

J-PARC MR での非線形ディスパージョン関数を用いた六極誤差磁場の探索 SEARCH FOR THE SEXTUPOLE ERROR FIELD USING WITH THE NON-LINEAR DISPERSION FUNCTION MEASUREMENT AT J-PARC MR

五十嵐進^{#,A)}, 浅見高史^{A)}, 佐藤洋一^{A)}, 發知英明^{A)}, 譚玉蓮^{A)}, 安居孝晃^{A)}
Susumu Igarashi^{#,A)}, Takashi Asami^{A)}, Yoichi Sato^{A)}, Hideaki Hotchi^{A)}, Yulian Tan^{A)}, Takaaki Yasui^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

High power beam operation has been performed at the main ring (MR) of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The beam losses have been reduced for the fast extraction operation with the correction of the third-order non-structure resonances of $3\nu_x=64$ and $\nu_x+2\nu_y=64$. Possible causes of the resonances are error fields such as the imperfections of sextupole magnets. A new method was invented to search for the error fields. The nonlinear dispersion function η_1 can be described in an inhomogeneous equation, and the inhomogeneous term includes sextupole strength. We have derived the linear and nonlinear dispersion functions by measuring the beam orbits for certain settings of the momentum deviation using the beam position monitors located throughout MR. The sextupole error fields were then located from the information of the η_1 distribution. This method was verified with measurements using the trim coil settings of the sextupole magnets.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の主リング(MR)では、大強度ビームを素粒子・原子核実験に供給している。長基線ニュートリノ振動実験(T2K)のために速い取り出し運転を行い、ビームパワーを上げて 830 kW で供給を行った[1]。その際ビームロスを低減することが重要で、加速器機器のハンズオンメンテナンスが可能な状態としている。ビームロスの原因の一つとして、3 次共鳴が挙げられる。MR のオペレーションチューンの近くに $3\nu_x=64$ と $\nu_x+2\nu_y=64$ の 2 つの 3 次共鳴がある。4 台の六極電磁石の補正コイルを使って、これらの共鳴を補正することにより、ビームロスを低減している[2]。

今後ビームパワーを増強して 1.3 MW にする計画で[3]、そのためビームロスを更に減らす必要がある。六極電磁石の補正コイル(Trim S)の電源システムを現在の 4 台から、24 台として、共鳴補正の高度化を計画している[4]。それと同時に、3 次共鳴のエラーの発生源が分かると、効率的な共鳴補正が可能になると考えられる。

MR のラティスは 3 回対称となるように設計されている。更に、精密な光学測定により、ベータatron 振幅関数が設定どおりとなるように補正を行い、3 回対称性を精度よく保つようになっている[5]。非構造 3 次共鳴の原因として可能性のあるものは、3 回対称ではない六極磁場が考えられる。MR はクロマチシティ補正のために 72 台の六極電磁石を使用している。そのばらつきが、MR の持つ 3 回対称性を破り、3 次共鳴の原因となる可能性がある。また、偏向電磁石の六極成分のばらつき、入射機器の漏れ磁場などの六極成分が 3 次共鳴の原因となり得る。

3 次共鳴の原因としての六極磁場の発生源を特定するため、非線形ディスパージョン関数の測定を使う方法を考案した。

2. 非線形ディスパージョン

非線形ディスパージョンについては、文献[6]で導出されている。運動量偏差 $\delta = \Delta p/p$ について水平方向軌道 x を展開して式(1)のように表す場合、

$$x = \eta_0 \delta + \eta_1 \delta^2 + O(\delta^3) \quad (1)$$

非線形ディスパージョン関数 η_n は、式(2)の漸化式で表すことができる。

$$\eta_n'' + (K_x^2 + g_0)\eta_n = \Omega_n(\eta_0, \dots, \eta_{n-1}) \quad (2)$$

ここで、非斉次項 $\Omega_n(\eta_0, \dots, \eta_{n-1})$ は以下の様に表される。

$$\Omega_0 = K_x \quad (3)$$

$$\Omega_1 = g_0 \eta_0 - \frac{1}{2} \lambda_0 \eta_0^2 - K_x \left(1 - \frac{1}{2} \eta_0^2\right) + 2K_x^2 \eta_0 - K_x^3 \eta_0^2 \quad (4)$$

ここで K_x は偏向電磁石の曲率、 g_0 、 λ_0 は四極、六極電磁石の強さを示す。

非斉次項が六極磁場成分を含むことから、1 次の非線形ディスパージョンを測定することにより、六極磁場の分布が求めることができる。ただし、六極の強さの項にはディスパージョン η_0 がかかっており、 η_0 が 0 のところでは寄与がなくなり、誤差磁場の探索ができないという条件がある。

軌道計算プログラム SAD[7]を用い、3 回対称な設定値を非斉次項として、非線形 1 次のディスパージョン関数の計算値を求める。その計算値と、非線形ディスパージョン関数の測定値を比較することにより、想定していない六極磁場の分布が導出できる。

[#] susumu.igarashi@kek.jp

3. クロマティシティ測定

MR は横方向、縦方向ともに大きなアパーチャーを確保しており、横方向は $81 \pi \text{ mm mrad}$ 、縦方向は運動量偏差 $\delta = \Delta p/p$ で 0.67% となっている。ビームサイズが小さい場合にはより大きな運動量偏差が許容できる。クロマティシティの測定のために、 δ を -1.3% から $+1.3\%$ の範囲で、チューンを測定した。測定は入射期間 (0.13 s) で行い、入射後 0.05 s から 0.09 s の間で rf 周波数を変化させた。シンクロトロン振動に比べて充分遅くアディアバティックな変化となる。ビームは通常の運転では 4 回で 8 バンチ入射するが、この測定では入射は 1 回 (K1)、1 バンチのみで、加速終了後 (P3) に取り出している。ビーム強度は $1 \times 10^{12} \text{ ppb}$ 、 $\delta = 0$ でのチューンは (21.39, 2.41) と設定した。

チューンの測定は、それぞれ水平方向、垂直方向のエキサイターでビームのベータatron振動を励起し、BPM 信号のリアルタイムスペクトラムアナライザを用いた周波数解析によって行っている。水平方向チューンの運動量偏差 δ 依存性を図 1 に、垂直方向チューンの運動量偏差 δ 依存性を図 2 に示す。

SAD 計算を行い、クロマティシティ全補正の設定と比較して、六極電磁石 SF の設定電流が 92.85% 、SD の設定電流が 90.0% となるクロマティシティとなっていることが分かった。

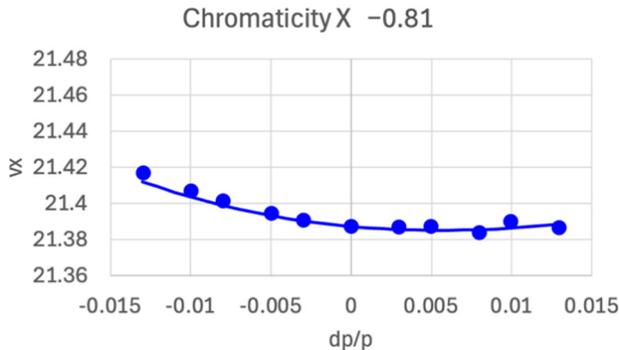


図 1: 運動量偏差 δ を変えた時の水平方向チューンの測定値 (●) と SAD による計算値 (青線)。

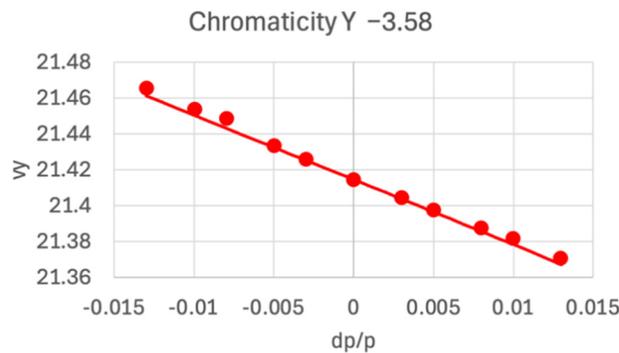


図 2: 運動量偏差 δ を変えた時の垂直方向チューンの測定値 (●) と SAD による計算値 (赤線)。

4. ディスパーション測定

ディスパーションの測定のために、運動量偏差 δ が -1.3% から $+1.3\%$ の範囲で、閉軌道のずれ (COD) を測定した。運動量偏差の設定は、クロマティシティ測定の場合と同様に、入射後 0.05 s から 0.09 s の間で rf 周波数を変化させた。COD は、それぞれのビーム位置モニター (BPM) を使い、 10 ms 毎に測定した (図 3)。

この軌道の変化を、それぞれの運動量偏差の設定についてプロットしたものを図 4 に示す。この結果は 2 次の多項式で良くフィットできている。1 次の項は線形ディスパーションとなり、2 次の項は非線形の 1 次のディスパーションとなる。

BPM 処理回路は一部動作不良となるものがあり、186 台のうち今回は 22 台の測定ができなかった。正常に読み出せた全ての BPM 測定について同じ解析を行い、線形ディスパーションを図 5 に示す。測定結果は良い 3 回対称性を示している。また、SAD による計算値とも良く一致している。

非線形の 1 次のディスパーションについても同様のプロットを作成した (図 6)。測定結果は概ね良い 3 回対称性を示している。SAD による計算値とも概ね一致しているが、六極磁場の分布を求めるため、この差違を解析に用いる。

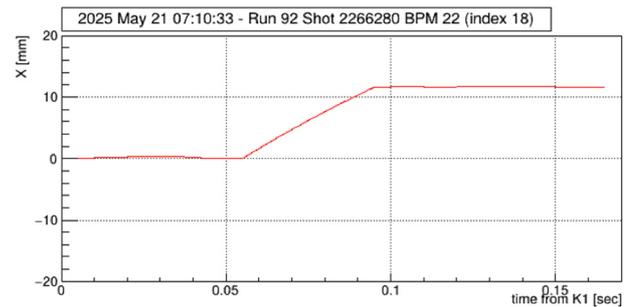


図 3: BPM022 での水平方向軌道位置の時間的な変化。入射後 0.05 s から 0.09 s の間で運動量偏差 $\delta = -1.3\%$ に対応する rf 周波数を変化させている。

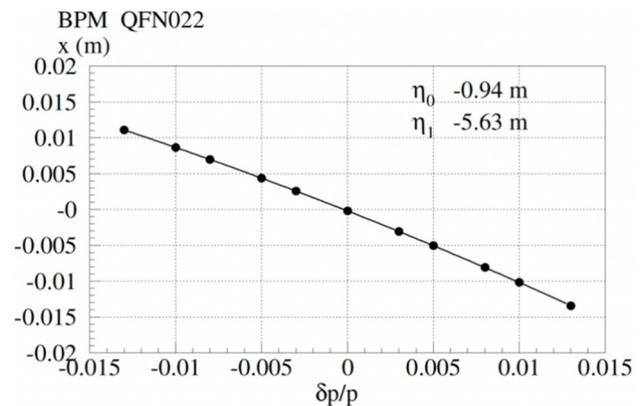


図 4: BPM022 での水平方向ビーム位置についての運動量偏差依存性。

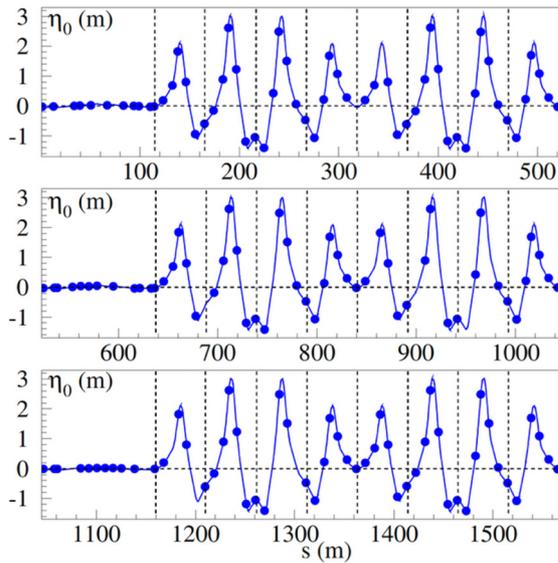


図 5: 線形ディスパージョンの測定値(●)と SAD による計算値(実線)。MR 全周のうち、上図に直線部 A とアーク部 A、中図に直線部 B とアーク部 B、下図に直線部 C とアーク部 C を示す。

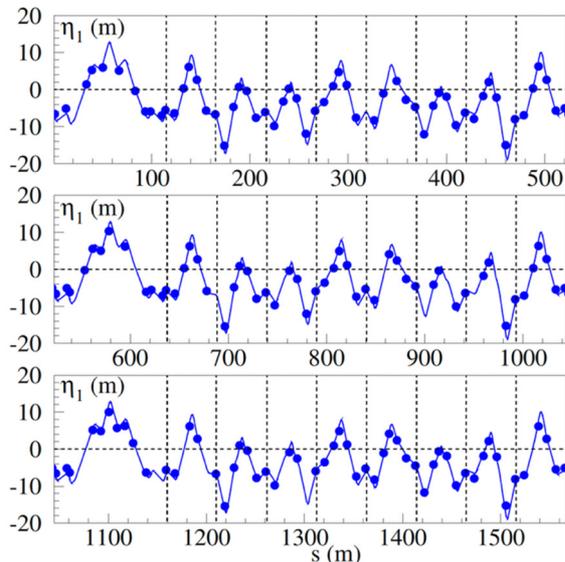


図 6: 非線形 1 次ディスパージョンの測定値(●)と SAD による計算値(実線)。MR 全周のうち、上図に直線部 A とアーク部 A、中図に直線部 B とアーク部 B、下図に直線部 C とアーク部 C を示す。

5. 非線形ディスパージョン測定による六極磁場探索の有効性の確認

Trim S を使い、その磁場の探索を行い、非線形ディスパージョン測定による方法が有効かどうかを確認した。3 次共鳴補正のための 4 台の Trim S について on の場合と off の場合の 2 通りについて非線形ディスパージョンの測定を行った。Trim S は 24 台の SFA のうち、SFA048、SFA055、SFA062、SFA069 の 4 台を使用している。ビームロスが少なくなるように設定値のスキャンからそれぞれ

の電流値を決めており、その値は、+1.61 A、−0.09 A、−0.07 A、+0.17 A としている。Trim S 4 台が on の状態で、運動量偏差の 11 とおり ($\delta = \pm 1.3\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 0.8\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.3\%$ 、 0%) について 100 ショットずつのデータを取得し、非線形ディスパージョンを求めた。また Trim S を全て off の状態で、100 ショットずつのデータを取得し、その非線形ディスパージョンを求めた。非線形ディスパージョンの Trim S on の測定値から Trim S off の測定値を引いた値を図 7 の上図に示す。これを閉軌道のずれ (COD) と見なし、水平方向ステアリング 93 台の位置での補正を SAD の orbit correction により行った。図 7 の中図は補正後の値で、良く補正できていることが分かる。その補正キックの結果を図 7 の下図に示す。

Trim S を使用している 4 か所に相当する場所での電流値から求めた評価値と非線形ディスパージョンから求めた補正キックを比較して良く一致していることが分かった (表 1)。このことより、この方法は六極の誤差磁場を探索するのに有効であることが分かった。また想定していない場所での最大の絶対値の値は 0.018 で、この測定の精度のひとつの評価となる。

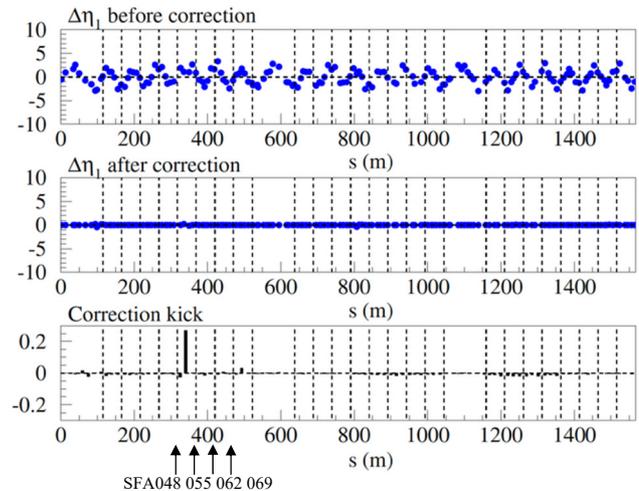


図 7: 非線形 1 次ディスパージョンの Trim S on での測定値と Trim S off での測定値との差(上図)。その差を COD と見なし軌道補正を行い、その結果、補正後の軌道(中図)。そこでの補正キックの分布(下図)。

表 1: Trim S 設定値からの評価と補正キック

$\Delta \Omega_1$	Estimate	Correction
SFA048	+0.291	+0.268
SFA055	−0.035	−0.013
SFA062	−0.027	+0.008
SFA069	+0.030	+0.033

6. 六極誤差磁場の探索

Trim S off の時の非線形ディスパージョン η_1 の測定から SAD を使った式(2)の η_1 の計算値を引いたものを COD

と見なし、軌道補正を行うことにより、六極誤差磁場の探索を行った。非斉次項の計算には誤差を想定しない 3 回対称の設定どおりの状態として計算した。非線形ディスパージョンの測定値を図 8 の上図に示す。これを COD と見なし、水平方向ステアリング 93 台の位置での補正を SAD の orbit correction により行った。図 8 の中図は補正後の値で、良く補正できていることが分かる。その補正キックの結果を図 8 の下図に示す。ここでは 3 回対称ではない誤差磁場を探索することを目的としているため、3 回対称となる部分については差し引いた。ただし、まだ補正キックの分布に 3 回対称の成分は残っている。探索結果としては、六極電磁石の場所で数%程度のばらつきがあることになる。

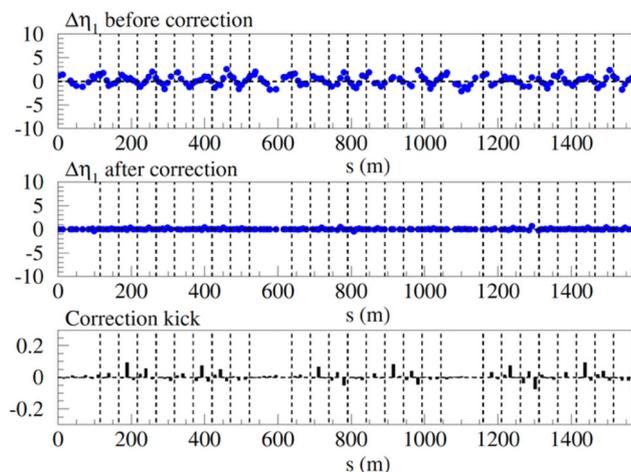


図 8: Trim S off の時の非線形 1 次ディスパージョンの測定値との差(上図)。これを COD と見なし軌道補正を行い、その結果、補正後の軌道(中図)。そこでの補正キックの分布(下図)。

7. まとめ

1 次の非線形ディスパージョン関数は六極磁場の寄与を受けており、その測定から六極誤差磁場が探索できることを確認した。そのために Trim S on と off の状態で非

線形ディスパージョンを測定し、その測定から誤差磁場分布を求め、それが Trim S の設定どおりとなっていることを確認した。また、Trim S off の時の非線形ディスパージョンの測定から、六極誤差磁場の探索を行い、誤差磁場の分布が得られた。この方法については、非斉次項の六極の強さの項にはディスパージョン η_0 がかかっており、 η_0 が 0 のところでは寄与がなくなり、誤差磁場の探索ができないという条件がある。ディスパージョン η_0 が 0 の場所については、この測定のためだけに、オブティクスを変更し、必要に応じてディスパージョンを有限の値とすることを検討する。また今後、測定精度の向上についても検討する。

参考文献

- [1] Y. Sato *et al.*, “J-PARC 主リングにおける FX 830 kW, SX 90 kW の利用運転達成と今後の展望”, Proceedings of the 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), paper FRO604, August 6-8, Tokyo, 2025.
- [2] S. Igarashi *et al.*, “High-power beam operation at J-PARC”, Proc. 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2018), paper TUA2WD02, Daejeon, Korea, Jun. 2018, pp. 147-152.
- [3] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator Technical Design Report for 1.3 MW Operation at J-PARC Main Ring”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021, ptab011. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [4] Y. Tan *et al.*, “Third order resonance correction using new Trim-S system in J-PARC MR”, Proceedings of the 16th International Particle Accelerator Conference, paper WEPB042, Jun. 1-6, Taipei, 2025.
- [5] T. Asami *et al.*, “Precise evaluation of time-varying quadrupole field errors through closed-orbit measurements in the J-PARC main ring”, Physical Review Accelerators and Beams **28**, 012801, 2025. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.28.012801
- [6] K. Soutome *et al.*, “Higher order formula for nonlinear dispersion” Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference, 1998, pp. 924-926.
- [7] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>