

突発ビームロス事象解明のための新型バンチ振動レコーダーの開発

DEVELOPMENT OF A NEW BUNCH OSCILLATION RECORDER FOR DISENTANGLING OF SUDDEN BEAM LOSS EVENTS

能丸理玖^{#, A)}, 三塚岳^{B)}, Larry Ruckman^{C)}

Riku Nomaru^{#, A)}, Gaku Mitsuka^{B)}, Larry Ruckman^{C)}

^{A)} The University of Tokyo

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

^{C)} SLAC National Accelerator Laboratory

Abstract

In the SuperKEKB/Belle-II experiment, new physics searches are being carried out by colliding 4 GeV positrons with 7 GeV electrons. The experiment aims to significantly enhance luminosity, targeting an increase to 100 times the current level. However, achieving this goal is challenged by a recurrent issue known as "Sudden Beam Loss" event, where the beam abruptly disappears within tens of microseconds. The cause of this event remains unidentified. To diagnose and debug these sudden beam loss events, a new Bunch Oscillation Recorder (BOR) has been developed, utilizing the Radio Frequency System on Chip from AMD/Xilinx. The BOR measures and records the beam position bunch-by-bunch just before the beam abort and enable detailed analysis of Sudden Beam Loss.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器[1]は電子と陽電子を高いルミノシティで衝突させ、Belle II 検出器に B 中間子、タウ粒子、その他の荷電粒子を大量に供給している。本加速器は、7 GeV の電子蓄積リング (HER) と 4 GeV の陽電子蓄積リング (LER) で構成されている。ナノビーム方式を採用することで、衝突点でのビームサイズを小さく絞り込み、2022 年には世界最高記録である $4.65 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という瞬間ルミノシティを達成した。本加速器には、両リング合わせて 31 個のコリメータが設置されており (Fig. 1)、Belle II 検出器を不要なビームバックグラウンドから守っている。本加速器は、1 年以上にわたる最初の長期シャットダウン (LS1) を経て、2024 年 2 月に運転を再開した。さらなる高ルミノシティ化に向けてコミッション中であるが、突発ビームロス事象と呼ばれる現象がルミノシティ向上の妨げとなっている。

2. 突発ビームロス事象

突発ビームロス (SBL) 事象は、数十マイクロ秒の間に蓄積ビームが突然ロスし、ビームアポートにつながってしまうという現象である。これは現在、SuperKEKB のルミノシティ向上の最大の障害となっている[2]。SBL 事象は、加速器運転に関わる様々な支障、例えばコリメーターなどの加速器コンポーネントへのダメージ、Belle II 検出器の損傷、超伝導収束システムのクエンチ、などを引き起こしている。Figure 2 は、SBL 事象発生時にビームコアがコリメーターヘッドに直接衝突し、ヘッド表面が削られてしまった様子を示している。なおこれまでの運転により、蓄積電流が大きいほど SBL 事象によって引き起こされるダメージも深刻であるということが分かっている。そのため、蓄積電流を当初の予定通りに増やすことができず、

瞬間ルミノシティの向上を妨げている。さらに、一旦 SBL 事象が発生すると、ビームアポートや超伝導システムのクエンチにつながり、ビーム運転へ復帰するのに最大で数時間から半日かかってしまう。このように、SBL 事象は積分ルミノシティの向上も阻害している。2024 年 2 月から 7 月までの運転期間中のスタディの結果によると、SBL 事象の原因はビームパイプ内のダストである可能性があると分かってきている。しかし、発生機構や詳細な発生場所は未だ完全に解明されていない。

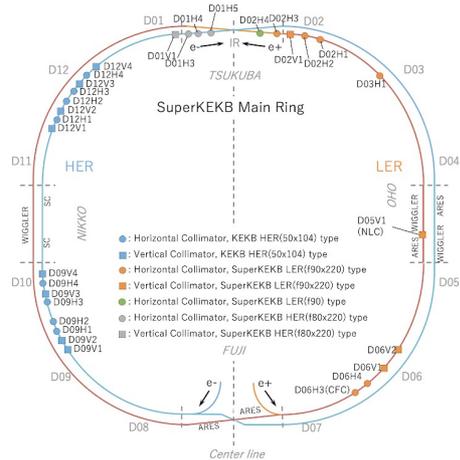


Figure 1: Collimator location at SuperKEKB.



Figure 2: Collimator head damaged by SBL.

[#] nomaru@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

3. バンチ振動レコーダー

バンチ振動レコーダー(BOR)[3]は、ビームがアポートするまでの 100 ターン以上のビーム位置をバンチバイバンチで記録するビーム診断システムである。LS1 以前は、各リングに 1 台ずつ BOR が装備されており、その BOR 測定から、SBL 事象はバンチ位置振動を伴っていることが知られていた。このような観測結果は、残留ダスト、何らかのビーム不安定性、完全に最適化されていないフィードバックキッカーシステムなどの未知の要因によってバンチの一部が蹴られ、バンチ位置の振動と結果的に大きなビームロスに繋がっていることを示唆している。そして、SBL 事象解明のためには、各バンチの位置振動を高精度かつ高速で測定できるビーム診断システムが必須だということも示唆している。一方、1 つの BOR だけでは、どこでどのように SBL 事象が発生・発達するのかを特定することができないという問題がある。なぜなら、振動の振幅が小さい、または BOR を設置した位置のベータatron振動の位相が節に近い、という 2 つのシナリオを弁別することができないからである。そのため、複数台の BOR をベータatron位相が異なる場所に設置することで、様々なベータatron位相を広くカバーし、さらに、振動の発生地点に近い場所でバンチ振動をより直接的に検出する必要があると考えている。本研究の目的は、SBL 事象の解明のために、LS1 後の運転に対応できるハンディな BOR を新開発し、それをリングに沿って複数配置することである。

4. RF System on Chip

AMD/Xilinx 社製の RF System on Chip (RFSoc) [4] と呼ばれる新しいチップを使用して、新型 BOR の開発を行った。RFSoc は、ADC、DAC、FPGA、CPU を一枚のチップに統合したものである。本研究ではまず、ZCU111 RFSoc 評価ボードを使用して開発を開始した。XCZU28DR を搭載した ZCU111 評価ボードには、最大 4096 Msps の ADC が 8 チャンネル搭載されている。外部クロック入力により、RFSoc を SuperKEKB RF クロック

に同期させることができる。PMOD GPIO も備え付けられており、SuperKEKB アポート信号を受信することができる。XM500 RFMC ドーターボードでは、SMA ポートが ADC 入力と DAC 出力用に設けられている。8 つの ADC 入力のうち 4 つは差動信号用で、残り 4 つはシングルエンド信号用である。シングルエンド用のうち 2 チャンネルは、10 MHz~1 GHz (LF) 用のバランに接続され、残りの 2 チャンネルは、1~4 GHz (HF) 用のバランに接続されている。現在は XM500 を使用しているが、BOR としてさらに効率的に利用するため、全てのチャンネルに対して同じ周波数特性を持つ新しいカスタムドーターボードを開発中である。

5. BOR 回路開発

ビームパイプ内に設置された、相対する 2 つのボタン電極からの電圧信号を比べることで、バンチ位置を算出できる。ボタン電極からの電圧信号は SuperKEKB の最小バンチ間隔である約 4 ns より十分細かい時間間隔でサンプリングする必要がある。Figure 3 に BOR 回路の概略図を示す。ここではバンチの垂直位置の測定を想定している。バンチ位置 y は、向かい合った電極からの信号の差をそれらの和で割り、あらかじめ数値計算より決定した係数 k を乗じることで計算する。

$$y = k \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D} = k \frac{\Delta}{\Sigma} \quad (1)$$

ここで、 V_B , V_D は垂直方向に向き合う 2 つの電極の電圧、 k は定数、 $\Delta = V_B - V_D$, $\Sigma = V_B + V_D$ である。

向かい合った 2 つの電極からの波形はローパスフィルターに入れられ、高周波ノイズが除去される。その後、180 度ハイブリッド回路に入力され、和信号 Σ と差信号 Δ が取り出される。Figure 4 (Left) はハイブリッド回路の出力信号をオシロスコープで測定したものであり、これは LER の一つのバンチの信号である。 Σ と Δ の信号は ZCU111 評価ボードに入力される。XM500 ドーターボードの LF バランを通して信号は RFSoc に入力され、RF-ADC によってデジタル化される。デジタル信号は FPGA

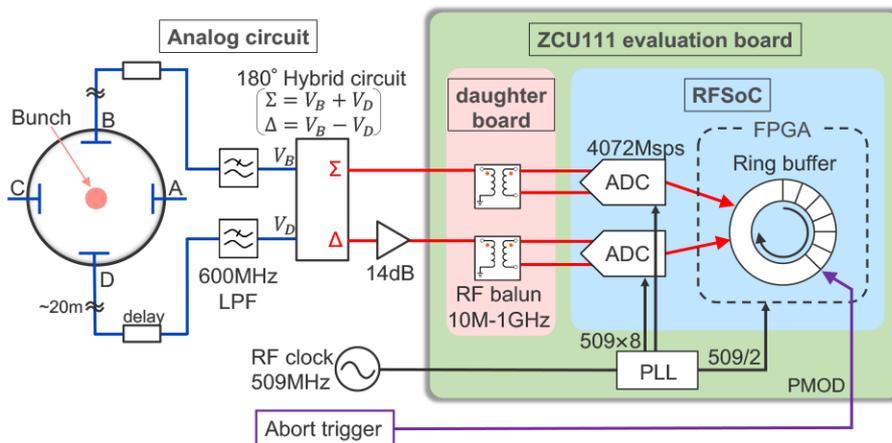


Figure 3: Schematic diagram of the RFSoc-based BOR.

に送られ、FPGA に実装されたリングバッファが波形を一時的に保持する。Figure 4 (Right) は RFSoc で測定された波形である。 Δ 信号は振幅が小さいため、180 度ハイブリッド回路と ZCU111 の間のアンプで 14 dB 増幅している。 Σ と Δ それぞれのバイポーラ信号のピークをとり、その比をとって位置 y を計算することができる。外部クロック入力へ SuperKEKB の RF クロック信号を入力し、RF クロックと同期した ADC サンプルングを行っている。RF クロック同期により、連続して訪れるバンチのバイポーラ信号のピークにサンプルング点をロックさせる。サンプルング周波数 4072 MHz は、SuperKEKB の RF 周波数 509 MHz を 8 通倍したものである。また、2 分周した 254.5 MHz を FPGA の動作クロックとしている。PMOD GPIO が SuperKEKB のアボートトリガ信号を受け取り、FPGA 内部でリングバッファへ接続されている。アボートトリガを受け取った際に、リングバッファを停止するように設計した。現在の設計では、このリングバッファはアボート直前の 101 ターン分の波形を保存することができる。

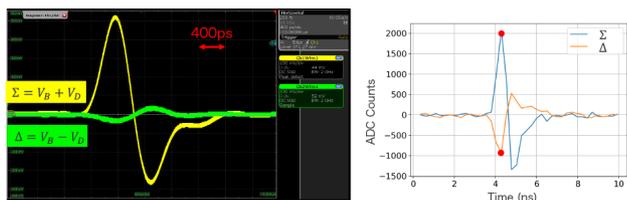


Figure 4: (Left) Hybrid circuit output (yellow is Σ and green is Δ). (Right) Waveforms measured by RFSoc (blue is Σ and orange is Δ).

6. SuperKEKB ビームを用いた BOR の回路試験

6.1 ビームバンパを用いたテスト

RFSoc を用いた BOR を LER 富士直線部にある二つの未使用ボタン電極に接続し、SuperKEKB ビームを用いて BOR 回路の性能評価を行った。位置分解能を評価するため、富士直線部近傍にローカルビームバンパを作り、バンパ位置を RFSoc で測定した。Figure 5 に性能評価結果を示す。RFSoc で測定された位置 (縦軸) はバンパ位置 (横軸) とよく一致しており、RFSoc を用いた BOR システム全体の線形性が優れていることがわかる。また、各測定点における標準偏差は約 0.03 mm であり、目標性能である 0.05 mm 以内を達成している。

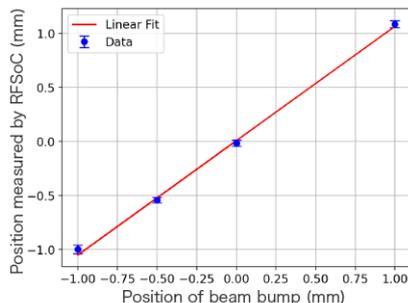


Figure 5: Results of the test using a local beam bump.

6.2 フィードバックシステムを用いたテスト

RFSoc を用いた BOR が正しく動作していることを検証するため、既存のバンチバイバンチ検出器との位置測定結果の比較を行った。比較対象としたのは校正済みの Dimtel 社製 iGp12[5]であり、バンチバイバンチフィードバックシステム用の検波器として使用されている。リングにビームを蓄積した状態でフィードバックキッカーの位相を 180 度反転させると、意図的にビームの不安定性を増大させることができ、バンチ位置の振動が増大する。徐々に増大していくバンチ位置の振動を、iGp12 と RFSoc で同時に測定し、同様の振動が観測できるか確認した。測定結果を Fig. 6 に示す。青点が iGp12 で測定した位置、オレンジ点が RFSoc で測定した位置である。1 つの点は 1 つのバンチを表す。フィードバック位相を反転させることで、バンチ位置の振動が時間とともに大きくなっていることがわかる。iGp12 と RFSoc の測定結果を比較すると、振動の大きさと振動が増加するタイミングはほとんど同じであることがわかる。定量的な検定は未着手であるが、今回の比較結果より、開発した RFSoc を用いた BOR はバンチバイバンチ検出器として正しく機能していると考えている。

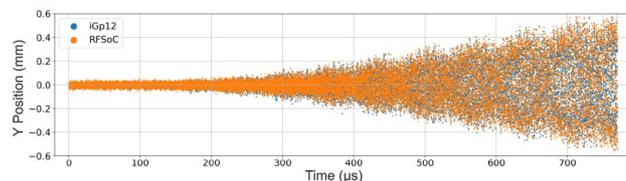


Figure 6: Results of the test using feedback systems.

7. SBL 事象の観測

RFSoc を用いた BOR は回路テスト後も富士直線部に設置され、2024 年 2 月末からビームアボート観測を開始した。Figure 7 は RFSoc を用いて記録された最初の SBL 事象である。赤点はバンチの垂直位置、青点はバンチ電荷である。各点が各バンチを表している。アボートの約 1 ターン前に、ビームの 200 ns の部分が垂直に蹴り上げられたことがわかる。そして、その位置変動の直後から、ビーム電流が失われ始め、その後約 1 ターンで約半分減少したことが観測された。

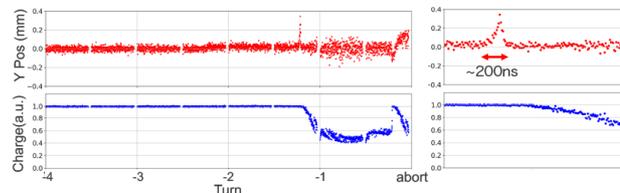


Figure 7: The SBL event recorded with RFSoc (8 March 2024, bunch current ~ 0.33 mA/bunch). Left: Vertical position (upper) and charge (bottom) for the last four turns before the abort. Right: Enlarged view of the spike area.

その後もビームアポートの観測を継続しているが、Fig. 8 に示すように様々な種類の振動とビームロスが観測されている。各 SBL 事象に共通する特徴を見出すのが困難で、まだ発生箇所やメカニズムの特定には至っていない。そのため、今後一年以内に、さらに複数の RFSoc を用いた BOR を開発・設置し、SBL 事象を引き起こす振動源と考えられる場所を広くカバーする計画である。今回開発した超高速モニターによって可能になるバンチごとのビーム位置測定によって、今後、SBL 事象発生機構が解明されることが期待される。

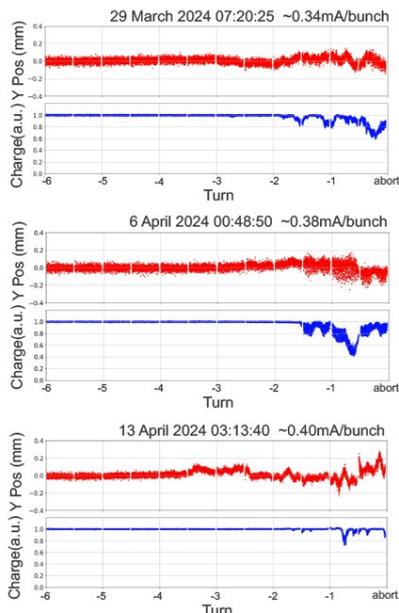


Figure 8: Example of some SBL events.

8. BOR によるアポート高速化の可能性

RFSoc を用いた BOR で記録したビームアポートデータを使って、バンチ振動が始まるタイミングとバンチ電荷の減少が始まるタイミングの比較を行った。Figure 9 に示すように、バンチ位置のデータに対して移動平均線を引き、それが ± 0.01 mm の閾値を超えた点を振動が始まったタイミング (T_{pos}) とする。また、バンチ電荷が初めて 5% 減少した点をチャージロスが始まったタイミング (T_{charge}) とする。

これらのタイミングを 65 件のビームアポート事象に対し

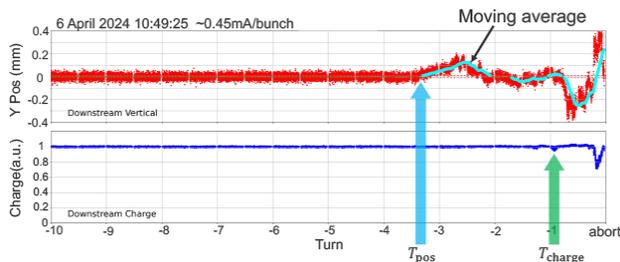


Figure 9: The moving average curve and obtained T_{pos} and T_{charge} timings.

て計算し、Fig. 10 にプロットした。これを見ると、多くの場合で位置振動が始めるタイミングの方が、チャージロスが始まるタイミングよりも早いことがわかる。

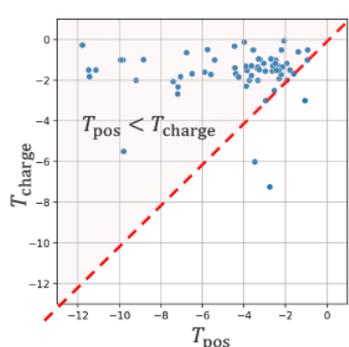


Figure 10: Relation between T_{pos} and T_{charge} for 65 SBL-like events.

そこで、我々は RFSoc を用いた新たなビームアポートシステムの開発を検討している。従来のビームアポートシステムはロスモニターによってビームロスを検出してアポートトリガーを発行している。一方で、RFSoc で捉えたバンチ位置の異変を用いてアポートトリガーを発行することができれば、従来より高速なビームアポートシステムの実現につながると期待できる。高速なアポートシステムの実現により、SBL 事象が発生した場合でも Belle II 検出器や加速器コンポーネントを守ることができる。さらに、このシステムは RFSoc 内の FPGA ファームウェアを書き換えるだけで比較的簡単に開発・テストができるため、RFSoc の利点を活かした応用先として非常に魅力的である。

高速アポートシステムの実現可能性の検討をするためには、Fig. 9 に示したような閾値を超える振動がアポート直前にしか起きないのか、それともアポートに至らない規模の小さなビーム不安定性としても起きているのかを判断する必要がある。我々は RFSoc を用いた BOR に、アポート時以外の通常運転時にも定期的にリングバッファを止める機能を追加し、膨大なデータを蓄積している。このデータを用いて新しいアポートシステムの実現可能性を調査する予定である。

9. まとめ

SuperKEKB 加速器では突発ビームロス(SBL)事象が問題となっている。SBL 事象の解明と発生抑制策の検討のために、新型バンチ振動レコーダー(BOR)を RFSoc という新しいアーキテクチャーを使って開発した。この BOR はビームアポート直前約 100 ターン分のビームポジションをバンチバイバンチで記録することができる。開発した BOR を用いて実際に SBL 事象の観測を開始しており、RFSoc のバンチバイバンチモニターとしての有用性を確認できた。今後は、この BOR を複数台製作し、リングのさまざまな場所に配置して SBL 事象のメカニズム・発生箇所解明に繋げる。また、RFSoc をビームアポートシステムとして応用するためのスタディも進める予定である。

参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, "Technical Design Report of SuperKEKB".
<https://kds.kek.jp/indico/event/15914/>
- [2] H. Ikeda *et al.*, "Observation of sudden beam loss in SuperKEKB", in *Proc. IPAC'23*, Venice, Italy, May 2023, pp. 716-719. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-MOPL072
- [3] M. Tobiyama and J. W. Flanagan, "Development of Bunch Current and Oscillation Recorder for SuperKEKB Accelerator", in *Proc. IBIC'12*, Tsukuba, Japan, Oct. 2012, paper MOPA36, pp. 138-142.
- [4] <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/rfsoc.html>
- [5] <https://www.dimtel.com/products/igp12>