

SuperKEKB ダンピングリングの放射光モニターを使ったビーム計測

BEAM MEASUREMENT OF SuperKEKB DAMPING RING USING SR MONITOR

池田仁美^{#, A, B)}, 杉本 寛^{A, B)}, 飛山真理^{A, B)}, 福間均^{A)}, フラナガンジョン^{A, B)}

Hitomi Ikeda^{#, A, B)}, Hiroshi Sugimoto^{A, B)}, Makoto Tobiyama^{A, B)}, Hitoshi Fukuma^{A)}, J.W.Flanagan^{A, B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} The Graduate University for Advanced Science (SOKENDAI)

Abstract

Four positron bunches are accumulated in SuperKEKB damping ring (DR) at the same time up to 4nC. A synchrotron radiation monitor (SRM) was built to measure the beam size. The emission light comes from bending magnet($\rho=3.14\text{m}$) just after a fork to the beam extraction line of DR. The light propagates the pit under the floor in the tunnel to SRM monitor room. We measured a damping time of the injected bunch using a gated camera and a streak camera.

1. はじめに

SuperKEKB は、7 GeV の電子リング(HER)と 4GeV の陽電子リング(LER)から成る衝突型加速器で、KEKB の 40 倍のルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目指して建設された。2016 年 2 月から 6 月にかけて主リングの試験運転である Phase-I 運転を行った後[1]、Belle-II 検出器の据え付け及び入射部の改造を行い、2018 年 3 月から 7 月まで Phase-II 運転を行った[2]。デザインルミノシティを達成するためには、衝突点でのビームサイズを nm レベルまで絞ることが必要であるが、LER に関しては、陽電子のエミッタンスを小さくするためのダンピングリング(DR)を建設し、Phase-II 運転に先立って 2018 年 2 月初旬に調整を開始した[3,4]。DR の主なパラメータは Table 1 の通りである。2019 年 3 月 11 日から 7 月 1 日までの phase III 運転では、本格的な物理データ収集を始め、リング内の蓄積ビームを増やし、ビームチューニングによるビームサイズを絞ることによって、ルミノシティを向上させることを目指した[5]。

Table 1: Damping Ring Parameters

Parameter		unit
Energy	1.1	GeV
No. of bunch trains/ bunches per train	2/2	
Circumference	135.5	m
Maximum stored current	12	mA
Damping time (h/v/z)	11.5/11.7/5.9	ms
Emittance(h/v)	29.2/1.5	nm
Energy spread	0.055	%
Bunch length	7.85	mm
Mom. compaction factor	0.01	
Cavity voltage	1.0	MV
RF frequency	509	MHz

Phase-III 運転中の DR は大きな問題なく稼働しており、

[#] hitomi.ikeda@kek.jp

ダンピングタイム等のパラメータ測定のために放射光モニターを使ったスタディを行ったので、その結果を報告する。

Table 2: DR SRM Parameters

Parameter		Unit
SR Opening Angle	3.47	mrad
Chamber Vertical Aperture	13.6	mrad
Chamber Horizontal Aperture	38.64	mrad
Bending Radius	3.15	m
Bending Angle	0.152	rad
Bending Length	0.4794	m
SR Power	12	W
Forward Spectral Angular Density of Flux	8.37×10^2	photons/mr ² /0.1% band width/nC

2. ダンピングリングの放射光モニター

DR 放射光モニター(SRM)のパラメータを Table 2 にまとめた。測定には、DR から入射器への出射路(RTL)が枝分かれた直後にある曲げ半径 3.14 m の偏向電磁石からの光を使用する[6]。磁石から約 0.5 m 下流のベリリウム鏡で光を取り出し、Fig. 1 に示す様に、トンネル床下のピットを通してトンネルに隣接する SRM 室まで伝送する。ベリリウム鏡は KEKB メインリングで使用していたものを再利用した水冷式だが、鏡に当たる放射光パワーは現時点の DR の最大電流値に対して 3.0W と見積もられ、これは KEKB LER の 1/10 に当たり、十分低いため、熱変形等を気にする必要はない。

光転送路にはアルミコーティング鏡を 4 枚使用し、それぞれをパルスモータでリモートコントロールすることにより、光軸の調整を行う。あらかじめ光路設置時にレーザーを使った光軸調整を行っていたため、ビームが出てからの調整は短時間で終了した。SRM 室内に入っか

らの光は、平面鏡で 2 つのラインに分割し、横方向のビームサイズを測定するゲートカメラと時間方向の分布を測定するストリークカメラの測定が同時に出来る様にした。Phase-II 運転時には屈折光学系とバンドパスフィルターを使った入射光学系を使っていたが、光量が少なく単バンチ毎のサイズ測定が難しかったため、両ラインとも Phase-III 開始時に反射光学系に組み替えて、すべての波長領域の入射光を測定に使用できるようにした。その結果、通常運転電流 (2.5mA/bunch) での単バンチの測定が可能になった。

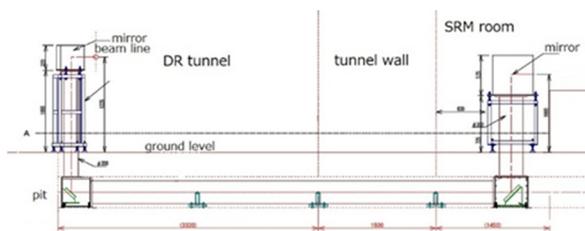


Figure 1: Layout of the DR SRM line.

3. サイズ較正

カメラの像を実際のビームサイズに変換するため、以下の方法でサイズ較正を行った。

ストリークカメラについては時間軸の較正のため、周波数シンセサイザーと半導体レーザーパルス光源 (508.88MHz、パルス幅約 50ps) を組み合わせて等間隔時間パルスを発生させ、カメラに入力した。時間軸は 4 段階に切り替えられるので、それぞれのレンジで入力パルスを変えて測定した結果が Table 3 である。実際のバンチ長測定には主にタイムレンジ 2 を使用しているのので、理論値と実測値の差は-0.6%であり、7mm のバンチ長に対して 0.042mm となり、十分小さい。

Table 3: Streak Camera Calibration Result

Time range	Theoretical value	Measured value	difference
4	1122.94	1138	1.3%
3	802.1	800.7	-0.2%
2	398	395.7	-0.6%
1	105.5	109.9	4.0%

ゲートカメラの較正には実ビームを用いた。放射光の発光点にローカルバンパ (横方向:-3.5mm~2mm, 縦方向:-3mm~3.5mm) を立てて、ゲートカメラ画像上でのビーム位置の変化を測定し、ピクセル数からビームサイズ[mm]への変換係数を導出する。Figure 2 が立てたローカルバンパの一例で、緑の線がバンパ軌道である。Figure 3 に横 (h) 方向、縦 (v) 方向それぞれの較正の結果を示す。

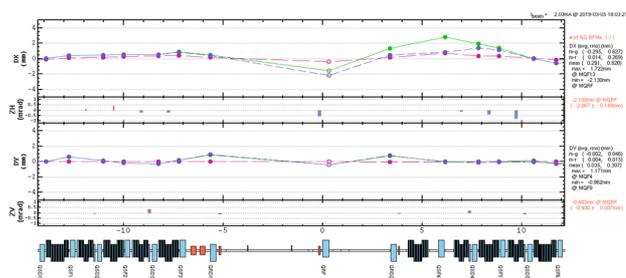
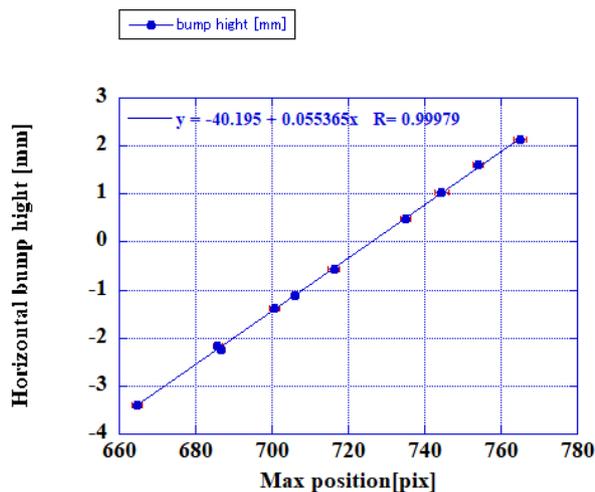


Figure 2: Measured bunch length after injection.

(a)



(b)

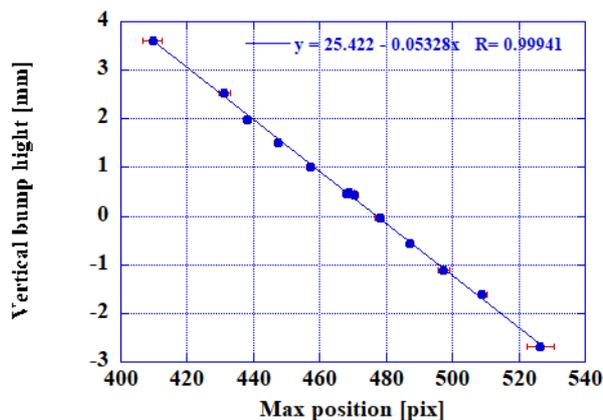


Figure 3: Calibration of beam size measurement by gated camera for (a) horizontal and (b) vertical direction.

4. ビームサイズ測定

上流の入射器からのシミュレーション結果によると、DR へ入射直後のバンチ形状は長手(z)方向に偏りを持っているが、DR を周回するにつれてダンピングされて、Gaussian に近づく[7]。ストリークカメラで測定すると、Fig. 4 の様に入射直後には時間軸方向にも横方向にも歪んでいたバンチが徐々にダンピングされて、20 ms 後には

Gaussian 形状に近い形になっていることがわかる。ゲートカメラでの測定でも、入射直後は大きく広がっているビームが、最初の数 10 ターンは収縮を繰り返した後に、縦(v) 方向、横(h) 方向とも縮んで行く様子が計測された。ストリークカメラ及びゲートカメラを使って DR 入射後のビームサイズの変位を測定した結果が Fig. 5 である。測定結果を Fit した結果、hvz 方向のダンピングタイムはそれぞれ $11.5\text{ms} \pm 0.29\text{ms}/9.9\text{ms} \pm 0.93\text{ms}/5.1\text{ms} \pm 1.17\text{ms}$ となり、デザインオプティクスから計算した値 $11.5\text{ms}/11.7\text{ms}/5.9\text{ms}$ と近い値を示した。十分ダンプした後のバンチ長は、 7.15mm となり、エラーバーの範囲内で計算値と一致する。

5. まとめ

SuperKEKB LER の陽電子ビームのエミッタンスを小さくするためのダンピングリングは、Phase-II 運転前に立ち上げられ、Phase-III 運転まで大きな問題なく稼働している。今回、放射光モニターを使って測定したところ、横方向、バンチ長方向とも予想ダンピングタイムとよく合った結果が得られた。また、バンチ長の絶対値も計算値とあっている。

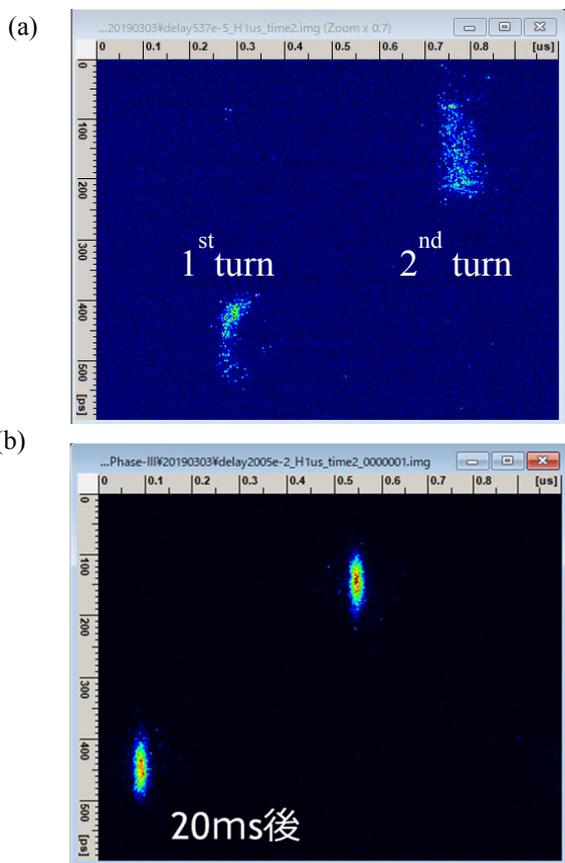


Figure 4: Longitudinal beam distribution that measured by streak camera (a) just after injection and (b) 20 ms after injection.

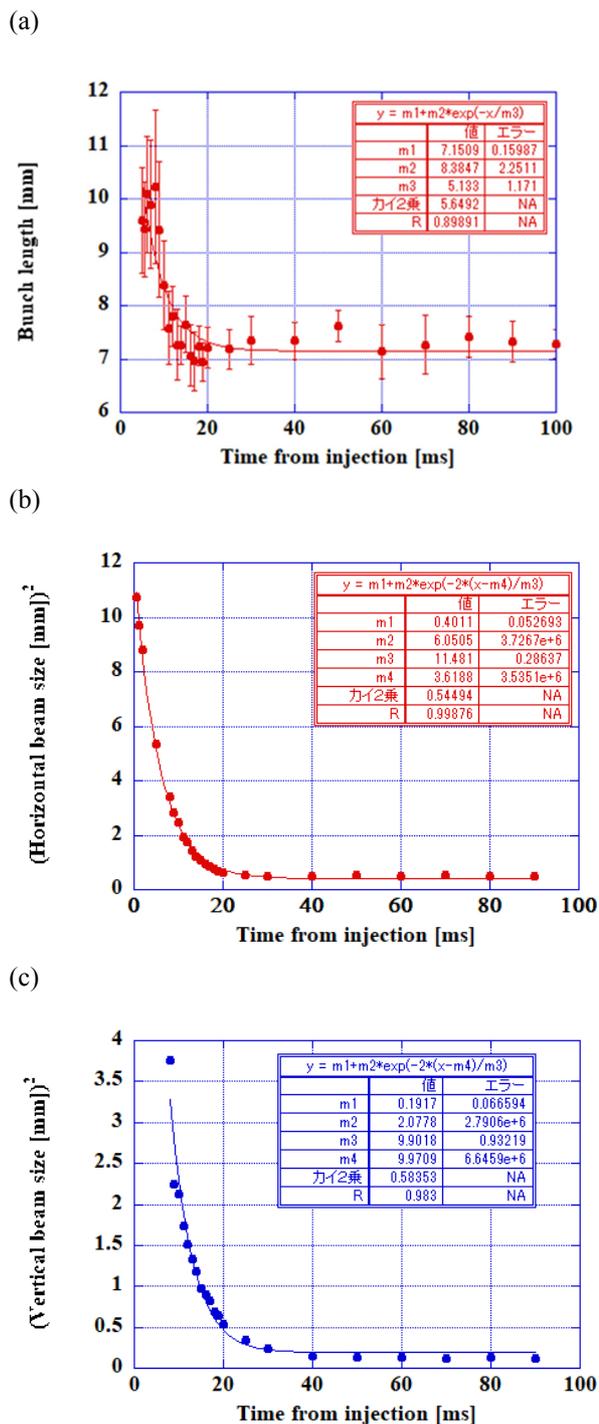


Figure 5: Measured beam size of (a) longitudinal, (b) horizontal and (c) vertical after injection.

参考文献

- [1] Y. Funakoshi, "BEAM COMMISSIONING OF SuperKEKB", Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea TUOBA01 (2016).
- [2] Y. Ohnishi et al., "SuperKEKB フェーズ 2 におけるコミッションングの成果", 第 15 回日本加速器学会, 新潟県, WEOLP01 (2018).
- [3] M. Kikuchi *et al.*, "DESIGN OF POSITRON DAMPING

- RING FOR SUPER-KEKB”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, TUPEB054 (2010).
- [4] N. Iida *et al.*, “BEAM DYNAMICS IN POSITRTON INJECTOR SYSTEMS FOR THE NEXT GENERATION B-FACTORIES”, Proceedings of IPAC’11, San Sebastian, Spain, THYA01 (2011).
- [5] Y. Ohnishi *et al.*, “SuperKEKB フェーズ 3 コミッショニング”, 第 16 回日本加速器学会, 京都府, FSPH008 (2019).
- [6] H. Ikeda *et al.*, “SuperKEKB ダンピングリング放射光モニター”, 第 8 回日本加速器学会, つくば, MOPS069 (2011).
- [7] N. Iida *et al.*, “SuperKEKB の陽電子ダンピングリングの入出射路コミッショニング”, 第 15 回日本加速器学会, 新潟県, THOM04 (2018).