

# 電子線形加速器における低エミッタンスビーム輸送路光学系の最適化試験 OPTIMIZATION OF BEAM OPTICS IN LOW EMITTANCE ELECTRON LINAC

宮島司<sup>\*A)</sup>、永井良治<sup>B)</sup>、本田洋介<sup>A)</sup>、島田美帆<sup>A)</sup>、高井良太<sup>A)</sup>、帯名崇<sup>A)</sup>、Dongseok Lee<sup>C)</sup>  
Tsukasa Miyajima<sup>\*A)</sup>, Ryoji Nagai<sup>B)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>,  
Dongseok Lee<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup>JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka, Ibaraki, 319-1195

<sup>C)</sup>Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 702-701, Korea

## Abstract

An optics correction method has been developed to optimize the condition of beam transportation for low emittance electron beam in a linear accelerator. In order to measure the transverse beam optics, the response function of beam size is measured, when the strength of a quadrupole magnet is varied. And, response matrix about four quadrupole magnets, which are used to correct the beam optics, is also measured. Using both the response function and the response matrix, the correction values of the four quadrupole magnets are calculated. The optics correction method was demonstrated in the compact ERL. After few iteration of the correction, the condition of beam transportation was optimized.

## 1. はじめに

X線自由電子レーザー (XFEL) やエネルギー回収型線形加速器 (ERL) などの近年の電子線形加速器では、非常に輝度の高い電子ビームを生成し、その品質を保ったまま輸送することが極めて重要である。現実の加速器でこれらの性能を実現するには、ビーム輸送路光学系をいかに設計条件に近づけていくか、言い換えるといかに加速器要素のパラメータを最適化していくかということが鍵となる。

電子線形加速器では、貯蔵リング型加速器とは異なり、電子ビームは基本的に一回だけ線形加速器内を通過することになる。このため、線形加速器でのビーム性能は、上流から下流へ伝播していくことになる。したがって、ビーム性能を設計条件に近づけるには、上流からビーム輸送路光学系の補正を行っていく必要がある。ERLの場合も、減速のためにもう一度同じ加速空洞を電子ビームが通過することになるが、貯蔵リング型加速器のように周期境界条件があるわけではなく、上流から下流へ電子ビームが進んでいくことになり、やはり上流から補正を行っていくことが必要である。また、線形加速器の大きな特徴として、輸送路の位置によってエネルギーが変化していくことがある。電子源付近ではエネルギーが低いため、空間電荷効果が支配的になり、この効果を含めてビーム輸送路光学系を制御していくことが必要となる。

我々は、加速器要素のパラメータ最適化を効率良く実行するための手法開発の一つとして、ビーム輸送路光学関数の最適化手法の開発を行っている。ここでは、ERL実証機である KEK の compact ERL (cERL) 加速器<sup>[1]</sup>の低エミッタンスビーム調整用に開発した、ビーム光学系の最適化手法とその試験結果について報告する。

## 2. CERL 加速器の運転条件

図 1 に cERL 加速器のレイアウトを示す。光陰極を用いた DC 電子銃から 390 keV<sup>1</sup> の電子ビームが生成され、

入射器超伝導空洞で 2.4 MeV まで加速される。入射器で加速された電子ビームは、合流部で周回部軌道に入り、主空洞で 19.4 MeV まで加速される。19.4 MeV の電子ビームは周回部を通過して再び主空洞に入り、エネルギー回収され主ダンプに輸送される。現在の典型的な運転条件は、バンチ電荷 0.5 pC、繰り返し周波数 162.5 MHz で平均ビーム電流 80  $\mu$ A の CW 運転となっている。バンチ電荷 0.5 pC は、繰り返し周波数 1.3 GHz の CW 運転におけるピーク電流 0.65 mA に相当し、空間電荷効果が現れてくる電荷量となっている。特に、電子銃から主空洞までの区間では、エネルギーが 390 keV ~ 2.4 MeV と低いため、空間電荷効果の制御とともに、残留磁場や環境磁場等による影響も補正していく必要がある。この領域では、4次元の横方向位相空間  $(x, x', y, y')$  と、進行方向位相空間  $(z, \delta)$  が空間電荷効果を通して結合するため、6次元位相空間を制御することが必要となる。ただし、実際のビーム調整では、横方向と縦方向の運動の結合を避けて、空間電荷効果の無視できる非常に低いバンチ電荷 (数 10 fC) から調整を開始している。横方向と縦方向をそれぞれ独立に調整して補正方法を確立したのちに、バンチ電荷を増強して空間電荷効果を含めた 6次元位相空間制御を行っている。ここでは、横方向のビーム光学関数の補正方法開発とその試験結果について紹介したあと、縦方向のビーム輸送条件の試験結果について紹介する。

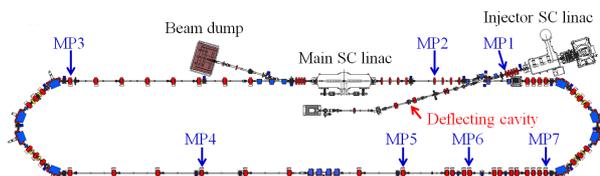


Figure 1: Layout of cERL. MP indicates optics matching point.

\*tsukasa@post.kek.jp

<sup>1</sup>ここでは、運動エネルギー  $T = (\gamma - 1)mc^2$  を用いる。

### 3. ビーム光学関数の最適化手法

横方向のビーム光学関数を設計条件に合わせるための手法として、四極電磁石の  $k$  値を変えたときのビームサイズの変化 (Q-scan の応答) を下流のスクリーンモニターで測定し、その応答が設計条件と同じになるように調整するという方法を用いる。測定された Q-scan の応答からビーム光学関数  $\alpha, \beta$  とエミッタンス  $\varepsilon$  を求めて、これらを補正することもできるが、空間電荷効果の支配的なエネルギー領域に適用するために、ビーム光学関数の代わりにビームサイズの応答を測定と設計条件で比較する方法を用いることとする。電子ビームが加速されて空間電荷効果を無視できるエネルギー領域では、ビームサイズの応答からビーム光学関数を求めて、それを補正するように拡張することは容易である。

まず、横方向のビーム光学関数の設計条件を合わせる手法について紹介する。図 2 に示すように、ここで紹介するビーム光学関数の最適化手法では、5 台の四極電磁石と 1 台のスクリーンモニターを用いる。補正の流れは以下ようになる。最下流の四極電磁石 (Q5) の収束力 ( $k$  値) を変えながら、その下流にあるスクリーンモニターで rms ビームサイズを測定し、Q5 に対するビームサイズの応答関数を得る。この測定された応答関数を設計条件の応答関数 (ターゲット) と比較し、この差が小さくなるように上流の四台の四極電磁石 (Q1, Q2, Q3, Q4) の  $k$  値を補正する。

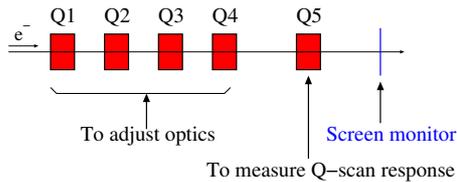


Figure 2: Schematic layout of optics matching using five quadrupole magnets and a screen monitor.

次に、具体的な最適化手順を示す。まず最初のステップとして、ターゲットとなる応答関数を求める。Q5 の収束力の値を  $k$  とし、これを  $\Delta k$  ずつ変化させ、そのときのスクリーンモニター上での水平・垂直方向の rms ビームサイズ  $\sigma_{xt}, \sigma_{yt}$  を計算する。具体的には、 $i = 1, 2, \dots, n$  として、 $n$  個の収束力、

$$k_i = k_0 + \left( i - 1 - \frac{n-1}{2} \right) \Delta k, \quad (1)$$

に対してビームサイズを計算する。ここで、 $n$  は奇数とし、 $k_0$  は設計条件の  $k$  値であるとする。このとき、ターゲットの応答関数は、

$$T = \left( \sigma_{xt}(k_1) \quad \sigma_{yt}(k_1) \quad \dots \quad \sigma_{xt}(k_n) \quad \sigma_{yt}(k_n) \right)^T,$$

と求まる。空間電荷効果の支配的な場合には、空間電荷効果を含んだ粒子トラッキングコードを使用して、ターゲットの応答関数  $T$  を求める。空間電荷効果を無視できる場合には、Q5 入口のビーム光学関数  $\alpha, \beta$  とエミッタンス  $\varepsilon$  を初期値として、Q5 とスクリーンモニターまでの転送行列を用いて、 $T$  を計算することもできる。

2 番目のステップとして、 $n$  個の  $k_i$  に対して、実際の加速器でビームサイズ  $\sigma_{xm}, \sigma_{ym}$  を測定する。測定された応答関数を  $M = (\sigma_{xm}(k_1) \quad \sigma_{ym}(k_1) \quad \dots \quad \sigma_{xm}(k_n) \quad \sigma_{ym}(k_n))^T$  とする。ターゲット応答関数と測定された応答関数の差  $\Delta M = (M - T) = (\Delta\sigma_{xm}(k_1) \quad \Delta\sigma_{ym}(k_1) \quad \dots \quad \Delta\sigma_{xm}(k_n) \quad \Delta\sigma_{ym}(k_n))^T$  を求める。この差が設計条件とのずれを表す。

3 番目のステップとして、これを補正するための応答行列を測定する。このために、Q1 の  $k$  値を設計条件から  $\Delta K$  だけずらした状態で、Q5 の応答関数を測定する。これを  $M_{Q1} = (\sigma_{xm,Q1}(k_1) \quad \sigma_{ym,Q1}(k_1) \quad \dots \quad \sigma_{xm,Q1}(k_n) \quad \sigma_{ym,Q1}(k_n))^T$  とする。 $\Delta K$  を加える前の測定結果との差  $\Delta M_{Q1} = (M_{Q1} - M) = (\Delta\sigma_{xm,Q1}(k_1) \quad \Delta\sigma_{ym,Q1}(k_1) \quad \dots \quad \Delta\sigma_{xm,Q1}(k_n) \quad \Delta\sigma_{ym,Q1}(k_n))^T$  は、Q1 に  $\Delta K$  だけ加えたときの応答関数の変化量を表すことになる。Q1 の  $k$  値を元の値に戻したあと、同様の測定を Q2, Q3, Q4 に対して行い、 $\Delta M_{Q2}, \Delta M_{Q3}, \Delta M_{Q4}$  を求める。これらの測定結果から補正量を計算するための応答行列を求めることができる。応答行列は、

$$R = \left( \Delta M_{Q1} \quad \Delta M_{Q2} \quad \Delta M_{Q3} \quad \Delta M_{Q4} \right), \quad (2)$$

となる。 $\Delta K$  が小さいとして応答が線形であると仮定すると、Q1, Q2, Q3, Q4 のそれぞれの四極電磁石の  $k$  値を  $(\Delta K_{Q1} \quad \Delta K_{Q2} \quad \Delta K_{Q3} \quad \Delta K_{Q4})^T$  だけ変化させたときの応答関数の変化量は、

$$\frac{R}{\Delta K} \begin{pmatrix} \Delta K_{Q1} \\ \Delta K_{Q2} \\ \Delta K_{Q3} \\ \Delta K_{Q4} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

となる。これより、 $(\Delta K_{Q1} \quad \Delta K_{Q2} \quad \Delta K_{Q3} \quad \Delta K_{Q4})^T$  が、ターゲット応答関数と測定された応答関数の差  $\Delta M$  を生じさせると考えると、

$$\Delta M = \frac{R}{\Delta K} \begin{pmatrix} \Delta K_{Q1} \\ \Delta K_{Q2} \\ \Delta K_{Q3} \\ \Delta K_{Q4} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

とすることができる。このとき、 $R$  の逆行列  $R^{-1}$  を求めることで、ターゲット応答関数と測定された応答関数の差  $\Delta M$  から Q1, Q2, Q3, Q4 の補正量を、

$$\begin{pmatrix} \Delta K_{Q1} \\ \Delta K_{Q2} \\ \Delta K_{Q3} \\ \Delta K_{Q4} \end{pmatrix} = \Delta K R^{-1} \Delta M, \quad (5)$$

と求めることができる。以上に示した方法で、Q5 の応答関数を設計と合わせることができる。手順をまとめると次のようになる。

1. ターゲット応答関数  $T$  の計算
2. Q5 応答関数  $M$  の測定
3. Q1, Q2, Q3, Q4 の応答行列  $R$  の測定
4. Q1, Q2, Q3, Q4 の補正量の計算と設定

この手順をターゲット応答関数と測定された応答関数の差  $\Delta M$  が小さくなるまで繰り返す。

この方法では、応答は線形であるということ以外は何も仮定を導入していないため、現実の応答を利用して直接加速器パラメタの最適化を実施していることに対応する。このため、加速器のモデルに依存せずに補正できるところが長所となる。ただし、線形な応答を仮定しているため、設計条件と実際の条件が離れている場合には、設計条件に収束しない可能性もある。この方法では、ある程度設計条件に近い条件から開始して、繰り返し補正を実施することが必要となる。次のセクションでは、この方法を cERL 加速器に適用して、横方向のビーム輸送路光学関数の補正を行った例を紹介する。

また、縦方向のビーム輸送条件の補正についても、基本的には横方向の場合と同じ、加速器要素のパラメタを変えたときのビーム条件の応答を測定・補正する方法を用いることができる。縦方向の場合には、四極電磁石の  $k$  値の代わりに、高周波空洞の加速電圧、加速位相を変えたときのパンチ長、エネルギー拡がりの応答を測定し、これを設計条件と合わせるように補正することになる。

#### 4. CERL における輸送路光学系の調整

cERL では、前のセクションで紹介した方法を用いて、上流から横方向のビーム輸送路光学系の補正を行っている。縦方向については、基本的にエネルギーとエネルギー拡がりを測定しながら加速空洞の加速電圧と位相の調整を行っている。空間電荷効果が顕著になるバンチ電荷では、より精密な加速電圧と位相の調整が必要となるため、バンチ長に対する応答を測定する方法を試験した。

##### 4.1 横方向輸送条件の最適化

横方向の輸送条件の最適化にあたっては、最上流の電子銃から補正を行っている。cERL の電子銃は DC 光陰極電子銃を用いており、160 mm のギャップの間に 390 kV を引加して電子ビームを生成・加速している。この区間では、電極形状による横方向の収束・発散力が働き、これをモデルで正確に表現することが重要となる。まず、空間電荷効果の効かない極めて低いバンチ電荷(数 10 fC) で収束・発散力の測定を行い、実験結果をモデルで再現できるようにしている<sup>[2]</sup>。390 keV に加速された電子ビームは、ソレノイド電磁石による横方向の収束力を受けたあと、バンチャー空洞<sup>[3]</sup> でバンチ圧縮され、入射器空洞で 2.4 MeV まで加速される。入射器空洞による加速では、電子ビームを空洞の中心に合わせて通すことが、低エミッタンスビームを保持するうえで重要となる。このために、入射器空洞の高次モード信号を利用したビーム位置モニタの開発を行い、これを用いて軌道調整試験を行っている<sup>[4]</sup>。このように入射器空洞上流では、電子銃、ソレノイド電磁石、バンチャー空洞と入射器空洞による影響を総合的に調整して、輸送条件の最適化を行っている。

入射器より下流では、輸送条件の調整のために四極電磁石を用いる。主空洞で加速されたあともビームエネルギーは 19.4 MeV と低いため、電磁石自身による残留磁場や、真空ゲージの磁石が作る環境磁場等の影響を

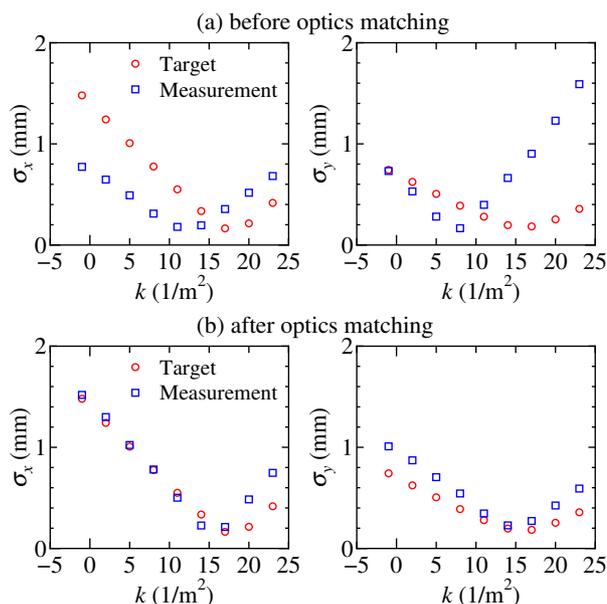


Figure 3: Quadrupole scan results before and after optics matching at matching point, MP1.

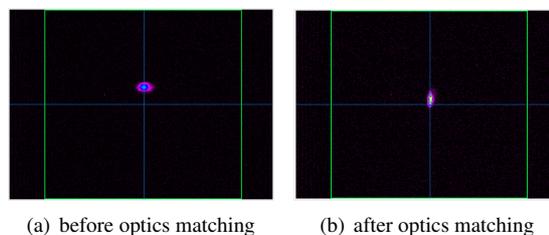


Figure 4: Transverse beam profiles before and after optics matching at matching point, MP1.

強く受けてしまう。このため、設計の輸送条件に近づけるには、上流から四極電磁石の補正を行っていく必要がある。これを実施するために、前のセクションで紹介した、5 台の四極電磁石を一セットにした輸送条件補正法を用いている。周回運転のときには、図 1 に示す 7 箇所マッチングポイント (MP) で補正を行っている。応答行列  $R$  の逆行列を求める際には、特異値分解 (SVD 法) によって疑似逆行列を求めている。実際の補正では、測定誤差の影響を考慮して 4 個のうちの 2 個の固有値を用いて疑似逆行列を計算している。

ここでは、バンチ電荷 0.5 pC の運転条件時のマッチング結果について紹介する。図 3 に合流部にあるマッチングポイント MP1 における輸送条件補正の結果を示す。応答関数のターゲット値は、空間電荷効果を含む粒子トラッキングコードである General Particle Tracer (GPT)<sup>[5]</sup> を用いて計算された。図 3 の (a) は補正前の Q5 の応答関数を示している。補正前は、垂直方向の応答関数の測定値がターゲットから大きくずれていることがわかる。この状態から前のセクションで示した輸送条件の補正を実施した。補正を 3 回実施したあとの応答関数を図 3 の (b) に示す。完全に一致しているわけではないが、かなりターゲット応答関数に近づいていることがわかる。図 4 に補正前後のビームプロファイル

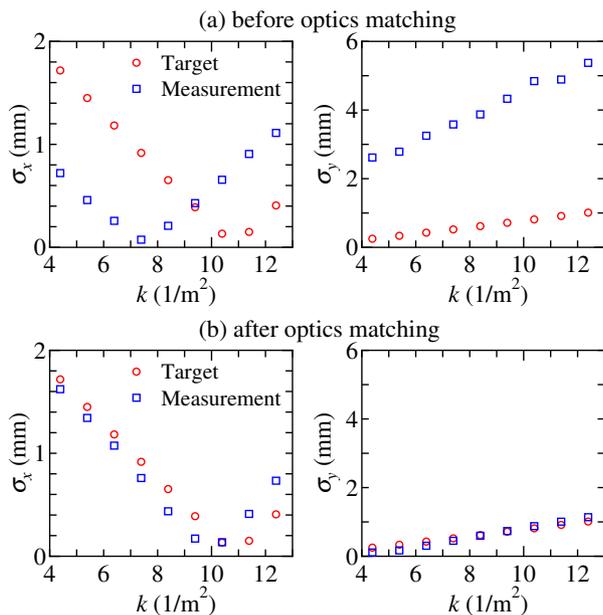


Figure 5: Quadrupole scan results before and after optics matching at matching point, MP2.

を示す。応答行列の測定時間は、1回あたり5分程度であり、ここでの補正には20分程度を要している。MP1ではエネルギーが2.9 MeVであり、空間電荷効果がまだ残る領域であるが、この方法によって空間電荷効果を含めて輸送条件を補正できることが確認された。

図5に合流部と主空洞の間にあるマッチングポイントMP2における輸送条件の補正結果を示す。こちらも3回補正を実施し、ほぼ設計条件に補正できていることがわかる。このように、5台の四極電磁石を一セットにして、測定された応答行列を用いる方法で、横方向の輸送条件を補正できることが確認された。cERLの運転では、これらの補正は、毎日行うわけではなく、輸送条件を大きく変えたときに実施している。主空洞下流のエネルギー19.4 MeVの領域も同様の方法でマッチングを実施し、ビームサイズを小さく抑えて輸送できることが確認されている。

#### 4.2 縦方向輸送条件の応答測定

縦方向の輸送条件の最適化には、高周波加速空洞の加速電圧と位相を補正することが必要となる。これまでの空間電荷効果が比較的弱いバンチ電荷では、各空洞下流のエネルギーが設計条件になるように調整を実施することで、輸送条件を補正してきた。しかしながら、バンチ電荷を増強して空間電荷効果が支配的になってくると、より詳細な加速電圧と位相の調整が必要となってくる。最終的には、バンチ長とエネルギー拡がりに対する、加速電圧と位相の応答を測定して補正することが目標であり、その準備として、バンチャー空洞の加速電圧とバンチ電荷を変えたときのバンチ長の応答関数測定を行った。バンチ長は、図1に示すように、入射器診断ラインに設置された偏向空洞<sup>[6]</sup>を用いて測定された。

測定時のバンチ電荷は7.7 pCであり、これは1.3 GHzで平均ビーム電流10 mAに相当する。バンチ電荷7.7 pCでは空間電荷効果が支配的であり、縦方向と横方向の輸

送条件が結合する。まず、横方向の輸送条件の調整を実施したあとに、バンチ長の応答測定を行った。図6にバンチャー空洞の加速電圧を変えたときのバンチ長の応答を示す。シミュレーションの応答はGPTによって計算された。エネルギー合わせによる位相調整のみを実施したあとの測定結果であるが、バンチャー電圧に対するバンチ長の応答は、モデル計算から大きくずれていないことが確認された。

図7にバンチ電圧を変えたときのバンチ長の応答を示す。バンチ電荷は空間電荷効果の効かない微小電荷から、7.7 pCまで増強された。シミュレーションの応答と測定結果を比較すると、かなり近い応答になっていることが確認された。このことより、エネルギー合わせによる位相調整のみで、ある程度設計条件に近づけられることが確認された。

バンチ圧縮条件は、バンチャー空洞だけでなく入射器空洞の加速電圧と位相にも依存するため、次の段階として、それらの応答行列を測定し、それを用いた補正法の試験を行う予定である。また、空間電荷効果を介して、横方向の運動が縦方向の運動にも影響を与えるため、6次元位相空間の応答を合わせるように補正法を拡張していく予定である。

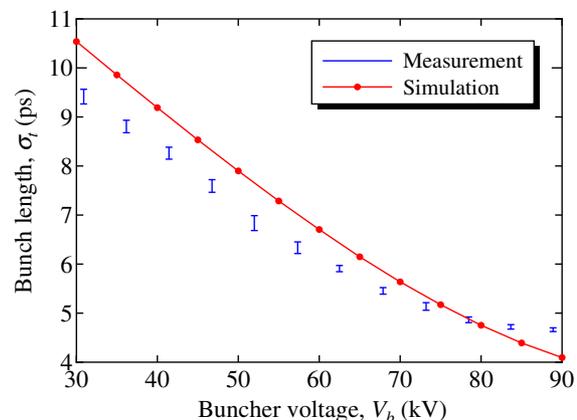


Figure 6: Buncher voltage scan results. Bunch length was measured by the deflecting cavity in Fig. 1.

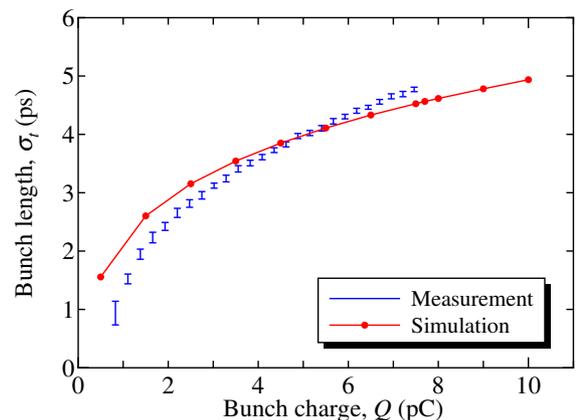


Figure 7: Bunch charge scan results. Bunch length was measured by the deflecting cavity in Fig. 1.

## 5. まとめ

電子線形加速器の低エミッタンスビームをその品質を保ったまま輸送するために、ビーム輸送路光学系を補正し、最適化する方法を開発している。横方向の輸送条件に対しては、Q-scan によるビームサイズの応答関数を測定し、また、それを補正するための4台の四極電磁石の応答行列を測定し、補正值を求める方法を開発した。cERL 加速器でこの補正方法の試験を行い、数回の繰り返し補正によって輸送条件を最適化できることが確認された。縦方向の輸送条件についても同様の応答行列を用いる方法を検討しており、その前段階としてバンチャー電圧とバンチ電荷に対するバンチ長の応答の測定を実施し、モデル計算とある程度一致していることが確認された。今後は、横方向については補正精度の向上を目指すとともに、縦方向については応答行列による補正法の試験を行う予定である。

## 6. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (15K04740) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] S. Sakanaka *et al.*, “Recent Progress and Operational Status of the Compact ERL at KEK”, in Proc. of IPAC’15, Richmond, USA (2015), TUBC1.
- [2] T. Miyajima *et al.*, “Low Emittance Electron Beam Transportation in Compact ERL Injector”, in Proc. of IPAC’14, Dresden, Germany, 2014, pp. 3104-3106.
- [3] T. Takahashi *et al.*, “Development of a 1.3-GHz Buncher Cavity for the Compact-ERL”, in Proc. of IPAC’14, Dresden, Germany, 2014, pp. 3866-3868.
- [4] 本田洋介他, “cERL 入射器超伝導空洞の高次モードによるビーム位置測定”, THP089, in these proceedings.
- [5] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>
- [6] S. Matsuba *et al.*, “Deflecting Cavity for Bunch length Diagnostics at compact ERL Injector”, in Proc. of IPAC’10, Kyoto, Japan, 2014, pp. 951-953.