

J-PARC MR 1.3MW 化計画のための光学測定による リング全周の誤差四極磁場評価

EVALUATION OF QUADRUPOLE ERROR FIELDS AROUND THE RING BY OPTICS MEASUREMENT FOR J-PARC MR 1.3 MW UPGRADE PLAN

浅見高史^{*,A,B)}, 五十嵐進^{B)}, 佐藤洋一^{B)}, 發知英明^{B)}, 安居孝晃^{B)}, 小関忠^{A,B)}

Takashi Asami^{*,A,B)}, Susumu Igarashi^{B)}, Yoichi Sato^{B)}, Hideaki Hotchi^{B)}, Takaaki Yasui^{B)}, Tadashi Koseki^{A,B)}

^{A)} The University of Tokyo

^{B)} KEK

Abstract

In high intensity proton synchrotron J-PARC main ring (MR), a plan to upgrade the beam intensity from 515 kW to 1.3 MW by increasing the number of protons and shortening the repetition rate of the operation cycle is now in progress. In the beam tuning for the 1.3 MW upgrade, precise evaluation of the effects of quadrupole field errors will be even more important. An important error factor to be considered is the effect of eddy currents on vacuum duct wall, which will increase with higher repetition rates. In fact, it has been shown by 3D magnetic field analysis that the error quadrupole field can be up to 1.5% of the main quadrupole component at 1.36 s repetition rate, depending on the shape and material of the duct. Eddy current effects increase as the repetition rate shortens and can be a limiting factor for future MR beam intensity. In addition, some of the main quadrupole magnet power supply families were split in the hardware upgrade. The resulting betatron resonance has a significant impact on beam loss during injection standby and acceleration, and previous beam tuning has succeeded to suppress the beam loss through its compensation. In this study, we aimed to establish a method to accurately evaluate the strength and time dependence of the error quadrupole field for each of the 216 quadrupole magnets in MR by optics measurement using the central orbit response. Details of the method and results of validation using beam will be described in this presentation.

1. はじめに

陽子を運動エネルギー 3 GeV から 30 GeV へ加速し、ニュートリノ・ハドロン両実験施設へ陽子ビームを供給する大強度陽子シンクロトロン J-PARC 主リング (MR) では、現在 1.3 MW 化計画が進行中である [1]。MR の基本パラメータを Table 1 に示す。1.3MW 化は運転サイクルを従来の 2.48 秒から 1.16 秒へ高繰り返し化する事、及び陽子数を 2.7×10^{14} ppp から 3.3×10^{14} ppp へ増加させる事で行われる。2022 年までに 1.3MW 化に向けた大規模なハードウェアアップグレードが実施され、運転サイクルが従来の 2.48 秒から 1.36 秒へ短縮された。また 2023 年 4 月には 760 kW 運転のデモンストラクションに成功している [2]。

Table 1: Basic Parameters of J-PARC MR

Circumference	1567.5 m
Energy	3-30 GeV
Superperiod	3
Number of quadrupole magnets	216
Number of BPMs	Horizontal 186 Vertical 186

MR の 1.3 MW 化に向けたビーム調整では誤差四極磁場の影響を正しく評価し光学対称性を追求する事が一層重要になる。特に、高繰り返し化によって増加する真空

ダクト壁上の渦電流による四極磁場応答は 1.3MW 化計画における大きな懸念事項の一つである。MR には 216 台の四極電磁石が設置されており、これらの四極電磁石にはビーム軌道や物理口径に応じて形状と材質が異なる 13 種類の真空ダクトが用いられている。さらに四極電磁石における磁極の形状とダクトの種類組み合わせは様々であり、各真空ダクトの配置は必ずしも三回対称となっていない。そのため渦電流効果は加速中の光学対称性を崩す原因となりうる。

また、ハードウェアアップグレードでは高繰り返し化に対応するため主四極電磁石電源が更新され、その際一部の電源ファミリーが三回対称性を満たさない形で分割された。その結果強化されたベータトロン共鳴は入射受け・加速中のビームロスに多大な影響を与え、これまでのビーム調整ではその補正により数 % もの大幅なロス抑制に成功している。

本研究の目的は MR の 1.3 MW 化及びその先の更なるアップグレードに向け、MR の 216 台の四極電磁石それぞれに対する誤差四極磁場の強さと時間変化を光学測定により正確に評価する手法を確立する事である。

2. 誤差四極磁場評価手法 QLCR の提案

本研究では、リング全周に点在する局所的な誤差四極磁場を高精度に求める方法を模索し新手法 QLCR(Quadrupole field analysis by Linearized closed orbit Response) を開発・実証した。その詳細について述べる。

* tasami@post.j-parc.jp

2.1 QLCR について

QLCR はステアリング電磁石を一台または複数台励磁し、その閉軌道 (Closed Orbit Distortion, COD) の応答から誤差四極磁場手法を求める手法である。類似する方法として LOCO [3] や KEKB で開発された光学測定手法 [4] がある (以降合わせて「従来手法」)。これらはステアリング電磁石を一台ずつ励磁しながら COD への応答を求めそれらを説明するような四極磁場と光学パラメータを推定する。この際用いられる四極磁場から閉軌道への応答関数のモデルは非線形である。しかし一般に、非線形モデルを用いた推定で測定値から誤差項を精度良く取り出す事は困難であり、これまで高精度のために様々な努力がなされてきた [5, 6]。一方、QLCR は四極磁場から閉軌道への応答を摂動論により線形化し、測定値から四極磁場に対応する項の射影成分を求める事で誤差の影響を低減する事を目指した手法である。

2.2 QLCR の概要

QLCR は以下のような手順でリングの誤差四極磁場を推定する手法である。以降 $\chi = x, y$ としそれぞれ Horizontal 方向と Vertical 方向の変数とする。

1. 同時に複数台または一台のステアリング電磁石を用いて全周に意図的な COD 応答 $\chi(s, \vec{\theta})$ を作る。 s はビーム位置モニタ (BPM) の位置、 $\vec{\theta}$ は各ステアリング電磁石における設定蹴り角を表す。
2. 1. で用いた全てのステアリング電磁石の設定蹴り角の符号を反対にした上で COD 応答 $\chi(s, -\vec{\theta})$ を測定する。
3. $\Delta\chi_i \equiv [\chi(s_i, \vec{\theta}) - \chi(s_i, -\vec{\theta})]/2$ とし線形方程式 $\Delta\chi \equiv A(\vec{\theta})\Delta\vec{K}$ と書ける事が示される。この線形方程式を誤差磁場項 $\Delta\vec{K}$ について解く。

ただし $A(\vec{\theta})$ は無摂動 COD と各ステアリング電磁石の設定蹴り角のみで決まる応答行列、 $\Delta\vec{K}$ は全周の誤差四極磁場とステアリング電磁石の蹴り角の calibration error を合わせて一つのベクトルにしたものである。応答行列の各要素は誤差磁場入りの Hill 方程式を周期的境界条件のもと摂動的に解き誤差四極磁場から COD への応答を線形化する事で導出出来る。しかし本稿ではビームを用いた試験結果に重点をおき原理に関する詳細を省略する。

2.3 Single kick 法による QLCR の運用

QLCR では各四極磁場位置に十分大きな COD 応答が与えられるような測定条件を作る事が重要である。その方法の一つとして、ベータトロン位相が十分に異なるいくつかのステアリング電磁石を選び、それらを一回の測定につき一台ずつ蹴りながら COD 応答を取得する方法が挙げられる。ここでは「single kick 法」と呼び採用する。

Single kick において Horizontal 方向, Vertical 方向各 M 台ずつのステアリング電磁石を用いるとする。これらを用いた測定は別々に行われ、それぞれの測定において $\Delta x_i = A_{x,i}\Delta\vec{K}$, $\Delta y_i = A_{y,i}\Delta\vec{K}$ ($i = 1, 2, \dots, M$) が成り立つとする。これらは Eq. (1) のようにまとめて

つの線形方程式として書く事が出来る。

$$\begin{aligned} \vec{z} &= A^{(\text{all})}\Delta\vec{K} \\ \vec{z} &\equiv (z_1^T \ z_2^T \ \dots \ z_M^T)^T \\ z_i &\equiv (\Delta x_i^T \ \Delta y_i^T)^T \quad i = 1, 2, \dots, M \\ A^{(\text{all})} &\equiv (A_{x,1}^T \ A_{y,1}^T \ \dots \ A_{x,M}^T \ A_{y,M}^T)^T \end{aligned} \quad (1)$$

ベクトル \vec{z} の要素数が M に比例する事が重要である。また、入射から取り出しまで設定蹴り角を一定に保つ事で線形方程式は入射からの経過時間を t_{pat} として Eq. (2) と書ける。

$$\vec{z}(t_{\text{pat}}) = A^{(\text{all})}\Delta\vec{K}(t_{\text{pat}}) \quad (2)$$

本研究では Eq. (2) を用いる。また、パルスごとに变化しない四極磁場成分の時間発展に着目しそれ以外をランダム誤差によるものとみなす。線形モデルを用いる QLCR は原理的に測定誤差に強い手法である。その議論については Appendix で行う。

3. QLCR の原理検証のためのビーム試験

MR において QLCR の原理検証のためのビーム試験を行った。その詳細について述べる。

3.1 目的と方法

原理検証の目的は主な四極電磁石 216 台の四極磁場強度をフリーパラメータにした上で全周の誤差四極磁場の大きさ・場所・時間変化を正確に推定出来る事を示す事である。以下のような手順で検証を行なった。

1. ベータトロン位相の異なるステアリング電磁石 5 台を正負 0.2 mrad ずつ励磁し、それぞれの COD 応答を取得する。
2. MR の四極電磁石電源 16 台の電流値を変え、各ステアリング電磁石に対する COD 応答を再取得する。
3. 電源電流設定の変更前後の各 COD 測定結果の差分をとり、それを QLCR の入力データとして 216 台個別の四極電磁石強さの変化量を推定して電源における設定値と比較する。電源電流値の設定誤差は主四極電磁石強度相当の電流値に対して 0.01% 以下である。

3.2 ビーム条件

本原理検証試験は高線り返し化後の MR で行われた。ビームは 0.65 秒かけて 3 GeV から 30 GeV まで加速される (以降「0.65 秒加速」)。今回はビーム光学の時間変化が大きい加速初期までの誤差四極磁場について考えた。試験は 1×10^{12} ppb (pulse per bunch)、2 バンチの低強度条件で行われ、設定チューンは $(\nu_x, \nu_y) = (21.35, 21.43)$ である。また、事前に従来手法を用いて入射領域と加速中のベータトロン関数を理想値との相対誤差の RMS 値が 3% 程度以下になるまで合わせ込んだ。

3.3 ランダム誤差の扱い

各ステアリング電磁石 i に対する $\Delta\chi_i(t_{\text{pat}})$ は 1 パルスで取得出来るが、多数のパルスについて取得し平均化

すればランダム誤差の影響を抑える事が出来る。本ビーム試験では各条件に対し N_{pulse} パルスの $\Delta\chi_i(t_{\text{pat}})$ を平均化する。 N_{pulse} の具体的な値は随時明示する。また、偏向電磁石電源の電流リップルや運動量の揺れ $\Delta p/p$ による閉軌道の揺れはランダム誤差要因になるため、パルスごとに評価し予め測定結果から除去する。

3.4 結果

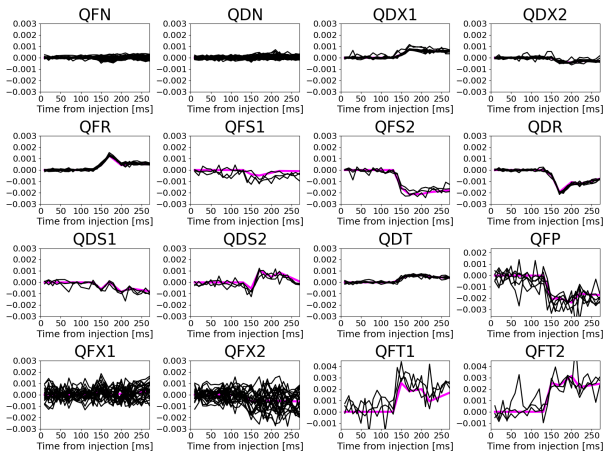


Figure 1: The results of examination of QLCR using beam. Each figure corresponds to each of the power supply families in MR. Black lines correspond to each magnets, and magenta lines correspond to the set values. Horizontal axis is time from injection in [ms] and vertical axis is K value in [/m]. Width of vertical range is 0.006 /m for each figure.

全周の誤差四極磁場の時間変化を $N_{\text{pulse}} = 100$ についてプロットしたものを Fig. 1 に示す。縦軸は四極電磁石における GL 積を $B\rho$ で割ったものであり以降「K 値」と呼ぶ。Figure 1 中の全ての図で縦軸の幅は大きさ 0.006 /m にスケールされており、横軸は入射からの経過時間である。ここで「推定精度」を $\text{RMS}[(K_{\text{QLCR}} - K_{\text{set}})/(K_{\text{main}})]$ と定義する。 K_{QLCR} は QLCR による推定値、 K_{set} は電流設定値からの計算値及び K_{main} は主四極電磁石強度である。RMS は全時刻、216 台全ての四極電磁石の推定値についてとる。本試験における QLCR の推定精度は $N_{\text{pulse}} = 10, 20, 50, 100$ についてそれぞれ 0.79%、0.61%、0.45%、0.32% であった。

3.5 考察

QLCR は $N_{\text{pulse}} = 100$ で全周の誤差四極磁場を 0.3% 程度の精度で推定出来る。しかし、Fig. 1 にを見るとファミリー QFX、QFT、QFP と名前の付く Family では推定値のばらつきが大きい事がわかる。ただし QFX1 と QFX2、QFT1 と QFT2 は分割ファミリーである。

この現象を理解するため、Fig. 2 に主四極電磁石の配列をリングの一部から抜粋したものを示す。Figure 2 の進行方向の厚さや配置の比は実際のリングと同等である。QFX 同士及び QFP と QFT は全周に渡って Fig. 2 のように隣合ったペアを成して並ぶ。これらは収束方向も同じであり相関が大きい。定性的には、実際の誤差磁

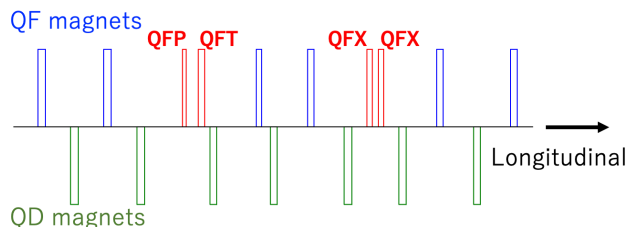


Figure 2: In MR, each pair of two QFX magnets and each pair of one QFP magnet and one QFT magnet are adjacent to each other in close location even though their focusing directions are same.

場が共にゼロであっても、それぞれの電磁石に ΔK と $-\Delta K$ のように打ち消し合う誤差磁場がある解も測定値を説明し得る。この事は Fig. 3 の実測値からも示される。Figure 3 はある QFP と QFT のペア一つとその平均値の時間変化の推定結果である。単に平均するだけで速い成分が消える。これはビームへの応答が非常に近い事を示している。

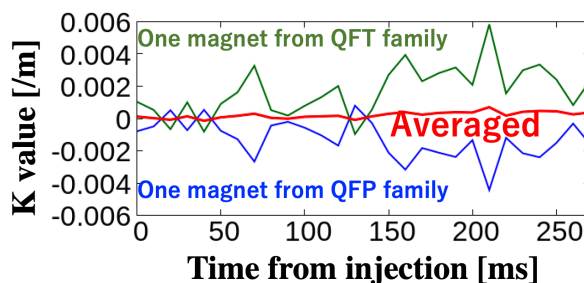


Figure 3: Time variation of one of the QFP-QFT pair are shown together with their mean as an example. The large variance can be eliminated by averaging.

4. QLCR のさらなる高精度化

4.1 新たなモデル

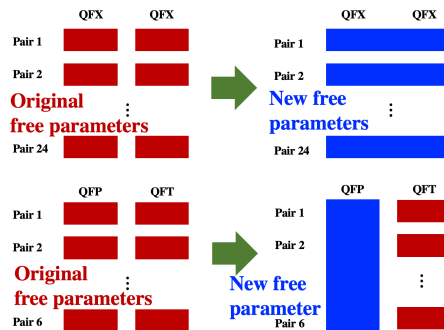


Figure 4: New model to take measures against large variance seen in QFP, QFT and QFX magnets.

QFP,QFT,QFX における推定値のばらつきが大きいのは、ほぼ同じ応答を与える 2 つの電磁石を異なるフリーパラメータとして扱っているためである。その対処方法

の一つはペア内の平均値を新たなフリーパラメータとする事である。例えば、MR ではペアをなす電磁石に対して同じ種類のダクトが用いられており渦電流影響の評価の点では問題ない。しかし、QFP と QFT 電磁石は異なる電源で駆動されている。電源の電流値は調整可能であり、設定によっては片方みのファミリーの全ての電磁石強度を同じ収束方向に揃って意図的に非常に大きくする事が出来る。また、QFP と QFT のペアに対する単純な平均化は QFP と QFT のファミリーとしての違いに関する情報を落とす。そこで新たなモデルを Fig. 4 のように設計した。以降「高精度化モデル」と呼ぶ。高精度化モデルでは、QFX 同士はペアの中で平均化するが、QFP と QFT のペアについては QFP のファミリー内平均を新たなフリーパラメータとして QFT は変更しない。この場合、QFP に個体差があれば同じ大きさの QFT の個体差として検出される。正当性の実証は次節で行う。

4.2 高精度化モデルに対する検証実験

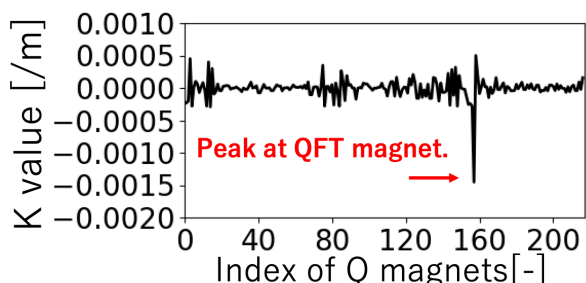


Figure 5: Intentional quadrupole field is given at one of the QFP magnet, and the error field is correctly observed at QFT location which is the other magnet of the pair.

高精度化モデルを用いた原理検証のため、設定チューン $(\nu_x, \nu_y) = (21.35, 21.43)$ の条件下で MR の入射領域を用いたビーム試験を行なった。試験は QFP 一台に備え付けられた補正コイルを用いて K 値 $-0.0014 / m$ 程度の意図的な誤差磁場を与えた上、その位置と強さを QLCR を用いて同定する問題を考える事による。QLCR の入力としては、補正コイルの電流を ON/OFF にしたそれぞれの状態で COD 測定を行いその差分を用いた。また、ステアリング電磁石は 6 台使用し蹴り角 $\pm 0.2 \text{ mrad}$ で検証した。試験では $1 \times 10^{12} \text{ ppb}$ 強度のビームを 1 バンチ入射しビームエネルギーを 3 GeV で一定にした状態で 220 ms 周回させ、1 ms おきの COD を測定した。なお、入射領域では電源電流値やエネルギーが変化しないよう調整される。そのため本試験ではパルス平均を取る代わりに 200 ms 間の時間方向の平均を取る事でランダム誤差の影響を落とした。QLCR による全周の誤差四極磁場の測定結果を Fig. 5 に示す。ペアとなる QFT 位置に正しい大きさのピークが表れている。

4.3 高精度化モデルによる全周四極磁場の時間変化の測定

「2. QLCR の原理検証のためのビーム試験」と同じ問題設定を考える。全周の誤差四極磁場の時間変化を $N_{\text{pulse}} = 100$ についてプロットしたものを Fig. 6 とす

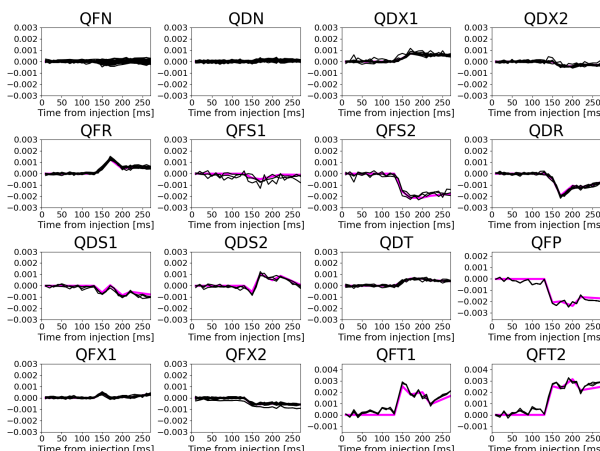


Figure 6: The examination of high-accuracy QLCR using beam under same condition as Fig. 1. The large variance seen in Fig. 1 were successfully eliminated. Horizontal axis is time from injection in [ms] and vertical axis is K value in [1/m]. Width of vertical range is 0.006 /m for each figure.

る。高精度化モデルでは QFX, QFP, QFT のばらつきが消えている事が分かる。また、 $N_{\text{pulse}} = 10, 20, 50, 100$ のときの推定精度はそれぞれ 0.21%, 0.18%, 0.13%, 0.10% である。明らかに通常モデルに比べ高精度となっていると同時に、0.1% 精度での誤差四極磁場測定が実測ベースで実証された。

5. 全周の誤差四極磁場の時間変化の調査

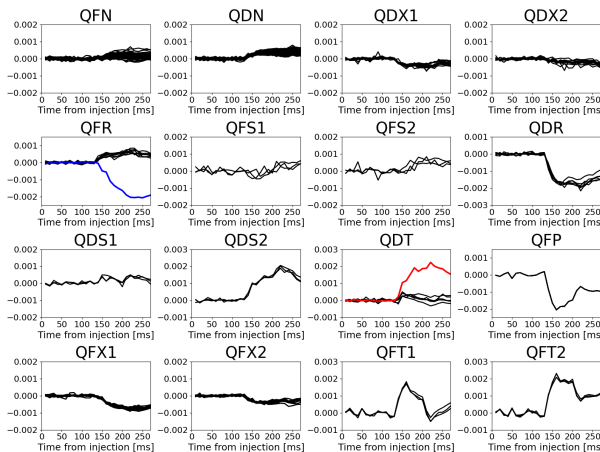


Figure 7: The time variation of error quadrupole field evaluated by high-accuracy QLCR. Horizontal axis is time from injection in [ms] and vertical axis is K value in [1/m]. Width of vertical range is 0.004 /m for each figure.

ダクトに流れる渦電流の磁場応答による光学対称性の崩れは当初より懸念事項であった。そこで QLCR を実用し、高繰り返し条件における全周の誤差四極磁場の時間発展の調査を試みた。調査は $1 \times 10^{12} \text{ ppb}$ 強度のビームを 2 バンチ入射し、single kick 法における

ステアリング電磁石 6 台、 $N_{\text{pulse}} = 80$ 、設定チューン $(\nu_x, \nu_y) = (21.35, 21.43)$ 、0.65 秒加速の条件下で行われた。また、誤差磁場の時間変化のみを見るため、入射待受領域における各条件下での COD 測定値の時間平均を各パターン時刻で測定された COD から予め除去した。QLCR で推定された誤差四極磁場の全周の時間変化を Fig. 7 に示す。Figure 7 中の全ての図で縦軸の幅は大きさ 0.004 /m にスケールされている。Figure 7 において、赤線と青線で示した 2 台の電磁石が他の電磁石と明らかに異なる時間変化を示す事が分かる。これらの箇所には

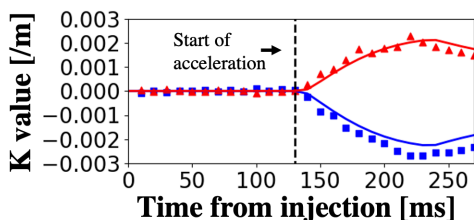


Figure 8: The comparison between 3D EM simulation result and QLCR. Dots correspond to QLCR and lines correspond to EM simulation. They agree well.

ビーム取り出し軌道を確保するための特殊な形状をしたダクトが用いられており、この種類のダクトが設置されているのはこの 2 台のみである。よって渦電流効果が疑われる。そこで CST [7] を用いて誤差四極成分の過渡応答を求める電磁場シミュレーションを行ない、QLCR による推定結果と比較した。結果を Fig. 8 に示す。QLCR については各特殊ダクト位置における推定結果から、ファミリーの他の電磁石の推定値の平均値を差し引いている。QLCR と電磁場解析の結果はよく一致し、この応答は渦電流に由来するものであると考えられる。

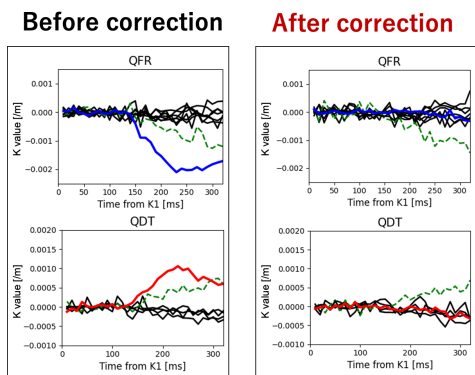


Figure 9: Correction of eddy effects using trim coils.

MR の遅い取り出し運転のための、設定チューン $(\nu_x, \nu_y) = (22.308, 20.80)$ 及び 1.4 秒加速の条件下で行われた QLCR を用いた調査でも同様の渦電流応答が見られた。そこで QLCR による測定結果と特殊ダクト箇所の四極電磁石に備え付けられた補正コイルを用いて渦電流効果の補正を行なった。補正前後の QLCR による測定結果は Fig. 9 のようになり、補正に成功した。緑色の波線は遅い取り出し運転時のみ現れ、現段階では遅い取り出し用のセブタム電磁石由来であると考えられて

いる。

6. まとめと展望

本研究ではリング全周の誤差四極磁場を 0.1% 精度で推定する手法 QLCR を開発し実証した。また、QLCR を用いる事で MR におけるダクトに流れる渦電流の効果の同定と補正に成功した。そして本研究により更なる高繰り返し条件下でも渦電流効果を検出し補正する事が可能となった。以降は本手法の適用範囲の拡大を目指す。

謝辞

本研究の遂行において、KEK の山本昇氏に多くの助言や貴重な意見を頂きました。深く感謝いたします。

APPENDIX: 線形化による測定誤差影響の抑制

QLCR における応答行列 A を $A = \sum_{i=1}^r \sigma_i \vec{u}_i \vec{v}_i^T$ のように特異値分解する。ここで $\vec{u}_i \cdot \vec{u}_j = \delta_{ij}$ かつ $\vec{v}_i \cdot \vec{v}_j = \delta_{ij}$ である。 r は行列 A のランクであり、 σ_i は A の特異値である。線形方程式 $\vec{z} = A\Delta\vec{K}$ の解は $\Delta\vec{K} = \sum_i \vec{v}_i \left(\frac{\vec{z} \cdot \vec{u}_i}{\sigma_i} \right)$ のように書かれる。よって $\vec{z} \cdot \vec{u}_i$ から測定誤差の影響を可能な限り除去する事が重要である。ところで \vec{z} は、 $\vec{\epsilon}$ を測定誤差項として $\vec{z} = \alpha_1 \vec{u}_1 + \alpha_2 \vec{u}_2 + \dots + \alpha_r \vec{u}_r + \vec{\epsilon}$ のように展開出来る。 $\vec{u}_i \cdot \vec{u}_j = \delta_{ij}$ より、測定誤差 $\vec{\epsilon}$ の影響は推定値に $\vec{z} \cdot \vec{u}_i = \alpha_i + \vec{u}_i \cdot \vec{\epsilon}$ の形で入ってくる。しかし \vec{z} の要素数が多ければ、ベクトル \vec{u}_i と $\vec{\epsilon}$ の向きが偶然一致する可能性が小さくなり $\vec{u}_i \cdot \vec{\epsilon} \approx 0$ が成立する。QLCR はこの原理で誤差の影響の抑制し、真の応答のみを拾う事を試みた手法である。QLCR では用いるステアリング電磁石の台数や組み合わせを増やす事で \vec{z} の要素数を大きく出来る。

参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, "Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC main ring", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2021, 033G01 (2021).
- [2] T. Yasui, "J-PARC operation with the high repetition rate upgrade", in *emphProc. IPAC'23 Venezia*, 05 2023, pp. 1276-1280. doi:10.18429/jacow-ipac2023-tuxg1
- [3] J. Safranek, "Experimental determination of storage ring optics using orbit response measurements", *Nucl. Instr. and Meth. Accel. in Phys. Res. A*, 388(1997) 27-36.
- [4] A. Morita *et al.*, "Measurement and correction of on- and off-momentum beta functions at KEKB", *Phys. Rev. Accel. Beams* 10, 072801(2007).
- [5] X. Huang, J. Safranek, and G. Portmann, "LOCO with constraints and improved fitting technique", *ICFA Newsl.* 44, 60 (2007).
- [6] X. Huang and X. Yang, "Correction of storage ring optics with an improved closed-orbit modulation method", *Phys. Rev. Accel. Beams* 26, 052802(2023).
- [7] CST Studio Suite, https://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php