

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 その 2

ROTATING COIL SYSTEM FOR ILC FINAL FOCUS MAGNET QADRUPOLE PART2

北原龍之介^{#, A)}, 不破康裕^{A)}, 岩下芳久^{A)}

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

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University

Abstract

Quadrupole magnets for ILC final focus should be strong enough with the restriction on the external radius to let the disrupted out-going beam pass by, while vibration of the magnetic center has to be highly avoided to keep the nm sized beam focusing stable at the interaction point a few meter downstream from the lens. Gluckstern's 5-ring PMQ singlet seems a good candidate for this point of view. In order to fabricate a good 5-ring singlet, property of each ring has to be good enough. A precise magnetic field measurement system for harmonic components is needed for adjustments of relative positions and angles of magnet pieces in a ring. A rotating coil system, which has 24-bit ADCs for higher resolution, is developed. We calibrated the system with 2D mapping results of dipole and quadrupole of PM by hall probe and evaluated statistical error.

1. はじめに

多極磁場はビーム光学上重要な要素であり、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使われる。また冷中性子ビームもその磁気モーメントを使って六極磁場で集束できる。これら多極磁石では半径の冪乗で磁場が増大する。小ボア径ではコイル線材領域内で磁場強度が最大になる超伝導電磁石よりも永久磁石の方が強磁場発生に有利である。

International Linear Collider (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は最終集束磁石の直ぐ横を逃がす必要があり、その外径に制約がある。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系が構成できるため、この試作を行った^{[1][2]}。これは、Gluckstern's model を用いた 5 つのリング四極磁石を相対的に回転させることでビームを通したときの X-Y カップリングに対する影響を打ち消している。この評価には、ビーム進行軸上での磁場有効長(≒300[mm])に対しての GL 積を測定して行う。レンズとして働く四極成分に対する多極磁場成分との比にも制約があり、これらの背景から以下のようなハーモニックコイルを用いた多極磁場測定システムを整備した。

2. 測定原理

ビーム光学では、ビームの進行方向を長手方向に取る円柱座標系が有効である。ハーモニックコイルのシャフトは長手方向に沿わせてあり、フレキシブルプリント基板を貼り付けて 1turn のタンジェンシャルコイルとしている。コイルは二つに貼あり 180 度対称に貼り付けられている。プリント基板の

パターンから $\Delta\theta$ の異なる 3 つのコイルでの測定が可能となる。ハーモニックコイルが多重極磁場内で回転した時に作る起電力について考える。半径 R の軸表面における動径方向の磁場 $B[T]$ は多重展開して、

$$B_r(\theta, z) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n(z) R^{n-1} \sin(n\theta + \alpha_n) \quad (1)$$

と書ける。 n はハーモニクス次数、 b_n は n 次磁場強度、 θ は基準軸からの角度、 α_n は n 次の初期位相である。この時、1turn のタンジェンシャルコイルを貫く磁束 $\Phi [Tm^2]$ は、

$$\begin{aligned} \Phi(\theta) &= \int_{z_1}^{z_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B_r(\theta, z) \cdot R d\theta \cdot dz \\ &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n R^n}{n} \sin\left(n \frac{\Delta\theta}{2}\right) \cos(n\theta + \alpha_n) \end{aligned} \quad (2)$$

$$b_n = \int_{z_1}^{z_2} b_n(z) dz, \quad \Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$

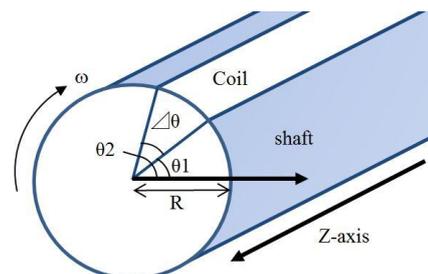


Figure 1: The coordinate system of the shaft.

[#] kitahara@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

ファラデーの電磁誘導の法則より、コイルに生じる起電圧 $V(t)$ は、

$$V(t) = \frac{d\Phi}{dt} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n R^n}{n} n\omega \cdot \sin\left(n \frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (3)$$

$\theta = \omega t$ であり、 ω はコイルの回転角速度、 t は基準角からの経過時間である。この起電圧を sampling rate Δt 毎(ロータリーエンコーダーからのパルス時間)に積分すると、時間 $t (= k\Delta t : k = 0, 1, 2, \dots)$ における磁束変化分は以下ようになる。

$$\Phi_n = \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} V(t) dt = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n R^n}{n} \sin\left(n \frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin\left(n\omega \frac{\Delta t}{2}\right) \cos(n\omega t + \alpha_n) \quad (4)$$

このフーリエ成分 F_n はサンプル数 $N (= 8192)$ より、

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Phi_k e^{ikn \frac{2\pi}{N}} \quad (5)$$

となる。よってローテーションコイルから得られる磁場のハーモニクス成分 b_n は以下ようになる。

$$b_n = \frac{2 \cdot F_n}{\kappa_n} \quad [\text{T/m}^{n-2}]$$

$$\kappa_n = \frac{4R^n \sin\left(n \frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin\left(n\omega \frac{\Delta t}{2}\right)}{n} \quad [\text{m}^n]$$

積分によって係数に掛かっていた ω が消えるため角速度の揺らぎの影響が排除できる。また、積分時間は充分短く、アンプのオフセットなどによる積分値の発散がないため、連続の測定操作が可能となる。

3. 解析方法

3.1 統計誤差評価

ハーモニックコイルから得られたデータを1セット8周分としており、フーリエ変換したあとに次数 n を $1/8$ して振りなおせば、整数次の成分のみが周期性より多極磁場成分とみなせる。非整数成分は周期条件を満たさない成分なので、主となる成分と比較して充分小さいものであり、測定における

バックグラウンドノイズとみなすことができる(Fig. 2)。このノイズは、積分回路やアンプなどの回路的なものや、シャフト、台座の振動、角速度の揺らぎなどの機械的なものが原因と考えられる。前回^[3]と比較して系統誤差低減のためにパルスモーターを支える支柱を太いものに変え、振動由来の角速度の揺らぎを抑えた。

統計誤差を減らすためには積算回数を増やせばよいが、Fig. 3を見ると10回を超えたところでノイズが $1/10$ 以下にならず、これ以上の精度を出すためには系統誤差の低減が求められる。

3.2 データ処理

実際に得られる信号データの値は、電圧値の時間積分を積分区間長さで規格化した台形公式を用いている。信号データを V_{meas} とすると、データ値と磁束の間には以下のような関係がある。

$$\Phi_{meas} = \int V(t) dt = \alpha \times \frac{V_{meas} \times \Delta t'}{(N_c)} \quad [\text{Wb}] \quad (6)$$

N_c とは積算回数であり、1回の測定で何セット分のデータをとるか決めるものである。例えば積算回数5回なら1つのロータリーエンコーダーパルスで得られるデータが5セット分足されており、積算回数で割ることで、平均されたデータとなる。これにより、統計誤差を減らすことができる。5セット分のデータ取得は連続的に行われ、 $\omega = 2\pi$ のとき、測定時間は $8 \times 5 = 40$ [s] 必要となる。

ここで、PGAによるゲインを x とすると、(6)式は

$$\Phi_{meas} = \int V(t) dt = \frac{\alpha}{x} \times \frac{V_{meas} \times \Delta t'}{(N_c)} \quad [\text{Wb}] \quad (7)$$

となる。

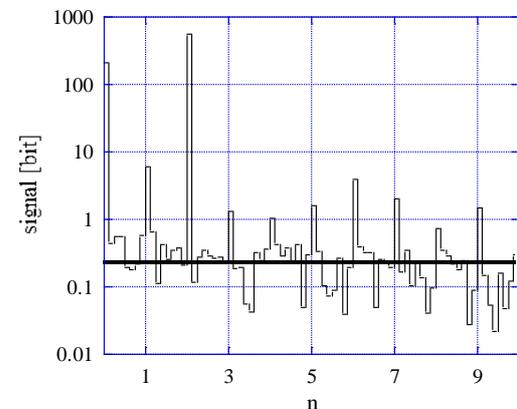


Figure 2: Fourier components of a Q-magnet for a calibration of harmonic coil system. Black horizontal line is an average value of non-integer components.

4. キャリブレーション

4.1 キャリブレーション用磁石

キャリブレーションに用いた磁石について述べる。永久磁石でできた二極、四極磁石を作成した。水平平面上で稼働するステージに乗ったホールプローブで磁場強度を測定し、2次元マッピングをとった。マッピングデータから得られる BI 積をビームの進行方向に対して垂直方向(x 軸)でプロットし、多項式近似から主となる多極成分を求めた。それぞれ二極磁石からは $b_1=8.72 \times 10^{-3}$ 、四極磁石からは $b_2=1.07$ を得た(Fig. 4, 5)

4.2 キャリブレーション結果

ホールプローブによって二極磁石と四極磁石を2次元マッピングして得た $b_n(n=1,2)$ とハーモニックコイルで測定・計算して得られたデータ Φ_{meas} をフーリエ変換した F_n^{meas} を比較して、 α [V/bit] を求める。信号のピークをアンプが飽和しない範囲で gain を大きく設定し、分解能を上げる。測定パラメータを table.1 に示す。3種類のコイルのパターンについてそれぞれ測定し、キャリブレーションを行った。これより2つのチャンネルについて $\alpha_1=1.49 \pm 0.03E-9$, $\alpha_2=1.51 \pm 0.04E-9$ を得た。

5. 今後の課題

周期的な系統誤差の原因は、シャフトのたわみによるパルスモーターの角速度の変化、またそれに伴う振動などが考えられる。今回パルスモーターを支える支柱を太く、重いものに交換し、角速度の揺らぎの変化を抑えることを試みたが、更なる改善の余地はあると思われる。

参考文献

- [1] Y. Iwashita, et al., "Beam test plan of permanent magnet Quadrupole lens at ATF2", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, Aug. 1-3, 2001
- [2] 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
- [3] R. Kitahara, et al., "Rotating Coil System for ILC Final Focus Magnet Multipole", Proceedings of PASJ'9, p481, 2012

Table1 : main parameters of electric device

R (m)	6.5×10^{-3}
$\Delta\theta$ [rad]	$\pi/7, \pi/12, (1/7+1/12)$
$\Delta r'$ [s]	6.4×10^{-6}
Δr [s]	9.8×10^{-4}
ω [Hz rad]	2π
Gain	$\times 2, \times 4, \times 8, \times 16, \times 32, \times 64$

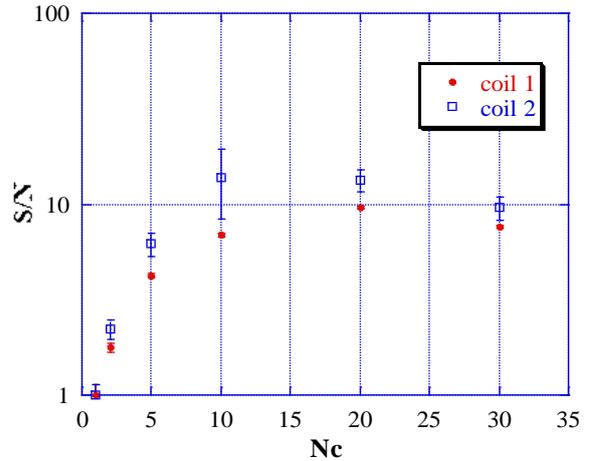


Figure 3: S/N ratios of the Q magnet measurement as functions N_c . Harmonic component $n=2$ is considered.

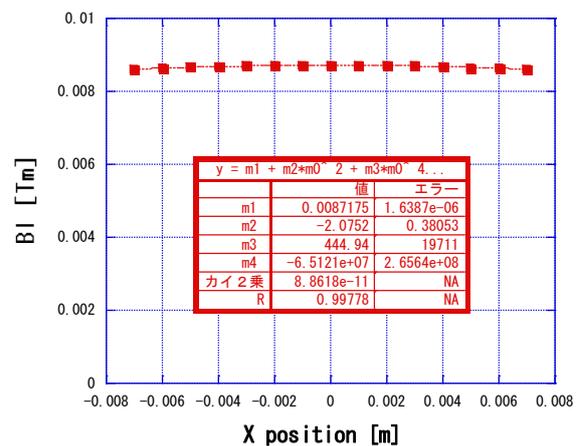


Figure 4: BI mapping of dipole magnet.

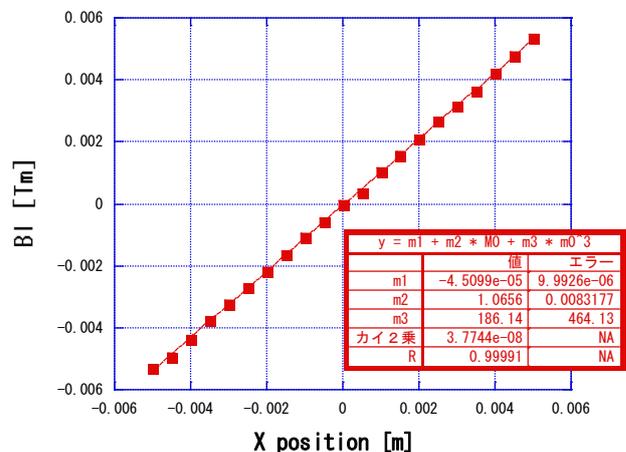


Figure 5 BI mapping of quadrupole magnet.