

## 高分解能ハーモニクコイルによる多極永久磁石の磁場評価

### MAGNETIC FIELD EVALUATION OF MULTIPOLE PERMANENT MAGNETS BY HARMONIC COIL WITH HIGHER RESOLUTION

北原龍之介<sup>#, A)</sup>, 不破康裕<sup>A)</sup>, 岩下芳久<sup>A)</sup>

Ryunosuke Kitahara<sup>#, A)</sup>, Yasuhiro Fuwa<sup>A)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Institute for Chemical Research, Kyoto University

#### Abstract

We developed multipole permanent magnets that have a variable main magnetic harmonics. One is a Quadrupole magnet for ILC final focusing system. Another is a sextupole magnet for focusing pulsed thermal neutron beam. In order to evaluate the variation of their main magnetic harmonics, we also developed a harmonic coil with tangential single-turn coil. The systematic error based on uncertainty of the coil wire's position can be reduced by using single-turn coil. We measured the wire's position by using a pair of attracting pieces of 10 mm square flat NdFeB magnets generating a cusp shape field, so that the influence of the coil position displacement was estimated. We estimated the systematic error less than 5%. Then we measured the variable magnetic field of the permanent magnets multipole. We observed high values of higher harmonics compared with a result of a simulation.

#### 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。これら多極磁場は半径の冪乗で増大する。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。

永久磁石を組み合わせた多極磁石は Halbach 型磁石が一般的であるが、磁場強度を変えることができなかった。しかし、我々はこれまでに二つの多極磁石を組み合わせた Extended-Halbach 型の六極磁石<sup>[1]</sup>や、Gluckstern's model を用いた四極磁石<sup>[2]</sup>などにより、永久磁石による強度可変多極磁石が製作を行ってきた<sup>[3]</sup>。これらの磁場の可変性、また多極磁場成分を評価するために高分解能ハーモニクコイルを開発し、磁場評価を行った。

#### 2. ハーモニクコイル

##### 2.1 測定原理

ハーモニクコイルは、磁場中で円柱に沿って張られたループコイルを回転させて、誘起した電圧から多極磁場強度を評価する測定器である。得られた電圧値は時間積分により磁束密度に対応し、フーリエ変換により多極成分解析を行うことができる。磁場を極座標で多極展開すると

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

と書ける。 $n$  はハーモニクス次数、 $b_n$  は  $n$  次磁場強度、 $\theta$  は基準軸からの角度、 $\alpha_n$  は  $n$  次の初期位相である。

開発したハーモニクコイルは 24bit 分解能を持つ ADC によって電圧データを取得している。コイル部分に誘起した電圧はロータリーエンコーダーから生じるパルス幅を積分区間としている。こうして得られた磁束密度は以下のように表される。

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

$R$  はロッド中心からコイル線までの距離、 $\Delta\theta$  はコイル線がロッド中心で為す開き角、 $\omega$  はロッドの角周波数である。 $\Delta t$  はロータリーエンコーダーのパルス幅であり、この範囲で電圧値を積分している。使用した ADC はサンプリング時のタイミング同期が取れないが、十分高速であるためロータリーエンコーダーパルスの立ち上がり、立下りでは線形補間

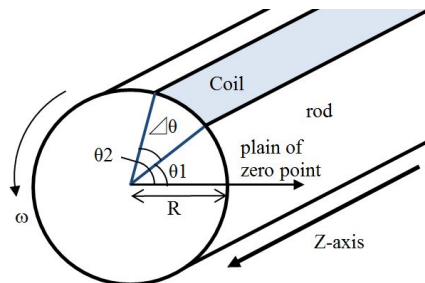


Figure 1: The coordinate system of the shaft.

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

した値を用いて台形公式による積分を行っている<sup>[4]</sup>。  
式(4)から、系統誤差の主要因は  $R$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\omega$  である事が分かる。

## 2.1 系統誤差評価

コイル部分は石英ロッド表面に張られたフレキシブルプリント基板の銅線パターンで形成された1回巻のタンジェンシャルコイルである(Fig. 2)。誘起電圧は多数巻コイルの大きい、コイル線の中心位置が不明瞭となり、これが系統誤差の原因となる。一回巻コイルにすることでコイル線の位置評価が容易になり、系統誤差を見積もる事ができる。コイル線の位置評価にはカスプ状磁場を発生するネオジウム磁石片を用いて、コイル線を貼り付けた際のねじれなどを観測し、開き角の実測に成功した(Fig. 3)。ねじれは 100[mrad]程であると観測された。ここから系統誤差は四極、六極磁石に対して 4%であると見積もられる。コイル線の距離  $R$  についての位置評価方法は検討中である。

ロッドの角速度はロータリーエンコーダーのパルス時間測定により、一周あたり 2.002(2)[ $\pi$ s]であった。この結果から角速度による磁場評価の系統誤差は 0.01%と見積もられる。各角度による角速度分布(Fig. 4)を見ると、スパイク状のピークと周期的な揺らぎが観測された。スパイク状ノイズは、回転系に取り付けた回路系への電源供給用スリップリングが原因であると考えられる。この部分的角速度の揺らぎによる多極磁場への影響は、0.2%以下である。周期的ノイズは周波数解析の結果、高次のパルスモーター由来のものとベアリング由来のものと考えられ、低次のノイズはロータリーエンコーダーのパルス感覚の長周期の不均一性からきていると考えられる。

## 3. 磁場評価

### 3.1 四極磁石

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。これまでに、超伝導磁石による四極磁石と永久磁石による四極磁石 (PMQ:Permanent Magnet Quadrupole)を最終集束系に用いることが検討されてきた。超伝導磁石の利点は強力な磁場勾配の発生と容易な調整である。反面、冷却のためにコイルを支えるサポートは細く、数も少ないので、微小振動に弱いことが危惧される。即ち、微小振動により集束点が安定せず、衝突の障害になる可能性がある。対して、永久磁石は常温で動作するため、剛性を上げることが容易であり、液体ヘリウム等の振動源とも接触しない。さらに、超伝導磁石と同程度の磁場を発生でき、コンパクトかつ微細振動の少ない最終集束系の構成が可能である。また、永久磁石を用いる利点として、磁場の発生に電力を必要とせ

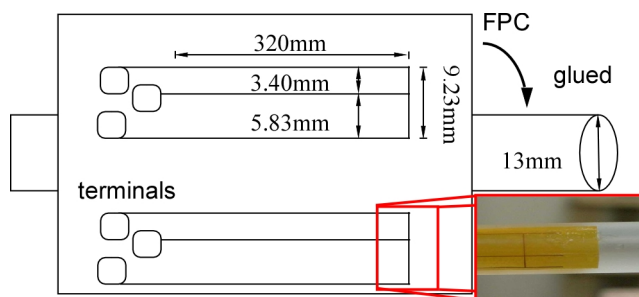


Figure 2: the construction of the coils by using FPC.

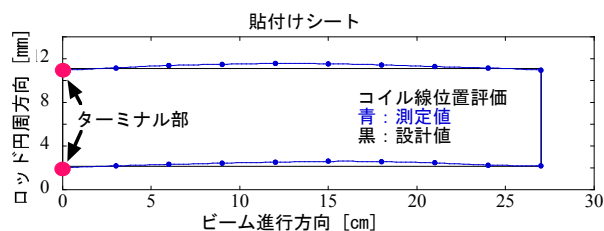


Figure 3: printed measurement data of a coil with maximum opening angle.

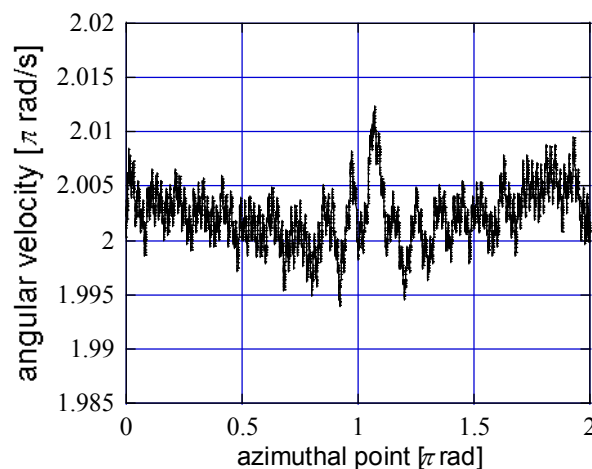


Figure 4: printed measurement data of a coil with maximum opening angle.

ず、冷却などの負荷も減るため、運転コストを下げることができる。これまでに永久磁石を用いた最終集束用四極磁石のテスト機が開発され、取り扱いや設置に関する情報の取得、ビームに対する影響などの測定がされている[1]。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強度可変を実現している(Fig. 5)。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。

Fig. 5はKEKでの測定と今回開発したハーモニクコイルとの結果の比較である。フィッティングの結果、KEKで測定した際のデータと良い一致を示している。しかし、開発された永久磁石による最終集束用四極磁石は、六極磁場成分  $B_3$  と四極磁場成分  $B_2$  の比  $B_3/B_2$  が制限値を満たしていない。一般的に四極磁石を作成した場合、四極磁場成分以外にも

高次の磁場成分(六極、八極など)が存在する。これらはビームに対して集束以外の作用をするため低い値が望ましい。シミュレーションから算出される制限値は少なくとも  $B_3/B_2 < 10^{-4}$  である<sup>[5]</sup>。多極成分の中で最も要求を満たしていないのは六極磁場であり、測定値は KEK、京都大学のどちらの結果も  $B_3/B_2 \approx 10^{-3}$  であった。これは PMQ を構成する磁石ピースの位置の決定精度の不足であると考えられるため、製作、組み立て、調整方法の検討が必要である。

### 3.2 六極磁石

数 Å の波長をもつ低速中性子は、小角散乱法により結晶構造やたんぱく質の構造解析に用いられる。統計量を大きくするためには中性子強度を上げる必要がある。中性子源は現在原子炉、もしくは加速粒子の核破砕反応による加速器ベースの中性子源が主であるが、いずれも 2 次的な発生方法であり、荷電粒子ビームに比べエミッタンスは悪い。そのため中性子強度を上げるためには単純に中性子源を巨大化させなくてはならないが、利用者が限られるという問題が生じる。そのため、小型、中型の中性子源で中性子を集光し、中性子強度を上げる事が検討されている。

中性子レンズとして、 $Mg_2F$  の物質レンズが存在する。これは安価で大量に生産が可能であるが、焦点距離に中性子波長依存性があり、単色ビームしか集光することができないという欠点がある。

六極磁場は中性子の磁気モーメントと相互作用し、偏極に応じてビームを集束力させる。現在開発が進められている加速器ベースによる中性子源のほとんどはパルス中性子ビームであるため、パルスに同期して磁場を変調させることでパルス内の広い波長の中性子を単一の焦点距離に集束させることができる。長波長領域の中性子を連続的に集束させることのできる六極磁石として開発されたのが Mod-PMSx (moderated-Permanent Magnet Sextupole) である。27~55 Å という広い波長領域の集光を実証した<sup>[6]</sup>。また、通常小角散乱法で用いられる波長よりも長い場合 q 分解能の向上が見込める。更なる改良のために多極磁場解析を行う事は、六極より上の高次磁場成分がビームに対する影響を論じる上で有意義である。

Mod-PMSx は内輪、外輪の二つの Halbach 型の永久磁石から構成された Extended-Halbach 型であり、内輪の磁極部分には透磁率の高いパーマネンジュールを用いている。ボア半径は 7.5[mm] である。パルスモーターで外輪を回転させることで連続的な磁場強度変化を実現している。Fig. 7 はハーモニクコイルで測定されたデータと計算値である。磁場有効長はホールプロローブによる測定から 65[mm] と求められた。規格化半径を 7[mm] で算出し、比較すると。三回対称性は 1% 以内であると確認された。多極成分はシミュレーションと比較した結果、PMQ と同様シミュレーションと比べて大きく観測された。特に四極(n=2)、八極(n=4)磁場については  $10^3$  以上大きく観測されている[Fig. 8]。

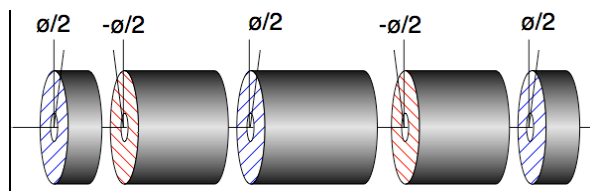


Figure 5: A Gluckstern's PMQ model.

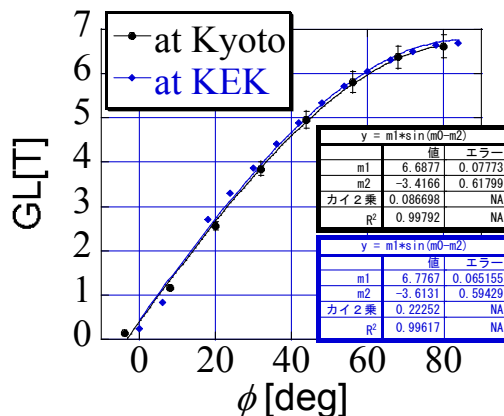


Figure 6: PMQ's variable Quadrupole component compared between at Kyoto and at KEK.

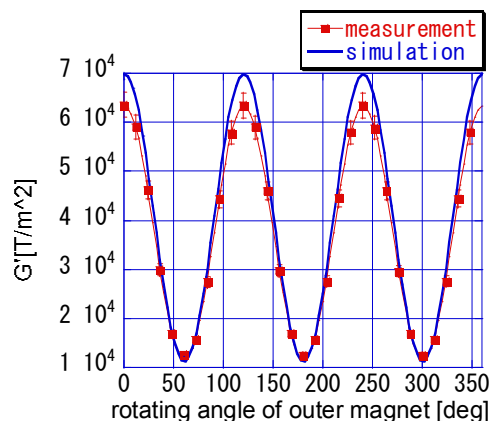


Figure 7: Mod-PMSx's variable Sextupole components.

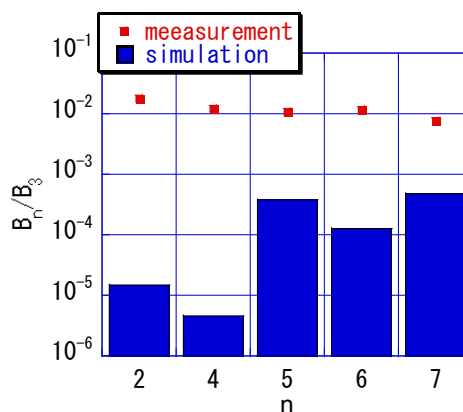


Figure 8: Mod-PMSx's multipole components at rotating angle of outer magnet 0 degree.

#### 4. 今後の課題

系統誤差を全て見積もった上で、これらの測定値の高次多極成分を正確に評価することが必要である。また、多極磁場成分について、磁石ピースの組み立てによる位置の誤差由来の高次多極磁場成分への影響を見積ることが求められる。

#### 参考文献

- [1] M. Yamada, et al., "Development of modulating permanent magnet sextupole lens for focusing of pulsed cold neutrons", Phys. B Condens. Matter **404**, 2646 (2009).
- [2] Y. Iwashita, et al., "Beam test plan of permanent magnet Quadrupole lens at ATF2", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, Aug. 1-3, (2011).
- [3] Y. Iwashita, et al., "Variable Permanent Magnet Multipoles" IEEE Trans. on Applied Supercond. **22**, [4000905] (2012).
- [4] R. Kitahara, et al., "Rotating Coil System for ILC Final Focus Magnet Multipole", Proceedings of PASJ'9, p481, (2012).
- [5] T. Okugi, et al., "Linear and second order optics corrections for the KEK Accelerator Test Facility final focus beam line", Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams **17**, 023501 (2014).
- [6] M. Yamada, et al., "A compact TOF-SANS using focusing lens and very cold neutrons", Physica B, Condensed Matter **406**, 12, 2453-2457 (June 2011).