

# ビームスクレーパによる蓄積リング直線部のビームサイズ測定を試み BEAM SIZE MEASUREMENT AT SAGA-LS STORAGE RING USING A MOVABLE BEAM SCRAPER

金安達夫\*, 高林雄一, 岩崎能尊, 江田茂

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

SAGA Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0005

## Abstract

An experimental investigation of the transverse beam size and beam lifetime of the SAGA-LS storage ring has been performed using a movable beam scraper. We measured reduction of the beam lifetime due to the quantum effect resulting from the insertion of the scraper rod. The transverse beam size was derived from the lifetime reduction through the lifetime analysis using the quantum lifetime formula. The measured beam size roughly agrees with the designed value. Moreover the lifetime reduction provides information about the residual gas species and the vacuum pressure under the low beam current condition.

## 1. はじめに

光源用電子蓄積リングにおいてビームサイズは重要なパラメータの一つである。蓄積リングの偏向部ビームサイズは、偏向電磁石からの放射光を利用して比較的容易に測定可能である。偏向電磁石からの放射光を利用したビームサイズ測定は多様な手法が開発されており<sup>[1]</sup>, 多くの放射光施設で各種のビームサイズモニターが運用されている。SAGA Light Source (SAGA-LS) の 1.4 GeV 電子蓄積リングでは放射光干渉計モニター<sup>[2]</sup> を使ってビームサイズを測定しており<sup>[3]</sup>, 定常的なユーザー運転におけるビーム調整に加え、様々なマシンスタディで有効利用されている。一方、挿入光源の発光点である蓄積リング直線部のビームサイズはアンジュレタ放射を利用<sup>[4,5]</sup> すれば評価できるものの、挿入光源に利用可能なスペースが限られる中小規模の蓄積リングでは、直線部への新たな装置の導入や大掛かりな観測系の整備は難しい。そこで既存の装置を活用した簡便なビームサイズ測定法として、蓄積リング直線部に設置されたビームスクレーパの利用を試みた。

スクレーパによるビームサイズ評価は NSLS<sup>[6]</sup> や SPEAR3<sup>[7]</sup> における測定が報告されており、アパーチャー縮小による量子寿命の減少を解析することで、数十  $\mu\text{m}$  から数百  $\mu\text{m}$  の領域でビームサイズが求められている。本研究では SAGA-LS 電子蓄積リングにおけるスクレーパを用いたビームサイズ測定を試みとして、ビーム寿命の減少曲線からビームサイズに関する情報を得るための解析方法と最適な測定条件を探った。

## 2. 測定方法

電子蓄積リングを周回する電子ビームの寿命は残留ガスとの衝突散乱、タウシエック効果、量子寿命によって制限される。ユーザー運転条件では、SAGA-LS 電子蓄積リングのビーム寿命はタウシエック効果による制限が支配的である<sup>[8]</sup>。通常の運転条件では量子寿命の影響は無視できるが、アパーチャーがビームサイズの 6 倍程度まで縮小すると量子寿命は急激に減少する。良く知

られているように、量子寿命は以下の式で表される。

$$\tau_Q = \tau_{\beta_{x,y}} \frac{\sigma_{x,y}^2}{a_{x,y}^2} \exp\left(\frac{a_{x,y}^2}{2\sigma_{x,y}^2}\right) \quad (1)$$

ここで  $\tau_{\beta_{x,y}}$  はベータatron振動のダンピングタイム、 $\sigma_{x,y}$  は電子ビームサイズ、 $a_{x,y}$  はアパーチャーである。また添え字  $x, y$  はそれぞれ水平・垂直方向を示している。

ビームスクレーパは蓄積リングの直線部 LS6 に設置されており、四本の円筒ロッドを用いて水平・垂直方向のアパーチャーを制限することができる。量子寿命はビームサイズとアパーチャーに強く依存するため、量子寿命が制限される領域までスクレーパロッドを挿入すれば、ビーム寿命の減衰傾向からビームサイズに関する情報が得られる。

ビーム寿命の測定は、タウシエック効果が無視できる低いビーム電流 ( $\sim 3 \text{ mA}$ ) で行った。ビーム寿命が急落する領域までロッドを挿入し、量子寿命とガス散乱寿命の寄与を考慮してビーム寿命の減衰曲線を解析した。今回の測定条件では常にスクレーパロッドによって横方向のアクセプタンスが制限されるため、ダクト中心からロッド先端までの距離をアパーチャーとして扱った。量子寿命が支配的な領域で得られたビーム寿命を解析することで、フィッティングパラメータとしてビームサイズを求めた。なお測定に際して、電子ビームのカップリングは干渉計モニターによる垂直ビームサイズの測定値を参照して調整した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 量子寿命とビームサイズ

量子寿命が減少する領域までロッドを挿入した場合のビーム寿命の測定例を図 1 に示す。カップリングはユーザー運転条件の  $\kappa \sim 1.4\%$  へ測定前に設定した。ただしカップリングの測定値としては、寿命測定中の垂直ビームサイズの平均値から換算した値を採用している。水平方向の測定は蓄積リング内側のロッド挿入、また、垂直方向の測定は蓄積リング下面のロッド挿入の結果である。実線は量子寿命のモデル式による曲線フィットの

\* kaneyasu@saga-ls.jp

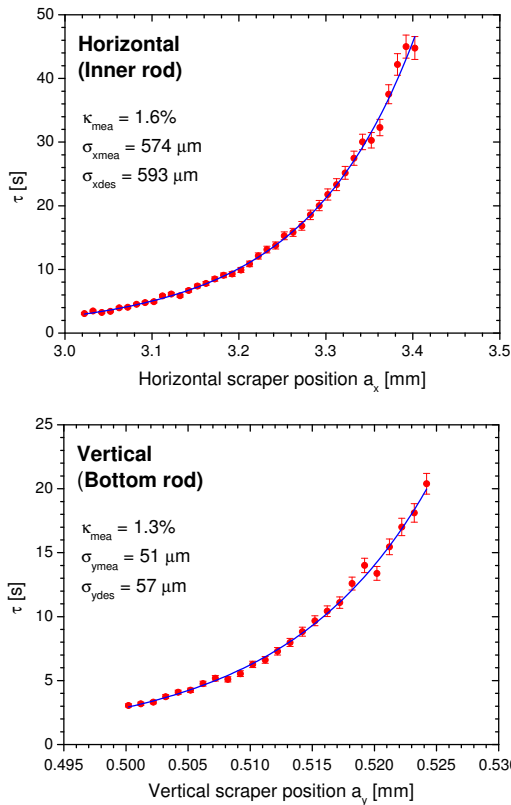


Figure 1: Reduction of the quantum lifetime by insertion of the scraper rod. The scraper position is defined by the scraper to beam distance. The blue line is curve fitting of the quantum lifetime reduction. Top: Horizontal scraper; Bottom: Vertical scraper.

結果であり、水平・垂直方向共に量子寿命のモデルは測定結果を良く再現していることがわかる。

曲線フィットで得たビームサイズと設計値の比較を図中に示した。今回の測定条件では干渉計モニターで測定したビームサイズは設計値と良く一致しており、スクレーパによるビームサイズ測定も設計値との比較が妥当である。ビームサイズの測定値は設計値と概ね一致しており、低ビーム電流では蓄積リング直線部の実効的なビームサイズは設計値に近いと考えられる。ただし水平ビームサイズに比べ、垂直ビームサイズの方がデザイン値との差異が大きい傾向が今回の測定を通じて観測された。

図2はビームサイズ測定値のカップリング依存性を示す。ここで測定値には水平・垂直方向の四本のロッドを用いた測定が含まれている。スクレーパによる測定値はカップリングに依存して変動しており、その傾向は設計値から予測される曲線とおおよそ一致している。この結果より、量子寿命の解析によって得たビームサイズ測定値は確かに電子ビームの状態を反映しており、スクレーパによるビームサイズ評価は有効であることがわかる。

図2に示したデータでは、測定値と設計値との差異は水平ビームサイズは5% (rms)、垂直ビームサイズは12% (rms)であった。電子蓄積リングのレスポンス行列

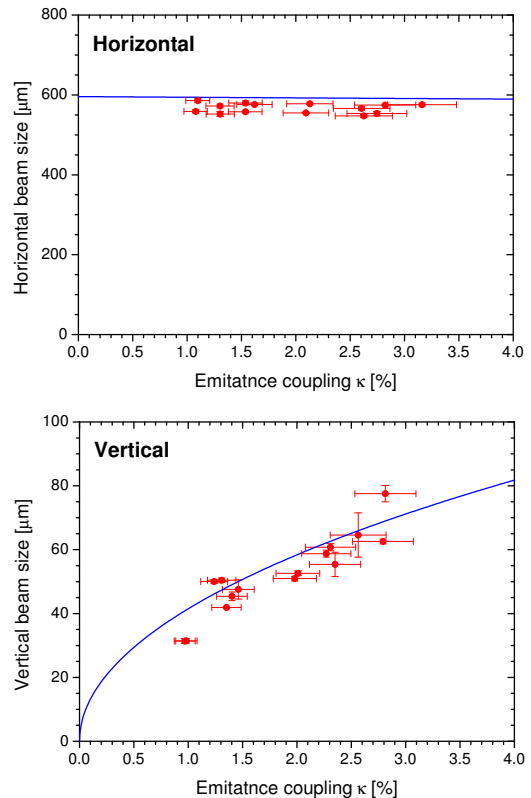


Figure 2: Beam size evaluated by the scraper measurements. Designed beam sizes at the center of the straight section are indicated by blue lines. Top: Horizontal scraper; Bottom: Vertical scraper.

の解析 [9] やラティス関数測定 [10] により、ラティス関数の設計値からのずれは10% (rms)程度と推測されている。したがって水平ビームサイズについては、測定値との差異はラティス関数のばらつきと同等であり、スクレーパによる測定結果は妥当と思われる。一方、垂直ビームサイズの差異が大きいのは、カップリング1%における測定結果の寄与が最も大きい。この測定点を取り除けば設計値との差異は8% (rms)まで減少する。カップリング1%では今回の測定条件におけるビームサイズ測定の検出下限が近く、測定精度が低下した可能性がある。

垂直ビームサイズの差異が大きい要因は解析上の問題も考えられる。次節で述べるように、ビーム寿命測定において、垂直ロッドの挿入ではガス散乱による寿命減少が無視できない。それに対し、水平ロッド挿入ではビーム寿命の減少は量子寿命の寄与が圧倒的である。よってビーム寿命の測定値に対して、比較的容易に量子寿命モデルを適用することが出来る。垂直ロッド挿入の測定については、量子寿命がガス散乱寿命より一桁以上短くなる領域を切り出して解析しているが、ガス散乱寿命の効果により系統誤差が生じている可能性がある。垂直ビームサイズについては、測定条件の最適化が今後の検討課題といえる。

### 3.2 ガス散乱寿命

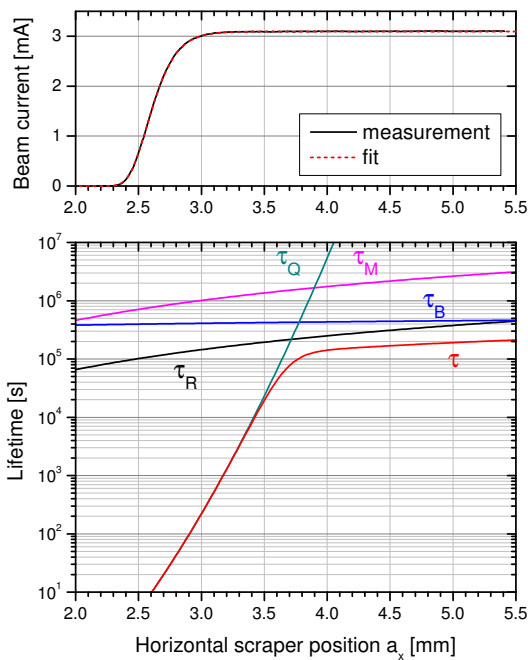


Figure 3: Top: Reduction of the beam current by horizontal scraper insertion. Bottom: Contributions of the quantum and gas scattering lifetimes to the beam current decay. The gas scattering lifetime was calculated by assuming the average pressure of  $4 \times 10^{-8}$  Pa for nitrogen molecule.

スクレーパロッドを徐々にビーム中心へ挿入していくと、量子寿命より先にガス散乱寿命が減少する。ビームサイズの解析は量子寿命が支配的な領域で行っているが、ガス散乱寿命が支配的な領域からは、残留ガスの圧力と成分に関する情報が得られる。量子寿命解析で得たビームサイズを用いて、ロッドスキャン中のビーム電流の減衰が再現されるよう残留ガス圧力を決定した。ここで各種のガス散乱寿命は、SAGA-LS 電子蓄積リングにおけるビーム寿命の解析モデル<sup>[8]</sup>を用いて求めた。

カップリング 1.4 % におけるビーム電流の減衰曲線と量子寿命及びガス散乱寿命の寄与を図 3 と 4 に示す。図中で  $\tau_Q$  は量子寿命、 $\tau_R$ ,  $\tau_M$ ,  $\tau_B$  はガス散乱寿命 (ラザフォード散乱, メラー散乱, 制動放射),  $\tau$  はトータルのビーム寿命を示している。残留ガス種は窒素のみと仮定すると、測定結果を再現する圧力は  $4 \times 10^{-8}$  Pa であった。この圧力は蓄積リングの真空計 (CCG) の平均値と概ね一致している。ガス散乱寿命と量子寿命の寄与を比較すると、水平ロッドの挿入ではビーム寿命の急落はほぼ量子寿命の効果とわかる。一方、垂直ロッド挿入では量子寿命によるビーム寿命の急落の前に、ガス散乱による寿命減少が効いていることがわかる。

四重極質量分析器を用いた調査の結果、ユーザー運転時 (300 mA 蓄積) の残留ガス成分は水素分子と一酸化炭素分子が主要 (分圧 7:3) とわかっている<sup>[8]</sup>。しかしながら、今回の測定結果に対し同様の残留ガス成分と分圧を仮定すると、測定結果に整合する残留ガス圧力は 300 mA 蓄積時と同等となった。この結果は無負荷に近い蓄積リングの圧力として受け入れがたい。よって無負

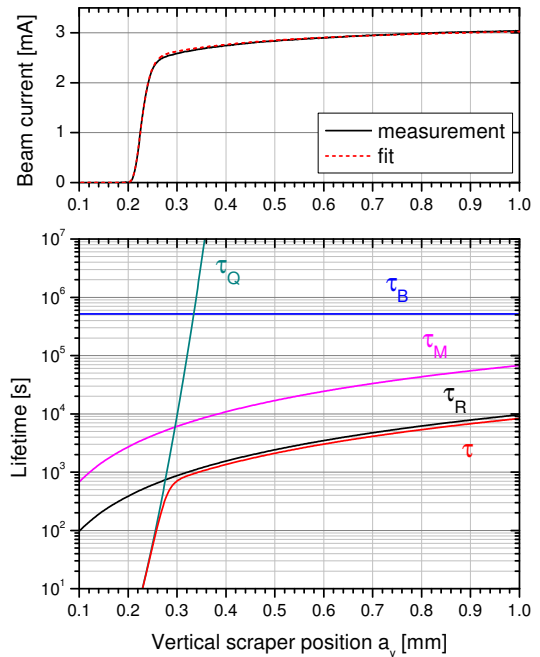


Figure 4: Top: Reduction of the beam current by vertical scraper insertion. Bottom: Contributions of the quantum and gas scattering lifetimes to the beam current decay. The gas scattering lifetime was calculated by assuming the average pressure of  $4 \times 10^{-8}$  Pa for nitrogen molecule.

荷時の蓄積リングの残留ガス成分は 300 mA 蓄積時と大きく異なり、水素より原子番号の大きいガス種が主要と推測される。残留ガス種として窒素分子を仮定すると、図 3, 4 に示したとおり、真空計の測定値と同等の圧力でビーム電流の減衰が良く再現された。

## 4. まとめ

ビームスクレーパを利用した簡便な手法を用いて、電子蓄積リング直線部のビームサイズ測定を試みた。スクレーパロッドの挿入によるビーム寿命の減少を測定し、量子寿命のモデル関数を用いて解析することでビームサイズを求めた。ビームサイズの測定値は概ねデザイン値と一致しており、低ビーム電流では蓄積リング直線部のビームサイズは設計値に近いと考えられる。ただし垂直ビームサイズの測定については、測定条件の最適化が今後の検討課題である。またガス散乱寿命の解析により、無負荷に近い状態の蓄積リングの残留ガス圧力とガス種についても情報が得られた。今後は広い蓄積電流範囲に対してビーム寿命の統合的な理解を進める予定である。

## 参考文献

- [1] G. Kube, Proc. of DIAPC'07, p. 6 (2007).
- [2] T. Mitsuhashi, Proc. of PAC'97, p. 766 (1997).
- [3] Y. Takabayashi et. al., Proc. of ICALEPCS'09, p.140 (2009).
- [4] B.X. Yang, A.H. Lumpkin, Proc. of PAC'99, p.2161 (1999).
- [5] F. Ewald, Proc. of DIPAC'09, p.182 (2009).
- [6] P.M. Stefan, et. al., Nucl. Instr. and Meth. A 412 (1998) 161.

- [7] X. Huang, J. Corbet, Nucl. Instr. and Meth. A 629 (2011) 31.
- [8] T. Kaneyasu, et. al., Nucl. Instr. and Meth. A 694 (2012) 107.
- [9] Y. Iwasaki et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 652 (2007).
- [10] Y. Takabayashi et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 649 (2007).