

SPring-8 蓄積リングのオフモーメント粒子の運動と モーメントアクセプタンスについて

OFF-MOMENTUM PARTICLE MOTION AND MOMENTUM ACCEPTANCE AT THE SPRING-8 STORAGE RING

高雄勝*, 早乙女光一, 下崎義人

Masaru Takao*, Kouichi Soutome, Yoshito Shimosaki

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

At the low emittance storage rings like a high brilliance radiation light source, the electron-electron scattering in a bunch, *i.e.* Touschek effect, dominates in beam lifetime. Originally in Touschek scattering, the electron exchanging the energy through the collision spills out the RF bucket and is lost. Besides, the off-momentum particle starts to oscillate around the dispersion orbit with the amplitude proportional to the momentum deviation, so that the momentum acceptance is also limited by the transverse dynamics. The SPring-8 storage ring consists of the 44 double bend unit cells and the 4 long straight sections, and the dynamical stability is secured by the phase matching in the matching sections for the on-momentum particle and the local chromaticity correction for the off-momentum particle. The latter correction is carried out by optimizing the focus sextupole magnets in the arc section of the matching cells, so that the momentum acceptance is made large almost up to that limited by the RF bucket in the high RF accelerating voltage of the user operation. The tracking simulation shows that the particle motion of the momentum deviation over the threshold limited by the sextupole magnet becomes stochastic and that the oscillating amplitude grows large leading to the beam loss.

1. はじめに

高輝度放射光リングなど低エミッタンス電子蓄積リングでは、バンチ内電子電子散乱即ち Touschek 散乱がビーム寿命に対して支配的な影響を与える。元来、Touschek 散乱では衝突によりエネルギー交換した電子が RF バケットから溢れて失われるのであるが、オフモーメント粒子にとってはディスパージョンが中心軌道であるため、これを中心にモーメント偏差に応じた振幅で振動するので、モーメントアクセプタンスは横方向の力学によっても制限を受ける。SPring-8 蓄積リングは、44 double bend unit cell と 30 m の長直線部 (LSS) 4ヶ所からなり、蓄積リングの安定性は長直線部 (上下流のマッチングセルを含む) の on momentum 粒子に対する位相整合と off momentum 粒子に対する局所クロマティシティ補正で確保されている。後者は、マッチングセルの収束 6 極電磁石を調整することで行われるが、これによりモーメントアクセプタンスは十分に広げられている。Touschek 散乱 (オフモーメント) 粒子の運動のトラッキング解析により、モーメント偏差が 6 極電磁石で決まる閾値を超えると運動は stochastic な様相を示すようになり、振動振幅は増幅してビーム損失に至るなど、アクセプタンスの境界領域では stochastic 現象が重要な役割を果たしていることが理解できる。

2. 前置き

2.1 SPring-8 蓄積リング

高輝度放射光光源である SPring-8 蓄積リングは、36 ノーマルセル (セル長: 30 m, double bend) と 30 m 長直線部 4ヶ所、および長直線部両側の 8 (= 4 × 2) マッチングセルから成る。長直線部の内 1ヶ所 (D ゾーン、

LSS-D) は、狭ギャップ真空封止挿入光源 (ID) を設置するため、3 連の 4 極電磁石 2 組を設置することで 3 分割し、垂直ベータトロン関数を低くしてある。SPring-8 蓄積リング全周のベータトロン関数を Fig. 1 に示す。

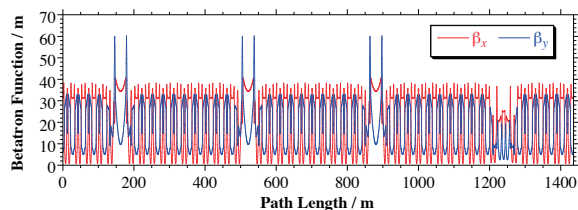


Figure 1: Betatron function.

SPring-8 蓄積リングのラティス構造は、エミッタンス低減のため、直線部にもディスパージョンを漏らした、modified double bend 構造をしており、ディスパージョン関数は Fig. 2 に示す構造をしている。LSS-D は、3 分割に改造されているため、他の LSS とは異なっており、両側のマッチングセルアーク部ディスパージョンは、他と較べて大きくなっている。後で説明する通り、局所モーメントアクセプタンスはディスパージョンに反比例するので、LSS-D では全周で最も狭くなっている。

SPring-8 蓄積リングの主要なパラメータを Table 1 に示す。SPring-8 蓄積リングの beam energy は、8 GeV と高エネルギーではあるが、高輝度化のためエミッタンスが 2.4 nm-rad と極端に低いことに加え、利用運転バンチフィリングパターンはバンチ電流の高いセベラルバンチモードが主流であるので、バンチ内電子電子散乱 (Touschek 効果) がビーム寿命に対して支配的となっている。

*takao@spring8.or.jp

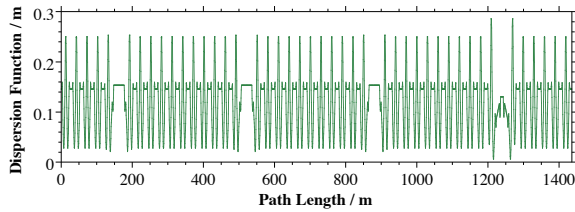


Figure 2: Dispersion function.

Table 1: Parameters of the SPring-8 storage ring

| | |
|----------------------------|-----------------------|
| Beam energy | 8.0 GeV |
| Circumference | 1436 m |
| Harmonic number | 2436 |
| Natural emittance | 2.4 nm-rad |
| Coupling ratio | 0.2 % |
| Energy spread | 0.11 % |
| Radiation loss w/o ID's | 8.91 MeV |
| RF accelerating voltage | 16 MV |
| Betatron tune (H/V) | 41.14 / 19.34 |
| Chromaticity (H/V) | 3 / 3 |
| Momentum compaction factor | 1.59×10^{-4} |

SPring-8 蓄積リングの運動学的安定性は、マッチングセクションによるベータトロン位相整合と局所クロマティシティ補正 [2]、及びカウンター 6 極電磁石による非線形キックの相殺 [3] により確保されている。LSS (マッチングセクションを含む) のオプティクスを Fig. 3 に示す。

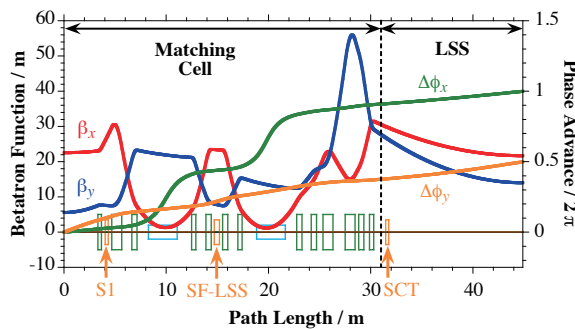


Figure 3: Optics (betatron functions β_x, β_y , phase advance $\Delta\phi_x, \Delta\phi_y$) at matching section (half).

ベータトロン位相整合は、LSS におけるベータトロン位相進度を水平/垂直ともに 2π の整数倍に取ること、on momentum 粒子に対し LSS を動力学的に透明にして、対称性を高めることにより安定性を回復するものである。Fig. 3 にある通り、SPring-8 蓄積リングでは LSS の水平位相進度: 4π 、垂直位相進度: 2π にしてある。

on momentum 粒子に対してはベータトロン位相整合により安定性を確保することができるが、off momentum

粒子に対してはマッチングセル内の 4 極電磁石による局所クロマティシティのため、ベータトロン位相整合が崩れ、モーメントムアクセプタンスが狭くなる。これを補正するため、マッチングセクションのアーキ部に 6 極電磁石 (Fig. 3 中の SF-LSS) が導入されている。SF-LSS の励磁を最適化することにより、off momentum 粒子のダイナミックアパーチャーが拡大し、Touschek ビーム寿命を十分延ばすことができる。後節において、本論文の目的であるこの局所クロマティシティ補正について詳しく解説する。

SF-LSS を励磁することにより、off momentum 粒子のダイナミックアパーチャーを拡げることができたが、これによる非線形キックにより、on momentum 粒子の安定性が損なわれることになる。この状況を改善するため、SF-LSS の非線形キックを相殺する目的でマッチングセルに 6 極電磁石 (Fig. 3 中の S1、SCT) が導入された [3]。Inteleaved Sextupole Scheme [4, 5, 6] を参考に、SF-LSS に対してベータトロン位相が π 離れた位置に 6 極電磁石を設置し、適当に励磁することで非線形キックが相殺されるようにした。ベータトロン位相が π 離れた位置にある 2 台の 6 極電磁石の強さを λ_1, λ_2 、そこのベータトロン関数を β_1, β_2 とすると、

$$\lambda_1/\lambda_2 = (\beta_1/\beta_2)^{3/2} \quad (1)$$

とすることにより非線形キックを相殺することができるが、一般には水平、垂直の両方向について満足することは困難である。そこで、入射効率や Touschek ビーム寿命を考慮する上で、水平方向のベータトロン振動が重要なので、SF-LSS から水平ベータトロン位相の差が π の位置に非線形キック相殺用の 6 極電磁石 (カウンター 6 極電磁石 SCT) を設置した。垂直方向に関しては、マッチングセクションに角度 $y'_{in} = 0$ で入ってきた電子は角度 $y'_{out} = 0$ で出ていくように、SCT とは反対側の水平ベータトロン位相の差が π に近い位置に 6 極電磁石 (Fig. 3 中の S1) を設置することで、相殺条件を近似的に満たしている。

2.2 Touschek ビーム寿命とモーメントムアクセプタンス

本論に入る前に、Touschek ビーム寿命について解説する。バンチ内の電子は、ベータトロン振動しているのである確率で衝突するが、この時交換するベータトロン振動のエネルギーは Lorentz ブーストされ、大きな縦方向エネルギー (モーメントム) 偏差となる。その結果、RF バケットから溢れて電子が失われるというのが、本来の Touschek 効果である。加えて、モーメントム偏差が突然起こると、その電子にとってはモーメントム偏差に応じたディスパージョン軌道が軌道中心になるので、その周りでベータトロン振動を始めることになる。このため、モーメントム偏差が RF バケット内であっても、横方向の運動により真空容器などの物理障壁に衝突して、ビーム損失が起り得る。実際、SPring-8 蓄積リングでは RF 加速電圧を 16 MV と十分高く取っているため、このような状況にある。

SPring-8 蓄積リングでは、バンチ電流値 1 mA において Touschek 効果がビーム損失に対して支配的となり、そのビーム寿命はほぼ Touschek ビーム寿命と見做せる。

Figure 4 は、RF 加速電圧に対する Touschek ビーム寿命の測定例である。Figure 4 中、点線はモーメントムアクセプタンスが RF 加速電圧だけから決まっているとした場合の Touschek ビーム寿命 (計算) である。RF 加速電圧で決まるモーメントムアクセプタンス $\delta_{RF\text{ acc}}$ は、

$$\delta_{RF\text{ acc}} = \sqrt{\frac{U_0}{\pi k \alpha E_0} F\left(\frac{e\hat{V}}{U_0}\right)} \quad (2)$$

(k : harmonic number, α : momentum compaction, E_0 : 電子エネルギー, U_0 : 放射損失, \hat{V} : RF 加速電圧, $F(q) = 2 \left[\sqrt{q^2 - 1} - \cos^{-1}(1/q) \right]$) となるので、RF 加速電圧の増大に従い拡大するが、これに比例する Touschek ビーム寿命は RF 加速電圧のべき乗で伸びていくことになる。

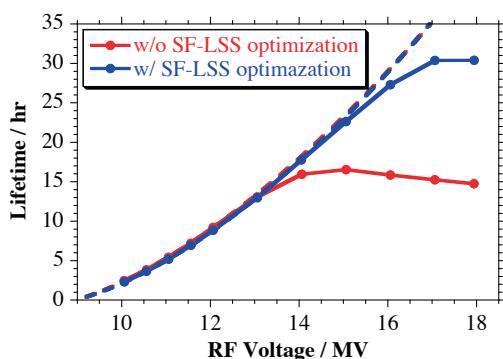


Figure 4: Measured lifetime vs. Rf accelerating voltage.

Touschek ビーム寿命の実測では、高 RF 加速電圧側で横方向運動による制限のためビーム寿命の伸びは頭打ちになっている。6 極電磁石 (SF-LSS) の調整によりモーメントムアクセプタンスは改善されており、調整前 2.4 %であったものが、調整後 3.2 %にまで拡大している。

6 極電磁石調整の過程を Fig. 5 に示す。Touschek ビーム寿命の変化が分かり易いように、RF 加速電圧を 18 MV として、SF-LSS による最適化を行った。まず、4ヶ所全ての SF-LSS を同じ値に設定しながら、モーメントムアクセプタンスの改善を行った。引き続き、3 分割の改造が施されている LSS-D の SF の最適化を実施した。前者では SF の強さが 1.5 m^{-2} でビーム寿命が最大となり、後者では SF-LSS-D が 2.0 m^{-2} が最適値であった。この

3. OFF MOMENTUM 電子の運動

ビーム損失過程を理解するために、symplectic integrator code *CETRA* [7] でトラッキングシミュレーションを行った。横方向運動によるモーメントムアクセプタンスを見るので、同じモーメントム偏差に対して振動振幅初期値が最も大きくなる LSS-D アーク部 (デースバージョンが最大値となる) で衝突したとして、その後の single particle tracking を行った。

6 極電磁石の最適化でモーメントムアクセプタンスが広げられることと、モーメントムアクセプタンスを外

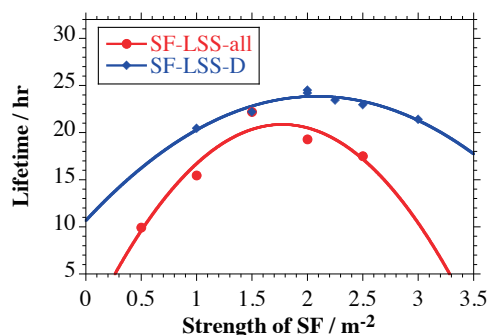


Figure 5: Lifetime vs. strength of sextupole magnet at LSS.

れた電子は水平物理口径でビームが失われることから、まずは蓄積リングの誤差磁場はオフとしてシミュレーションを行った。また、損失過程が数ターンあるいは 1 ターンもしないと、放射減衰に比較して大変早いので、純粋に横方向の運動を見るため、放射損失オフとして詳しく見ることにする。

Figure 6 は、SF-LSS を変更した際のモーメントム偏差に対して回りきった最大ターンをプロットしたものである。シミュレーションは 2048 ターンまで行っており、安定領域 (2048 ターン回りきったモーメントム偏差の領域) は、Fig. 7 のようになっていて、SF-LSS を強くしていくに従い、Touschek ビーム寿命と同様の増減の傾向を示している。

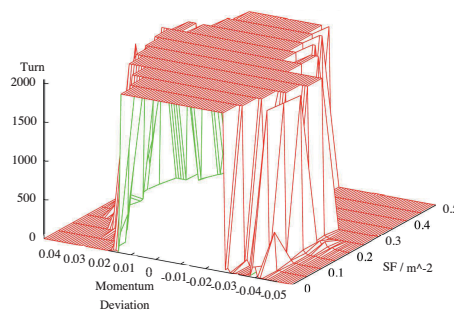


Figure 6: Maximum turn vs. the momentum deviation for the strength of SF-LSS.

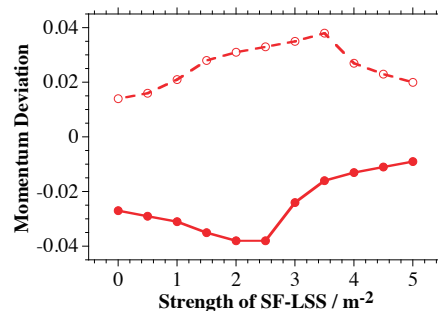


Figure 7: Stability region vs. the strength of SF-LSS.

実際の Touschek 散乱では、+/- のモーメントム偏差は対になって現れ、Touschek ビーム寿命における総計の

モーメンタムアクセプタンスとしては両者の幾何平均を取ってやれば良い:

$$\frac{1}{\delta_{\text{acc}}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{|\delta_{-\text{acc}}|} + \frac{1}{|\delta_{+\text{acc}}|} \right). \quad (3)$$

これをプロットすると、Fig. 8 のようになった。誤差磁場と放射損失をオフとした今の計算では、Touschek ビーム寿命に較べてピークの位置が SF-LSS の強い方にシフトしているが、誤差磁場と放射損失を入れることで一致するようになっている。

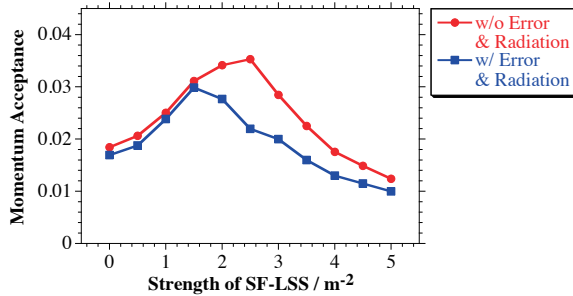


Figure 8: Momentum acceptance vs. the strength of SF-LSS.

モーメンタム偏差 1.5 % に対してターン毎の LSS-D アーク部 (Touschek 散乱の起点) での水平ビーム位置をプロットしたものが、Fig. 9 である。SF-LSS 0.0 m^{-2} では 12 ターンまで、それ以外は 2048 ターンまで周回している。最大変位は、SF-LSS の強さに従って減少している。振動の様子を観察すると、局所クロマチシティによるキックを SF-LSS (SCT を含む) が蹴り戻しているものと考えることができ、この結果、モーメンタムアクセプタンスは広がっているものと思われる。

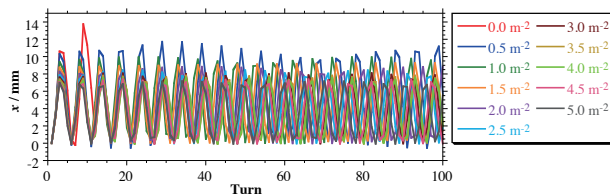


Figure 9: Turn by turn beam position.

水平ビーム位置の最大(最小)変位を、Fig. 10 に示す。モーメンタム偏差の増加に伴い最大変位は大きくなっているが、初めは線形から指数関数的に緩やかに増大していたものが、ある値で急に飛んでいるようである。しかも、SF-LSS 3.5 m^{-2} より先では、最大変位がジャンプするように変化するモーメンタム偏差は SF-LSS の強さに従って低下していく。SF-LSS によるキックが、オーバーフォーカスになっているのではないかと考えられる。

運動の様子を詳しく観察するため、位相空間プロットを行った。Figure 11 に、SF-LSS 0.0 m^{-2} , 0.5 m^{-2} , 1.0 m^{-2} に対して、モーメンタム偏差 1.0 % から 2.0 % まで、0.1 % 刻みのプロットを示す。SF-LSS 0.0 m^{-2} の場合、モーメンタム偏差 1.4 % までは運動は regular で

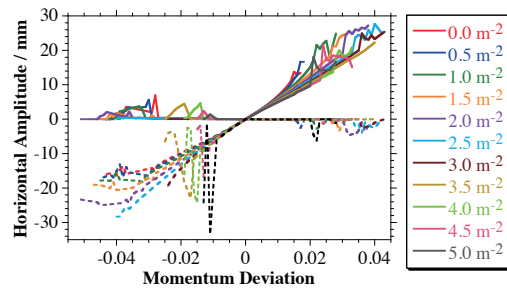


Figure 10: Maximum amplitude vs. the momentum deviation.

あるが、それ以上では stochastic になり発散している。SF-LSS 0.5 m^{-2} の場合、モーメンタム偏差 1.7 % で運動が stochastic となっている。ただし、モーメンタム偏差 1.4 % から 1.6 % までアイランド構造を示している。SF-LSS 0.5 m^{-2} の場合、ここで示していないがモーメンタム偏差 2.1 % まで regular になっており、モーメンタム偏差 2.2 % で運動が stochastic となっている。また、ここでは、SF-LSS 0.5 m^{-2} の場合に見られたアイランド構造は見られ無くなっていた。

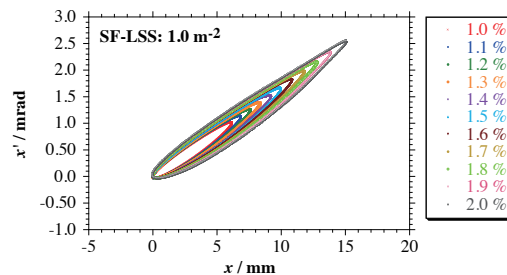
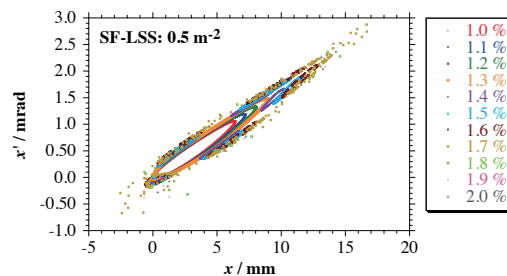
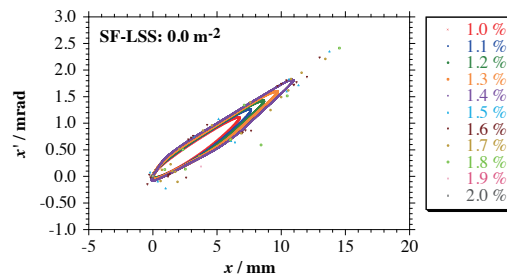


Figure 11: Phase space plot of the momentum deviation 1.0 % – 2.0 % with the strength of SF-LSS 0.0 m^{-2} (upper), 0.5 m^{-2} (middle), and 1.0 m^{-2} (lower).

4. まとめ

SPring-8 蓄積リングのモーメンタムアクセプタンスは、横方向のダイナミクスで制限を受けており、長直線部マッチングセルに設置している6極電磁石を最適化することで、モーメンタムアクセプタンスを最大化している。この過程を理解するため、トラッキングシミュレーションを行った。ビーム損失は、一義的には水平方向に放射減衰に較べて早い過程で起こっているため、シミュレーションにおいて放射損失はオフとした。また、水平方向の口径制限でビーム損失しているため、先ずは水平垂直振動のカップリングを与える蓄積リングの誤差磁場をオフとした。

ディスパージョンがある場所で Touschek 散乱した電子は、衝突により獲得したモーメンタム偏差のディスパージョン軌道を中心として振動をはじめめる。その運動はモーメンタム偏差が大きくなったところで stochastic なものになり、振動振幅が成長するようになり、物理障壁に衝突してビーム損失が起こる。stochastic 運動に移るモーメンタム偏差は6極電磁石の強さに依っており、これを最適化することによりモーメンタムアクセプタンスを改善することができる。SPring-8 蓄積リングでは、このように SF-LSS を調整することで Touschek ビーム寿命の改善を図っている。

参考文献

- [1] K. Soutome *et al.*, Proc. of IPAC12, New Orleans, USA (2012), 1188 (TUPPC015).
- [2] H. Tanaka *et al.*, Proc. of EPAC2000, Viena, Australia (2000), 1086 (TUP4A05).
- [3] K. Soutome *et al.*, Proc. of EPAC08, Genoa, Italy (2008), 3149 (THPC070).
- [4] K.L. Brown, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26** (1979), 3490.
- [5] L. Emery, Proc. of PAC1989, Chicago, USA (1989), 1225.
- [6] K. Oide and H. Koiso, Phys. Rev. **E47** (1993), 2010.
- [7] J. Schimizu *et al.*, Proc. of the 13th Symp. on Accel. Sci. and Tech., Osaka, Japan (2001), 80.