

突発ビームロス事象解明のためのターン毎ビームサイズモニター開発 DEVELOPMENT OF TURN-BY-TURN BEAM SIZE MONITORS FOR DISENTANGLING OF SUDDEN BEAM LOSS EVENTS

三塚 岳 ^{*,A)}, 石田 孝司 ^{A)}, 岩瀬 周平 ^{A)}

Gaku Mitsuka ^{*,A)}, Takashi Ishida ^{A)}, Syuhei Iwabuchi ^{A)}

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

Abstract

The biggest challenge in realizing high luminosity at the SuperKEKB accelerator is sudden beam loss events that entail the abrupt disappearance of the beam within tens of microseconds. Why, how, and under what conditions sudden beam loss events occur is still unclear. Nevertheless, the position and size of a bunch are supposed to oscillate or increase rapidly, and these bunches may unwantedly collide with the collimator system installed in the SuperKEKB main ring, causing beam loss. To elucidate the mechanism of sudden beam loss events, we have developed a turn-by-turn beam size monitor to measure the size blow-up during these events. In this presentation, we report on developing the beam size monitor using an ultrafast CMOS camera and the size blow-up during the sudden beam loss event.

1. SUPERKEKB と突発ビームロス事象

SuperKEKB 加速器は 7 GeV 電子リングと 4 GeV 陽電子リングからなる衝突型加速器である。SuperKEKB が 2022 年に記録した最高ルミノシティは、2024 年時点の世界最高記録となる $4.71 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。一方で SuperKEKB が目標とする $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の達成には、更なるビーム電流増強やビーム運転安定化の必要性が明らかである。電流増強やビーム運転の長期的な安定性を阻む最大の原因が突発ビームロス事象 (sudden beam loss events) である [1]。突発ビームロス事象は明らかな前兆も無く突然ビーム (バンチ) 軌道が振動を始め、わずか数ターン (数十マイクロ秒) ほどでビーム電流の 10% 以上を損失しアポートへ至るとい現象である (Fig. 1)。突発ビームロス事象はビーム電流に比例して Belle II 検出器や加速器コンポーネントへ大きな損傷をもたらすことがあり、発生機構の解明とそれにもとづく発生抑制策が喫緊の課題である。

リング各所に設置されたロスモニターやバンチ振動レコーダー (各バンチの軌道を 100 ターン以上に渡って記録できるモニター) で取得したデータの解析から、突発ビームロス事象の発生は、何らかの理由によりバンチ位置が変化、またはバンチサイズが増大し、コリメータシステムと衝突した、と考えられる [1,2]。バンチ位置やサイズの変化は、Fig. 2 に示すように 3 つのパターンが考えられる。パターン A は通常のバンチ、パターン B はバンチ位置が変動、パターン C はサイズが増大、パターン D は位置とサイズが変動した場合である。本研究では、バンチがコリメータに衝突しビームロスが発生する B-D の 3 つのパターンを弁別し機構解明へつなげる目的で、ターン毎のビームサイズ測定を可能とする高速プロフィールモニターを開発した。

2. X線ビームサイズモニターの高速度化

X線ビームサイズモニター [3] は、SuperKEKB において横方向ビームサイズ測定を担う標準モニターである。

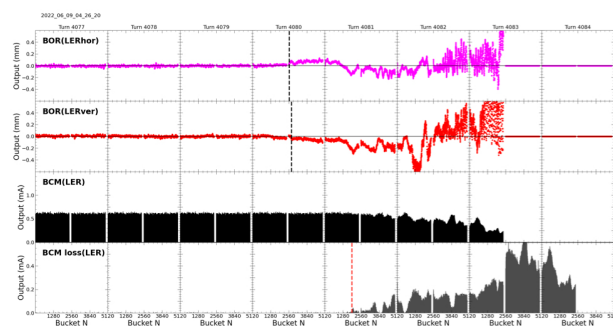


Figure 1: Example of a sudden beam loss event, where the horizontal orbit, vertical orbit, bunch charge, and bunch charge (multiplied by 5) are shown from the top.

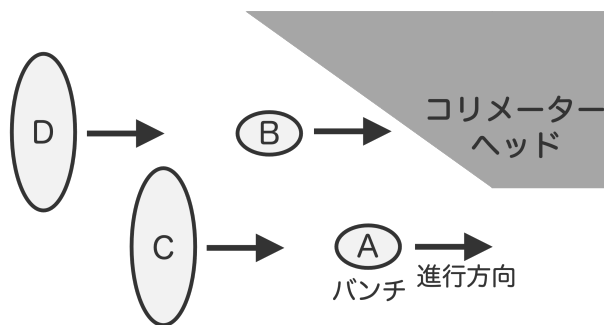


Figure 2: Patterns of sudden beam loss events.

まずシンクロトロン放射光は、発光点より約 10 m 下流に設置された coded aperture と呼ばれる光学マスクに達する。ランダムに配置された幅の異なるマルチスリットを通過した X 線のみが、さらに約 30 m 下流に設置されたシンチレータスクリーンに到達する。スクリーンに射影された X 線プロフィールを CMOS カメラで測定し、ある想定ビームサイズに対応するシミュレーションプロフィールと測定プロフィールのマッチングを取ることで、ビームサイズを推定する。

シンチレータスクリーン上の X 線プロフィールを測定するため通常使用している CMOS カメラは、Basler 社

* gaku.mitsuka@kek.jp

製 Gige カメラである。本研究では Gige カメラに加え、SuperKEKB の周回周波数である 99.4 kHz 以上の高速撮像に対応する Mikrottron 社 EoSens 1.1 CXP2 を新たに導入した。2 台の CMOS カメラを用いて X 線プロファイルを撮像することで、通常のビームサイズ測定 (~ 10 Hz) とターン毎ビームサイズ測定を両立させた。EoSens 1.1 CXP2 はデータ転送や電力供給を CoaXPress 2.0 規格に則って行うため、CoaXPress 2.0 に準拠したフレームグラバードが必要である。本研究では、BitFlow 社 Claxon CXP4 PCIe ボードを用いている。データ取得中は周回周波数 99.4 kHz に同期してシャッターを動作させ、撮像データをフレームグラバード内部のリングバッファ (2 GB) へ保存し続ける。ビームアボートが発生したときのみ、リングバッファ内データをサーバー側のディスクへ移動し、その後オフライン解析を行っている。

3. X 線ビームサイズモニターの測定結果

Figure 3 にビームサイズ増大を伴う陽電子リングでのアボート事象例を示す。この事象は大きなロスが発生しなかったため、突発ビームロス事象とは認定されていない。上段が X 線ビームサイズモニターで測定したビームサイズであり、中段と下段が各バンチ振動レコーダーで測定したバンチ位置である。LERUV と LERDV は陽電子リングに設置されたバンチ振動レコーダーの名称であり、ベータatron 振動位相が互いに 90° 離れている。

Figure 3 上段に示すように、アボートの約 12 ターン前よりビームサイズ ~ 85 μm が増大を始め、最大値は約 400 μm に達している。ここで LERDV を見ると、アボートの約 12 ターン前よりバンチ位置がわずかに振動を始めているのが分かる。今回の測定では 3 μs の露光時間を取っているため、露光時間に含まれるバンチの位置振動も、見かけ上ビームサイズ増大の一因となり得る。LERDV と X 線ビームサイズモニターデータを詳細に解析し、位置振動とビームサイズ増大の切り分けを行うのが今後の課題である。

4. 高速可視光ビームサイズモニターの開発

前項で述べた X 線ビームサイズモニターは大光量を期待できるため、露光時間が数 μs と極めて短いビームサイズ診断に適している。一方で、X 線ビームサイズモニターはその撮像システムを SuperKEKB トンネル内に置かざるを得ず、結果的に電子・陽電子ビームに由来する放射線の影響を受けやすい。実際、陽電子リング側の X 線ビームサイズモニターの周囲には線量が高い電子ビーム入射部やダンプシステムがあり、CMOS カメラやフレームグラバードの誤動作が発生した。

本研究では、X 線ビームサイズモニターの高速化に加え、高速可視光ビームサイズモニターも開発した。可視光ビームラインは基本的に既設ラインをそのまま使用し、以下の検出器側システムのみを新開発した。まず、ビームハロー測定用に開発したコロナグラフ [4] の初段であるグレゴリアン望遠鏡を結像システムとして流用した (Fig. 4)。グレゴリアン望遠鏡は凹面鏡を二枚対面させた構成であり、凸面鏡を用いるカセグレン望遠鏡などに比べて鏡表面の研磨精度を出しやすい利点がある。ま

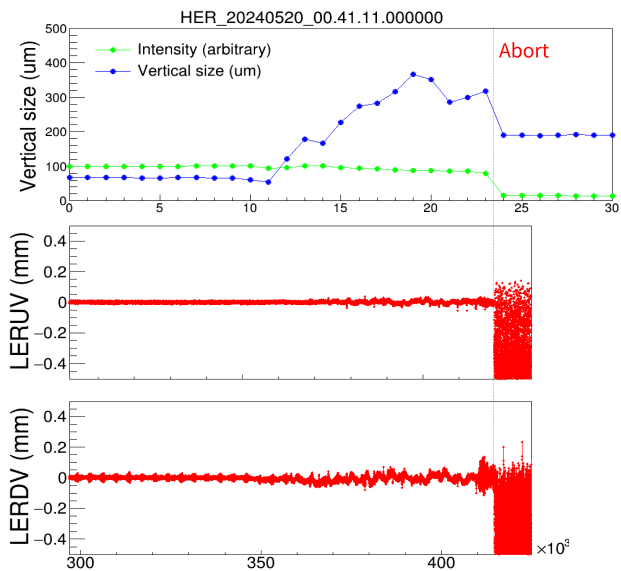


Figure 3: Measurements for beam abort events in turn-by-turn vertical beam size (top) and bunch-by-bunch orbits (middle and bottom). The vertical bar indicates the timing of the beam abort.

たレンズではなく鏡を使用するので非点収差の影響も受けにくい。グレゴリアン望遠鏡の設計拡大率は 0.57 である。

CMOS カメラは X 線ビームサイズモニターと同じく、Mikrottron 社 EoSens 1.1 CXP2 を用いた。ただし、可視光モニターでは CMOS センサーの特定領域 (Region Of Interest, ROI) を X 線モニターの場合の 2 倍に広げた。これは結像したビーム像をテール部まで ROI 内に収めるためである。ROI 拡大により撮像レートが最大 50 kHz へ低下したため、可視光モニターの測定はターン毎ではなく、2 ターンに 1 ショットである。シャッター制御は (1) FPGA ボード内で周回信号 99.4 kHz を 1/2 に間引いた 99.4 kHz/2 = 49.7 kHz 信号を作りカメラへ送る、(2) カメラ内部のクロックを用いて 49.7 kHz を作る、の二通りの方法を試した。なお、今回の測定では露光時間を 2 μs とした。



Figure 4: Gregorian telescope and ultrafast CMOS camera.

5. フラウンホーファー回折とサイズ較正

結像型可視光ビームサイズモニターを運用する上で、以下二点の注意が必要である。

第一に、カメラで撮像したプロファイルは、ビーム本来のプロファイルと放射光取り出し用鏡の回折の双方を畳み込んだプロファイルとなる。そのため、測定プロファイルから真のビームサイズを導出するためには、回折の影響を正確に差し引く必要がある。放射光取り出し用鏡は横 22 mm×縦 32 mm のダイヤモンド鏡 [5] であり、これが放射光発光点から望遠鏡までの間で最も小さい開口となる。Figure 5 左図はシミュレーションで得られた、ダイヤモンド鏡の回折プロファイルである。これはグレゴリアン望遠鏡直前で得られるプロファイルを想定しており、ダイヤモンド鏡からグレゴリアン望遠鏡までの距離は 24.6 m である。Figure 5 右図はグレゴリアン望遠鏡の後方焦点で得られる回折プロファイルの射影であり、主ピークの幅は $\sigma = 62 \mu\text{m}$ である。

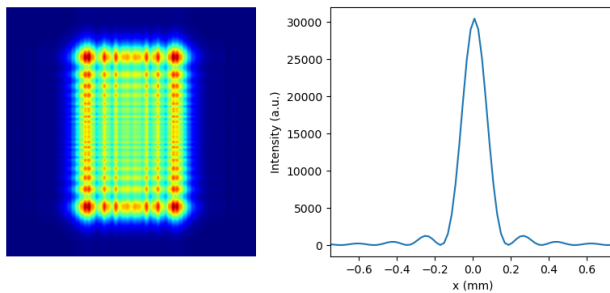


Figure 5: The diffraction pattern of the diamond reflection mirror at the front of the Gregorian telescope (left) and the rear focal point (right).

第二に、CMOS カメラで撮像した際のピクセル単位と実際のビームサイズ (メートル単位) の対応に注意が必要である。本研究では pixel/mm の係数を導出するため、まず (1) グレゴリアン望遠鏡直前に置かれた水平ステージ上の平面鏡位置を 1 mm ずつ移動させ、(2) その都度 CMOS カメラで光像中心の移動距離をピクセル単位で測定する、(3) この操作を光像が CMOS センサー内に収まる範囲で数十回繰り返す、(4) データを直線フィットし mm 距離に対するピクセル距離の傾きを求める、という手順で較正を行った。Figure 6 に示すように、ベストフィット値 32.3 pixel/mm が得られた。これにグレゴリアン望遠鏡の横倍率 0.57 を掛けると、 $1 \text{ mm}/32.3 \text{ pixel} \times 0.57 = 17.6 \mu\text{m}/\text{pixel}$ という最終的な較正係数が得られる。なお、較正係数は CMOS センサーのピッチサイズに相当する値であるが、CMOS カメラの仕様書によると $13.7 \mu\text{m}/\text{pixel}$ であり、水平ステージとビームを用いた較正結果と仕様の差異の理解は今後の課題である。

今回紹介するビームサイズ測定結果は測定プロファイルそのもののフィット値、つまり回折が畳み込まれた状態でのビームサイズ (プロファイルの垂直軸をガウス関数フィットして得られた σ) をピクセル単位で表したものである。プロファイルからフラウンホーファー回折の効果を差し引き、ビームサイズを μm 単位で表す作業は

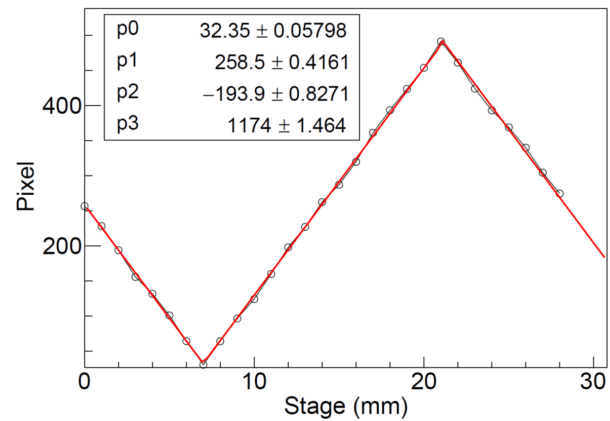


Figure 6: Metric units and pixel correspondence calibrated using the manual horizontal stage. Red lines indicate the best fit results

今後の課題である。

6. 可視光ビームサイズモニターの測定結果

Figure 7 にビームサイズ増大を伴う陽電子リングでのアボート事象を示す。左図と中央図に示した事象は、ノッカーと呼ばれる機器を用いて真空チェンバーに意図的に振動を加えたスタディ時 (2024 年 6 月 25 日) に発生した突発ビームロス事象である。スタディの意図は、真空チェンバーに振動を加えることでチェンバー内壁に付着したダストを強制的に振り落とし、ノッカーが動作したタイミングでダストとビームを衝突させるというものである。ノッカー作動のタイミングでの再現から、突発ビームロス事象はダスト由来であるという強い根拠になっている。右図は通常の物理ラン中に発生した突発ビームロス事象である。いずれの事象も、上段が可視光ビームサイズモニターで測定したビームサイズ (ピクセル単位)、中段と下段がそれぞれバンチ振動レコーダー LERUV および LERDV で測定したバンチ位置である。

Figure 7 に示したすべての事象で、ビームサイズが増大するタイミングと LERDV で測定したバンチ位置が振動を開始するタイミングは概ね一致している。これより、可視光ビームサイズモニターとバンチ振動レコーダーは確かに同一の現象、すなわち突発ビームロス事象を測定していることが分かる。既に述べた課題、(1) フラウンホーファー回折の影響を測定プロファイルから取り除き真のビームサイズを導出する、(2) ピクセル単位を μm 単位へ変換する、の二点が解決され次第、バンチ振動レコーダーと可視光ビームサイズモニターの測定データの詳細な解析を全測定データに対して行う予定である。

参考文献

- [1] H. Ikeda, "Observation and cause investigation of sudden beam loss at SuperKEKB", Proceedings of the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2024.
- [2] R. Nomaru, G. Mitsuka, and L. Ruckman, "Development of a new bunch oscillation recorder for disentangling of sudden

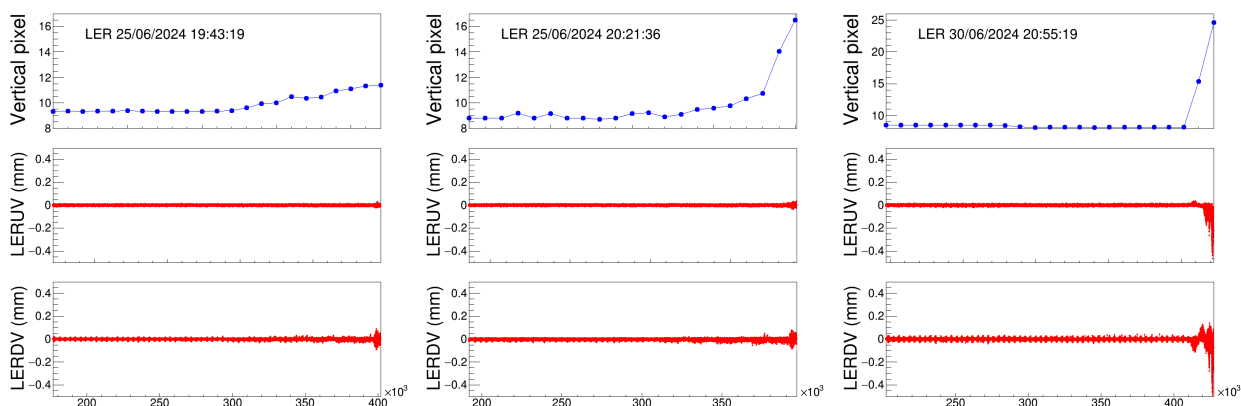


Figure 7: Measurements for beam abort events in vertical beam size (top) and bunch-by-bunch orbits (middle and bottom). The markers in the top panels indicate shots every two turns.

beam loss events”, Proceedings of the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2024.

- [3] E. Mulyani *et al.*, “First measurements of the vertical beam size with an X-ray beam size monitor in SuperKEKB rings”, *Nucl. Instr. Meth.*, vol. 919, pp. 1–15, 2019. doi:10.1016/j.nima.2018.11.116
- [4] G. Mitsuka, T. Mitsuhashi, and H. Ikeda, “Design and Construction of Optical System of the Coronagraph for Beam

Halo Observation in the SuperKEKB”, in *Proc. IPAC’22*, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 769-771. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-TUOXGD1

- [5] G. Mitsuka, H. Ikeda, and T. Mitsuhashi, “Renovation of the SR Beam Profile Monitors with Novel Polycrystalline Diamond Mirrors at the SuperKEKB Accelerator”, in *Proc. IPAC’22*, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 313-315. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOPT031