

# ROTATING COIL SYSTEM FOR MULTIPOLE MAGNETS

Yuji Nasu<sup>#A)</sup>, Yasuhiro Fuwa<sup>A)</sup>, Masako Yamada<sup>A)</sup>, Ushijima Shotaro<sup>A)</sup>,  
Yoshihisa Iwashita<sup>A)</sup>, Hirohiko Shimizu<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto 611-0011

<sup>B)</sup>High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba City, Ibaragi 305-0801

## 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 signal are integrated digitally. The coil wire positions (radius and azimuthal angle) are evaluated by a small magnet that has a sharp magnetic field distribution.

## 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 14mrad 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。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。またパルス冷中性子ビームに対して強度変調型六極磁石を製作し、白色ビームの集束実験を行っている<sup>[1]</sup>。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。

### 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できる<sup>[2]</sup>。

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

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、ワンターンのコイルが 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。四極磁石を測定したときの生データを図 3 に示す。

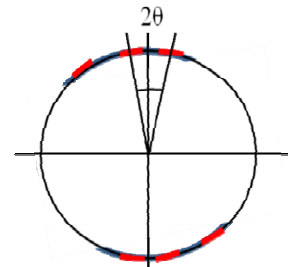


図 1 : タンジェンシャルコイルの断面図

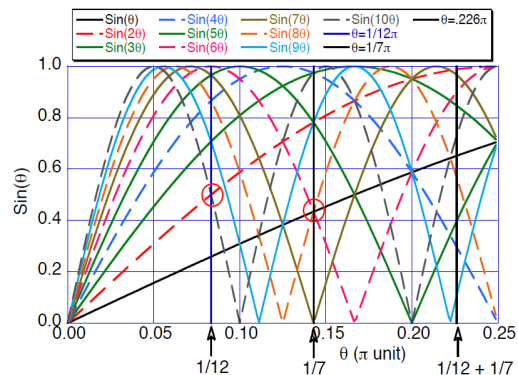


図 2 : コイル開き角と多極成分検出振幅

<sup>#</sup> nasu@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

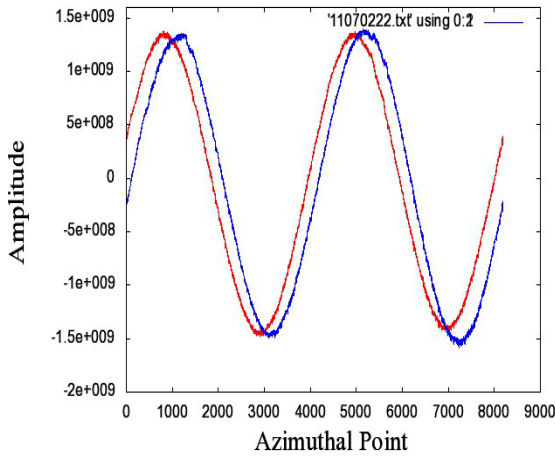


図3：四極磁石の磁場分布

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  $6.4 \mu\text{s}$  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  $177 \mu\text{s}$  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  $177 \mu\text{s}$  後のデータを取ること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4)。

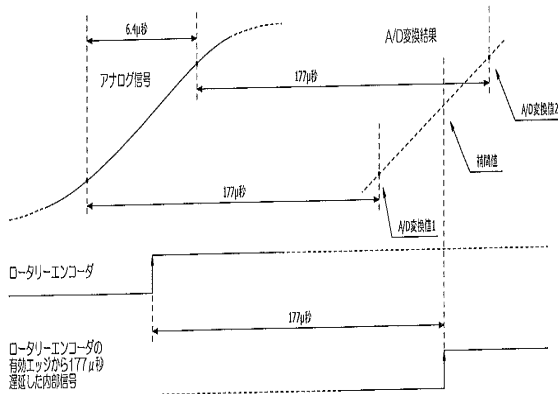


図4： $\Sigma\Delta$  型 ADC の出力をロータリーエンコーダーによるタイミングに合わせるための補間

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。

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

これで判るように、生のコイル出力は角速度  $\omega$  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、せっかく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。

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

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。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。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。システム全景を図5に、ブロックダイアグラムを図6に示す。

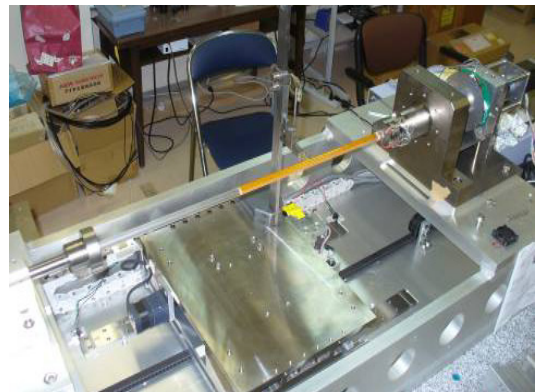


図5：ロータリーエンコーダコイルシステム全景

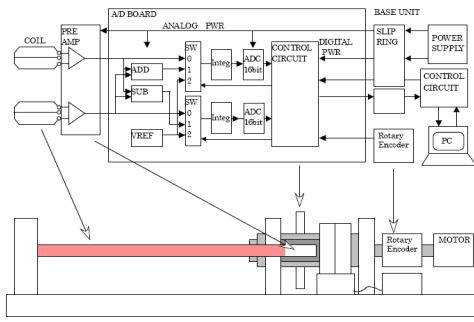


図6：システムのブロックダイアグラム

### 3. コイルの回転半径と角度のずれの評価

ここで使っているコイルはワンターンであるためコイル位置を評価しやすいという特徴がある。

フレキシ基盤は石英ガラスに手作業で貼られており、コイルの長手方向にコイル線の半径位置、角度位置にずれがそれぞれ生じる。そのずれを評価するため、局所磁場を発生する磁石によって得られた誘導電圧の信号を用いた（図7）。コイルは長手方向に約30cmあり、長手方向を3cm刻みで10点の測定を行って、コイルの回転半径と角度方向のずれを評価した。2チャンネルを同時に測定しているのので、2つの波形が表示される（図8）。局所磁場発生磁石により、2つの波形の極大値と極小値のピーク位置と値からコイルの角度と回転半径の評価が可能となる。

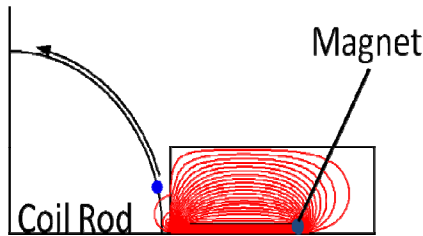


図7：局所磁場発生磁石

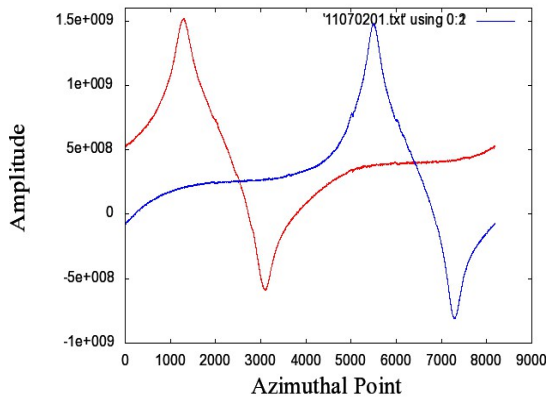


図8：局所磁場により得られた信号

振幅データにはオフセットが入っているのので、周期全体の平均値を引いてピーク値を求めた。暫定的に各ピークを極値とその位置で評価し、角度及び振幅

のずれの分布を表したのが図9である。後ほどピークフィットによる詳細な解析を行う予定である。相対間隔（コイルの角度広がり）は1度程度の変動であるが、全体的にねじれて貼られているようである。振幅情報をコイル半径に焼き直すためには、磁石を微小移動させたときの振幅変化の情報が必要であり、これも後ほど行う。

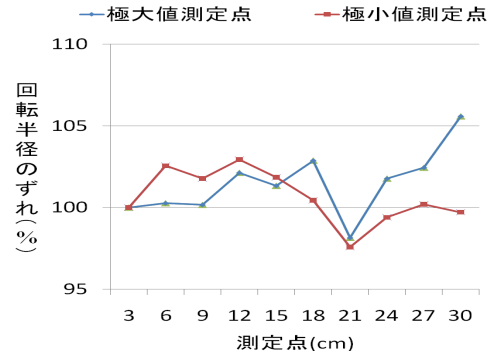
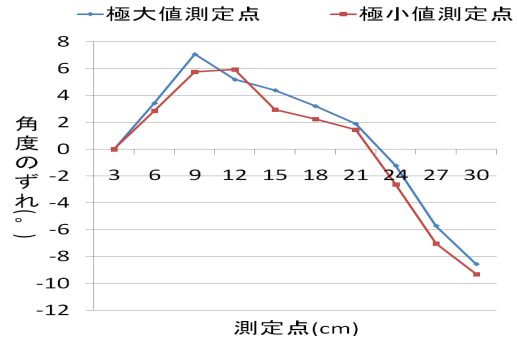


図9：局所磁場発生磁石からの信号のピーク角度位置分布（上）及び振幅（下）

### 4. 今後の課題

多極磁場強度の絶対値を求めるために、ホールプローブを用いたマッピングなど、別の測定によって校正された磁石を用いたキャリブレーションが必要である。また、回路系にノイズの混入が見られるため、電気系の改良を検討する。ガラス棒へのコイル基盤貼り付け精度の向上や、軸受けの改善なども検討したい。

### 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 <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 <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOTxt/OHO-1997/txt-1997-III.pdf>