

KEK STF における RFBT 実験

ROUND TO FLAT BEAM TRANSFORMATION EXPERIMENT AT KEK STF

荒本真也^{#, A)}, 栗木雅夫^{A)}, Liptak Zachary John^{A)}, 金 秀光^{B)}, 早野仁司^{B)}, 清宮裕史^{B)},
山本康史^{B)}, 柏木茂^{C)}, 坂上和之^{D)}, 鷺尾方一^{E)}
Shinya Aramoto^{#, A)}, Masao Kuriki^{A)}, Liptak Zachary John^{A)}, Jin Xiuguang^{B)}, Yuji Simiya^{B)}, Hitoshi Hyano^{B)},
Yasuchika Yamamoto^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{C)}, Kazuyuki Sakaue^{D)}, Washio Masakazu^{E)}

^{A)} Hiroshima University

^{B)} KEK Accelerator Laboratory

^{C)} Tohoku University

^{D)} University of Tokyo

^{E)} Waseda University

Abstract

The design challenge for all colliders is to increase luminosity. In addition, in the Linear Collider, the luminosity will be increased by minimizing the beam size. However, simply reducing the beam size causes Beamstrahlung and reduces the beam energy width. Therefore, a flat beam having a large beam size ratio and emittance ratio in the horizontal and vertical methods is used. The current linear collider uses radiation attenuation in a damping ring with a circumference of 3 km, but in this study, we investigated a method using emittance exchange technology as an alternative method. This technique produces an asymmetric minimal emittance beam by exchanging emittance between two degrees of freedom, x-y and x-z, in a six-dimensional topological space. First, RFBT is used to replace the horizontal emittance, and then TLEX is used to transfer the excessive horizontal emittance in the traveling direction. We will present the design research by simulation and the experimental results at the Superconducting Accelerator Test Facility of Tsukuba High Energy Accelerator Research Organization on the above issues.

1. はじめに

電子陽電子衝突型加速器は現在の技術で素粒子の消滅を実現する唯一の方法である。過去行われた LHC 実験では超対称性の有意な証拠がないため、ヒッグス粒子の詳細な研究と、電子陽電子衝突型加速器を使用した標準モデルとの不整合の探索の重要性は非常に高い。ILC(Inter National Linear Collider)[1]は超電導加速空洞を基にした電子陽電子加速器であり、日本の岩手県に建設される予定である。

ILC のルミノシティは以下の式で表される[2]。

$$L = \frac{f n_b N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

f は繰り返し周波数、 n_b はパルス中のバンチ数、N はバンチあたりの粒子数、 σ_x 、 σ_y は横方向ビームサイズである。粒子数は以下に示す消費電力の式から大きくできないことが分かる。

$$P = \eta e f n_b N \quad (2)$$

η は電力効率、 eE はビームエネルギーである。一方ルミノシティを高めるために横方向ビームサイズを小さくすると、Beamstrahlung により Energy Spread が発生する。

$$\Delta E \propto \frac{1}{\sigma_z} \left(\frac{1}{\sigma_x + \sigma_y} \right)^2 \quad (3)$$

以上のことからルミノシティを高めつつ、Beamstrahlung を抑制するため横方向どちらかにビームサイズを絞る必要がある。ILC の場合、interaction point(IP)においてビームサイズは水平方向に 640 nm、垂直方向に 5.7 nm、エミッタンスは縦方向に 10 mm mrad、横方向に 0.04 mm mrad が要求される。現在の ILC の基本設計ではダンピングリングによるシンクロトロン放射を利用してこの非対称エミッタンスビームを生成する。そこで我々はダンピングリングを必要としない、エミッタンス交換技術を提案する。

六次元位相空間におけるエミッタンス交換技術は二つある。一つ目の RFBT(Round to Flat Beam Transformation)は、ソレノイド磁場中でビームを生成し角運動量を与え、扁平ビームを生成する方法である。もう一つの TLEX(Transverse to Longitudinal Emittance eXchange)はダイポールモード空洞を通過させ、縦方向のエミッタンスを交換する。

2. エミッタンス交換技術

この章では RFBT と TLEX について説明する[2]。

2.1 RFBT

RFBT は角運動量が支配的なビームから横方向の非対称エミッタンスビームを生成する。過去行われた RFBT

[#]m201956@hiroshima-u.ac.jp

の実験では 100 のエミッタンス比が確認された[3]。ビームをソレノイド磁場中で生成することで角運動量が発生する。ソレノイドのベクトルポテンシャル A は正準運動量 P_c を発生させる。 P_c は

$$P_c = P - eA \quad (4)$$

ここで P は運動学的運動量であり、 A は

$$A = \frac{eA}{2} \begin{pmatrix} y \\ -x \end{pmatrix} \quad (5)$$

で表される。 e は素電荷、 B_0 はソレノイド磁場である。 x, y と P_x, P_y 間の相関はシグマ行列の非対角成分を生成する。

$$\Sigma_0 = \begin{pmatrix} \varepsilon T_0 & LJ \\ -LJ & \varepsilon T_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

ε は固有のエミッタンスであり、 T_0 は固有エミッタンスの Twiss parameter で

$$T_0 = \begin{pmatrix} \beta & -\alpha \\ -\alpha & \frac{1 + \alpha^2}{\beta} \end{pmatrix} \quad (7)$$

で表される。 L は

$$L = \frac{eB_0\sigma}{p_z} \quad (8)$$

無次元角運動量であり、 σ は rms ビームサイズ、 p_z は縦方向運動量である。 J は

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

非対角成分で表される単位行列である。RFBT は 3 つの skew quadrupole で線形変換を行う。3 つの skew quadrupole の輸送行列は

$$M = R^{-1} N_Q R = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} A_+ & A_- \\ A_- & A_+ \end{pmatrix} \quad (10)$$

R は $\pi/4$ 回転行列で、 N_Q は 3 つの skew quadrupole の輸送行列であり、

$$N_Q = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix} \quad (11)$$

$A_{\pm} = A \pm B$ である。 M によって転送されるシグマ行列は

$$A_- = A_+ S \quad (12)$$

$$S = \pm J T_0^{-1} \quad (13)$$

の時、

$$\Sigma = M \Sigma_0 \tilde{M} = \begin{pmatrix} \varepsilon_- T_- & 0 \\ 0 & \varepsilon_+ T_+ \end{pmatrix} \quad (14)$$

非対角成分が 0、対角成分に非対称エミッタンスが現れる。また、この時生成されるエミッタンスの大きさは

$$\varepsilon_{n\pm} = \sqrt{\varepsilon_{n0}^2 + (\gamma\beta L)^2} \pm \gamma\beta L \quad (15)$$

で表される。 ε_{n0} は熱エミッタンスである。それらの比は

$$\frac{\varepsilon_{n+}}{\varepsilon_{n-}} \sim \left(\frac{\varepsilon_{n0}}{2\gamma\beta L} \right)^2 \quad (16)$$

である。また

$$\varepsilon_{n+} \varepsilon_{n-} = \varepsilon_{n0}^2 \quad (17)$$

となることから、エミッタンスは保存されることが示される。

2.2 TLEX

TLEX は 2 組の doglegs とダイポールモード加速空洞で構成されたビーム輸送路である。TLEX は横方向の強度変調から縦方向の変調への変換を示すことが実験的に証明されている。Doglegs とダイポールモード加速空洞の転送行列 M_d, M_c は

$$M_d = \begin{pmatrix} 1 & L & 0 & \eta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \eta & 1 & \xi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$M_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \eta \\ 0 & 1 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ k & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$k = eV_0/aE_0$ 、 V_0 は加速空洞電場、 a は空洞サイズ、 E_0 はビームエネルギーである。ダイポールモード加速空洞は 2 組の doglegs の中間に位置し、TLEX 全体の転送行列は

$$M_T = M_D M_c M_D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{L}{\eta} & \eta - \frac{L\xi}{\eta} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\eta} & -\frac{\xi}{\eta} \\ -\frac{\xi}{\eta} & \eta - \frac{L\xi}{\eta} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\eta} & -\frac{\xi}{\eta} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$1 + \eta k = 0$ とした。TLEX では x と z 間で位相空間の交換が可能である。

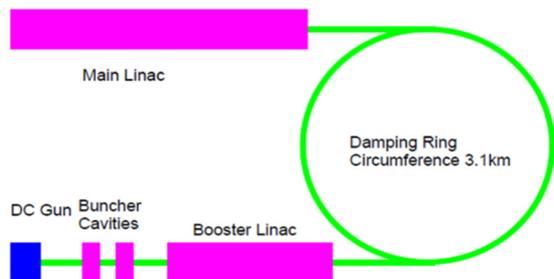


Figure 1: The conventional design of the injector for Linear colliders. The beam is stored in DR to make asymmetric beam emittance in horizontal and vertical directions by radiation damping.

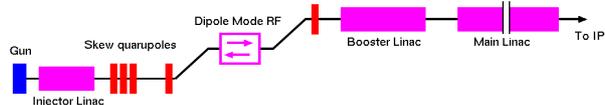


Figure 2: The injector design employing the emittance exchange techniques. The asymmetric emittance beam in horizontal and vertical directions are made by RFBT and TLEX.

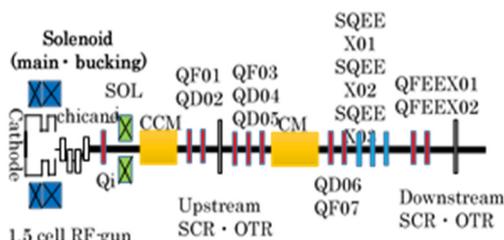


Figure 3: KEK STF Beam line for RFBT.

3. FLAT BEAM GENERATION FOR LINEAR COLLIDERS

冒頭で示したようにフラットビームは LC のルミノシティを高めるために有効である。現在の ILC の設計では IP では水平方向で 10 mrad mm、垂直方向で 0.04 mrad mm、縦方向 8.4×10^5 mrad mm のエミッタンスが要求される。このビームを生成するために 3km の周長の DR が必要である(Fig. 1)[2]。

エミッタンス交換技術(RFBT, TLEX)を採用すれば Fig. 2 のようにコンパクトなビームラインとなる。Table 1 にエミッタンスの変遷を示す。まず、カソードにおいてビームを生成する。RFBT のみで ILC の要求値を満たそうとすると、エミッタンスの積は保存するため 0.6 mrad mm の低エミッタンスとなる。ここで問題となるのが粒子密度である。エミッタンスが低ければ粒子密度が大きくなり、空間電荷効果によりエミッタンス増大が起こる。すると RFBT においてエミッタンス比が悪化し、期待したエミッタンス

Table 1: Emittance Budget for ILC at IP(TDR) and Six-dimensional Emittance Exchange

	ILC	6D emittance Exchange		
		Initial	RFBT	TLEX
ϵ_{nx} [$\pi \mu\text{m}$]	10	<u>50</u>	<u>62500</u>	<u>10</u>
ϵ_{ny} [$\pi \mu\text{m}$]	0.04	<u>50</u>	<u>0.04</u>	0.04
ϵ_{nz} [$\pi \mu\text{m}$]	110000	10	10	<u>62500</u>
ϵ_{6D}	44000	25000	25000	25000

Table 2: Simulation Parameter

Parameters	Value	unit
Beam size (Rms)	0.85	mm
Bunch size (Full width)	12	ps
Initial emittance(x,y)	0.72	pi mrad mm
Angler momentum on cathode	18.4	pi mrad mm

Table 3: Twiss Parameter (Simulation)

	$\sqrt{\beta_x \nu m}$	$\sqrt{\beta_y \nu m}$	α_x	α_y
上流	25.8179	24.7064	-8.6214	-8.7514
下流	42.0264	42.0233	-3.7543	-3.7537

は得られない。そのためまず、ある程度大きなエミッタンスをカソード上で発生させる(ここでは 50 mrad mm)。RFBT によって y 方向エミッタンスを 0.04 mrad mm に絞ると、x 方向のエミッタンスは 62500 mm mrad になる。その後、TLEX で x-z 間のエミッタンスを交換し、x 方向のエミッタンスは 10 mrad mm となる。縦方向エミッタンスは IP における反応には関与しないため、最終的に z 方向へ余分を押し付けることにより、ILC の要求値を達成する。

4. シミュレーション・実験結果

4.1 シミュレーション

高エネルギー加速器研究機構(KEK)超電導リニアック試験施設(STF)の RFBT 実験用ビームライン(Fig. 3)を想定したシミュレーションを行った。実験では CCM 直後と skew 直後(以降それぞれ上流と下流と定義する)の 2 か所にスクリーンが位置するため、シミュレーションも同じ地点の Twiss parameter、エミッタンスの比較を行う。また、60 pC の小さいバンチ電荷で実験を行うため、空間電荷効果を計算していない。

まず Eq. (6)からエミッタンス交換では Twiss parameter が skew 入射時に x と y 方向で対称である必要がある。そのため、quadrupole によって Twiss parameter の調整を行

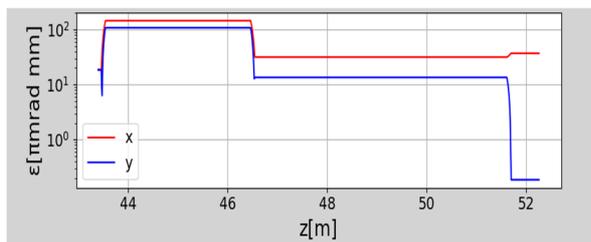


Figure 4: Emittance after skew (simulation), Longitudinal distance from cathode position vs normalized emittance. Red: x, blue: y.

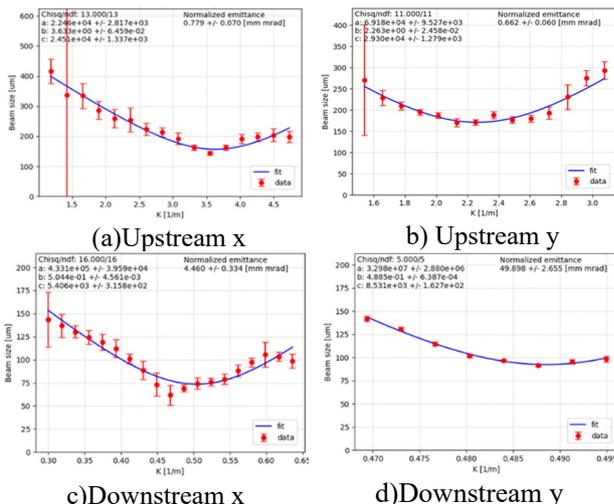


Figure 5: Qscan at Upstream and Downstream.

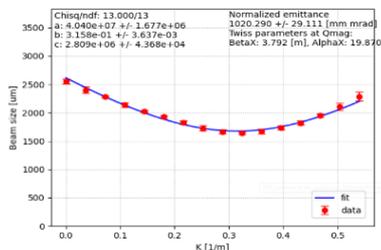


Figure 6: RFBT result. Measured only in x direction.

う。Quadrupole 磁場は ELAGANT を用いて最適化を行い、ASTRA でトラッキングを実行した。シミュレーション条件を Table 2 に、結果を Table 3 に示す。この時、カソード上の磁場を 0T に調整した。 β 、 α ともにビームライン下流で 4 桁ほどの精度で一致していることが分かる。次にカソード上にソレノイド磁場を与え、skew を通過させ、RFBT を行った結果を Fig. 4 および Table 4 に示す。エミッタンス比は 195 である。これは Eq. (16) で熱エミッタンスとソレノイド磁場により発生する角運動量から得られる理論上のエミッタンス比 ($\epsilon_{n-}/\epsilon_{n+} \approx 2600$) より一桁小さい。Eq. (16) から得られる値はビーム発生時から skew まで全くエミッタンス増大を起こさずに、かつ Twiss parameter が完全に対称なまま輸送した条件でエミッタ

Table 4: Emittance Exchange (Simulation)

	ϵ_x [π mrad mm]	ϵ_y [π mrad mm]	ϵ_x/ϵ_y
上流	18.5	18.5	1.0
下流	37.0	0.19	195

Table 5: Twiss Parameter (Experiment)

	$\sqrt{\beta_x \sqrt{m}}$	$\sqrt{\beta_y \sqrt{m}}$	α_x	α_y
上流	0.978+/- 0.256	1.241+/- 0.333	-3.48+/- 0.088	-3.48+/- 0.175
下流	3.122+/- 0.747	7.885+/- 1.67	-492+/- 5.44	4.5+/- 0.334

Table 6: Emittance (Experiment)

	ϵ_x [π mrad mm]	ϵ_y [π mrad mm]
上流	0.662+/-0.040	4.5+/-0.334
下流	0.779+/-0.070	49.9+/-2.655

Table 7: Emittance Exchange (Experiment)

	ϵ_x [π mrad mm]	ϵ_y [π mrad mm]
下流	1020+/-29.1	

ス交換を行った場合である。このことからビーム輸送路の改善や Optics の厳密な調整により、さらなる改善が可能であることが考えられる。

4.2 実験結果

シミュレーション結果をもとに KEK STF ビームラインで実験を行った。まずシミュレーションと同様にカソード上磁場を 0T に調整を行い、ビーム輸送路でシミュレーションと同様の結果が得られるか検証を行った。結果を Fig. 5 および Table 5, Table 6 に示す。これから Twiss parameter は非対称に変化したことが分かる。また、上流から下流にかけてエミッタンスの非対称な増大が見られた。次にソレノイド磁場を与え、RFBT 実験を行った結果を Fig. 6 および Table 7 に示す。測定時の不備のため、x 方向しか測定できなかったが、エミッタンス交換は確認されなかった。これは skew 直前での Twiss parameter に大きな差があったことや、ビーム輸送中のエミッタンス増加が原因であると考えられる。

4.3 考察

実験後、再現シミュレーションを行い、以下のことが分かった。

1. Quadrupole の計算モデルの違い
実験前の Simulation に用いた Quadrupole の K 値と STF で実際に使用されているものでは数十%異なることが分かった。これにより Twiss parameter が非対称に変化したと考えられる。

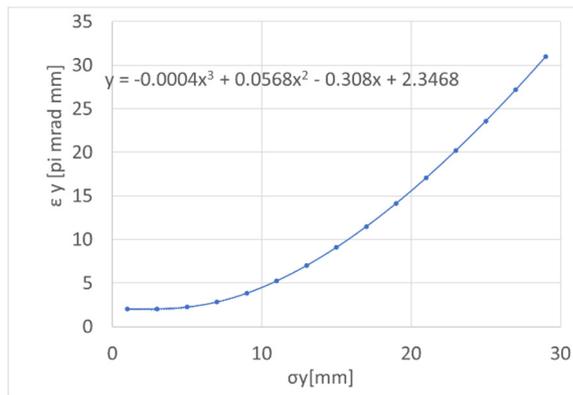


Figure 7: Beam size at CM entrance vs Emittance at CM exit.

2. 加速空洞電場の非線形効果

CM 入口でのビームサイズに対する CM 出口でのエミッタンスの変化について Fig. 7 に示す。およそビームサイズの 2 乗にエミッタンスが比例しており、これは加速空洞内の横方向電場の影響であると考えられる。また、加速空洞入射時に β 関数をなるべく小さくすることで、エミッタンス増加を抑えられることを示している。

5. まとめ

ルミノシティを高めるため、フラットビームが必要である。現在の ILC の設計では DR を用いて非対称エミッタンスビームを生成する。そこで我々は六次元位相空間においてエミッタンスを交換する RFBT、TLEX を提案する。これにより DR が不要となる。今回は実験的なデモンストレーションとして RFBT 実験を行った。シミュレーションでは 195 のエミッタンス比が得られる計算であったが、実際の実験ではエミッタンス交換は見られなかった。その原因として、磁石の計算モデルの違いによる Twiss parameter の一致精の精度の不足していたことや、加速空洞でのエミッタンス増大が挙げられる。

今後はシミュレーションによる実験結果の再現を行い、KEK STF にて RFBT 実験を再度行う予定である。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, KEK-Report 2013-1, 2013.
- [2] M. Kuriki *et al.*, "HIGH LUMINOSITY FLAT BEAM GENERATION WITH PHASE-SPACE ROTATION FOR LINEAR COLLIDERS", Proceedings of the 15th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagoya, Japan, pp. 135-138.
- [3] P. Piot *et al.*, "PHOTOINJECTOR PRODUCTION OF A FLAT BEAM WITH TRANSVERSE EMITTANCE RATIO OF 100", Proceedings of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA, pp.382-384.