J-PARC 主リングのリップル補正磁石磁場と遅い取り出しスピル間の伝達関数検討

A CONSIDERATION ON THE TRANSFER FUNCTION BETWEEN RQ FIELD AND SLOW EXTRACTION SPILL IN THE MAIN RING OF J-PARC

岡村勝也#, A),B), 武藤亮太郎 A),B), 木村琢郎 A),B), 新垣良次 A),B), 村杉茂 A),B), 白壁義久 A),B), 柳岡栄一 A),B), 冨澤正人 A),B)
Katsuya Okamura#, A), Ryotaro Muto A), Takuro Kimura B), Yoshitsugu Arakaki B), Shigeru Murasugi B), Yoshihisa Shirakabe B), Eiichi Yanaoka B), Masahito Tomizawa B)
A) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
B) J-PARC Center

Abstract

Increasing the duty of beam spill is one of the important issues in the slow extraction system. In the Main Ring of J-PARC, the spill feedback system combined with EQ and RQ magnet is used to smooth the spill. In this study, frequency domain characteristics between the current of RQ magnet and the beam spill was investigated. As a result, the spill intensity gain increases with the frequency, whereas phase shift decreases with the frequency. Also the transfer function was derived, which is expected to be useful to obtain the best control parameter of the spill feedback system.

1. はじめに

J-PARC 主リングの遅い取り出しシステムでは 3 次共鳴を利用した遅い取り出し (SX)によって、素粒子・原子核実験施設へ陽子ビームを供給する[1,2]。取り出しビームは理想的には平坦な台形波であるべきだが、現実的には主として主電磁石のリップルに起因するチューンの時間変動によって取り出しビーム（スピル）は大きな時間構造を持つ。これを改善するために取り出されたビーム強度信号をもとにフィードバックを行う Q 電磁石（RQ）が設置され DSP を用いて制御されている[3]。DSP は観測されたスピルと目標値を比較し、PID 制御ブロックを介して RQ 電磁石の電流制御を行う。これまで PID の制御定数は実験的に最適化されてきたが、もしも RQ 電磁石の電流とスピルの間の伝達関数が知られたなら机上の計算からも最適な制御定数を得られる可能性がある。今回は RQ 電磁石をサイン波で駆動し、スピルの振幅、位相特性について検討した結果について報告する。

2. スピルフィードバックシステム

J-PARC 主リングの遅い取り出しシステムでは取り出されるビームの時間構造（ビームスピル）を平坦にするためにビームスピル制御用四極電磁石（EQ 電磁石）とリップル補正用四極電磁石（RQ 電磁石）の 2 種類の磁石の磁場を取り出されたビームスピルの大きさをフィードバックすることで制御している。Figure 1 にスピルフィードバックシステムの構成を示す。ビームラインに設けられた真空膜をビームが通過する際に発生する二次粒子によってビームライン近くに設置されたプラスチックシンチレータを発光させ、さらに光電子増倍管で電気信号に変換することでフィードバックのソース信号を得ている。この信号は電源棟の制御室に設置された DSP（Digital Signal Processor）を中心とする制御装置で処理された後、EQ 電磁石電源、RQ 電磁石電源の制御入力信号となる Fig. 2 に制御プログラムのブロックダイアグラムを示す。

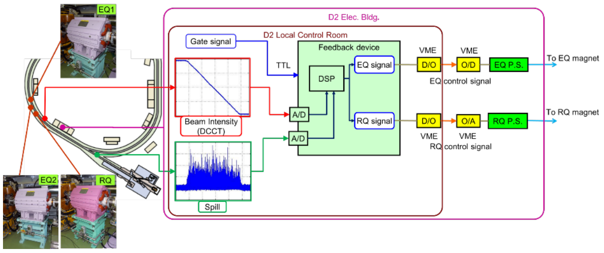

Figure 1: Schematic of the spill feedback system.

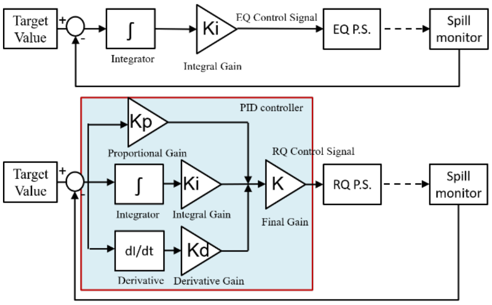

Figure 2: A block diagram of the feedback program.

#katsuya.okamura@j-parc.jp

ここで EQ 電磁石はチューンが共鳴に近づく速度を制御することでビーム取り出しの大きな構造を制御し、RQ 電磁石は主電磁石電源の電流に含まれるリップル成分に起因するビーム取り出しの時間構造を打ち消して平坦化することを目的としている。そこで EQ の制御では誤差を積分して電流指令値とする制御制御を用い、RQ の制御では比例、積分、微分を併用する PID 制御を採用している。

Table 1 に EQ 電磁石と RQ 電磁石の諸元を示す。EQ 電磁石はスピルの大きな構造を制御するためにターン数を多くして磁場勾配を高くとり、RQ 電磁石は周波数特性を重視してターン数を減らした設計としている。

Table 1: Design Parameters of EQ and RQ Magnets

項目	EQ	RQ
ボア径 (mm)	80	80
磁極長 (m)	0.62	0.62
ターン数	22	6
磁場勾配 (T/m)	2.6 @301 A	0.94 @400 A
インダクタンス (mH)	8.8	0.65
周波数帯域 (Hz)	dc ~ 1k	40 ~ 10k
ΔTune (Horizontal) (A^{-1})	1.06E-4	1.43E-5

Figure 3 に周回ビームの電流、EQ 電流、RQ 電流、スピルの測定例を示す。

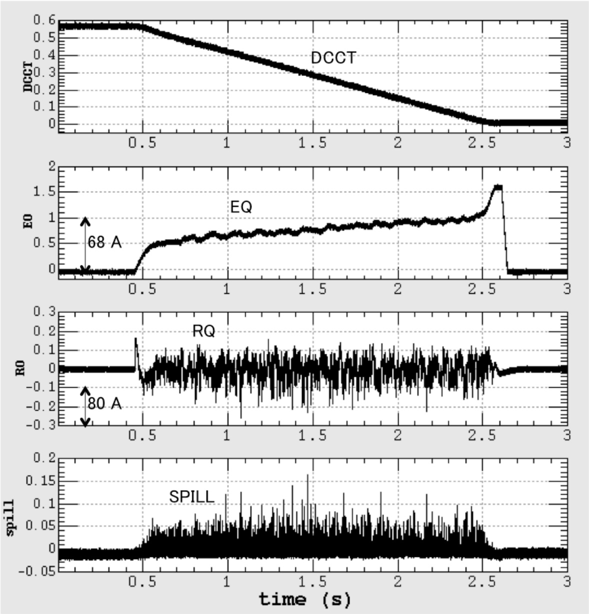

Figure 3: DCCT, EQ magnet, RQ magnet, and SPILL waveforms in a slow extraction operation.

Figure 4 に RQ 電磁石電源の振幅、位相周波数特性を示す。振幅については 5 Hz-10 kHz の範囲において-3dB,+2dB の特性が得られているが、位相については変化が大きく、10 kHz においては 180 度の位相遅れが生じている。

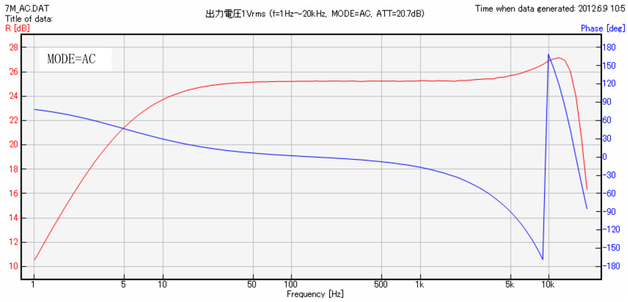

Figure 4: Frequency response of the RQ power supply.

3. 伝達特性測定

3.1 測定方法

遅い取り出しビーム試験において、スピルフィードバックシステムの RQ 制御部分のフィードバックを取り外し、正弦波発振プログラムに置き換えることで RQ 電磁石に正弦波通電を行った。スピル信号と RQ 電磁石電源のモニター信号を比較することで両者の関係を調べた。なお、ビーム取り出しを安定に行うために EQ 電磁石電源については通常通りのフィードバック通電を行った。

3.2 測定結果

測定結果の一例を Fig. 5 に示す。正弦波の周波数は 1 kHz、RQ 電流の大きさは 20 A_{P-P} である。時間領域の波形では RQ 電流とスピルの相関が明確でないため、EQ 電流、RQ 電流、スピルの高速フーリエ変換(FFT)をおこなってみた。その結果を Fig. 6 に示す。1 kHz にピークが現れており、両者の比率から振幅の伝達率を求めることができる。さらに FFT を用いることにより位相差も求めることができる。周波数を 20 Hz から 2 kHz まで変化させて振幅伝達率と位相差をプロットした結果を Fig. 7 に示す。振幅伝達率特性には RQ 電流と EQ 電流の実効的な比率も示している。ここで実効的なという意味は Table 1 に示したように EQ と RQ では単位電流あたりのチューンに与える影響力に差があるためにそれを補正したという意味である。

Figure7 に示したように振幅伝達特性は 700 Hz 程度までは周波数と共に上昇し、その後急激に小さくなる。一方、位相については 100 Hz 程度までは進み 30 度で一定であり、それ以上では段々と遅れていく。ここで EQ の影響についても注意が必要である。EQ についてはフィードバックが生きているので、EQ は RQ の影響を打ち消すように働くためである。Figure 7 から分かるように 150 Hz 以下では EQ の影響が大きいので、RQ の影響はかなり打ち消されているとみられる。

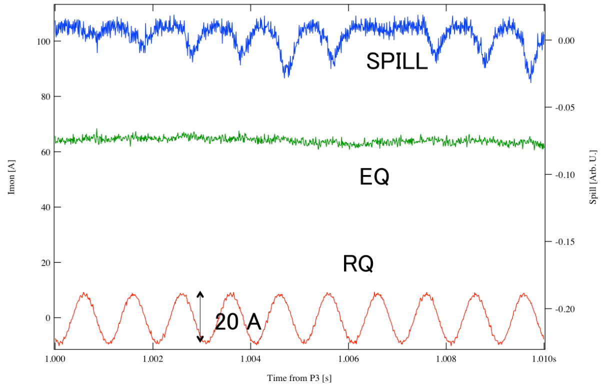

Figure 5: Typical waveform at 1 kHz.

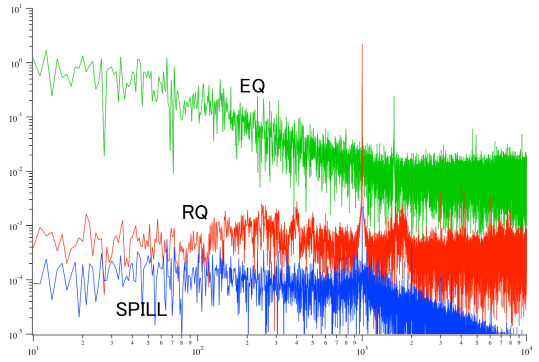

Figure 6: FFT results correspond to Fig. 5.

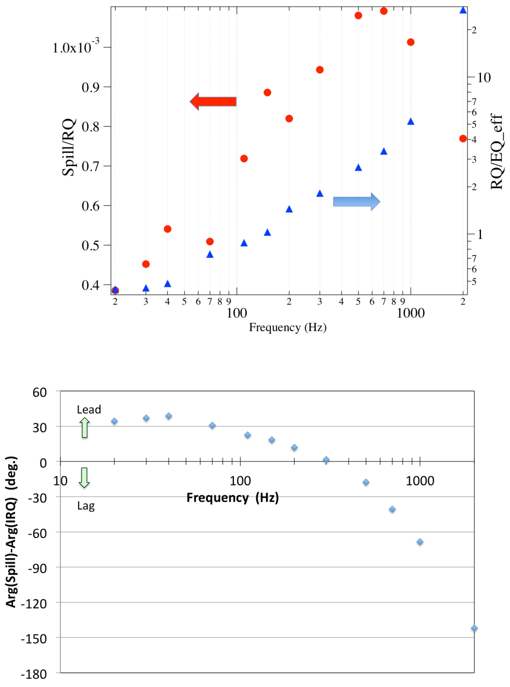

Figure 7: Amplitude transfer (upper) and phase shift (lower).

3.3 取り出しシミュレーションとの比較

フィードバック Q 磁石によるビームスピルへの応答は、3 次共鳴のセパラトリックス周辺に滞在したビームが、セパラトリックスの取り出しアームに沿って静電セプタムの電場領域に到達するまでの時間に依存する。Figure 8 は 48 台で構成される QFX に対する振幅比 1×10^{-3}、周波数 3.2 kHz の変調波形とスピルの関係を示す一例である。SAD コードを使い遅い取り出し過程のトラッキングシミュレーションにより求めた。横軸はターン数で 1 ターンは実際の 5.23 μsec. に対応する。水平方向チューンは 22.29 から 22.33 にむけて変化させ約 100 ms かけて取り出す設定とした。この図から Q 電磁石のリップル立ち上がりから 35 ターン（183 μs）程度遅れてスピルが応答していることがわかる。Figure 7 において 2 kHz での位相遅れは 140 度（194 μs）であり、整合する。

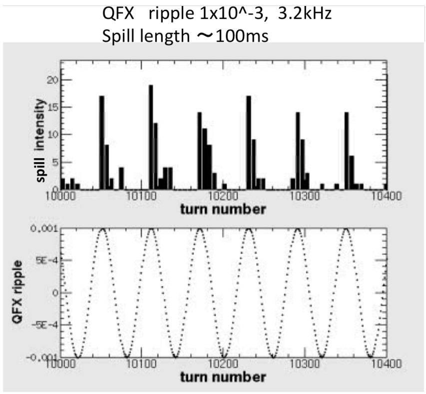

Figure 8: Beam extraction simulation.

3.4 伝達関数の検討

前節で述べたように、測定結果には EQ の影響が含まれる。そこで EQ 電磁石電源も組み入れた形で回路シミュレーションを行うことで RQ−スピル間の伝達関数の推計を試みた。シミュレーション回路の例を Fig. 9 に示す。

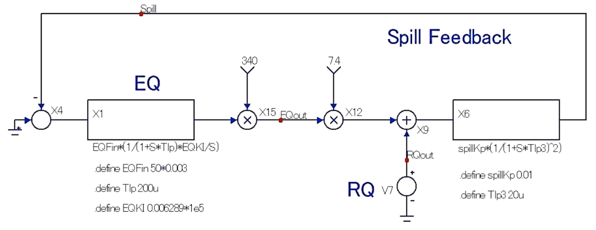

Figure 9: Simulation circuit for transfer function.

Figure 9 において RQ 電磁石電源は単純な信号源で置き換えられている。伝達関数 H(s)を

$$H(s) = 0.01 * (1/(1 + s * T_1)^2) \quad (1)$$

とした時のシミュレーション結果を Fig. 10 に示

す。但し、T_1=2E-5 とした。シミュレーションの方が全体に位相が進んでいるという違いはあるものの全体としてはよく合っている。位相の進みについては時間遅れ要素を加えることにより、改善することが期待される。

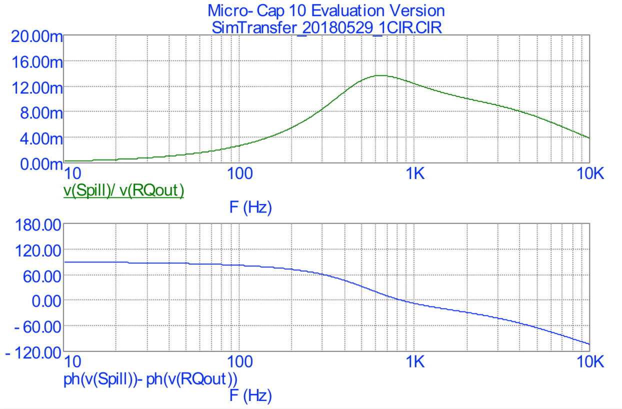

Figure 10: Simulation result.

4. まとめ

- J－PARC 主リングの遅い取り出しシステムにおいてリップル補正電磁石（RQ 電磁石）を正弦波駆動することにより取り出しスピルの振幅、位相に与える影響を調査した。
- 振幅伝達特性は 700 Hz 程度までは周波数と共に上昇し、その後急激に小さくなる特性であった。一方、位相については 100 Hz 程度までは進み 30 度で一定であり、それ以上では段々と遅れていく特性であった。
- 上記の位相遅れの特性はビーム取り出しシミュレーションと整合性のある結果となった。
- 今回の測定結果をもとに RQ 電磁石－ビームスピルの伝達関数を推定した。
- この伝達関数をもとにスピルフィードバックシステムの最適化が期待される。

参考文献

[1] M. Tomizawa *et al.*, “Present status and future plans of J-PARC slow extraction”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 1-3, 2016, pp. 70-74.
[2] R. Muto *et al.*, “Beam commissioning of slow extraction at J-PARC Main Ring”, in this conference, WEP011.
[3] T. Kimura *et al.*, “Improvement of the spill feedback control system of J-PARC slow extraction”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, 2014, pp. 1279–1281.