

ROTATING COIL SYSTEM FOR ILC FINAL FOCUS MAGNET MULTIPOLE

Ryunosuke Kitahara^{#A)}, Yuji Nasu^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}

^{A)}Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto 611-0011

Abstract

We are preparing a rotating coil system for precise magnetic harmonic field measurement. A flexible print circuit sheet, where a pair of one turn coils are printed on, is glued on a quartz rod. The coil location can be well defined because of the one turn coil scheme and the small thermal expansion coefficient of quartz eliminates the ambient temperature effect. The two coils located on the quartz rod with the angle difference of 180 degree can separate the odd and even harmonics components by recording both the signals simultaneously to get their sum and difference. 24-bit ADC's are used for higher resolution and the signals are integrated digitally. The coil wire positions (radius and azimuthal angle) are evaluated by a small magnet that has a sharp magnetic field distribution. We found nonuniform interval between signals of the rotary pulse encoder and tried to compensate for a quadrupole magnet data.

ILC 最終集束永久磁石の多極磁場測定用

ローテーティングコイルシステム

1. はじめに

四極、六極などの多極磁場はビームを安定に輸送する際に用いられ、ビーム光学上重要な要素である。荷電粒子では四極は集束、その高次要素である六極や八極は非線形成分や色収差の補正に用いられる。加速器の中に組み込まれる磁石が生み出す磁場では、高精度が要求されるため、磁場分布を精度良く測定する必要がある。

当研究室では、International Linear Collider (ILC)の最終集束用四極磁石や、パルス冷中性子ビームの集束用六極磁石の研究を行っている。ILC の最終集束では nm オーダーに絞ったビームを交差角 14[mrad]で衝突させるが、衝突点をすり抜けてきたビームを最終集束磁石のすぐ横に逃がす必要がある。そのため、磁石の外径に制約があり、小形である必要がある。また、四極以降の高次成分と、四極成分の相対値には許容制限が厳しくかかっている。表 1 に示す。

n	3	4	5	6	7	8	9	10
B_n/B_2	3.0	2.5	1.0	5.0	1.6	5.5	3.1	1.2
B_2	E-4	E-4	E-4	E-4	E-3	E-4	E-3	E-3

表 1 : ハーモニクス成分と四極との相対強度許容値

永久磁石では小型で微細振動の心配のない強力な最終集束が構成できる可能性があり、この試作を行い、評価を行っている。これら製作した磁石の磁場分布を精度良く測定すべく、ローテーティングコイルシステムを用いた多極磁場測定システムを整備した。これまでの測定では、六極成分が許容値を大きく上回っている[1]。これが測定器由来のものなのかどうか現状分からない。

2. コイルシステムの概要

コイルは、フレキシブルプリント基盤に印刷されており、そのフレキ基盤を石英ガラスの表面に貼っている。石英ガラスを用いたのは線膨張係数が 10^{-7} のオーダーと小さく、測定系の温度依存性を減らすためである。このため、コイルはタンジェンシャルコイル (図 1) となる。多極磁場は以下のように多極展開して表すことが出来る[2]。

$$B(\theta) = \sum_{n=1, \dots} b_n \sin(n\theta + \alpha_n) \quad (1)$$

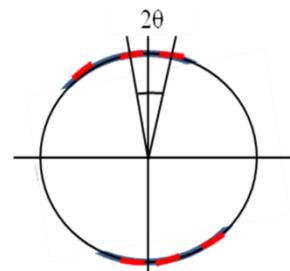


図 1 : タンジェンシャルコイルの断面図

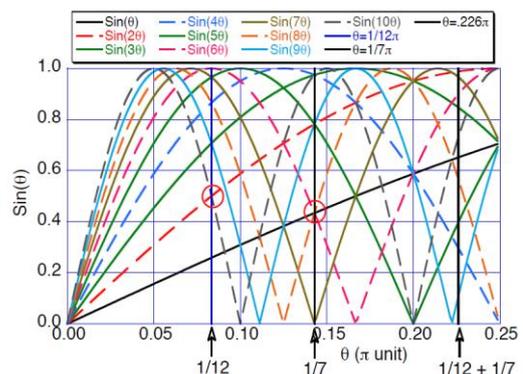


図 2 : コイル開き角と多極成分検出振幅

このとき、誘導電圧の相対値は図 2 のようにコイルの開き角によって変わる。ここでは線の組み合わせによって開き角が変更できるようにしてある。最も大きい開き角 $(1/12+1/7)\pi$ のとき、二極磁石、四極磁石、六極磁石の信号は検出可能である。

このコイルシステムでは、ワンタンのコイルが 180 度の対称位置に一つずつ印刷されており、それぞれの信号を同時に計測することができる。

また、二つのコイルの信号の和と差を同時記録することによって偶数次と奇数次の磁場多極成分の分離が可能になる。この測定システムでは微小電圧を扱うので、プリアンプから分解能 24bit の $\Sigma\Delta$ 型 ADC (AD7765) までをコイル直近の回転系側に置いてデジタル化してから固定系に送信することにより、ノイズの混入を減らしている。積分操作は ADC 後のデジタルで行う。ADC は $\Sigma\Delta$ 方式であるために一定周期の 6.4 [μs] ごとにデータを更新するが、内部遅延があり出力時の変換結果は 177 [μs] 前のアナログ値となっている。角度情報は 1 周 8192 点の出力を出すロータリーエンコーダーから取っているが、これのエッジから 177 [μs] 後のデータを取ることにによりこの遅延の影響をなくしている。また、サンプリング周期とロータリーエンコーダーからのトリガ信号は同期しないので、トリガ信号時点相当のアナログ値を得るために、前後の変換データから直線補間を行っている (図 3)。

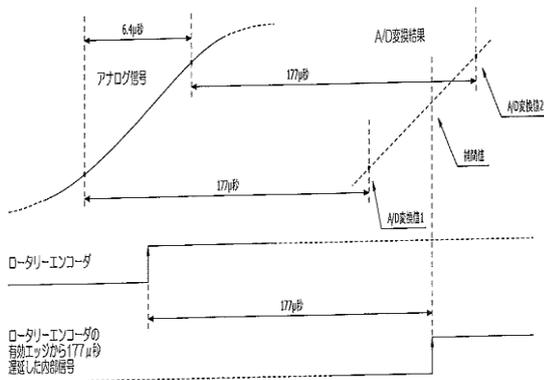


図 3 : $\Sigma\Delta$ 型 ADC の出力をロータリーエンコーダーによるタイミングに合わせるための補間

コイル回転の角速度の変動の影響を打ち消すために一般に積分が行われるが、この積分区間を測定開始から持続的に取るのではなく、データサンプリング毎にし、毎回積分器をリセットしている。これにより、 n 次成分が $1/n$ で減るデメリットが回避できる。また、頻繁にリセットを行うので、アンプのオフセットによるドリフトが解消できる。コイル出力は (1) より以下のように書ける。

$$V(\theta) = \frac{d}{dt} B(\theta) = \sum_{n=1, \dots} n \omega b_n \cos(n\theta + \alpha_n) \quad (2)$$

(2) 式から判るように、生のコイル出力は角速度 ω に比例するため、コイル回転の角速度の変動の影響をうける。このため、時間積分をおこなうことにより、以下 θ のように角速度依存性を消去することができる。ここで t_n はロータリーエンコーダーからの角度 (トリガ) 信号がでるタイミングである。

$$\int_0^{t_n} V(\theta) dt = \sum_{n=1, \dots} b_n \{ \sin(n\theta + \alpha_n) - \sin \alpha_n \} \quad (3)$$

しかし、係数の前に付いていた次数 n が落ちる。このため、次のように、積分区間を小刻みにし、毎回積分をリセットすることを考える。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} V(\theta) dt \\ &= \frac{1}{\Delta t} \sum_{n=1, \dots} b_n \{ \sin(n(t + \Delta t/2) + \alpha_n) \\ & \quad - \sin(n(t - \Delta t/2) + \alpha_n) \} \\ &= \sum_{n=1, \dots} b_n (n \cos(nt + \alpha_n) + O^2(\Delta t)) \end{aligned} \quad (4)$$

こうすることで、係数 n を復活させることが出来、元々絶対値の小さな高次成分の測定に有利になる。タイミングの中心が積分区間の端ではなく、中心となることに注意する必要がある。この信号を定期的に蓄え、フーリエ変換すれば多重極成分が求まる。今回、1 回転を 1024 点とし 8192 点、すなわち 8 回転分のデータをフーリエ変換した。また、各測定毎の ADC 及びアンプノイズの低減のために、8 回転分のデータを 1 セットとして 5 セット分の測定データの平均をフーリエ変換している。これにより、1/8 次毎の成分を得ることができ、整数次以外の成分はノイズとみなすことができる。(図 4、図 5)

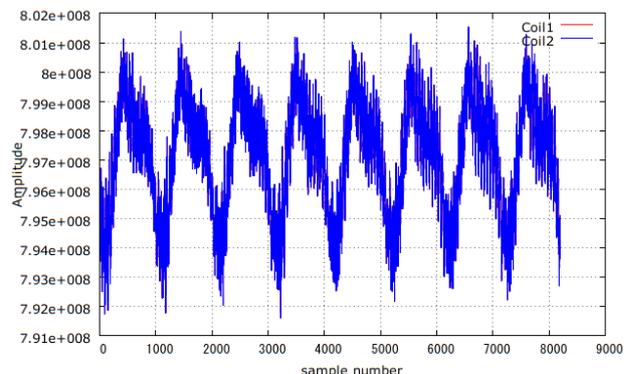


図 4 : 8 回転分サンプリングデータ (5 セット平均)

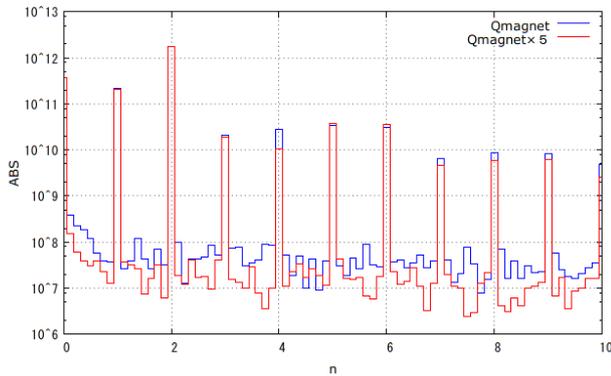


図 5 : Coil1 データのフーリエ変換による 5 セット平均と 1 セットとの比較

図 5 では、5 回積算時にはフロアノイズ平均が 66% まで減少している。しかし、六極成分をはじめとする高次の成分は減少傾向は見られるものの、許容値を上回っている。

システム全景を図 6 に、ブロックダイアグラムを図 7 に示す。

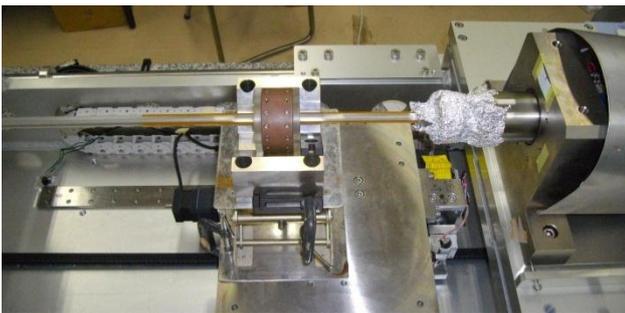


図 6 : ローテーティングコイルシステム全景

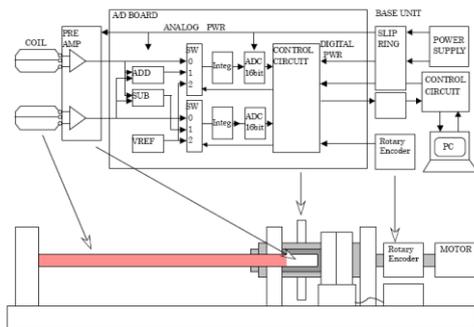


図 7 : システムのブロックダイアグラム

3. 時間積分区間補正

ロータリーエンコーダーからの信号間隔は不均一である。そこで、角速度が一定であると仮定して、フーリエ変換時に補正をかけてみる。サンプル数 N は 8192 であり 1 回転分のサンプル数は 1024 である。 i 番目のデータのサンプリング間隔が t_i [s], 1 回転する時間を T [s] とすると、補正項 $H(i)$ は、

$$H(i) = \frac{t_i}{T/1024} \quad i = 0, 1, \dots, N-1$$

となる。 i 番目のサンプルデータ値を $f(i)$ とするとフーリエ変換は台形公式から、

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k)H(k)e^{-i\left\{\frac{2\pi n}{N}\left(\sum_{j=0}^k H(j)\right)\right\}} \quad (5)$$

で表される。

実際には、各測定毎に、各サンプルの時間間隔は最大で 4.9[μ s]程の誤差を持つため、時間補正データのサンプリング間隔は 1 周分のデータを 5 回分とり、その平均時間としている。変換時にはこのデータを 8 周期分繰り返して使用している。(5)式によるフーリエ変換と通常のフーリエ変換を比較したものを図 8 に示す。フロアノイズはほぼ一致し、台形近似による補正の効果は通常のフーリエ変換とほぼ変わらない。二極、四極成分は 1%未満の変化であるが、六極以降の高次のハーモニクス成分は六極成分が約 6%減、八極成分が約 20%減という結果になっており、より高次の近似をすることでさらに低減できる可能性がある。

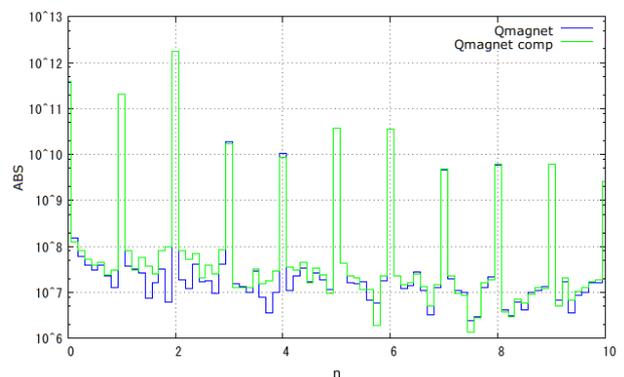
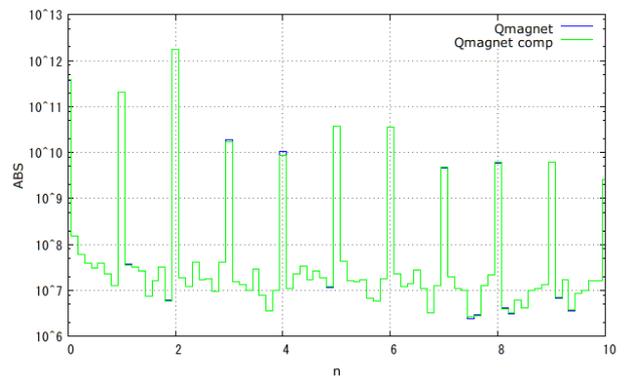


図 8 : データのフーリエ変換による補正 (上図 : Coil1、下図 : Coil2)

5. 今後の課題

補正データとなる時間間隔情報は測定データとは別にとったものを使用している。これらを同時に測定することができれば補正の精度を上げることがで

きると考えられる。他のノイズの要因として現在使用しているパルスモーター用パルス信号発振器の精度が有効数字 1 桁であり、コイルの角速度が一定でない可能性もあるため、早急に改善する必要がある。また、動作中に微小ではあるがパルスモーター由来の振動が装置と共鳴し、高周波振動しているので、回転数等も調整が必要である。回路系のノイズに関しては現在調査中である。

参考文献

- [1] S.Ushijima et al., “Preparation of Adjustable Permanent Magnet Quadrupole Lens For Beam Test At ATF2”, Proceedings of the 25th International Accelerator Conference in Japan, Tsukuba, September. 12-17, 2010
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2010/papers/mop105.pdf>
- [2] Y.Endo., “加速器における電磁石の基礎”, OHO's 97 Seminar at KEK in Japan, Tsukuba, September. 1-4, 1997
URL:<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-1997/txt-1997-III.pdf>