

# SuperKEKB 陽電子源における電子・陽電子バンチ特性の直接計測 DIRECT MEASUREMENT OF ELECTRON AND POSITRON BUNCH CHARACTERISTICS AT THE SUPERKEKB POSITRON SOURCE

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

Electron ( $e^-$ ) and positron ( $e^+$ ) bunch characteristics were directly measured for the first time using wideband beam monitors (WBM) and a detection system at the  $e^+$  source of the SuperKEKB B-factory. Secondly-generated  $e^-$  and  $e^+$  bunches after the  $e^+$ -production target were clearly identified in their dynamical capture process at locations of the WBM under a two-bunch acceleration scheme. The longitudinal and transverse bunch characteristics, the time intervals between the  $e^-$  and  $e^+$  bunches, the bunch lengths, transverse bunch positions, and bunch charges were simultaneously separately measured for each bunch as functions of the capture phase to investigate their dynamical capture process. The results show that quite symmetric behaviors of the  $e^-$  and  $e^+$  bunch characteristics were definitely observed. The new WBM open up a new window for direct measurements of both the  $e^-$  and  $e^+$  bunches during their dynamical capture process and in the optimization procedure of the  $e^+$  bunch intensity in multidimensional parameter spaces at any  $e^+$  sources.

## 1. はじめに

KEK 電子・陽電子入射器 (入射器) では、SuperKEKB(SKEKB) リングへの  $e^+$  入射増強を目指し、2020 年夏期保守時  $e^+$  捕獲部の改造が行われた。本改造では、軌道補正電磁石と一体化した広帯域モニター (Wideband Beam Monitor, WBM) が新たに設置された。

WBM の設置目的は、 $e^+$  捕獲部において  $e^-e^+$  バンチ特性の同時分離計測をすることで、両バンチの動力学に対する実験的検証と  $e^+$  捕獲効率の最大化にある [1-3]。  $e^+$  捕獲部は、直上流にある  $e^+$  生成標的により放射線環境が悪いこと、間隙のないソレノイド電磁石列の配置により設置空間の余裕がかなり厳しいこと、さらに標的内ではほぼ等量の  $e^-e^+$  が同時に生成されるので、 $e^+$  捕獲部では  $e^-e^+$  がほぼ並走することになり分離検出が極めて難しいことである。これまでこの困難に正面から取り組んだ例は世界的に見ても無い。

標的からの  $e^+$  生成量は、標的上の照射ビーム特性を除くと 1 次  $e^-$  の照射パワーと標的材料特性により決まる。標的材料を選択すれば、それは 1 次  $e^-$  のエネルギーと電流量の積で決まる。従って、 $e^+$  生成量の最大化は一義的には 1 次  $e^-$  の照射パワーを最大化することにある。照射パワーを固定すれば、最終的に得られる  $e^+$  収量は後段の捕獲部における捕獲効率の最大化に置き換えられる。標的内部では、1 次  $e^-$  と原子核との電磁相互作用による  $e^+e^-$  対生成過程により電磁シャワーが急速に発達する。対生成  $e^+e^-$  は、多重散乱により標的出口では空間的に大きなエミッタンスに広がり出射する。2 次  $e^-$  も  $e^+$  と同様な広がりを持ち、前方に出射したほぼ等量の 2 次  $e^-e^+$  の一部が同時に捕獲部に入射する。

Figure 1 に SKEKB  $e^+$  源の概略を示す。  $e^+$  源にお

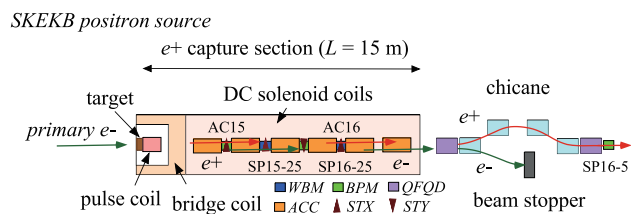


Figure 1: Schematic of the SKEKB  $e^+$  source.

るパラメータ諸元は他 [4] を参照してほしい。  $e^+$  源における捕獲部全長は約 15 m である。この中に標的及びその直後に強力なパルス電磁石、その周りにブリッジ電磁石が取り囲み、引き続いて DC ソレノイド列が並び軸方向磁場が切れ目無く生成される。他方、その中に合計 6 本の 2m 長加速管が連続して設置される。  $e^-e^+$  の横方向広がり、軸方向磁場で抑制され、同時に加速電磁場で縦方向に閉じ込められ加速 (又は減速) が行われる。捕獲部出射直後のビーム位置モニター (BPM, SP16-5) で  $e^+$  電荷量が最大になるように捕獲部のパラメータが調整され、  $e^+$  収量の最大化が計られる。捕獲部直後で計測される  $e^+$  電荷量が唯一の最適化パラメータになっている。

$e^+$  収量は、捕獲部のパラメータ (パルス磁場、ブリッジ電磁石、DC ソレノイド磁場、加速電磁場の振幅と位相) のみならず、標的上の 1 次  $e^-$  のパラメータ (サイズ、エミッタンス、標的への入射角度) にも強く依存する。さらに、加速管や DC ソレノイド列のアライメント、捕獲部以降の加速ユニットへのビーム光学整合にも注意する必要がある。このように、  $e^+$  収量の最適化は多次元空間で行われる必要がある。従来法では、各パラメータを 1 次元上で順次調整しながらその最大化が計られる。このような従来法では、最適点が多次元空間の局所的な停留値に留まってしまい、広域の最適点に到達することは困

\* tsuyoshi.suwada@kek.jp

難である。これは、数多くの自由度があるにも関わらず目的関数が唯一だからである。通常このような場合、シミュレーションの力を借りてパラメータ探索が行われるが、捕獲部のアライメントや隣接するソレノイドコイルの巻き方から生じる横方向磁場の影響など、シミュレーションには乗らないパラメータも多く、実験的に検証しておくことが肝要である。

$e^-e^+$  の同時分離計測ができれば目的関数のパラメータが増えることになり、シミュレーションとの比較においても多次元空間での最適化をより広域で行うことが可能になる。特に捕獲部では、両バンチは加速  $rf$  による位相スリップ過程を通してバンチ特性が動的に変化する。この過程を実験的に検証し正しく理解することがシミュレーションの精度を向上させるだけでなく、最終的には  $e^+$  収量の広域最適化につながるようになる。このことが WBM を導入した動機である。

## 2. WBM 導入の経緯

WBM は、 $e^+$  捕獲部内で  $e^-e^+$  バンチを時間領域で同時分離検出する。従って、縦方向のみならず電荷量や位置計測など横方向のバンチ特性についても計測可能である。WBM による縦横方向の両バンチ特性の同時分離計測を報告することが本報告の主目的であるが、その前に WBM 着想に至った経緯を触れておきたい。

$e^+$  源の改造に伴い捕獲部内へのモニター設置の検討依頼が来たのは 2018 年のことである。この依頼を聞いて、筆者は直感的に難しい依頼であると思った。これは過去において世界的にも前例が無かったからである。しかも、設置場所の問題で先端技術である光学的手法を用いたとしても、捕獲部内では光の入出力用窓さえ設ける余裕もなく、従来の電気信号を取り出す以外に方法は無いからである。

一般的に、周波数領域と時間領域での信号処理法がある。当時の私の記憶にあったことは、アルゴンヌグループによる周波数領域での処理法と東大東海グループによる時間領域での処理法であった。簡単のため前者を周波数処理、後者を時間処理と呼んでおく。前者は、当時 (1992 年) アルゴンヌ放射光施設において  $e^+$  入射が実現し始めた時期である<sup>1</sup>。線形加速器の  $e^+$  源には設置場所の関係で  $e^+e^-$  セパレータがなく  $e^+$  の強度計測には工夫が施された。モニターは典型的なストリップライン BPM であるが、検出回路の開発報告を国際会議 [5] で聞いていた。標的から出射した  $e^-e^+$  (各パルス幅 30 ns) は僅かに離れて走行するので、加速周波数 (2856 MHz) でヘテロダイン検波すれば僅かな位相差に基づく信号和の加速周波数成分の振幅を計測することができる。この回路では  $e^-e^+$  の分離計測は困難であるが、回路を拡張して加速周波数成分の 0-180 度位相検波をすれば  $e^-e^+$  の相対位相差の計測が可能となる。しかし周波数処理では、安定した加速周波数が必要となること、さらに位相差のみが計測量となり、他のバンチ特性を計測することはできない。

他方当時 (1993 年)、東大東海グループでは細野等によ

りピコ秒単バンチパルスの生成と診断が精力的に研究されていた。この研究成果が国内研究会 [6] で報告されたことが私の記憶にあった。この報告は、当時の時間処理におけるバンチ長計測の最先端であった。細野等の方法は、SMA をビームパイプに突き刺しただけの単純なモニターであった。モニター自身は単純ではあるが、超低損失の高周波同軸ケーブルを最小長の引き回しでサンプリングオシロスコープに接続し信号波形を直接的に計測する。測定結果によると、単バンチによるパルス波形が多少のリングングを伴い幅が  $\sim 100$  ps (半値全幅) のパルスが計測されていた。この報告から  $\sim 10$  ps というバンチ長計測の困難さを思い知らされた。

2018 年当時、私の頭の中にはこれら 2 つの手法があった。周波数処理を選択すると安定した加速周波数の伝送が可能なのかという技術的問題があり、さらに走行時間差以外のバンチ特性を諦めないといけない。他方、時間処理を選択すると放射線環境が悪いので低損失の高周波同軸ケーブルを長距離に亘り引き回すことはできない。耐放射線ケーブルを使用するにしても、高周波損失による信号の鈍りを避けることはできない。さらに耐放射線ケーブルを最小長にして、その後大口径の同軸ケーブルを接続し信号伝送すれば減衰は緩和されると考えたが、同軸ケーブルには口径に依存する限界周波数<sup>2</sup>という制限があり、この制限によりむやみに大口径の同軸ケーブルを使用することはできない<sup>3</sup>。従って、ある程度の波形鈍りは覚悟しないとイケない。このように周波数処理、時間処理のどちらを選択しても困難がある、という理解であった。

そうこうする内に処理法の選択時期に差し掛かり、とりあえず同軸ケーブルの信号減衰を調べるべく、ケーブルを担いで八王子のキーサイト本社を訪問し、高速パルサーによる伝送損失測定をさせて頂くことにした。半値全幅で  $\sim 30$  ps 幅のパルスを同軸ケーブル (3 種類の同軸ケーブルを直列に接続した全長が 15m 程度の本番用ケーブル) に入力し出力を広帯域オシロスコープで計測したところ、パルス出力は予期した通りに鈍り、出力の半値全幅は 128 ps、底値全幅では 1 ns と周波数損失が極めて大きいことがわかった [1]。これでは時間領域の分離検出は到底叶わない。

この時キーサイトの技術の方からオシロスコープに周波数補正機能 ("de-embedding") があることを教わった。この方法はオシロスコープに内蔵されているソフトウェアで、信号をリアルタイムに周波数補正するという優れた機能である。ベクトルネットワークアナライザー (VNA) を用いて計測した周波数に対する振幅及び位相データを事前にオシロスコープにアップロードして設定しておく、時間領域で取得した信号波形を FFT 演算により周波数領域に変換し補正データとの積を取り、逆 FFT 演算により信号波形を再度時間領域に戻し表示することができる。逆 FFT 演算をする際に、ソフトウェアで

<sup>2</sup> 同軸ケーブルの口径が大きいとちょっとしたケーブル変形により同軸モードの一部が高次高調波に変換されてしまうという厄介な問題を指す。理想的な直線状に敷設できれば良いが、実際の敷設では大きな曲率で引き回して敷設せざるを得ず、高次高調波への変換を容易に制御できないという厄介な問題が生じる。

<sup>3</sup> 本 WBM の信号処理では限界周波数を  $\sim 10$  GHz とし、口径が 10D 相当の低損失同軸ケーブルを選択することにした。

<sup>1</sup> KEK PF においても 1988 年 3 月に陽電子ビームの蓄積に成功している。

フィルター特性を適用することができ、カットオフ周波数に応じて周波数特性を調整することもできる。現場でこの機能を利用して頂いた時の出力波形の半値全幅は 63 ps となり、遜色なく入力波形が見事に再現されることが確認された。

この試験結果により、ようやく時間処理に可能性を見出した。しかし、まだ SMA 電極の周波数特性や 4 電極ゲインの校正をどのようにすれば良いのか、という課題もありビーム試験を行い信号波形を確認するまでは確信を持てなかった。以上が導入の経緯であるが、実証実験 [2] が成功裏に終わりこれらの懸念が払拭されることとなった。電極ゲインの校正については既に他 [3] で報告しているので詳細はそちらを参照してほしい。

### 3. 電子・陽電子バンチ特性計測結果

Figure 2 に AC15 の捕獲位相  $\Phi_{15}$  を変化させた時のバンチ特性の変化を示す。 $\Phi_{15} = 0^\circ$ 、 $\Phi_{16} = 0^\circ$  は  $e^+$  運転の設定位相である。この位相を始点として  $\Phi_{15}$ 、 $\Phi_{16}$  の変化量を固定 ( $\Delta\Phi_{15} = \Delta\Phi_{16} = 10^\circ$ ) し同時に変化させてバンチ特性を計測した。バンチ特性は、上から  $e^+e^-$  の走行時間差 ( $\Delta t$ , ps)、バンチ長 ( $l_b$ , rms, ps)、バンチ位置 ([hor/x, ver/y], mm)、電荷量 (nC/bunch) の変化をそれぞれ示す。同図では、SP15-25 における  $e^-$  (a)、同  $e^+$  (b)、SP16-25 における  $e^-$  (c)、同  $e^+$  (d) の計測結果を示す。走行時間差計測では、 $e^-$  を時間基準に取っていることに注意してほしい。このことから  $\Delta t > 0$  の場合、 $e^-$  が加速され先行し、 $e^+$  は減速され後行することを意味する。これを別表記すると  $e^-@e^-e^+$  である。図中では両バンチが同時分離計測されるので、捕獲位相に依存して 4 種類の  $e^-e^+$  の組み合わせが存在する。すなわち、 $e^-$  に対し加速  $e^-(e^-@e^-e^+)$  と減速  $e^-(e^-@e^+e^-)$  が分離計測され、 $e^+$  に対し加速  $e^+(e^+@e^+e^-)$  と減速  $e^+(e^+@e^-e^+)$  が分離計測される。これらは色を変えて表示している。

計測結果によると、走行時間差は  $\Delta t \simeq 20 \sim 280$  ps の範囲で変化している。計測は全て 100 回平均とその標準偏差を誤差とした。両バンチに対する相対的な位相スリップが  $\Phi_{15}$  の変化に対し動的に変化していることを示し、その最大値は  $\Delta t \simeq 280$  ps である。 $\Delta t \simeq 0$  は  $\Phi_{15} \simeq 50^\circ$ 、 $\Phi_{15} \simeq 250^\circ$  で見られる。これは、両バンチが同時に加速 rf のゼロクロスに捕獲されることを示す。 $e^-e^+$  の加減速がこのゼロクロスを経に入れ替わるのである。ゼロクロスとその付近の計測データの測定誤差が他位相に比べ大きいことが興味深い。両バンチが完全に同時走行すると WBM は計測不能になる。データを詳しく見ると平均値が  $\Delta t \simeq 20$  ps であって、1 ショットで見ると誤差の範囲で  $\Delta t = 0$  の周りで  $\Delta t$  が大きく揺動している。この原因は加速 rf の位相変動、或いは縦ウエーク場の影響が考えられるが、後者であればこの効果は興味深い研究テーマになるだろう。

次にバンチ長計測結果を示す。バンチ長計測ではモニター位置や  $e^-e^+$  に依存して特徴的な変化を示している。 $\Phi_{15}$  に対するバンチ長の変化は  $l_b \simeq 14 \sim 50$  ps である。バンチ幅 (半値全幅,  $\Delta_b$ ) でこれを表すと  $\Delta_b \simeq 33 \sim 118$  ps となり、下限値が本 WBM の測定限界値に相当する。ゼロクロスとその付近では、両バンチの加減速が入り替

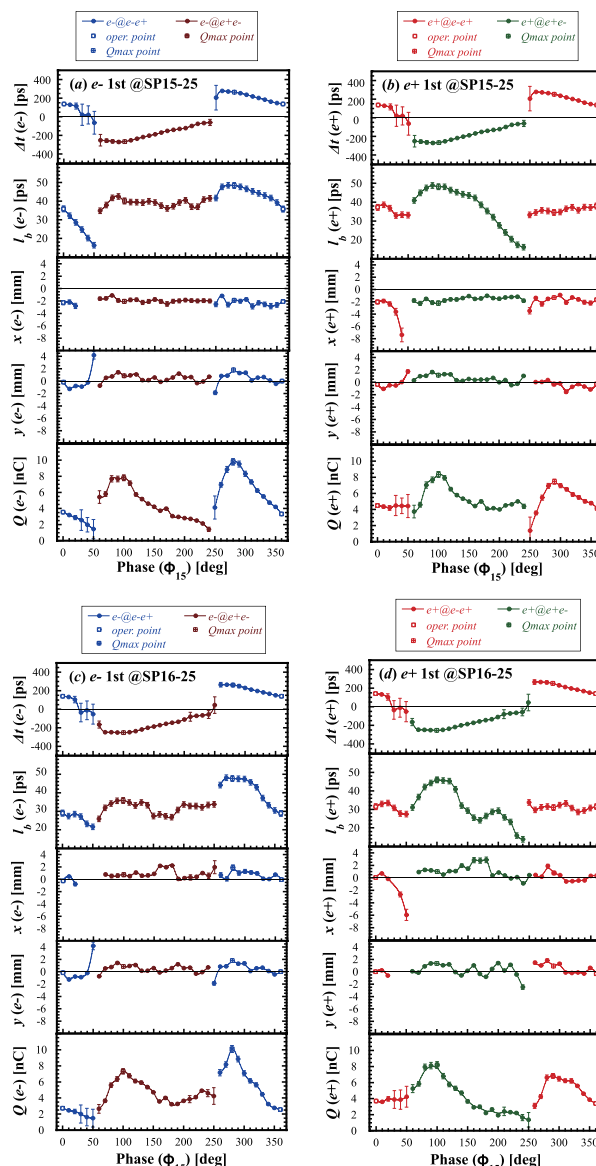


Figure 2: Variations in the  $e^-$  and  $e^+$  bunch characteristics of the first bunch as functions of the capture phase  $\Phi_{15}$  with a step phase of  $10^\circ$ , for which the phase  $\Phi_{16}$  was concurrently changed by the same step phase. Characteristics of the (a)  $e^-$  and (b)  $e^+$  bunches at SP15-25 and those of the (c)  $e^-$  and (d)  $e^+$  bunches at SP16-25.

わるのでバンチ長は飛躍的に変化している。

次にバンチ位置計測結果を示す。位置の変化は概ね  $|x(y)| \lesssim 2$  mm の範囲に入っている。ゼロクロスとその付近では、同様にバンチ位置も飛躍的に変化している。

次に電荷量計測結果を示す。電荷量の変化は  $\Phi_{15}$  の変化範囲  $0^\circ - 360^\circ$  で特徴的な 2 点のピーク値を示す。加速  $e^+$  (減速  $e^-$ ) に対し、ピーク位相は  $\Phi_{15} = 100^\circ$  ( $\Phi_{15} = 100^\circ$ ) に存在する。他方、加速  $e^-$  (減速  $e^+$ ) に対し、ピーク位相は  $\Phi_{15} = 280^\circ$  ( $\Phi_{15} = 290^\circ$ ) に存在し、両バンチに対するピーク位相はほぼ一致する。ゼロクロスとその付近では、同様に電荷量も飛躍的に変化している。加速  $e^-$  は加速  $e^+$  の電荷量に比べ  $\sim 15\%$  大きいことに注意

してほしい。これは、標的における1次 $e^-$ のコンプトン効果による電荷量増加を示す。

図中、特徴的な計測点として運転の捕獲位相、最大電荷量におけるバンチ特性の各点を白抜き四角や同クロスで表した。これらの色の違いは加減速 $e^-e^+$ に対応する。計測では入射器2バンチ加速における第2バンチに対しても同様な計測結果を得ているが、その結果については省略する。

#### 4. 電子・陽電子バンチの相関解析

2台のWBMで計測された両バンチ特性の相関解析を行った。解析手法の詳細は他を参照してほしい[7]。図3に $e^-$ (a)と $e^+$ (b)のSP15-25とSP16-25におけるバンチ位置計測結果を示す。全捕獲位相の計測点を重畳してプロットしている。加減速バンチに対しバンチ位置はク

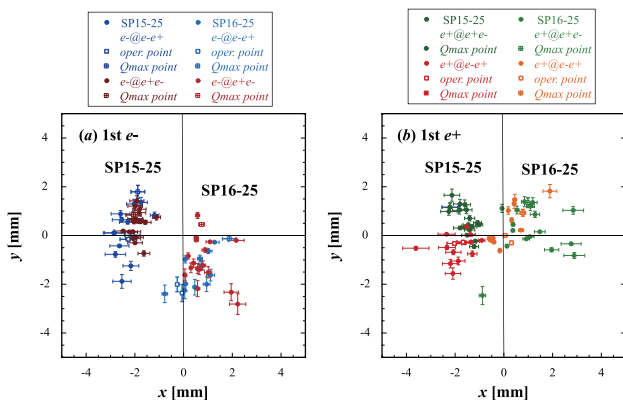


Figure 3: Variations in the position displacements in the transverse plane for the accelerated and decelerated (a)  $e^-$  bunches and (b)  $e^+$  bunches at SP15-25 and SP16-25 including all the data points.

ラスター化しており、2台のWBM間で各クラスターが回転している。これは両バンチに対し回転の向きは異なるが、軸方向磁場に対するサイクロトロン運動を示す。SP15-25で加速(減速) $e^-$ に対するバンチ位置としてクラスター平均を算出すると、 $(-2.3 \pm 0.5 \text{ mm}, 0.3 \pm 1.4 \text{ mm})$  [ $(-1.9 \pm 0.3 \text{ mm}, 0.5 \pm 0.5 \text{ mm})$ ]となり、同SP16-25でのそれは $(0.5 \pm 0.7 \text{ mm}, -1.5 \pm 0.8 \text{ mm})$  [ $(0.8 \pm 0.6 \text{ mm}, -1.0 \pm 0.9 \text{ mm})$ ]である。他方、SP15-25で加速(減速) $e^+$ に対するバンチ位置としてクラスター平均を算出すると、 $(-1.6 \pm 0.4 \text{ mm}, 0.6 \pm 0.6 \text{ mm})$  [ $(-2.3 \pm 1.5 \text{ mm}, -0.3 \pm 0.7 \text{ mm})$ ]となり、同SP16-25でのそれは $(1.1 \pm 1.0 \text{ mm}, 0.3 \pm 1.0 \text{ mm})$  [ $(-0.2 \pm 1.8 \text{ mm}, 0.4 \pm 0.8 \text{ mm})$ ]である。入射 $e^-$ の中心軌道を $(x, y) = (0, 0)$ としている関係で、標的の中心位置はオフセットさせて $(x, y) = (-3, 0) \text{ mm}$ である。従って、捕獲部内の偏向電磁石の印加によりバンチ位置 $xy$ は共にゼロに近づき、軌道補正が正しく動作していることがわかる。運転点や $e^-e^+$ 最大電荷量における計測点を同時にプロットしているが、特徴的な振る舞いは見られない。

Figure 4にSP15-25とSP16-25における走行時間差の相関を示す。同図(a)に $e^-$ に対する相関を電荷量相関を含めて示す。同図(b)に $e^+$ に対する相関を同様に示す。ここで、走行時間差の定義から $e^+e^-$ の走行時間

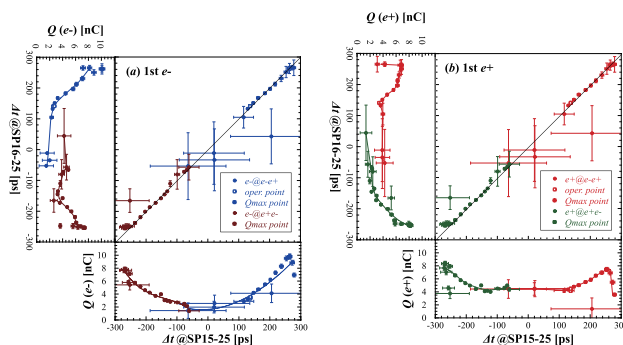


Figure 4: Variations in the correlations between the time intervals and charges in the accelerated and decelerated (a)  $e^-$  bunches and (b)  $e^+$  bunches at SP15-25 and SP16-25 including all the data points. The solid lines are only to guides the eye.

相関は同じである。相関解析によると計測点は $45^\circ$ 傾いた直線上にある。これは走行時間差がSP15-25で既に固定されたことを示す。すなわち、両バンチの運動に対し位相スリップ過程がSP15-25で完了していることを意味する。加速(減速) $e^-$ に対し最大電荷量における位相スリップは $\Delta t = -268 \pm 11 \text{ ps}$  ( $\Delta t = -264 \pm 9 \text{ ps}$ )である。他方、加速(減速) $e^+$ に対し最大電荷量におけるそれは $\Delta t = -268 \pm 11 \text{ ps}$  ( $\Delta t = -253 \pm 7 \text{ ps}$ )である。両バンチの位相スリップに対する電荷量変化は、若干の差異が見られるが同様な変化をしている。また、最大電荷量における位相スリップは誤差の範囲で同じで、最大電荷量では最大限に位相スリップが生じていることがわかる。

Figure 5にSP15-25とSP16-25におけるバンチ長の相関を示す。同図(a)に $e^-$ に対する相関を電荷量相関を含めて示す。同図(b)に $e^+$ に対する相関を示す。相

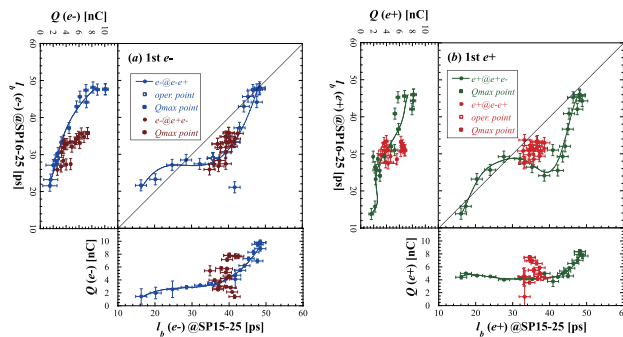


Figure 5: Variations in the correlations in the bunch lengths and charges for the accelerated and decelerated (a)  $e^-$  bunches and (b)  $e^+$  bunches at SP15-25 and SP16-25 including all the data points. The solid lines are only to guides the eye.

関解析によるとバンチ長は直線上には無く、加速バンチに対し多項式に従う曲線上にあり、減速バンチに対し狭い領域に集群している。集群幅は極めて狭く、その幅は減速 $e^-$ に対し $\Delta l_b \simeq 10 \text{ ps}$ 、減速 $e^+$ に対し $\Delta l_b \simeq 6 \text{ ps}$ である。この結果は、動的位相スリップ過程がSP15-25

で完了しているにも関わらず 2 台の WBM 間でバンチ長の伸縮が生じていることを意味する。加速  $e^-$  に対し 2 点のバンチ長 ( $l_b \simeq 27$  ps,  $l_b \simeq 48$  ps) にゼロクロスがある。他方、加速  $e^+$  に対し 3 点のバンチ長 ( $l_b \simeq 18$  ps,  $l_b \simeq 29$  ps,  $l_b \simeq 48$  ps) にゼロクロスがあり、これらの点を境にバンチ長の伸縮が逆転する。最大電荷量は最大バンチ長で生じており、SP15-25 では加速 (減速) $e^-$  に対し最大電荷量は  $l_b = 48 \pm 2$  ps ( $l_b = 40 \pm 2$  ps) にあり、他方 SP16-25 ではそれらは  $l_b = 47 \pm 2$  ps ( $l_b = 36 \pm 2$  ps) にある。また SP15-25 では、加速 (減速) $e^+$  に対し最大電荷量は  $l_b = 48 \pm 2$  ps ( $l_b = 35 \pm 2$  ps) にあり、他方 SP16-25 では、それらは  $l_b = 46 \pm 2$  ps ( $l_b = 31 \pm 2$  ps) にある。減速バンチは常にバンチ短縮となっており、特徴的なゼロクロスが無いことに注意してほしい。

走行時間差計測から位相スリップ過程が SP15-25 で完了しているにも関わらず、バンチ内では縦方向に粒子の入れ替えが生じていることが興味深い。減速バンチの最大電荷量が加速バンチに比べ小さいことにも注意してほしい。減速バンチは狭い領域に集積しているの、僅かなバンチ長変化でも電荷量が大きく減少することになる。従って、このことは電荷量の安定性という観点から見ても不利であることを意味する。

Figure 6 に 2 台の WBM と SP16-5 における  $\Phi_{15}$  に対する両バンチ電荷量の変化を示す。同図 (a)(同図 (b)) に SP15-25(SP16-25) における  $e^-e^+$  の  $\Phi_{15}$  に対する電荷量の変化を、同図 (c) に 3 地点 (SP15-25, SP16-25, SP16-5) における  $e^+$  の  $\Phi_{15}$  に対する電荷量の変化を示す。既に述べたように、各バンチの最大電荷量が加減速領域にあることが明確である。同図 (a) によると SP15-25 では減速バンチに比べ加速  $e^-$  (同  $e^+$ ) の電荷量は  $\sim 20\%$  ( $\sim 10\%$ ) 大きい。他方、同図 (b) によると SP16-25 では減速バンチに比べ加速  $e^-$  (同  $e^+$ ) の電荷量は  $\sim 27\%$  ( $\sim 17\%$ ) 大きい。 $\Phi_{15}$  に対する両バンチの電荷量変化は極めて対称的で、最大電荷量を与える  $\Phi_{15}$  も一致する。

同図 (c) では、SP16-5 で同時計測された  $e^+$  電荷量変化も追加プロットした。同図では運転捕獲位相における電荷量を白抜き四角で、最大電荷量を白抜きクロスや白抜き十字で表示している。捕獲部直後にある SP16-5 の電荷量変化が捕獲部内のそれと一致していない。最大電荷量を与える捕獲位相も一致せず、さらには運転点における電荷量と最大電荷量との比も大きく異なる。SP16-5 の加減速  $e^+$  に対しその比は  $\sim 5\%$  である。他方、SP16-25 の加速 (減速) $e^+$  に対し、その比は  $\sim 122\%$  ( $\sim 84\%$ ) である。SP16-5 の加速 (減速) $e^+$  最大電荷量を与える捕獲位相は、SP16-25 のそれから  $120^\circ$  ( $330^\circ$ ) 離れている。このように  $e^+$  電荷量の変化は、捕獲部内外で同じではない。この事実は、捕獲部外の  $e^+$  電荷量計測のみでは最適化が困難であることを示す。考えられる原因は、例えば捕獲部直後のビーム光学整合や捕獲部のアライメント等が関係している可能性があり、今の所よくわかっていない。捕獲部内で両バンチの力学的振る舞いが高い対称性を示したことが本計測システムの信頼性が高いことを示している。捕獲部内の  $e^+$  電荷量を最小限の損失で取り出せれば、捕獲効率をさらに向上できる。本計測手法は、最終的な  $e^+$  電荷量の広域最適化を可能にするであろう。

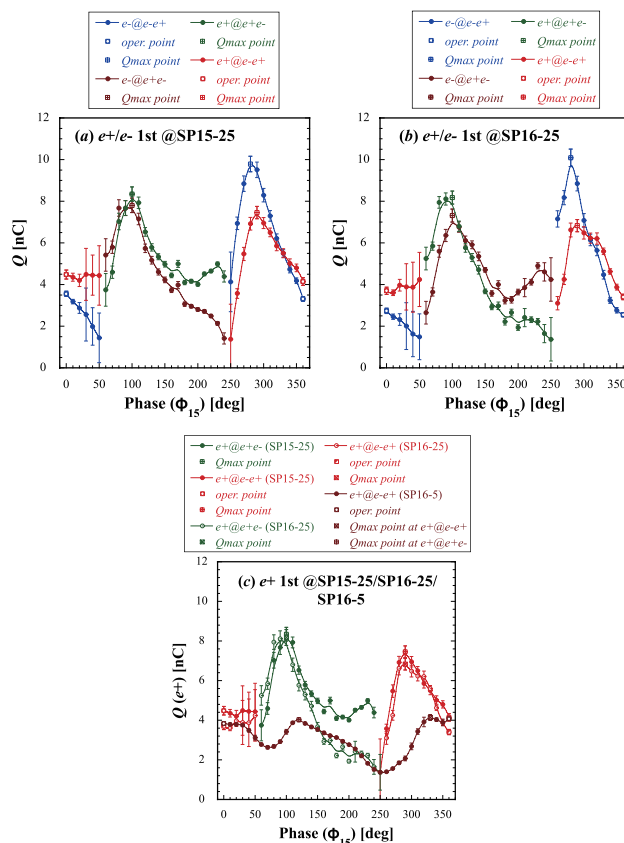


Figure 6: Variations in the bunch charges for the  $e^-$  and  $e^+$  bunches at (a) SP15-25 and (b) SP16-25, and (c) for the  $e^+$  bunch at three locations, SP15-25, SP16-25, and SP16-5 as functions of the capture phase. The solid lines are only to guide the eye.

## 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バンチ特性の解析を行った。厳しい放射線環境、システムの周波数帯域制限という厳しい環境の中でも、時間領域において  $e^-e^+$  の同時分離検出が可能であることを世界で初めて検証し、バンチ特性計測から高い対称性を持った  $e^-e^+$  の動的振る舞いの観測に成功した。

## 参考文献

- [1] T. Suwada, Proceedings of the 18th Annual Meeting of PASJ, Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 670-674.
- [2] T. Suwada, Proceedings of at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp.333-337.
- [3] T. Suwada, Proceedings of at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp.548-552.
- [4] T. Kamitani *et al.*, Proceedings of the IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, p.579.
- [5] R. Fuja and Y. Chung, AIP Conference Proceedings 281, 248 (1992); doi:10.1063/1.44344
- [6] Y. Hosono *et al.*, Proceedings of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 21-23, 1993, pp. 101-103.
- [7] T. Suwada, AIP Advances 13, 045021 (2023); doi:10.1063/5.0145776