

SuperKEKB 加速器のための超高速ビームサイズモニターの開発

R&D OF AN ULTRAFAST X-RAY BEAM SIZE MONITOR FOR SuperKEKB

能丸理玖^{#A)}, 三塚岳^{B)}, Matthew Andrew^{C)}, 吉原圭亮^{C)}, Larry Ruckman^{D)},
Riku Nomaru^{#A)}, Gaku Mitsuka^{B)}, Matthew Andrew^{C)}, Keisuke Yoshihara^{C)}, Larry Ruckman^{D)}

^{A)} The University of Tokyo

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

^{C)} University of Hawaii

^{D)} SLAC National Accelerator Laboratory

Abstract

At SuperKEKB, Sudden Beam Loss (SBL)—a phenomenon characterized by rapid beam instabilities occurring within tens of microseconds—has emerged as a major obstacle to further luminosity improvements. Previous observations suggest that the beam size increases rapidly during SBL events, highlighting the need for ultra-fast beam size diagnostics. To address this, we are developing and testing a novel beam size monitor capable of bunch-by-bunch measurements. The system employs synchrotron X-rays and a 128-channel silicon strip detector to capture beam images at high speed. In this study, we used a pulsed laser instead of X-rays to evaluate the response of the sensor and associated readout electronics. We confirmed that the detector system functions as intended, and gain calibration using laser data is currently underway in preparation for beam observations. The monitor is scheduled to be installed in the next SuperKEKB operation beginning in November 2025.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器[1]は、4 GeV の陽電子と 7 GeV の電子を用いた高ルミノシティ電子・陽電子衝突型加速器である。2024 年 12 月には、瞬間ルミノシティにおいて世界最高記録である $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。最終的にはこの記録の 10 倍以上となるルミノシティを目指しており、その実現に向けて加速器の運転が続けられている。しかしながら、Sudden Beam Loss (SBL) と呼ばれる現象が、このルミノシティ向上を妨げる要因の一つとなっている[2]。SBL は、数十マイクロ秒という極めて短時間のうちにビームの不安定性が発生し、大規模なビーム損失およびビームアバートを引き起こす現象である。

SBL のメカニズムを解明することは、SuperKEKB におけるルミノシティのさらなる向上にとって極めて重要である。これまでの観測結果から、SBL 発生時にはビームサイズが急激に増大している可能性が示唆されており[3]、この短時間でのビームサイズの変動を正確に捉えることが不可欠である。しかし、SuperKEKB においては、ターンバイターンでの観測が可能なビームサイズモニターは存在するものの、それよりも高速な時間分解能を有するモニターは存在しない。

この課題を解決するため、我々はバンチバイバンチでのビームサイズ測定が可能な新たなビームサイズモニターの開発および試験を進めている。本モニターは、SBL の詳細な観測に加え、かねてより問題とされてきた電子雲不安定性など、他のビーム不安定性の解析にも有効であると期待される。

2. ビームサイズの測定手法

SuperKEKB メインリングにおけるビームサイズの測定

[#] nomaru@post.kek.jp

には、ビームが偏向電磁石により曲げられた際に放出される放射光 X 線が利用されている。放射光 X 線に Coded aperture 型のスリットを通過させ、その像を撮影し、得られたパターンをフィッティングすることによりビームサイズを算出している[4]。この手法の概念図を Fig. 1 に示す。

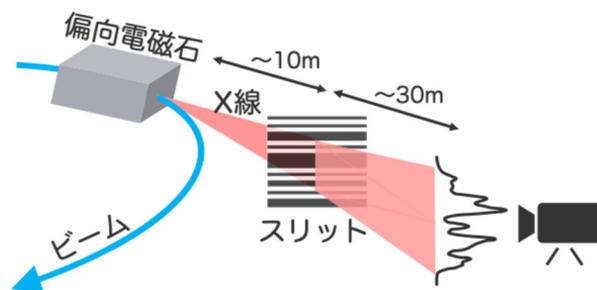


Figure 1: Concept of X-ray beam size monitor.

従来は、最も高速な撮像デバイスとして CMOS カメラが用いられており、ターンバイターン(約 100 kHz)の時間分解能での測定が可能であった。本研究では、撮像デバイスとしてシリコンストリップ検出器を新たに導入し、放射光 X 線像を 2.7 GSa/s で高速サンプリングすることで、最小 4 ns 間隔で到来する各バンチのビームサイズ測定を可能とする。

3. 超高速ビームサイズモニターの構成

我々は現在、KEK とハワイ大学が共同開発した超高速ビームサイズモニターの動作試験を進めている。Figure 2 にモニター外観を示す。本システムは以下の 3 要素から構成される: 128 チャンネルのシリコンストリップ

センサーを載せたセンサーボード、信号増幅用プリアンプボード、ならびに信号のデジタル化と転送を担う DAQ ボードである。各 DAQ ボードは 32 チャンネル分の信号を処理可能であり、これらを 4 層に積層することで、128 チャンネルの信号を 2.7 GSa/s で記録できる構成となっている。DAQ ボードは、ハワイ大学が Belle II TOP 検出器用に開発した読み出し回路[5]と同じものを使用している。

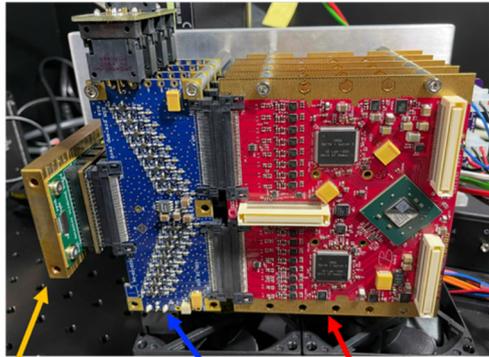


Figure 2: Photo of ultra-high-speed beam size monitor.

Figure 3 に、使用しているシリコンストリップセンサーの拡大写真を示す。本センサーは Stanford Nanofab により製作され、50 μm ピッチで配置された 128 チャンネルのカソードストリップを有する。空乏層の深さは 75 μm であり、通常 -40 V のバイアス電圧で動作させる。本発表では 128 チャンネルのうち 42 チャンネルのみを後段の回路に接続したセンサーを用いた試験の結果を述べる。

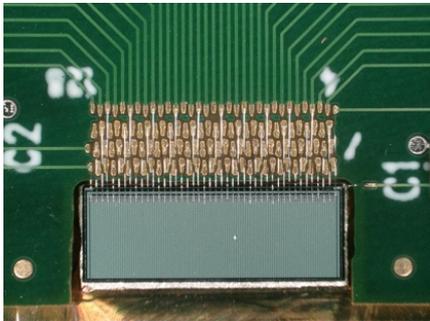


Figure 3: Enlarged photo of silicon strip sensor. The X-rays come from below the photograph.

4. テストベンチ構成

本モニターの動作検証のため、我々は放射光 X 線の代替としてパルスレーザーを用いてシリコンストリップセンサーへの照射試験を実施している。Figure 4 に、試験のために構築したテストベンチの概念図を示す。暗箱内にパルスレーザー発生器および本センサーシステム一式を設置し、レーザー発生器を昇降ステージ上に配置してセンサーへの照射を行う。昇降ステージは外部からの遠隔操作により上下動が可能であり、照射位置を制御できる。DAQ により取得されたデータは光ファイバーを通じて外部コンピュータに転送され、センサーへのバイアス電圧も外部から調整可能である。

使用したパルスレーザーは THORLABS 社製の

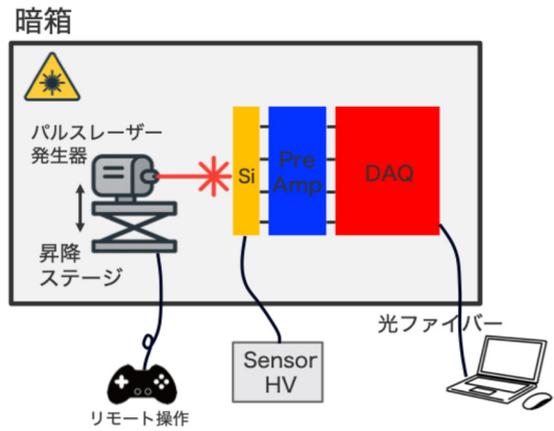


Figure 4: Test bench using a pulsed laser.

NPL98B[6]であり、波長 980 \pm 10 nm のレーザーを 5 種類のパルス幅で出力可能である。本研究では最も狭い 6 ns パルスを用いて試験を実施した(詳細なパルス形状は THORLABS の web ページ[6]参照)。

5. レーザー照射試験

5.1 センサー応答特性

まず、パルスレーザー照射に対するシリコンストリップセンサーの応答を評価した。一つのパルス照射に対する、ある 1 チャンネルの出力波形を Fig. 5 示す。これはセンサー出力を直接オシロスコープにより観測したものである。照射されたパルスと同等の時間幅を有する出力パルスが得られていることが分かった。このパルス波形の高さを、Fig. 5 内の矢印で示されているようにベースラインからパルスの頂点までの電圧差と定義する。

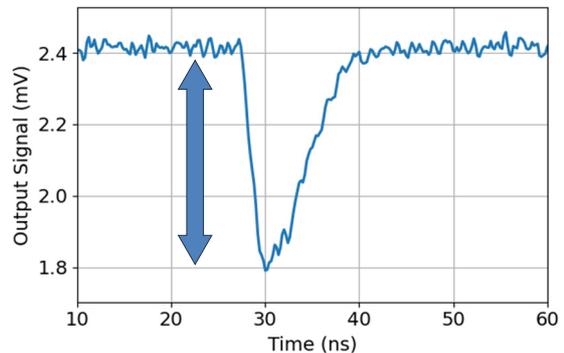


Figure 5: Output waveform of one channel of the silicon sensor for a single pulse irradiation. The arrow in the figure indicates the definition of pulse height.

Figure 6 に、バイアス電圧を変化させた際のパルス波形の高さ(青)およびバイアス電流の変化(赤)を示す。バイアス電圧の絶対値を増加させるにつれて、パルス波形の高さおよびバイアス電流はいずれも増加する傾向を示した。特に、パルス波形の高さの増加はバイアス電圧の低下に伴い次第に飽和していく様子が確認された。

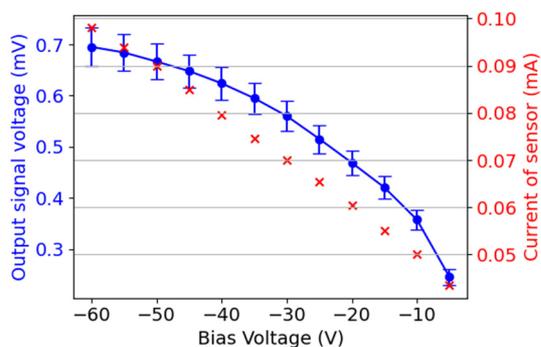


Figure 6: Relationship between bias voltage and pulse height (blue) / bias current (red)

5.2 プリアンプおよび DAQ 応答

次に、プリアンプと DAQ を用いた増幅・デジタル化による波形取得を行った。Figure 7 に示すように、1 パルスに対するシリコンストリップセンサー全体の応答が記録された。特に、チャンネル番号 89 の波形を拡大表示したものを Fig. 8 に示す。この測定では、チャンネル番号 60 から 110 周辺の範囲に信号が確認されており、レーザーがこの領域に照射されていることが分かる。

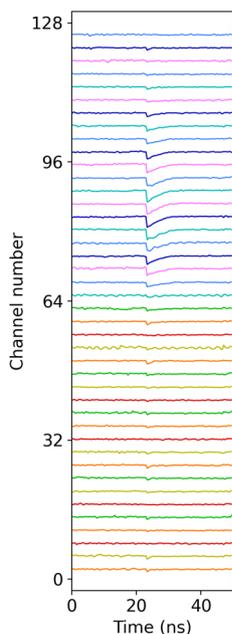


Figure 7: Overall response of the silicon strip sensor to a single laser pulse recorded by the DAQ. Only 42 out of 128 channels are shown.

昇降ステージによりレーザー照射位置を上下に動かすことで、信号が観測されるチャンネル範囲も対応して移動することが期待される。Figure 9 に示すヒートマップは、レーザーの上下位置変更に伴う各チャンネルのパルス高さ分布を示している。レーザー照射位置を変化させると、パルスが記録されるチャンネルも線形に移動していくという関係性が明確に確認できた。

以上の結果より、センサーおよび後段回路が正常に

動作していることが確認され、今後のビーム観測に向けた各チャンネルのゲインキャリブレーションへと展開可能である。

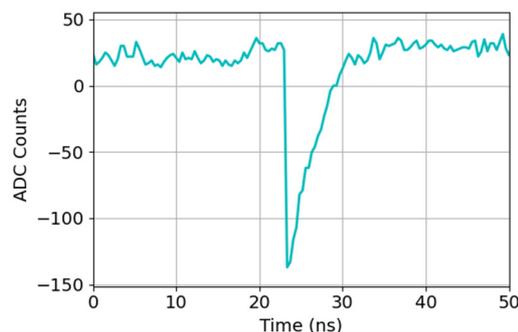


Figure 8: Single-pulse response of channel 89 recorded by the DAQ.

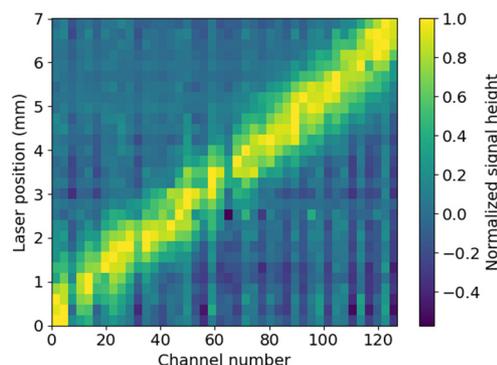


Figure 9: Relationship between laser vertical position and pulse height in each channel.

6. まとめと今後の展望

本研究では、SuperKEKB 加速器における Sudden Beam Loss や電子雲効果等のビーム不安定性を詳細に観測するため、バンチバイバンチで測定可能な新規ビームサイズモニターの開発および試験を行っている。本モニターはシリコンストリップ検出器を用いて放射光 X 線像を高速に撮像し、最小 4 ns 間隔で到来するバンチのビームサイズを記録可能とする。我々はレーザー照射による本システムの応答試験を実施し、センサーと電子回路が良好に動作することを確認した。本モニターは 2025 年 11 月からの次期 SuperKEKB 運転期間において、メインリングに設置し実際のビーム観測を行う予定である。

一方で、本システムにはいくつかの課題も存在する。たとえば、サンプリングクロックが加速器 RF 信号と同期していないこと、DAQ ボード上にメモリを搭載していないため大量のバンチのデータを同時取得できないことなどが挙げられる。これらの問題に対処するため、我々は AMD/Xilinx 製の RF System On Chip[7]を用いた新たな読み出し回路の開発も進めており、2026 年秋の運転より同回路によるビームサイズ測定の開始を計画している。

参考文献

- [1] SuperKEKB Design Report,
<https://kds.kek.jp/event/15914/>
- [2] H. Ikeda *et al.*, “Observations and efforts to reduce sudden beam loss at SuperKEKB”, in Proc. IPAC’25 (2025) pp. 57–60.
- [3] G. Mitsuka *et al.*, “Measurements for beam size blowup in sudden beam loss events and analysis of the beam loss evolution mechanism”, in Proc. IPAC’25 (2025) pp. 3144–3147.
- [4] E. Mulyani *et al.*, “First measurements of the vertical beam size with an X-ray beam size monitor in SuperKEKB rings”, Nucl. Instrum. Meth. A **919** (2019), 1-15.
doi:10.1016/j.nima.2018.11.116
- [5] M. Andrew, “128 channel waveform sampling digitizer/readout in the TOP counter for the Belle II upgrade”, PoS **TIPP2014** (2014), 171. doi:10.22323/1.213.0171
- [6] https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10823#ad-image-0
- [7] <https://www.amd.com/en/products/adaptive-socs-and-fpgas/soc/zynq-ultrascale-plus-rfsoc.html>