

# SPring-8 蓄積リングにおける非線形オプティクス設計 DESIGNS OF NONLINEAR OPTICS FOR THE SPRING-8 STORAGE RING

下崎義人<sup>#</sup>

Yoshito Shimosaki<sup>#</sup>

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

## Abstract

In order to expand an off-momentum dynamic aperture at the SPring-8-II storage ring, a code for solving the simultaneous equations concerning the nonlinear resonances, the amplitude dependent tune shifts, the nonlinear chromaticities, etc. has been developed [1]. For its demonstration, the sextupole magnetic fields at the present SPring-8 storage ring have been optimized with this code. The evaluated sextupole fields were set to the ring, and then the several beam dynamic phenomena have theoretically and experimentally been examined.

## 1. SPring-8 蓄積リングについて

SPring-8 蓄積リングは 8 GeV・100 mA の電子ビームを蓄積して、 $10^{20}$  photons / sec / mm<sup>2</sup> / mrad<sup>2</sup> / 0.1 % B.W. の硬エックス線をユーザー実験に供給する、第 3 世代の大型放射光施設である。SPring-8 蓄積リングのラティス関数を Figure 1 に、主要なパラメーターを Table 1 に与える。

SPring-8 蓄積リングは元々、“unit cell” x 9 + “matching cell” + “30m long drift” + “matching cell”を 4 回繰り返す、4 回対称リングであったが、2011 年に狭ギャップアンジュレータ導入のためにリングの一部が改造され、ラティス関数の対称性が一部崩れた (Figure 1 参照) [2]。六極磁石も周期条件から外れた場所に移設されたため、現在の SPring-8 蓄積リングは四極・六極共に 1 回対称なリングと言える。一般に、リングの対称性が高い程、ビームの安定性は増す。逆に対称性の低い放射光リングでは、ユーザーに硬エックス線を安定供給する為、ビーム安定領域の確保が重要な課題のひとつとなる。

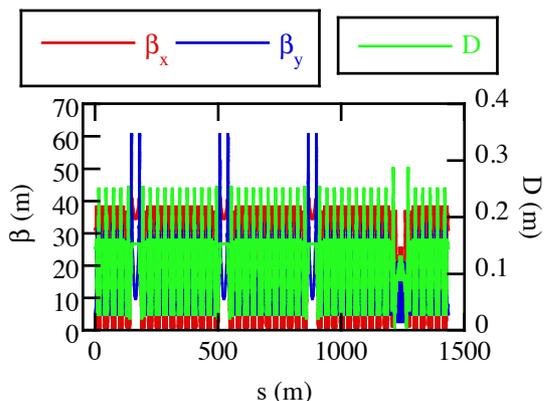


Figure 1: Lattice function at the SPring-8 storage ring.

Table 1: Main Parameters of the SPring-8 Storage Ring

Natural emittance	2.41 nm.rad
Sigma of energy spread	0.11 %
Tune	(41.14, 19.35)
Natural chromaticity	(-117, -47)

## 2. 遺伝的アルゴリズムに頼らない、非線形オプティクス最適化

SPring-8 蓄積リングの 1 回対称リング化に伴い、六極磁石のファミリー数は 31 となった。計 31 自由度の六極磁場係数 ( $k_1 \sim k_{31}$ ) を用いて、SPring-8 の非線形オプティクスを構築することとなる。今回、非線形オプティクスを構築するための目的関数として

1. 線形クロマチシティ
2. バンプ軌道内に設置された六極によるバンプ軌道の漏れ [3]: トップアップ入射の度に蓄積ビーム、すなわち光源が振動するので、バンプ漏れを最小となる六極パラメーターを決定する必要がある
3. on-momentum / off-momentum 粒子に関する非線形共鳴ポテンシャル振幅 [4]
4. (電子の運動量偏差を  $\delta$  と定義すると)  $\delta^2$  に関する非線形分散関数 ( $D_1$ ) [4]
5.  $x$  及び  $y$  方向の振幅依存チューンシフトの内、作用変数 ( $J_x$  及び  $J_y$ ) の 1 次に関する成分 [5]
6.  $\delta$  方向の振幅依存チューンシフトの内、 $\delta^2$  に関する成分 [6]。ただし  $D_1$  を含む項は除く

を選択した。これらは逐次的に補正すると互いの補正条件が崩れてしまう事から、同時に補正する必要がある。これら最適化はビーム物理現象を理解しながら行うことが望ましい。よって最近流行の遺伝的アルゴリズム等のメタヒューリスティックな探索法は用いず、SPring-8-II 用に開発したアルゴリズム [1]、すなわち上記ビーム物理現象に関する、 $k$  の 1 次及び 2 次に関する連立方程式

<sup>#</sup> shimosaki@spring8.or.jp

$$\begin{pmatrix} \text{coef. of linear chromatic term} \\ \text{coef. for suppression of bump leakage} \\ \text{coef. of resonant term } (\delta=0, \delta \neq 0) \\ \text{coef. of 2nd order dispersion} \\ \text{coef. of amp. dependent tune } (x, y) \\ \text{coef. of 2nd order chromaticity} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \\ k_1^2 \\ \vdots \\ k_i k_j \\ \vdots \\ k_n^2 \end{pmatrix} = \text{goals} \quad (1)$$

を立てて、一意に  $k$  の決定を行う手法を採用した。

### 3. 非線形オプティクス最適化条件

四極・六極共に 1 回対称なリングと言える SPring-8 蓄積リングにおいて、今回特に、振幅依存チューンシフトと入射効率を改善することを目的とした。このときの補正条件、すなわち式(1)の goals に入力した設定値について、共鳴ポテンシャル振幅の設定値を Table 2 に、振幅依存チューン

$$v_x = v_{x0} + \alpha_{xx} J_x + \alpha_{xy} J_y + \xi_x \delta + \alpha_{px} \delta^2 \quad (2)$$

$$v_y = v_{y0} + \alpha_{yx} J_x + \alpha_{yy} J_y + \xi_y \delta + \alpha_{py} \delta^2 \quad (3)$$

(ただし  $v_0$  は bare tune、 $J$  は作用変数、 $\xi$  は線形クロマティシティ)の係数に関する設定値を Table 3 に、 $D_1$  振幅の設定値を Table 4 に与える。

Table 2: Amplitudes of Nonlinear Resonant Potentials

		Original Sxs ~ Oct. 2015	New Sxs Oct. 2015 ~
$v_x \sim \text{int. (1)}$	Real	0.5	0.0
	Im.	-1.3	0.1
$v_x \sim \text{int. (2)}$	Real	26.6	0.0
	Im.	11.2	0.0
$3v_x \sim \text{int.}$	Real	-0.9	-0.1
	Im.	10.0	8.8
$v_x + 2v_y \sim \text{int.}$	Real	7.2	-7.4
	Im.	6.0	-6.1
$v_x - 2v_y \sim \text{int.}$	Real	126.8	120.4
	Im.	47.5	45.2
$2v_x \sim \text{int.}$	Real	20.3	19.5
	Im.	-15.6	-15.0
$2v_y \sim \text{int.}$	Real	5400.8	5038.7
	Im.	24884.7	25375.8

Table 2 ~ 4 の内の赤字で示した部分が、今回、六極

電源の許容する範囲内で、積極的に抑制した項となる。非線形共鳴については、整数共鳴の実部と虚部、及び 3 次共鳴の実部に関して補正を行った。振幅依存チューンの係数に関しては transverse 方向の振幅に関してチューンシフトが抑制されるように、係数の設定を行った。それ以外の項に関しては、ほぼ六極磁場係数の変更前後で値が変わらないように、設定値を調整した。

Table 2~4 の設定値と連立方程式(1)から、これらを満たす六極磁場係数の解析解 ( $k_1 \sim k_{31}$ ) を求め、SPring-8 で開発された symplectic integrator の CETRA [7] と SPring-8 蓄積リングの実機に適用し、ビーム物理諸現象に関する結果の比較を行った。

Table 3: Coefficients of Amplitude Dependent Tunes

	Original Sxs ~ Oct. 2015	New Sxs Oct. 2015 ~
$\alpha_{xx}$	-14619	-7310
$\alpha_{xy}$	6206	1241
$\alpha_{yy}$	-3106	-1553
$\xi_x$	3.0	3.0
$\xi_y$	3.0	3.0
$\alpha_{px}$	-45869	-45869
$\alpha_{py}$	10551	10551

Table 4: Amplitudes of  $D_1$

	Original Sxs ~ Oct. 2015	New Sxs Oct. 2015 ~
Real part	175.3	132.4
Imaginary part	-105.0	-76.7

### 4. CETRA トラッキング結果、及び SPring-8 実機での測定結果

まず「 $x$  方向チューンの  $x$  方向振幅依存性」の結果を Figure 2 に、「 $y$  方向チューンの  $x$  方向振幅依存性」の結果を Figure 3 に示す。測定ではバンプ電磁石で初期

振幅を与えて single path BPM でビーム重心を測定し、その FFT スペクトルを取得した。横軸を初期振幅、縦軸をチューンとし、FFT スペクトルの高さについて色を変えながらプロットしている。

X 方向振幅依存チューンについて、トラッキング結果と測定結果とがほぼ一致し、解析通りに振幅依存チューンシフトが抑制されているという結果となった。

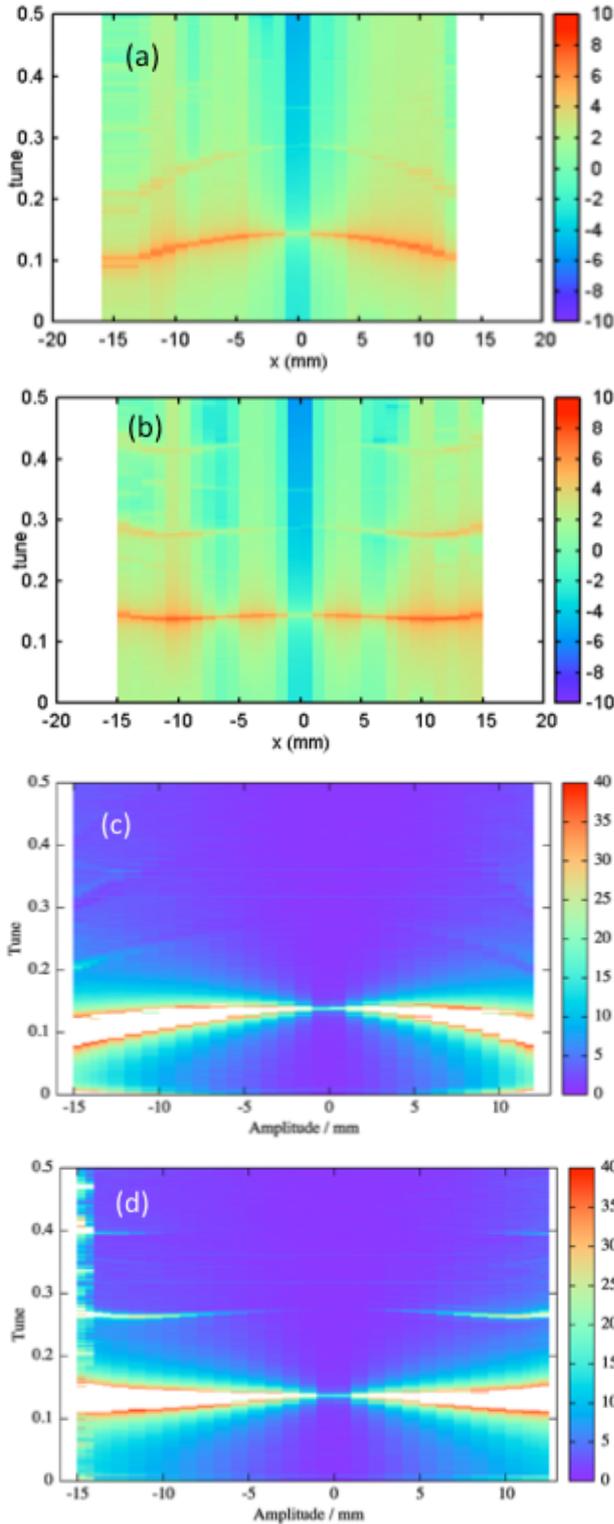


Figure 2:  $\nu_x$  dependent on  $x$  with (a) original Sxs (cal.), (b) new Sxs (cal.), (c) original Sxs (meas.), and (d) new Sxs (meas.).

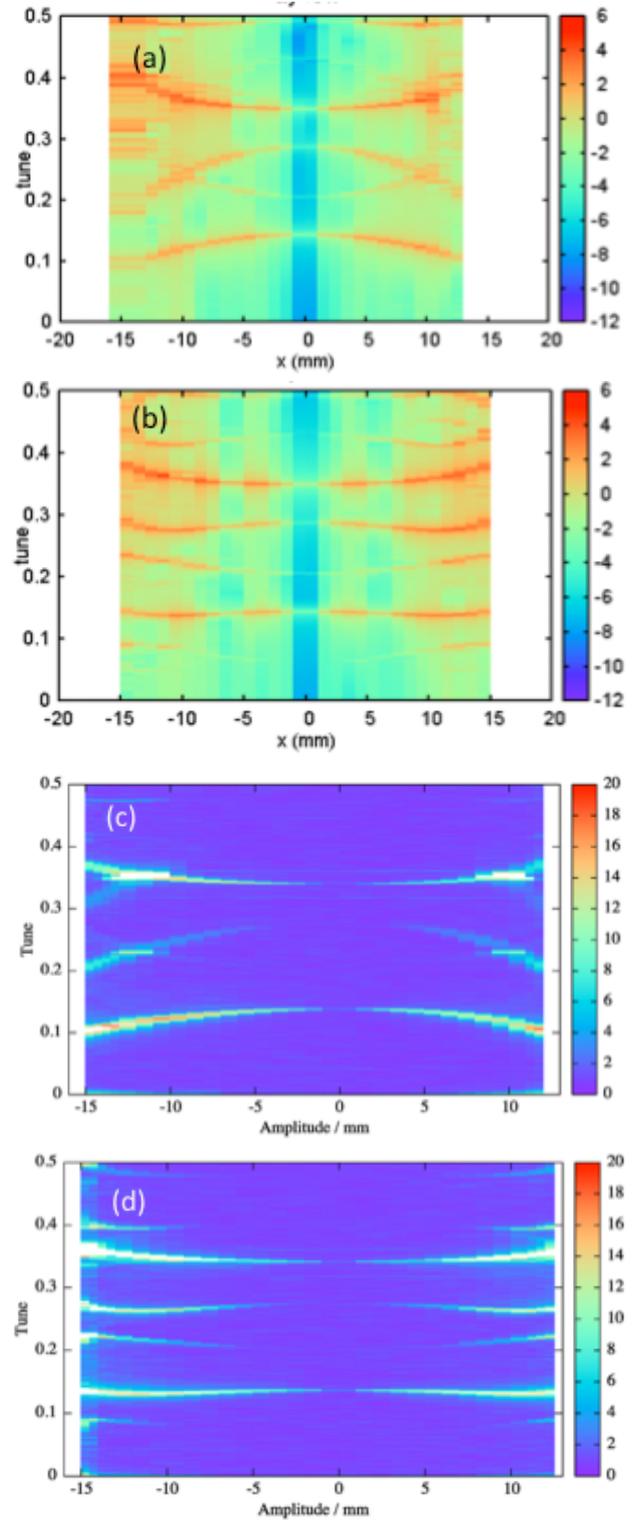


Figure 3:  $\nu_y$  dependent on  $x$  with (a) original Sxs (cal.), (b) new Sxs (cal.), (c) original Sxs (meas.), and (d) new Sxs (meas.).

次に  $x$  方向及び  $y$  方向チューンの  $y$  方向振幅依存チューンについて、トラッキング結果を Figure 4 に示す (SPring-8 では  $y$  方向振幅依存チューンを測定する手段がないので、測定結果は与えていない)。

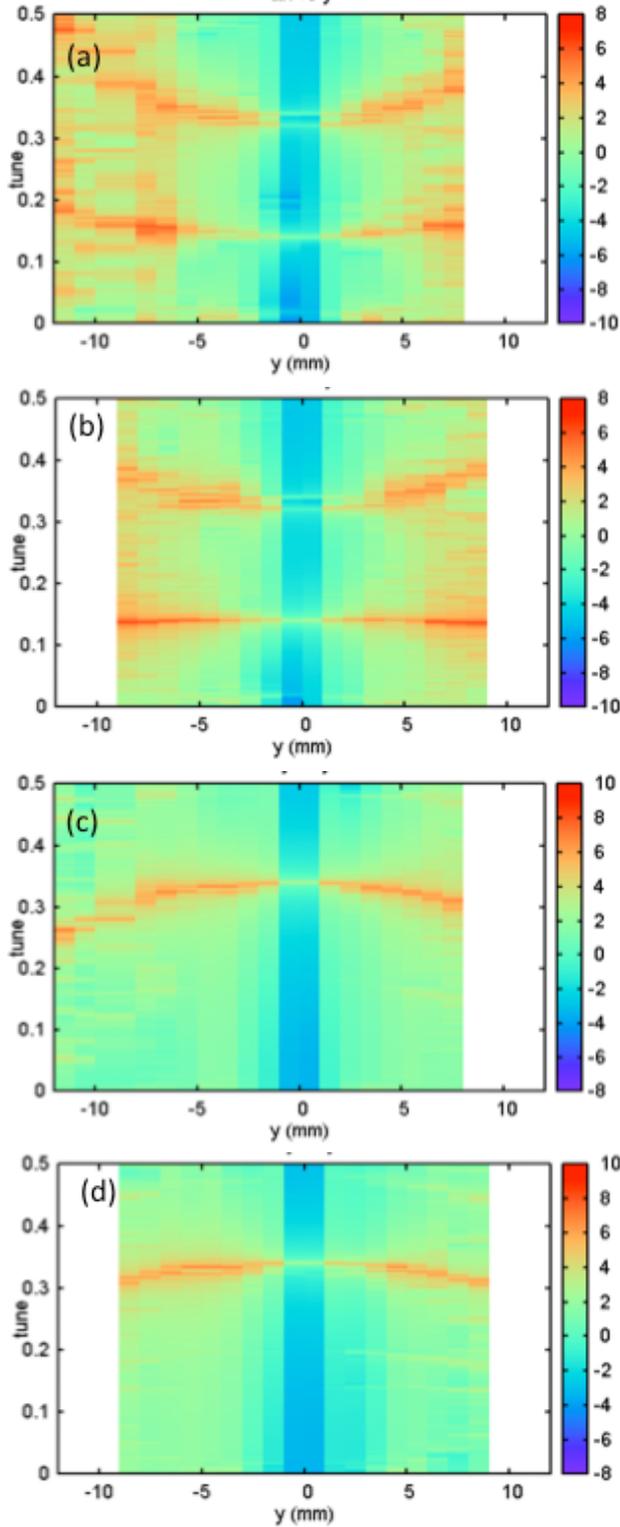


Figure 4:  $\nu_x$  dependent on  $y$  with (a) original Sxs (cal.) and (b) new Sxs (cal.), and  $\nu_y$  dependent on  $y$  with (c) original Sxs (cal.) and (d) new Sxs.

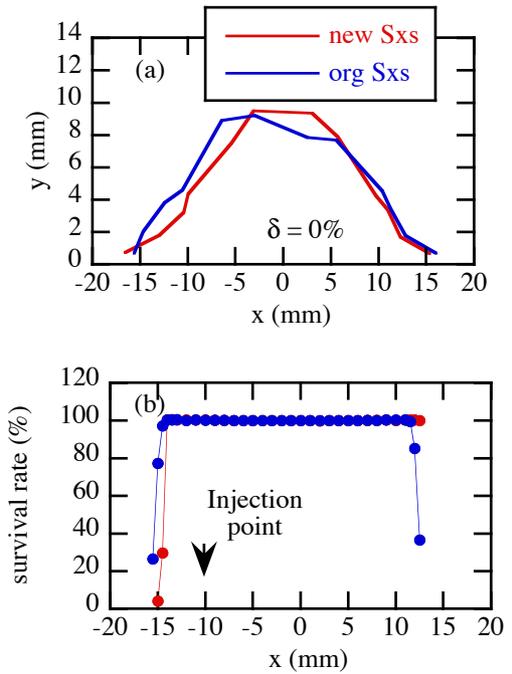


Figure 5: Dynamic aperture. (a) Tracking results with CETRA and (b) measurement results.

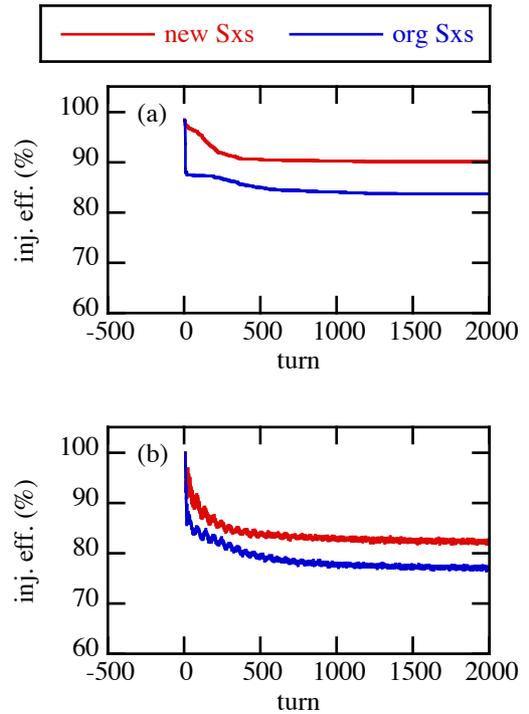


Figure 6: Injection efficiency. (a) Tracking results with CETRA and (b) measurement results.

$Y$  方向振幅依存チューンに関しても、トラッキング結果は概ね解析値を再現し、振幅依存チューンシフトが抑制されているという結果となった。 $X$  方向振幅依存チューンに関してトラッキング結果と測定結果がほぼ定

量的に一致しているの、実機においても y 方向振幅依存チューンシフトは抑制されているものと思われる。

「入射部におけるダイナミックアパーチャー」のトラッキング結果と測定結果(バンパ電磁石で初期振幅を与え、2048 ターンまでの生存率を測定した)を Figure 5 に与える。SPring-8 における入射点は  $x = -10$  mm の位置であり、両者ともそれを十分にカバーできる程度のダイナミックアパーチャーが存在する結果となった。

入射効率に関する結果を Figure 6 に示す。トラッキング結果と測定結果は定性的に一致した(トラッキングでは、入射ビームの条件を実機と厳密には合わせていないので、測定結果と定量的には一致しない)。すなわち(1)トラッキングでは入射効率が 83.7%から 90.2%に改善するという結果だったのに対し、測定では 79.2%から 83.9%に改善されるという結果になった。また(2)トラッキング及び測定共に、入射直後に 20 ターン以内の生じる急峻なビームロスが抑制される結果となった。共鳴補正の効果と思われる。

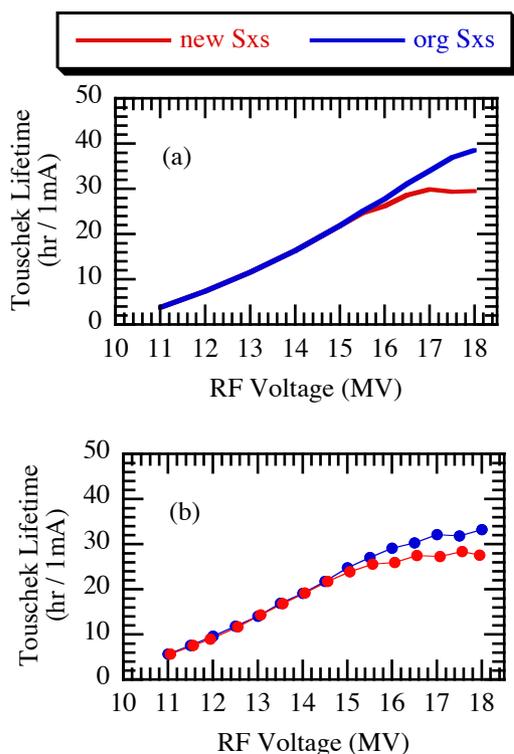


Figure 7: Tauschek lifetime. (a) Calculations with Piwinski's formula and (b) measurement results.

最後に、Tauschek ビーム寿命について、Piwinski の公式[8]を用いた計算結果と、21 バンチ 21mA で RF 電圧を変えながら測定した結果を Figure 7 に示す。解析の際、線形クロマティシティ( $\xi_x, \xi_y$ )、2 次のクロマティシティ( $\alpha_{px}, \alpha_{py}$ )、及び 2 次の分散関数( $D_1$ )が概ね変わらないように境界条件を与えたので、Tauschek ビーム寿命は変化しないと予想していたが、計算結果・測定結果ともに、横方向運動がモーメントアクセプタンスを支配する RF 電圧の高い領域において、元の六極磁場係数に比べ新しい六極磁場係数の方が、ビーム寿命が減少するという結果となった(測定結果からモーメントアク

セプタンスは 3.3%から 3.1%に減少しているものと思われる)。新しい六極磁場係数ではオフモーメント粒子に関する非線形共鳴  $2\nu_x \sim \text{int}$  の虚部のみ、元の六極磁場係数時に比べ強くなっているため、これが原因でモーメントアクセプタンスが微減したのではないかとと思われる。ただし、ユーザー運転に使用される RF 電圧は 14~16 MV であり、Figure 7 から、この RF 電圧領域では元の六極磁場係数と新しい六極磁場係数で、ビーム寿命はほとんど変わらないので、ユーザー運転には影響ないものと思われる。

## 5. まとめ

四極・六極共に 1 回対称なリングと言える SPring-8 蓄積リングにおいて、振幅依存チューンシフトと入射効率を改善することを目的とし、非線形オプティクス最適化を行った。最適化の際はビーム物理現象を理解しながら行うことが望ましく、よって最近流行の遺伝的アルゴリズム等のメタヒューリスティックな探索法は用いず、線形クロマティシティ、非線形共鳴、振幅依存チューンシフト等を同時に補正するための“ビーム物理諸現象からなる連立方程式”を立てて、一意に六極磁場係数を決定した。

解析的に求めた六極磁場係数を、SPring-8 で開発された symplectic integrator の CETRA と SPring-8 蓄積リングの実機に適用し、ビーム物理諸現象に関する結果の比較を行った。当初の目的通り、振幅依存チューンシフトと入射効率が改善されることを計算・測定共に確認した。Tauschek ビーム寿命に関しては、RF 電圧の高い領域においてビーム寿命の低減が見られた。ただし、ユーザー運転に使用される RF 電圧領域(14~16 MV)においては、元の六極磁場係数と新しい六極磁場係数で、ビーム寿命はほとんど変わらないので、ユーザー運転には影響ないと思われる。

2015 年 10 月より、この新しい六極磁場係数が SPring-8 のユーザー運転に適用されている。

実機での測定の際、運転員の方々に御助力を頂いた。感謝致します。

## 参考文献

- [1] Y. Shimosaki, “Design of nonlinear optics for the SPring-8-II”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (Tsuruga, 2015), pp. 468.
- [2] K. Soutome *et al.*, “Local modification of lattice of a long straight section for installing small gap in-vacuum undulators at SPring-8”, Proc. of IPAC2012, TUPPC015.
- [3] H. Tanaka *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 539, 547 (2005).
- [4] Y. Shimosaki, K. Soutome, J. Schimizu, K. Kaneki, “Dynamic aperture correction for very low-emittance storage ring of SPring-8-II”, Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (Tsukuba, 2011), pp. 195.
- [5] S.Y. Lee, “Accelerator Physics Second edition”, World Scientific 2004.
- [6] M. Takao, Phys. Rev. E 72, 046502 (2005).
- [7] J. Schimizu *et al.*, Proc. of 13th Symp. on Accel. Sci. and Tech., (Osaka, 2001), pp.80-82.
- [8] A. Piwinski, “The Tauschek effect in strong focusing storage ring”, DESY 98-179, 1998.