

Skew Quadrupole Magnet at the SAGA Light Source

Yoshitaka Iwasaki^{1,A)}, Yuichi Takabayashi^{A)}, Shigeru Koda^{A)}

^{A)} Kyushu Synchrotron Light Research Center, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, SAGA, 841-0005

Abstract

A skew quadrupole magnet has been operated to control the coupling coefficient at the SAGA Light Source electron storage ring. The skew quadrupole magnet is a type of modified steering coils involved in a sextupole magnet. We describe the magnetic properties of the skew quadrupole magnet and the effect to the coupling coefficient and the dynamic aperture.

SAGA Light SourceにおけるSkew 4極電磁石

1. はじめに

九州シンクロトロン光研究センター電子蓄積リングはコンパクトなDBタイプのラティスで構成されており、設置スペースの制限からskew 4極電磁石を置かずにオペレーションを行ってきた。しかしながら、挿入光源の稼働に伴うカップリング変化の補正や、ビームサイズの計画的なコントロールのためにはskew 4極磁場の生成が必要であるため、6極電磁石内蔵COD補正用ステアリングコイルの配線を変更することでskew 4極電磁石として使用することとした。グローバルCOD補正に対しては、任意の個数のステアリング電磁石を除いた運用が可能ないようにCOD補正プログラムを修正した。6極電磁石内蔵ステアリングコイルを用いたskew 4極電磁石の磁気的な性質と、当センター電子蓄積リングのカップリングへの効果について報告する。なお、カップリングの測定方法および実測例については[1]にて報告する。

2. 6極電磁石内蔵ステアリング用コイル

当センター電子蓄積リングはコンパクトな8回対称DBタイプのラティスで構成され、各セルにSF・SDが各2台、計16台の6極電磁石がクロマティシティ補正のために使用されている。図1に当センター電子蓄積リングの1セル分のラティスを示す。長直線部長をできるだけ確保するため、6極電磁石は水平・垂直方向COD補正用のステアリングコイルを内蔵したコンバインドタイプである。ステアリングコイルは、20A通電時に中心付近で0.047T、1.4GeV電子ビームに対して1mrad以上のキックを与える仕様で、図2のように各方向コイルがシリーズに配線されている。

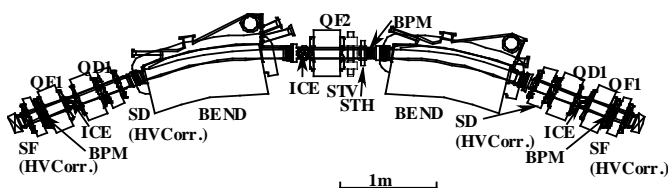


図1：ラティス

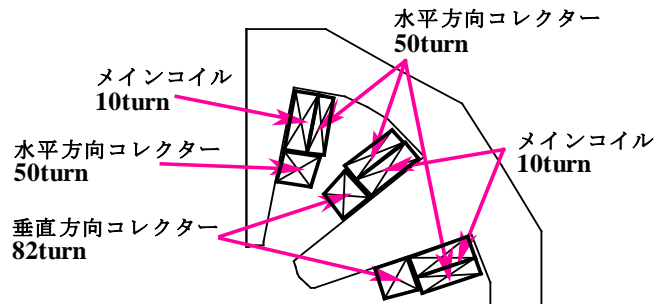


図2：6極電磁石コイル構成(1/4象限モデル)

これらのステアリング用コイルのうち、水平方向コレクターコイル3ヶ所の配線を変更することにより、各磁極の極性が図3のようになり、skew 4極成分が生成される。コイルのショートや追加をしないため、電源負荷は不変である。

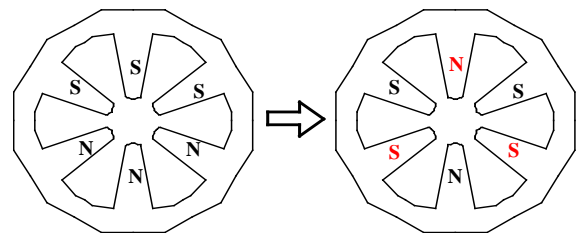


図3：ステアリングコイル極性の変更内容

3. 磁場解析

はじめに、解析するモデルの妥当性を確認するため、メインコイルを励磁して生成される6極成分について、Poissonによる解析結果と磁場測定データを比較した。コイルの通電電流は180A、鉄心の透磁率は一定とした。図4に垂直方向磁場の水平方向分布を示す。Poissonによる6極電磁石の磁場分布は、磁場測定データと良く一致した。また、Poissonによるハーモニック解析^{[2][3]}の結果得られた6極成分は165.4T/m²であり、磁場測定データを多項式フィッ

¹ E-mail: iwasaki@saga-ls.jp

ティングして得られた6極成分は164.6 T/m²であった。ハーモニック解析に関してもよく一致していると言える。

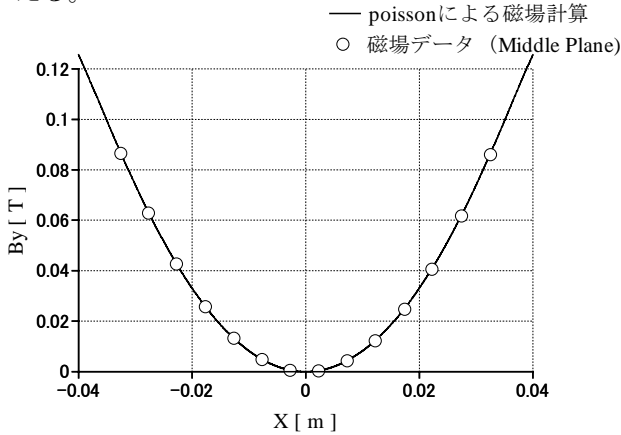


図4：6極電磁石磁場分布の比較

図5に6極内蔵ステアリングコイルによるskew 4極成分の解析モデル、図6にy=x 直線上でのBxおよびBy成分、表1にハーモニック解析の結果を示す。コイルへの通電電流は10A、ハーモニック解析の数値積分領域および規格化半径は10mmとし、第6次(12極成分)までの解析を行った。

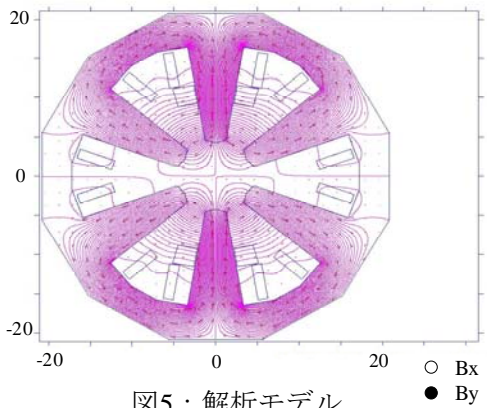


図5：解析モデル

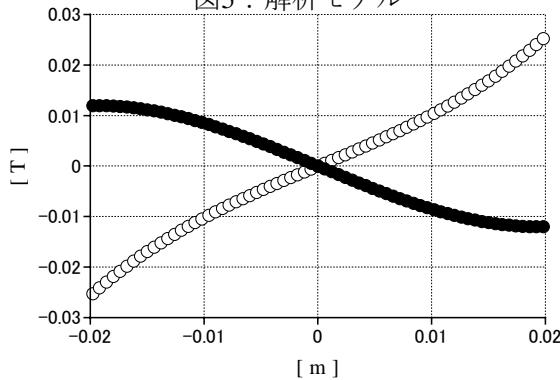


図6：磁場分布(y=x 直線上)

リニアリティは±5mmの範囲で2%程度、10Aあたり、0.94T/mのskew 4極成分が生成されることがわかった。なお、n次のnormalおよびskew成分An,Bnから第2n極の多極成分α_{2n}、β_{2n}へは次式により変換した。

$$\alpha_{2n} = \frac{nA_n}{r_{norm}} \times \frac{(n-1)!}{r_{norm}^{n-1}}, \beta_{2n} = \frac{nB_n}{r_{norm}} \times \frac{(n-1)!}{r_{norm}^{n-1}}$$

n	Field Coefficients		2n極成分		
	Normal n*An/r [gauss]	Skew n*Bn/r [gauss]	unit	Normal α _{2n}	Skew β _{2n}
1	-7.5E-2	-2.8E-2	T	-7.5E-6	-2.8E-6
2	2.2E-3	9.4E+1	T/m	2.2E-5	9.4E-1
3	-1.8E-3	3.2E-5	T/m ²	-3.5E-3	6.3E-5
4	8.3E-5	-4.3E+0	T/m ³	5.0E-2	-2.6E+3
5	-1.5E-4	2.4E-5	T/m ⁴	-3.7E+1	5.7E+0
6	2.0E-5	2.7E-4	T/m ⁵	2.4E+3	3.2E+4

表1：ハーモニック解析結果

4. 蓄積リングへの影響

カップリング係数κは水平・垂直方向チューンの差の小数部Δおよび共鳴励起強度Cを用いて

$$\kappa = \frac{C^2}{C^2 + 2\Delta^2}$$

と表わされる。[4] また、共鳴励起強度Cは、skew 4極成分K、β関数、周長L、位相φ、チューンνおよび整数qを用いて、

$$C = \frac{1}{2\pi} \int_0^L ds K(s) \sqrt{\beta_x(s)\beta_y(s)} \times \exp \left[i \left(\phi_x(s) - \phi_y(s) - \frac{2\pi}{L} (\nu_x - \nu_y - q) \right) \right]$$

と表わされる。[5] skew 4極成分が薄い領域Δℓの範囲に1箇所あるとすると、共鳴励起強度Cの大きさの2乗はskew 4極成分がある場所での平均されたベータ関数を用いて

$$C^2 \approx \left(\frac{K\Delta\ell}{2\pi} \right)^2 \overline{\beta_x(s)\beta_y(s)}$$

と近似することができる。

当センター蓄積リングの動作点は水平方向5.796、垂直方向1.825であり、Δは0.029である。Skew 4極電磁石として使用したSF電磁石がある場所のベータ関数平均値として水平・垂直方向各それぞれ7.957m、7.239m、SF電磁石の長さ0.1mを上式に代入し、通電電流に対するカップリング係数を求めた。計算結果を図7に示す。蓄積リングに他のskew 4極成分がないとき、ステアリングコイルの定格25Aに対して、68%のカップリングを得ることができる。

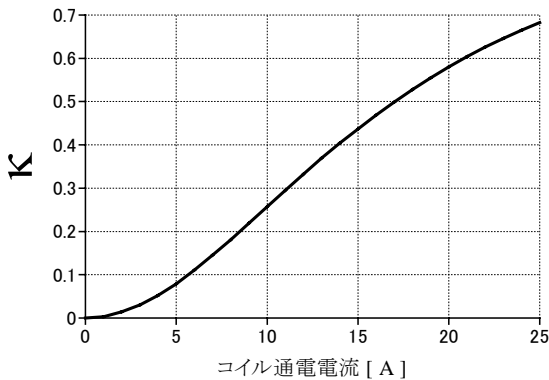


図7：コイル通電電流に対するカップリング
(計算値)

表1に示したように、6極電磁石内蔵ステアリングコイルの配線を変更しskew 4極成分を発生させたときには他の多極成分も発生する。そこで、これらの多極成分のダイナミックアパーチャに対する影響を調べた。トラッキングコードにはTRACY2^[6]を用いた。結果を図8に示す。コイルへの通電電流は定格の25Aとした。

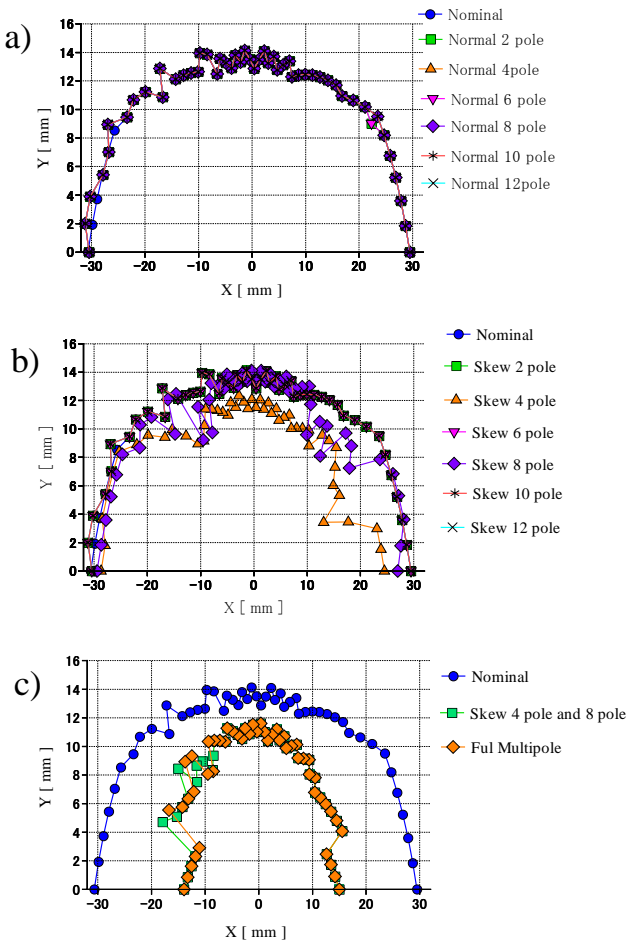


図8：ダイナミックアパーチャへの影響

- a) これまでに知られている偏向電磁石、4極電磁石および6極電磁石のミスアライメントおよび多極成分(Nominal)に加え、12極までの各Normal成分をそれぞれ加えた場合。Normalの各多極成分はダイナミックアパーチャにほとんど影響を与えない。
- b) a)同様にこれまでに知られているミスアライメントおよび多極成分(Nominal)に加え、12極までの各Skew成分をそれぞれ加えた場合。Skew 4極およびSkew 8極成分は、ダイナミックアパーチャを縮小させる。
- c) a)同様にこれまでに知られているミスアライメントおよび多極成分(Nominal)に加え、Skew 4極およびSkew 8極成分のどちらも加えた場合、および全ての多極成分を加えた場合についてのダイナミックアパーチャを示す。ダイナミックアパーチャの縮小のほとんどは、Skew 4極およびSkew 8極成分により生じていることがわかる。カップリングの変化によるタウシェック寿命への効果の一方で、6極内蔵skew 4極コイルの最大励磁はダイナミックアパーチャの縮小により貯蔵寿命を低減させる可能性がある。

6. まとめ

カップリングの制御のため、6極内蔵ステアリングコイルの配線を変更してskew 4極電磁石とした。1Aあたり0.094T/mのskew 4極成分が発生し、既存の定格25Aのステアリング電磁石電源を用いて68%のカップリングを与えることが可能である。一方で、生成されたSkew 4極およびSkew 8極成分により、蓄積リングのダイナミックアパーチャが縮小される。より強いカップリングのコントロールが必要となったときには、効果的なskew 4極電磁石の配置と、skew 4極成分以外の多極成分を抑えることが今後の課題である。

参考文献

- [1] S. Koda, et al., "MEASUREMENT OF BETATRON COUPLING IN SAGA-LS STORAGE RING", Proc. of this meeting
- [2] Poisson Manual, SFCODES.DOC, p.p.222~227
- [3] OHO '97 遠藤 "加速器における電磁石の基礎"
- [4] N. Kumagai, et al., "ESTIMATION OF BETATRON COUPLING AND VERTICAL DISPERSION FOR SPRING-8 STORAGE RING", Proc. of the PAC1999, pp. 2349-2351.
- [5] M. Takao, et al., "ON SKEW NONLINEAR RESONANCE IN THE SPRING-8 STORAGE RING", Proc. of the PAC2007, pp. 4003-4005.
- [6] W. Deckingy, D. Robin, "DYNAMIC APERTURE MEASUREMENTS AT THE ADVANCED LIGHT SOURCE", Proc. of the PAC1999, pp. 1581-1583.