

## J-PARC MR における 3 次共鳴補正

### THIRD ORDER RESONANCE CORRECTION IN J-PARC MR

五十嵐進<sup>#,A)</sup>, 三浦一喜<sup>A)</sup>, 大見和史<sup>A)</sup>, 佐藤健一<sup>A)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 山田秀衛<sup>A)</sup>

Susumu Igarashi<sup>#,A)</sup>, Kazuki Miura<sup>A)</sup>, Kazuhito Ohmi<sup>A)</sup>, Kenichi Sato<sup>A)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>A)</sup>, Shuei Yamada<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

We have measured the amplitudes of the third order resonances and made corrections with the trim coils of the sextupole magnets in the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). It is important for the high intensity operation to maintain the dynamic aperture and to correct resonances near the operation tune. The operation tune of the MR in the fast extraction mode is (22.40, 20.75). We have measured the beam losses with a low intensity beam of  $8 \times 10^{11}$  protons per bunch (ppb) on the tunes of  $3\nu_x=67$  and  $\nu_x+2\nu_y=64$ . For each resonance the condition of better beam survival was searched with the trim coil excitation for the sextupole magnets. A solution was found with trim coils of four sextupole magnets to correct both resonances at the same time. It was applied for the high intensity operation and the improvement of the beam survival was observed.

#### 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  $1.7 \times 10^{14}$  protons per pulse (ppp) の陽子ビームを 2.48 s 周期で取り出し 335 kW のビームパワーで供給している[1]。このとき、ビームロス は 0.13 s の入射期間中に 160 W (0.5%)、加速開始後 0.12 s の間に 500 W (1.5%) 程度となっている。MR コリメータの許容限度は 3.5 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 (22.40, 20.75) としている。空間電荷チューンシフトは 310 kW のビームパワーの状態では 0.4 程度と考えられる。Fig. 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 [2] 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。

線形結合共鳴  $\nu_x+\nu_y=43$  のエラーソースは、四極電磁石の回転設置エラーおよび六極電磁石でのビーム軌道の垂直方向でのずれによると考えられ、4 台のスキュー四極電磁石により補正を行っている[3]。低いビーム強度でチューンを共鳴線上に乗せたときのビームサバイバルの改善を確認した。さらに大強度で、ビームプロファイル測定によりエミッタンスの増大が改善すること、およびビームロスの低減を観測した。

半整数共鳴  $2\nu_y=41$  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[1]。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、四極電磁石の補助コイル励磁により  $\beta$  変調の改善を確認した。さらに大強度で、入射期間中のビームロスの改善を観測した。

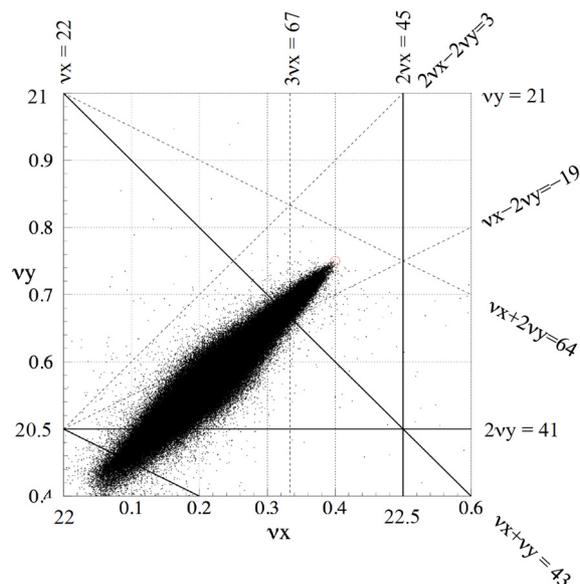


Figure 1: Space charge tune spread for the beam power of 310 kW in J-PARC MR.

#### 2. 3 次共鳴の共鳴振幅の測定

3 次共鳴  $3\nu_x=67$  の共鳴振幅を求めるために、 $8 \times 10^{11}$  ppb の 1 バンチの低いビーム強度で、チューンを (22.34, 20.75) と共鳴線上に乗せる設定とした。ビームを 3 GeV の状態を保ち、1.08 s 周回させる

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

モードとして、ビーム強度が時間とともに低下して、サバイバルが良くない状態を作った (Fig. 2 黒線)。そして SFA048 の補助コイルと SFA055 の補助コイルに接続したそれぞれの電源の電流値をスキャンして、ビームサバイバルが良くなる状態を探した。

SFA はフォーカス極性の六極電磁石のファミリーで 24 台あり、その他ディフォーカス極性の SDA と SDB ファミリーがそれぞれ 24 台ずつある。SFA の位置での  $\beta_x$  の方が、SDA、SDB のものより大きく、より低い電流値で補正できることより選んでおり、さらに 048 と 055 は  $3v_x$  の位相差で約 90 deg となることより選んだ。電源としては、六極電磁石の主コイルの励磁の逆起電圧に耐えることができ、 $-1.5 \text{ A} \sim +1.5 \text{ A}$  の電流を流すことができるものを用意した。

SFA048 の補助コイルに  $+0.3 \text{ A}$ 、SFA055 の補助コイルに  $0 \text{ A}$  の電流値の場合で、ビームサバイバルが改善することが観測された (Fig. 2 赤線)。さらに、次のセクションで説明する 2 つの 3 次共鳴  $3v_x=67$  と  $v_x+2v_y=64$  を同時に補正する設定の場合 (SFA048  $+1.11 \text{ A}$ , SFA055  $-0.69 \text{ A}$ , SFA062  $+0.81 \text{ A}$ , SFA069  $-0.69 \text{ A}$ )、Fig. 2 の青線のように、SFA048  $+0.3 \text{ A}$  の場合と同様、ビームサバイバルの改善が観測された。

補正コイルの電流値により  $k_2 = 0.026 \text{ m}^{-2}$  となり、共鳴振幅は以下のように計算された。

$$|G_{3,0,64}| = \left| \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2} k_2 \exp[i(3\phi_x)] \right| = 0.033 \quad (1)$$

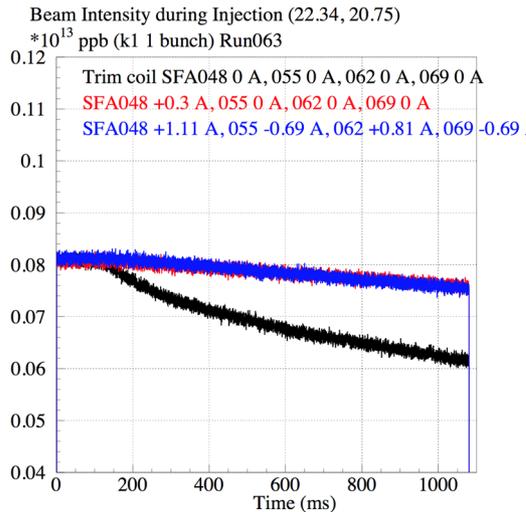


Figure 2: Beam intensity during injection at the tune of (22.34, 20.75) without the trim coil correction (black line), with the trim coil correction of SFA048 of  $+0.3 \text{ A}$  (red line) and with the trim coil parameters for correction of both  $3v_x=67$  and  $v_x+2v_y=64$  of SFA048  $+1.11 \text{ A}$ , SFA055  $-0.69 \text{ A}$ , SFA062  $+0.81 \text{ A}$ , SFA069  $-0.69 \text{ A}$  (blue line).

3 次共鳴  $v_x+2v_y=64$  の共鳴振幅を求めるために、 $8 \times 10^{11} \text{ ppb}$  の 1 バンチの低いビーム強度で、チューンを (22.42, 20.78) と共鳴線上に乗せる設定とした。ビームを  $3 \text{ GeV}$  の状態を保ち、 $1.08 \text{ s}$  周回させるモードとして、ビーム強度が時間とともに低下して、サバイバルが良くない状態を作った (Fig. 3 黒線)。そして SFA048 の補助コイルと SFA055 の補助コイルに接続した電源の電流値をスキャンして、ビームサバイバルが良くなる状態を探した。

SFA048 の補助コイルに  $+1.1 \text{ A}$ 、SFA055 の補助コイルに  $0 \text{ A}$  の電流値の場合で、ビームサバイバルが改善することが観測された (Fig. 3 赤線)。さらに、次のセクションで説明する 2 つの 3 次共鳴  $3v_x=67$  と  $v_x+2v_y=64$  を同時に補正する設定の場合 (SFA048  $+1.11 \text{ A}$ , SFA055  $-0.69 \text{ A}$ , SFA062  $+0.81 \text{ A}$ , SFA069  $-0.69 \text{ A}$ )、Fig. 3 の青線のように、SFA048  $+1.1 \text{ A}$  の場合と同様、ビームサバイバルの改善が観測された。

補正コイルの電流値により  $k_2 = 0.095 \text{ m}^{-2}$  となり、共鳴振幅は以下のように計算された。

$$|G_{1,2,64}| = \left| \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2} \beta_y k_2 \exp[i(\phi_x + 2\phi_y)] \right| = 0.17 \quad (2)$$

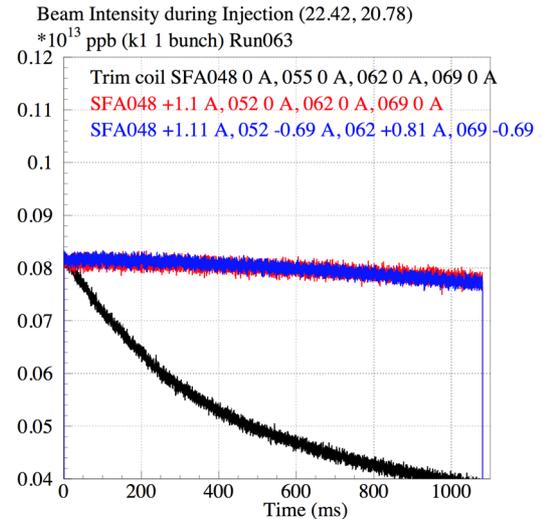


Figure 3: Beam intensity during injection at the tune of (22.42, 20.78) without the trim coil correction (black line), with the trim coil correction of SFA048 of  $+1.1 \text{ A}$  (red line) and with the trim coil parameters for correction of both  $3v_x=67$  and  $v_x+2v_y=64$  of SFA048  $+1.11 \text{ A}$ , SFA055  $-0.69 \text{ A}$ , SFA062  $+0.81 \text{ A}$ , SFA069  $-0.69 \text{ A}$  (blue line).

### 3. 2つの3次共鳴の同時補正

2つの3次共鳴  $3v_x=67$  と  $v_x+2v_y=64$  についての同時補正を検討した。六極電磁石の補正コイルを用いて、式 (1) および (2) の2つの複素数 (4つの実数) の値を同時に合わせるためには、4台の六極電磁石を使う必要がある。適切な4台の六極電磁石を選び、それにより、補正コイル電流が比較的小さくなるようにする。Eq. (3) の4つの変数を持つ連立方程式を解く必要がある。

ここで、右辺の  $k_{2\_measured}(3)$  は3次共鳴の1つずつ補正したときの補正コイル電流値からの  $k_2$  の測定値で、左辺の  $k_{2\_variable}(j)$  は  $j=1\sim 4$  の4つ変数で、4元連立方程式の解となる。また  $j=1, 2, 3, 4$  は、それぞれ SFA048, SFA055, SFA062, SFA069 に対応する。式中の光学パラメータは、チューンを (22.33, 20.83) として計算したもので、 $3v_x=67$  と  $v_x+2v_y=64$  の両方を満たすものとした。

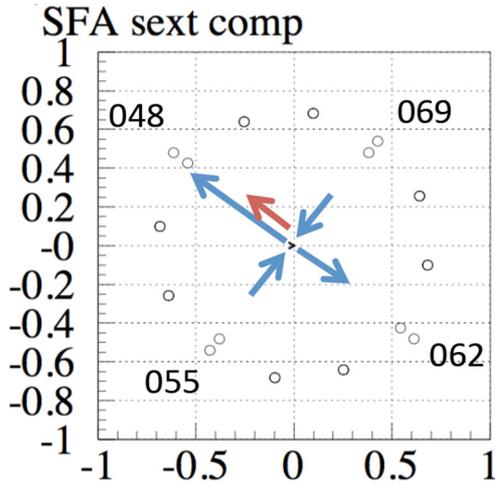


Figure 4: Each contribution of SFA magnets for resonance amplitude of  $3v_x=67$  at the tune of (22.33, 20.83) with the trim coil correction of SFA048 of +0.3 A (red vector) and with the trim coil correction of SFA048 +1.11 A, SFA055 -0.69 A, SFA062 +0.81 A, SFA069 -0.69 A (blue vectors).

Fig. 4 に  $3v_x=67$  の共鳴振幅の24台のSFAの寄与を複素平面上に表示した。SFA048の補助コイル +0.3 A 分の寄与を赤矢印で表し、それが青矢印で示した2つの3次共鳴を同時に補正する設定 (SFA048 +1.11 A, SFA055 -0.69 A, SFA062 +0.81 A, SFA069 -0.69 A) で再現されていることが分かる。この補正によりこの共鳴振幅が  $6.1 \times 10^{-11}$  に改善することが期待される。

また、Fig. 5 に  $v_x+2v_y=64$  の共鳴振幅の24台のSFAの寄与を複素平面上に表示した。SFA048の補助コイル +1.1 A 分の寄与を赤矢印で表し、それが青矢印で示した2つの3次共鳴を同時に補正する設定 (SFA048 +1.11 A, SFA055 -0.69 A, SFA062 +0.81 A, SFA069 -0.69 A) で再現されていることが分かる。この補正によりこの共鳴振幅が  $2.0 \times 10^{-3}$  に改善することが期待される。

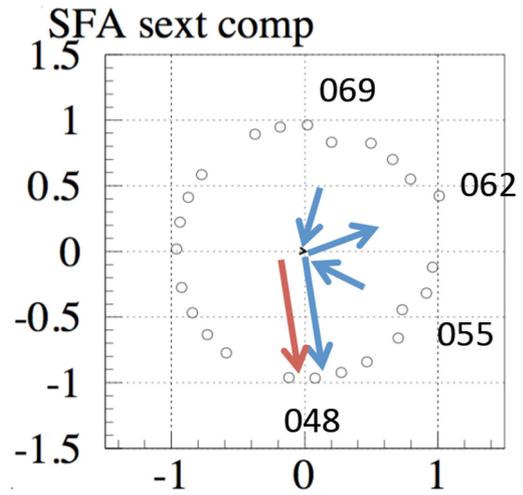


Figure 5: Each contribution of SFA magnets for resonance amplitude of  $v_x+2v_y=64$  at the tune of (22.33, 20.83) with the trim coil correction of SFA048 of +1.1 A (red vector) and with the trim coil correction of SFA048 +1.11 A, SFA055 -0.69 A, SFA062 +0.81 A, SFA069 -0.69 A (blue vectors).

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(j) k_{2\_variable}(j) \cos[3\phi_x(j)] &= \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(1) k_{2\_measured}(1) \cos[3\phi_x(1)] \\
 \sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(j) k_{2\_variable}(j) \sin[3\phi_x(j)] &= \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(1) k_{2\_measured}(1) \sin[3\phi_x(1)] \\
 \sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(j) \beta_y(j) k_{2\_variable}(j) \cos[\phi_x(j) + 2\phi_y(j)] &= \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(1) \beta_y(1) k_{2\_measured}(1) \cos[\phi_x(1) + 2\phi_y(1)] \\
 \sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(j) \beta_y(j) k_{2\_variable}(j) \sin[\phi_x(j) + 2\phi_y(j)] &= \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(1) \beta_y(1) k_{2\_measured}(1) \sin[\phi_x(1) + 2\phi_y(1)]
 \end{aligned} \tag{3}$$

#### 4. 大強度運転への適用

入射粒子数  $2 \times 10^{13}$  ppb の 2 バンチ入射の条件で 0.13 s の入射期間の後 1.4 s で加速を行い、3 次共鳴補正についてビームサバイバルの測定を行った。この際、線形結合共鳴  $v_x + v_y = 43$  をスキュー四極電磁石により補正し、半整数共鳴  $2v_y = 41$  を 3 台の四極電磁石の補正コイルにより補正した状態とした。2 つの 3 次共鳴を同時に補正する設定により、入射期間のビームロス補正なしの場合の 148 W から 62 W に改善した。加速期間の初期 0.12 s ではビームロスが 332 W から 168 W に改善した。これらの値は 3 ショット平均を取っている。ビームロスは概ね半減した (Fig. 6)。

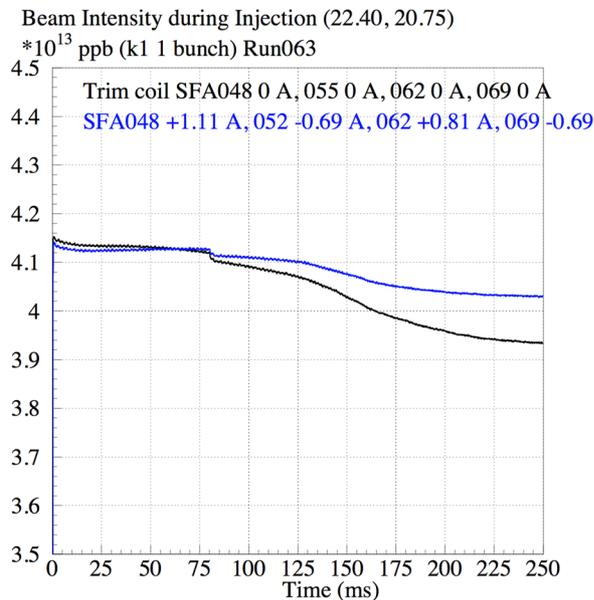


Figure 6: Beam intensity during injection and the beginning of the acceleration at the tune of (22.40, 20.75) without the trim coil correction (black line) and with the trim coil parameters for correction of both  $3v_x = 67$  and  $v_x + 2v_y = 64$  of SFA048 +1.11 A, SFA055 -0.69 A, SFA062 +0.81 A, SFA069 -0.69 A (blue line).

#### 5. まとめ

J-PARC の MR において 3 次共鳴を観測し、六極電磁石の補助コイルに電流を流すことにより、共鳴補正を行った。大強度運転のためにはダイナミックアパーチャーの確保が重要で、オペレーションチューンに近い共鳴を補正することが必要となっている。MR の速い取り出しモードでのチューンは (22.40, 20.75) で、その付近の  $3v_x = 67$  および  $v_x + 2v_y = 64$  について  $8 \times 10^{11}$  ppb の低い強度でビームロスを観測した。2 台の六極電磁石の補助コイルに電源を用意し、それぞれの共鳴を補正し、ビームロスを低減する条件を探した。また、複素数である共鳴強度の 2

つを同時に補正するために、4 台の六極電磁石の補正による解を求めた。4 台の補正電源を用意して、2 つの 3 次共鳴を同時に補正し、大強度運転においてビームロスの低減を観測した。

#### 参考文献

- [1] Y. Sato, et al., “J-PARC Main Ring 大強度運転の進捗と展望”, these proceedings.
- [2] 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.
- [3] J. Takano, et al., “Linear Coupling Resonance Correction of the J-PARC Main Ring”, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Science at J-PARC, Tsukuba, Japan, July 12-15, 2014.