

## CORRECTION OF LINEAR DIFFERENCE RESONANCE COUPLING AT THE SPRING-8 STORAGE RING

M. Takao\*, M. Masaki, J. Schimizu†, K. Soutome, and S. Takano  
JASRI/SPRING-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

### Abstract

It is observed that the linear difference resonance coupling of the SPRING-8 storage ring is well described by the perturbation theory with the single resonance approximation. This fact implies that the resonance coupling can be corrected by the skew quadrupole magnets with two degrees of freedom. The detail of the coupling correction is reported.

### SPRING-8 蓄積リングにおける線形差共鳴結合補正

#### 1. はじめに

高輝度放射光光源リングでは、X-Y 結合は最も重要なパラメーターの一つである。SPRING-8 蓄積リングでは、設計段階から X-Y 結合の原因となる誤差磁場が発生しないよう工夫を凝らしてきた。例えば、電磁石の 2 段階アラインメントを徹底することにより、極力誤差磁場の影響が現れないようにした<sup>[1]</sup>。軌道補正に対しても、正しくこれが行えるようにビーム位置モニターオフセット評価手法などを開発して、COD による誤差磁場が発生しないよう努めた<sup>[2, 3]</sup>。この結果、SPRING-8 蓄積リングの X-Y 結合はコミッシング段階から極めて小さな値が実現された<sup>[4, 5]</sup>。

このように X-Y 結合は重要なパラメーターであるので、SPRING-8 蓄積リングでは定期的にチューンサーベイを行い、共鳴状態を確認している。数年前には、共鳴励起強度は 0.002 以下の低いレベルであったが、近年徐々に悪化して 0.01 を越えるまでになった。そこで、蓄積リングに設置されている 28 台のスクュー四極電磁石を用いて、線形差共鳴補正を実施することにした。本発表では、この線形差共鳴結合補正の詳細について報告する。

#### 2. SPRING-8 蓄積リングの線形差共鳴結合

##### 2.1 線形差共鳴の摂動的取り扱い

スクュー四極磁場が存在すると水平垂直ベータatron 振動は結合し、そのチューン差が整数に近づくと共鳴することになる。さてスクュー四極磁場が弱い場合、単共鳴近似を用いた摂動理論によると、共鳴励起強度  $C$  は

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

と表される<sup>[6, 7]</sup>。ここで、 $s$  は経路長、 $L$  は周長、 $K(s)$  はスクュー四極磁場強度、 $\beta_{x,y}(s)$  は無摂動系のベータ

atron 関数、 $\phi_{x,y}(s)$  はその位相、 $\nu_{x,y}$  はベータatron チューンである。また、 $q$  は整数で線形差共鳴の位数を表し、SPRING-8 蓄積リングの最近接差共鳴の場合 22 (= 40 - 18) である。このとき、結合系の固有振動のベータatron チューン  $\nu_{1,2}$  は、

$$\nu_{1,2} = \frac{1}{2} \left( \Delta \pm \sqrt{\Delta^2 + |C|^2} \right) \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 $\Delta$  は共鳴からの距離で、無摂動系のベータatron チューン  $\nu_{x,y}$  を用いて

$$\Delta = \nu_x - \nu_y - q \quad (3)$$

と表される。実験で測定されるベータatron チューンは、この固有振動のチューンである。式 (2) から明らかなように、共鳴上 ( $\Delta = 0$ ) でチューン差 ( $|\nu_1 - \nu_2| = \sqrt{\Delta^2 + |C|^2}$ ) は最小となり、共鳴励起強度に一致することになる。

単共鳴近似による摂動理論によれば、共鳴線近傍での水平ビームサイズ  $\sigma_x$ 、垂直ビームサイズ  $\sigma_y$ 、およびビームプロファイル傾き  $\theta$  はそれぞれ

$$\sigma_x^2 = \frac{\Delta^2 + \frac{1}{2}|C|^2}{\Delta^2 + |C|^2} \beta_x \varepsilon_0, \quad (4)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\frac{1}{2}|C|^2}{\Delta^2 + |C|^2} \beta_y \varepsilon_0, \quad (5)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\text{Re}(C) \sqrt{\beta_x \beta_y} \Delta}{2\beta_x \Delta^2 + (\beta_x - \beta_y) |C|^2} \quad (6)$$

と表される。ただし、 $\varepsilon_0$  は無摂動系の自然エミッタンス、 $\text{Re}(C)$  は共鳴強度の実成分である。

##### 2.2 SPRING-8 蓄積リングにおけるチューンサーベイ

垂直ビームサイズ表式 (4) から分かるとおり、共鳴励起強度に比例している垂直ビームサイズは共鳴結合測定の良いプローブである。実際、SPRING-8 蓄積リングの線形差共鳴結合の補正は、これをプローブとして実行した。また、ビームプロファイル傾きも共鳴励起強度の実部に比例していることから、これも

\* E-mail: takao@spring8.or.jp.

† On leave from JRI Solutions, Limited, Osaka 550-0013.

表 1: Parameters of the SPring-8 storage ring.

Energy [GeV]	8
Horizontal Tune	40.15
Vertical Tune	18.35
Emittance [nmrad] (Achromat)	6.6
(Low-emit.)	3.4
Synchrotron Tune	0.01

共鳴結合測定のプロープとして使えることがわかる。SPring-8 蓄積リングのビームプロファイル測定装置には、可視光干渉計 (47B2 に設置) と X 線ビームプロファイルモニター (38B2 に設置) がある<sup>[8, 9]</sup>。何れも 2 次元的測定装置なので、水平垂直ビームサイズとその傾きを測定することができる。

SPring-8 蓄積リングの主要なパラメータを表 1 に示す。SPring-8 蓄積リングのオプティクスは、double bend achromat (DBA) が基本で、その dispersion free の直線部に dispersion を漏らして、自然エミッタンスを下げた low emittance optics がある。現在の利用運転は、後者で行われている。

SPring-8 蓄積リングのチューンサーベイは、通常のアペレーションポイント (40.15, 18.35) から出発して、垂直チューン一定のまま水平チューンを上げて行き、線形差共鳴を横切るように行っている。測定例 (共鳴結合補正前) を図 1 に示す。白抜き赤丸印は

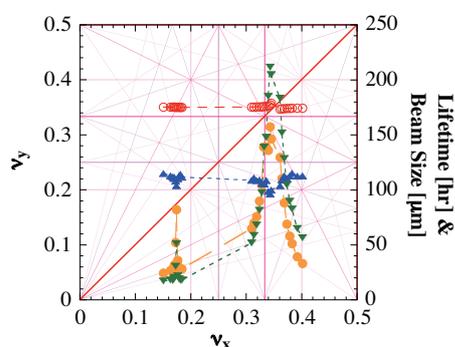


図 1: SPring-8 蓄積におけるチューンサーベイ。

ベータatronチューン、塗りつぶし橙丸印はビーム寿命、青色下三角印は水平ビームサイズ、緑色上三角印は垂直ビームサイズを表す。今回対象としている線形差共鳴 ( $\nu_x - \nu_y = 22$ ) の他に、 $2\nu_x - \nu_y = 62$  の 3 次共鳴が観測されている。ビーム寿命は、Touschek 効果が支配的な高バンチ電流値条件下で測定されており、ほぼ Touschek ビーム寿命に相当する。これはバンチ体積に比例するため、垂直ビームサイズと同じような振る舞いを示している。

線形差共鳴 ( $\nu_x - \nu_y = 22$ ) について詳しく説明する。この共鳴近傍での振る舞いを示したものが図 2 である。左上図はチューン差を示しており、その最小値から共鳴励起強度  $|C|$  は 0.012 と求められる。右上図と左下図に、X 線プロファイルモニターで測定した線形差共鳴近傍での水平垂直ビームサイズの変化を示す。実線は、先に求めた共鳴励起強度を用いてビー

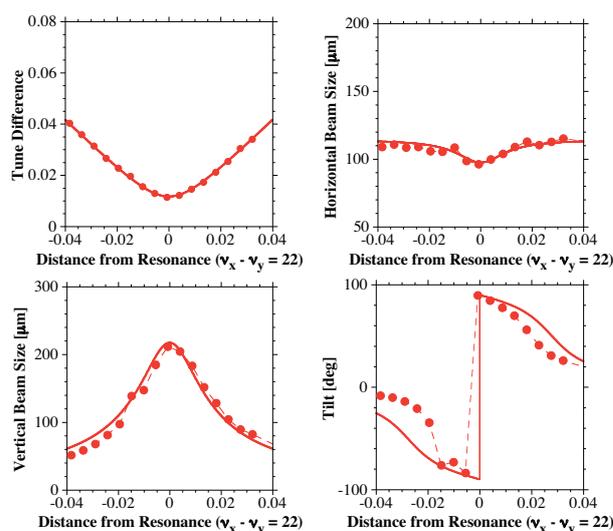


図 2: 線形差共鳴近傍でのビームの振る舞い。

ムサイズ公式 (4) および (5) から予想されるものを表す。ただし、水平ビームサイズは光源点に dispersion があるためエネルギー拡がりの寄与を含んでいる。共鳴結合により垂直ビームサイズが膨らんでいることがよく分かるが、この幅が共鳴励起強度に対応している。線形差共鳴近傍でのビームプロファイル傾きの振る舞いが右下図に示されている。ここで、実線は同じく近似公式 (6) からの予想を表す。ビームプロファイル傾きは共鳴線に近づくに従って大きくなり、共鳴線上で直立することになる。共鳴線通過後、離れるに従ってまた小さくなり、垂直ビームサイズ同様、この幅は共鳴励起強度に対応している。

### 3. 線形差共鳴結合の補正

チューンサーベイの結果を見ると、SPring-8 蓄積リングの線形差共鳴は単共鳴近似を用いた摂動理論でよく記述されていることがわかる。このことは、線形差共鳴結合は 2 自由度のスキュー四極電磁石で補正可能であることを示唆している。SPring-8 蓄積リングには、通常セル (1 セルおき) アーク部に計 20 台、4ヶ所の長直線部上下流各 1 台、計 8 台のスキュー四極電磁石が設置されており、垂直 dispersion 関数補正に使用されている。垂直 dispersion 関数補正は、近接する共鳴を励起しない条件を付けて行われており、線形差共鳴結合補正との両立は可能である。通常セルアーク部のスキュー四極電磁石は、線形差共鳴について  $\pi$  の整数倍の位相関係にあり、長直線部を挟んで符号変える配置になっている。長直線部のスキュー四極電磁石とは丁度  $\pi/2$  の位相関係にあり、線形差共鳴結合補正には都合のよい配置をしている。

線形差共鳴結合補正のためのスキュー四極電磁石調整は、通常の運転点では共鳴線から遠くて応答が観測し難いので、(40.38, 18.35) に移動して行った。まず、通常セルアーク部のスキュー四極電磁石を個別に励磁 ( $\pm 4$  A) したときの垂直ビームサイズの応答を測定した。これを図 3 に示す。セル番号 0 はス

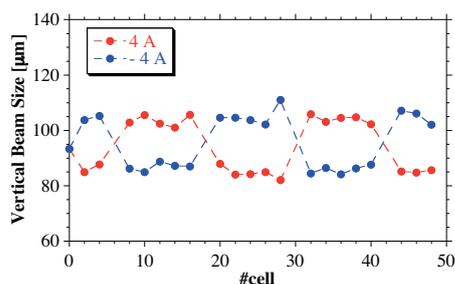


図 3: 垂直ビームサイズのアーク部スキュー四極電磁石に対する応答。

スキュー四極電磁石を 1 台も励磁していない場合の垂直ビームサイズを表している。セル 6, 18, 30, 42 は、長直線部に対応しており、この前後で応答の極性が反転している。通常セルアーク部のスキュー四極電磁石は、線形差共鳴について  $\pi$  の整数倍の位相関係にあることが確認された。長直線部のスキュー四極電磁石についても同様のことが確認された。

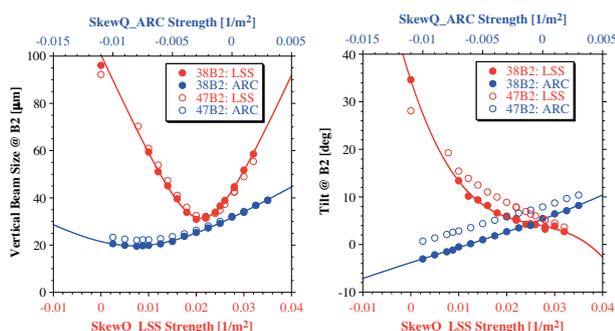


図 4: 線形差共鳴結合補正状況。

線形差共鳴結合補正は、長直線部スキュー四極電磁石を調節して垂直ビームサイズが最小となるようにした。その後、通常セルアーク部スキュー四極電磁石を調節して同じく垂直ビームサイズ最小の値を求めた。この過程を図 4 に示す。左図は垂直ビームサイズの変化、右図は同時に測定したビームプロファイル傾きである。横軸はスキュー四極電磁石強さを表しており、下軸は長直線部の合計強度（符号付き）を、上軸は通常セルアーク部のそれに対応している。赤色丸印は長直線部スキュー四極電磁石を調節したときの垂直ビームサイズおよびビームプロファイル傾きを、青色丸印は通常セルアーク部のそれを調節したときのものを表す。塗りつぶし丸印はビームプロファイルモニターで測定したデータを、白抜き丸印は可視光干渉計によるものを表す。垂直ビームサイズ、ビームプロファイル傾きとも近似公式に整合して変化しており、線形差共鳴結合はよく補正されている。スキュー四極電磁石調整後、通常の運転点に戻って、垂直 dispersion 関数補正を実施して、スキュー四極電磁石設定を確定した。

線形差共鳴結合補正後、性能を確認するためチューンサーベイを実施した。結果を図 5 に示す。このときの共鳴励起強度はチューン差から求めると 0.0012

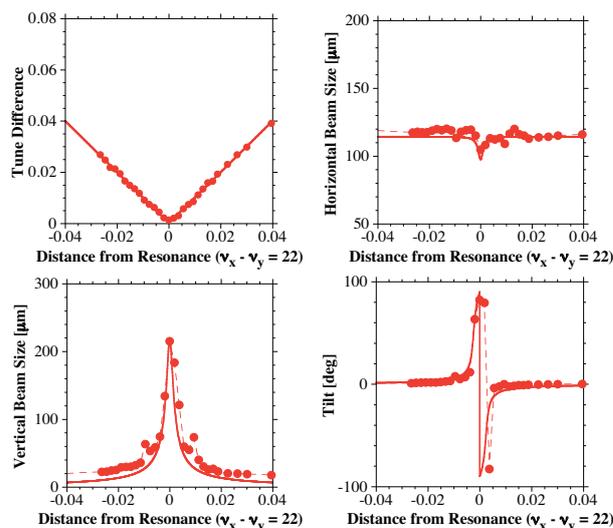


図 5: 線形差共鳴結合補正結果。

で、線形差共鳴結合補正前の十分の一になった。ビームプロファイルの振る舞いの変化を見ればわかる通り、これに呼応して共鳴線幅が狭くなっていることが確認できた。しかも、ビームプロファイル傾きの変化する方向が補正前後で逆転している。これは、公式 (6) からわかるように、共鳴励起実部の符号が変わったためと思われる。また、補正前には共鳴幅が広いために観測できなかった垂直ビームサイズのシンクロトロンサイドバンドが観測されるようになった。

単共鳴近似を用いた摂動理論に従って、SPRING-8 蓄積リングで線形差共鳴結合補正を行った。通常運転点は線形差共鳴から離れているため、この補正はビームプロファイルの改善に大幅に寄与するものではないが、これにより線形差共鳴結合が誘起する高次共鳴が抑制され、力学的安定性が改善されるものと期待される。実際、3 次共鳴 ( $2\nu_x - \nu_y = 62$ ) の励起が減衰していることが確認されている。

## 参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., Nucl. Instrum. Method **A313** (1992), 529.
- [2] M. Masaki, et al., Proc. of the 11th Symp. on Accel. Sci. and Technol. (SPRING-8, 1997), 83.
- [3] K. Soutome, et al., Nucl. Instrum. Method **A459** (2001), 66.
- [4] N. Kumagai, et al., Proc. of PAC'99 (New York, 1999), 2349.
- [5] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC'00 (Vienna, 2000), 1574.
- [6] M. Takao, Phys. Rev. ST Accel. Beams. **9** (2006), 084002.
- [7] M. Takao, Proc. of EPAC'06 (Edinburg, 2006), 1975.
- [8] M. Masaki and S. Takano, J. Synch. Rad. **10** (2003), 295.
- [9] S. Takano, M. Masaki and H. Ohkuma, Nuclear Instrum. and Method **A 556** (2005), 357.