

ESTIMATION OF ALIGNMENT ERRORS OF QUADRUPOLE MAGNETS BY COD

A. Ando¹, Y. Fukuda, S. Hisao, T. Matsubara

NewSUBARU, Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
1-1-2 Kouto, Kamigooori-cho, Ako, Hyogo 678-1205

Abstract

The alignment errors of quadrupole magnets were estimated from the revolution frequency shift and COD (Closed Orbit Distortion) shift due to the excitation perturbation of these magnets in the NewSUBARU storage ring. After the COD correction setting the obtained errors as the offset of BPM's (Beam Position Monitors), the ring circumference is only shorter than the designed value (118.731 m) by ~ 0.5 mm and the agreement of beam optics between in the real machine and in the calculation is almost complete.

閉軌道データと四極電磁石の据付誤差

1. はじめに

放射光施設ニュースバル²蓄積リング^[1]は困難であったコミッショニングの歴史性(主原因: RF contact finger の垂れ下がりによるアパーチャーの狭窄)から、COD補正用水平方向ステアリング電磁石(sth)の設定に偏りがあり、RF周波数も設計値から大きくずれた 499.9555 MHzで軌道長は設計値: 118.731 mより 2.6 mm 以上短くなっている。従ってCOD補正を初心に戻ってやり直すことが、以下に述べるように大きな課題である。

2. ことの起こり

蓄積リングは周期2の鏡像対称であるが、六極や八極などの高次非線形磁場の奇数次のフーリエ成分が大きく、ベータatron振動数(チューン: ν_x, ν_y)の動作点を大きく制限している。高次非線形磁場の主原因は四極電磁石や偏向電磁石の系統的高次成分及びこれらの磁石中でのCODであると考えられるので、CODが充分小さい限り、偶数次のフーリエ成分しか発生しないはずである。

またsthの設定値の規格化されたフーリエ成分: $J_n = (1/2) \int_{-\pi}^{\pi} x^{1/2} \exp(in\theta) d\theta$ (t番目のsthのキックは x_t でベータと位相はそれぞれ β_t, ϕ_t) のゼロ成分(平均値)は図1の黒丸と実線で示すようにゼロでない。

更にチューン動作点を変えるたびにCOD補正を常にやり直している。

NewSUBARUリングの特徴である $\nu_p < 0$ 運転^[2]で且つ $|\nu_p| \ll 1$ では、COD補正中に $\nu_p > 0$ となることがしばしば生じた。

以上から前述した軌道長問題も含め、電子ビームは磁石中心を通過しているか確認することとした。

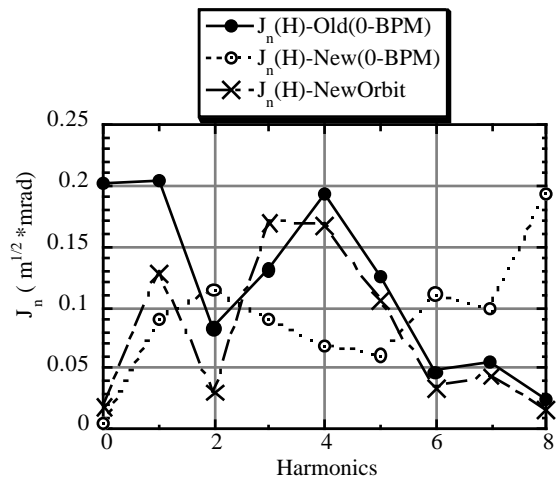


図1: 規格化されたsthのフーリエ成分(単位: $m^{1/2}$)

3. QM 摂動による COD Shift

電子ビームは放射励起と減衰により、設定された磁場に対して、回転周波数の h (Harmonic Number) 倍が RF 周波数と一致するようにエネルギーを変えるので、水平方向(x) 軌道は式(1)で表される。ここに本来の RF 周波数 $f_0(l)$ はこの磁場設定で決まる軌道長: $L(l)$ に対応しているが、データからでは何も分からない量である。 δx は磁石の据付誤差である。(1)式を $L(l)$ で割り全周について積分すると、この軌道長の $L(l)$ からのずれ $L(l)$ が(2)式のように求まる。但し所謂 Smooth Approximationを用い、 $\int_{-\pi}^{\pi} G(s) x(s) ds = 0$ 等とした。また六極電磁石の寄与を無視した。

¹ E-mail : ando@lasti.u-hyogo.ac.jp

² <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/Index-J.html>

$$x(s) = A\sqrt{\beta(s)}\{ \sqrt{\beta_k}K_t \cos(t) - \sqrt{\beta_j}G_j(x_j - \delta x_j)\cos(j) + \sqrt{\beta_k}S_k(x_k - \delta x_k)^2 \cos(k)\} + D(s)d(1)$$

$$A = 1/(2\sin\pi\nu), \quad \cos(t) = \cos(\pi\nu - |\psi(s) - \psi_t|) \quad (1)$$

$K = (\text{Kick-by-steering \& Error})$

$G = B' \ell / (B\rho), \quad SB'' \ell / (B\rho)$

$D = (\text{Dispersion}), \quad d(1) = -\{f_{RF} - f_0(1)\} / f_0(1) / \alpha$

$$L(1) = K_t D_t + G_j \delta x_j D_j + d(1)\alpha L(1) \quad (2)$$

以上では、次の関係式を用いている。

$$D(s) = \frac{1}{2\sin\pi\nu} \int_0^s \frac{\beta^{1/2}(s')}{\rho} \cos\{\pi\nu - |\psi(s') - \psi(s)|\} ds$$

四極電磁石の励磁の強さを $G_j \Rightarrow G_j + g_j$ と変えたとき、同じ RF 周波数にて $x \Rightarrow x + z$ となり、軌道長も更に、 $\delta L(2)$ 長くなったとすると、

$$L(1) + \delta L(2) = K_t D_t + (G_j + g_j) \delta x_j D_j + d(2)\alpha L(2)$$

$$L(2) = L(1) + \delta L(2), \quad f_0(2) = hc / L(2) \quad (3)$$

(3) - (2) を整理すると以下を得る。

$$0 = g_j \delta x_j D_j - \delta L(2) \frac{f_{RF}}{f_0(1)} \left\{ 2 + \frac{\delta L(2)}{L(1)} \right\}$$

もし $d(1)=0$, 即ち $f_{RF}=f_0(1)$ であれば、

$$g_k \delta x_k D_k = 2\delta L(2) \quad (4)$$

但し添え字 k に対応する QM だけを変更。

3.1 RF 周波数設定

本来の軌道長が確定されていない段階では、BPM での測定値の平均がゼロとなるように、RF 周波数を設定した。

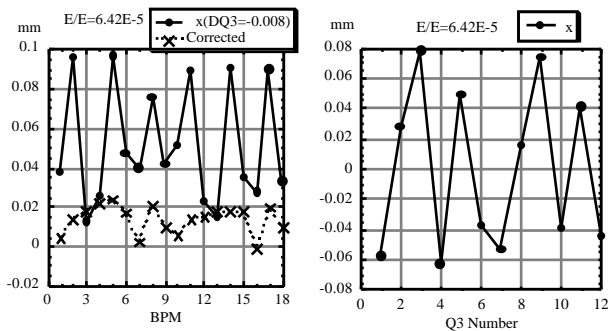


図 2 : Q3 摂動と COD Shift 及び COD 補正計算からの据付誤差評価 (ともに mm)

従来の sth 設定を忘れ COD 補正を行うと sth のフーリエ成分は図 1 の白丸と点線のようになる。5 以上に特異な大きさがあり、補正軌道の信頼性

に疑いが生じる。但し RF 周波数は ~ 499.9465 MHz で軌道長は設計値より ~ 0.5 mm 短い。

3.2 Q3 電磁石

1 2 台の Q3 に $g = -0.0083 * 0.214 = -1.71E-3$ (1/m) を与えると図 2 左の COD 変位があった。運動量分散が ~ 1.40 m 点で外側に ~ 0.1 mm ずれているので、電子は $E/E = \sim 1E-4 / 1.40 = \sim 7.14E-5$ だけ高エネルギーになっている。これは軌道長 $L(2)$ が $L(1)$ より短くなり、RF 周波数を大きくしなければならぬことを表している。これらを (4) に代入すると、 $p = \sim 1.30E-3$ として、

$$-1.71E-4 * 1.40 * 12 \quad x = -8.14E-5 * 1.30E-3 * 118.731 * 2$$

$$\delta x = 1.05 \text{ (mm)}$$

を得る。

3.3 COD Shift と QM でのキック

(1) 式を用いると、この時の COD 変位は以下となる。

$$x(s) = A\sqrt{\beta(s)} [\{-G_j x_j - G_j^*(x_j + x_j - \delta x_j)\} \cos(j) + \{S_k [2 x_k^*(x_k - \delta x_k) + x_k^2] + S_k^*(x_k + x_k - \delta x_k)^2\} \cos(k)] + D(s)\{d(2) - d(1)\}$$

$$A\sqrt{\beta(s)} G_j \delta x_j \cos(j) \cos(k) + D(s)\{d(2) - d(1)\} \quad (5)$$

後半では $|x|, |\Delta x| \ll |\delta x|$ とし、六極も無視した。これを用い図 2 左を解析すると図 2 右を得る。

Q3 の配置は BPM : 2, 5, 8, 11, 14, 17 の両側に、(1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8), (9, 10), (11, 12) である。

3.4 ビームによる確認

上記 2 方法で推定された据付誤差をもとに、対応する BPM にオフセットを与えて軌道補正し、QM 励磁変更に伴う COD 変位の最小のオフセットを求めた。3.3 項での COD 補正 -> キック -> δx では近似(5)を用いているが、実際の x ではこれが成り立っておらず、結果は 3.2 項の評価式 (4) に対応した δx : **0.95 mm** が最適値であった。他の QM に対しても、COD 補正計算を目安にして Try & Error で解を求めると以下となった。これを新軌道と呼ぶことにする。

BPM No.	BPM Offset 値 (mm)
1	1.0
2	0.95
3	0.05
4	-0.15
5	0.95
6	-0.15
7	0.5
8	0.95
9	-0.25
10	-0.2
11	0.95
12	0.4
13	0.0
14	0.95
15	0.5
16	0.75
17	0.95
18	0.42

これを基準に QM の強さ : $B' / (B) = -0.008 \text{ (m}^{-2}\text{)}$

変更したときの COD 変位は図3のようになった。
(上記オフセット無しでは 40~ 100 μm である。)

きさである。即ち Betatron Tune は変化していない
と考えられる。

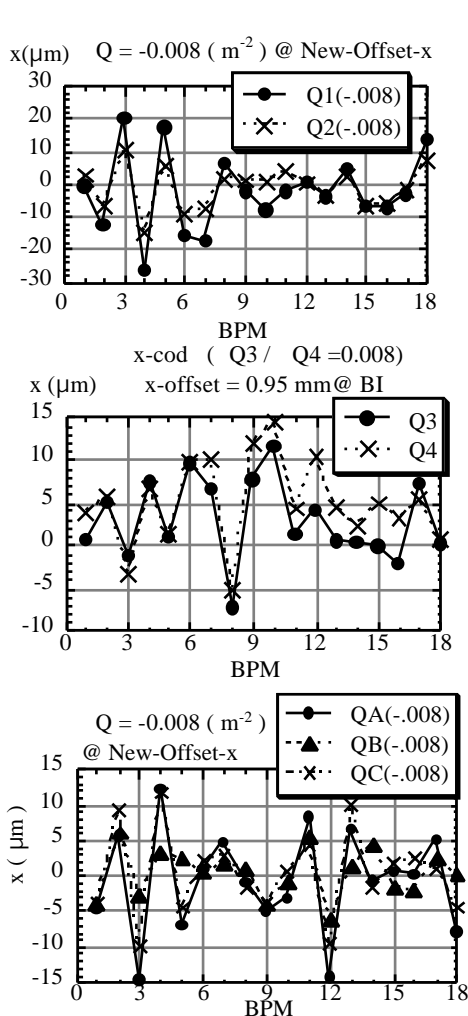


図3：新軌道でのQM摂動とCOD変位(μm)

20 μm 以下は六極電磁石の寄与などがあり、実現
は不可能であった。

RF 周波数は ~ 499.9467 MHz と COD = 0 とほぼ
同一で軌道長は設計値より ~ 0.5 3mm 短い。

4 . 六極電磁石摂動と Tune Shift

上記新軌道での六極電磁石の設定を変更したとき
の COD と Tune の変位を測定した。(図4)

台数及び変化の強さは以下の通り。

S1	S2	SF	SD	台
8	8	12	12	
-1.32	1.32	0.66	-0.655	$\text{LB}^2/(\text{B}) \text{m}^{-2}$

これらによる Tune Shift は $-(1.0\text{E}-4 \sim 1.0\text{E}-3)$ で
あり、Synchrotron 振動のチューンが $\sim 2\text{E}.0\text{E}-3$ である
ことを考慮すると、上記シフトは測定誤差内の大

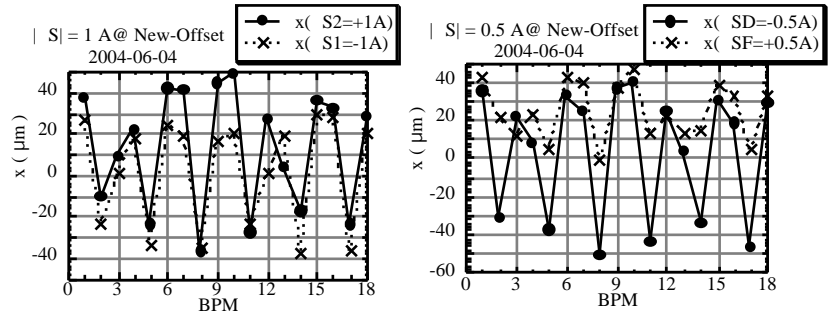
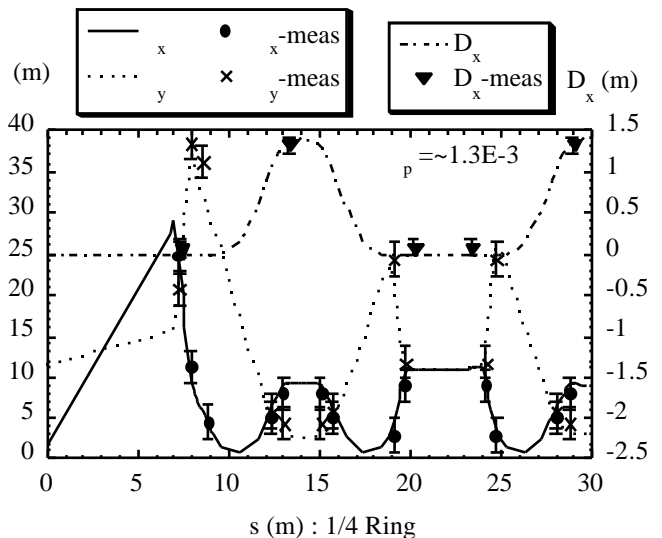


図4：六極摂動と COD Shift (μm)

この COD 変位を、対応する六極の設定変化量から
のキックの変化によるとしては説明できない。も
ともの COD や四極の影響もあると思われる。(設
置位置は、S1 & S2 は Q1 & Q2、SF & SD は Q3
& Q4 に対応。)

5 . 結論

新軌道での Twiss Parameter を測定すると、以下
のように計算値と良く一致している。



この新軌道を採用するか、或いは据付をやり直す
かについては、放射光軸の変化が伴うので、目下検
討中である。

参考文献

- [1] A. Ando, et al., " Isochronous storage ring of the New
SUBARU project ", J. Synchrotron Radiation, 5 (1998),
pp. 342-344.
- [2] A. Ando, et al., " Negative Alpha-p Operation at
NeWSUBARU ", Proceedings of the 8-th Int. Conf.
on Synchrotron Radiation Instrumentation, AIP
Conference Proceedings 705 (2004), pp. 13-16.