

# HIGH PRECISION TRACKING CONTROL FOR RAPID CYCLING MAGNETS

Yasuhiro Watanabe<sup>#,A)</sup>, Norio Tani<sup>A)</sup>, Toshikazu Adachi<sup>B)</sup>, Hirohiko Someya<sup>B)</sup>, Yoshiro Irie<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

Rapid cycling magnets are excited using a resonant circuit and the current waveform is a DC-biased sinusoidal pattern. However, non-linear characteristic of the magnet produces harmonic components in the magnetic field. The harmonic components are different for each type of magnet depending upon the degree of saturation, and it causes a tracking error. This paper proposes harmonic current control in the resonant circuit to reduce harmonic components in the magnetic field.

## 速い繰り返しの電磁石における高精度トラッキング制御

### 1. はじめに

J-PARC 3-GeV 陽子シンクロトロンは、繰り返し周波数が 25 Hz という速い繰り返しの 181-MeV から 3-GeV まで加速するラピッドサイクルシンクロトロン(RCS)である。J-PARC RCS の主電磁石は 24 台の偏向電磁石とポア径及び鉄心長が異なる 4 種類、合計 60 台の四極電磁石から構成されており<sup>[1]</sup>、これらを励磁するための電源は、偏向電磁石は 1 ファミリ、四極電磁石は 7 ファミリで構成されている。各電磁石ファミリは独立した共振回路により励磁され、電流パターンは図 1 に示すように、直流バイアスされた 25 Hz の正弦波交流波形である。しかし、電磁石は飽和特性を持つため、電流波形は正弦波であっても磁場波形は高調波成分を含んだ歪んだ波形となる。電流と磁場との関係は電磁石の種類ごとに異なるため、磁場の高調波成分はトラッキングエラーの要因となる。また、25 Hz という速い繰り返しの励磁されることから、渦電流が磁場に与える影響を考慮する必要がある。

本論文では、速い繰り返しの電磁石における高精度トラッキング方法を提案する。この方法は、共振回路において積極的に高調波電流を制御することにより<sup>[2]</sup>、磁場の高調波成分を低減する。これにより、加速中における偏向磁場と四極磁場の比率を一定に保つことが容易となり、高調波磁場に起因するトラッキングエラーを低減することが可能になる。これを実現するためには、あらかじめ電磁石の電流に対する磁場の関係を精度良く測定する必要がある。そこで、偏向電磁石はロングフリップコイル、四極電磁石ではハーモニックコイルを用いた動磁場測定システムを用いて、各電磁石について高調波磁場が 0.01% 以下となるような高調波電流を求めた。さらに、速い繰り返しのに伴い生じる渦電流の影響である磁場の遅れを測定した。

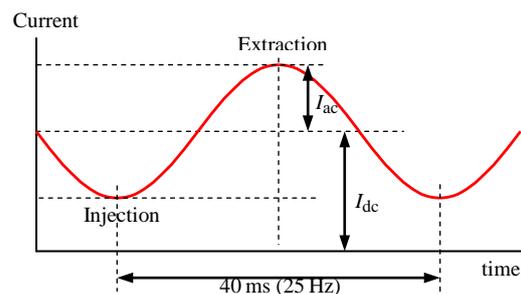


図 1 : 偏向・四極電磁石の電流波形

### 2. 電磁石の動磁場測定

直流又は渦電流効果が無視できるような繰り返しの遅い電磁石の場合、直流電流で磁場測定して電流と磁場との関係を関数化し、要求される磁場パターンからその関数を用いて電流パターンを作成すればよい。しかし、速い繰り返しの電磁石の場合、渦電流の効果を考慮しなければならず、実際に運用される電流パターンを用いて動磁場測定を行う必要がある。

電磁石の動磁場測定は、加速器トンネルへの据付前に専用の試験電源を用いて行った<sup>[3]</sup>。偏向電磁石の磁場測定はロングフリップコイルを用いてギャップ中心の積分磁場を、四極電磁石の磁場測定にはハーモニックコイル<sup>[4]</sup>を用いて積分磁場勾配を求めた。

試験電源のリファレンス電流パターンには直流及び 25 Hz の基本波に加えて高調波振幅及び位相を微調整しながら磁場測定を繰り返し、高調波磁場が基本波磁場に対して 0.01% 以下となるような高調波電流、及び位相を求めた。実際にリファレンス電流パターンで制御している高調波電流は 2 次(50 Hz)から

<sup>#</sup> yasuihiro.watanabe@j-parc.jp

4次(100 Hz)までであり、それ以上の次数は測定結果より高調波磁場値が0.01%以下であることが分かっているため制御していない。

図2に偏向電磁石、図3に四極電磁石の内最も数の多いQMAの最大定格における積分磁場と電磁石電流の測定結果を示す。それぞれの電流波形には高調波が重畳しているが、きわめて僅かであるため時間領域ではわかりにくい。そこで、表1、2に図2、3の電流波形及び磁場波形を周波数解析した結果を10次(250 Hz)まで示す。磁場の高調波成分はすべて0.01%以下となっていることが分かる。偏向電磁石の高調波電流で最も大きなものは二次高調波で13.53Aと基本波振幅1127.73Aに対して1.2%である。基本波電流位相(-3.13744)に対する基本波磁場位相(-3.14072)の差は0.00328 rad (21 us)である。これは、渦電流の影響により基本波磁場位相が基本波電流位相に対して遅れていることを示している。

### 3. 四極電磁石の励磁特性

偏向電磁石の場合、入射と出射のエネルギーが決まれば、磁場の設定値を大きく変化させることはないが、四極電磁石の場合、オプティクス調整のため磁場の設定値を大きく変化させる必要がある。J-PARC RCSの場合、四極電磁石に要求される可変範囲はノミナル値に対し±15%である。そのため、この可変範囲内において磁場に対する電流の関係を測定する必要がある。ここでは、可変範囲の内3点について、高調波磁場振幅が0.01%以下となるように高調波電流を調整した結果得られた電流と磁場波形を周波数解析して、直流成分、基本波成分及び高調波成分ごとに比較する。

図4、5に四極電磁石QMAについて直流及び基本波振幅における磁場-電流特性を示す。ここから所要磁場に対する電流値を計算することができる。

図6に四極電磁石4種類(QMA、QMB、QMC、QMD)について、基本波電流に対する基本波磁場の位相遅れを示す。基本波電流振幅が増加するに従い磁場の遅れが大きくなることが分かる。鉄心長が短い電磁石ほど磁場の遅れが大きくなっているが、渦電流は主に電磁石端部で発生することから、鉄心長が短いほど積分磁場に含まれる渦電流の効果が大きくなるためである。

図7、8に四極電磁石QMAの基本波電流振幅に対する高調波電流、磁場特性(50 Hz、75 Hz、100 Hz)を示す。基本波振幅が大きくなるほど高調波磁場を低減するために必要な高調波振幅が大きくなっている。これは、電流値が大きくなるほど高調波磁場の発生要因である飽和の影響が大きくなるためである。

### 4. まとめ

本論文では、速い繰り返しの電磁石における高精度トラッキング方法を検討した。共振電源に高調波電流制御を加えることにより磁場の高調波成分を基本波に対して0.01%以下に抑制できることを示した。また、基本波電流に対する基本波磁場の遅れを測定

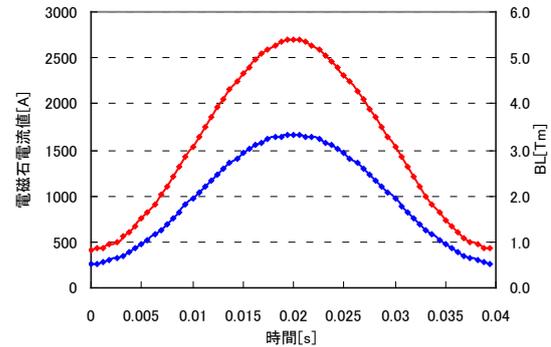


図2：偏向電磁石の電流(赤)、磁場(青) (高調波磁場成分の振幅を0.01%以下にした場合)

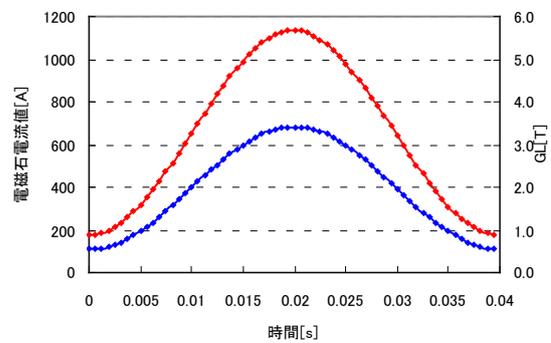


図3：四極電磁石QMAの電流(赤)、磁場(青) (高調波磁場成分の振幅を0.01%以下にした場合)

表1：偏向電磁石の磁場、電流のFFT結果

n	周波数 [Hz]	電磁石電流			積分磁場(BL)		
		振幅[A]	基本波比率[%]	位相[rad]	振幅[Tm]	基本波比率[%]	位相[rad]
0	0	1539.08			1.928670		
1	25	1127.73	100	-3.13744	1.398504	100	-3.14072
2	50	13.53	1.199	0.09095	0.000116	0.008	-1.54386
3	75	8.91	0.790	-3.03904	0.000116	0.008	-2.87720
4	100	5.26	0.467	0.07116	0.000134	0.010	-0.02223
5	125	3.02	0.268	-3.11471	0.000129	0.009	-3.14073
6	150	1.52	0.135	-0.02309	0.000127	0.009	0.10094
7	175	0.71	0.063	2.98192	0.000086	0.006	-3.12423
8	200	0.31	0.027	-0.42228	0.000054	0.004	-0.30090
9	225	0.12	0.011	2.33724	0.000013	0.001	2.71567
10	250	0.07	0.007	-1.94404	0.000018	0.001	-1.19989

表2：四極電磁石QMAの磁場、電流のFFT結果

n	周波数 [Hz]	電磁石電流			積分磁場(QL)		
		振幅[A]	基本波比率[%]	位相[rad]	振幅[T]	基本波比率[%]	位相[rad]
0	0	650.12			1.973238		
1	25	477.34	100	-3.12968	1.433263	100	-3.13625
2	50	4.24	0.889	0.21465	0.000146	0.010	1.27147
3	75	2.36	0.495	-2.89496	0.000112	0.008	-0.77714
4	100	1.18	0.247	0.17722	0.000147	0.010	0.43181
5	125	0.58	0.122	-3.00474	0.000131	0.009	-2.56594
6	150	0.21	0.044	0.13220	0.000064	0.004	0.63053
7	175	0.08	0.017	-2.96572	0.000040	0.003	-2.25571
8	200	0.04	0.009	-0.52688	0.000015	0.001	-0.12757
9	225	0.02	0.005	2.27936	0.000008	0.001	-3.00463
10	250	0.01	0.002	-1.73095	0.000006	0.000	0.65106

した。以上の測定結果より、高調波及び基本波位相に起因するトラッキングエラーを低減することが可能になる。

しかし、現在の運用では、偏向電磁石については本論文で行ったような高調波電流制御が十分にできておらず、磁場波形には高調波成分が除去できず残っている。これは、偏向電磁石の飽和が設計値を大きく超えてしまい、実機電源では共振回路構成や電源容量が試験電源とは異なっているため、高調波電流を十分に制御できないからである。今後は、四極電磁石の磁場に高調波を入れて、偏向電磁石の磁場波形に合わせていく必要がある。

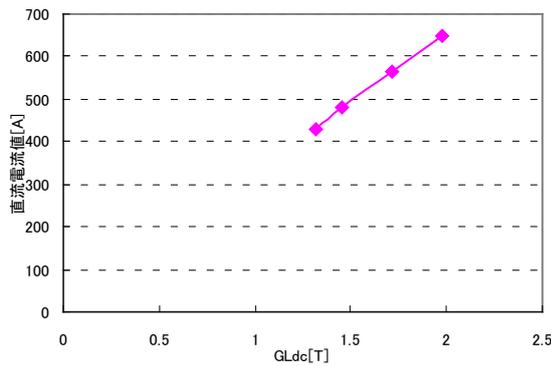


図 4：四極電磁石 QMA の磁場—電流特性 (直流成分)

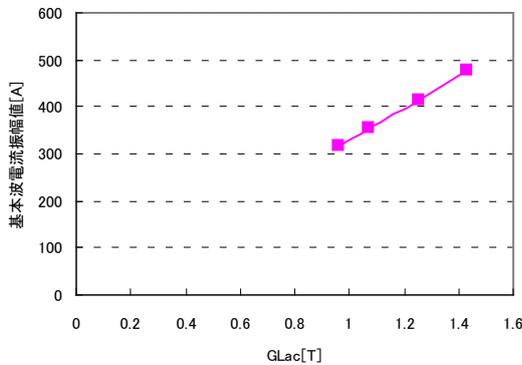


図 5：四極電磁石 QMA の磁場—電流特性 (基本波振幅成分)

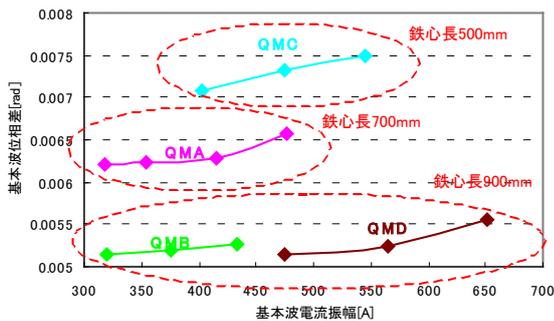


図 6：四極電磁石の基本波電流に対する基本波磁場の位相遅れ

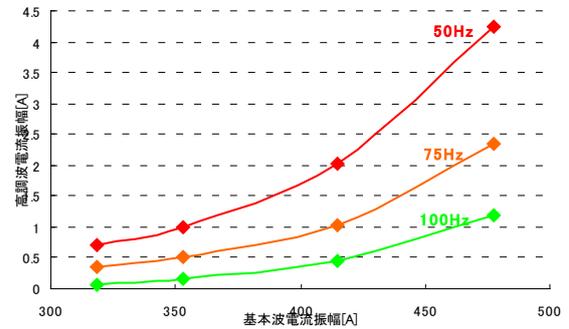


図 7：四極電磁石 QMA の高調波電流振幅特性 (高調波磁場成分の振幅を 0.01% 以下にした場合)

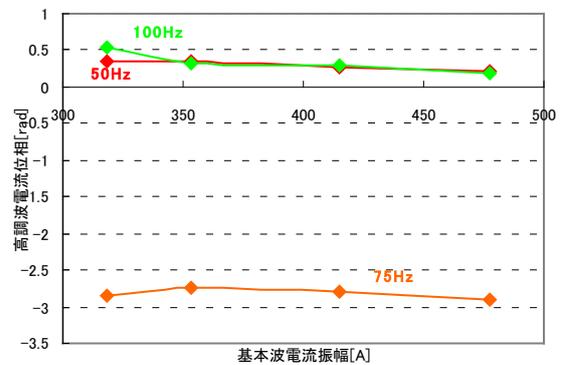


図 8：四極電磁石 QMA の高調波電流位相特性 (高調波磁場成分の振幅を 0.01% 以下にした場合)

## 参考文献

- [1] N. Tani, T. Adachi, S. Igarashi, Y. Watanabe, H. Someya, "Design of RCS Magnets for J-PARC 3-GeV Synchrotron", IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp.409-412 (2004).
- [2] T. Adachi, H. Someya, F. Zhang, "Possibility of Waveform Manipulation of the Magnet Current in a Resonant Network", Proceedings of EPAC 2000, 2193-2195.
- [3] Y. Watanabe, et al., "J-PARC RCS 共振電源における電流制御系の開発", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 424-426.
- [4] T. Adachi, S. Igarashi, H. Someya, N. Tani, Y. Watanabe, "Dynamic Field Measurement Using a Harmonic Coil", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 630-632.