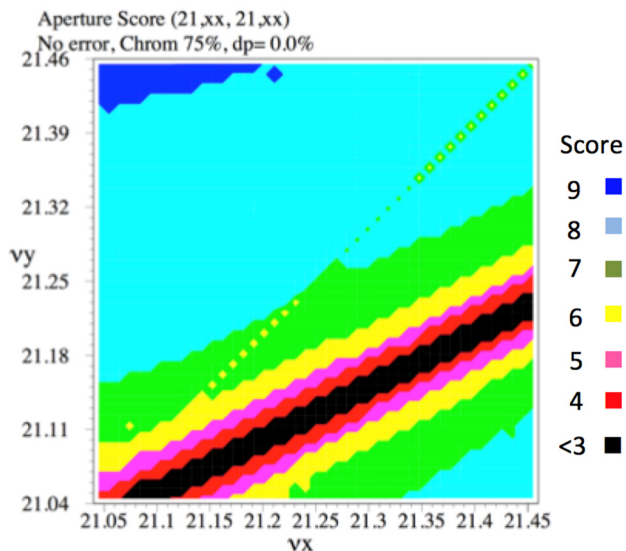


Figure 2: Aperture score for the tune area of 21.04 ~ 21.46 for both horizontal and vertical tunes.

### 3. 3 次共鳴 $v_x-2v_y=-21$ の抑制

3 次の構造共鳴である  $v_x-2v_y=-21$  を抑制するには六極電磁石の配列を考え直さなければならない。六極電磁石は全部で 72 台で、24 台ずつの 3 つのファミリー: SFA, SDA, SDB で構成されている。この共鳴振幅を式 (1)から計算した。

$$G_{1,-2,-21}e^{i\xi} = \sum \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2} \beta_y k_2 \exp[i(\phi_x - 2\phi_y)] \quad (1)$$

クロマティシティ補正は 75 %を仮定している。また計算上チューンを (21.3333, 21.1667) とした。Figure 3 に、SFA の 24 台の分を示す。ただし 3 回対称性から表示点はアーク A の 8 台分となっている。アーク B の 8 台、アーク C の 8 台は、アーク A の点に重なる。同様に Fig.

4 に、SDA の寄与、Fig. 5 に SDB の寄与を示す。共鳴振幅についてのそれぞれのファミリーの寄与は、図中に位相を含めてベクトルで示す。3 つのファミリーの寄与の和は、3.52 であり、位相は  $-1.70$  rad であり、これらの図ではほぼ下向きとなっている。

この共鳴を抑制するために、ベクトル和を小さくするような構成を検討した。SDA について Fig. 4 に赤で示した 047 と 061 とその対称に位置にある 119, 133, 191, 205 を使用しないことにすると、向きはあまり変わらず振幅が小さくなる。また、SDB について Fig. 5 に赤で示した 049 と 063 とその対称の位置にある 121, 135, 193, 207 を使用しないことにすると、向きはあまり変わらず振幅が小さくなる。SDA, SDB については 24 台中 18 台を使用する状態となり、このままだとクロマティシティがずれるので、SDA, SDB について 1.3333 倍の励磁とするとところから微調整してクロマティシティ補正量を計算し直した。そしてクロマティシティ補正 75 %のときの状態で、共鳴振幅は 0.53 となり、元の 3.52 から大幅に小さくすることができた。

この構成では、 $3v_x=63$  と  $3v_y=63$  にはあまり悪影響はないが、4 次共鳴  $2v_x-2v_y=0$  が大きくなってしまったことが分かった。

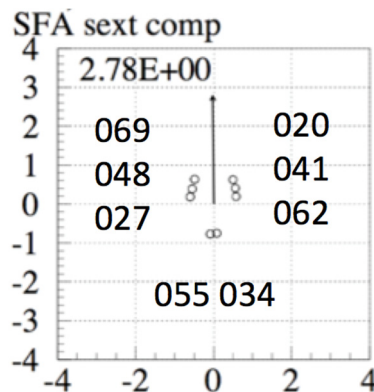


Figure 3: Resonance amplitudes of  $v_x-2v_y=-21$  by 24 SFA sextupole magnets. The amplitude of the sum is 2.78.

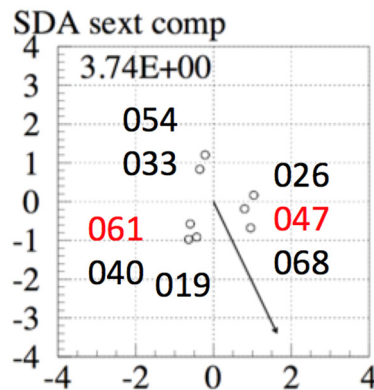


Figure 4: Resonance amplitudes of  $v_x-2v_y=-21$  by 24 SDA sextupole magnets. The amplitude of the sum is 3.74.

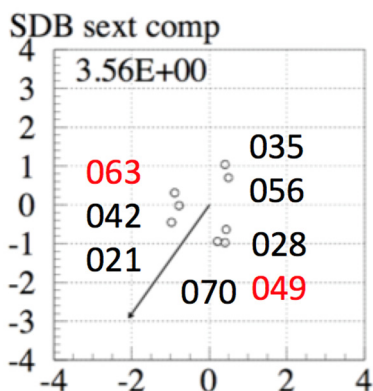


Figure 5: Resonance amplitudes of  $v_x-2v_y=-21$  by 24 SDB sextupole magnets. The amplitude of the sum is 3.56.

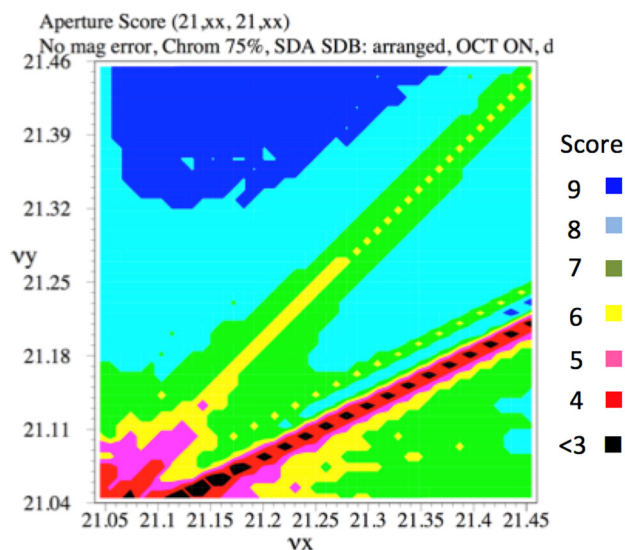


Figure 7: Aperture score for the tune area of 21.04 ~ 21.46 for both horizontal and vertical tunes with the correction of the resonances of  $v_x-2v_y=-21$  and  $2v_x-2v_y=0$ .

#### 4. 4次共鳴 $2v_x-2v_y=0$ の抑制

4次共鳴  $2v_x-2v_y=0$  を八極電磁石の励磁で抑制することをシミュレーション上で検討した。チューンを(21.35, 21.35)としてテスト粒子を1000ターンさせ、x方向とy方向のCourant-Snyder invariantの交換量を求めた(Fig. 6)。そして、その交換量が小さくなるように八極電磁石の励磁量を求めた。八極電磁石はもともとビーム不安定性抑制のために6台設置してある[4]。ビーム不安定性はフィードバック制御により抑制されているので、八極電磁石は現在は、ダイナミックアパーチャーを補正するように使用している。OCT016, 088, 160を17.5 A、OCT047, 119, 191を5.25 A励磁することにより、4次共鳴  $2v_x-2v_y=0$  が抑制できることが分かった。

この構成により、チューンを21.04から21.46まで0.01毎に変えて、スコアを計算した(Fig. 7)。ここでは電磁石のばらつき、設置誤差を入れていない。Figure 2と比べると構造共鳴の  $v_x-2v_y=-21$  が抑制されていることが分かる。また、現在運転で適用しているチューン(21.35, 21.45)でのスコアが良くなっていることが分かった。

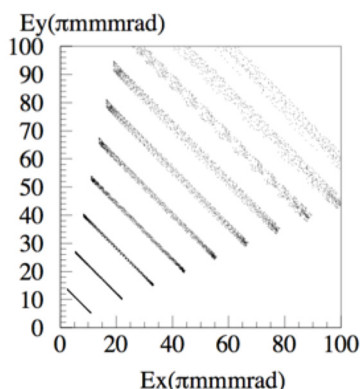


Figure 6: Horizontal and vertical Courant-Snyder invariants for test particle tracking of 1000 turns at the tune of (21.35, 21.35).

#### 5. まとめ

J-PARC MRのビーム運転において、非構造共鳴を補正することによりビームロスを改善している。半整数共鳴  $2v_x=43$  は四極電磁石の補正コイル励磁により補正しており、3次共鳴  $3v_x=64$  と  $v_x+2v_y=64$  を六極電磁石の補正コイル励磁により補正している。構造共鳴  $v_x-2v_y=-21$  と  $2v_x-2v_y=0$  を抑制する方法をシミュレーションにより求めた。六極電磁石の構成を変え、八極電磁石の励磁することにより、ダイナミックアパーチャーを改善できることが分かった。

#### 参考文献

- [1] K. Ohmi *et al.*, "Study of Halo Formation in J-PARC MR", Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Particle Accelerator Conference, Albuquerque (PAC07), USA, Jun 25-29, 2007.
- [2] S. Igarashi *et al.* (J-PARC MR Beam Commissioning Group), "Recent Progress of J-PARC MR Beam Commissioning and Operation", HB2016, Malmo, Sweden, July 2016, pp. 21-26.
- [3] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [4] S. Igarashi *et al.*, "J-PARC MRにおける八極電磁石および電源", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.