

MOMENTUM ACCEPTANCE IN THE LOW EMITTANCE OPTICS AT THE SPRING-8 STORAGE RING

Masaru Takao^{*A)}, J. Schimizu^{A,B)}, K. Soutome^{A)}, and H. Tanaka^{A)}

^{A)} JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{B)} The Japan Research Institute Limited, 1-5-8 Shinmachi, Nishi-ku, Osaka, 550-0013

Abstract

Last autumn the optics of the SPring-8 storage ring was changed for the purpose of lowering the emittance. In this paper we report the influence on the beam lifetime or the momentum acceptance caused by this optics change.

SPring-8 蓄積リング低エミッタンスオプティクスと モーメントムアクセプタンス

1. はじめに

SPring-8 蓄積リングは 8 GeV という高エネルギーではあるが、その極低エミッタンスのためにバンチ内電子電子散乱（タウショック効果）がビーム寿命に対して多大な影響を及ぼしている。利用運転にトップアップ運転^[1]が導入され、ビーム寿命はそれほど深刻な問題ではなくなったが、入射頻度増加による漏洩線量増加などを勘案すると運転上はより長いビーム寿命が望まれることに変わりはない。また、入射時の損失電子数が制限されている SPring-8 トップアップ運転の現状から、ある程度の長いビーム寿命は必須条件であると言える。

元来 SPring-8 蓄積リングは、挿入光源などが設置される直線部は無分散となるよう設計されていた。この直線部に分散を持たせることで、アーク部にある分散のピークを下げるができる^[2, 3, 4]。SPring-8 蓄積リングではこれを利用して低エミッタンスオプティクスを実現している。オプティクス変更の際にビーム寿命向上のためのマシン調整の結果、低エミッタンスオプティクスのビーム寿命は従前のアクロマットオプティクスと比べて遜色のないものとなった。スタディの結果これは、低エミッタンス化によってバンチ体積は約半分になっているが、体積減少によるビーム寿命の低下はモーメントムアクセプタンスの拡大が補っていることが分かった。ここでは、このモーメントムアクセプタンス拡大機構について説明する。

2. 低エミッタンスオプティクス

SPring-8 蓄積リングはダブルバンドアクロマットを基本構造に設計されている。リングの超周期は 4、4カ所の 30 m 長直線部を持ち、各長直線部上下流にある計 8 個のマッチングセルと 36 個のノーマルセルからなる。元のアクロマットオプティクスでは、挿入光源や RF 空洞の設置を想定して、セル間の直線部は無分散となる光学系が組まれていた。図 1 に、アクロマットオプティクスの長直線部を挟むノーマルセルとマッチングセルのラティス関数を示す。

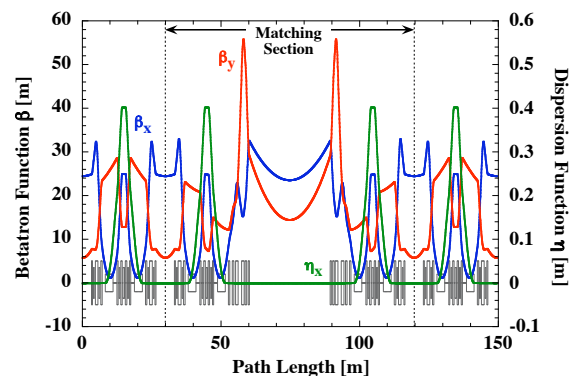


図 1: アクロマットオプティクスのラティス関数。

電子蓄積リングでは、ビームサイズは量子励起と放射減衰の平衡で決まり、量子励起は偏向電磁石中の分散関数に比例しているため、この積分を下げることによってエミッタンスを低減することができる^[2, 3, 4]。偏向電磁石中の分散関数を平均的に下げるために、直線部に分散を持たせたものが低エミッタンスオプティクスである。図 2 参照。

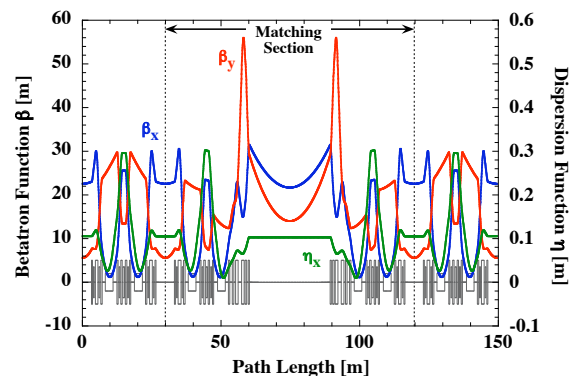


図 2: 低エミッタンスオプティクスのラティス関数。

両オプティクスの直線部及び分散部（頂点）における分散関数を表 1 にまとめておく。オプティクス変更によって、元のアクロマットオプティクスでは 6.6

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

表 1: 分散関数。

オプティクス	アクロマット	低エミッタンス
直線部	0 m	0.1 m
分散部 (頂点)	0.4 m	0.3 m

nmrad であったエミッタンスが、低エミッタンスオプティクスでは 3.4 nmrad まで低減することができた。これはビームサイズ測定によって確認されている。

分散をもっと下げて自然エミッタンスをさらに低減することができるが、直線部に分散を持たせているのでエネルギー広がりによるビームサイズに対する影響で、ユーザーにとって重要な実効エミッタンスが膨らんでくることになる。図 3 参照。SPring-8 蓄積リング低エミッタンスオプティクスでは、この実効エミッタンスが最適となるよう設定されている¹。

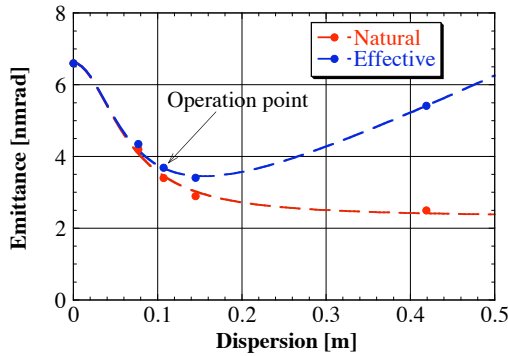


図 3: 分散関数とエミッタンス。

3. モーメントムアクセプタンス測定

バンチ密度が上がってくるとバンチ内電子電子散乱に起因するタウシェック効果がビーム寿命に対して支配的となる。タウシェックビーム寿命は、その機構から明らかなようにモーメントムアクセプタンスを反映している。そこでモーメントムアクセプタンスを知るため、シングルバンチ 1 mA 蓄積のタウシェック効果がビーム寿命に対して支配的なビーム条件で、ビーム寿命の RF 電圧依存性を測定した。結果を図 4 に示す。

モーメントムアクセプタンスが RF 電圧で決まっている時、タウシェックビーム寿命 τ の RF 電圧依存性を表す式は

$$\tau \propto \frac{\sqrt{(V_{rf}/U_0)^2 - 1} - \cos^{-1}(U_0/V_{rf})}{\sin[\cos^{-1}(U_0/V_{rf})]} / [2 \ln \{(V_{rf}/U_0)^2 - 1\} - 2.077]$$

で近似できる。ただしここで、 V_{rf} は RF 電圧、 U_0 は放射損失である。この式から予想されるタウシェック

¹実際の利用運転時は、実効エミッタンス最小点の手前に設定している。

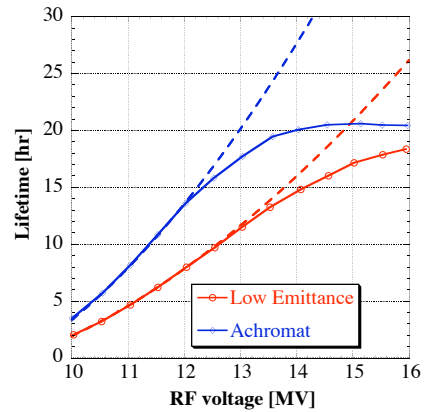


図 4: Touschek lifetime measurement.

ビーム寿命が、図 4 の点線で示されている。この表式が表すとおり、RF 電圧だけでモーメントムアクセプタンスが決まっている場合のビーム寿命は図中の点線のように伸びていくが、実際は横方向の運動力学によってモーメントムアクセプタンスが制限を受けるため、予想曲線から離れて行く^[5,6]。RF 電圧でモーメントムアクセプタンスが決まっている低電圧領域における低エミッタンスオプティクスとアクロマットオプティクスの寿命の違いは、もちろんバンチ体積比によるものであり、ほぼエミッタンス比になっている。

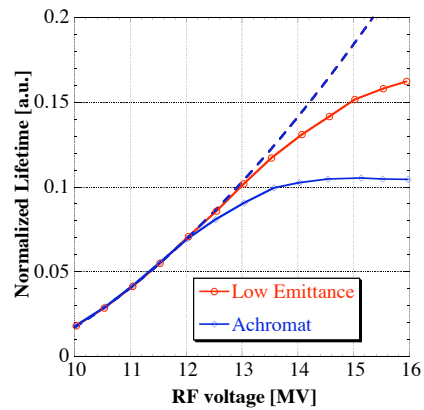


図 5: Normalized Touschek lifetime.

高電圧領域では両オプティクスにおけるビーム寿命の開きが小さくなっているが、これはモーメントムアクセプタンスの違いによるものと考えられる。オプティクスによるモーメントムアクセプタンスの差異を顕わにするため、バンチ体積で規格化したビーム寿命を図 5 に示す。これから明らかなように、通常運転時の RF 電圧 16 MV で寿命差が小さくなるのは、低エミッタンスオプティクスの方がモーメントムアクセプタンスが広いためであることがわかる。ビーム寿命から逆算すると、低エミッタンスオプティクスは 2.5%、アクロマットオプティクスは 2.2% の実効モーメントムアクセプタンスである。

4. 考察

横方向の運動力学によってモーメントムアクセプタンスが制限を受けるのは、タウシェック効果でエネルギーを交換した電子が、分散の分だけ水平方向に振動を始め、物理的障壁に衝突し失われるからである^[5, 6]。水平面内の最小物理口径は入射部セプタム壁でビーム中心軌道から 18 mm、分散関数が最大となる点で衝突した電子がセプタム壁に衝突するためには、エネルギー偏差が 6.7% (低エミッタンスオブティクス) あるいは 5% (アクロマットオブティクス) である必要がある。

ビーム寿命測定で求めたアクセプタンスとの食い違いは、結合共鳴によって説明される^[5, 6]。タウシェック効果によって引き起こされた水平振動は結合共鳴により垂直方向に移り、より狭い垂直開口で振動運動は制限されているのである。これを検証するため、垂直スクレーパーのギャップを閉じてビーム寿命への影響を観測した。ただし、実際には SPring-8 蓄積リングに多数設置されている真空封止アンジュレーターを垂直スクレーパーの代用とした。使用した挿入光源は長直線部に設置された長尺アンジュレーター ID19 と真空封止アンジュレーター中最も狭い最小ギャップを持つ ID20 である。そのパラメーターを表 2 に示す。RF 電圧は通常運転時の 16 MV とした。

表 2: 挿入光源パラメーター。

	ID19	ID20
全長	25 m	4.5 m
最大ギャップ	50 mm	50 mm
最小ギャップ	12 mm	7 mm
垂直ベータ関数(出入口)	25.2 m	6.5 m

真空封止アンジュレーターのギャップを閉じた際のビーム寿命測定結果を図 6 に示す。横軸は、ベータ関

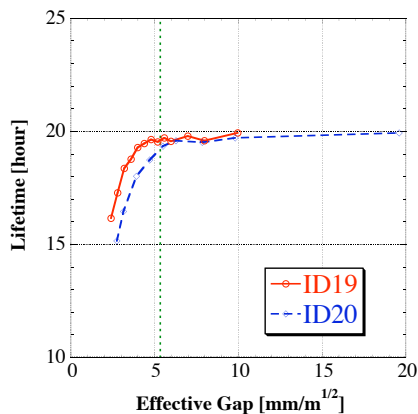


図 6: Tauschek lifetime measurement.

数の平方根で規格化した実効ギャップとした。図中、点線は真空容器の最小実効口径を表す。測定結果は、アンジュレーターギャップが真空容器口径を切ると、ビーム寿命がアンジュレーターギャップに従って減少

する様子を示している。この結果は、散乱電子は垂直口径制限で失われることを表しており、通常運転 RF 電圧 16 MV ではモーメントムアクセプタンスは横方向運動で決まっていることが分かる。

緒言で述べたとおり、低エミッタンスオブティクスでは分散のピークが抑えられているので、同じエネルギーを交換してもその水平振動振幅はアクロマットオブティクスに比べて小さくなる。結果として、低エミッタンスオブティクスのモーメントムアクセプタンスがアクロマットオブティクスに比べて広くなることは定性的には理解できる。これを数値計算で確認するため、トラッキングシミュレーションを実行した。SPring-8 内で開発した粒子トラッキングコード^[7]を用いて解析を行った。応答関数解析で求めたリングモデル^[8]上で、オフモーメントム粒子のトラッキングを行い、モーメントムアクセプタンスを求めた。分散関数が頂点を取るところから出発して、口径制限にかかるエネルギーをもってモーメントムアクセプタンスとした。結果を表 3 にまとめる。消失

表 3: モーメントムアクセプタンス。

オブティクス	アクロマット	低エミッタンス
+側	+ 1.50 %	+ 2.15 %
-側	- 2.45 %	- 2.77 %

点は何れも垂直ベータ関数最大の垂直口径制限である。実際はリング全周に亘って平均する必要があるが、シミュレーションはほぼ現実を再現している。

SPring-8 蓄積リングのモーメントムアクセプタンスは、加速 RF 電圧が十分にあるときには横方向運動力学で決まっている。そこでは結合共鳴が重要な役割を果たしており、オフモーメントム粒子の水平振動を垂直方向に変換することによって粒子損失を引き起こしている。オブティクス変更によって、低エミッタンスオブティクスではこの振動振幅が小さくなるためモーメントムアクセプタンスが広がっている。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., in Proc. of EPAC '04, Lucerne, 2004, p. 222.
- [2] H. Tanaka and A. Ando, Nucl. Instrum. Method **A369** (1996), 312.
- [3] M. Takao, et al., in Proc. of APAC '04, Gyeongju, 2004, p. 49.
- [4] H. Tanaka, To be published in Proc. of EPAC '06, Edinburgh, 2006.
- [5] M. Takao, K. Soutome and H. Tanaka, in Proc. of EPAC '00, Vienna, 2000, p. 1569.
- [6] H. Tanaka, J. Schimizu, K. Soutome and M. Takao, in Proc. of EPAC '02, Paris, 2002, p. 1196.
- [7] J. Schimizu, et al., in Proc. of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology (2001), 80.
- [8] H. Tanaka, et al., in Proc. of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology (2001), 83.