

Orbit Correction in Electron Storage Ring for Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility Project

Yasuhiro Suzuki^{A), B)}, Masahiro Katoh^{A), B)}, Yoshifumi Takashima^{A)}, Masato Hosaka^{A)},
Naoto Yamamoto^{A)}, Hiroyuki Morimoto^{A)}
^{A)} Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan
^{B)} Institute for Molecular Science
Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585 Japan

Abstract

Simulation of COD (COD: Closed Orbit Distortion) in an electron storage ring for Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility Project, planned to be constructed in suburb of Nagoya was performed. Three sources of COD were considered: (a) Field error of bending magnets, (b) Alignment error of bending magnets, (c) Alignment error of quadrupole magnets. As a remarkable feature, this ring has four 5T superconducting magnets among 12 bending magnets, to generate hard X-rays. It is prospected that magnetic error of the superconducting magnets would be larger than that of normal conducting bending magnets. We have assumed 1% field errors on the super bends. It was found that the most influenced factor on the horizontal COD and vertical one is field error of super bend magnets and alignment error of bending magnets, respectively. The strengths of correcting magnets are required to be 0.6mrad on horizontal and 0.2mrad on vertical, assuming that the COD by superconducting magnets are corrected by adjusting their own excitation currents individually.

中部シンクロトロン光利用施設(仮称)電子蓄積リングの閉軌道歪みとその補正

1. はじめに

名古屋大学小型シンクロトロン光研究センターでは、中部シンクロトロン光利用施設(仮称)の検討が行われている。同施設はナノテクノロジー、IT、バイオテクノロジーなど様々な分野に多角的な計測分析データを提供し、産業界からの要望に応える地域共同利用施設として期待されている[1]。その中核となるのは、蓄積電子エネルギー1.2GeV、蓄積電流300mA以上、周長62.4m、ビームエミッタンス約53nm-radの電子蓄積リングである。中部シンクロトロン光源では12台の偏向電磁石のうち、4台が5T超伝導偏向電磁石であることが特徴である。これに

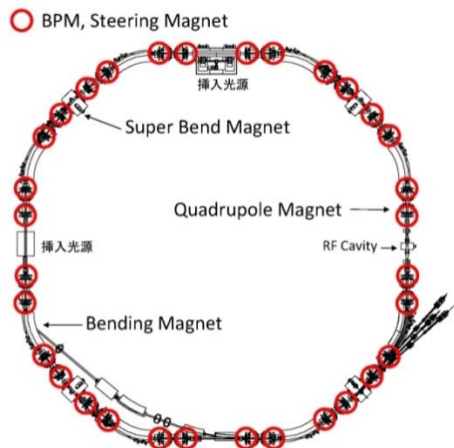


図1 中部シンクロトロン光源
電子蓄積リング概略図

表1 中部シンクロトロン光源基本パラメータ

Beam energy	1.2GeV
Circumference	62.4m
Normal bend	1.4T、39°×8
Superbend	5T、12°×4
RF frequency	500MHz
Natural emittance	53nmrad

よって1.2GeVというビームエネルギーでありながら、10keV程度のX線の利用が可能となる。図1に電子蓄積リング概略図、表1に基本パラメータを示す。

中部シンクロトロン光源にはビーム位置検出器(BPM)、軌道補正用電磁石がそれぞれ32台ずつ設置される予定である(図1)。補正用磁場は六極電磁石に設ける補助コイルで発生する予定である。

電子蓄積リング建設、運転に際しては様々な誤差が発生する。その要因は電磁石の製作精度、設置精度、気温変化、地殻変動、シンクロトロン放射熱、BPM自身の変動など様々である[2]。これらの誤差の発生は不可避であり、電子閉軌道歪み(COD: Closed Orbit Distortion)発生の原因となる。リングの設計段階においては、予めリングに発生する誤差の影響で電子軌道にどの程度の歪みが発生するかを知ることが重要である。これによってリング建設時の電磁石設置誤差や電磁石製作時の電磁石磁場誤差の上限値を設定することが出来る。またCODの補正に必要な補正電磁石磁場強度を見積もることが出来る。

2. 電子軌道歪みシミュレーション

2.1 軌道変動要因

上述した因子のうち特に建設段階において考慮すべき因子として、

- (a) 偏向電磁石の磁場誤差
- (b) 偏向電磁石の据付誤差による磁場の傾き
- (c) 四極電磁石の据付誤差

の三つを取り上げ、シミュレーションを行った。(a)は電磁石の製作段階における加工誤差であり通常誤差は0.1%を目標とする。(b)は偏向電磁石の設置に傾きがあると磁場も傾き、本来水平方向のみに偏向するはずが、磁場が垂直方向にも偏向することで垂直方向の閉軌道歪みの原因となる。通常は傾き0.2mrad以下を目標にする。(c)は理想的には基準軌道は四極電磁石の中心を通るはずだが四極電磁石が水平または垂直方向に変位することにより、それぞれの方向に偏向を受けることになりCODの原因となる。通常100 μ m程度の精度で設置される。なお、軌道水平方向には(a)、(c)が、垂直方向には(a)、(b)が影響を及ぼす。本研究ではそれぞれの誤差目標値を誤差RMS値として、電磁石誤差がガウス分布するよう与えた。また、中部シンクロトロン光源の最大の特徴は、超伝導電磁石を用いることによる硬X線発生であるが、超伝導電磁石では磁場も強力であり、その磁場強度が通常の常伝導電磁石に比べて製作段階でのばらつきが大きくなることが予想される。本研究では超伝導電磁石の磁場誤差を1%と仮定しシミュレーションを行った。なお超伝導偏向電磁石の回転誤差の影響は、今回は取り入れていない。今後の課題である。

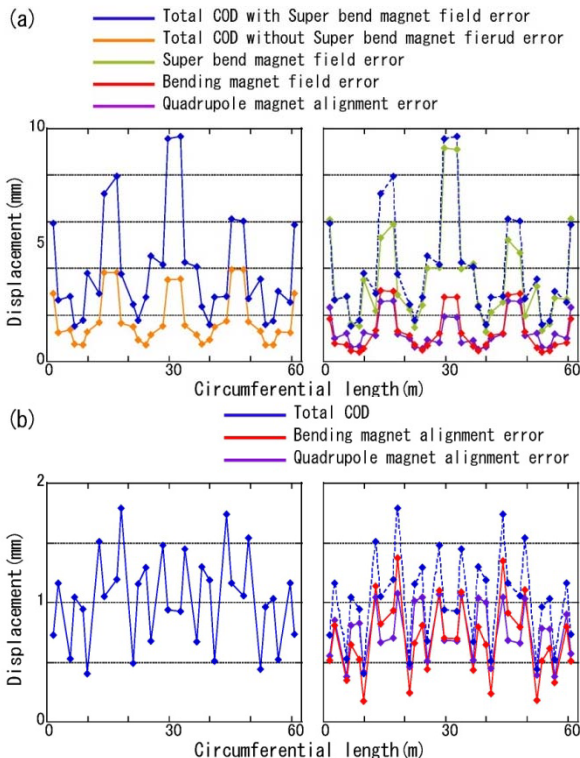


図2 CODシミュレーション
(a) 水平方向 (b) 垂直方向 左: 合計COD, 右: COD内訳

2.2 CODシミュレーション

CODシミュレーションはC言語を用いた自作のプログラムを用いて行った。乱数をもとに各電磁石の誤差を求め、CODを計算した。図2に、200回のシミュレーションを行った結果をRMS値で示してある。水平方向では超伝導電磁石磁場誤差がある場合では最大約9.5mm、ない場合では最大約4mm、垂直方向では最大約1.8mmが予測される。また(a)右図より、各因子のCODへの寄与に関して内訳は水平方向では超伝導電磁石磁場誤差による影響が最も大きく、リングに超伝導電磁石磁場誤差のみを仮定した場合その最大値は約9mmである。また(b)右図より、垂直方向では常伝導偏向電磁石据付誤差による影響が大きく、最大値は約1.4mmである。

3. 電子軌道歪みの補正シミュレーション

2章におけるCOD予測から得られた結果を補正するシミュレーションを行った。中部シンクロトロン光源では電子蓄積リングに設置する4つの超伝導電磁石はそれぞれ個別の電源を用い、電流値を微調整することによって個別に補正を行う予定である。そのため本章の補正シミュレーションでは常伝導電磁石に起因するCODを取り扱うものとした。

3.1 補正原理

閉軌道歪みはリングに設置された補正電磁石を励磁することで補正する。リングのj番目のBPMで検出したCODを z_j として、i番目の補正電磁石を単位強度で励磁した時のj番目BPMの位置に発生するCODを R_{ij} とする。また、i番目の補正電磁石強度を q_i とする。このときにCODを最小化する補正電磁石強度は

$$S = |\mathbf{R} \cdot \mathbf{q} + \mathbf{z}|^2 \quad (1)$$

を最小化する条件を求める、つまり最小二乗法を解くことに帰着する。解を求める際には特異値分解(SVD)法を用いる。マトリックスをMとすると、Mは(2)式に示すように分解できる[3]。

$$M = \sum_{k=1}^n \vec{u}_k \lambda_k \vec{v}_k^T \quad (2)$$

\vec{v}_k は補正電磁石ベクトルであり、 \vec{u}_k はBPMベクトル、 λ_k はマトリックスMの固有値である。また逆行列は(3)式で表わされる。

$$M^{-1} = \sum_{k=1}^n \vec{v}_k \frac{1}{\lambda_k} \vec{u}_k^T \quad (3)$$

ここで得られた固有値($\lambda_i; i = 1, 2, 3, \dots$)のうちある値を超えて小さいものを除くことで解qのノルムを小さく出来る。つまり、

$$1/\lambda_i = \begin{cases} \frac{1}{\lambda_i} & |\lambda_i| \geq \delta \\ 0 & |\lambda_i| \leq \delta \end{cases} \quad (4)$$

として解を求める。

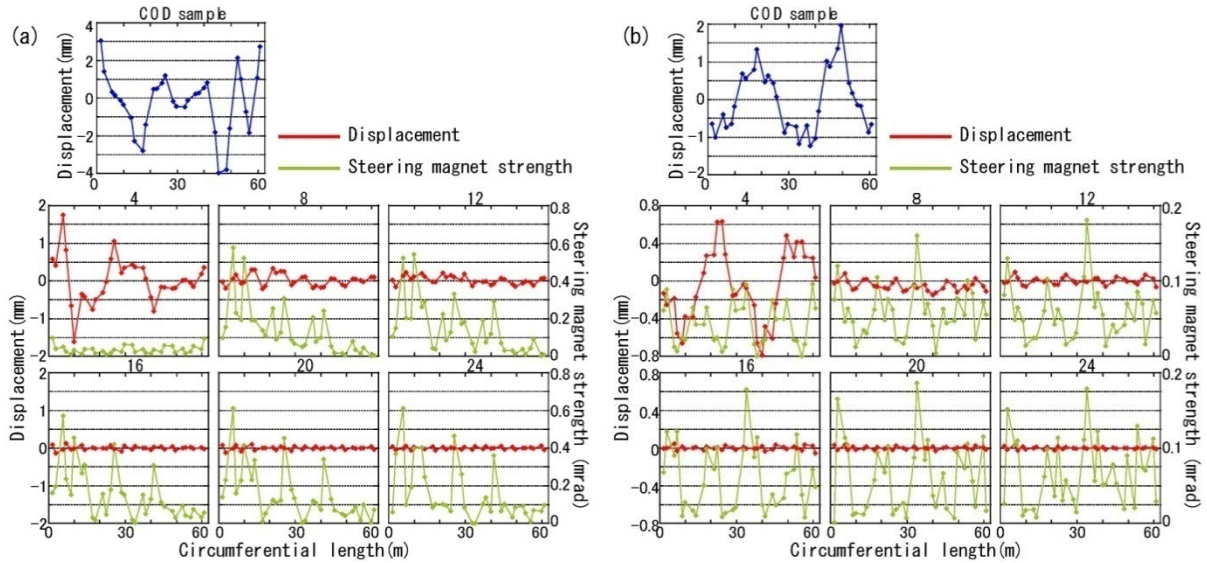


図3 補正前後のCODと電磁石強度の関係
(a) 水平方向、(b) 垂直方向

3.2 補正範囲

図3は2章においてシミュレーション計算から得られたCODに対し、固有値数の違いによる補正結果を表している。固有値数が増加するにつれ、補正精度は上昇していく。固有値が16のときには、電子軌道水平方向では約4mmのCODを150 μ m以内に、垂直方向では約2mmのCODを50 μ m以内に補正出来る。

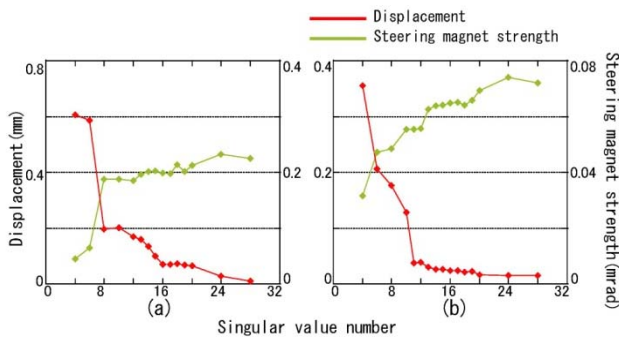


図4 固有値とCOD、補正電磁石強度の関係
(a) 水平方向、(b) 垂直方向

3.3 Steering Magnet強度決定

図4に固有値数と補正電磁石強度、CODの関係を示す。水平方向では固有値数8までは急激に補正電磁石強度は上昇し、CODは減少する。固有値数8以上では補正電磁石強度は緩やかに増加していくのに対しCODは固有値数16から20付近において100 μ m以内ではば一定である。これは仮定した電磁石誤差以下の値であるため、補正值として十分であると考えられる。また垂直方向では固有値数の増加と共に補正電磁石強度はゆるやかに増加するのに対し、CODは固有値11まで急激に減少後は、40 μ m以内に抑えられている。固有値数18以上では補正電磁石強度の増加に対してCODの変化は少ない。これから補正電磁石強度は水平方向では0.2mrad、垂直方向では

0.06mradが最適であると考えられる。実際に補正電磁石を稼働する際には上述の強度の3倍程度を見積もっておくことでおおよそのCODに対応することが可能である。つまり水平方向、垂直方向の補正電磁石強度はそれぞれ0.6mrad、0.2mrad程度とすべきである。またこのときの補正後のCODは水平方向、垂直方向それぞれ約100 μ m、約40 μ mである。

4. 結言

中部シンクロトロン光源における電子軌道歪みのシミュレーションを行った。偏向電磁石磁場誤差0.1%、偏向電磁石据付誤差0.2mrad、四極電磁石据付誤差100 μ m、超伝導電磁石磁場誤差1%を仮定すると、軌道水平方向では最大約9.5mm、超伝導電磁石の影響を考慮しない場合約4mm、軌道垂直方向では最大約1.8mmのCODが予想される。水平、垂直方向でCODに最も影響を与える因子は、それぞれ超伝導電磁石磁場誤差、偏向電磁石の据付誤差であった。またシミュレーション結果を基にCOD補正に必要な補正電磁石強度の決定を行った。その結果軌道水平方向では0.6mrad、垂直方向では0.2mradの補正電磁石強度が必要であると考えられる。またこのとき、補正後のCODは軌道水平方向、垂直方向にそれぞれ約100 μ m、約40 μ mと予想される。

<参考文献>

- [1] Yoshifumi Takashima et al., "Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility Project", Journal of the Japanese Society for Synchrotron Radiation Research, Vol.21, No.1 Jan.2008,p10-18.
- [2] H.S.Kang et al., "Analysis of slow orbit movement in PLS storage ring," Proceeding of the 2003 Particle Accelerator Conference, p3383-3385,(2003).
- [3] J.Safranek, "Orbit control at synchrotron light sources", International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, p240-244,(1999).