

2024 年度 修士論文

SuperKEKB 電子陽電子衝突型加速器のための 新型バンチ振動レコーダーの開発

(Development of a new bunch oscillation recorder for the
SuperKEKB electron positron collider)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

能丸理玖

指導教員: 後田裕

概要

SuperKEKB/Belle II 実験では、4 GeV の陽電子と 7 GeV の電子を衝突させ新物理探索実験を行っている。この実験には、ルミノシティを大幅に向上することが必要であり、瞬間ルミノシティを現在の 10 倍以上に向上することを目指している。しかし、突発ビームロス事象という新奇な現象が安定な加速器運転を妨げている。これはビームが数十マイクロ秒の間に突然損失する現象で、この現象が起こる原因は未だ完全には特定されていない。突発ビームロス事象を詳細に解析し解明に繋げるために、本研究では AMD/Xilinx 社製の RF System on Chip を用いて、可搬性を備えた新型 Bunch Oscillation Recorder (BOR) を開発した。BOR は、ビームアポート直前のビーム位置と電荷をバンチごとに測定・記録するビーム診断デバイスである。開発した新型 BOR はバンチ電流 0.5 mA で位置測定精度 30 μm を達成し、バンチ毎位置モニターとして設計通りの性能で動作していることも確認された。この BOR を用いてリング上の複数点でバンチ毎にビーム診断できるシステムの構築を行い、突発ビームロス事象のような急速に発展するビーム不安定性の成長を詳細に観測・解析することが可能となった。

新型 BOR を用いて突発ビームロス事象を実際に観測し、観測結果の解析も行った。バンチ振動と電荷損失のパターンを解析することで、突発ビームロス事象は真空チェンバー内で発生する圧力バースト現象と深い関係性を持っていることが分かった。この圧力バースト現象はほとんど全ての突発ビームロス事象に付随して起こる現象で、圧力バースト現象が起きる箇所が異なると振動パターンも異なることを発見した。また、圧力バースト現象が起きた箇所でバンチが何らかの力を受けて振動が始まっているのではないかと考えられ、力を受けてからビーム損失するまでのバンチの挙動についても考察することができた。

この観測と解析によって、突発ビームロス事象の原因や発生過程についての理解を大きく深めることに繋がった。このように、今回開発した BOR が突発ビームロス事象の解析において有効であることが示されたことから、今後のバンチ毎ビーム診断システムのベースとして活用されることが期待されている。このシステムをさらに増設・発展させることで、突発ビームロス事象だけでなく、他のビームダイナミクスに関する問題解決にも寄与できると考えられる。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	SuperKEKB 加速器	2
2.1	SuperKEKB 加速器の概要	2
2.2	加速器パラメータ	3
2.3	加速器コンポーネント	5
2.3.1	コリメータ	6
2.3.2	ロスモニターとビームアポートシステム	8
2.3.3	真空ゲージ	10
第 3 章	突発ビームロス事象 (SBL)	11
3.1	突発ビームロス事象 (SBL) の概要	11
3.2	Long shutdown 1 以前の観測	12
3.3	新しい BOR 開発の必要性	13
第 4 章	RF System on Chip を用いた新型 BOR の開発	15
4.1	RFSoc を用いた新型 BOR 開発の概略	15
4.2	バンチ位置の測定方法	16
4.2.1	バンチ位置測定方法の概要	16
4.2.2	バンチの位置と波形の大きさの関係	17
4.2.3	電極配置	18
4.2.4	境界要素法	19
4.3	RFSoc-BOR の回路	19
4.3.1	真空チェンバーとボタン電極	20
4.3.2	アナログ回路	21

4.3.3	ZCU111 評価ボード	24
4.3.4	ファームウェア	26
4.3.5	ソフトウェア	28
4.3.6	バンチ位置の計算	29
4.4	2 台目の RFSoc-BOR の開発	30
第 5 章	RFSoc-BOR の動作試験	31
5.1	ローカルビームバンプを用いた試験	31
5.2	バンチ毎フィードバックシステムを用いた試験	33
5.3	新型 BOR 開発のまとめ	36
第 6 章	RFSoc-BOR を用いた SBL の観測	37
6.1	セットアップ	37
6.2	SBL の観測例	40
第 7 章	RFSoc-BOR を用いた SBL の解析と考察	43
7.1	振動継続時間	43
7.2	振幅の大きさ	46
7.3	バンチ電荷損失の発生場所	47
7.4	圧力バースト現象と SBL の関係	50
7.4.1	圧力バースト現象の発生場所とバンチ振動の関係	52
7.4.2	D10_L02/03 での圧力バースト現象	53
7.4.3	D10_L05 での圧力バースト現象	58
7.4.4	D10_L08 での圧力バースト現象	63
7.4.5	圧力バースト現象についてのまとめ	65
7.5	本章のまとめ	66
第 8 章	結論と展望	68
付録 A	アナログ回路に使用するフィルターの選定	71
参考文献		73

第 1 章

序論

SuperKEKB 加速器は茨城県つくば市にある電子・陽電子衝突型加速器である。4 GeV の陽電子と 7 GeV の電子を高ルミノシティで衝突させ、大量の B 中間子や D 中間子、 τ 粒子などを Belle II 実験に提供している。Belle II 実験ではこれらの粒子の崩壊を精密に測定することで、標準理論を超えた物理の探索を行っている。新物理探索精度に直結する SuperKEKB 加速器のルミノシティ向上は実験成功の鍵を握っており、最終的に 50 ab^{-1} という大統計を蓄積する計画である。しかし、2024 年現在、SuperKEKB 加速器は深刻な「突発ビームロス事象」の多発に悩まされており、これは更なるルミノシティ向上を妨げる最大の障壁となっている。突発ビームロス事象は数十マイクロ秒という極めて短い時間の間に蓄積ビームの数 % から数十 % が兆候なく突然損失 (ロス) し、ビームアバートへ至るという新奇な現象である。本研究の目的は、この突発ビームロス事象を詳細に観測できるようにするための新しいバンチ振動レコーダーの開発である。バンチ振動レコーダーとは、ビームアバートが起こる直前のビーム位置と電荷をバンチ毎に測定し、記録するデバイスである。

第 2 章では、SuperKEKB 加速器の概略を説明し、第 3 章では突発ビームロス事象の概略や、新型のバンチ振動レコーダーが必要とされる理由について説明する。第 4 章では、本研究で新たに開発したバンチ振動レコーダーの詳細について説明し、第 5 章では開発したバンチ振動レコーダーの動作試験について説明する。第 6 章では新型バンチ振動レコーダーを用いた突発ビームロス事象の観測結果を紹介し、第 7 章ではその結果を用いた解析によって突発ビームロス事象の発生原因や過程として何が考えられるかを考察する。第 8 章では結論と今後の展望を述べる。

第 2 章

SuperKEKB 加速器

本章では、SuperKEKB 加速器の概要と、ルミノシティなど主要なパラメータの説明、本研究に関連する重要な加速器コンポーネントの紹介をする。

2.1 SuperKEKB 加速器の概要

SuperKEKB 加速器 [1](以下、SuperKEKB) は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構にある電子・陽電子衝突型加速器である。4 GeV の陽電子と 7 GeV の電子を高いルミノシティで衝突させ、大量の B 中間子、D 中間子、 τ 粒子などを生成している。Belle II 実験では SuperKEKB で生成されたそれらの粒子の崩壊を Belle II 検出器 [2] で精密に測定することで、標準理論を超えた物理の探究が行われている。SuperKEKB の概略図を図 2.1 に示す。SuperKEKB は電子と陽電子を加速する直線型加速器と、陽電子のエミッタンスを減少させる円形加速器ダンピングリング、直線型加速器からメインリングにビームを輸送するビームトランスポートライン、電子と陽電子を衝突させるメインリングで構成されている。そして、メインリングは周長約 3 km の 4 GeV の陽電子蓄積リング (LER) と 7 GeV の電子蓄積リング (HER) から構成されている。

SuperKEKB のルミノシティ向上は Belle II 実験における新物理探索精度に直結しており、前身の Belle 実験/KEKB 加速器 (1999~2010 年) の 50 倍に相当する 50 ab^{-1} という大統計を蓄積する計画である。SuperKEKB のルミノシティ向上計画を図 2.2 に示す。SuperKEKB では衝突点でのビームサイズを細く絞ることで、より低い蓄積電流にもかかわらず、前身の KEBB 加速器の世界記録を大幅に塗り替え、2022 年に当時の瞬間ルミノシティの新記録である $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成した。その後、2022 年 7 月から Long Shutdown 1 (LS1) 期間に入り運転を停止していたが、2024 年 2 月に運転を再開し、さらなる高ルミノシティを目指して運転中である。2024 年 12 月には瞬間ルミノシティ $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成した。以下、本研究の舞台であるメインリングの重要なパラメータ、コンポーネントについて説明する。

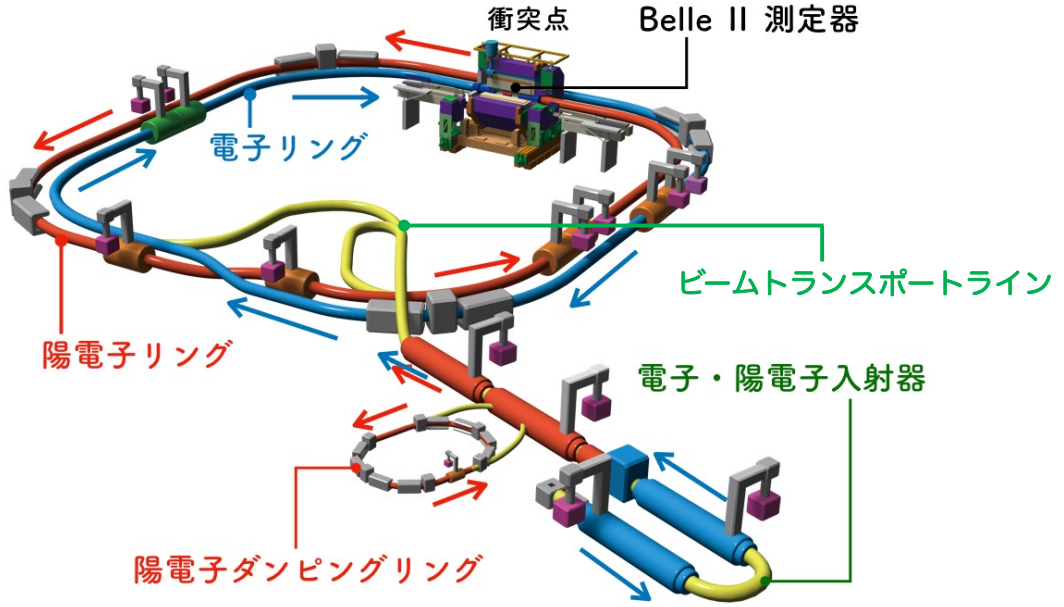


図 2.1 SuperKEKB の概略図 [3]

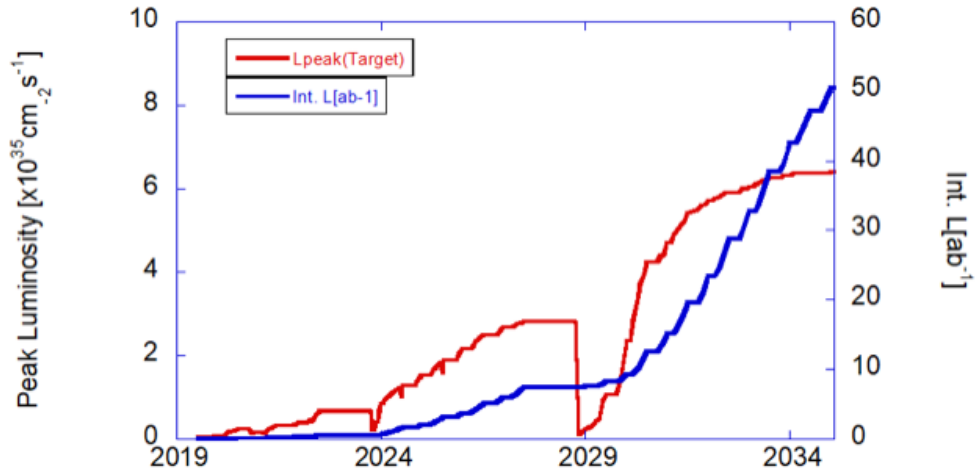


図 2.2 SuperKEKB のルミノシティ向上計画を表したプロット。赤色が瞬間ルミノシティ、青色が積分ルミノシティの計画を表す。 [4]

2.2 加速器パラメータ

加速器の衝突性能はルミノシティで表現される。衝突によって生成される物理事象数 N はルミノシティを用いて次のように表される。

$$N = \sigma \int L dt \quad (2.1)$$

ここで σ は対象となる物理事象の反応断面積、 L は瞬間ルミノシティ、 t は時間である。新物理探索の精度向上のためには高いルミノシティが必要なことが分かる。瞬間ルミノシティは加速器パラメータを用いて次のように書ける。

$$L = \frac{N_+ N_- n_b f_0}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} \simeq \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} R \quad (2.2)$$

ここで添字 $\pm$ はそれぞれ陽電子、電子ビームのパラメータであることを示し、 N はバンチに含まれる粒子数、 n_b はリング一周に含まれるバンチ数、 f_0 は周回周波数、 σ_x^*, σ_y^* は衝突点での水平及び垂直方向ビームサイズ、 γ はローレンツ因子、 e は素電荷、 r_e は古典電子半径、 I はビーム電流、 β_y^* は衝突点での垂直方向ベータ関数、 ξ_y は垂直方向のビームビームパラメータ、 R は両ビームの交差角や砂時計効果に由来する幾何学的な補正項である。ビームビームパラメータは電子陽電子の衝突によって生ずるベータatronチューンシフトに対応し、

$$\xi_{y\pm} \simeq \frac{r_e N_{\mp}}{2\pi \gamma_{\pm} \sigma_x^*} \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\epsilon_y}} \quad (2.3)$$

と近似して表される。SuperKEKB では、前身の KEKB 加速器に比べて β_y^* を小さく絞り、ビーム電流を増加させることで、瞬間ルミノシティをおおよそ 30 倍に向上するというのが基本計画である。

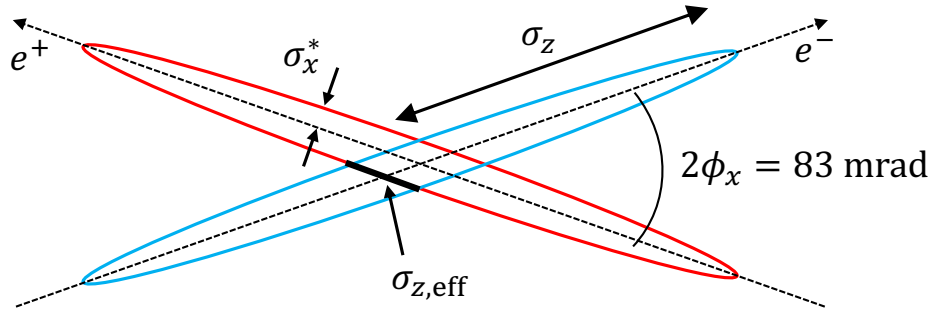


図 2.3 SuperKEKB におけるナノビームスキームの概念図。赤い楕円が陽電子ビームのバンチ、青い楕円が電子ビームのバンチを表す。

ベータ関数は衝突点から離れるにつれて、 $\beta_y(s) = \beta_y^* + s^2/\beta_y^*$ (s は衝突点からの距離) で表されるように急激に増加する。よって、 β_y^* をバンチ長よりも小さく絞っていくと、同一バンチ内でも衝突点から少し離れたところでビームサイズが大きくなってしまい、逆にルミノシティが小さくなるという砂時計効果が起きる。砂時計効果を避けるために SuperKEKB ではナノビームスキーム [5] と呼ばれる衝突手法を用いている。図 2.3 にナノビームスキームの概念図を示す。ナノビームスキームとは水平方向ビームサイズが十分小さいビーム同士を大きな交差角 (図中の $2\phi_x$) で衝突させる方法である。この方法では、バンチの中で垂直方向にビームサイズが十分絞られた領域のみが衝突することになり、その衝突する領域の長さを実行的バンチ長 (図 2.3 の $\sigma_{z,\text{eff}}$) と呼び、

$$\sigma_{z,\text{eff}} \simeq \frac{\sigma_x^*}{\phi_x} \quad (2.4)$$

と書ける。これは実際のバンチ長 (σ_z) よりも小さい値になり、砂時計効果が始まる β_y^* を小さくすることが可能になるため、砂時計効果を避けながら β_y^* を小さく絞り込むことが可能になる。

SuperKEKB メインリングの主なパラメーターの典型的な値を表 2.1 に示す。

		LER	HER
エネルギー	E [GeV]	4.0	7.0
周長	C [m]	3016	
ハーモニック数	h	5120	
RF 周波数	f_{RF} [MHz]	509	
周回周波数	f_0 [kHz]	100	
最小バンチ間隔	[ns]	4	
ビーム電流	I [A]	1.632	1.259
バンチ数	n_b	2346	
バンチ電流	I_b [mA]	0.696	0.537
衝突点水平方向ベータ関数	β_x^* [mm]	60	60
衝突点垂直方向ベータ関数	β_y^* [mm]	1.0	1.0
水平方向ベータトロンチューン	ν_x	44.525	45.531
垂直方向ベータトロンチューン	ν_y	46.585	43.5985
ビームビームパラメータ	ξ_y	0.0361	0.0267
水平方向エミッタンス	ϵ_x [nm]	3.0	7.0
垂直方向エミッタンス	ϵ_y [pm]	100	100
衝突点水平方向ビームサイズ	σ_x^* [μm]	13	20
衝突点垂直方向ビームサイズ	σ_y^* [nm]	320	320
バンチ長	σ_z [mm]	~ 6	~ 6
瞬間ルミノシティ	L [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	5.1×10^{34}	

表 2.1 メインリングの主なパラメータ。ビーム電流以下の項目は最高ルミノシティを記録した際 (2024 年 12 月 27 日) のパラメータを記載している。

2.3 加速器コンポーネント

ここでは SuperKEKB のメインリングを構成するコンポーネントのうち、本論文に関係するものを紹介する。

2.3.1 コリメータ

リングを周回するビーム内の各粒子は、真空チェンバー内の残留ガスとの散乱や、同一バンチ内の粒子間散乱 (Touschek 効果) などの影響により、本来の軌道から外れることがある。このように軌道を逸脱した粒子は、最終的に真空チェンバーや電磁石などの加速器コンポーネントに衝突し、二次粒子シャワーを生成する。この現象が衝突点付近で発生すると、Belle II 検出器においてバックグラウンド信号として検出されることになる。このような粒子由来のバックグラウンドは「ビームバックグラウンド」と呼ばれる。ビームバックグラウンドによって、検出器の性能低下が引き起こされたり、Belle II 実験で観測されるべき物理事象の検出が困難になったり、放射線によるダメージが検出器に蓄積したり、検出器のデータ取得システムが飽和したりするなどの悪影響をもたらす。この問題を抑制するため、ビーム軌道を外れた粒子を除去し、検出器付近でのビームバックグラウンドを低減する役割を担う加速器コンポーネントがコリメータである。

さらに、突発的なビーム不安定性により、ビーム内の各粒子ではなくビーム全体の位置が本来の軌道から逸脱したり、ビームサイズが増大したりする場合もある。このような異常なビームが加速器コンポーネントや検出器に衝突すると、ビーム全体の大部分が損失して大量の放射線が発生する。このような異常なビームがもたらす放射線は機器保護の観点から極めて危険である。特に衝突点付近では物理的な開口が狭いため、異常なビームが通過すれば真空チェンバーに衝突し、大量の放射線が発生して検出器に深刻なダメージを与える可能性がある。実際に SuperKEKB のような大電流ビームを維持する加速器では検出器に与える被害が非常に大きく、コリメータのビーム軌道からの相対位置が正しく設定されていなかった時には、異常なビームによって衝突点に最も近いシリコン検出器を損傷する事故も起きたことがある。コリメータはこのようなビーム不安定性が発生した時に異常なビームを堰き止め、各種機器を保護するという重要な役割も担っている。

SuperKEKB メインリングには二つのリング合わせて 31 台 (LER に 11 台、HER に 20 台) のコリメータが設置されている。図 2.4 はメインリング上のコリメータ設置場所を示す図である。KEKB 時代から使用されているコリメータ (水色の四角と丸) は、上下 (水平コリメータなら左右) の片方に可動式のコリメータヘッドがある形式になっていて、それ以外の SuperKEKB 用に新たに設置されたコリメータは、上下 (左右) 両方に可動式のコリメータヘッドを持っている。メインリングは全周を時計回りに 12 の区間に分けられていて、それぞれ D01 区間から D12 区間まで名前が付けられている (図 2.4 の外周に記載されている)。コリメータの名前は、設置されている区間の名前に続けて、水平コリメータの場合は「H」、垂直コリメータの場合は「V」を付け、その後と同じ種類のコリメータを識別する番号を付ける形式になっている。図 2.5 に、SuperKEKB 用に新たに設置されたコリメータの構造を示す [6]。図内の Movable jaw と書いてある部分が可動式のコリメータヘッドで、これがビーム近くまで押し込まれることで開口を狭くし、ビームの不

要なハロー部分を削り落としてビームバックグラウンドを低減したり、異常なビームを堰き止めたりする。コリメータヘッドの位置は遠隔操作で調整でき、約 50 μm の精度で制御される。

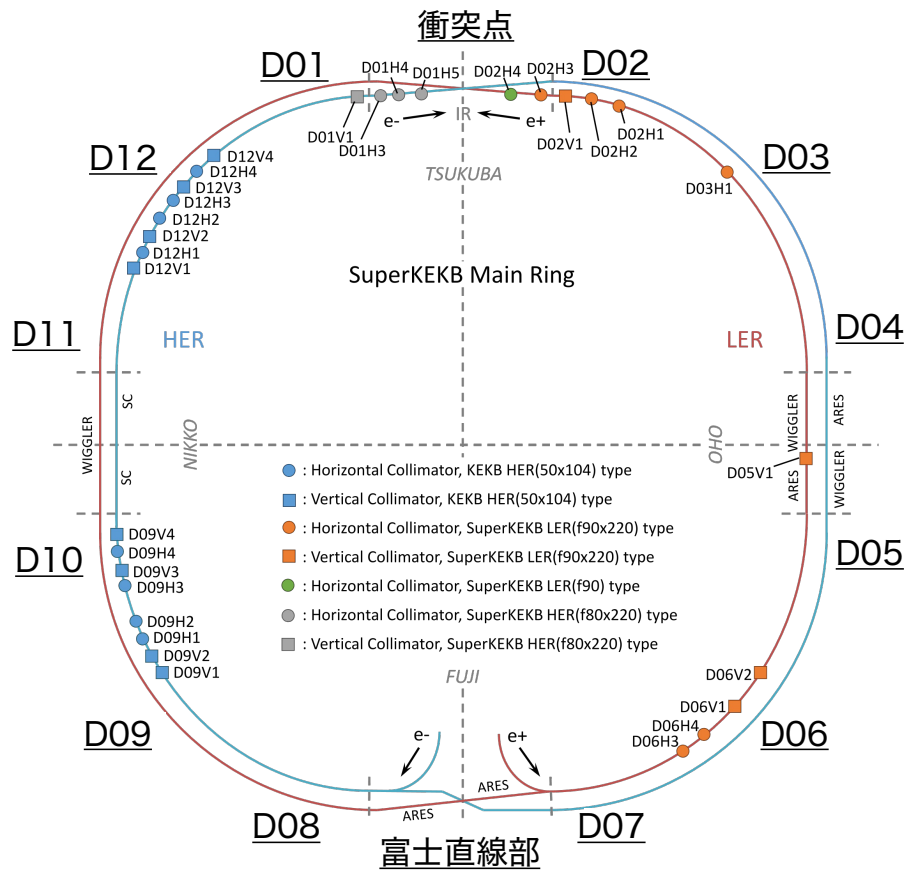


図 2.4 SuperKEKB メインリングのコリメータ配置図。赤色のリングが LER で、水色のリングが HER を示す。リング上に描かれている四角が垂直コリメータの設置場所、丸が水平コリメータの設置場所である。[6]

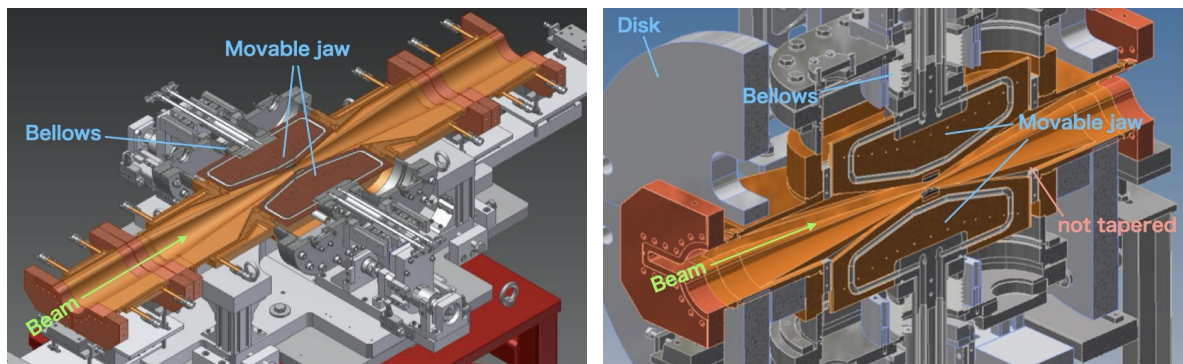


図 2.5 SuperKEKB 用に新たに設置されたコリメータの構造。左図が水平コリメータ、右図が垂直コリメータを示す。

2.3.2 ロスモニターとビームアポートシステム

前述のように、ビーム不安定性が発生しビーム損失 (ビームロス) が生じた場合、大量の放射線が生成され、機器保護の観点から極めて危険である。このような異常なビームを迅速に蓄積リングから取り出して廃棄することは、加速器コンポーネントや検出器へのダメージを最小限に抑えるために極めて重要である。メインリングでは、ビームロスを検知するための「ロスモニター」と、その情報を基にビームを蓄積リング外に蹴り出して廃棄する「ビームアポートシステム」がこの役割を担っている。

ロスモニターはメインリング全周各所に設置されていて、PIN フォトダイオードや光ファイバーやイオンチェンバー [7]、ダイヤモンド検出器 [8]、プラスチックシンチレーターと SiPM を組み合わせた sCintillation Light And Waveform Sensors (CLAWS) [9] などが使用されている。これらのセンサーが加速器から発生する放射線を測定し、ビームロスを検知する。図 2.6 にダイヤモンド検出器と CLAWS の写真を示す。

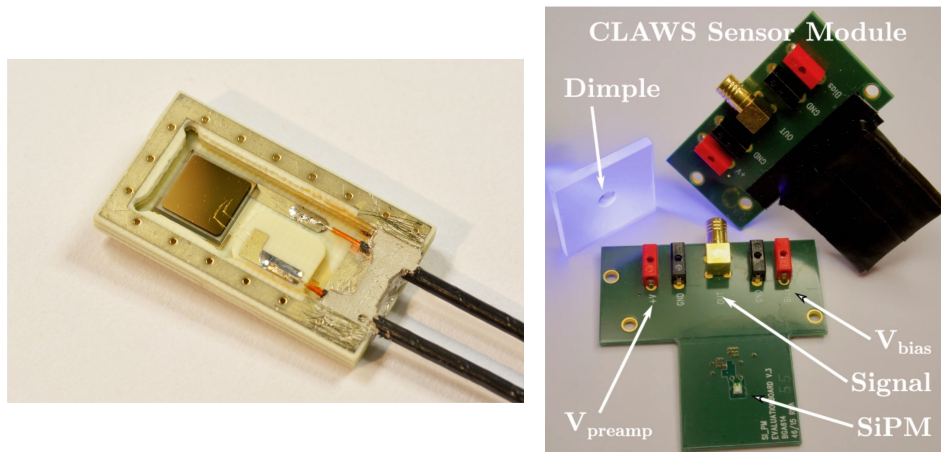


図 2.6 メインリングのロスモニターに使用されているダイヤモンド検出器 (左図) [8] と、CLAWS(右図) [9] の写真

ロスモニターがビームロスを検知するとビームアポートリクエストを発行する。アポートリクエストは光信号として加速器中央制御室に集約され、中央制御室からアポートキッカートリガーが発行される。このトリガーはアポートキッカー電磁石を作動させるもので、これによってビームが蹴り出されてビームダンプへ導かれ、廃棄されるという流れである。

ビームダンプは、ビームアポートシステムによってビームが蹴り出された時に、その不要なビームを吸収して止める装置である。LER のビームダンプは D07 区間、HER のビームダンプは富士直線部に設置されている。ビームダンプの直前にはビームを蹴り出すためのアポートキッカー電磁石やセプタム電磁石、ビームを広げるための六極電磁石などが設置されており、ビームを安全に蓄積リングから取り出して鉄とコンクリートで作られたビームダンプに誘導し吸収させ

る [10, 11]。図 2.7 にアボートキッカー電磁石とビームダンプの写真を示す。



図 2.7 アボートキッカー電磁石 (左図) と、ビームダンプ (右図) の写真 [10]。右図において水色の矢印がメインリングの蓄積ビームが通る方向、ピンク色の矢印がビームダンプに向かうビームが通る方向を示し、右側の緑色の物体がビームダンプである。

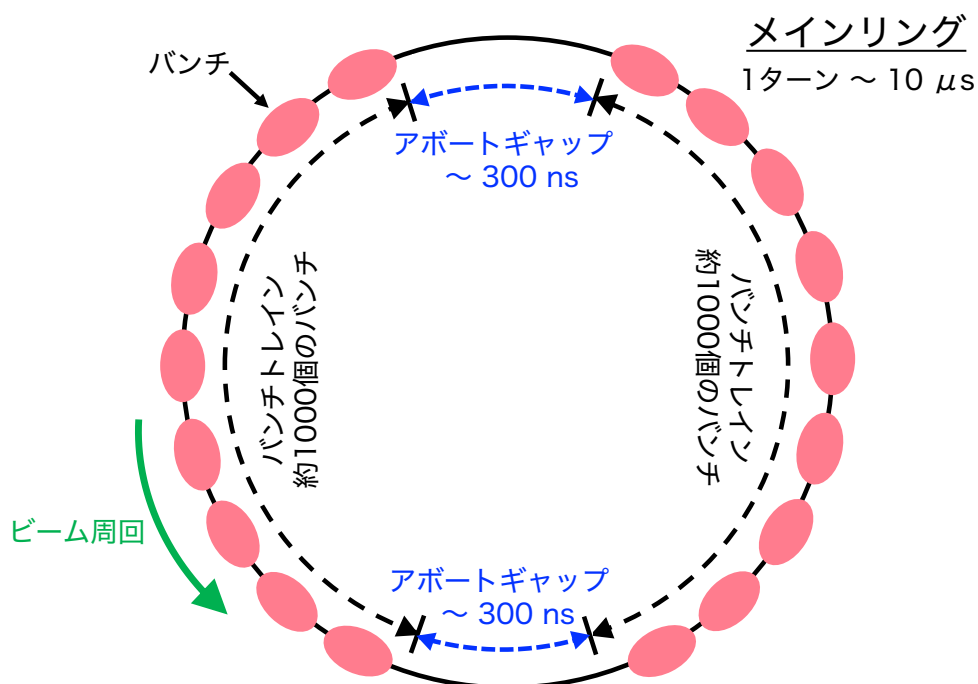


図 2.8 メインリングにおけるバンチトレインとアボートギャップの概略図。ピンク色の楕円が各バンチで、それがリング上を周回している様子を表している。

メインリングでは、通常 2000 個ほどのバンチを周回させるが、それらは二つのバンチトレインに分けられ、その間には約 300 ns のバンチが無い区間が存在する。これはアボートギャップと呼ばれるもので、アボートキッカー電磁石の磁場の立ち上がり時間を待つために設定されているギャップである。メインリングのバンチトレインとアボートギャップの概略図を図 2.8 に示す。メインリングにおいてビームは約 $10 \mu\text{s}$ かけて 1 ターン周回するため、1 ターンあたり二つのアボートギャップが約 $5 \mu\text{s}$ おきに訪れることになる。ロスモニターがビームロスを検知した際は、

次のアボートギャップが訪れるのを待ってからアボートキッカートリガーが発報され、ギャップ時間 300 ns の間にアボートキッカー電磁石が立ち上がるという順序になる。そしてアボートギャップ直後のバンチから順次ビームダンプに誘導されていく。

2.3.3 真空ゲージ

メインリングには、真空チェンバー内の真空度を測定するための冷陰極型電離真空計（Cold Cathode Gauge : CCG）が約 10 m ごとに計約 600 台（各リング約 300 台ずつ）設置されている [12]。CCG は電磁場を利用して真空中の残留ガス分子を電離し、その結果得られるイオン電流を測定することで圧力を求める真空ゲージで、高真空領域から超高真空領域（ 10^{-4} から 10^{-8} Pa 程度）の圧力を測定することができる。運転時は真空チェンバー内は 10^{-8} Pa 程度の超高真空に維持され、CCG によってリング全周の圧力が常時監視されている。CCG の設置場所には例えば「D01L01」のように名前がついている。設置されている区間の名前に続けて、LER 場合は「L」、HER の場合は「H」を付け、その後に上流からの通し番号をつける形式になっている。

第 3 章

突発ビームロス事象 (SBL)

本章では、SuperKEKB メインリングで現在問題となっている突発ビームロス事象について、その概要と、本研究以前にどのような観測が行われていたか、さらに新しいバンチ振動レコーダーの必要性について説明する。

3.1 突発ビームロス事象 (SBL) の概要

突発ビームロス事象 (Sudden Beam Loss : SBL) とは、数十マイクロ秒という極めて短い時間の間に蓄積ビームが突然大きく損失 (蓄積電流の数 % から数十 % が損失) し、ビームアボートに至るという新奇な現象である [13]。ロスモニターがビームロスを検知してからビームアボートまでには $10\ \mu\text{s}$ から $20\ \mu\text{s}$ の時間を要するため、SBL 発生時には大きなビームロスに至るまでにビームアボートが間に合わない。その結果、Belle II 検出器やコリメータなどの加速器コンポーネントに大量の放射線が当たり、それらに深刻なダメージを及ぼしている。具体的には、Belle II 検出器最内層に設置されているシリコン検出器の損傷や、コリメータヘッドの損傷、衝突点付近に設置されている超伝導収束システム (QCS) [14] のクエンチなどが発生している。ダメージの一例として、SBL 発生時にビームが直接当たり、傷ついたコリメータヘッド (タンタル製) の写真を図 3.1 に示す [15]。このように破損したコリメータヘッドを交換するには、損傷によって散乱したヘッド材料 (タングステンやタンタル) を真空チェンバー内から除去し、その後、交換プロセス中に大気圧レベルまで低下した真空チェンバー内の圧力を超高真空レベルまで回復させなければならない。そのため、交換プロセス全体には通常数日から 1 週間かかり、加速器運転に大きな支障をもたらす。先ほど紹介したような損傷を防ぐために、蓄積ビーム電流を思うように増やすことができず、瞬間ルミノシティの向上が妨げられている。さらに、SBL が発生してビームアボートが起きたり、超伝導システムがクエンチしたりすると、復旧して再びビーム運転に戻るまでに数時間から 1 日を要してしまう。このように SBL は積分ルミノシティの向上も阻害している。したがって、SBL は瞬間・積分ルミノシティ両方の向上を直接制限しているため、SuperKEKB の運転において非常に大きな問題となっており、SBL の解決は SuperKEKB において喫緊の課題である。

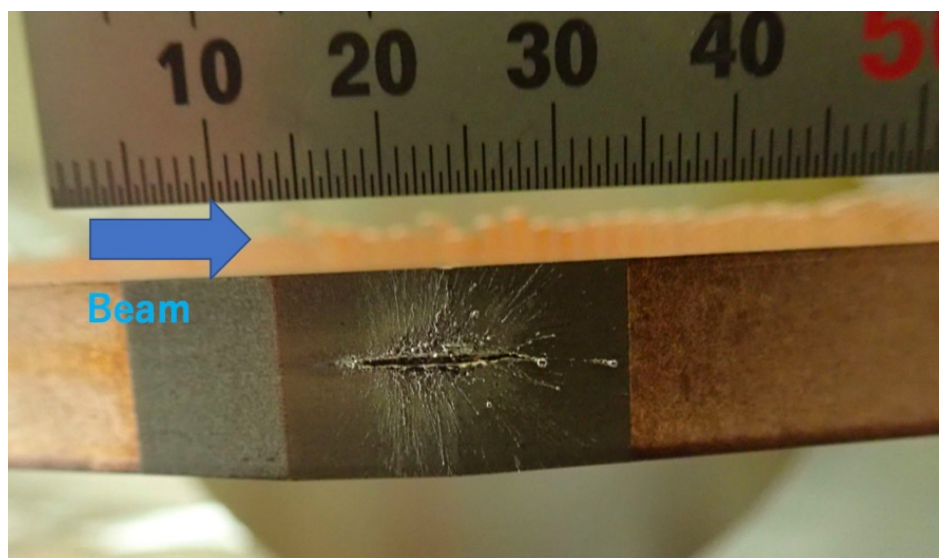


図 3.1 SBL によってコリメータヘッドが傷ついた様子

3.2 Long shutdown 1 以前の観測

SBL は、2022 年 7 月から 2024 年 2 月までの Long shutdown 1 (LS1) 期間以前からバンチ振動レコーダー (BOR) というデバイスで観測が行われていた。BOR はビームアポートが起きる直前のビーム位置と電荷をバンチ毎に記録するビーム診断装置である。BOR を使うことで、バンチがどのような挙動を示しながら電荷を損失していくのかを観測することができる。LS1 以前は、VME ボードを用いた BOR である Digitex Co., Ltd 製の 18K10 という BOR が両リングに一台ずつ設置されていた [16]。ここではこれを VME-BOR と呼ぶことにする。VME-BOR の写真を図 3.2 に示す。VME-BOR は SuperKEKB メインリングの富士直線部 (図 2.4 下部) に設置され、ビームアポート前 4000 ターンのバンチ毎の位置情報を記録する。また、この VME-BOR の位置測定精度は $30\text{ }\mu\text{m}$ である。VME-BOR を用いた観測によって、SBL 発生時にはバンチ位置が振動を起こしていることが LS1 前に発見された。図 3.3 [17] に VME-BOR で記録された SBL の一例を示す。これを見ると、バンチの水平位置と垂直位置がビームアポート約 3 ターン前から振動を始めるのが分かり、その後、ビームアポート約 2 ターン前からバンチ電荷の損失も始まっている。この結果は、バンチ電荷の大幅な損失と同時に、バンチ毎ビーム診断装置でなければ観測できないような速いビーム位置の振動が起きていることを示している。何らかの原因によって蓄積ビームが不安定になり、その結果として大きなビームロスが生み出されていると考えられ、この速い不安定性を捉えられるような BOR というデバイスは SBL 解決のために非常に重要なものだと考えられる。

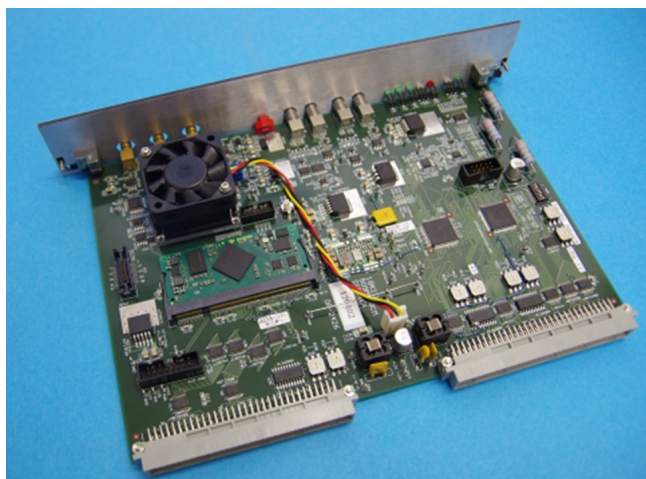


図 3.2 VME-BOR の写真 [16]

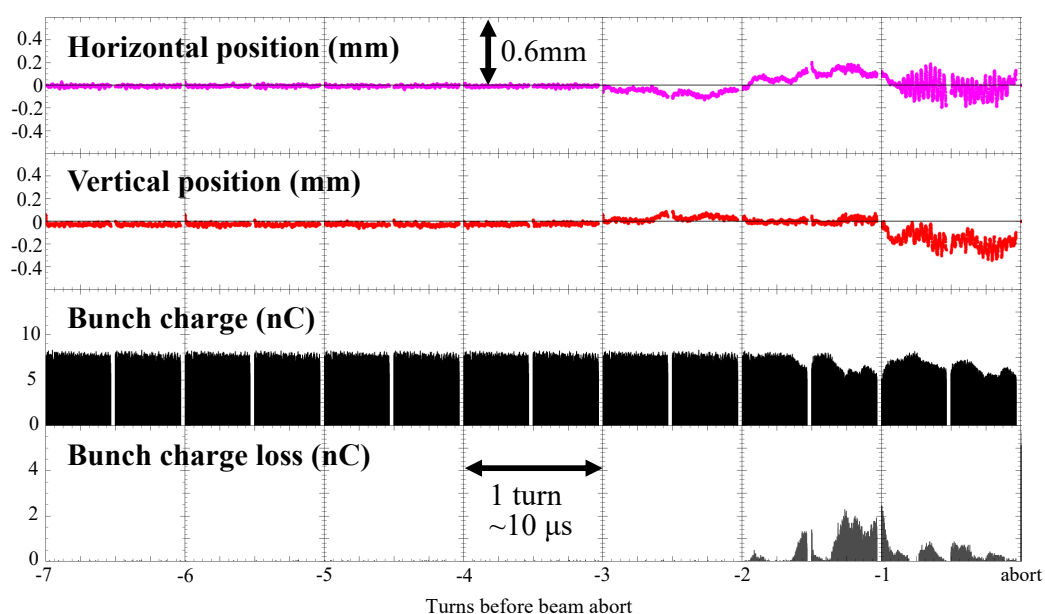


図 3.3 VME-BOR で記録された LER で発生した SBL の一例 (2022 年 3 月 23 日 13:49)。上から順にバンチ毎の水平位置、垂直位置、電荷、電荷損失を示す。横軸はビームアボートの何ターン前かを示していて、画像の右端でビームアボートが起きている。縦線で区切られている一区間が 1 ターン分の時間 (約 $10\ \mu\text{s}$) に相当する。

3.3 新しい BOR 開発の必要性

この VME-BOR はリングに一台しかなく、SBL の発生箇所や不安定性の発展を詳しく捉えるには物足りない。リングに 1 台しかなければ、リングのどこで不安定性が始まり、発展していくのかを特定するのは困難である。また、振動が小さい場合と BOR の設置位置がベータatron 振動の節である場合、これら二つの場合を区別できないという不都合もある。そこで我々は、複数の

BOR をリングに設置してベータトロン位相を幅広くカバーしたり、複数の BOR を用いてリングを分割し、不安定性の時間発展を細かく見ることで、SBL の解明にさらに近づけると考えている。

さらに、この VME-BOR は 10 年以上前にデザインされており、8-bit ADC などの回路内の多くの部品が古く、今日では入手できなくなっている。また、VME-BOR はラックを必要とし、リング上の別の箇所に移動させて観測を行うことが簡単ではない。そこで、新たな可搬性を備えた BOR を開発することが、SBL のさらなる深い理解には重要だと考えた。よって本研究では、可搬性を備えながらも既存の VME-BOR の精度 ($\sim 30 \mu\text{m}$) と同等あるいはそれよりも良い位置測定精度を持つ新型の BOR を開発することを目標とする。本研究では AMD/Xilinx 社製の RF System on Chip という新しいチップを用いて新しい BOR の開発を行った。

第 4 章

RF System on Chip を用いた新型 BOR の開発

本章では、RF System on Chip (RFSoc) を用いた新型 BOR について、その概略と、開発の詳細について説明する。

4.1 RFSoc を用いた新型 BOR 開発の概略

本研究では、新型 BOR を開発するにあたって、AMD/Xilinx 社製の RF System on Chip (RFSoc) という新しいチップを用いている。RFSoc は複数チャンネルの ADC, DAC, FPGA, CPU が一つにまとまったチップで、高周波デジタル信号処理システムを効率よく開発するためにデザインされたものである [18, 19]。最高 5 Gsps, 14-bit の ADC を、最大 16 チャンネルまで搭載した RFSoc が販売されており、同期した多チャンネルの高速サンプリングを容易に実現することができる。また、それら多チャンネルの情報をまとめて 1 つの FPGA で処理することが可能である。そのため、高周波信号を扱う様々な分野で RFSoc が使用され始めていて、加速器のビーム診断システムへの応用に関しても注目を集めている [20, 21]。よって本研究による新型 BOR の開発は、次世代のバンチ毎ビーム診断システムのベンチマークとなることも期待される。

本研究ではまず RFSoc の純正評価ボード ZCU111 [22] を用いて開発を行った。これは最大約 4 Gsps の 12-bit ADC を 8 チャンネル搭載している RFSoc チップが使われているボードである。この RFSoc 評価ボードを BOR に使用する利点としては、まず VME-BOR よりも ADC ビット数を向上できるという点がある。そして、ラックを必要とする VME-BOR とは違い、RFSoc ボードは簡単に移動できるため、加速器リング上の観測したい場所に設置することが可能である。FPGA と ADC の通信を一から設計する必要がなく、開発期間を短縮することが可能である。また、FPGA のロジックを書き換えることによって、測定したバンチ位置をリアルタイムに低レイテンシーで解析することが可能である。高速な異常検知など、将来的な応用可能性が非常に広い。以下、本研究で開発した BOR のことを RFSoc-BOR と呼ぶことにする。

4.2 バンチ位置の測定方法

4.2.1 バンチ位置測定方法の概要

まず、バンチ位置をどのように測定するのかを数式を交えて説明する。一般的に、バンチ位置は加速器の真空チェンバーに取り付けられたビームポジションモニター用ピックアップ電極を用いて測定する。図 4.1 に真空チェンバーとピックアップ電極とそれにつながる回路の概略図を示す。バンチが進むとき、バンチが持つ電荷によって周りに電場が形成される。バンチがほぼ光速で飛んでいる時は、ローレンツ収縮によって、バンチから出た電気力線は進行方向に垂直な面内ではほぼ二次元的な分布をしていると考えて良い。バンチは真空チェンバー内を進むため、それらの電気力線は真空チェンバー内壁に垂直に入り、真空チェンバー内面にバンチとは逆符号の電荷が誘起される。ピックアップ電極に誘起された電荷を図 4.1 に示すような回路で電圧波形に変換すると、同じ図に示すようなバイポーラー波形がバンチあたり一つ得られる。

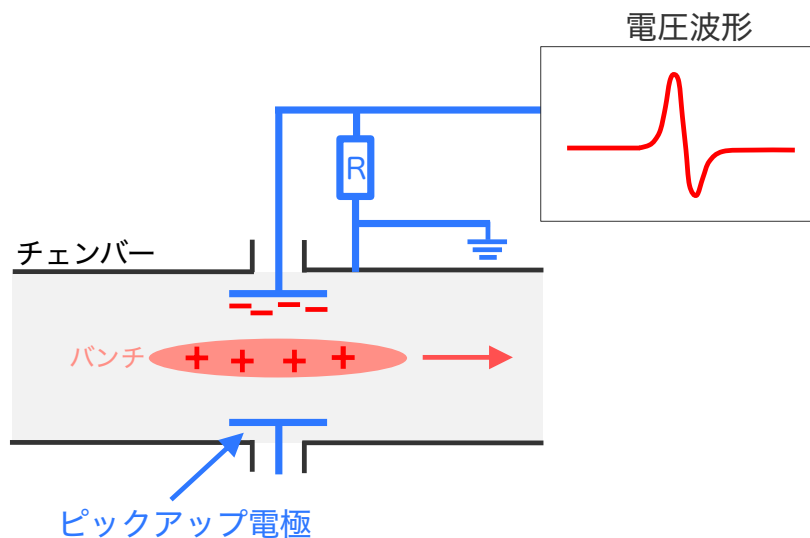


図 4.1 真空チェンバーとピックアップ電極とそれにつながる回路の概略図。真空チェンバーの中をバンチが左から右に通る様子を示す。バンチは陽電子を想定し正の電荷を持つ。ピックアップ電極にはその反対の電荷が誘起される。

例えば上下向かい合うようにピックアップ電極が付いている場合、バンチによってそれら電極に電荷が誘起され、バンチが真空チェンバー中心を通過していればそれらの電荷量は等しくなる。しかし、バンチが中心から外れた場所を通過していれば、二つの電極に誘起される電荷量は等しく無くなる。その偏りを電圧波形の大きさを通じて検知することでバンチの位置を測定することが可能である。図 4.2 にバンチ位置が異なる 2 パターンの場合に観測される波形の概略図を示す。左図はバンチが真空チェンバーの中心を通過している時で、向かい合う二つの電極からの波形の大き

さは等しく、波形の引き算をすればゼロになる。右図はバンチ位置が上にずれている時で、上の電極からの波形の方が大きくなるため、波形の引き算をすればバンチ位置に対応した大きさの波形になる。

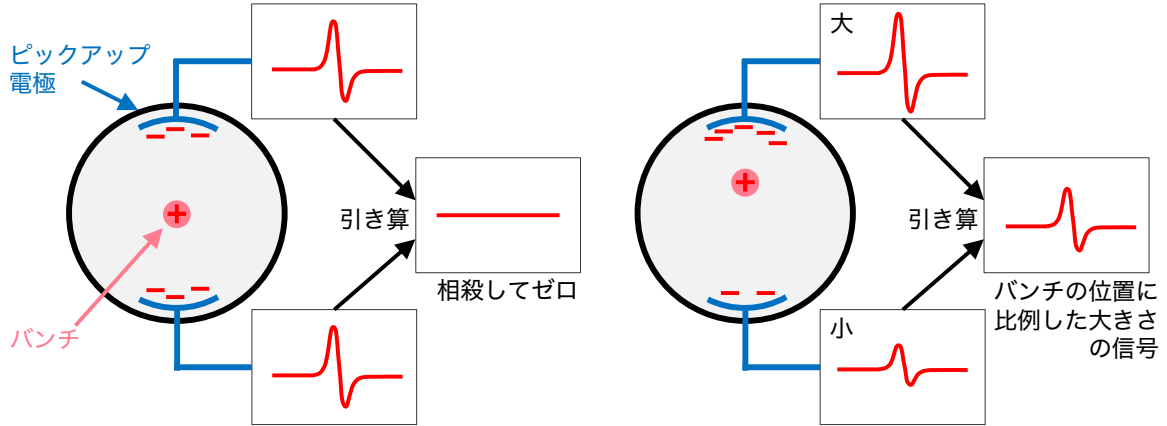


図 4.2 バンチ位置が異なる 2 パターンに見える波形の概略図。左図はバンチが真空チェンバーの中心を通っている時、右図はバンチ位置が上にずれている時を示す。[23]

4.2.2 バンチの位置と波形の大きさの関係

ここで、図 4.3 のような円形の真空チェンバー断面図を考える。この図において、バンチが極座標 (r, θ) で表される位置にあるとする。

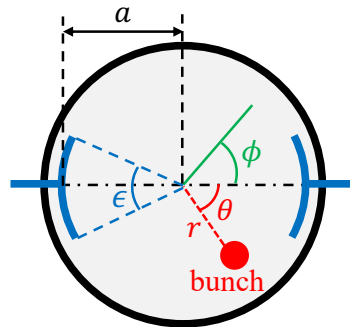


図 4.3 真空チェンバーの断面図。バンチ位置を (r, θ) の極座標で表している。ピックアップ電極がある位置は $r = a$ の位置で、広がり角度は ϵ とする。[23]

この時、バンチの電荷が Q だとすると、半径 a 、角度 ϕ の位置に誘起される鏡像電荷分布 $Q_{im}(\phi)$ は解析的に求めることができ

$$Q_{im}(\phi) = \frac{Q}{2\pi a} \cdot \frac{a^2 - r^2}{a^2 + r^2 - 2ar \cos(\phi - \theta)} \quad (4.1)$$

と書ける。したがって、ピックアップ電極上に誘起される電荷の和 Q_{el} を求めるには、これを積

分すれば良い。

$$Q_{el} = \int_{-\epsilon/2}^{\epsilon/2} a \cdot Q_{im}(\phi) d\phi \quad (4.2)$$

ここで、右側の電極の電荷を Q_R 、左側の電極の電荷を Q_L とおき、次の量 U を計算すると

$$U = \frac{Q_R - Q_L}{Q_R + Q_L} = \frac{2 \sin(\epsilon/2)}{a} x + \text{高次項} \quad (4.3)$$

となる。 $x = r \cos \theta$ はバンチの水平位置である。バンチ位置が中心に近いとして x の高次の項を無視すれば、

$$x \simeq \frac{a}{2} \frac{\epsilon/2}{\sin(\epsilon/2)} \cdot U \equiv k_x U \quad (4.4)$$

となる。ここで、 k_x は U からバンチ位置に変換するときの係数で、感度係数と呼ばれる。ピックアップ電極と、接地された真空チェンバーの壁面の間には仮想的なコンデンサーが形成されるため、電極に誘起される電荷と得られる電圧波形の大きさは比例する。よって、 V_L, V_R を左右の電極から得られる電圧波形の大きさとして、位置 x は

$$x = k_x \frac{V_R - V_L}{V_R + V_L} \quad (4.5)$$

と書ける。これは 4.2.1 項で説明した通り、向かい合う電極の電圧差が位置に結びつくことを示している。電圧差はバンチ電荷にも依存してしまうので、バンチ電荷に対応する電圧和 (分母) で規格化していると理解できる。位置 y についても同じように考えることができるし、電極の配置が変わっても基本的な考え方は変わらない。

4.2.3 電極配置

真空チェンバー内の電極配置や電極の数には複数のパターンがある。ここでは二種類の電極配置を紹介する。図 4.4 に二種類の電極配置の例を示す。メインリングではどちらの配置も使われている。メインリングの中でも直線区間では主に十字型配置が採用され、アーク (曲線) 区間では放射光が電極に直接当たるのを防ぐために X 字型配置が採用される。

十字型配置の場合、バンチの水平位置と垂直位置は

$$x = k_x \frac{V_A - V_C}{V_A + V_C} \equiv k_x \frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \quad (4.6)$$

$$y = k_y \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D} \equiv k_y \frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \quad (4.7)$$

と書ける。ここで k_x, k_y は感度係数、 V_A, V_B, V_C, V_D は電極 A, B, C, D の電圧である。また、 $V_A - V_C = \Delta_x, V_A + V_C = \Sigma_x, V_B - V_D = \Delta_y, V_B + V_D = \Sigma_y$ とおいた。

X 字型の場合は

$$x = k_x \frac{V_A - V_B - V_C + V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (4.8)$$

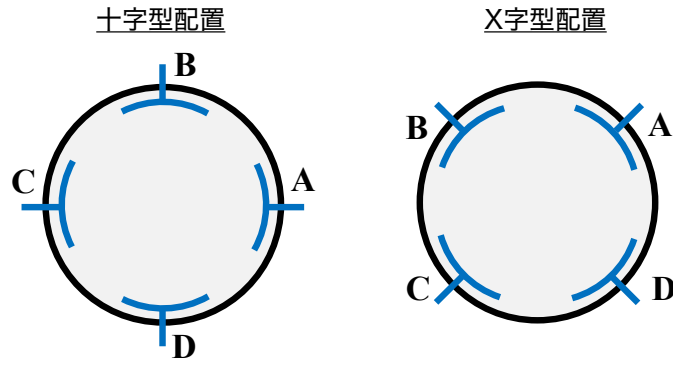


図 4.4 二種類の電極配置の例。左図が十字型配置、右図が X 字型配置を示す。

$$y = k_y \frac{V_A + V_B - V_C - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (4.9)$$

と計算できる。

4.2.4 境界要素法

真空チェンバーが完全に円形の場合は感度係数 k を解析的に求めることができるが、真空チェンバーの断面は必ずしも完全な円形とは限らず、一般的に感度係数は数値計算で導き出す。その手法の一つが境界要素法である。真空チェンバー内に電荷がある時、それが作るポテンシャルを求めるためにはポアソン方程式を解く必要がある。それをグリーン関数を用いて積分形に変換し、積分境界面を細かい要素に分割することで、積分を和に変更し数値計算をする。真空チェンバーは接地されているので、真空チェンバーという電位 0 の面で囲まれている状態を考えることになり、その境界条件を考慮に入れると、その数値計算結果から境界面上の離散的な電荷分布が求められる。その電荷分布から各電極に誘起される電荷が求められ、それを用いて逆算することで感度係数 k を求めることができる [24]。

4.3 RFSoc-BOR の回路

ここからは、RFSoc-BOR の回路開発の詳細を説明する。図 4.5 に本研究で開発した RFSoc-BOR の回路の概略図を示す。この図では、パンチの垂直位置を測定する回路を示している。一番左に描かれている円形のもが真空チェンバーの断面を示していて、垂直方向に向かい合って取り付けられている電極からの信号を左から順にアナログ処理をして ZCU111 評価ボードに入力する。式 4.7 を使ってパンチ位置を求めるために、アナログ回路の段階で向かい合うボタン電極の和信号と差信号を作り出してから RFSoc に入力してデジタル化し、記録するという流れになっている。アナログ回路部分は、二つの信号のタイミングを揃えるディレイ回路、高周波ノイズを取り除くためのローパスフィルター、和信号と差信号を作るための 180° ハイブリッド回路、差信号を

増幅するアンプで成り立っている。後段の RFSoc チップ内にはアナログ回路で処理した波形をサンプリングして記録し、我々が BOR を操作するサーバーまでデータを送信するようなファームウェア、ソフトウェアが実装されている。筆者は主にアナログ回路部分の各部品の選定、試験、回路の組み上げと、RFSoc に実装するファームウェアの開発を担当した。以下、アナログ回路、ZCU111 評価ボード、RFSoc 内のファームウェア、ソフトウェアの順に回路の詳細を説明していく。

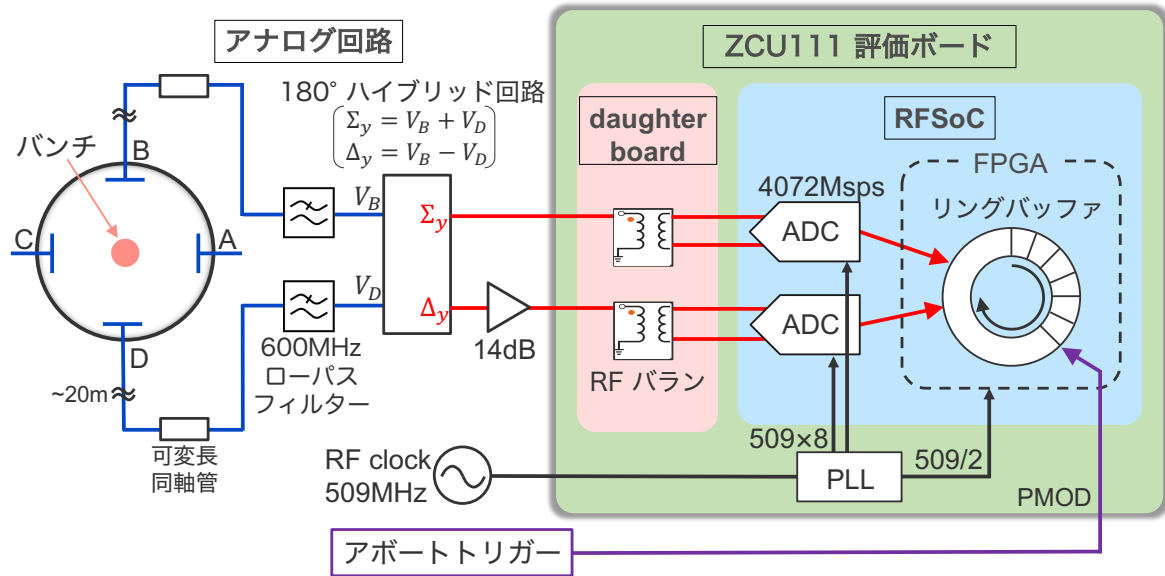


図 4.5 RFSoc-BOR の回路の概略図

4.3.1 真空チェンバーとボタン電極

この ZCU111 評価ボードを用いた RFSoc-BOR の設置場所は LER の富士直線部 (図 2.4 下部) である。図 4.6 に本開発で使用した真空チェンバーの設計図を示す。これは富士直線部に設置されている bunch-by-bunch orbit feedback BPM (FB-BPM) チェンバーと呼ばれるものである [25]。これには、LER のフィードバックシステムの運用やスタディに用いるためのボタン電極が複数個設置されている。これらの電極のうち、使用されていないで余っている電極を今回の R&D に用いた。図 4.6 右側の真空チェンバーに付いている黒い突起物が電極の位置を表していて、ボタン電極が設置されている区間の真空チェンバーの直径は 64 mm である。これらの電極は十字の配置で設置されているため、バンチ位置は式 4.6 と 4.7 で求めることができる。境界要素法で計算すると、この真空チェンバーの感度係数は $k_x = k_y = 16.58$ である。図 4.7(左図) は FB-BPM チェンバーの写真である。写真中央部に複数のケーブルが見えるが、これが真空チェンバー内のボタン電極に接続されていて、このケーブルから来る信号を処理していく。図 4.7(右図) はこの FB-BPM チェンバーに取り付けられているボタン電極の写真である。直径は 6 mm で、ガラス

コーティングが施されており、SMA コネクタを持っている電極である [25, 26]。

図 4.6 FB-BPM チェンバーの設計図

図 4.7 (左図)SuperKEKB FB-BPM チェンバーの写真 (右図)FB-BPM チェンバーに取り付けられているボタン電極の写真

まず、ボタン電極からの信号は後段のアナログ処理のために約 20 m のケーブルによって加速器トンネルの外部に運ばれる。これ以降の回路は全て加速器トンネルの外にあり、放射線を浴びることはない。次に、向かい合う二つの電極からの信号タイミングを揃えるために、これらのケーブルを日本高周波製の可変長同軸管 [27] に接続する。これは長さを調整することのできるディレイ回路であり、最大 88 cm まで伸ばすことが可能である。その後、それぞれの信号をローパスフィルターに入力し、高周波のノイズを低減する。SuperKEKB の LER における典型的な真空チェンバーのカットオフ周波数は 990 MHz であり [1]、それ以上の周波数成分はノイズが多く位置測定における線形性を悪くするため、十分に減衰させなければならないことから、ローパスフィルターを使用している。ローパスフィルターに求められる条件は、ボタン電極から入力されるバイポーラ信号の出力に、テールやリングングが極力含まれないことである。これは、メインリングの最小バンチ間隔は約 4 ns であるため、テールやリングングがそれ以上の長さになってしまうと、

次に来るバンチの信号に悪影響を及ぼしてしまうからである。そこで様々なローパスフィルターに実際のボタン電極からの信号を入力しテストした結果、LORCH [28] 製の 600 MHz ローパスフィルター 5LP8-600B-SR の出力が最もリングングやテールが小さいことを発見したため、本開発ではこれを採用した。他のローパスフィルターと出力を比べた結果については付録 A に示す。図 4.8 にボタン電極からの生信号 (緑色) と、それを LORCH 製のこのローパスフィルターに通した後の信号の波形 (黄色) を示す。この測定に使用したオシロスコープは Rohde & Schwarz 製の RTO2024 であり、サンプリングスピードは 10 Gsps、帯域幅は 2 GHz である [29]。緑色の信号の高さは約 700 mV であるが、黄色の信号の高さは約 150 mV であり、これはローパスフィルターに通したことによる減衰を示している。ローパスフィルターを通したことによってバイポーラ信号の時間幅が広がったことが分かり、後段の RFSoc でサンプリングする際に波形を捉えやすくなるという効果もある。リングングやテールは小さく、4 ns の間に一バンチの信号が収まっていることが分かり、これは次のバンチが作る信号に影響を及ぼさないことが確認できた。

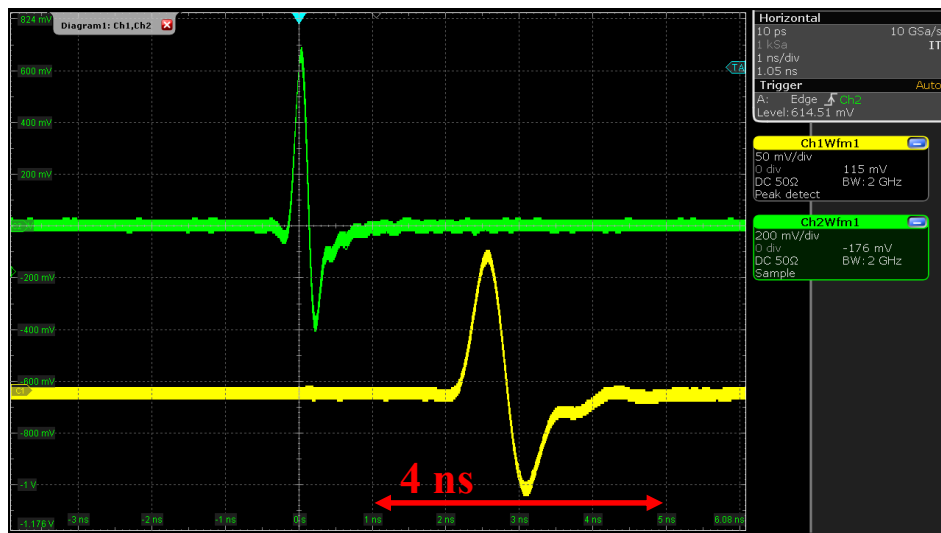


図 4.8 ボタン電極からの一バンチ信号 (緑色) と、それを LORCH 製のローパスフィルターに通した後の信号 (黄色) をオシロスコープで測定した結果。横軸は 1 ns/div で、縦軸は緑色の信号については 200 mV/div で、黄色の信号に関しては 50 mV/div である。

このローパスフィルターの周波数特性を測定した結果を図 4.9 に示す。測定に使用したネットワークアナライザは Keysight Technologies 製の E5071C [30] で、帯域は 300 KHz から 20 GHz である。この測定結果によると、600 MHz での S_{21} パラメータ (入力から出力への伝達効率) の絶対値は約 -3 dB であり、このローパスフィルターがカットオフ周波数約 600 MHz で正しく機能していることが確認できた。

ローパスフィルターの出力信号は、次に 180° ハイブリッド回路に入力される。180° ハイブリッド回路は入力された二つの信号の和信号と差信号を抽出するアナログ回路である。これに向かい合う二つの電極の信号を入力することで、それらの和信号 ' Σ_y ' (式 4.7 の分母) と差信号 ' Δ_y '

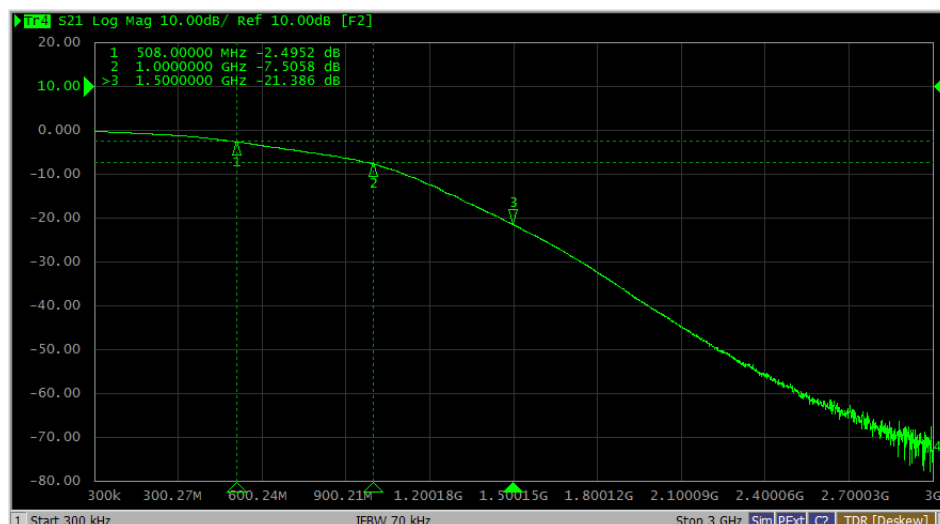


図 4.9 LORCH 製ローパスフィルタ LP8-600B-SR の周波数特性。これはネットワークアナライザで測定した S_{21} パラメータの絶対値を示す。

(式 4.7 の分子) を作り出す。本開発で用いたハイブリッド回路は MACOM 製の H-183-4-SMA [31] である。100-1500 MHz の範囲において、Insertion loss は最大 1.5 dB、Isolation は最小 20 dB、電圧定在波比 (VSWR) は最大 1.6:1 である。図 4.10 に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結果を示す。これは LER の一バンチ信号をハイブリッド回路に入力した時の出力であり、測定時のバンチ電荷は約 1 mA/bunch であった。また、測定したバンチの前後には 6 ns 以上のバンチ間隔があった。ハイブリッド回路の出力信号は、入力したバイポーラー信号 (図 4.8 の黄色の波形) と同じような形で、大きさが異なるような信号を出力していることが分かり、180° ハイブリッド回路として正しく機能していると考えられる。また、安定状態のビーム軌道は真空チェンバーのちょうど中心にあるとは限らないため、この図において必ずしも Δ_y 信号が 0 になる必要はない。我々が測定したいのは、ビーム軌道を基準としてその周りでバンチが振動する様子である。

次に、 Δ_y 信号は小さいため、 Δ_y 信号のみアンプによって増幅する。アンプに求められる条件は、前後の回路コンポーネントであるハイブリッド回路の出力と ZCU111 評価ボードの入力形式 (シングルエンド SMA) に適合した入出力を持つということと、RFSoc の ADC の入力レンジに収まるような増幅率を持つことである。これらの条件に適するアンプとして、本開発ではアンプの評価ボードである Texas Instruments 製の THS4303EVM [32] を採用した。これは高周波アンプのチップ THS4303 [33] を搭載した評価ボードで、THS4303 は固定ゲイン、シングルエンドのアンプである。このチップ増幅率は 20 dB であり、帯域幅は 1.8 GHz である。評価ボード上では 50 Ω のインピーダンスマッチングをしているため、全体では 14 dB の増幅率を持つ。メインリングの典型的なバンチ電流 1 mA/bunch では、 Δ_y 信号の高さがおおよそ 30 mV ほどになる。それを 14 dB 増幅すると約 150 mV となり、これは後段の RFSoc の ADC に入力できる最大電圧 1 V

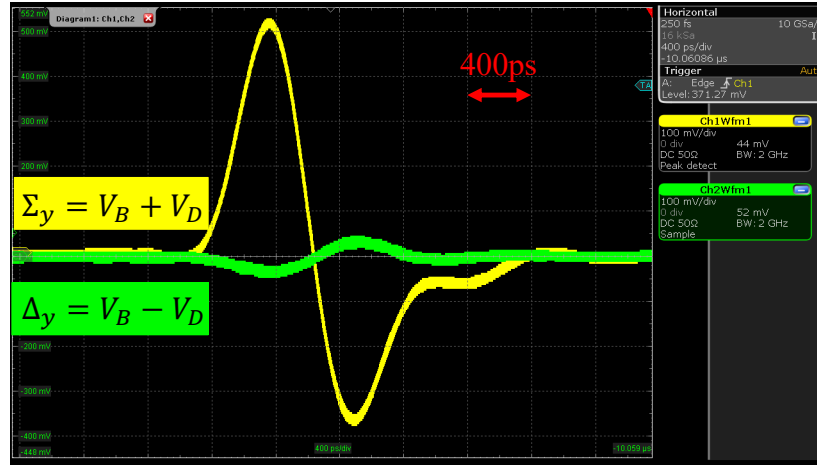


図 4.10 一パンチ信号をハイブリッド回路に入力し、その出力信号をオシロスコープで測定した結果。黄色の波形が Σ_y を緑色の波形が Δ_y を示す。横軸は 400 ps/div であり、縦軸は 100 mV/div である。

の範囲内にある。また、このアンプ評価ボードでは入力、出力ともにシングルエンドの SMA コネクターで実装されていて、前後の回路に適合している。

その後、 Σ_y と増幅された Δ_y 信号は後段の ZCU111 評価ボードに入力される。

4.3.3 ZCU111 評価ボード

ZCU111 評価ボードは第一世代 RFSoc チップ (Zynq UltraScale+ XCZU28DR [34]) を使用しており、これは 12-bit の ADC(最大 4.096 Gsps) を 8 チャンネルと 14-bit の DAC(最大 6.554 Gsps) を 8 チャンネル搭載している。

また、この評価ボードには外部クロック入力が備え付けられている。これに SuperKEKB の RF クロック (509 MHz [1]) を入力することで、評価ボード上の phase locked loop (PLL) を用いて、RFSoc 内の ADC と DAC のサンプリングクロックと FPGA の動作クロックを加速器の RF クロックと同期できる。

RFSoc の ADC,DAC 入出力は純正のドーターカード XM500 RFMC (Radio Frequency Mezzanine Card) [35] 上の SMA コネクターに接続されている。8 チャンネルの ADC 入力のうち 4 チャンネルは差動入力になっていて、残り 4 チャンネルはシングルエンド入力になっている。本研究では 4 チャンネルあるシングルエンド入力のみを使用している。シングルエンド入力のうち 2 チャンネルは Mini-Circuits 製のバラン TCM2-33WX+ [36] に接続されていて、これは主に 10 MHz から 1 GHz の帯域で使用され、LF (Low Frequency) バランと呼ばれる。残り 2 チャンネルは Anaren 製のバラン BD1631J50100AHF [37] に接続されていてこれは主に 1 から 4 GHz の帯域で使用され、HF (High Frequency) バランと呼ばれる。HF バランについては、1 GHz 以下の信号であっても、Insertion loss は大きくなってしまいが、問題なく使用することができる。

このように特性の異なる二種類のバランが2チャンネルずつ使われている。

Σ_y で Δ_y を割り算することでバンチ位置を求めるので、特性の同じバランに Σ_y と Δ_y を入力することが重要である。アナログ回路で作った Σ_y と Δ_y 信号を XM500 ドーターカードのシングルエンド SMA 入力に接続する。バランを通過した信号は RFSoc チップに入力され、ADC でサンプリングされる。ADC のサンプリング周波数は SuperKEKB の RF クロックを 8 通倍した 4.072 Gsps に設定している。サンプリングクロックの周期と位相は SuperKEKB の RF クロックと同期させているため、連続して来るバンチのバイポーラー信号のピークにサンプリング点を固定し続けることが可能である。図 4.11 に、RFSoc で記録された Σ_y と Δ_y 信号の波形を示す。これは LER の一バンチ信号を、先ほど述べたアナログ回路に通し、LF バランを通して RFSoc に入力したものである。観測したバンチのバンチ電流は約 0.2 mA であり、測定時のバンチ間隔は前後とも 8 ns より大きかった。図 4.10 と同様な形のバイポーラー信号が RFSoc で記録できていることが確認できる。これらサンプリングされた二つの信号のピーク値の比を取ることで位置の算出を行うことができる。

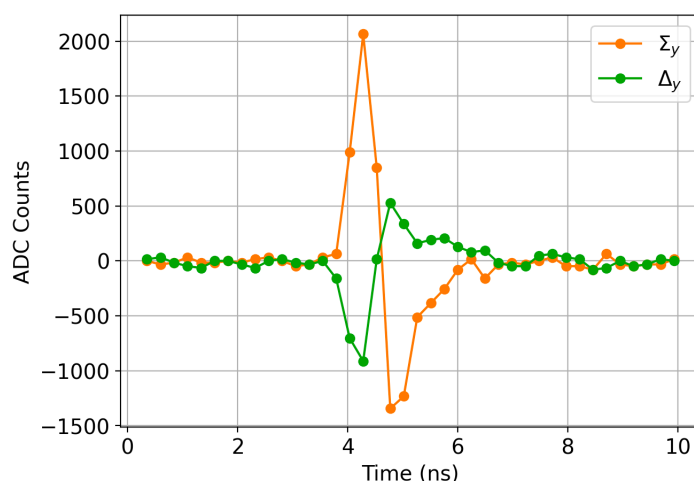


図 4.11 RFSoc で記録されたデジタル信号。オレンジ色の波形が Σ_y を緑色の波形が Δ_y を示す。

ここまでは垂直方向に向かい合った電極からの信号のみ説明したが、水平方向に向かい合った電極からの信号も全く同じように処理し、 Σ_x と Δ_x 信号を作り出し、RFSoc に入力する。RFSoc 内の FPGA にはリングバッファが実装されていて、これらのデジタル信号を一時的に保持している。ZCU111 評価ボードには PMOD (Peripheral Module) GPIO (General Purpose Input/Output) が備え付けられており、これを用いて SuperKEKB のアボートキックカートリガーを受け取っている。アボートキックカートリガーは PMOD GPIO を介して FPGA 内のリングバッファに接続されていて、トリガーが来た時にリングバッファを停止するように設計している。これによって、ビームアボート直前の Σ_x と Δ_x と Σ_y と Δ_y 波形が記録される。

図 4.12 に本開発で使用した ZCU111 評価ボードの写真を示す。ボード中央部には RFSoc チッ

プがあり、その周りに外部クロック入力や PMOD GPIO、Ethernet のソケットなどが備え付けられている。右側に付属している小さいボードが XM500 RFMC である。これには ADC 入力、DAC 出力用の SMA コネクタが実装されている。図中で赤く囲った場所にあるのが、シングルエンド入力 4 チャンネル分のバランである。

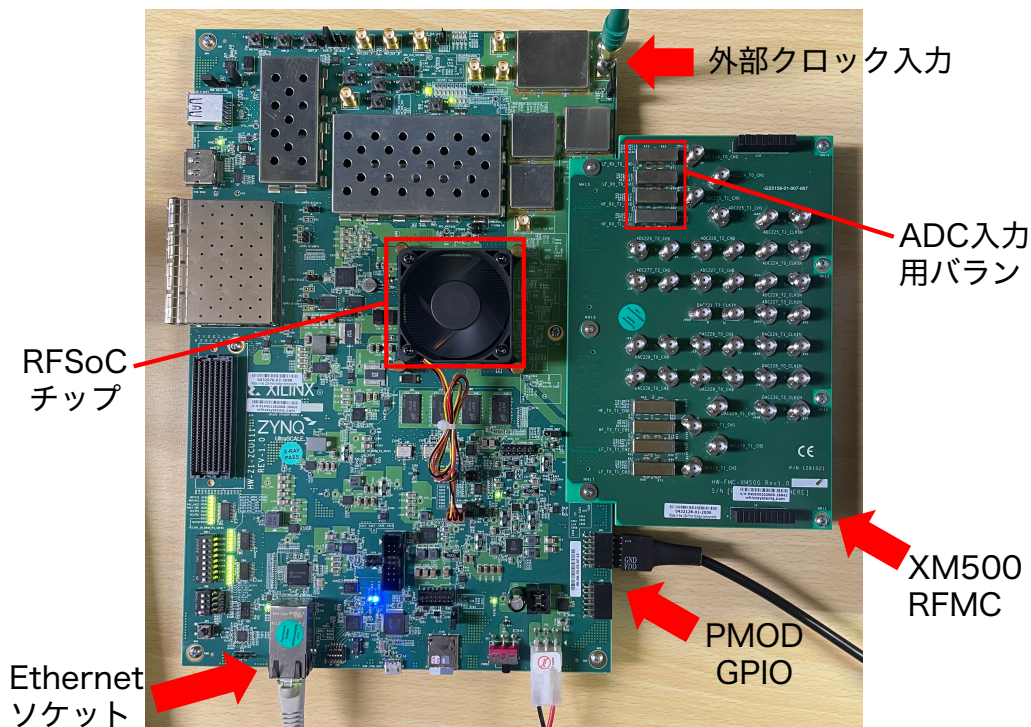


図 4.12 ZCU111 評価ボードの写真

4.3.4 ファームウェア

ここでは RFSoc に実装したファームウェアについて説明する。図 4.13 に実装したファームウェアのブロック図を示す。ファームウェア作成には、SLAC 発の FPGA 開発用 VHDL ライブラリである ‘surf’ [40] を用いている。これは、さまざまな用途の膨大な IP (Intellectual Property: 特定の機能を実現する設計済みモジュールのこと) が VHDL ベースで用意されているライブラリであり、図 4.13 に示す各ブロックは surf の IP を用いて作ったものである。

左から順に、まず RFSoc に入力された信号と外部クロック入力は Radio Frequency Data Converter (RFDC) ブロックに入力される。このブロックは RFSoc のために用意された IP で、ADC や DAC を操作するためのものである。サンプリング周波数やどのリファレンスクロックを使うかなどを設定することができる。FPGA のファームウェアに用いる他の IP と同じように使用、接続できるので、ADC、DAC のデータの FPGA 内処理への転送が非常に簡単に設計できる。この図では、シングルエンド SMA 入力の 4 チャンネル分の信号を扱っている ($\Sigma_x, \Delta_x, \Sigma_y, \Delta_y$)。

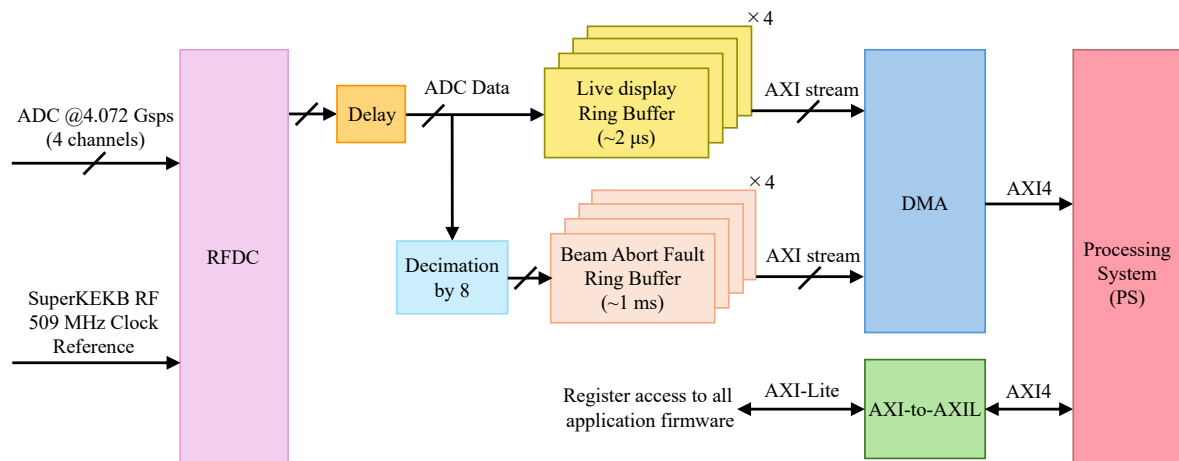


図 4.13 RFSoc に実装したファームウェアのブロック図

ADC のサンプリング周波数は 4.072 Gsps (509 MHz の 8 通倍) に設定している。

RFDC の出力は、デジタル化された信号で、FPGA に送られる。FPGA の動作クロック周波数は、SuperKEKB の RF クロック 509 MHz の 2 分周である 254.5 MHz に設定している。そのため、4.072 Gsps でサンプリングされた信号は、1 クロックあたり 16 サンプル点の信号が連結されて一つの信号にされた状態で FPGA に送られる。FPGA に送られてくる 4 チャンネル分の信号は、それぞれの到着タイミングに数クロックサイクルのずれが生じる。これは RFSoc で一般的に観測される現象であり、完全には回避できない。このタイミングのずれを補正するため、各チャンネルの信号それぞれに対してディレイを付加する機能が実装されている。このディレイ量は我々が BOR を操作するサーバー側から設定可能である。

FPGA 内にはリングバッファが二種類実装されている。一つ目は Live Display 用リングバッファであり、これは ADC から来た信号をそのまま保持している。およそ 2 μs の信号を記録することができる。このリングバッファは定期的に (約 1 秒おきに) 停止し、デジタル化された生信号を定期的にサーバーに送っている。これをサーバーで我々が確認することで、ADC にどのような形の信号が届いているのか、各チャンネルの信号はどのようなタイミングで FPGA に届いているのかを把握できる。主にデバックやディレイ調整用に用いるためのリングバッファである。

二つ目のリングバッファは Beam Abort Fault 用リングバッファである。これはアボートキックトリガーを受け取って停止するリングバッファであり、ビームアボート直前の波形を記録するものである。このリングバッファの直前にはデシメーションブロックが実装されている。我々が最終的に欲しい情報は、バンチごとのバイポーラー信号のピークの値のみである。それ以外の不要な点を削除しデータ量を抑えることで、できるだけ長い時間のバンチ位置を保存したいので、ここでは 8:1 のデシメーションをしてからリングバッファに入力している。8:1 のデシメーションを行うとサンプリング周波数が 509 Msps になる。これはメインリングの RF バケットが訪れる

周波数と同じであるから、全バッチの情報を記録しようと思えばこの 8:1 が最大のデシメーションファクターである。デシメーションを行ってからリングバッファに入力することで、このリングバッファは 100 ターン分、つまり約 1 ms 分の信号を記録することができる。SuperKEKB では 1 ターンに約 10 μ s かかるので、それに 100 ターンを掛け合わせると約 1 ms である。それぞれの種類のリングバッファはチャンネル数に応じて 4 つずつ実装されている。

リングバッファが停止した時に、リングバッファから記録された信号が送り出される。送り出された信号は、AXI-Stream protocol [38] を用いて Direct Memory Access (DMA) ブロックに転送される。DMA は受け取ったデータを AXI4 memory protocol [39] で Processing System (PS)、つまり RFSoc 内の CPU に転送する。

また、FPGA 内のファームウェアのレジスタアクセスは全て AXI-Lite protocol [39] を用いて行われている。我々がサーバーからレジスタの値を変更することが可能で、変更した際は PS から AXI4 memory protocol で FPGA に信号が行き、それが AXI-Lite にプロトコル変換されて、FPGA 内のレジスタに新しい値を設定する。

4.3.5 ソフトウェア

ここでは RFSoc-BOR のソフトウェアの構成を説明する。図 4.14 にリングバッファで記録したデータの転送と、FPGA のレジスタアクセス信号のソフトウェア内の流れを表した図を示す。

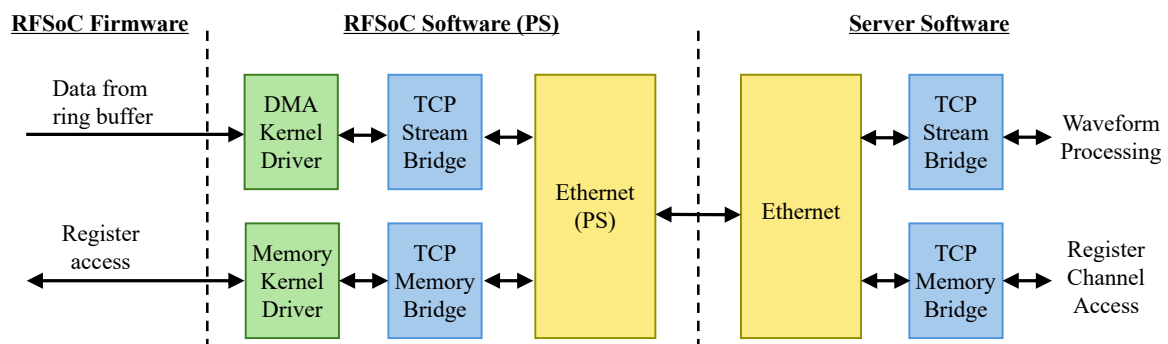


図 4.14 リングバッファで記録したデータの転送と FPGA のレジスタアクセス信号のソフトウェア内の流れを表したブロック図

左から順に、RFSoc のファームウェア・RFSoc 内の CPU のソフトウェア・我々が BOR をコントロールするのに使うサーバーのソフトウェアの三つに分かれている。ファームウェアから来たリングバッファからの波形データは PS 内の DMA Kernel Driver に転送され、AXI-Lite レジスタアクセス用信号は Memory Kernel Driver に転送される。その後、TCP stream bridge が波形データを TCP セグメントに変換し、Ethernet で送信可能にする。同様に、TCP memory bridge がレジスタアクセスのリクエストやレスポンスを TCP セグメントに変換し、Ethernet で送受信

可能にする。RFSoc 内の PS においては、Linux kernel として Petalinux (6.1.30-xilinx-v2023.2) [41] を用いている。

我々はそれらのデータを Ethernet を介してサーバーで受け取り、サーバー内で TCP セグメントを Python で扱えるデータ構造に変換する。このサーバー上では、BOR を操作するソフトウェアを稼働させる。この操作ソフトウェアは SLAC で開発された 'Rogue' [42] と呼ばれるソフトウェアパッケージを使用していて、波形データの変換やファームウェアのレジスターの値の変更などを行うことができる。この Rogue は Python を基本的に使用していて、波形データは numpy 配列に変換され、プロットや数値計算がしやすい形となる。このソフトウェアは GUI を立ち上げることが可能で、Live display リングバッファで記録された波形を GUI 上でリアルタイムで確認できたり、GUI 上でレジスターに新たな値を与えたりすることができる。GUI のスクリーンショットの一例を図 4.15 に示す。GUI ソフトウェアは SLAC で開発された Python Display Manager (PyDM) [43] というユーザーインターフェースを作るためのフレームワークを使用している。

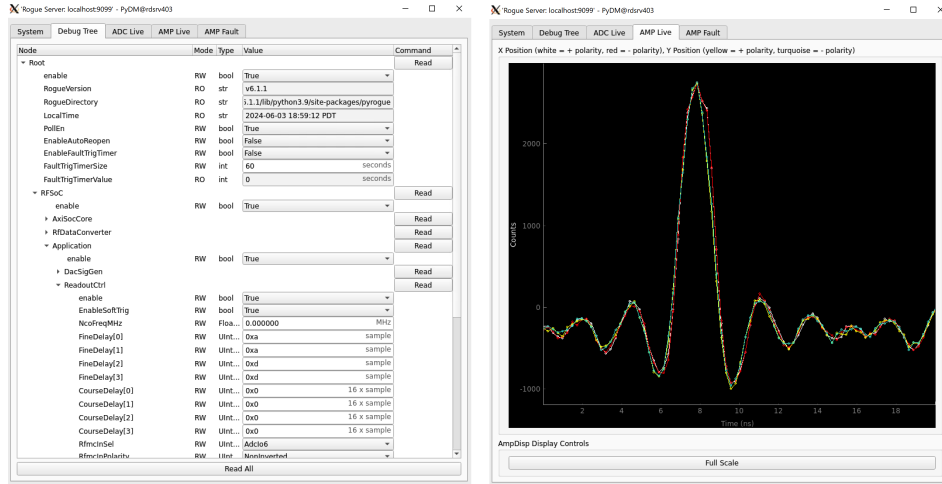


図 4.15 サーバー上で動かす BOR 操作 GUI のスクリーンショット。左図はファームウェアのレジスターを確認・設定する画面で、右図はリングバッファで記録した波形を確認する画面である。

4.3.6 バンチ位置の計算

以上に説明した流れで、真空チェンバーのボタン電極からの信号を処理し、デジタル化し、リングバッファで記録されたデータを BOR を操作するサーバーまで転送することができる。我々が得るデータは、4 種類の信号 $\Sigma_x, \Delta_x, \Sigma_y, \Delta_y$ の各バンチのバイポーラー信号のピーク値であった。それらピーク値の比をとることで位置を求めることができる。具体的には、式 4.6 と 4.7 を用いて、各バンチの位置は mm 単位で

$$x = 16.58 \cdot \frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \quad (4.10)$$

$$y = 16.58 \cdot \frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \quad (4.11)$$

と計算できる。また、各バンチの電荷 Q は

$$Q = \Sigma_x + \Sigma_y \quad (4.12)$$

と計算できる。これらの計算は記録したデータをもとにオフラインで行っている。

4.4 2 台目の RFSoc-BOR の開発

メインリング上の複数箇所でも SBL を観測したいというモチベーションのもと、2 台目の RFSoc-BOR の開発にも取り組んだ。この開発には、純正の RFSoc 評価ボード ZCU208 [46] を用いた。ZCU208 は第三世代 RFSoc チップ (Zynq UltraScale+ RFSoc ZU48DR [47]) を使用しており、これは 14-bit の ADC(最大 5 Gsps) を 8 チャンネルと 14-bit の DAC(最大 9.85 Gsps) を 8 チャンネル搭載している。ZCU208 が備えている機能は ZCU111 と基本的に同じで、外部クロック入力やアボートキックトリガーを受け取る GPIO も搭載している。全体的な回路設計については、アナログ回路、それを処理するファームウェア、ソフトウェアは全て 4.3 で説明した ZCU111 を用いた RFSoc-BOR のものをコピーして作成した。

ZCU111 を用いた RFSoc-BOR と大きく異なる点は使用した真空チェンバーの電極配置である。この 2 台目の RFSoc-BOR は LER の D05 区間 (図 2.4 の右側) に設置した。この区間の真空チェンバー直径は 90 mm であり、X 字型の電極配置 (図 4.4 の右図) である。斜め向きに向き合う二つの電極の和信号と差信号を作り、つまり $V_A + V_C, V_A - V_C, V_B + V_D, V_B - V_D$ の四つの信号をアナログ回路で作り出し、RFSoc でサンプリング・記録することで、式 4.8, 4.9 により位置を求める。境界要素法で計算すると、式 4.8, 4.9 の感度係数は $k_x = 31.8, k_y = 32.7$ である。

2 台の RFSoc-BOR を区別するために、富士直線部に設置した RFSoc-BOR を「富士-RFSoc」、本項で説明した D05 区間に設置した RFSoc-BOR を「D5-RFSoc」と呼ぶことにする。

第 5 章

RFSoc-BOR の動作試験

本章では、開発した RFSoc-BOR を実際のビームを用いて動作試験した結果について説明する。2 台ある RFSoc-BOR のうち、富士直線部に設置した富士-RFSoc を用いて二種類の試験を行った。一つ目は、ローカルビームバンプを用いた試験で、位置測定精度を求めた。二つ目は、SuperKEKB バンチ毎フィードバックシステムを用いたテストで、バンチごとの位置振動を適切に見ることができるのかを試験した。

5.1 ローカルビームバンプを用いた試験

RFSoc-BOR の位置決定精度を評価するために、ローカルビームバンプを用いた試験を行った。富士-RFSoc を接続している FB-BPM チェンバーの周りのステアリング磁石を用いて、FB-BPM チェンバーがある区間にローカルビームバンプを立ててその位置を富士-RFSoc で測定した。図 5.1 にローカルビームバンプの概念図を示す。一般的には 4 つのステアリング磁石を用いて、指定区間のビーム軌道の位置を変化させる。

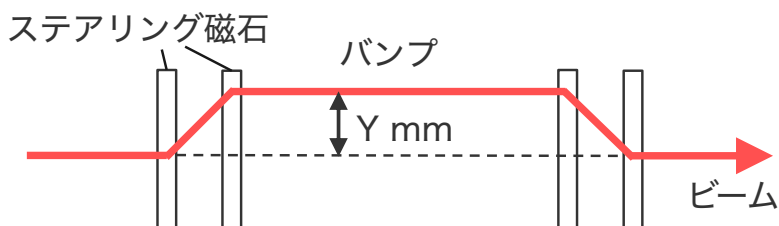


図 5.1 ローカルビームバンプの概念図

この試験は 2024 年 2 月 23 日に行われ、試験時のバンチ数は 97、バンチ電流は 0.5 mA/bunch、 Σ_y 信号の大きさはおよそ 250 mV であった。使用したのは LER で、本試験では垂直方向にバンプを立てた。通常運転時のビーム軌道の位置から、 -1 mm , -0.5 mm , $+1\text{ mm}$ の高さにバンプを立てて、それぞれのバンチの位置を富士-RFSoc で測定した。バンプの位置は、通常運転中にもビーム軌道測定に使用されている狭帯域検波器で測定して調整しており、この検波器の精度は

2 μm である [1]。また、 $\pm 1\text{ mm}$ 程度の高さのバンプであれば、バンプの高さによるビーム自体の揺らぎの変化は無視できる。例として、 -0.5 mm の高さにバンプを立てた時に富士-RFSoc で測定されたバンチ位置の分布を図 5.2 示す。これは、富士-RFSoc に記録された波形から式 4.11 を用いて位置を求め、バンプを全く立てない時、つまり通常運転時のビーム軌道の位置を測定した点が 0 mm になるようにオフセットを引いた値である。分布の中心が -0.5 mm からずれているが、これは後述する直線フィットによって校正することが可能である。

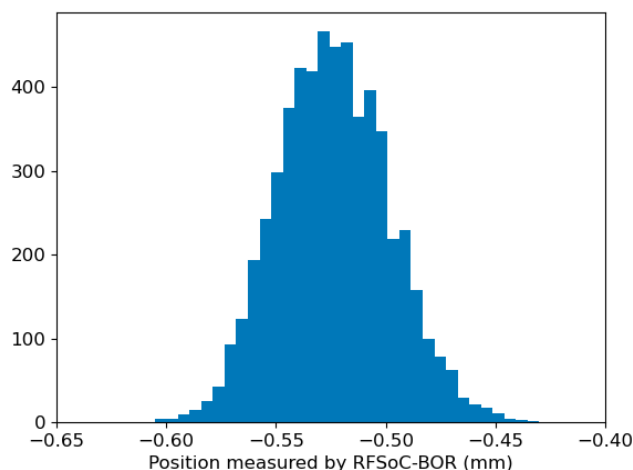


図 5.2 -0.5 mm の位置にバンプを立てた時に富士-RFSoc で測定された位置の分布

この測定をそれぞれの高さのバンプに対して行い、その分布の平均を測定された位置、標準偏差を位置測定精度とする。本試験の結果をまとめた図を図 5.3 に示す。

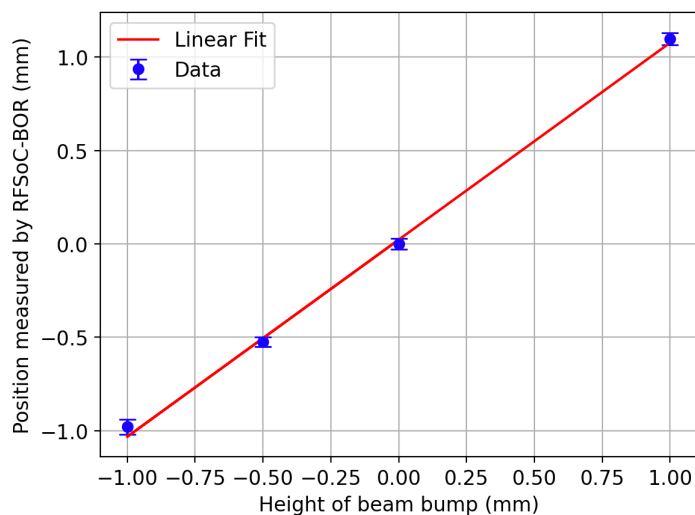


図 5.3 ローカルビームバンプを用いた試験の結果。横軸は立てたローカルビームバンプの高さ、縦軸は富士-RFSoc で測定した位置を示す。青色の点が測定点で、富士-RFSoc で記録した波形から式 4.11 を用いて計算した垂直方向バンチ位置の平均である。誤差棒はその標準偏差を描いている。赤色の直線はそれらの測定点の直線フィットである。

この図を見ると、富士-RFSoc で測定した位置とビームバンパの高さは全体的によく一致していることが分かる。また、赤色の直線はこれら 4 点を直線フィットしたものである。 x をバンパの高さ (図 5.3 の横軸)、 y を富士-RFSoc で測定した位置 (図 5.3 の縦軸) とすると、フィッティング結果は $y = (1.055 \pm 0.029)x + (0.022 \pm 0.020)$ mm であった。これは RFSoc-BOR システムの線形性が優れていることを示している。各測定点の標準偏差を平均すると 30 μm であった。この値は狭帯域検波器の精度 ($\sim 2 \mu\text{m}$) よりも大きく、ビームバンパを立てる正確さが今回の測定に与える影響は無視できると考えられる。この 30 μm という精度は、目標としていた VME-BOR と同等の精度を達成している。ここで、RFSoc-BOR は VME-BOR よりも ADC ビット数が大きいにも関わらず、同等の精度を持つ結果となったが、これは RFSoc-BOR の ADC の入力レンジを満足に活かしていないという点が理由である。本開発は RFSoc を用いた BOR 開発の最初の試みであったため、現在、電極信号の増幅に用いるアンプにはゲインが固定された評価ボードを用いている。そのため、ADC のレンジに合わせたゲイン設計をしていない。現在、RFSoc の ADC レンジ全体を最大限に活用するために、より高いゲインのアンプを表面実装したカスタム RFMC ドーターカードを設計・製作している。この新しいドーターカードを使用することで、将来的にはさらなる精度向上が期待される。現在の計画では、アンプの増幅率を現在の約 6 倍に引き上げることで、バンチ電流 0.5 mA において位置測定精度を約 5 μm まで向上させる予定である。

また、位置測定精度はバンチ電流の大きさに依存する。バンチ電流が大きければボタン電極からの波形も大きくなり、ADC の入力レンジを有効に使えるようになるため、位置測定精度は向上する。通常、メインリングは高いルミノシティを維持するために、バンチ電流を 0.5 mA 以上に設定して運転することが大半である。今回の試験では、バンチ電流が 0.5 mA の条件下で位置測定精度 30 μm という結果が得られた。このことから、メインリングで実際に使用する際には、今回の試験と同等、もしくはそれ以上の精度で BOR として使用できると考えられる。

5.2 バンチ毎フィードバックシステムを用いた試験

次に、RFSoc-BOR の測定結果を既存のバンチ毎モニターの測定結果と比較することで、RFSoc-BOR がバンチ毎の位置振動を適切に捉えられるのかを試験した。比較対象としては、富士直線部の FB-BPM チェンバーに設置されている SuperKEKB バンチ毎フィードバックシステム [44] 用の検波器として使われている FB-BPM 検波器と呼ばれるものである。これは現在富士-RFSoc が設置されている真空チェンバーと同じものに取り付けられている。図 5.4 にフィードバックシステムと富士-RFSoc の位置関係を示す。

このフィードバックシステムは Dimtel, inc. 製の iGp12 [45] を用いていて、これはディジタイザなどの検波システム、フィードバック計算用のタップフィルタを実装した FPGA などが搭載されている。FB-BPM 検波器で測定されたバンチ位置を用いて不安定性を抑えるような向きの

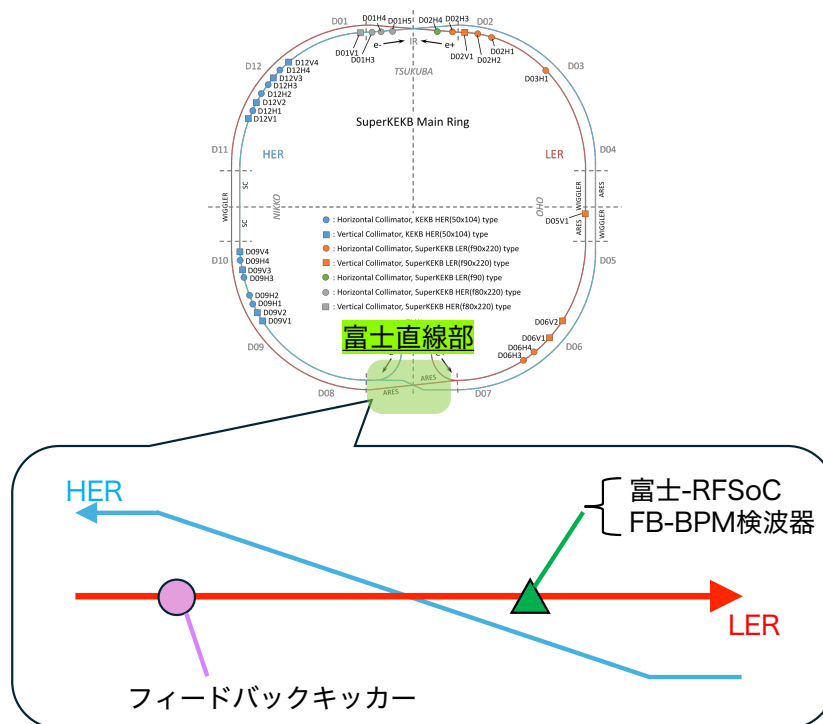


図 5.4 富士直線部における FB-BPM 検波器、RFSoc-BOR、フィードバックキッカーの設置場所を示す概略図。LER の上流側にフィードバックキッカーがあり、水平方向・垂直方向キッカーが同じ場所に設置されている。そして下流側に FB-BPM チェンバーがあり、そこに FB-BPM 検波器と RFSoc-BOR は取り付けられている。

キックを iGp12 が計算し、それを上流側にあるフィードバックキッカーに送信し、周回してきたバンチをキックするという仕組みになっている。このシステムは実際に SuperKEKB で運用されている実績があり、FB-BPM 検波器も良く校正されている。FB-BPM 検波器は $2\mu\text{m}$ の位置測定精度を持つ。

この FB-BPM 検波器は本来フィードバックシステム専用設計されたもので、LS1 以前は、BOR のように測定した位置を記録・保持する機能は備えていなかった。しかし、SBL の観測を行うことのできるデバイスを増やすために、FB-BPM 検波器にもバンチ位置の記録機能を追加する作業が RFSoc-BOR の R&D と同じ時期に行われ、LS1 以降から BOR としての運用も開始した。FB-BPM 検波器は圧倒的に良い位置測定精度を持つが、富士直線部から他の場所に移動させて測定することはできないため、可搬性を持つ RFSoc-BOR の開発の必要性は高い。現在、富士-RFSoc と FB-BPM 検波器が同じ場所に設置されているのは RFSoc-BOR の研究開発やテストを目的とした配置である。また、SBL の観測についても、将来的には富士-RFSoc を可搬性を活かしてリング内の別の場所に移動させ、複数種類の BOR を用いた統合的なバンチ毎ビーム診断を行う予定である。

BOR の役目はバンチ振動を捉えることであるから、本試験ではバンチ毎フィードバックシステ

ムを用いて意図的にバンチ振動を起こして測定を行った。フィードバックキッカーの位相を 180° 反転させると、バンチの振動を抑える方向ではなく、増長させる方向にキックを与えることができる。また、iGp12 にはフィードバックシステムの試験用として、自らキッカー位相を反転させる機能がある。この機能を利用してバンチ振動を意図的に増幅させ、それを富士-RFSoc と FB-BPM 検波器で同時測定し、測定された振動を比較した。位相を反転させる際のキックの強さは、通常運転時にフィードバックキッカーがバンチに与えるキックと同じ強さに設定した (フィードバックゲインを通常運転時と同じ値に設定した)。FB-BPM 検波器は富士-RFSoc と同じ FB-BPM チェンバーに取り付けられているため、観測されるバンチ振動はほとんど同じであることが期待される。この試験は 2024 年 6 月 6 日に LER を使って行われ、メインリングのオプティクスは $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ の設定であった。試験時のバンチ数は 393 で、バンチ電流は 0.5 mA/bunch 、 Σ_y 信号の高さは約 250 mV であった。バンチ電流は 5.1 項で説明したローカルビームバンプを用いた試験時のバンチ電流と同じである。そのため、富士-RFSoc の位置決定精度は $30 \mu\text{m}$ である。この試験においても、バンチに対するキックは垂直方向に加え、垂直方向のバンチ位置を測定・比較した。

本試験の測定結果を図 5.5 に示す。キッカーの位相を反転するタイミングでトリガー信号が富士-RFSoc に送信され、このトリガーを用いて富士-RFSoc のリングバッファを停止することで、FB-BPM 検波器と富士-RFSoc が記録するバンチ位置情報のタイミングを大まかに同期させている。さらに、バンチ振動を増大させていくとビームロスが発生し、最終的にビームがアボートされる。この際、FB-BPM 検波器と富士-RFSoc の両方で、バンチ信号が消失するタイミングが記録できる。この消失タイミングを基準として、二つのデバイスで記録されるバンチ位置データのタイミングを詳細に揃えている。図 5.5 を見ると、キッカー位相を反転させたことによってバンチ振動が増大している様子が分かる。そして、FB-BPM 検波器と富士-RFSoc で記録されたデータを見比べると、振動の大きさや振動の発展時間がほぼ同一であることが分かる。

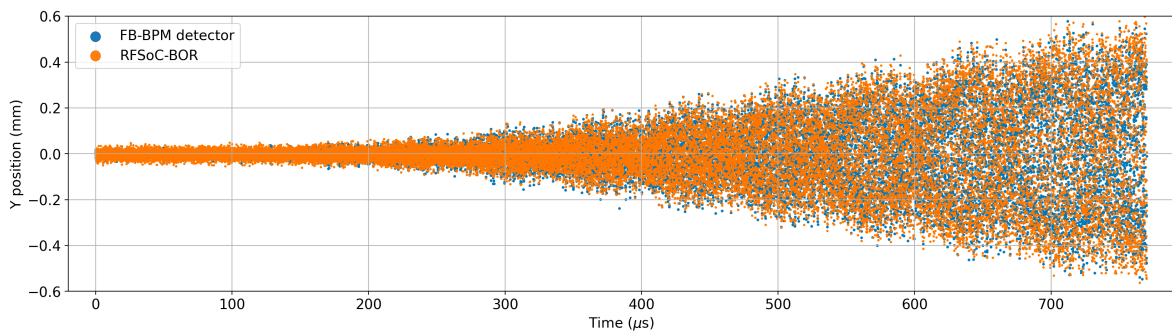


図 5.5 フィードバックシステムを用いた試験の結果。横軸は時間経過、縦軸は FB-BPM 検波器 (青色) と富士-RFSoc (オレンジ色) で測定された垂直バンチ位置を示す。一つひとつの点が一つのバンチを表している。

図 5.5 における各点 (すなわち各バンチ) について、FB-BPM 検波器で測定された位置から富士-RFSoc で測定された位置の引き算を計算し、ヒストグラムにしたものを図 5.6 に示す。これ

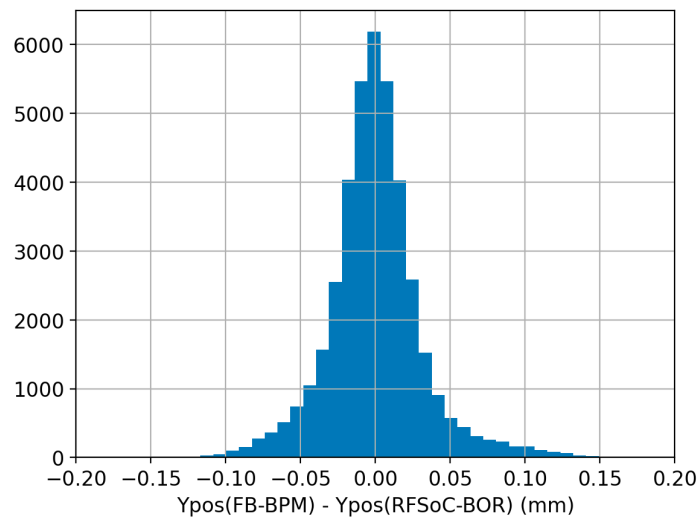


図 5.6 図 5.5 における各点 (各バンチ) について、FB-BPM 検波器で測定された位置から富士-RFSoc で測定された位置を引いた値のヒストグラム

は FB-BPM 検波器と富士-RFSoc で、測定されたバンチ位置がどの程度異なっているのかを示している。これは 0 を中心とした左右対称の分布となっていて、分布の標準偏差は $32\ \mu\text{m}$ であった。よって、富士-RFSoc で測定した位置は、FB-BPM 検波器で測定した位置とおよそ精度の範囲で一致していることが分かった。以上二つの試験から、RFSoc-BOR がバンチ毎位置モニターとして設計通りの性能で動作していることが確認された。

5.3 新型 BOR 開発のまとめ

以上のように、本研究では RFSoc を用いて、可搬性を持つ新型 BOR の開発を行った。開発した RFSoc-BOR は、ビーム電流 $0.5\ \text{mA}$ において位置測定精度 $30\ \mu\text{m}$ を達成し、バンチ毎のビーム振動を適切に捉えられていることも確認できた。RFSoc は加速器モニターへの応用可能性が注目されている新しいチップである。本研究での開発は RFSoc を用いたビーム位置モニターの開発の先駆けとなり、次世代の高速ビーム診断システムのモデルケースの一つとなる。

また、RFSoc-BOR の可搬性を活かした複数地点での観測システムを構築する最初の試みとして、本研究では 2 台の RFSoc-BOR を開発してリング上に配置した。このシステムによって、SBL 発生時のビーム不安定性の発展やビームロスの進み方を詳しく解析することが可能になった。さらに本システムの応用範囲は SBL に限定されない。観測対象に応じた任意の場所で、電子雲不安定性やイオントラッピングなど様々なビーム不安定性をバンチ毎に詳細に観測できる新たなツールとして機能する。可搬性を活かした柔軟な観測と、高速性を活用した精密な解析を可能にすることにより、RFSoc-BOR は今後の加速器高度化や性能向上に対して多大な貢献を果たすことが期待される。

第 6 章

RFSoC-BOR を用いた SBL の観測

開発した RFSoC-BOR を用いて実際に SBL の観測を行った。本章では観測時のセットアップを整理し、観測結果を紹介する。

6.1 セットアップ

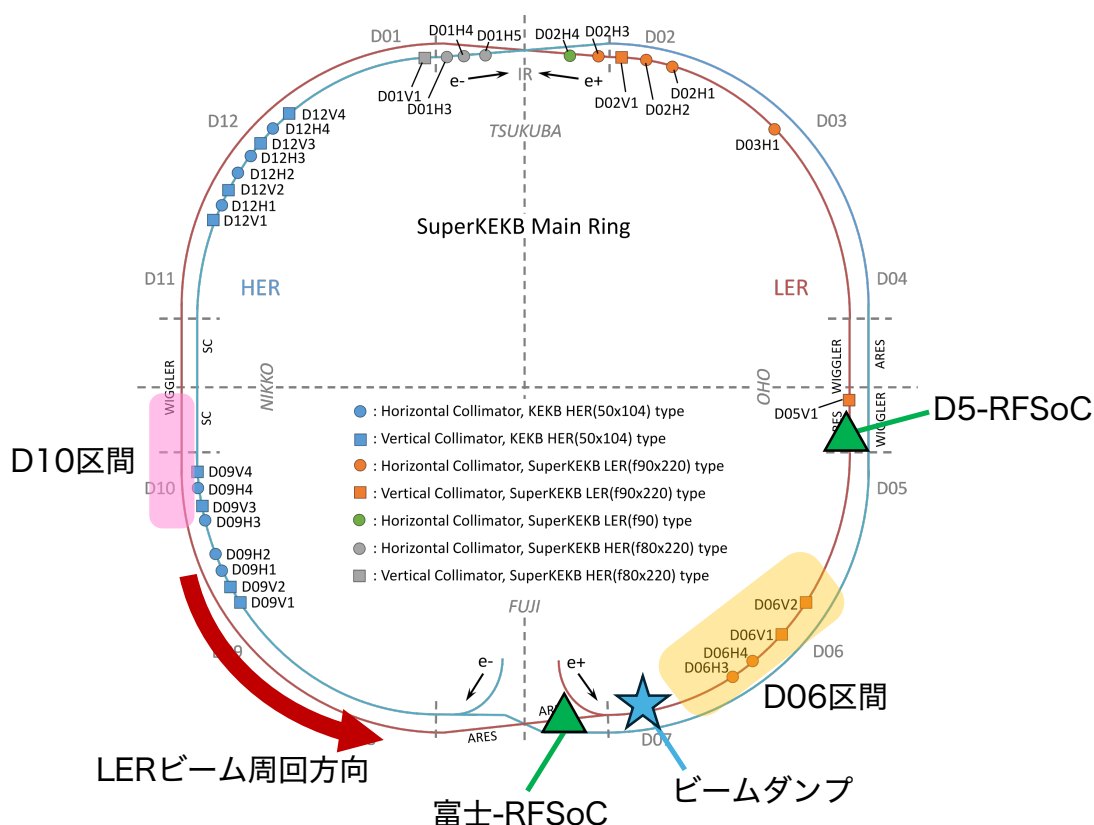


図 6.1 RFSoC-BOR の設置場所とその他重要な場所を整理した図

図 6.1 に、今回開発した 2 台の RFSoC-BOR の設置場所と、本論文で名前が登場する場所を整

理した。本研究では LER で発生する SBL のみに着目する。富士-RFSoc は、R&D や他のデバイスとの比較試験を行いやすい富士直線部に設置され、試験終了後も同じ場所で SBL の観測に使用した。また、LS1 以前には、コリメータなど開口が狭い箇所ではビームが力を受けて SBL が発生する可能性が指摘されていた。この仮説に基づき、コリメータが設置されている D06 区間を挟む形で、D05 区間に二台目の RFSoc-BOR を設置した。しかし、LS1 以降の観測結果から、SBL の原因はコリメータ周辺ではなく、圧力バースト現象が発生する場所と深く関係していると考えられるようになった [48]。このため、本論文では後述するように、圧力バースト現象に着目した SBL の解析を行っている。

LER は反時計回りにビームが周回し、上流から、D10 区間、富士-RFSoc、ビームダンプ、D06 区間、D5-RFSoc という順である。2 台の RFSoc-BOR でビームダンプと D06 区間が挟まれている。D06 区間には上流から順に水平コリメータが 2 台 (D06H3, D06H4) と垂直コリメータが 2 台 (D06V1, D06V2) が設置されている。

D10 区間には、約 10 m おきに真空ゲージ (CCG) が設置されていて、設置場所には上流から D10_L01, D10_L02, D10_L03, ... という順で名前がついている。図 6.2 に D10 区間の LER の真空ゲージ設置場所の概略を示す。

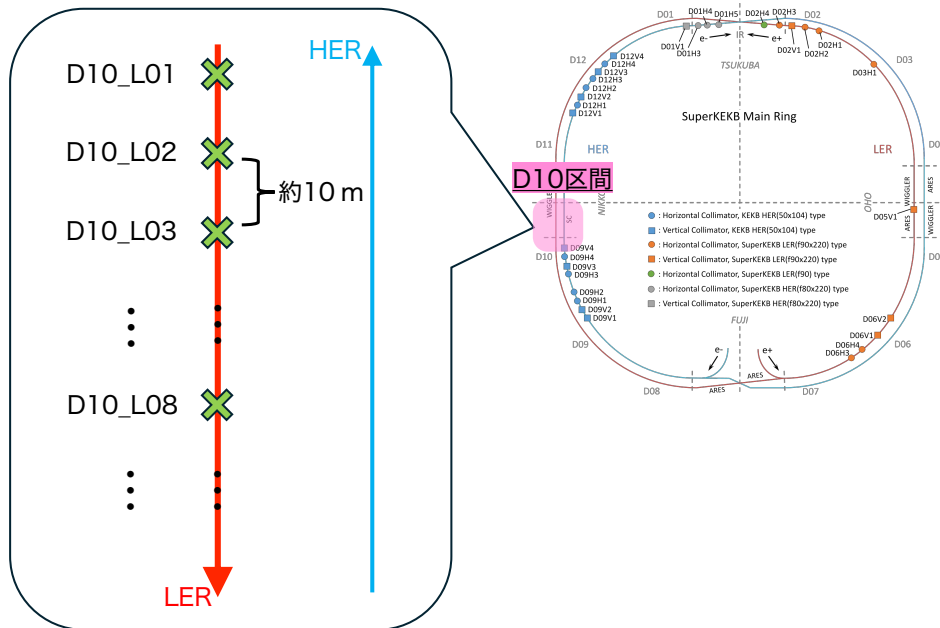


図 6.2 D10 区間の真空ゲージ設置場所の概略図。LER ビームが図の上から下へ、HER ビームが下から上へ通る直線部で、バツ印が真空ゲージの設置してある場所を示している。

本章で名前が登場する D10 区間内の各地点、富士-RFSoc と D5-RFSoc の設置箇所、D06 区間のコリメータ設置箇所におけるベータ関数やベータトロン位相を表 6.1 にまとめた。

本論文では、発生したビームアバートのうち最大のバンチ電荷損失が 5% 以上だったものを

場所	s (m)	β_x (m)	ν_x (rad/ π)	η_x (mm)	β_y (m)	ν_y (rad/ π)
D10.L02 CCG	773.19	29.80	22.98	5.15	6.82	23.59
D10.L03 CCG	782.61	6.02	23.21	-93.09	28.63	23.83
D10.L05 CCG	801.46	6.07	23.72	-103.45	29.59	24.30
D10.L06 CCG	810.89	29.80	23.97	-8.45	6.87	24.51
D10.L07 CCG	820.32	7.04	24.19	91.68	28.05	24.75
D10.L08 CCG	829.74	31.22	24.42	310.7	5.38	25.01
富士-RFSoc	1519.06	19.13	44.45	0	19.15	46.31
D06H3 コリメータ	1788.02	24.25	52.45	695.43	5.56	54.81
D06H4 コリメータ	1816.89	24.25	53.42	695.86	5.58	55.66
D06V1 コリメータ	1870.27	14.64	54.95	515.99	67.35	57.73
D06V2 コリメータ	1989.58	99.96	58.34	446.66	20.57	61.01
D5-RFSoc	2161.12	7.05	63.94	0	77.18	66.69

表 6.1 本章で名前が登場する D10 区間内の各地点、富士-RFSoc と D5-RFSoc の設置箇所、D06 区間のコリメータ設置箇所における加速器パラメータ。s は衝突点からの距離、 β_x と β_y は水平・垂直方向ベータ関数、 ν_x と ν_y は衝突点を 0 とした時の水平・垂直ベータトロン位相、 η_x は水平方向分散関数である。

	D02V1	D02H1	D06V1	D06H4
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Detuned オプティクス	13	20	8.7	30
$\beta_y^* = 1$ mm オプティクス	2.2	14	4.2	20

表 6.2 メインリングの主要な二種類のオプティクス設定における典型的なコリメータ開口度合い。向かい合うコリメータヘッド間の距離を表示している。実際にはそれらの値の周辺で少しづつ開口度を調整しながら運転する。

SBL と定義している。富士-RFSoc では、2024 年 10 月 13 日から 11 月 28 日までに 117 件の SBL を記録し、D5-RFSoc では 2024 年 10 月 26 日から 11 月 28 日までに 58 件の SBL を記録した。この期間の運転では、2024 年 10 月 13 日から 10 月 23 日まで電子・陽電子の衝突をさせない「Detuned オプティクス」で調整運転を行っていた。Detuned オプティクスでは、衝突点のベータ関数は絞られておらず、LER においては $\beta_y^* = 48.6$ mm, $\beta_x^* = 384$ mm であった。10 月 24 日以降は衝突点における垂直ベータ関数を $\beta_y^* = 1$ mm まで絞り、電子・陽電子の衝突を行うオプティクスへと変更し運転を継続した。これら二種類のオプティクス設定では、コリメータの開口度も異なっている。それぞれのオプティクス設定での典型的なコリメータ開口度を表 6.2 に示す。ベータ関数を絞る際にはコリメータの開口度を狭くし、加速器の物理開口も小さくする。また、メインリングでは水平方向ビームサイズの方が垂直方向ビームサイズよりも大きいため、それに対

応して水平コリメータの開口度の方が垂直コリメータの開口度よりも大きく設定されている。

6.2 SBL の観測例

ここでは 2 台の RFSoc-BOR で記録したデータを用いて SBL の観測例をいくつか紹介する。

図 6.3 に SBL の測定結果の一例を示す。

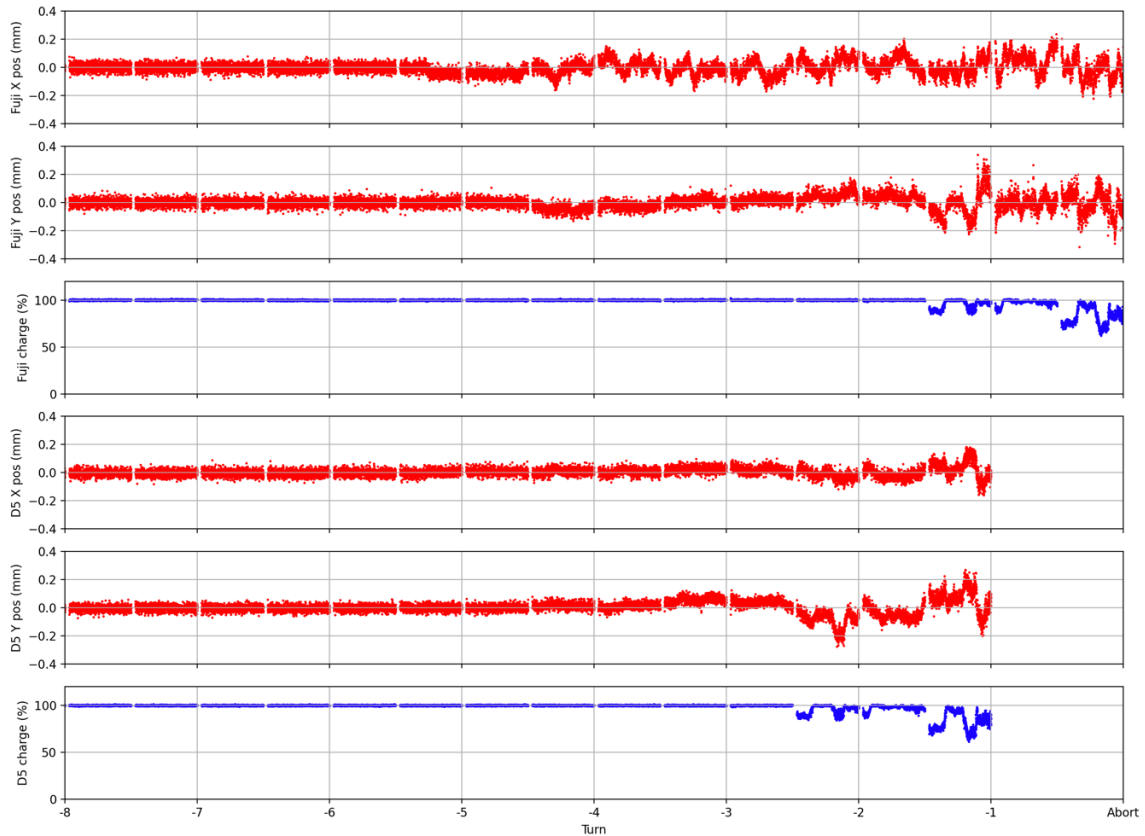


図 6.3 2024 年 10 月 28 日 2:55:30 に富士-RFSoc(上三段)と D5-RFSoc(下三段)で記録された SBL。ビームアポート直前の 8 ターンのバンチ位置と電荷を示すプロットである。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は 0.64 mA であった。上から順に富士-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷で、その下が D5-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷である。このプロットの一番右端でビームアポートが発生し、横軸はその何ターン前かを示している。D5-RFSoc はビームダンプの下流にあるため、最後の 1 ターンの記録はない。

この図において、縦罫線で区切られた一つの区間が 1 ターン、つまり約 10 μ s に対応し、一つ一つの点が一バンチに対応する。このプロットは、リング上のある一箇所で流れていくバンチの位置と電荷を記録して左から順にプロットしたものであるため、同じバンチが何回も周回してきて、1 ターンの区切りごとに一回記録されることに注意する。横軸はビームアポートの何ターン前かを示している。ビームアポート直前最後のターンにおいては、バンチが富士-RFSoc を通過した直後、ビームダンプに入るため (図 6.1 参照)、D5-RFSoc のプロットでは最後のターンはデータ

が無く空欄になっている。2.3.2 項で説明した通り、メインリングでは 1 ターンの中に二つのバンチトレインがあり、それらの間には約 300 ns のアボートギャップが存在する。そのため、図 6.3 を見ると、1 ターンあたり二つのバンチトレインと二つの切れ目 (アボートギャップ) があることが確認できる。また、バンチ位置は安定時のビーム軌道位置を中心として振動し、そのビーム軌道の位置は 0 とは限らない。そのため、記録された最初のターン (ビームアボートの 100 ターン前) のそれぞれのバンチ位置を、各バンチ・全ターンのデータから引き算することで、ビーム軌道による位置のオフセットを取り除いている。一番下の電荷のプロットは、記録された最初のターン (ビームアボートの 100 ターン前) の各バンチの電荷量を 100% とした時のそれぞれのバンチの電荷量を割合で表している。これは、メインリングでは全てのバンチの電荷が正確に均一化されていないため、絶対値で表すよりも割合で表した方が電荷の損失が見やすいためである。今後、本論文で登場するバンチ位置と電荷を表した同様なプロットは全て同じ読み取り方をする。この SBL では、富士-RFSoc においても D5-RFSoc においても電荷が損失する前にバンチ位置の振動が始まっているように見える。そして最終的に最大 40% ほどの電荷損失を伴いながらビームアボートが発生したことが分かる。

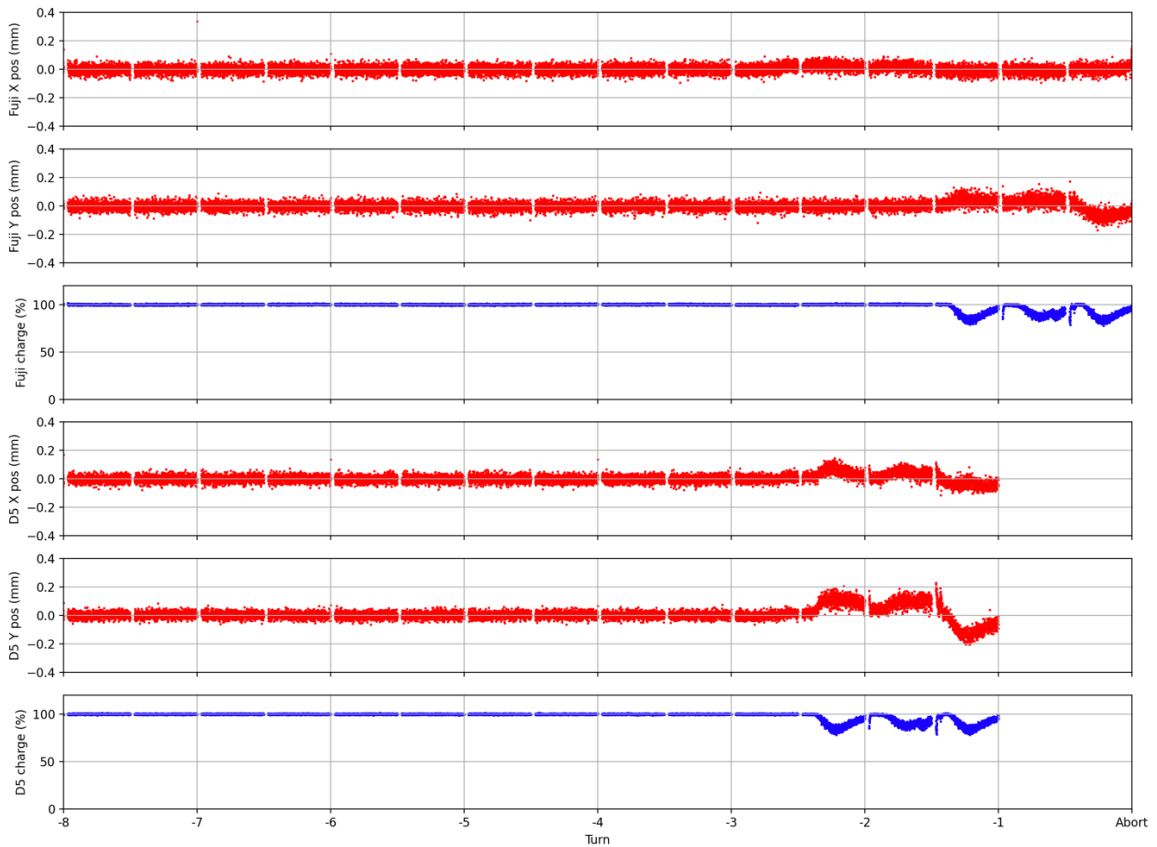


図 6.4 2024 年 10 月 28 日 02:30:07 に富士-RFSoc(上三段) と D5-RFSoc(下三段) で記録された SBL。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は 0.50 mA であった。

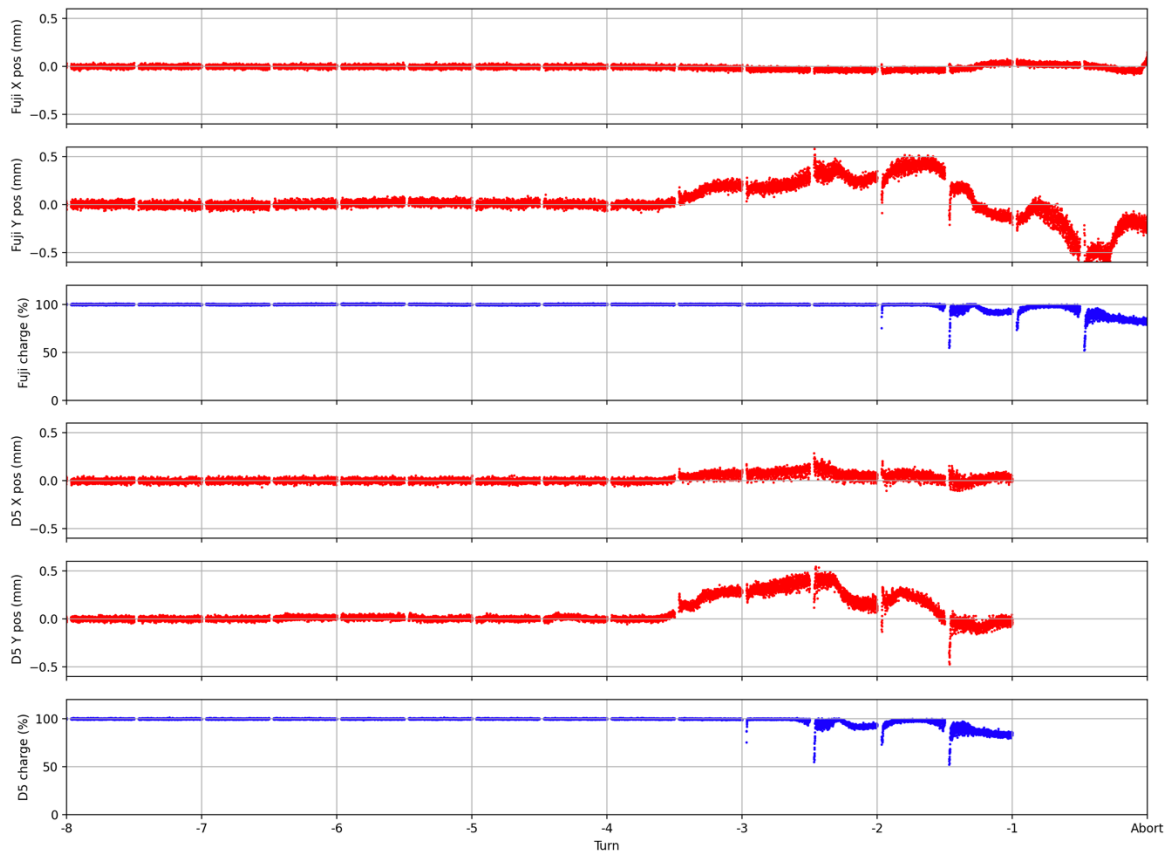


図 6.5 2024 年 11 月 12 日 19:38:00 に富士-RFSoc(上三段) と D5-RFSoc(下三段) で記録された SBL。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は 0.66 mA であった。

図 6.4 と図 6.5 に、RFSoc-BOR で記録された他 2 件の SBL の測定結果の例を示す。これらの図の見方は図 6.3 と同じである。図 6.4 の SBL に関しては、電荷損失が始まる前にバンチ位置の振動を見つけるのが少々困難である。図 6.5 の SBL に関しては、Y 方向振動が先ほどの 2 件に比べて大きく見えていて、どちらの RFSoc-BOR でも Y 位置が最大約 0.5 mm まで振れていた。そしてバンチトレインの先頭付近のバンチが著しく電荷を損失しながらビームアボートが発生している。

以上のように、SBL 発生時には、バンチ位置の振動が確認された後にバンチ電荷の損失が発生する場合や、電荷が損失して初めて振動が確認できる場合など、さまざまな進行パターンが観測されている。また、振動の挙動や大きさ、電荷損失の特性は、それぞれの SBL 事象ごとに様々である。バンチ位置の振動が観測されるということは、バンチが何らかの外力を受けたことを示しており、その外力の性質、すなわち力の方向、強さ、作用する場所が SBL 事象ごとに異なっていると考えられる。

第 7 章

RFSoc-BOR を用いた SBL の解析と考察

本章では、RFSoc-BOR で観測した SBL のデータを用いて、バンチ振動や電荷損失について解析した結果を示す。さらに、RFSoc-BOR だけでなく真空ゲージやロスモニターなど他のデバイスからの情報を組み合わせた解析も行い、SBL の原因について考察した結果も示す。

7.1 振動継続時間

まず、バンチ位置振動の開始時刻を特定し、その後ビームアバートに至るまでの振動継続時間を調査した。振動開始時刻の検出には、位置データに基づく移動平均法を適用した。具体的には、バンチ位置データに対して連続する 500 バンチ分の平均値を計算し、その計算対象範囲を一バンチずつスライドさせながら移動平均を求める。この移動平均値をプロットして移動平均線を描画し、その絶対値が設定した閾値を超えたタイミングを振動開始時刻と判定した。

閾値の設定には、ビーム安定時の移動平均線の揺らぎを使用した。揺らぎの評価には、ビームアバートによるトリガーではなく、ビーム安定時に RFSoc ヘトリガーを送信して取得したバンチ位置データを利用した。例として、富士-RFSoc の X 位置データについて、安定時の約 30 ms にわたる位置データを用いて移動平均を計算し、その分布を図 7.1 に示す。結果として、移動平均値は 0 を中心に分布し、標準偏差は 0.002 mm であった。この分布は、ビーム安定時であっても移動平均線はこの程度の範囲で動くということを意味している。この値を基に、閾値を標準偏差の 5 倍である 0.010 mm に設定した。同様の手法を用いて、富士-RFSoc および D5-RFSoc における X 位置と Y 位置の閾値を設定した。その結果を表 7.1 に示す。

	富士-RFSoc	富士-RFSoc	D5-RFSoc	D5-RFSoc
	X 位置	Y 位置	X 位置	Y 位置
閾値 (mm)	0.010	0.012	0.012	0.014

表 7.1 各 RFSoc-BOR の X 位置・Y 位置について、振動開始時間を検知する時に使用する閾値

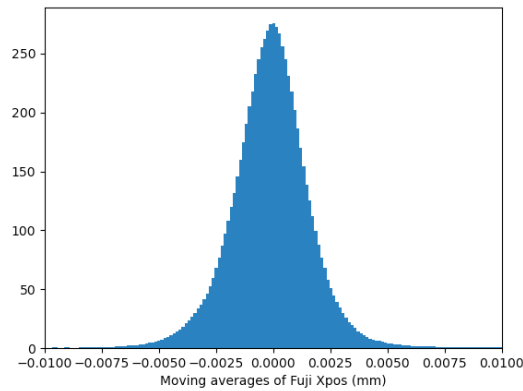


図 7.1 ビーム安定時に取得した富士-RFSoc の X 位置データに対して、移動平均を計算し、その値の分布をヒストグラムにした図

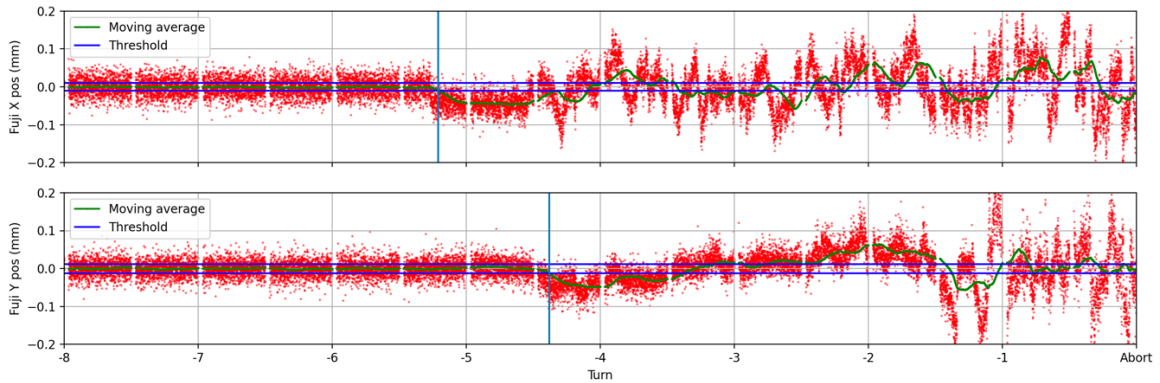


図 7.2 図 6.3(上二段) のパンチ位置のプロットに、移動平均線と閾値を書き加えた図。見やすさのために縦軸は拡大した。赤色の点は図 6.3 と同じくパンチ位置を表していて、緑色の線がそれらの移動平均線、青色の水平線が閾値である。青色の縦線が振動の始まりを検知したタイミングである。

図 7.2 は、実際に振動を検知する様子を示す一例である。パンチ位置に対して移動平均線 (緑色) を引き、それが、閾値の線 (青色) と閾値に-1 をかけた線 (青色) の間から飛び出したタイミングを振動開始時間とする。移動平均線の値は、計算に使用した最後のデータ点に対応する位置にプロットされている。この SBL の場合では、X 位置の振動がアボート 5.2 ターン前から始まり、Y 位置の振動がアボート 4.4 ターン前から始まったと求めることができる。

富士-RFSoc で記録された 117 件の SBL のデータに対して、この手法を用いて振動開始からアボートまでの振動継続時間を求め、その分布を図 7.3 に示す。D5-RFSoc で記録された 58 件のデータに対しても求め、その分布を図 7.4 に示す。富士-RFSoc、D5-RFSoc とともに大半の SBL では振動の継続時間が約 10 ターン以下であることが分かった。つまり、数十マイクロ秒から 100 マイクロ秒程度のパンチ位置振動でビームアボートが発生してしまうということである。

パンチ毎フィードバックシステムを用いた RFSoc-BOR の試験については 5.2 項で説明したが、この試験では意図的にパンチ振動を増長させる実験を行った。図 5.5 の右端ではパンチ振動を

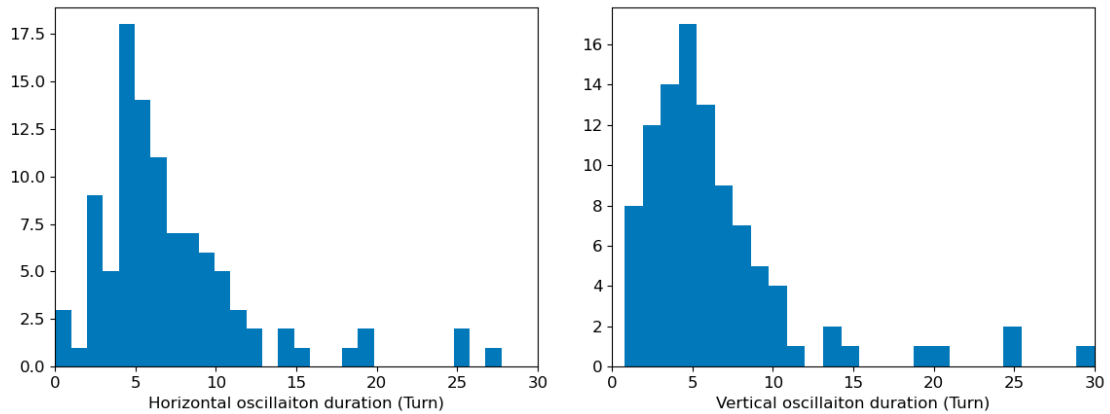


図 7.3 富士-RFSoc で記録された 117 件の SBL について、アボートまでの振動継続時間の分布を表したヒストグラム。左図が X 方向振動、右図が Y 方向振動を示し、30 ターン以下を表示している。

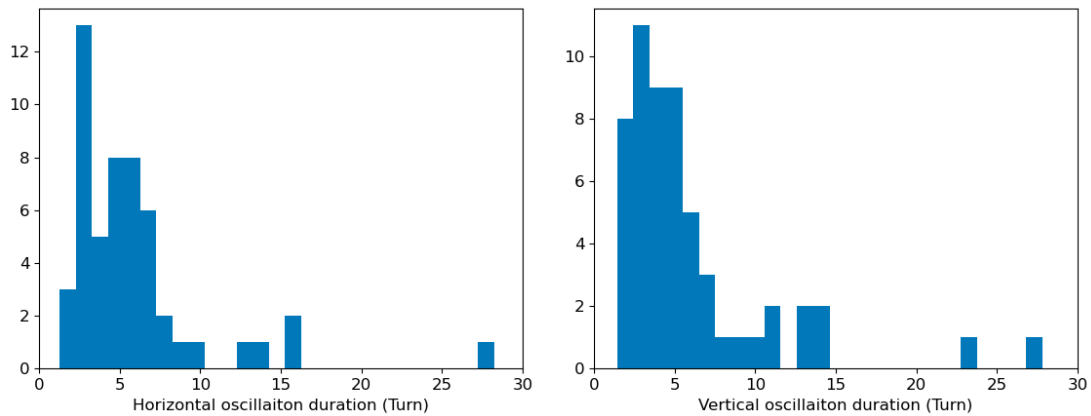


図 7.4 D5-RFSoc で記録された 58 件の SBL について、アボートまでの振動継続時間の分布を表したヒストグラム。左図が X 方向振動、右図が Y 方向振動を示し、30 ターン以下を表示している。

大きくしたことによるビームアボートが発生している。そしてこの試験でビームに与えたキックの強さは、通常運転時にフィードバックキッカーが与えるキックの強さと同程度に設定していた。つまりフィードバックキッカーを用いて不安定性を増長させても、通常運転時のフィードバックシステムの設定であれば、ビームロスが発生させてビームアボートに導くには数百マイクロ秒は必要だということである。バンチ毎フィードバックシステムの最適化不足により、バンチに対して不安定性を誘発するようなキックが加わり、SBL を引き起こすのではないかという説も検討されていたが、この観測結果からその可能性は低いということが分かる。SBL のように 100 μ s 以下でビームロスを引き起こすようなバンチ振動を発生させるには、通常運転時のフィードバックキッカーよりも遥かに強い力がビームに作用しなくてはならないと考えられる。

7.2 振幅の大きさ

次に、SBL 発生時におけるバンチ振動の大きさを調査する。図 7.5 にバンチ振動の振幅の導出方法についての概略図を示す。既に電荷損失をしているバンチは、コリメータなどでバンチの一部が削り取られていることによって電荷中心位置がシフトするため、SBL の原因となるような位置振動をそのまま反映しているわけではない。そのため、電荷損失しているバンチは振幅の計算に使用しないこととした。ここでは、記録された位置データのうち、電荷損失が始まる前の全バンチ位置の最大値から最小値を引き算した値を振幅と呼ぶことにする。電荷損失の始まるタイミングは、初めてバンチ電荷が 5% 失われたタイミングとしている。富士-RFSoc で記録した 117 件の SBL に対して振幅を計算し、図 7.6 にその分布を示す。X 方向の振幅の中央値は 0.32 mm、最頻値は 0.25 mm であった。Y 方向の振幅の中央値は 0.30 mm、最頻値は 0.29 mm であった。D5-RFSoc で記録した 58 件の SBL に対して振幅を計算し、図 7.7 にその分布を示す。X 方向の振幅の中央値は 0.22 mm、最頻値は 0.20 mm であった。Y 方向の振幅の中央値は 0.23 mm、最頻値は 0.19 mm であった。

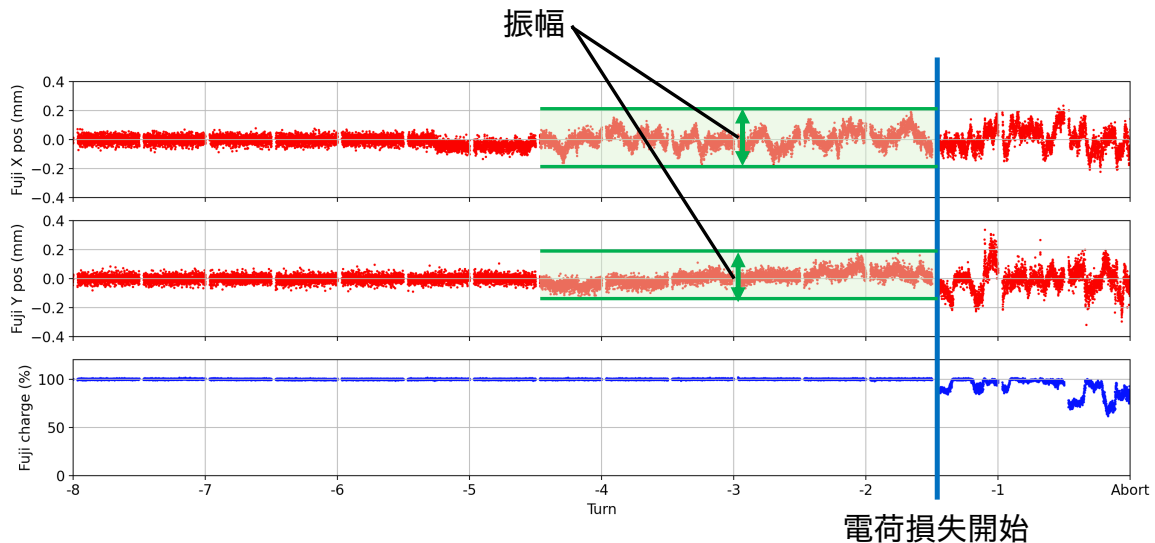


図 7.5 図 6.3(上三段) のプロットにおいて、振幅を計算する方法の概略を示す図。青色の縦線がバンチ電荷の損失が始まったタイミングで、それより前のバンチ振動の最大値と最小値の差が振幅である。

ここで、バンチ毎フィードバックシステムを用いた RFSoc-BOR の試験についてもう一度振り返る。図 5.5 によると、約 ± 0.6 mm、すなわち振幅が約 1.2 mm に達した時点で初めてビームアポートが引き起こされたことが分かる。 $\beta_y^* = 1$ mm のコリメータ開口度が狭いオブティクスであっても、この程度の振動までは許されるはずであるということが分かるが、先ほど算出した SBL 発生時の振幅はそれよりも小さい傾向にある。さらに、振幅が 1.2 mm に達するまでの数百

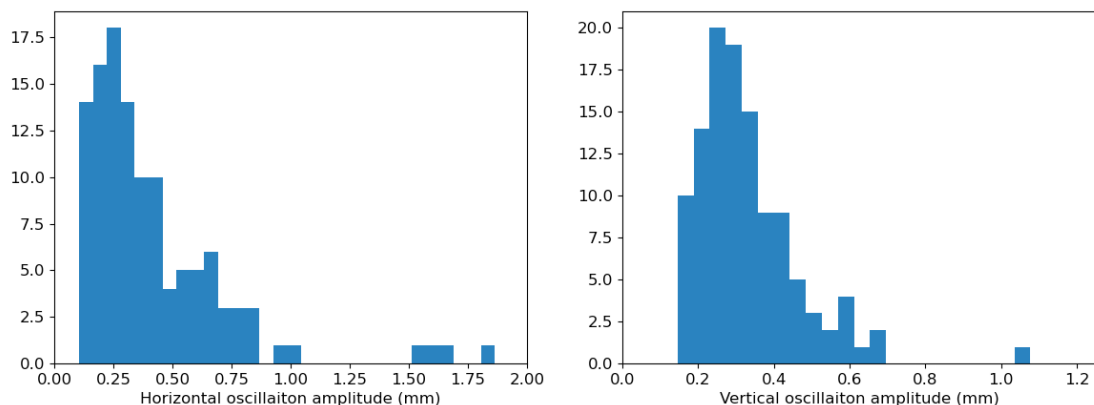


図 7.6 富士-RFSoc で記録された 117 件の SBL について、バンチ振動の振幅の分布を表した図。左図が X 方向振動、右図が Y 方向振動を示す。

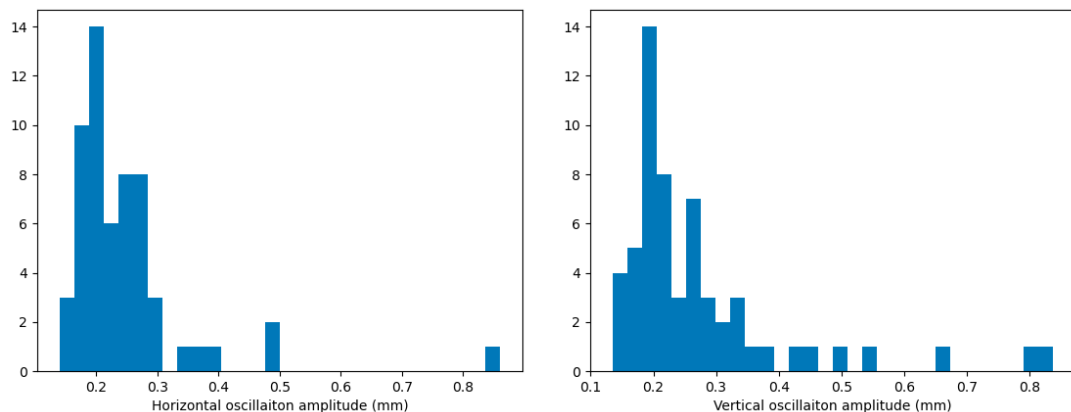


図 7.7 D5-RFSoc で記録された 58 件の SBL について、バンチ振動の振幅の分布を表した図。左図が X 方向振動、右図が Y 方向振動を示す。

マイクロ秒の間は、バンチ振動が起きながらもビームロスが発生することなく測定が継続できていた。対して、SBL 発生時にはそれよりも小さい振幅に関わらず、数十マイクロ秒で大きな電荷損失が発生し、ビームアポートされてしまうことが多い。この違いは、SBL 発生時には単純なバンチ位置の振動だけでなく、ビームサイズの増大が同時に発生し、それらの組み合わせでビームロスが発生している可能性を示唆していると考えられる。

7.3 バンチ電荷損失の発生場所

次に、富士-RFSoc と D5-RFSoc で記録したデータを組み合わせて、リング上のどこで電荷損失が発生しているのかを調査した。図 7.8 に示すように、LER を 2 台の RFSoc-BOR で二つの区間 (区間 1 と区間 2) に分割することを考える。富士-RFSoc で記録されたバンチ電荷と、そ

の直後に D5-RFSoc で記録されたバンチ電荷を比較することで、区間 1 で損失した量が分かる。D5-RFSoc で記録されたバンチ電荷と、その後富士-RFSoc に一周して帰ってきて記録されたバンチ電荷を比較すると、区間 2 で損失した量が分かる。

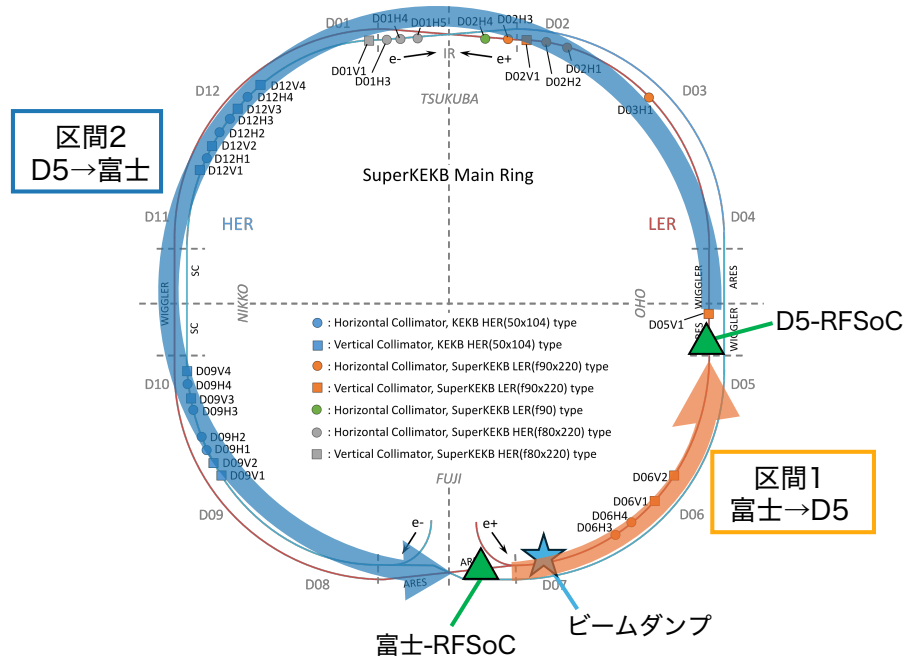


図 7.8 富士-RFSoc と D5-RFSoc でリングを二分割した様子。富士-RFSoc から D5-RFSoc までの区間 (オレンジ色の矢印) を区間 1、その後の D5-RFSoc から富士-RFSoc までの区間 (青色の矢印) を区間 2 と呼ぶことにする。

例として図 6.4 と同じ SBL 事象について 2 台の RFSoc-BOR で記録されたバンチ電荷のプロットを図 7.9 に示す。時系列順で考えると、富士-RFSoc で記録されたバンチが区間 1 を通過して D5-RFSoc に移動することは、上のプロットから下のプロットの同じ位置の点に移動することを意味する (図 7.9 内のオレンジ色矢印)。次に、D5-RFSoc で記録されたバンチが区間 2 を通過して富士-RFSoc に移動することは、下のプロットから上のプロットの 1 ターン後の位置の点に移動することを意味する (図 7.9 内の青色矢印)。そして、ビームがアポートされる直前は区間 2 を通って、最後に富士-RFSoc で記録され直後のビームダンプに入る。そのため、最後のターンでは D5-RFSoc で記録されたデータは無いため空欄になっている。上下のプロットを見比べると、区間 1 でほとんど全ての電荷の損失が発生していることが見て取れる (オレンジ色矢印の遷移をするとき電荷の値が減少する)。

この事実を見やすく理解するために、上下のプロットの引き算を行うことで、区間 1 と 2 でそれぞれどのくらい電荷損失が発生したのかを可視化したプロットを図 7.10 に示す。図 7.9 のオレンジ色矢印の遷移に関して差分を取ったものが図 7.10 のオレンジ色の点で、区間 1 での損失量を表す。これは、富士-RFSoc で記録したバンチ電荷から、D5-RFSoc で記録した同じターンのバ

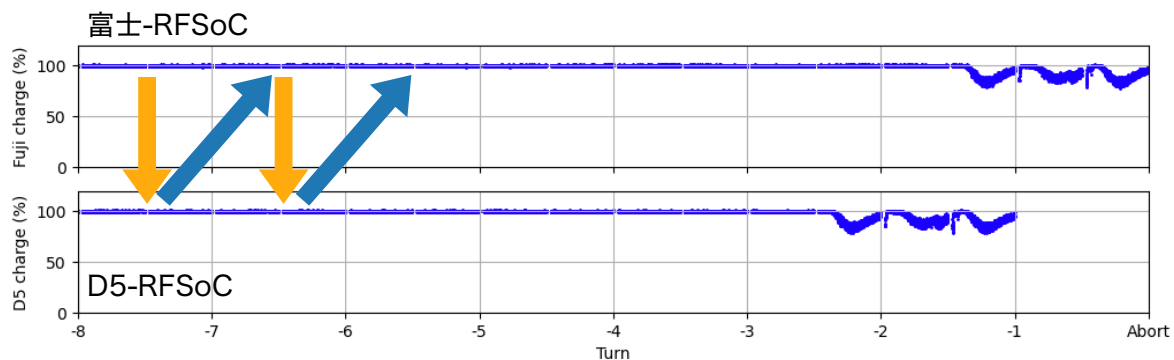


図 7.9 2024 年 10 月 28 日 02:30:07 に発生した SBL のアボートまでのバンチ電荷の推移をプロットした図。上のプロットが富士-RFSoc で記録したもので、下のプロットが D5-RFSoc で記録したものである。

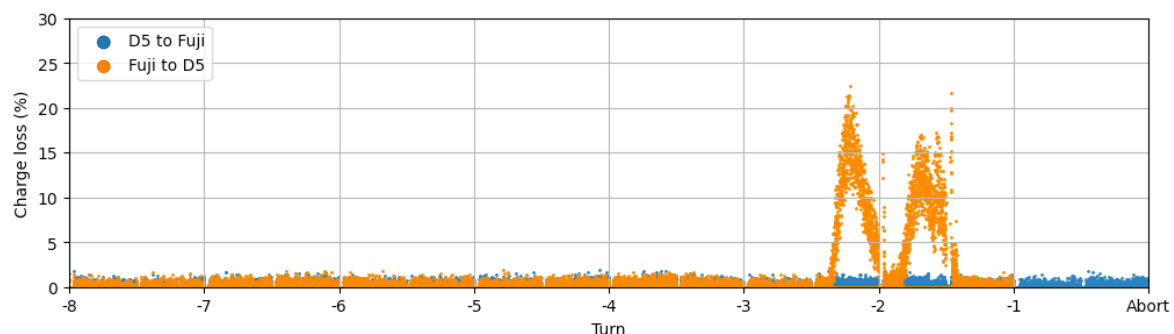


図 7.10 図 7.9 の SBL について、区間 1(この図の凡例の ‘Fuji to D5’) と区間 2(この図の凡例の ‘D5 to Fuji’) でそれぞれ発生した電荷損失量をプロットした図。区間 1 での電荷損失量については、最後の 1 ターンのデータは無い。

ンチ電荷を引き算した結果である。図 7.9 の青色矢印の遷移に関して差分を取ったものが図 7.10 の青色の点で、区間 2 での損失量を表す。これは、D5-RFSoc で記録したバンチ電荷から、富士-RFSoc で記録した次のターンのバンチ電荷を引き算した結果である。この図から、この SBL で発生した電荷損失のうちほとんど全てが区間 1 で発生したものであると分かる。具体的には区間 1 内で物理開口が狭い箇所、つまり D06 区間のコリメータにビームが当たって電荷が損失したのだと考えられる。

区間 1 と 2 での損失量を各 SBL で比較するために、全損失量に対する区間 1 での損失量の割合を定量化する。区間 1 での損失量をビームアボート 8 ターン前から 1 ターン前までの全バンチについて合計したもの (図 7.10 のオレンジ点の値の合計) と、区間 2 での損失量をビームアボート前 7 ターン分の全バンチについて合計したもの (図 7.10 の横軸 ‘-7’ から ‘Abort’ までの青い点の値の合計) を計算し、それを用いて次の量 P を計算する。

$$P = \frac{(\text{区間 1 での損失量の合計})}{(\text{区間 1 での損失量の合計}) + (\text{区間 2 での損失量の合計})} \quad (7.1)$$

図 7.11 は、この P を 58 件の SBL に対して計算し、ヒストグラムにしたものである。半分以上の電荷を区間 1 で失う事象数が全体の 100% であることが分かる。つまり、D06 区間にあるコリメータにビームが当たることによる電荷損失がほとんどを占めているということである。これはビームが D06 区間に突入する前に大きな振動、あるいはビームサイズの増大を伴っていることが多いということを意味している。

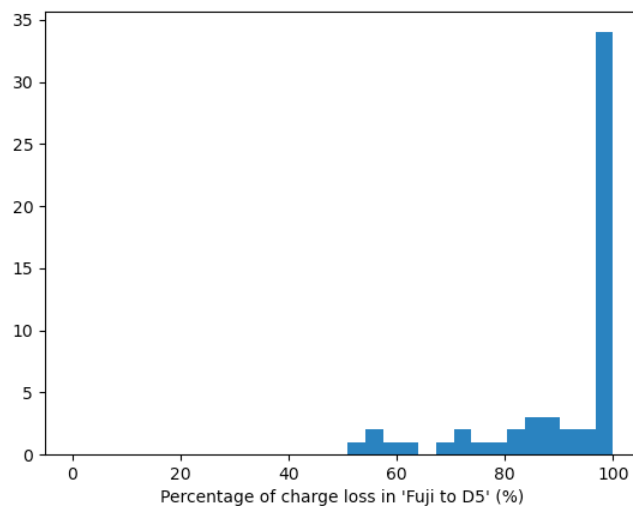


図 7.11 富士-RFSoc と D5-RFSoc で同時に記録した 58 件の SBL について、全電荷損失量に対する区間 1 での電荷損失量の割合 (式 7.1 の P) の分布

7.4 圧力バースト現象と SBL の関係

以降、複数点の RFSoc-BOR から得られる情報と、他の測定デバイスから得られる情報を組み合わせることで、どのように統合的なビーム不安定性の診断が行えるのかについて説明していく。本論文では特に圧力バースト現象に着目し、真空ゲージやロスモニターからの情報を RFSoc-BOR から得られる情報と組み合わせることで、SBL に関するさらに深い解析と考察を行った。

まず、SBL 発生と関わりが深いと疑われている圧力バースト現象について説明する。SBL 発生時には、リング上のいずれかの地点において、真空チェンバー内部の圧力が異常に増加する現象が多く観測されている。また、SBL ごとに圧力が上昇する地点も様々である。一例として図 6.3 の SBL が発生した時に、D10.L02 に設置されている真空ゲージ (CCG) で測定された真空チェンバー内の圧力推移を図 7.12 に示す。ビームがアボートされてビーム電流が 0 になった後に真空度が急激に上昇しているのが分かる。CCG の応答速度は遅いため、ビームがアボートされた後に真空度が上がっているように見えるが、実際にはアボートされるのとほぼ同時かその直前に真空度の急激な悪化が起きていると考えられている。我々はこのような現象を圧力バースト現象と呼び、

SBL の原因を探る上で重要なものと捉えている。そして一般的に、ビームロスを伴わないような安全なビームアボートの際には圧力バースト現象の発生頻度は低い。

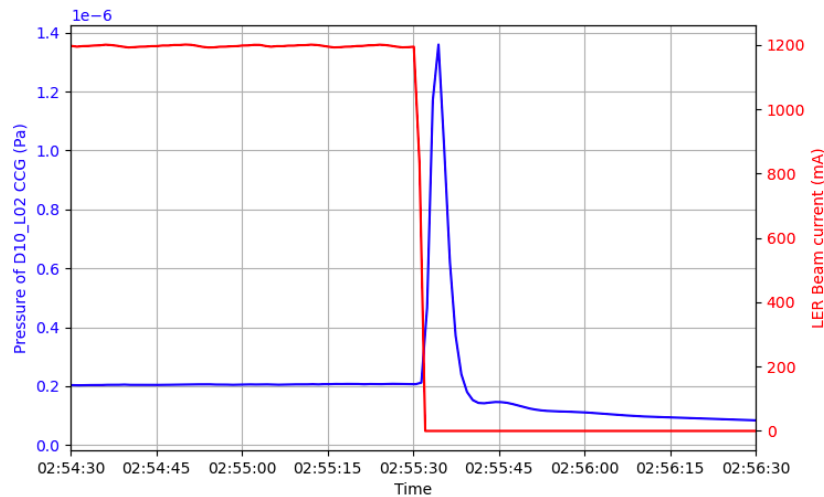


図 7.12 2024 年 10 月 28 日 2:55:30 の SBL 発生時の、LER ビーム電流 (赤) と D10.L02 に設置されている真空ゲージ (CCG) で測定された真空チェンバー内の真空度 (青)

実は LER では、2016 年に圧力バースト現象を伴うビームアボートが既に観測されていた [49, 50]。これは超伝導収束システムや Belle II 検出器を設置せず、また電子・陽電子を衝突させずに調整運転を行っていた Phase-1 と呼ばれる時期である。この Phase-1 の圧力バーストを伴うビームアボートについては、真空チェンバー上側内面に付着していたダストが落下してビームと衝突することでビームロスに繋がっているのだらうと結論づけられた。ダストがビームと衝突した時にダストが蒸発したり、発生したイオンが真空チェンバー壁面から気体を脱離させたりすることによって、圧力バーストに繋がるとされており、圧力バーストが起きた場所でダストとビームが衝突していると考えられている [49, 50]。そして真空チェンバーを人工的に叩くことで、上側内面に付着していたダストを離脱させ、Phase-1 以降はこの類のアボートの件数は減少していた。また、ビーム電流の損失が数 ms に渡ってゆっくりと進行することが観測されており、これは本論文で題材としている SBL とは大きく異なる点であった。しかし、SBL 発生時にも圧力バースト現象が発生していることから、Phase-1 に起きたアボートと SBL のメカニズムには何かしらの類似点があると考えられる。SBL 発生時にも、圧力バーストがあった地点でビームが何かしらの力を受けたり、何らかの物質との相互作用が起きていて、速いビームロスに繋がるのではないかと推測されている。

7.4.1 圧力バースト現象の発生場所とバンチ振動の関係

加速器の条件を揃えた議論のため、 $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ オプティクスで運転を行った 10 月 24 日から 11 月 23 日までに 2 台の RFSoc-BOR で記録された SBL58 件に注目する。このうち、リング上のいずれかの地点で圧力バースト現象を伴ったものは 55 件存在した。圧力バースト現象の判定については、アボートが起こる 6 分前から 4 分前の圧力値の平均値 (ビーム安定時の圧力値) に対して、ビームアボートの前後 1 分間に 20% 以上の圧力上昇があった場合に圧力バースト現象が起きたとしている。複数の場所で圧力バーストの判定が出た場合は、一番圧力の高い場所を圧力バーストの起きた場所として採用する。圧力バースト現象が起きた場所とその件数を表 7.2 に示す。これを見ると、この期間においては D10 区間での圧力バースト現象が多くを占めていることが分かる。D10 区間の中でもさまざまな場所で圧力バースト現象が起きており、特に D10.L02 と D10.L03 で起きた事象が多く、全体の 60% を占めていた。

圧力バースト現象を観測した CCG	件数
D10.L02/03	33
D10.L05	4
D10.L06	2
D10.L07	2
D10.L08	2
D02.L18	2
D06.L12	2

表 7.2 SBL 発生時に圧力バースト現象が起きた場所の名前とその件数を多い場所から順に示す。2 件以上発生した場所のみ表示している。D10.L02/03 については、隣り合った D10.L02 と D10.L03 に設置されている CCG がいつも同時に圧力バーストを検知するので、ひとまとめにしている。

7.1 項で紹介した方法で富士-RFSoc におけるビームアボートまでの振動継続時間を求め、圧力バースト現象が起きた場所ごとに分類し、ヒストグラムにしたものを図 7.13 に示す。また、D5-RFSoc についても同じヒストグラムを作り図 7.14 に示す。比較的統計が蓄積されている D10.L02/03 および D10.L05 での圧力バースト現象に着目すると、以下のことが分かる。

- 提示した 4 つのヒストグラム全てにおいて、D10.L05 での圧力バースト現象を伴う SBL (オレンジ色) は、全て振動継続時間が短い領域に集中している。
- 一方で、D10.L02/03 での圧力バースト現象を伴う SBL は全体的にそれよりも振動継続時間が長い傾向が見られる。

これらの結果から、SBL 発生時のバンチ振動と圧力バースト現象の間には関連性がある可能性が

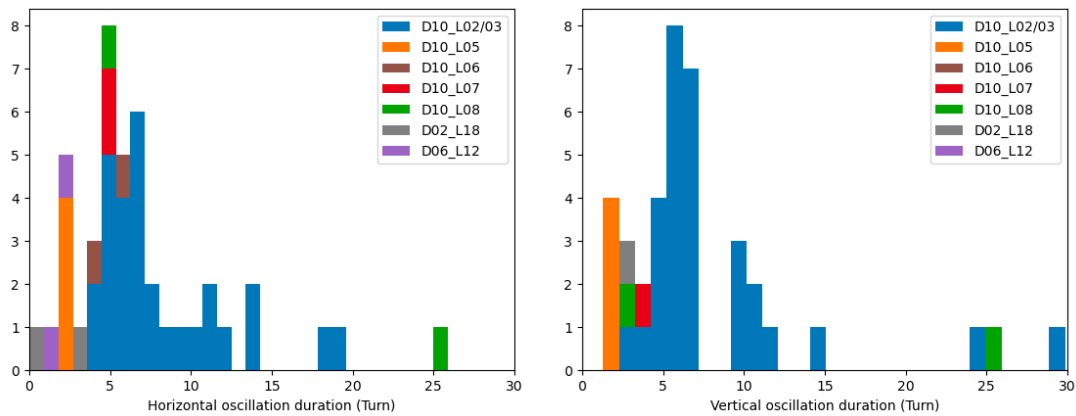


図 7.13 圧力バースト現象を伴った SBL について、富士-RFSoc で記録されたデータを基に計算した振動継続時間の分布。左図は X 方向の振動、右図は Y 方向の振動を表す。ヒストグラムの色分けは、圧力バースト現象が発生した位置に対応している。振動継続時間が 30 ターン以下のデータのみを表示していて、各色のデータをスタックしてプロットしている。

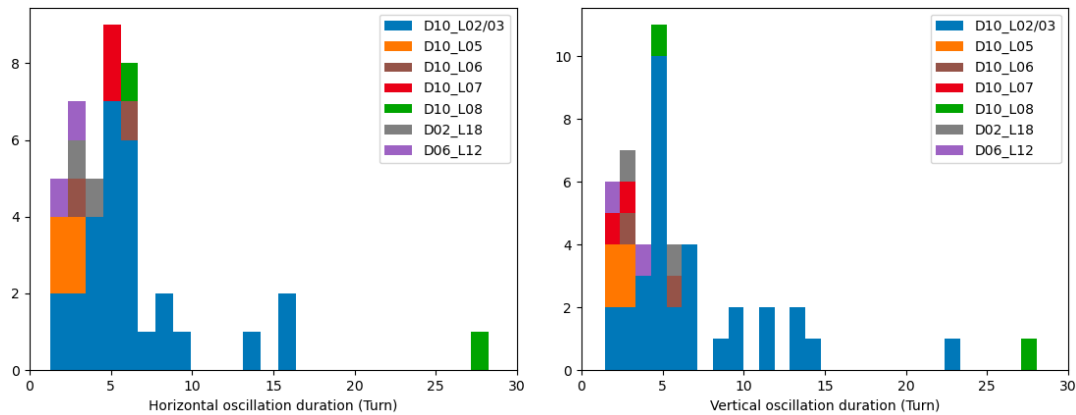


図 7.14 圧力バースト現象を伴った SBL について、D5-RFSoc で記録されたデータを基に計算した振動継続時間の分布。左図は X 方向の振動、右図は Y 方向の振動を表す。ヒストグラムの色分けは、圧力バースト現象が発生した位置に対応している。振動継続時間が 30 ターン以下のデータのみを表示していて、各色のデータをスタックしてプロットしている。

示唆される。この観察を踏まえ、圧力バーストが発生した位置ごとに SBL を分類して考察することで、新たな知見が得られるのではないかと考えた。以下、D10.L02/03、D10.L05 と、それに加えて統計は少ないが D10.L08 の三つの場所での圧力バースト現象を伴った SBL について分類し考察する。

7.4.2 D10.L02/03 での圧力バースト現象

D10.L02 と D10.L03 は SBL に付随する圧力バースト現象が最も多く観測された場所である。また、隣り合う D10.L02 と D10.L03 で常に同時に圧力バースト現象が検知されるのが特徴である。このことから、これら二つに挟まれた地点で圧力バースト現象が起き、その圧力が伝播してい

くことで二つの真空ゲージで観測されていると考えられる。もし D10.L02 に近い場所で圧力バースト現象が起きていれば D10.L02 で観測される圧力の方が D10.L03 よりも大きくなると予想され、逆も然りである。よって、D10.L02 と D10.L03 で観測された圧力の大きさに内分点を取れば、圧力バースト現象が発生している地点を特定できるのではないかと考えた。先ほど紹介した Phase-1 に発生していた圧力バースト現象の解析でも、真空ゲージの場所とその圧力値をもとに圧力バースト現象の発生地点を推定することが行われていた [49]。図 7.15 に D10.L02 と D10.L03 二つの真空ゲージで観測された圧力値の内分点を求めた結果の分布 (上図) と、これら二つの CCG 付近のベータ関数・分散関数 (下図) を示す。

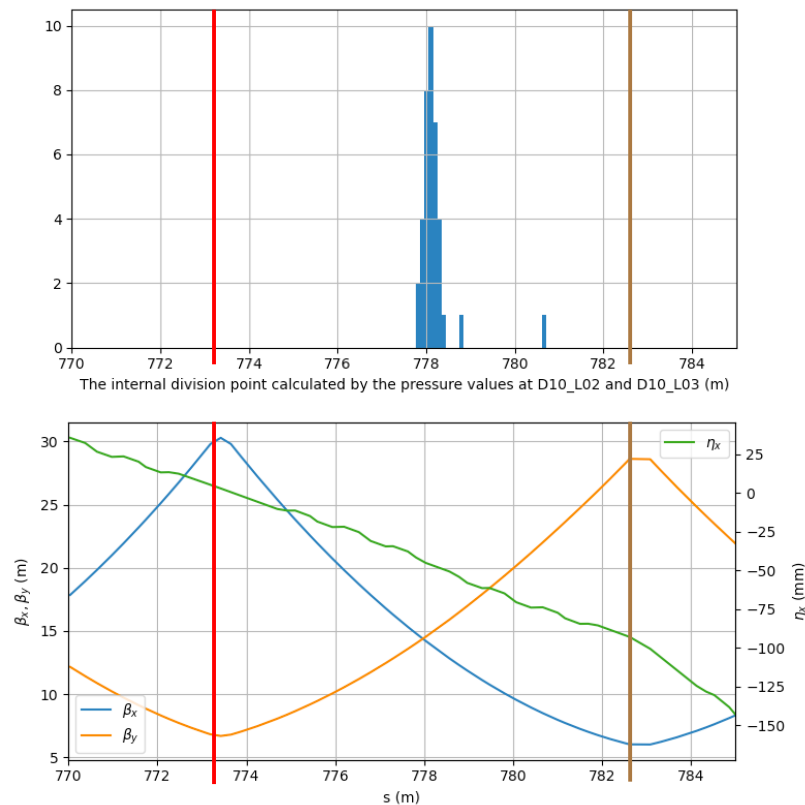


図 7.15 (上図) D10.L02 と D10.L03 で観測された圧力値を用いて内分点を計算することで求めた圧力バースト現象の発生場所の推定点分布。横軸は衝突点からの距離で、赤い縦線が D10.L02 の位置、茶色の縦線が D10.L03 の位置を示す。(下図) D10.L02 と D10.L03 付近のベータ関数と分散関数。左側の縦軸がベータ関数、右側の縦軸が水平方向分散関数を表す。横軸は上図と揃っている

これを見ると、圧力バースト現象の発生点として推定される場所は、D10.L02 と D10.L03 のほぼ中間地点であることが分かる。ここでビームが他の物質と相互作用を起こしたり横方向キック力を受けたりしている可能性が高い。ここには二つの真空チェンバー接続し、真空チェンバーの熱収縮を吸収するペローズチェンバーと呼ばれるチェンバーが取り付けられている。このペローズチェンバーが Phase-1 の時のようにダストを生み出し、SBL が発生しているのではないかと考えられたため、2024 年 11 月 6 日にこのペローズチェンバーを新品へ交換する作業が行われた。

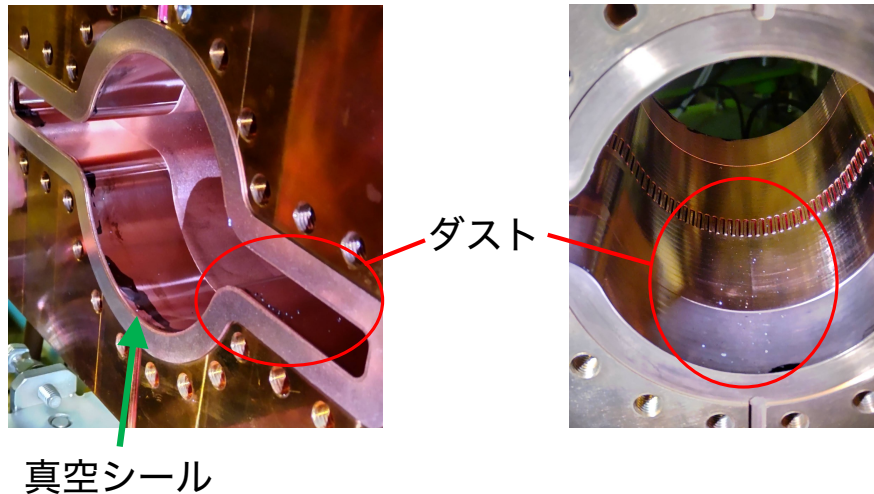


図 7.16 D10.L02 と D10.L03 の中間地点にあるベローズチェンバーを交換した際に撮影された写真 [51]。チェンバー内にダスト (赤い丸) や真空シールの染み出し (緑矢印で示された黒い物体) が見られる。

交換時に撮影されたベローズチェンバーの写真を図 7.16 に示す。ダストや真空シールの染み出しがチェンバー内に溜まっていることが確認され、Phase-1 でのビームアポートと同様に、これらの物質がビームと衝突したり相互作用したりしていたのではないかと考えられる。そして交換の結果、交換前は D10.L02/03 での圧力バースト現象を伴う SBL が 1 日あたり平均して 2.8 回発生していたが、交換後は一か月運転しても合計 1 回しか発生しなかった。このことは、圧力バースト現象が発生している地点近くに SBL の原因があることを強く示唆しており、その地点でビームが力を受けることによって SBL につながるような振動が発生しているのではないかと考えられる。

D10.L02/03 での圧力バースト現象を伴った SBL を RFSoc-BOR で観測した結果の典型的な一例を図 7.17 に示す。この図の読み取り方は図 7.9 と基本的に同じで、富士-RFSoc のプロット (上三段) から D5-RFSoc のプロット (下三段) へ下向きに遷移することが図 7.8 の区間 1 を移動することに対応する (オレンジ色の矢印)。この SBL においては、富士-RFSoc の X 位置で一番最初に振動が見え始め、その後 D5-RFSoc の X 位置、富士-RFSoc の Y 位置、D5-RFSoc の Y 位置という順番で振動が開始したことが分かる。もし D10 区間でビームが力を受けて振動を開始した場合、その振動は下流の富士-RFSoc を通過し、区間 1 を経由して D5-RFSoc に到達するため、理論的には富士-RFSoc と D5-RFSoc の両方について、このプロット上の同じタイミングで振動開始が観測されるはずである。しかし、実際には振動が開始する場所のベータatron位相などの条件によって、各 RFSoc-BOR 設置箇所で見ることのできる振動の大きさは変化する。このため、振動が見えにくい条件では振動を検知できない場合があり、振動開始時間の検知が遅れる。このような傾向を利用し、振動開始時間に着目して以下考察していく。

RFSoc-BOR で観測された 33 件の D10.L02/03 での圧力バースト現象を伴う SBL に対して、

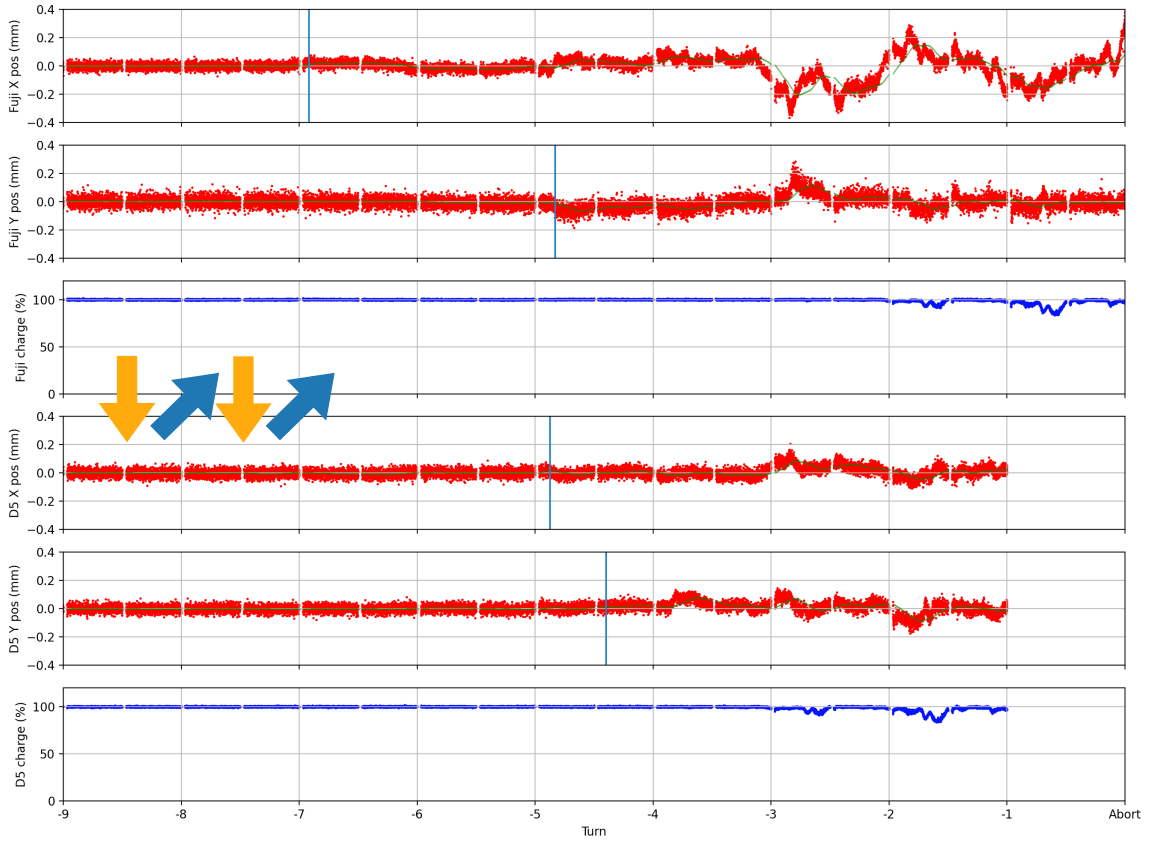


図 7.17 2024 年 11 月 3 日 3:58:26 に発生した D10.L02/03 での圧力バースト現象を伴う SBL の観測結果。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は 0.45 mA であった。上から順に富士-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷で、その下が D5-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷である。位置のプロットにある青色の縦線は振動の始まりを検知したタイミングである。位置のプロットには緑色で移動平均線も描画している。

富士-RFSoc の X 位置・Y 位置、D5-RFSoc の X 位置・Y 位置のうちどれが一番早く振動を開始したのかを判定し、件数を数えた結果を図 7.18 に示す。おおよそ、D5-RFSoc よりも富士-RFSoc の方が早く振動が始まる傾向があることが分かる。

なぜこのような傾向が見られるのかを考察する。先ほど述べた通り、D10.L02 と D10.L03 の中間地点でビームが力を受けているのではないかと考えられる。ここで、バンチがある地点 1 でキックを受け、そのバンチ位置を下流の地点 2 で観測するとき、地点 2 で観測されるバンチ位置は次の式で表される。

$$y_2 = \sqrt{\beta_{y1}\beta_{y2}} \sin \Psi_{12} \Delta y'_1 \quad (7.2)$$

この式は Y 方向振動を想定していて、 y_2 は地点 2 のバンチ位置、 β_{y1}, β_{y2} は地点 1 と 2 のベータ関数、 Ψ_{12} は地点 1 と 2 の間のベータatron位相差、 $\Delta y'_1$ は地点 1 で受けたキックアングル (キックの強さ) である。X 方向振動についても同じことが言える。この式から、バンチがキックを受けた位置と観測位置のベータatron位相差が π の半整数倍の時 ($\sin \Psi_{12} \sim 1$) に振動が大きく見

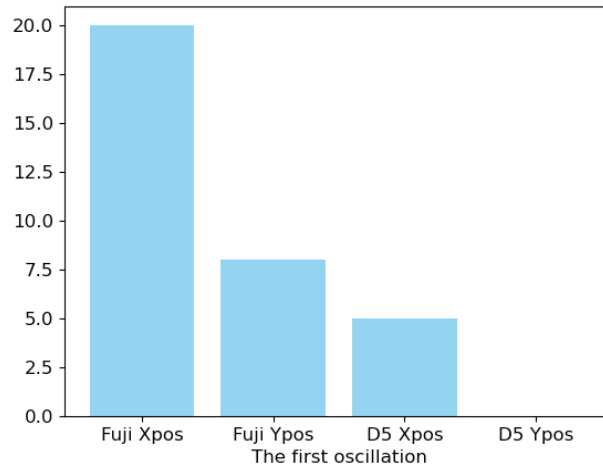


図 7.18 D10.L02/03 での圧力バースト現象を伴う SBL について、各観測地点での振動開始時間を比較し、富士-RFSoc の X 位置、Y 位置、D5-RFSoc の X 位置、Y 位置のいずれが最も早く振動を開始したかをカウントした結果

え、 π の整数倍の時 ($\sin \Psi_{12} \sim 0$) に小さく見えるということが分かる。D10.L02 と D10.L03 の中間地点を基準とした時の、富士-RFSoc と D5-RFSoc のベータatron位相を表 7.3 に整理した。D10.L02 と D10.L03 の中間地点と富士-RFSoc 間のベータatron位相差は、X・Y 方向ともに π の半整数倍に近いことが分かる。逆に、D10.L02 と D10.L03 の中間地点と D5-RFSoc 間のベータatron位相差は、X・Y 方向ともに π の整数倍に近い。よって、D10.L02 と D10.L03 の中間地点でバンチがキックを受ければ富士-RFSoc で真っ先に見える可能性が高いと考えられ、D5-RFSoc よりも富士-RFSoc の方が早く振動が始まる傾向があるという観測結果に合致する。

	D10.L02 と D10.L03 の中間地点		
		富士-RFSoc	D5-RFSoc
X 方向のベータatron位相 (rad/ π)	0	21.40	40.89
Y 方向のベータatron位相 (rad/ π)	0	22.56	42.93

表 7.3 D10.L02 と D10.L03 の中間地点を基準とした時の富士-RFSoc と D5-RFSoc 設置場所のベータatron位相

さらに、図 7.18 によると、Y 方向の振動よりも X 方向の振動の方が早く始まる傾向があることも分かる。先ほど、D10.L02 と D10.L03 の中間地点を基準としたベータatron位相を見た時、富士-RFSoc においては X・Y 方向ともに π の半整数倍に近く、D5-RFSoc 間においては X・Y 方向ともに π の整数倍に近いと説明した。このことから、もしビームが X と Y 方向に同じようなキックを受けているとすれば、同じ RFSoc-BOR において X 方向と Y 方向の振動の見え方を比べた時に、それがベータatron位相差によって大きく変わることは無さそうだと考えられる。また、式 7.2 によると、キックを受ける地点でのベータ関数が大きければ、振動も大きくなることが

分かる。しかし、図 7.15(下図) に示されるように、D10.L02 と D10.L03 の中間地点では X 方向と Y 方向のベータ関数がほぼ等しい。このため、ビームが X と Y 方向に同じようなキックを受けているとすれば、X 方向と Y 方向にベータ関数が与える影響は等しいと考えられる。以上を踏まえると、Y 方向よりも X 方向の振動が早期に開始する傾向は、ベータ関数やベータatron位相差が原因ではなく、この地点におけるキックの性質に起因している可能性が示唆される。具体的には、D10.L02 と D10.L03 の中間地点で発生するキックは初期段階において X 方向のキックから始まる性質を持つのではないかと推察される。

また、分散関数による影響もあるのではないかと考えられる。図 7.15(下図) に示されるように、D10.L02 と D10.L03 の中間地点では水平方向の分散関数が 0 ではない。このような場所でビームがダストと衝突して運動量を急激に失う場合、X 方向の振動を引き起こす可能性がある。実際、Phase-1 における圧力バースト現象を伴うビームアボート時には、ビームがエネルギーを失うことによるビームフェーズの振動が観測されている [49]。この現象に類似して、SBL 発生時にもダストとビームの相互作用によってビームの運動量が低下し、それが X 方向振動の発生要因となる可能性は十分に考えられる。ビームが進行方向に対して垂直な力を受けるよりも先に進行方向の力を受けるという順序の場合、分散関数の影響により、X 方向の振動が Y 方向の振動よりも先に発生する可能性があると考えられる。

7.4.3 D10.L05 での圧力バースト現象

アボートまでの振動継続時間が非常に短いことが D10.L05 で圧力バースト現象が起きた時の特徴であった。D10.L05 での圧力バースト現象を伴った SBL の一例を図 7.19 に示す。この図の読み取り方は図 7.17 と基本的に同じで、富士-RFSoc のプロット (上三段) から D5-RFSoc のプロット (最下段) へ下向きに遷移することが図 7.8 の区間 1 を移動することに対応する (オレンジ色の矢印)。D5-RFSoc では電荷損失が起こるまでバンチ振動が検知されなかったため、位置のプロットは省いている。

これを見ると、富士-RFSoc で X 方向振動が始まったタイミングと、D5-RFSoc で電荷損失が検知されたタイミングがほぼ同時であることが分かる。これは富士-RFSoc を通過した段階で振動を開始していたバンチは、区間 1 を通過し D5-RFSoc に到着した時には既に電荷を失っているということである。また、富士-RFSoc で振動を開始した時点では、バンチ電荷はまだ 100% であるため、この損失は D06 区間で発生している。振動を開始してからリングを 1 ターンも周回することなく D06 区間のコリメータにバンチが当たるのだと考えられ、ロスモニターによってビームロスが検知されるまでの時間が早く、図 7.13 や図 7.14 に示すように振動継続時間が短くなっていると考えられる。

図 7.20、図 7.21、図 7.22 に D10.L05 での圧力バースト現象を伴った他の 3 件の SBL の観測結

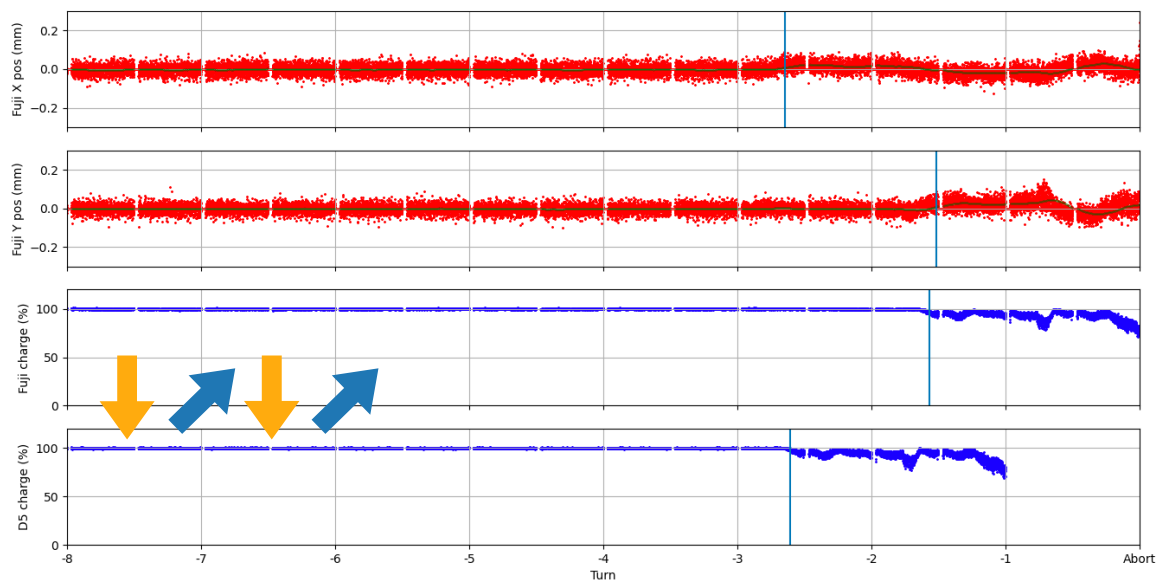


図 7.19 2024 年 10 月 29 日 19:49:12 に発生した D10.L05 での圧力バースト現象を伴う SBL の観測結果。発生時のパンチ数は 2346、平均パンチ電流は 0.51 mA であった。上から順に富士-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、パンチ電荷で、一番下の段が D5-RFSoc で記録されたパンチ電荷である。各プロットにある青色の縦線は振動、電荷損失の始まりを検知したタイミングである。パンチ電荷の損失に関しては、初めて電荷が 5% 減少したタイミングを採用している。

果を示す。図の読み取り方は図 7.19 と全く同じである。これらの図を見比べると、富士-RFSoc と D5-RFSoc での振動・電荷損失の始まるタイミングの関係性が全ての事象で類似していることが分かる。この結果は、圧力バースト現象、そしてそれが起きる場所と SBL の関係性の深さを示唆している。D10.L05 での圧力バースト現象を伴う SBL は、富士-RFSoc で振動の始まりを捉えた後、その振動を始めたパンチが直後の D06 区間のコリメータに当たり電荷損失する、という流れで進行することがこれらの結果から推察できる。

なぜこのような流れで進行するのかを考察する。まず、D06 区間にはコリメータが 4 つ設けられているが、どのコリメータに最初に当たっているのかをロスモニターの情報をもとに判別する。メインリングには、2.3.2 項で紹介したようなビームアポート用のロスモニターとは別に、SBL の観測専用の応答速度の速いロスモニターが各コリメータ付近に設置されている [52]。これらのロスモニターは、SBL 発生時にリング上のどこでビームロスが発生し、どのような順序で進行するのかを詳細に調査するために導入されたものである。CsI 結晶と光電子増倍管 (PMT) を組み合わせたロスモニターが D02V1 と D06V2 コリメータに、Electron Multiplier Tube (EMT) を用いたロスモニターが D06H3, D06H4, D06V1, D05V1, D03H1 コリメータに設置されている。例として図 7.19 の SBL 発生時に、各コリメータに設置されたロスモニターでどのような波形が記録されたのかを示すプロットを図 7.23 に示す。青色の点線で描いたターン数が図 7.19 の横軸で示しているターン数とタイミングが一致している。この図によれば、D06V1 コリメータに設置さ

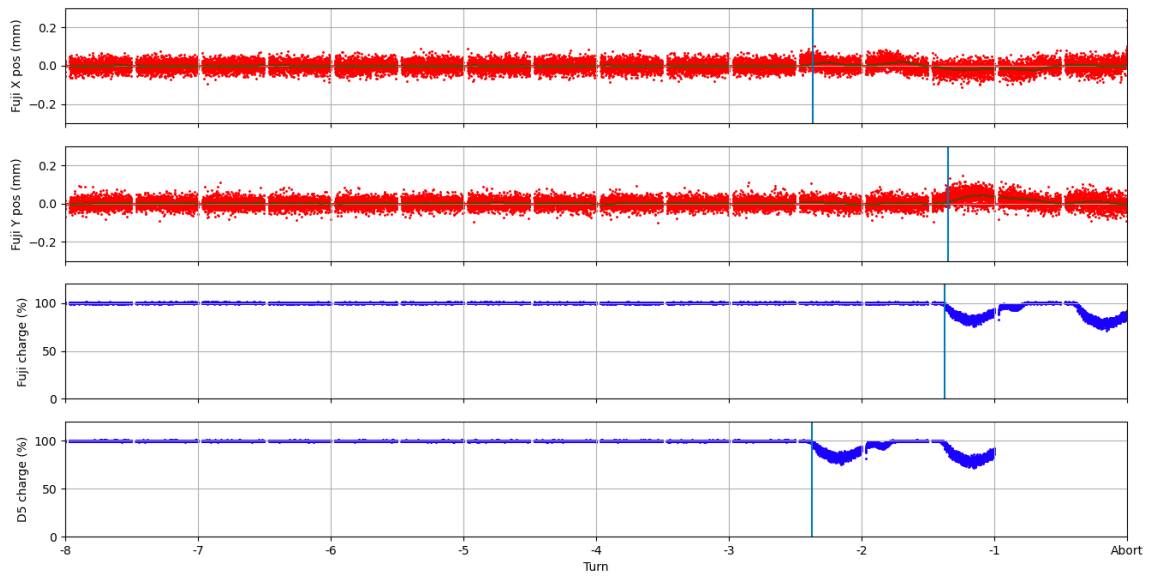


図 7.20 2024 年 10 月 27 日 21:28:33 に発生した D10_L05 での圧力バースト現象を伴う SBL の観測結果。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は 0.49 mA であった。

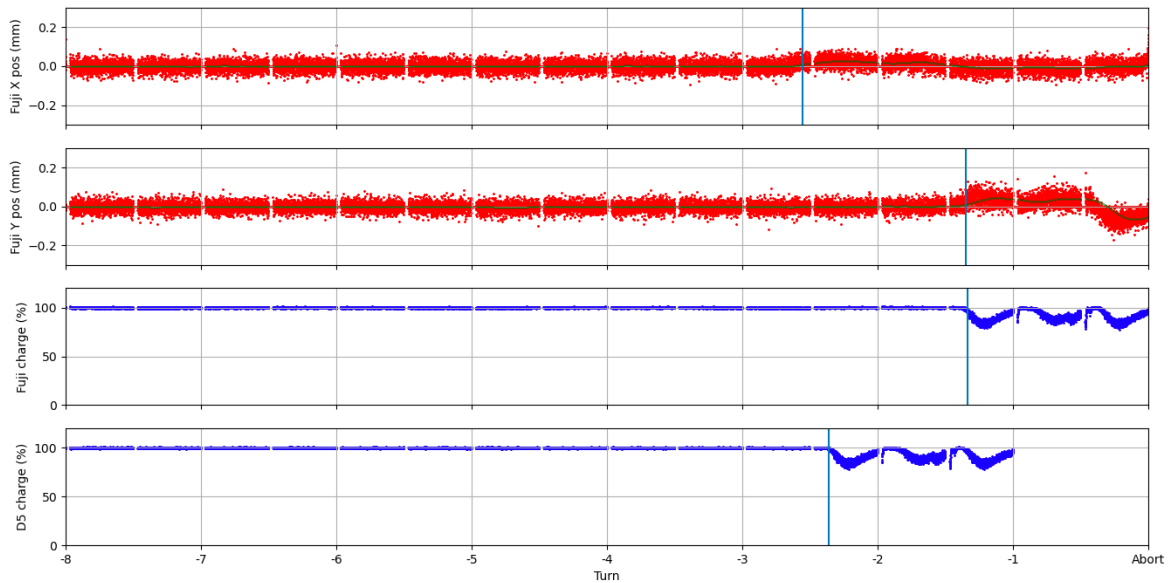


図 7.21 2024 年 10 月 28 日 02:30:07 に発生した D10_L05 での圧力バースト現象を伴う SBL の観測結果。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は約 0.50 mA であった。

れたロスモニターが一番早くビームロスによる放射線を検知していることが分かる。そしてそれはアボートの約 2.5 ターン前であり、図 7.19 と照らし合わせれば、富士-RFSoc にて X 方向振動が始まったタイミングの直後になる。よって、富士-RFSoc で振動し始めたバンチが、その後の D06 区間の初めての垂直コリメータである D06V1 に当たっているということが分かる。D06V1 コリメータの前には二つの水平コリメータ (D06H3 と D06H4) があるが、これらに設置されたロスモニターがビームロスを検知するのは次のターン以降になっている。この結果は他の 3 件の

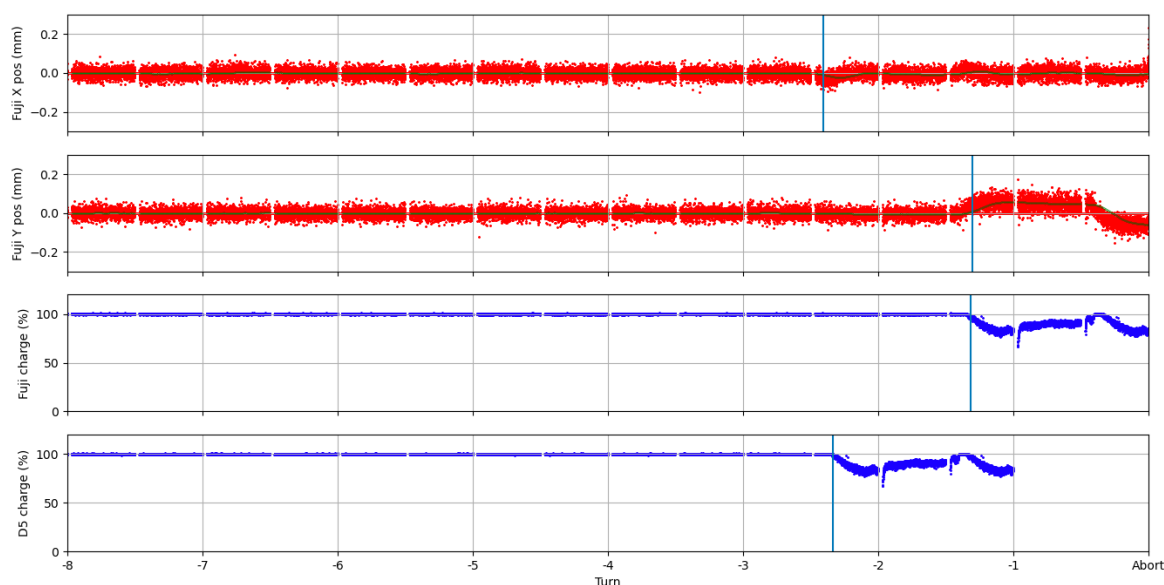


図 7.22 2024 年 10 月 30 日 02:30:10 に発生した D10.L05 での圧力バースト現象を伴う SBL の観測結果。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は約 0.55 mA であった。

D10.L05 での圧力バーストを伴う SBL でも同じであった。この事実から、X 方向の振動が開始すると同時に Y 方向の振動も開始していて、Y 方向振動が最初のビームロスを引き起こすのだと考えられる。しかし、富士-RFSoc で記録されたバンチ位置を見ると、X 方向振動が先に始まり、Y 方向振動はその 1 ターン後に始まるように見えている。その理由を次に考察する。

	D10.L05	富士-RFSoc	D06V1 コリメータ
X 方向のベータトロン位相 (rad/ π)	0	20.73	31.23
Y 方向のベータトロン位相 (rad/ π)	0	22.01	33.44

表 7.4 D10.L05 を基準とした時の富士-RFSoc と D06V1 コリメータの設置場所のベータトロン位相

D10.L05 で圧力バースト現象が起きたということは、D10.L05 付近でバンチが何らかの力を受けたのではないかと考えられる。表 7.4 に D10.L05 を基準とした富士-RFSoc と D06V1 コリメータのベータトロン位相を示す。D10.L05 と富士-RFSoc が設置されている場所の間の位相差は Y 方向に関してはほぼ π の整数倍になっていることから、D10.L05 でバンチがキックを受けても Y 方向振動を富士-RFSoc ではほとんど見ることはできない。これが先ほど X 方向振動の始まりしか見ることができなかった理由である。そして、D10.L05 と D06V1 コリメータは Y 方向のベータトロン位相差が π の半整数倍に近い。これはコリメータがある箇所では振動が大きくなることを意味していて、バンチが D06V1 コリメータに最初に当たるという事実と矛盾しない。

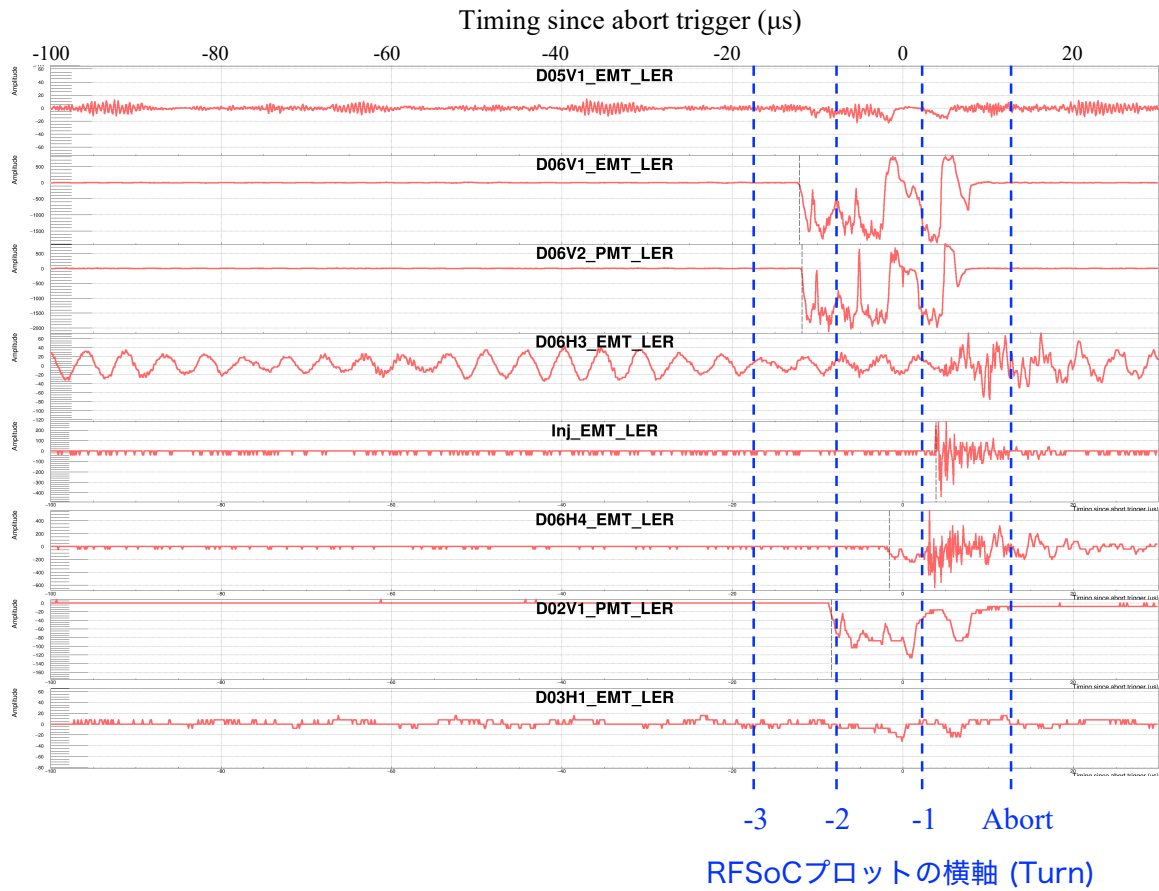


図 7.23 2024 年 10 月 29 日 19:49:12 の SBL 発生時のロスモニター波形のプロット。それぞれのプロットは各コリメータ付近に設置された PMT や EMT の波形を示していて、ビームロスによる放射線を感じると波形が大きくなる。横軸は中央制御室からアボートキックカートリガーが発報されたタイミングを 0 とした時間を表し、各地点に置かれたロスモニターのタイミングを合わせている。分かりやすくするために、青色の点線で図 7.19 の横軸と同じタイミングを表す線を記した。[53]

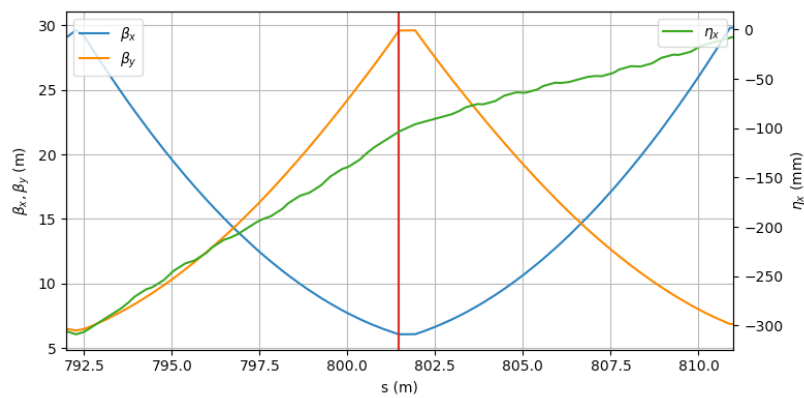


図 7.24 D10.L05 付近のベータ関数と分散関数。横軸は衝突点からの距離で、左側の縦軸がベータ関数、右側の縦軸が水平方向分散関数を表す。赤色の縦線が D10.L05 の場所を表している。

次に、D10.L05 付近のベータ関数について整理する。図 7.24 に D10.L05 付近のベータ関数と分散関数を示す。D10.L05 にはちょうど Y 方向に収束する向きの四重極磁石が置かれていて、Y 方向のベータ関数が極大となる場所になっている。式 7.2 によると、キックを受ける場所のベータ関数が大きければ、観測される振動も大きくなる。よって、D10.L05 でバンチがキックを受ければ、それは Y 方向振動に大きく影響するということが分かり、これがすぐに垂直コリメータに当たって電荷損失してしまう理由の一つになっているのではないかと考えられる。

7.4.4 D10.L08 での圧力バースト現象

図 7.25 と図 7.26 に D10.L08 での圧力バースト現象を伴う 2 件の SBL の観測結果を示す。図の読み取り方は図 7.17 と全く同じである。図 7.25 の SBL については、振動が D5-RFSoc の X 位置、Y 位置、富士-RFSoc の X 位置、Y 位置という順番で開始している。図 7.26 の SBL については、最初に D5-RFSoc の X・Y 位置の振動がほぼ同時に始まり、その後富士-RFSoc の Y 位置、X 位置の振動が開始している。よってこれら 2 件とも、X・Y 方向どちらの振動も D5-RFSoc の方が早く始まったように見えている。

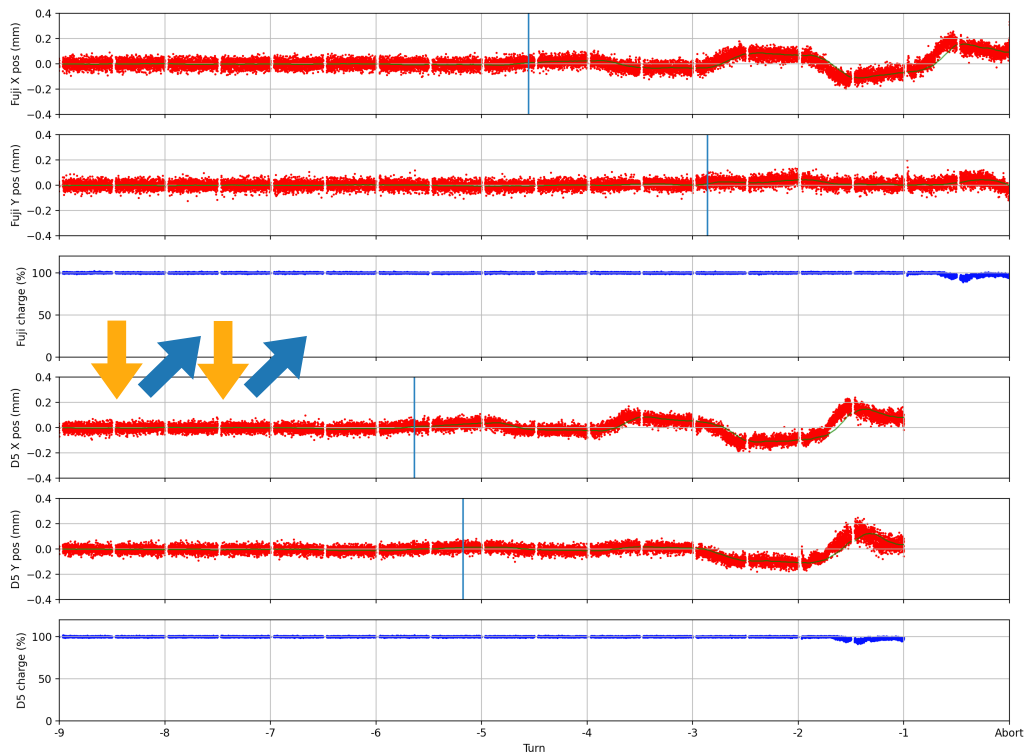


図 7.25 2024 年 10 月 27 日 13:43:55 に発生した D10.L08 での圧力バースト現象を伴う SBL の観測結果。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は 0.45 mA であった。上から順に富士-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷で、その下が D5-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷である。アボート 9 ターン前からの情報をプロットしており、位置のプロットにある青色の縦線は振動の始まりを検知したタイミングである。

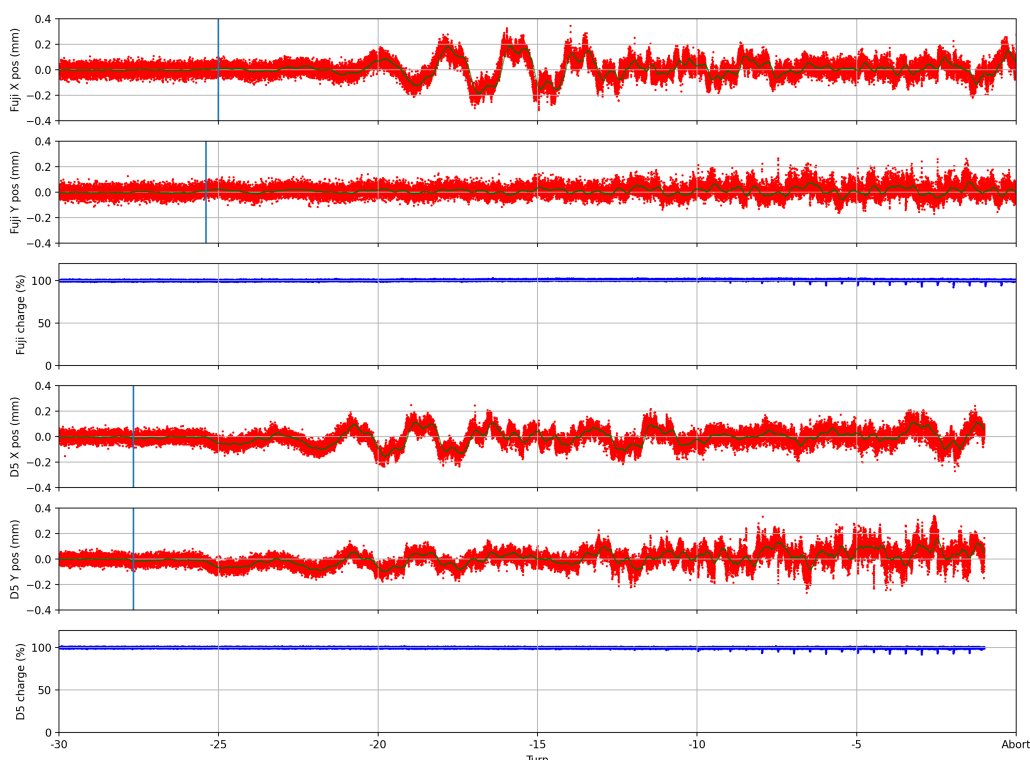


図 7.26 2024 年 10 月 27 日 15:10:13 に発生した D10.L08 での圧力バースト現象を伴う SBL の観測結果。発生時のバンチ数は 2346、平均バンチ電流は 0.43 mA であった。上から順に富士-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷で、その下が D5-RFSoc で記録された X 位置、Y 位置、バンチ電荷である。アボート 30 ターン前からの情報をプロットしており、位置のプロットにある青色の縦線は振動の始まりを検知したタイミングである。

D10.L08 を基準とした時の各 RFSoc-BOR のベータatron位相を表 7.5 に整理した。D10.L08 と富士-RFSoc のベータatron位相差は X 方向については π の整数倍に近くなっている、逆に D10.L08 と D5-RFSoc の間では π の半整数倍に近くなっている。よって、D10.L08 でビームが力を受けたとすると、それが生み出す X 方向振動は富士-RFSoc では見えづらく、まず D5-RFSoc で検知されやすいと考えられる。これは先ほど述べた D5-RFSoc の方が振動が早く始まるように見えるという事実と合致する。しかし、Y 方向振動に関しては、ベータatron位相差を見ても、富士-RFSoc と D5-RFSoc のどちらも極端に π の整数倍や半整数倍に近いということは無かった。表 6.1 に示すように、富士-RFSoc 設置場所と D5-RFSoc 設置場所での垂直方向ベータ関数を比較すると、D5-RFSoc 設置場所での垂直方向ベータ関数の方が大きい。式 7.2 によると、観測点でのベータ関数が大きければ振動も大きく見えるため、D5-RFSoc の方が Y 方向振動を捉えやすく、検知が早くなったのではないかと考えられる。

次に、図 7.27 に D10.L08 付近のベータ関数と分散関数を示す。D10.L08 は水平方向ベータ関数が極大となる場所であるため、そこでビームが力を受ければ Y 方向よりも X 方向に強く振動を引き起こす。メインリングは X 方向よりも Y 方向の開口が狭くなっているため、Y 方向の振動や

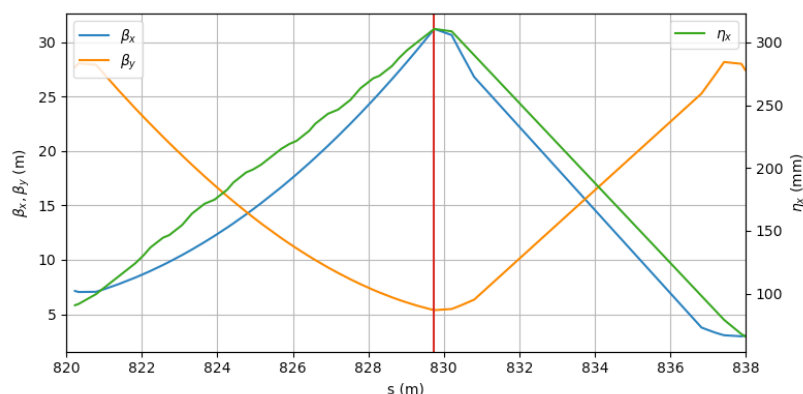


図 7.27 D10.L08 付近のベータ関数と水平方向分散関数。横軸は衝突点からの距離を表している。左側の縦軸がベータ関数、右側の縦軸が水平方向分散関数を表す。赤色の縦線が D10.L08 の場所を表している。

	D10.L08	富士-RFSoc	D5-RFSoc
X 方向のベータatron位相 (rad/π)	0	20.03	39.52
Y 方向のベータatron位相 (rad/π)	0	21.24	41.71

表 7.5 D10.L08 を基準とした時の富士-RFSoc と D5-RFSoc の設置場所のベータatron位相

ビームサイズ増大がロスに直結しやすい。先ほどの D10.L05 とは対照的な状況で X 方向に振動がつきやすいことによって、ビームロスするまで比較的長く振動が継続するのだと考えられる。

7.4.5 圧力バースト現象についてのまとめ

D10.L02/03、D10.L05、D10.L08 での圧力バースト現象を伴う SBL について、それぞれの振動の始まり方に着目しながら考察した。

D10.L02/03 で圧力バーストが見えている時は、そのちょうど中間地点で圧力バースト現象が起きて、その波及が見えていると考えられる。D10.L02/03 の中間地点でビームが力を受けて振動を開始すると、ベータatron位相の関係から D5-RFSoc よりも富士-RFSocの方が振動が見えやすい。これは、富士-RFSocの方がD5-RFSocよりも振動の始まりを検知するのが早い傾向があるという観測結果と合致していた。また、X 方向振動の方が Y 方向振動よりも早く始まる傾向が見られ、これはビームが受ける力の詳細を反映しているとも考えられるし、水平方向分散関数が影響している可能性もあるのではないかと考えられる。この地点では、次に述べる D10.L05 と比べて Y 方向ベータ関数が小さく、開口が狭い Y 方向に振動があまり付きにくいことによって、アポートまでの振動継続時間が長い傾向にあると考えられる。

D10.L05 で圧力バーストが起きた SBL は、振動の開始からアポートまでが非常に短い。それは D10.L05 でビームが力を受けて振動を開始した後、リングを一周もできずに D06 区間のコリメー

タに当たるからである。D10.L05 は Y 方向ベータ関数が高いことと、D10.L05 と D06V1 コリメータの間のベータatron位相差が π の半整数倍に近いことが理由で、D06V1 コリメータに最初にビームが当たると考えられる。この事実はロスモニターによる観測結果とも合致していた。

D10.L08 での圧力バースト現象を伴う SBL では、X 方向振動、Y 方向振動ともに富士-RFSoc よりも D5-RFSoc の方が早く振動の開始を検知していた。X 方向振動に関しては、ベータatron位相の関係から、富士-RFSoc よりも D5-RFSoc の方が振動が見えやすいためであると考えられる。Y 方向振動については、ベータatron位相の関係上はどちらの方が極端に振動が見えやすいという事は無いが、D5-RFSoc 設置場所の Y 方向ベータ関数が高いことによって D5-RFSoc の方が振動を捉えやすいことが原因だと考えられる。また、D10.L08 でのベータ関数は、D10.L05 とは対照的に X 方向が極大、Y 方向が極小になっているため、アボートまでの振動継続時間が D10.L05 での圧力バースト現象が起きた SBL よりも長くなっていると考えられる。

以上のように、圧力バースト現象が発生した場所で SBL を分類することで、振動の始まり方にパターンが存在することが明らかになった。さらに、そのパターンを加速器ラティスの観点から考察した結果、圧力バースト現象が起きた場所でビームが力を受け、それが SBL の発生につながるという因果関係が示唆された。

また、D10.L02/03 で発生した圧力バースト現象を伴う SBL についての考察として、水平方向分散関数が 0 でないことから、X 方向の振動が発生している可能性を述べた。この考察は、同様に D10.L05 や D10.L08 にも当てはまり、これらの地点でも水平方向分散関数が 0 でない。このことから、D10.L05 や D10.L08 で発生した圧力バーストを伴う SBL においても、X 方向の振動が発生しやすい傾向があると推測される。しかし、本研究では統計量や観測点の不足により、その傾向を明確に捉えることができなかった。このように、圧力バースト現象が発生した各地点での考察を他の場所にも適用し、SBL の発生過程を統一的に解釈することが今後の課題である。今後は、RFSoc-BOR の精度と台数を増やすことで、SBL が（ベータ関数や分散関数の依存性があるとしても）場所に依存しない一般的な現象であるのか、あるいはベータ関数や分散関数ではなく発生場所に依存する特別な要因によって大きく左右される現象であるのかを明らかにし、その発生・発展機構の解明を目指す。

7.5 本章のまとめ

本章では RFSoc-BOR を用いて記録したデータを用いて、SBL の解析・考察を行った。以下に分かったことを整理する。

- SBL 発生時のバンチ位置振動は、ビームアボートまでに数十 μs から 100 μs 程度しか持続しない。このことから、バンチ毎フィードバックシステムの調整不足によって SBL が誘発さ

れる可能性は低く、フィードバックキッカーよりも強い力がビームに作用しているのではないかと考えられる。

- SBL 発生時のバンチ位置振動の振幅が、加速器のコリメータ開口で許されているはずの振幅よりも小さい傾向にある。このことから、SBL 発生時にはバンチ位置振動だけでなく、ビームサイズの増大も発生しているのではないかと考えられる。
- SBL 発生時のバンチ電荷損失はほとんど D06 区間のコリメータで発生している。このことから、ビームが D06 区間に突入する前に大きな位置振動やビームサイズの増大が起きていることが多いと考えられる。
- 圧力バースト現象が起きる場所によって SBL 事象を分類して解析した結果、圧力バースト現象が起きた場所でビームが力を受け、それが SBL の発生につながるという因果関係が示唆された。

第 8 章

結論と展望

電子陽電子衝突型加速器である SuperKEKB 加速器では、Belle II 実験における新物理探索精度向上のためにルミノシティを大幅に向上する必要がある。しかし、突発ビームロス事象 (SBL) という新奇な現象の発生によってルミノシティの向上が阻害されている。SBL とは数十マイクロ秒の間に蓄積ビームの数 % から数十 % が消失してしまうという現象である。SBL を詳しく解析し解明に近づくために、AMD/Xilinx 社製の RF System on Chip (RFSoc) という新しいチップを用いて、可搬性の高い新型のバンチ振動レコーダー (BOR) を開発した。BOR はビームアバートが発生する直前のバンチ毎の位置と電荷を測定、記録するデバイスである。開発した RFSoc-BOR はバンチ電流 0.5 mA において位置測定精度 30 μm を達成し、バンチ毎位置モニターとして設計通りに動作していることも確認された。また、RFSoc 評価ボードに接続するドーターボードをアンプを表面実装したカスタムボードに更新する計画が現在進行中で、今後さらなる位置測定精度向上を見込んでいる。位置測定精度が向上することによって、より細かなバンチ振動の検出が可能となり、SBL の小さい兆候も掴めるようになる。本研究では 500 バンチの移動平均を用いて SBL の解析を行ったが、それによって鈍ってしまう振動の時間構造をさらに精度良く観測できるようになることが期待される。そして、本研究での BOR 開発は、次世代ビームモニターへの応用が期待されている RFSoc を用いた高速ビームモニターの先駆的事例として、ベンチマークの役割を果たすものである。

本研究では、この RFSoc-BOR を 2 台開発しリング上に設置することで、複数地点でのバンチ毎の振動および電荷損失を計測できるシステムを構築した。このシステムにより、SBL のような急速に発展するビーム不安定性を詳細に観測・解析することが可能となった。さらに、このシステムの応用範囲は SBL にとどまらず、電子雲不安定性やイオントラッピングといった多様なビーム不安定性のバンチ毎の挙動を、多地点で詳細にモニターする新たなツールとして機能する。RFSoc-BOR は高い可搬性を有し、観測したい地点やベータatron位相を迅速にカバーできるというのが大きな利点である。今後さらなる高ルミノシティ運転を目指す中で、様々なビーム不安定性が新たに問題として浮上する可能性がある。そのような場合に、その不安定性を迅速に検

出・診断し、適切な対策を行うためのプラットフォームとして、RFSoc-BOR を用いたシステムの活用が期待される。このように、RFSoc-BOR は加速器の性能向上に貢献する重要なツールとなるだろう。また、本研究は複数地点での観測システムの構築に向けた初めての試みであり、現在は RFSoc-BOR の設置台数が 2 台にとどまっている。しかし将来的には、リング全周にわたり RFSoc-BOR を複数台増設する計画があり、これにより SBL を含むビーム不安定性の発生プロセスや原因の理解がさらに深まることが期待される。

本論文では、開発した RFSoc-BOR を用いて SBL を観測し、観測結果の解析も行った。RFSoc-BOR で記録した SBL 発生時のバンチ振動を解析した結果、その振動は数十 μs から 100 μs 程度しか持続せずにビームアボートされてしまうということと、ビームロスに至る際の振動の大きさが加速器の開口で許されているはずの振幅よりも小さい傾向があることが分かった。これらの結果から、バンチ毎フィードバックシステムの最適化不足が SBL の原因となっている可能性は低いということと、SBL 発生時には位置振動だけでなくビームサイズの増大が同時発生している可能性が高いということが分かった。

さらに、2 台の RFSoc-BOR から得られる情報と、真空ゲージやロスモニターからの情報を組み合わせ、SBL の統合的な解析も行った。SBL 発生時には圧力バースト現象という急激な真空の悪化がリング上のいずれかの場所で起きることが多い。圧力バースト現象が発生した場所で SBL を分類してバンチ振動を解析・考察した結果、その発生場所でビームが力を受けることによって振動が発生しているのではないかという因果関係が示唆され、SBL の原因は圧力バースト現象が発生した場所にある可能性が高いということが分かった。

このように、本研究で開発した RFSoc-BOR を用いることによって、SBL の原因や発生過程に関する大きな知見を得られた。この結果から、RFSoc-BOR による複数地点での観測システムは、他のデバイスと組み合わせた統合的なビーム診断にも役に立つことが分かり、ビーム不安定性の詳細な理解に寄与する重要なツールであることが明らかとなった。本研究で開発したシステムが将来のバンチ毎ビーム診断システムの基礎となり、加速器の高度化に貢献することが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご支援をいただきました。指導教員の後田裕先生には、ゼミでの貴重なアドバイスに加え、個別の相談にも丁寧に対応していただきました。また、博士課程への進学に伴う研究室の移籍についても温かく背中を押してくださいました。三塚岳先生には、本研究のあらゆる面でご指導いただきました。研究の内容のみならず、学会発表や論文執筆の方法など、多くのことを学ばせていただきました。飛山真理先生には、加速器モニターに関する基礎的な知識からご教示いただくとともに、私の研究や各種スタディに多大なご協力をいただきました。また、古賀太一郎先生、中沢遊先生、宇野健太先生には、日々の議論を通じて貴重な助言をいただき、本論文および発表資料の添削においても多大なるご協力を賜りました。SLAC 国立加速器研究所の Larry Ruckman 氏には、本研究における RFSoC を用いた開発の部分で多大なご支援をいただきました。その他の KEK の職員の皆様にも、日々の研究活動において温かいご支援をいただきました。この場をお借りして、深く感謝申し上げます。また、後田研究室および小関研究室の学生の皆さんのおかげで、日々の研究生活を充実したものにすることができました。ありがとうございます。最後に、これまで研究を続けることができたのは、何よりも私を支えてくれた両親の存在があったからです。この場を借りて深く感謝し、謝辞の結びといたします。ありがとうございました。

付録 A

アナログ回路に使用するフィルターの選定

本文の 4.3.2 項で、RFSoc-BOR のアナログ回路部分に使用するローパスフィルターの選定について説明した。複数のローパスフィルターに対してボタン電極からの信号を実際に入力することで出力波形を比較した結果、本開発では LORCH 製の 5LP8-600B-SR を採用した。図 A.1、図 A.2、図 A.3、図 A.4 に 4 種類のローパスフィルターに一バンチ信号を入力した時の出力波形をオシロスコープで測定した結果を示す。これらは HER のボタン電極からの信号を用いた測定の結果で、バイポーラー信号の極性が LER のものとは逆になっているが、信号の形状は LER と基本的に同じである。測定時のバンチ電流は約 0.1 mA であった。

図 A.2 については、バイポーラー信号の直後に波形が少し振動しているのが確認できる。図 A.3 については、バイポーラー信号の約 6 ns 後に振動が確認できる。図 A.4 については、リングングが大きく、一バンチ分の信号が 4 ns に収まっていない。これらの結果から、一番バイポーラー信号を綺麗に出力する図 A.1 の 5LP8-600B-SR を採用した。

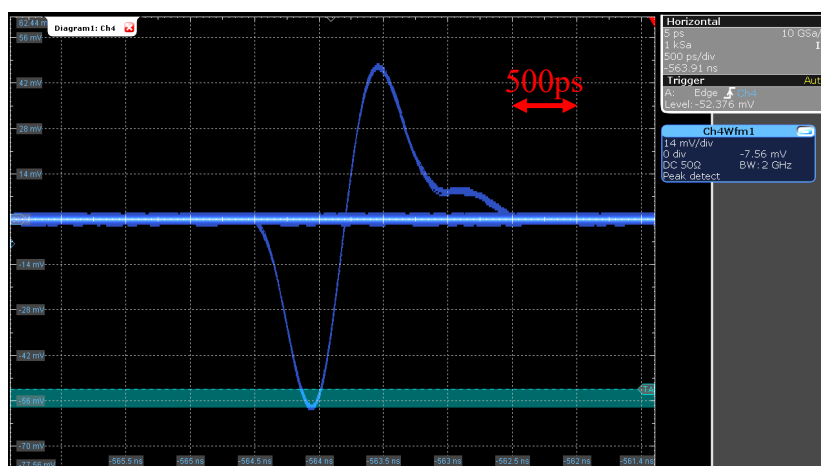


図 A.1 本開発で採用した LORCH 製 5LP8-600B-SR の出力を観測した結果

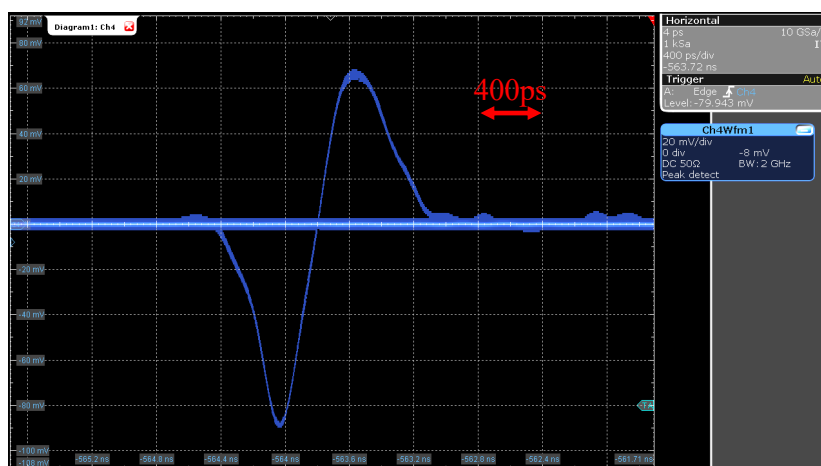


図 A.2 Mini-Circuits 製 SBLP-933+ [54] の出力を観測した結果

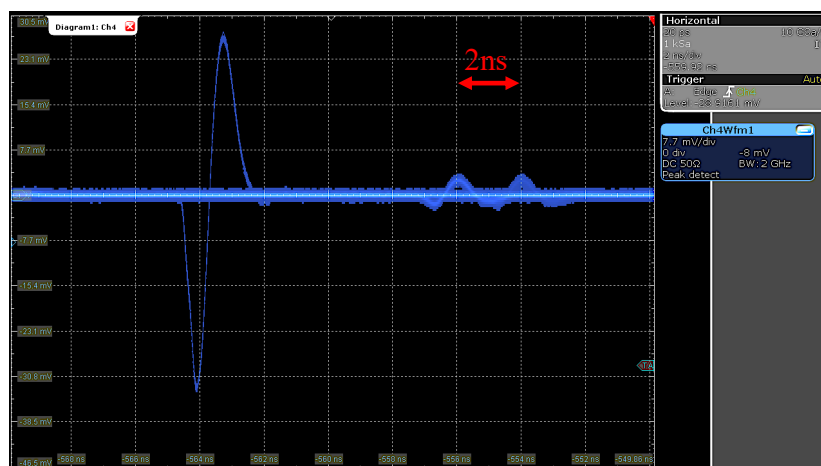


図 A.3 Mini-Circuits 製 SBLP-467 [55] の出力を観測した結果

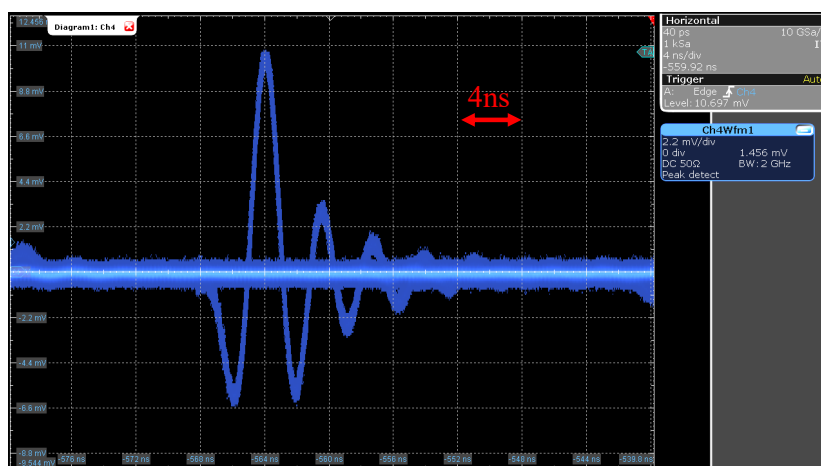


図 A.4 Mini-Circuits 製 SLP-300 [56] の出力

参考文献

- [1] SuperKEKB Design Report, <https://kds.kek.jp/event/15914/>
- [2] T. Abe *et al.* [Belle-II], “Belle II Technical Design Report,” [arXiv:1011.0352 [physics.ins-det]].
- [3] KEK. SuperKEKB プロジェクト全体図. <https://www.kek.jp/ja/about/pr/image/12548>
- [4] KEK. Luminosity projection. https://www-superkekb.kek.jp/Luminosity_projection/
- [5] SuperB Conceptual Design Report, INFN/AE-07/2, SLAC-R-856, LAL 07-15, March 2007.
- [6] T. Ishibashi, S. Terui, Y. Suetsugu, K. Watanabe, M. Shirai, Movable collimator system for SuperKEKB, Phys. Rev. Accel. Beams 23 (12) (2020) 053501. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.053501.
- [7] H. Ikeda, M. Arinaga, J. W. Flanagan, H. Fukuma, M. Tobiyama. Beam loss monitor at SuperKEKB, in Proc. International Beam Instrumentation Conference (IBIC’ 14), 2014, pp.459–462.
- [8] S. Bacherh, G. Bassia, L. Bosisio, G. Cautero, P. Cristaudo, M. Dorigo, A. Gabrielli, D. Giuressi, K. Hara, Y. Jin, C. L. Licata, L. Lanceri, R. Manfredi, H. Nakayama, K. R. Nakamura, A. Natochii, A. Paladino, G. Rizzo, L. Vitale, H. Yin. Performance of the diamond-based beam-loss monitor system of Belle II, Nuclear Instruments and Methods A 997 (2021) 165157.
- [9] M. Gabriel, F. Simon, H. Windel, Y. Funakoshi, M. Hedges, N. Iida, I. Jaegle, C. Kiesling, N. van der Kolk, P. Lewis, H. Nakayama, Y. Ohnishi, R. de Sangro, Y. Suetsugu, M. Szalay, S. Vahsen. A time resolved study of injection backgrounds during the first commissioning phase of SuperKEKB, The European Physical Journal C 81 (972) (2021). doi:10.1140/epjc/s10052-021-09769-3
- [10] T. Mimashi *et al.*, The abort system of SuperKEKB high energy ring, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP001

- [11] T. Mimashi *et al.*, SuperKEKB Beam abort System, in Proc. IPAC' 14, Dresden, Germany, Jun. 2014, pp. 116–118. doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPR0023
- [12] 石橋 拓弥, "真空システム", 高エネルギー加速器セミナー OHO'19, http://accwww2.kek.jp/oho/OH0txt/OH0-2019/12_Ishibashi_Takuya_20190927.pdf
- [13] H. Ikeda, T. Abe, M. Aversano, H. Fukuma, Y. Funakoshi, T. Ishibashi, T. Koga, H. Kaji, Y. Liu and G. Mitsuka, *et al.* Observation of sudden beam loss in SuperKEKB, JACoW IPAC2023, MOPL072 (2023), doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-MOPL072
- [14] N. Ohuchi, Y. Arimoto, *et al.* Superkekb beam final focus superconducting magnet system, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1021:165930, 2022
- [15] T. Ishibashi (private communication, 2024).
- [16] 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.
- [17] M. Aversano (private communication, 2024).
- [18] White Paper: An Adaptable Direct RF-Sampling Solution. AMD WP489 (v1.1) February 20, 2019, <https://docs.amd.com/v/u/en-US/wp489-rfsampling-solutions>
- [19] Technical Overview of AMD RFSoc Technology. AMD Technical Documentation, <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/rfsoc.html>
- [20] K. Ha *et al.*, NSLS-II bunch by bunch BPM development and beam operation, in Proc. IPAC' 24, Nashville, TN, USA, May 2024, pp. 2191–2194. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPG08>
- [21] T. Nakamura, K. Satou, T. Toyama, M. Okada, A. Kobayashi, I. Yamada and Y. Shobuda. Development of new RFSoc based intra-bunch transverse feedback system at J-PARC MR : Design and initial evaluation, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2024, Yamagata, FRP015
- [22] AMD Zynq UltraScale+ RFSoc ZCU111 Evaluation Kit, <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/zcu111.html>
- [23] 高井 良太, "ビーム位置モニターの検出ヘッド", 高エネルギー加速器セミナー OHO'20, http://accwww2.kek.jp/oho/oho20/OH020_txt/05_Takai_Ryota.pdf
- [24] G. Kube, Sensitivity Estimation for the PETRA III Beam Position Monitors Based on a Boundary Element Method, DESY-TECHNICAL-NOTE-2007-01
- [25] M. Tobiyama (private communication, 2024).

- [26] M. Tobiyama, H. Fukuma, K. Shibata, M. Tejima, S. Hiramatsu, K. Mori, H. Ishii and T. Obina. Development of Button Electrodes for SuperKEKB Rings, Proceedings of BIW10, Santa Fe, New Mexico, US
- [27] Nihon Koshuha Co., Ltd. variable length coaxial tube, https://www.nikoha.co.jp/coax_component/cat01_class07/294.html
- [28] LORCH, <https://www.smithsinterconnect.com/our-company/who-we-are/our-technology-brands/lorch/>
- [29] Rohde & Schwarz RTO2000 oscilloscope, https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/oscilloscopes/rs-rto2000-oscilloscope_63493-10790.html
- [30] Keysight Technologies E5071C, <https://www.keysight.com/us/en/product/E5071C/e5071c-ena-vector-network-analyzer.html>
- [31] MACOM H-183-4 datasheet, <https://cdn.macom.com/datasheets/H-183-4.pdf>
- [32] Texas Instruments THS4303EVM, <https://www.ti.com/tool/THS4303EVM>
- [33] Texas Instruments THS4303, <https://www.ti.com/product/THS4303>
- [34] ZCU111 Evaluation Board User Guide (UG1271), Zynq UltraScale+ XCZU28DR RFSoc, <https://docs.amd.com/r/en-US/ug1271-zcu111-eval-bd/Zynq-UltraScale-XCZU28DR-RFSoc>
- [35] ZCU111 Evaluation Board User Guide (UG1271) - XM500 RFMC Documentation, <https://docs.amd.com/r/en-US/ug1271-zcu111-eval-bd/HW-FMC-XM500>
- [36] Mini-Circuits TCM2-33WX+ , <https://www.minicircuits.com/pdfs/TCM2-33WX+.pdf>
- [37] Anaren BD1631J50100AHF datasheet, https://www.ttm.com/files/products/wireless-xinger/balun-transformers/BD1631J50100AHF/BD1631J50100AHF_DataSheet%28Rev_L%29.pdf
- [38] AMBA 4 AXI4-Stream Protocol Specification, ARM IHI 0051A (ID030610)
- [39] AMBA AXI and ACE Protocol Specification, ARM IHI 0022E (ID033013)
- [40] slaclab/surf: A huge VHDL library for FPGA development, <https://github.com/slaclab/surf>
- [41] AMD PetaLinux Tools Documentation: Reference Guide (UG1144), <https://docs.amd.com/r/2023.2-English/ug1144-petalinux-tools-reference-guide/Overview>
- [42] Rogue Software Framework, <https://slaclab.github.io/rogue>
- [43] PyDM: a PyQt-based framework for building user interfaces for control systems, <https://slaclab.github.io/pydm>

- [44] M. Tobiyama and J. W. Flanagan, “Bunch by bunch feedback systems for SuperKEKB rings”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp. 144-148.
- [45] Dimtel, inc. iGp12, <https://www.dimtel.com/products/igp12>
- [46] AMD Zynq UltraScale+ RFSoc ZCU208 Evaluation Kit, <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/zcu208.html>
- [47] ZCU208 Evaluation Board User Guide (UG1410), <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug1410-zcu208-eval-bd>
- [48] H. Ikeda *et al.*, “Observation and cause investigation of sudden beam loss at SuperKEKB”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2024, Yamagata, FRP023
- [49] S. Terui, H. Hisamatsu, Y. Suetsugu, T. Ishibashi, M. Shirai, K. Shibata, K. Kanazawa, H. Ikeda, Y. Funakoshi, “Observation of pressure bursts in SuperKEKB LER”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 1-3, 2017, Sapporo, Japan, WEOM09
- [50] S. Terui, H. Hisamatsu, T. Ishibashi, K. Kanazawa, K. Shibata, M. Shirai, and *et al.*, “Observation of Pressure Bursts in the SuperKEKB Positron Ring”, in *Proc. IPAC’18*, Vancouver, BC, Canada, Apr. 4,, pp. 2830–2832, doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPML058
- [51] G. Mitsuka (private communication, 2024).
- [52] K. Yoshihara, T. Abe, M. Aversano, A. Gale, H. Ikeda, H. Kaji, H. Kakuno, K. Kitamura, T. Koga and T. Iijima, *et al.* “Development and implementation of advanced beam diagnostic and abort systems in SuperKEKB,” Nucl. Instrum. Meth. A **1072** (2025), 170117 doi:10.1016/j.nima.2024.170117
- [53] X. Shi (private communication, 2024).
- [54] Mini-Circuits SBLP-933+, <https://www.minicircuits.com/pdfs/SBLP-933+.pdf?srsltid=AfmB0ookQxA0TbaOmswU4exbAKzaVFXtED5zPxTTV96N8qyJLDZhuPkz>
- [55] Mini-Circuits SBLP-467, https://www.minicircuits.com/pdfs/SBLP-467.pdf?srsltid=AfmB0oqy0Z1TTw99Y3d_El9jGGXrpZPzSn4xFRiEbuX26AHKym_YQjih
- [56] Mini-Circuits SLP-300, https://www.minicircuits.com/pdfs/SLP-300.pdf?srsltid=AfmB0oqv7fcmwdc-oJ4lxF6JAvN6sADLv3IOXU6IRf75QSPSPvxHq_Bz