

KEKB 入射器陽電子源における陽電子捕獲過程の直接観測

DIRECT OBSERVATION OF POSITRON CAPTURE PROCESS AT THE POSITRON SOURCE OF THE KEKB INJECTOR LINAC

諏訪田剛*

Tsuyoshi Suwada*

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
 SOKENDAI (Department of Accelerator Science, The Graduate University for Advanced Studies),
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

A direct simultaneous detection of electron (e^-) and positron (e^+) bunch signals was successfully performed for the first time with wideband pickups and a detection system at the e^+ capture section of the KEKB injector linac. The longitudinal bunch parameters, the time interval between e^- and e^+ bunches, and their bunch lengths with simultaneous two-bunch acceleration in an rf pulse were directly measured to investigate their dynamical longitudinal capture process and to maximally optimize the e^+ intensity. The results show that the time intervals were measured in the range of 20–280 ps, and the line-order switch and dynamical phase slip process for both e^- and e^+ bunches in the axial direction were clearly observed as a function of the phase of accelerating structures. The series of measurements have never been experimentally conducted so far. In this report, the dynamical phase slip process of e^- and e^+ bunches under the two-bunch acceleration scheme and the detection system are described in detail.

1. はじめに

KEKB 電子陽電子入射器 (以下入射器) では、SuperKEKB リングへの陽電子入射増強を目指し、2020年夏期保守に陽電子 (e^+) 捕獲部の改造を行なった。本改造では、 e^+ 集束用フラックスコンセントレータ (FC) の放電対策が実施され、 e^+ 捕獲部の4箇所軌道補正用偏向電磁石と広帯域モニター (WBM) が新たに設置された。WBM の設置により、これまでシミュレーション上でのみ再現されていた e^+ 捕獲部内の e^+e^- バンチの捕獲過程が動的に直接観測できるようになった。WBM のビーム応答に対する解析、最初の実験結果については既に他 [1, 2] で報告しているのので詳細はそちらを参照してもらいたい。

陽電子収量の最適化は、 e^+ 捕獲部出射後最初のビーム位置モニター (BPM) で e^+ 電荷が最大になるように e^+ 捕獲部の各種パラメータが設定される。従って、 e^+ 電荷量が唯一の最適化パラメータとなる。 e^+ 電荷量の最適化を決めるパラメータは e^+ 生成のための1次電子、 e^+ 捕獲部における電磁石や加速管など多様で、 e^+ 電荷量に対し多次元上の最適化が行われるべきであるが、実際には多次元上の最適化は難しい。

e^+ 捕獲部は上流の e^+ 標的により放射線環境が悪いこと、捕獲部全体がソレノイド電磁石列の中に入り空間的余裕が厳しいこと、さらに e^+ 標的直後ではほぼ等量の e^+e^- が同時に生成されるので、広帯域に分解しないと分離検出が難しいという根本的困難もあり、これまで診断装置は設置されていなかった。WBM の目的は e^+e^- バンチの動的な捕獲過程を直接観測し、多次元パラメータ空間上で陽電子収量の最適化に貢献することにある。

WBM は、 e^+e^- バンチを時間領域で分離検出する。従って、 e^+e^- 分離検出ができれば、縦方向パラメータ

のみならずバンチ電荷量や位置計測など横方向パラメータの計測も可能となる。分離検出を行うには周波数領域よりも時間領域での信号計測が適している。しかしながら、時間領域の計測では電極や信号伝送路のみならず計測器全体の周波数帯域と周波数損失に充分注意を払う必要がある。これらの困難を克服して満足の行く成果が得られたので本報告にまとめる。

2. 陽電子生成と捕獲の原理

入射器陽電子源の諸元については他に詳しいのでそちらを参照してほしい [3, 4]。ここでは、陽電子源の概要を述べると共に e^+ 生成と捕獲原理をまとめる。Figure 1 に入射器陽電子源の概略図を示す。

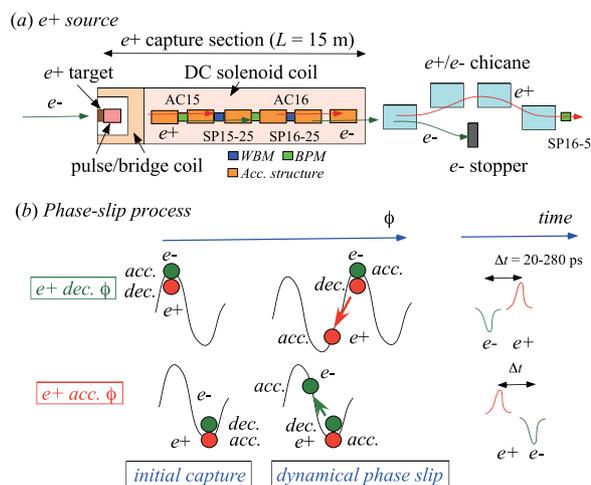


Figure 1: (a) Schematic drawing of the KEKB e^+ source, (b) dynamical phase-slip process of e^+e^- bunches at the e^+ capture section.

* tsuyoshi.suwada@kek.jp

入射器陽電子源 (Fig. 1 (a)) は、 e^+ 生成のための重金

属標的 (14mm 厚 W) と e^+ 捕獲部から構成される. 1次電子ビーム ($E_{e^-} \sim 3.2$ GeV, $Q_{e^-} \sim 10$ nC/bunch) が標的に衝突すると、標的内では高エネルギー電子と原子核との電磁相互作用である e^+e^- 対生成過程を通して電磁シャワーが発達し e^+e^- 対が生成される. 従って、ほぼ等量かつ電磁シャワーで空間的に広がった e^+e^- が標的背面から同時に射出することになる. e^+e^- は標的直後の e^+ 捕獲部に入り、ここではその一部が捕獲され、縦横方向に強力に集束される. 陽電子捕獲部では、 e^+e^- は強力なパルスコイル (FC, 3.5 T) とブリッジコイル (DC1.5 T) による軸方向の強力な磁場により横方向に集束され、直後に DC ソレノイドコイル (SC15/0.4 T, SC16/0.5 T) に囲まれた加速管 (AC15/2m \times 2 本, 14-20 MV/m, AC16/2m \times 4 本, 10 MV/m) に入り加速される. このように、 e^+ 捕獲部では e^+e^- バンチに対しソレノイド磁場による横方向の閉じ込めと加速管による加速が同時に行われる. e^+ 捕獲部を射出するとマッチング用 Q 電磁石群を経て 4 台の偏向電磁石で構成される e^+e^- 分離装置 (シケイン) に入り、 e^- はストッパーにより停止する. 他方、 e^+ ($E_{e^+} \sim 120$ MeV) は元の軌道に戻りさらに加速される.

e^+ 捕獲部では、 e^+e^- は rf 加速による位相スリップ過程を通して軸方向に走行時間差を生じる. Figure 1 (b) にこの位相スリップ過程を模式的に示す. e^+e^- はほぼ同時に最初の加速管 (AC15) に入ると位相 (捕獲位相と言う) に応じて e^+ 加速 e^- 減速 (又はその逆) される. 加速 e^+ はほぼ光速で走行するが、逆に e^- は位相スリップによりエネルギーを失い次第に減速して行く. しかし遂には加速位相に入り加速され始め、最終的には光速で走行し平衡状態に落ち着くことになる. このような位相スリップを通して平衡な e^+e^- 走行時間差が形成される. 走行時間差は捕獲位相でほぼ決まる. すなわち、捕獲位相に従い e^+e^- の走行順位と過渡的に変化する走行時間差が WBM の位置で計測されることになる.

通常運転パラメータで捕獲位相だけを変化させると、走行時間差が $\Delta t = 20 - 280$ ps の範囲で変化することが今回の実測で判明した. 走行時間差はビーム力学に対する重要なパラメータの一つである.

3. 広帯域モニターシステム

3.1 広帯域モニター

Figure 2 に WBM(実機) を示す. WBM は全長

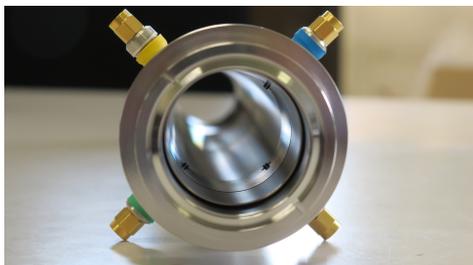


Figure 2: Photograph of WBM.

431mm、内径 38mm の胴体に SMA フィードスルーを胴体内壁面から中心に向かって 1mm 突き込んだ構造をしている. モニター端面には NW40 KF フランジを使用

した. 前後のフランジ直ぐにはベローズを装着し、上流フランジにはヒダを隠すために薄肉パイプを溶接した. これは、信号波形を乱さないようベローズで生成されるウェーク場を抑制するためである.

e^+e^- の分離検出を行うことで、バンチ間時間差や各バンチ長、電荷量計測に加え BPM として動作させるために胴体の 4ヶ所 (90° 毎) に SMA 端子を中心に向かって突き込んでいる. WBM と軌道補正用変更電磁石を 1組としてアルミフレームに組み込み、このフレームがビームラインの 4ヶ所に設置された. 2ヶ所にはストリップライン型 BPM(入射 e^- 用) が設置され、これらと交互の位置に WBM(入射 e^+ 用) が設置された.

3.2 計測システム

Figure 3 に計測システムを示す. 2ヶ所の WBM(SP15-

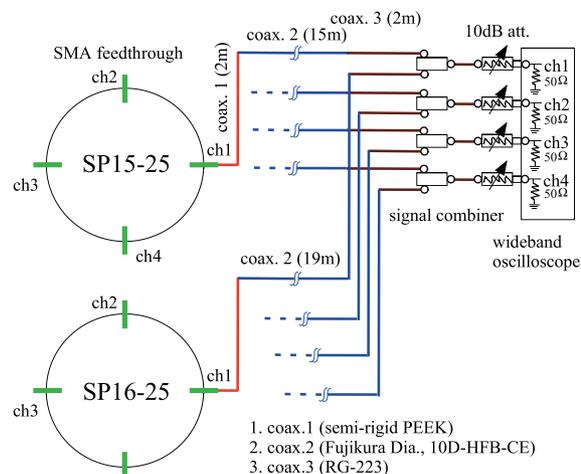


Figure 3: Signal detection system.

25/標的から 5.1 m 後、SP16-15/SP15-25 から 5.2 m 後) で検出した信号を最短距離の同軸ケーブルで伝送し、直接オシロスコープに入力するという単純なシステムである. 信号の高周波損失をできるだけ抑制するために測定器までのケーブル長を最短にした. 出力端子からの信号引出しには耐放射線性に優れた PEEK 材充填セミリジッドケーブル (2m) を用いた. その後 10D 同軸ケーブル (15m/SP15-25, 19m/SP16-25) に変換しトンネルから地上に引き出し、RG223(2m) に変換した後信号合成器 (Marki Microwave, PD-OR618, 0.6-18 GHz) を用いて信号を重畳した. 重畳信号は、固定減衰器 (10dB) を通して広帯域オシロスコープ (Keysight Technologies, Infiniium V DSOV134A, 13 GHz, 40 GSa/s) に直接接続された.

3.3 信号計測

同軸ケーブル、信号合成器及び SMA 端子の周波数損失により、入力信号の周波数帯域が制限されてしまうので、そのままでは e^+e^- バンチの十分な分離検出は難しい. そこでオシロの内臓機能である *DeEmbedding* 機能を利用することにした. これは、例えば同軸ケーブルの周波数特性をネットワークアナライザー (VNA) で事前に計測しそのデータをオシロに組み込んでおくことで実現できる. FFT 演算により信号を周波数領域で補正し、再

度逆 FFT 演算により時間領域の信号に変換し波形をリアルタイムに補正し管面表示するという優れた機能である。逆 FFT 演算ではソフトウェアフィルターを通して時間領域の信号に変換される。フィルターには、ベッセルフィルター(カットオフ $f_c=9.1$ GHz、ロールオフ 4 次)を選択した。

全同軸ケーブルと信号合成器の周波数特性が VNA を用いて計測された。ただし、SMA フィードスルーの計測はこの方法では困難なので別の校正手法を開発することにした [5]。この信号補正処理を用いて 2 台の WBM に対し、総計 16 波形(補正前 8 信号 + 補正後 8 信号)のリアルタイム表示を実現した。

4. 実験結果

4.1 波形取得

測定は通常陽電子運転 (2 バンチ同時加速) のパラメータを設定し、ただし e^+ 捕獲部における捕獲位相を 10 度毎 (AC15 位相 Φ_{15} (運転位相 $\Phi_{15}=0^\circ$) と AC16 位相 Φ_{16} を同時に同位相量変更) に変えながら、SP15-25 と SP16-25 の信号波形を同時計測した。実験時における 1 次 e^- の平均電荷量は、 $Q_{e^-}^{1st}=8.7$ nC、 $Q_{e^-}^{2nd}=8.5$ nC であった。また、 e^+ 捕獲部直後の BPM(SP16-5) における平均 e^+ 電荷量は $Q_{e^+}^{1st}=4.0$ nC、 $Q_{e^+}^{2nd}=4.1$ nC であった。従って、この時の e^+ 変換効率は $Y_{1st} \equiv Q_{e^+}^{1st}/Q_{e^-}^{1st} \sim 0.46$ 、 $Y_{2nd} \equiv Q_{e^+}^{2nd}/Q_{e^-}^{2nd} \sim 0.48$ であった。

Figure 4 に典型的な WBM 検出波形 (ch#1, SP15-25, 周波数補正有) を示す。Figure 4 (a)、(b) に $\Phi_{15}=0^\circ$ 、

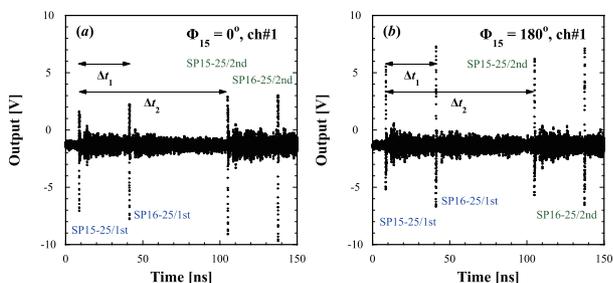


Figure 4: Frequency-corrected signal waveforms (ch#1) of WBM detected by the oscilloscope at the phases of (a) $\Phi_{15}=0^\circ$ and (b) $\Phi_{15}=180^\circ$.

$\Phi_{15}=180^\circ$ で得られた信号波形をそれぞれ示す。信号強度はノイズレベルを優位に超え、4 信号波形が検出できていることがわかる。また信号ピークは 13 V_{pp} 程度まで出力しているが、これは FFT 演算後の出力に基づくものである。図において前半の 2 信号は 2 台の WBM による検出信号で、後半の 2 信号は 2 バンチ同時加速された 2 バンチ目の信号を示す。

ここでノイズレベルを見ると面白いことがわかる。先頭の SP15-25 信号波形以前のノイズレベルは他の領域に比べ充分小さい。これはオシロの内部雑音(周波数補正後)である。一方、SP15-25 信号以降のノイズレベルは大きく、特に 2nd バンチ以降のノイズレベルはさらに増大している。これは加速管から射出したウェーク場によるもので、信号波形はウェーク場に重畳した形で出力される。このように波形処理をする上でウェーク場の効果は

意外と大きく、うまく処理しないと大きな誤差要因となることに注意しておく。ちなみにウェーク場の継続時間は 200 ns にも及びこの大きさ(及び位相)を直接計測することができる。これはウェーク場計測モニターへの発展が期待できることを示す [6]。後続バンチにはウェーク場が作用することになるが、バンチ間隔からすると従来の短距離や長距離ウェーク場の範疇には入らない中間距離ウェーク場に基づくビーム力学として面白いテーマになり得ると考えている。

計測された信号の時間差は、 $\Delta t_1=32.3$ ns、 $\Delta t_2=96.1$ ns である。前者は 2 台の WBM 間の走行時間差とケーブル長の違いによる遅延時間を考慮した時間差に一致し、後者は 2 バンチ同時加速の遅延時間に一致するのでバンチ信号検出が正しいことがわかる。Figure 4 (b) は位相が 180° 異なる信号波形を示し、信号出力に符号対称性が現れていることがわかる(後述)。

Figure 5 (a)、(b) は、Fig. 4 において SP15-25(1st バンチ、 $\Phi_{15}=0^\circ$)、同 (1st、 $\Phi_{15}=180^\circ$) を抜き出し拡大した信号波形をそれぞれ示す。ここで WBM 信号は、バンチ

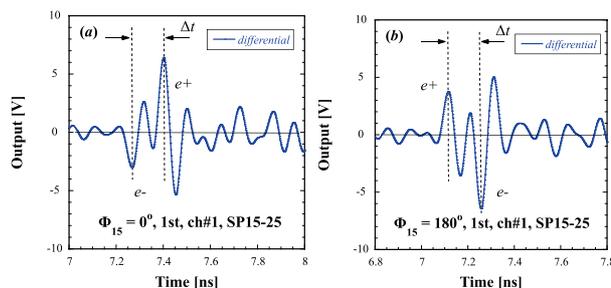


Figure 5: Frequency-corrected signal waveforms (ch#1) of WBM (1st, SP15-25) at the phases of (a) $\Phi_{15}=0^\circ$ and (b) $\Phi_{15}=180^\circ$.

のビーム軸方向分布の時間微分として検出されることに注意しておく。Figure 5 (a) を見ると最初のバイポーラ (-, +) が e^- バンチを、後続するバイポーラ (+, -) が e^+ バンチを示す。このように信号極性により e^+e^- を区別することができる。この結果から、捕獲位相が 180° 異なると e^+e^- の走行順位が入替わることが容易に理解できる。これは、 180° 異なれば位相スリップの e^+e^- 順位が逆転するからである。このことから、 e^+e^- 信号ピークの時間から走行時間差を計測することができる。これが走行時間差計測の原理である。

Figure 6 (a)、(b) に周波数補正前の同波形を示しておく。周波数補正後の全時間幅が 1 ns に対し、補正前の全時間幅が 2 ns であることからその違いは一目瞭然であろう。このように周波数補正機能により e^+e^- の分離検出が初めて可能になることに注意しておく。ちなみに、バイポーラ信号の極性を見ると周波数補正後の波形と逆になっていることがわかる。この極性が電磁誘導の法則に整合する極性である。従って、補正後の極性は FFT 演算における位相の定義に基づくものであると考えられる。

4.2 波形処理

得られる微分波形には 4 つのピークが見える (Fig. 4 参照)。ピーク強度は、ビーム位置が変化して信号振幅が小さくなると後続するウェーク波形に埋没するおそれが

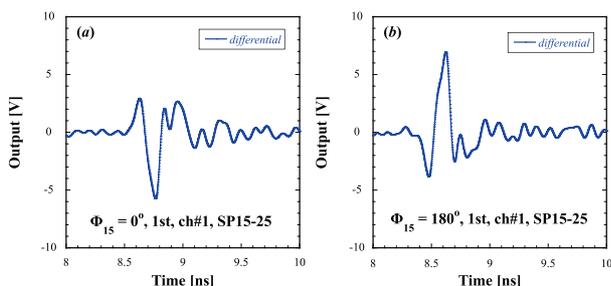


Figure 6: Raw signal waveforms (ch#1) of WBM (1st, SP15-25) at the phases of (a) $\Phi_{15}=0^\circ$ and (b) $\Phi_{15}=180^\circ$.

あり、この場合全4つのピークの同定は困難になる。そこで微分波形を積分することで積分波形を作る信号処理を施す。Figure 7 (a), (b)に $\Phi_{15}=0^\circ$, $\Phi_{15}=180^\circ$ の積分波形をそれぞれ示す。

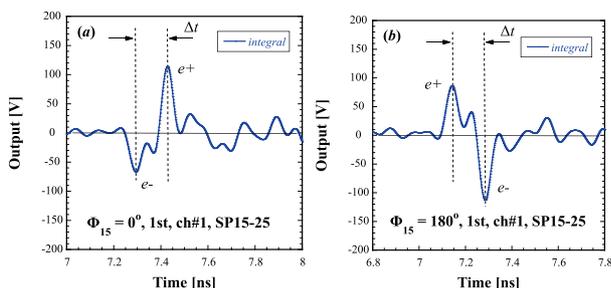


Figure 7: Integrated signal waveforms (ch#1) of WBM (1st, SP15-25) at the phases of (a) $\Phi_{15}=0^\circ$ and (b) $\Phi_{15}=180^\circ$.

この積分波形によりピーク数が2つになり波形解析が容易になる。 e^+e^- バンチ波形が極性の違いで容易に判別できるようになり、しかも各バンチのパルス面積が電荷量計測に、パルス幅がバンチ長計測に対応することも理解できる。サンプリングによる計測時間分解能は $\Delta t=1.56$ ps なので、パルス幅 (rms) やパルス面積計測には充分である¹。積分処理には、精度を高めるためにベースライン補正を何度か繰り返す必要がある。しかし、まだ後続するウェーク波形の影響が大きくさらに信号処理を進める必要がある。

Figure 8 ((a), (b))に各ch信号の積分波形のピーク時間を一致させ4ch信号和を取った積分波形 ($\Phi_{15}=0^\circ$, $\Phi_{15}=180^\circ$)をそれぞれ示す。この波形処理により e^+e^- バンチに後続するウェーク波形が、充分とは言えないがさらに抑制されることがわかる。これは、各ch信号の遅延時間が異なることから、バンチ波形に対するウェーク波形の位相の違いを利用して信号和を取ることである程度の波形抑制が可能になることを示す。この処理が、後述する動的な捕獲過程の検出に重要なることを指摘しておく。

Figure 9に位相を変化させた時の和信号による e^+e^- バンチの動的捕獲過程の変化を示す。Figure 9 (up),

¹ 周波数帯域の充足も重要であることは言うまでもない。既に報告しているので参照してほしい [2]。本システムの周波数補正に基づくバンチ長計測の限界は $\sigma \approx 13$ ps である。

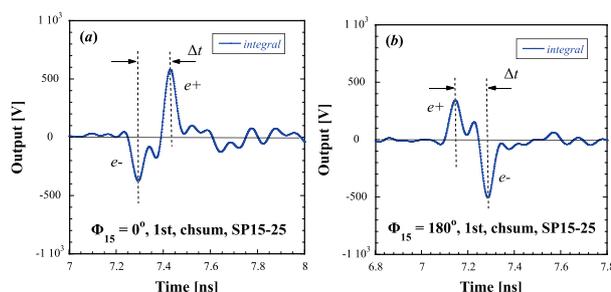


Figure 8: Integrated signal waveforms of WBM (SP15-25) with a sum of the four signal waveforms at the phases of (a) $\Phi_{15}=0^\circ$ and (b) $\Phi_{15}=180^\circ$.

(down) は、それぞれ SP15-25、SP16-25 における計測結果を示す。ただし $\Phi_{15}=0^\circ-100^\circ$ ((a)-(f))、 $\Phi_{15}=180^\circ-280^\circ$ ((g)-(l)) に対応する。この図から位相の変化に対する e^+e^- の動的捕獲過程の変化が一目瞭然であろう。さらに、位相が 180° 異なると e^+e^- の動的捕獲が全く対称的に振る舞うこともわかる。

運転時の捕獲位相 ($\Phi_{15}=0^\circ$) では、 e^- が e^+ に対し先行しているため、この捕獲位相は e^- 加速/ e^+ 減速である。 $\Phi_{15}=0^\circ$ を出発点とし位相が進むごとに e^- は位相スリップにより先頭から徐々に後退し、350 ps 離れた後方バケツに移行して行くことがわかる (同図 (b)-(d) 参照、矢印付き実線は 350 ps 幅の時間スケールを示す)。このように僅かに進行する位相スリップ e^- の変化の様子を見事に捕えていることが見て取れる。このことがウェーク波形の充分な抑制が必要な理由である。また同図 (e) で、ようやく e^+e^- バンチの走行順位逆転が生じることもわかる。このように、走行順位の逆転は単純な2バンチ順位の逆転ではなく、位相スリップ過程を通して過渡的に逆転が生じることが示された。

位相スリップが 180° 異なる場合 ($\Phi_{15}=180^\circ$, Fig. 9 (up) (g)-(l))、同様な動的捕獲過程 (ただし e^+e^- バンチは逆転)を確認することができる。さらに Fig. 9 (down)を見ると SP16-25 では、SP15-25 に比べ僅かではあるが e^+e^- の電荷量の変化に加えバンチ長も明らかに変化していることも見て取れる。バンチ前方の雑音はそれなりに抑制されているが、バンチ後方のノイズレベルの抑制はこれが限界である。この僅かな信号の起伏はこのウェーク場によるノイズレベルに制限されることになる。

Figure 10 ((a), (b))に位相の変化に対する e^+e^- バンチ走行時間差の変化 (1st/2nd at SP15-25/SP16-25)をそれぞれ示す。ここで走行時間差は、最大電荷量 (面積)を示す e^-e^+ 主バンチのピーク時間差として計測していることに注意してほしい。また e^-e^+ は e^- 先行 e^+ 後方を示し、各データ点は 100 回平均とその誤差 (標準偏差)をプロットした。図から $\Phi_{15} \sim 50^\circ$ と $\Phi_{15} \sim 230^\circ$ 付近の2点で順位逆転が生じていることがわかる。

順位逆転付近の誤差が大きくなっている。これは順位逆転付近の位相では位相スリップ途上のバンチが主バンチとして移行する過渡状態に対応し、この結果、走行時間差に大きな揺らぎが伴うからである (例えば Fig. 9 (up) (c), (d) 参照)。このような縦方向の過渡状態が見えていることも驚くべきことである。実験結果によると走行時間

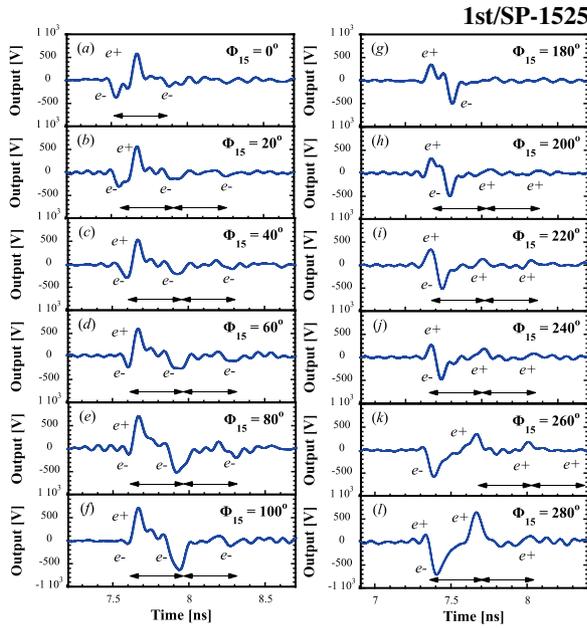


Figure 9: Variations in the integrated sum signal waveforms of WBM as a function of the capture phase for (up) 1st bunch at SP15-25 and (down) 1st bunch at SP16-25 ($\Phi_{15}=0^\circ-100^\circ$ ((a)-(f)) and $\Phi_{15}=180^\circ-280^\circ$ ((g)-(l))).

差は $\Delta t=20-280$ ps の範囲で変化しているが、SP15-25 と SP16-25 での違いはほとんど見られない。このことは位相スリップ過程が SP15-25 で完了していることを示す。また 1st と 2nd バンチの違いもほとんど見られていない。

Figure 11 (a), (b) に位相の変化に対する e^+e^- バンチ長の変化 (SP15-25 and SP16-25) をそれぞれ示す。ただし図では前後方バンチのバンチ長の変化としてプロット (e^-e^+ バンチは色分け) した。この結果から、位相の

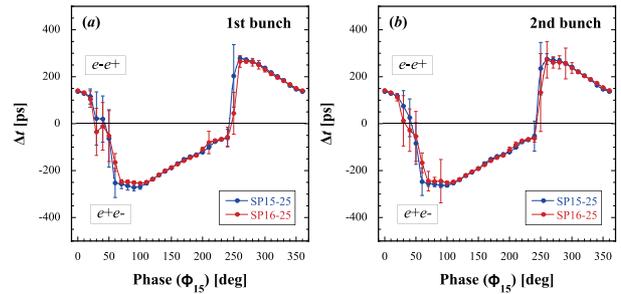


Figure 10: Variations in the time interval of e^+e^- bunches measured by two WBMs (1st and 2nd bunches at SP15-25 and SP16-25) as a function of the phase.

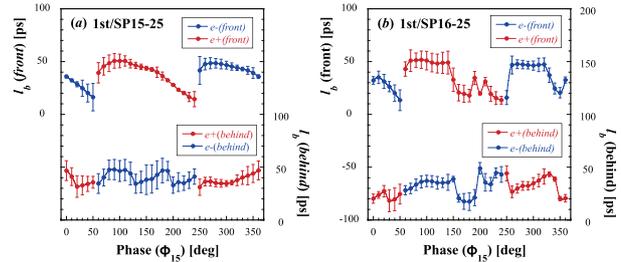


Figure 11: Variations in the front and behind bunch lengths measured by two WBMs (e^+ (red) and e^- (blue) bunches at SP15-25 and SP16-25) as a function of the phase.

変化に対するバンチ長 (rms) の変化は $\sigma_{e^-} \simeq 16-48$ ps, $\sigma_{e^+} \simeq 14-48$ ps (SP15-25), $\sigma_{e^-} \simeq 13-48$ ps, $\sigma_{e^+} \simeq 13-52$ ps (SP16-25) であった。さらに、前後方バンチに対するバンチ長の変化が位相の変化に対し非対称であること、SP15-25 と SP16-25 でのバンチ長の変化も同様でないことがわかる。これらの結果はビーム力学に基づくものと考えられるが、シミュレーション計算の妥当性に対する検証データとなるだろう。

5. まとめ

入射器 e^+ 捕獲部に導入した広帯域モニターを用いて、捕獲部内における e^+e^- バンチの動的捕獲過程の観測に成功した。厳しい放射線環境、システムの周波数帯域の制限という厳しい環境の中で、時間領域における e^+e^- バンチの分離検出が可能であることを初めて検証した。

参考文献

- [1] T. Suwada, Proceedings of the 18th Annual Meeting of PASJ, video meeting, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 670-674 (WEP023).
- [2] T. Suwada *et al.*, Sci. Rep. 11, 12751 (2021).
- [3] M. Akemoto *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. (2013), 03A002.
- [4] T. Kamitani *et al.*, Proceedings of the IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, p.579.
- [5] T. Suwada, Proceedings of the 19th Annual Meeting of PASJ, Kitakyushu, Japan, Aug. 8-11, 2022 (MOPS061).
- [6] M. A. Rehman and T. Suwada, Proceedings of the 10th International Beam Instrumentation Conference (IBIC2021), Pohang, Korea, Sep. 13-16, 2021, pp. 52-55.