

# LIFETIME STUDY IN THE SAGA-LS STORAGE RING BY USING A BEAM SCRAPER

Tatsuo Kaneyasu\*, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Koda

SAGA Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0005

## Abstract

An experimental investigation of the beam lifetime of the storage ring has been conducted using a beam scraper. The beam scraper consists of four movable rods that restrict the horizontal and vertical apertures. We measured the beam lifetime as a function of rod position to investigate the contribution of the Touschek effect and residual gas scattering (elastic, inelastic, and bremsstrahlung) on the total lifetime. The dependence of the beam lifetime on the rod position provides information about the average pressure in the storage ring and the contributions of the different scattering processes to the total lifetime. The present method clearly reveals the contributions of the different processes to the lifetime. At present, the Touschek effect dominates the beam lifetime of the storage ring.

## ビームスクレーパによる SAGA-LS 蓄積リングのビーム寿命評価の試み

### 1. はじめに

SAGA Light Source (SAGA-LS) の 1.4 GeV 電子蓄積リングのビーム寿命を理解することを目的として、ビームスクレーパ (以下スクレーパ) を用いた実験研究を進めている。SAGA-LS 蓄積リングはエミッタンスが比較的 low (25 nm-rad), さらにビームエネルギーもそれほど高くはないことから、ユーザー運転時のビーム寿命は Touschek 効果が支配すると推定されている<sup>[1]</sup>。本研究ではビーム寿命に対する各種の電子損失要因の寄与を実験的に評価する。要因別ビーム寿命の評価は、蓄積リングの運転状況に対する認識の検証に加え、寿命改善へ向けても多くの判断材料を提供するものであり、汎用的な加速器診断ツールとしての有用性は高いと期待される。

蓄積リングを周回する電子は、残留ガス分子との衝突散乱 (真空寿命), Touschek 効果, 量子寿命によって失われる。本研究ではスクレーパを用いて蓄積リングのアーチャーを制限し、スクレーパのロッド位置の関数としてビーム寿命の減少曲線を測定する。スクレーパは 4 本の円筒形状ロッドで構成され、蓄積リングの直線部 LS6 に設置されている。ロッドを電子ビーム軸方向へ挿入することで、水平・垂直方向のアーチャーを自在に制限することができる。電子損失レートのアーチャーサイズ依存が要因ごとに異なることを利用すれば、ビーム寿命の減少曲線から各過程の寄与が求まる。スクレーパを用いたビーム寿命の評価実験はこれまでもいくつか報告<sup>[2, 3, 4]</sup>されており、ビーム寿命に対するガス散乱や Touschek 効果の寄与が議論されてきた。本手法の特色は、測定中のビーム電流をほぼ一定値に保つことで寿命評価を単純化し、さらに SAGA-LS 蓄積リングの直線部には有限のエネルギー分散が存在するため水平ロッドの挿入時に運動量アクセプタンスが縮小することを利用して、各種の真空寿命に加えて Touschek 効果の寄与を明確に評価した点にある。

本稿ではスクレーパによるビーム寿命評価の方法と SAGA-LS 蓄積リングにおける測定結果を報告する。ま

た寿命評価法の有用性を検証するため、蓄積リングのエミッタンスカップリングを変更した測定も実施した。

### 2. ビーム寿命の評価方法

#### 2.1 寿命の評価式

寿命測定ではスクレーパロッドを挿入してアーチャーを制限する。ただし量子寿命が制限されるビーム軸近傍の領域まではロッドを挿入しないため、ビーム寿命に対する量子寿命の寄与は他の要因に比べ非常に小さい。量子寿命の寄与を無視すると、ビーム寿命はガス分子との衝突散乱と Touschek 効果で決まる。真空寿命として、Rutherford 散乱, Møller 散乱, 制動放射の寄与を取り入れると、ビーム寿命は各散乱過程による寿命の和として

$$\frac{1}{\tau_{\text{Total}}} = \frac{1}{\tau_{\text{R}}} + \frac{1}{\tau_{\text{M}}} + \frac{1}{\tau_{\text{B}}} + \frac{1}{\tau_{\text{T}}} \quad (1)$$

と表わされる。ここで  $\tau_{\text{R}}$ ,  $\tau_{\text{M}}$ ,  $\tau_{\text{B}}$ ,  $\tau_{\text{T}}$  はそれぞれ Rutherford 散乱, Møller 散乱, 制動放射, Touschek 効果による寿命である。

ガス散乱の断面積を用いると、ビーム寿命は

$$\frac{1}{\tau_{\text{Total}}} = cN \sum_i (\sigma_{\text{R}} + Z_i \sigma_{\text{M}} + \sigma_{\text{B}}) + \frac{1}{\tau_{\text{T}}} \quad (2)$$

と表わされる。 $c$  は光速,  $N$  はガス分子の数密度である。ガス散乱の断面積は散乱過程ごとに次のように表わされる<sup>[5, 6]</sup>。

$$\sigma_{\text{R}} = \frac{4\pi Z_i^2 r_e^2}{\gamma^2} \frac{1}{\theta_c^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{M}} = \frac{4\pi r_e^2}{\gamma^2} \frac{1}{\theta_c^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{B}} = 4\alpha r_e^2 Z_i (Z_i + 1) \left\{ \frac{4}{3} \ln \frac{1}{(\Delta p/p)_c} - \frac{5}{6} \right\} \ln(183 Z_i^{-1/3}) \quad (5)$$

ここで  $\gamma$  はローレンツ因子,  $Z_i$  は原子番号,  $r_e$  は電子の古典半径,  $\alpha$  は微細構造定数,  $(\Delta p/p)_c$  は運動量アク

\* kaneyasu@saga-ls.jp

セプタンス,  $\theta_c$  はガス分子との衝突によって電子が失われる臨界散乱角である. Rutherford 散乱と Møller 散乱に起因するビーム寿命は臨界散乱角で決まり, 制動放射による寿命は運動量アクセプタンスで制限される.

真空寿命は残留ガス分子の密度, つまり, 蓄積リングの圧力に反比例する. ビーム寿命の解析を容易にするため, 蓄積リングの圧力が一定値とみなせるように寿命測定は短時間でを行う. 測定中の蓄積電流値 (約 300 mA) の減少はエミッタンスカップリングに依存するが, 典型的には数%, 最大でもおよそ 10% であった. 蓄積リングの圧力が一定値かつ残留ガス種とその分圧比が既知であれば, 各種のガス散乱過程のビーム寿命への寄与は, 圧力をフィッティングパラメータとして寿命減衰曲線から決定可能である.

Touschek 寿命は次式で表わされる [6].

$$\frac{1}{\tau_T} = \frac{\sqrt{\pi} c r_e^2 N_b}{\gamma^3 V_b \sigma_x' (\Delta p/p)_c^2} F(\varepsilon_A) \quad (6)$$

ここで  $V_b$  は電子バンチの体積,  $N_b$  はバンチ当たりの電子数である. ただし

$$\varepsilon_A = \frac{1}{(\gamma \sigma_x')^2} (\Delta p/p)_c^2 \quad (7)$$

で,  $\varepsilon_A \ll 1$  の条件下

$$F(\varepsilon_A) = -\ln \varepsilon_A - 2.077 \quad (8)$$

となる. Touschek 寿命はバンチ当たりの電子密度に反比例するが, 測定中のビーム電流の減衰が少ないことから, 寿命解析では電子密度を一定値として取り扱う. 次節で述べるように水平ロッドを挿入すると運動量アクセプタンスが縮小するため, Touschek 寿命は水平ロッドの位置に依存する. 電子密度が一定であれば, ロッドを引き抜いた状態の Touschek 寿命をフィッティングパラメータとして, 寿命減少曲線から Touschek 効果の寄与が求まる.

## 2.2 スクレーパーの影響

スクレーパーロッドの挿入により臨界散乱角と運動量アクセプタンスが減少する. 臨界散乱角は楕円のダクト形状を仮定すると,

$$\frac{1}{\theta_c^2} = \frac{\overline{\beta_x} \beta_{xm}}{2x_{am}^2} + \frac{\overline{\beta_y} \beta_{ym}}{2y_{am}^2} \quad (9)$$

である. ここで  $\overline{\beta_x}, \overline{\beta_y}$  は水平・垂直方向のベータ関数の平均値,  $\beta_{xm}, \beta_{ym}, x_{am}, y_{am}$  はベータ関数が大きく, アパーチャが狭い箇所でのベータ関数とダクト半幅である. ラティス関数の設計値を用いて検討した結果, 通常, 臨界散乱角は四極電磁石 (QD) 部で制限されているが, 水平方向, 垂直方向共にスクレーパーロッドをビーム軸より 14 mm 程度まで挿入すると, スクレーパーによって臨界散乱角が制限されることがわかった. 評価式 (3) と (4) からわかるように臨界散乱角の減少を通じて, Rutherford 散乱と Møller 散乱による真空寿命が減少する.

一方, 運動量アクセプタンスは通常の運転条件では縦方向の運動 (RF バケットハイト  $(\Delta p/p)_{RF}$ ) によって

制限されているが, スクレーパー設置箇所に有限のエネルギー分散が存在することから, 水平方向のロッドをビーム軸へ近づけると横方向の運動 (スクレーパーによるアパーチャ制限で決まるアクセプタンス  $(\Delta p/p)_{AP}$ ) が支配するようになり, Touschek 寿命と制動放射寿命が減少する. 図 1 に運動量アクセプタンスと Touschek 寿命のロッド位置依存の計算結果を示す. Touschek 寿命はロッド引き抜き時の寿命 (RF バケットハイトで決まる値) で規格化してプロットした. 水平ロッドをビーム軸より 11 mm まで近づけると横方向の運動が運動量アクセプタンスを支配し, それに伴い Touschek 寿命が急落する.

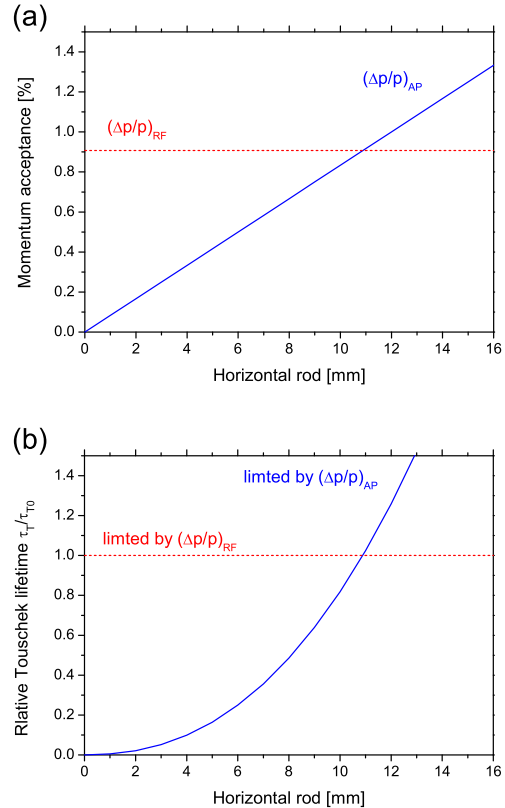


図 1: (a) 運動量アクセプタンスの水平ロッド位置依存. (b) 水平ロッド挿入による Touschek 寿命の減少.

## 2.3 測定方法

スクレーパーロッドをビーム軸方向へ挿入し, ロッド位置の関数としてビーム寿命を測定した. 寿命測定では 4 本のロッドのうち 1 本をビーム軸方向へ挿入する. このとき他のロッドは引き抜いた状態である. 解析を単純化するため, 測定中のビーム電流が一定値 (ユーザー運転時と同様の約 300 mA) とみなせるよう寿命測定は短時間で行った. エミッタンスカップリングはユーザー運転条件の  $\kappa \approx 1.4\%$  として測定を行い, その後, 寿命評価方法の有用性を検証するため, カップリングを変更した測定も実施した.

ロッド毎に得た 4 つの寿命減少曲線に対して, 蓄積リングの平均圧力, スクレーパー引き抜き時の Touschek

寿命, ロッドのオフセットを共通のフィッティングパラメータとして曲線フィットを行い, 各種の真空寿命と Touschek 寿命の寄与を決定した. なお曲線フィットに必要な臨界散乱角と運動量アクセプタンスのロッド位置依存は, 蓄積リングの設計値をベースとした計算値を使用した.

### 2.4 残留ガスの分析

真空寿命の内訳を決定するためには, 残留ガス種と分圧比に関する情報が必要である. そこで蓄積リングの直線部 LS1 の排気ポート付近に取り付けた四重極質量分析器 (アネルバ製 M-200QA-M) を用いて, 残留ガス種の分析を行った. 調査の結果, リングの主要な残留ガス種は  $H_2$  と  $CO$  であり, おおよその分圧比は  $H_2:CO=7:3$  とわかった.

## 3. 実験結果

カップリング 1.4% におけるビーム寿命の測定結果を図 2 に示す. 図 2(a) は水平ロッド挿入時のビーム寿命の減少曲線, 図 2(b) は垂直ロッド挿入時の結果である. 図中の実線は寿命評価式による曲線フィットを示しており, 要因別のビーム寿命が明確に分離評価されたことがわかる. なお参考のため, 図 2 にはリングの設計値から算出した量子寿命も含めてプロットした.

水平ロッド挿入時のビーム寿命の減少は Touschek 効果が支配的である. ロッドを 11 mm 以下まで挿入すると, 横方向アパーチャが運動量アクセプタンスを支配するようになり, Touschek 寿命は急激に減少する. 一方, 垂直ロッドの挿入によるビーム寿命の減少は, Rutherford 散乱の寄与が主要とわかった.

フィッティングの結果, 蓄積リングの平均圧力は  $4 \times 10^{-7}$  Pa, ロッド引き抜き時の Touschek 寿命はおよそ 7 時間と求まった. ロッド引き抜き時のビーム寿命を散乱過程ごとに表 1 にまとめる. ユーザー運転時のビーム寿命は Touschek 効果が支配的である. この結果は蓄積リングの運転状況に対する推定と一致している. また真空寿命に関しては制動放射の寄与が主要とわかった.

表 1: ユーザー運転条件におけるビーム寿命 (ビーム電流  $\sim 300$  mA, カップリング  $\sim 1.4\%$ )

要因	寿命 [hour]
Rutherford 散乱	301
Møller 散乱	1690
制動放射	87.2
Touschek 散乱	6.95
Total	6.3

ビーム寿命の減少曲線の測定は, 各種の真空寿命と Touschek 寿命について情報を与えることがわかった. 測定手法の有用性を確認するため, 蓄積リングのエミッタンスカップリングを変更して同様の寿命測定を行い, ビームサイズの変化が Touschek 寿命の評価値に反映されるか検証した. カップリングの調整では放射光干涉計<sup>[7]</sup>による垂直ビームサイズ測定を利用した.

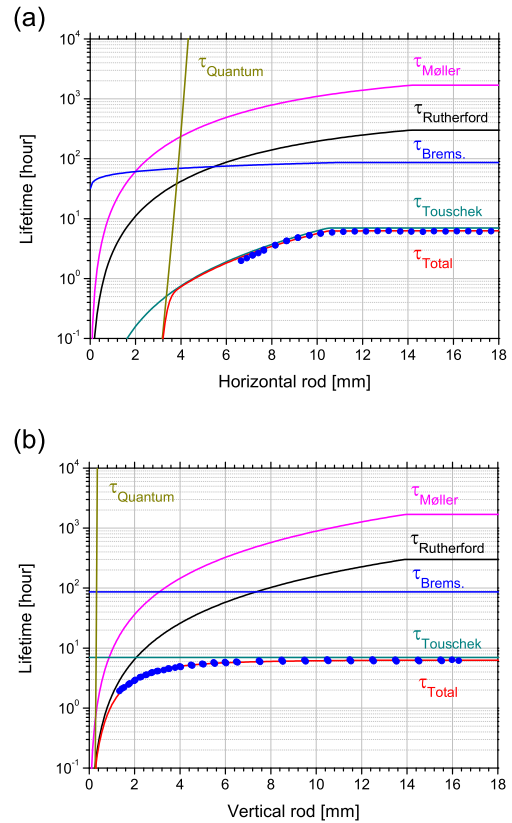


図 2: ビーム寿命の測定値と各散乱過程の曲線フィット. ロッド位置はビーム軸からの距離を示す. (a) 水平ロッド, (b) 垂直ロッド.

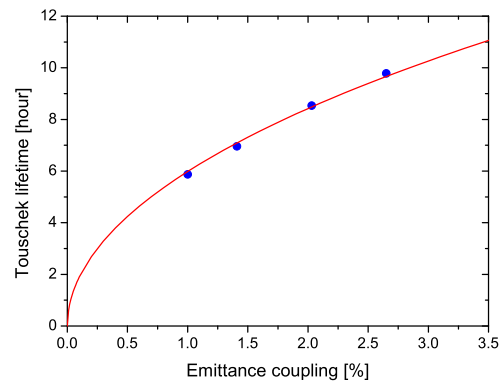


図 3: Touschek 寿命のカップリング依存. 実線は Touschek 寿命の理論曲線  $\tau_T \propto \sqrt{\kappa}$  の関係を示す.

図 3 に Touschek 寿命測定値のカップリング依存を示す. 測定結果はロッドを引き抜いた状態の寿命を示している. 図中の実線は,  $\kappa \ll 1$  の条件における Touschek 寿命とカップリングの関係式  $\tau_T \propto \sqrt{\kappa}$  を測定値にフィットした結果である. Touschek 寿命の測定値は理論曲線と良く一致しており, スクレーパーを用いた寿命評価の有用性が示唆された.

#### 4. まとめ

スクレーパを用いて SAGA-LS 蓄積リングにおけるビーム寿命の評価実験を進めている。電子損失の要因ごとに損失レートのアパーチャサイズ依存性が異なることを利用して、ロッド挿入時の寿命減少曲線から各種の真空寿命と Touschek 寿命の寄与を決定した。ユーザー運転時のビーム寿命は Touschek 効果が支配的であった。真空寿命の寄与は少ないが、その中では制動放射が主要である。寿命評価の有用性を確認するため、Touschek 寿命のカップリング依存性を検証した。Touschek 寿命の評価値は理論曲線と良い一致を示した。本手法によるビーム寿命の分離評価は、蓄積リングのビーム寿命を解明する有効な手段と考えられる。

#### 5. 謝辞

四重極質量分析器による残留ガスの分析では、SAGA-LS ビームライングループの瀬戸山博士にご協力いただきました。ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Y. Iwasaki, Proc. of PAC'03, p. 3270.
- [2] S. Khan, Proc. of PAC'99, p. 2831.
- [3] C.D. Park et al., J. Vac. Sci. Technol. A 18 (2000) 2722.
- [4] E. Wallén, Nucl. Instrum. Meth A 508 (2003) 487.
- [5] J. Le. Duff, Nucl. Instrum. Meth A 239 (1985) 83.
- [6] 中村典雄, OHO'91, ビーム寿命.
- [7] Y. Takabayashi et al., Proc. of ICALEPCS'09, p. 140.