

SuperKEKB 入射器におけるビーム変動とエミッタンス成長シミュレーション BEAM VARIATION AND EMITTANCE GROWTH SIMULATION FOR SUPERKEKB INJECTOR LINAC

清宮 裕史、佐藤 政則、肥後 寿泰

Y. Seimiya*, M. Satoh, T. Higo

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

SuperKEKB is e+/e- collider for high-energy particle physics in KEK. Design luminosity of the SuperKEKB is 8×10^{35} , which is 40 times higher than that of KEKB achieved. For the high luminosity, the injector linac is required to transport low emittance high-charged electron beam and positron beam to the ring. A charged beam with an offset from a center of cavity is affected by the wakefield depending on both the offset size in the cavity and longitudinal particle position in the beam. The wakefield causes emittance growth. This growth can be suppressed by appropriate orbit control so as to cancel the wakefield effect of the cavities in total. On the other hands, the beam variation in 6-dimensional phase space also induces the emittance growth. Emittance growth by both misalignments and 6-dimensional beam jitter was evaluated by particle tracking simulation. Investigation of beam jitter and drift was also performed by correlation analysis between beam position and measured parameter, charge or temperature.

1. 導入

SuperKEKB は電子陽電子衝突型の高エネルギー素粒子物理学のための加速器である。SuperKEKB の設計ルミノシティは 8×10^{35} であり、これは KEKB で到達した値の 40 倍である [1]。この高ルミノシティを実現するために、KEKB 運転の 2 倍の電流、20 分の 1 のビームサイズが要求されている。そのため、入射器には高電荷の低エミッタンスビームを輸送することが求められている。もしエミッタンスの大きいビームをリングへ入射しようとする、リングのアクセプタンスから漏れてしまい、電流が貯められないだけでなく検出器のバックグラウンドの増大を招くと考えられる。

SuperKEKB プロジェクトの Phase 1 は 2016 年に行われ、様々な機器やソフトウェアのチェック、真空焼きが順調に行われた。ダンピングリングコミッション前の入射器運転は文献 [2] で言及されているように終了し、2017 年 4 月には Belle II 検出器がインストールされた。2017 年秋から DR コミッションが、2018 年から低エミッタンスビーム調整が必要となる Phase 2 が開始予定である。素粒子物理学のためのデータ取りが本格的に開始される Phase 3 は 2018 年冬から予定されており、低エミッタンスビーム調整手法は Phase 2 までに確立する必要がある。

入射器の概略図を図 1 に示す。入射器はセクター A, B, J-ARC, C, 1~5 から構成される。規格化水平/垂直エミッタンスとしては、入射器終端部にて $40/20 \mu\text{m}$ 以下が要求されている。入射器は、陽電子生成のための高電荷電子ビーム生成用の熱電子銃と低エミッタンスビーム用のフォトカソード RF 電子銃の 2 種類の電子銃を所持している。SuperKEKB にて想定されている電子銃の運用は以下になる。熱電子銃で作られた高電荷電子ビーム (10 nC) は 1 セクターのターゲットに衝突し制

動放射、対生成が起こる。対生成によって生まれた陽電子はターゲット直後の Flux Concentrator (FC), 収束ソレノイドで効率良く捕獲される。陽電子は 2 セクター終端からダンピングリング (DR) へ輸送され、そこで低エミッタンスとなった陽電子がリングへ輸送される。陽電子には DR が存在するため、熱電子銃のエミッタンスに対する要求は厳しくない。一方、フォトカソード RF 電子銃から生成された電子ビーム用の DR は存在しない。これはフォトカソード RF 電子銃は低エミッタンスビーム生成が可能であるため、エミッタンスを保存したままビーム輸送を行うことができれば DR 無しで運転可能であるという思想に基づいている。

基本的に加速管などの空洞の中心をビームが通る場合、対称性により横方向の wake はキャンセルされるためエミッタンス成長は起こらないと考えられる。しかし、空洞の中心からずれた位置を荷電ビームが通過するとき、その空洞中心からのオフセット量やビーム先端からの距離に依存してキックを受けるため、それがエミッタンス成長に繋がる。これを抑えるためには、単純には空洞の入口と出口で wake 場の影響をキャンセルするように対角に通すのがよいが、現実的にはビームの軌道を変えるステアリング磁石の数は限られているため、いくつかの空洞でちょうど wake 場がキャンセルするような軌道を見つけ出すことが現実的な対策となる。SuperKEKB 入射器におけるエミッタンス保存に関する研究はいくつか報告されている [3-5]。しかし、現実的には 6 次元のビーム変動や電磁石の磁場ジッターといった様々な要因によって統計的にエミッタンスは成長してしまう [6]。本レポートでは、電子銃後から入射器の終端部までのトラッキングシミュレーションを現実的な 4 極磁石と加速管のミスアラインメントや電磁石の磁場ジッター、6 次元的なビーム変動が存在する場合について行った結果を報告する。また、入射器におけるビーム変動の原因についても調査を行った。

*seimiya@post.kek.jp

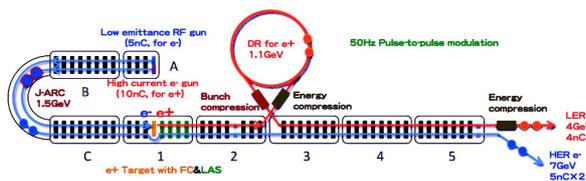


Figure 1: Schematic layout of the SuperKEKB injector linac.

2. WAKE 関数とポテンシャル

エミッタンス成長シミュレーションでは、加速管における横方向と縦方向の wake 場を取り扱う。短距離 wake 関数は、K. Yokoya [7] や K. Bane [8] によって導かれている。入射器における加速管の情報を用いて計算した wake 関数及びポテンシャルを、それぞれ図 2, 3 に示す。ここで、wake 関数から wake ポテンシャルを計算する際に用いたビーム分布はガウス分布であり、入射器で典型的なバンチ長の $1\sigma = 3 \text{ mm}/2.35$ を用いた。また、本レポートにおける wake ポテンシャルは電荷量 (nC) で規格化した値となっている。図 3 においては、CST studio [9] にて 3 次元電磁場計算を行った wake ポテンシャルもプロットされている。CST で得られた wake ポテンシャルの大きさは、ビーム中心 ($s=0$) において K. Yokoya や K. Bane によるものと比較して 20% 程度低い、振る舞いとしてはおおよそ一致している。

電子銃から出射されるビームの電荷を変化させると、J-ARC 部での軌道が変化する。これは、電荷量によって wake 場 (ビームローディング) が変化することでビームが得られるエネルギーが変化し、J-ARC のようなディスパージョンが大きい場所で軌道が変化するためである。ビーム電荷を変えて J-ARC 部での軌道変化を実測したデータとシミュレーションで求めた値を比較することでシミュレーションで用いている縦 wake の確かさを確認することができる。図 4 は、J-ARC の BPM におけるビームの軌道の比較を行ったものであり、青は実測した軌道と Yokoya wake を使ってシミュレーションした軌道との比較、緑は実測した軌道と CST で求めた wake ポテンシャルがビーム中心 ($s=0$) にて一致するように Yokoya wake をスケールしたのものを使ってシミュレーションした軌道との比較である。ここで、軌道を実測した際の電磁石の情報をシミュレーションに反映させていないため、軌道量そのものは一致していない。しかし、wake によるビームローディングによって生じるエネルギー変化が一致していればビーム電荷を変化させたときの軌道レスポンスは一致すると考えられる。実測と Yokoya wake を比較すると、青線の傾きが 1.41 となり若干過大評価となっている。一方、実測と CST wake を比較した場合、緑線の傾きは 1.00 となりほぼ一致する結果となっている。

このレポートでは、K. Yokoya による wake 関数をトラッキングシミュレーションに用いる。入射器においては最短のバンチ間距離は 96 ns 程度であるため、短距離 wake 場のみ取り扱えばよい。

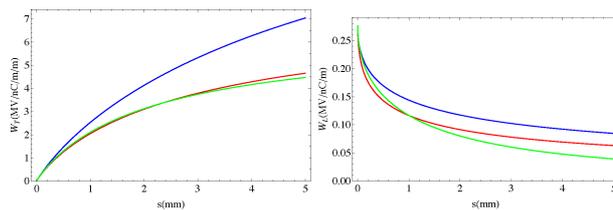


Figure 2: Comparison of wake functions. Right and left figures show transverse and longitudinal wake function, respectively. Green, red, and blue lines show K. Yokoya, K. Bane, and analytical wake function, respectively.

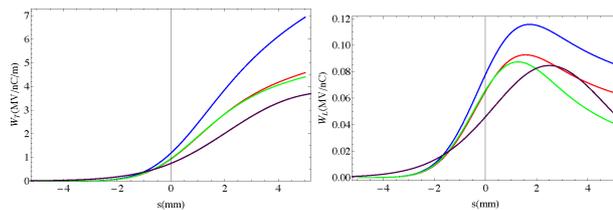


Figure 3: Comparison of wake potentials. Right and left figures show transverse and longitudinal wake function, respectively. Green, red, blue, and purple lines show K. Yokoya, K. Bane, analytical, and calculated wake function (CST), respectively.

3. シミュレーションの設定

粒子トラッキングシミュレーションは、加速器設計のための汎用計算機コードである SAD (Strategic Accelerator Design) [10] で行った。低エミッタンス調整としては、初めに BPM でのビーム軌道がある程度小さくなるように補正を行う。これは、加速管はレーザートラッカーを用いてある程度アライメントされているため、軌道補正することである程度加速管の中心近くをビームが通るようになると考えられるためである。次に、4 つのステアリング磁石を用いてオフセットインジェクション [11] を行う。4 つの磁石を用いれば x, x', y, y' を自由に変えることができるため、加速管で受ける wake 場の影響を低減可能な軌道を探し出すことができる。

本シミュレーションにおける仮定は以下になる。

- BPM と近接する 4 極磁石は同じミスアラインメント量である。
- A、B セクターにおいて、同じ架台に乗っている加速管は全て同一のミスアラインメントを持っている。
- A、B セクターにおいて、トリプレット 4 極磁石は全て同一のミスアラインメントを持っている。
- A、B セクター、J-ARC において、4 極磁石、加速管のミスアラインメントはそれぞれガウス分布しており、A、B セクターにおいては 0.2 mm、J-ARC 部では 0.1 mm である。

Quad-BPM 法 [12] によって BPM が 4 極磁石の磁極中心に数十 μm オーダーで校正されているため、第一の仮定を設定した。シミュレーションによると、仮に BPM と 4 極磁石の中心の間に数十 μm 程度の誤差があった

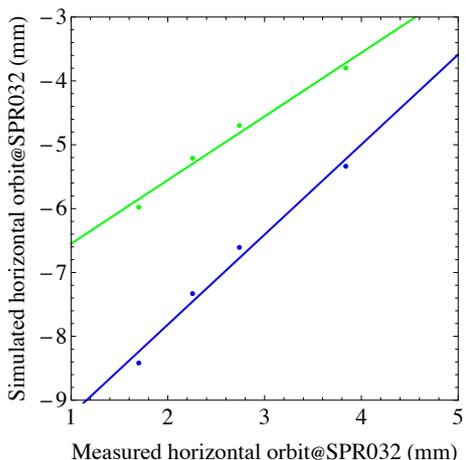


Figure 4: Comparison between measured horizontal orbit and simulated horizontal orbit at J-ARC section. Blue shows measured orbit vs. simulated orbit (Yokoya wake). Green shows measured orbit vs. simulated orbit (Scaled Yokoya wake so as to match CST wake at center of a beam).

Table 1: Basic Parameter Set

Parameter	Value	Unit
Charge	5	nC
Initial emittance	10	μ m
Initial σ_z	3/2.35	mm
Initial δ	0.004	-
# of initial particles	10000	-
Distribution	Gaussian	-
S-band accelerator aperture	ϕ 20	mm

としても結果に大きな影響は及ぼさない。これは、4極磁石がミスアライメントすることによって生じる軌道の方が10倍程度大きいため、これによる影響が支配的なためである。Cセクター以降は、レーザーPDによってレーザー軸に対するミスアライメントが各セクター10~20カ所程度の場所で測定されている[13]。そこで、各PD間の4極磁石、加速管のミスアライメントは、それらのPDで測定されたミスアライメントを線形補完した値とする。また、電磁石の最大磁場を超えないように調整は行われる。

オフセットインジェクションは、Aセクターの熱電子銃とフォトカソードRF電子銃のラインが交わった直後のステアリング、Cセクター初めのステアリングの2カ所で行う。本レポートでは、特に断らない限りエミッタンスはRMS規格化エミッタンスを指すものとする。表1はシミュレーションの基本パラメータであり、 δ は相対的運動量偏差を表す。加速管のアーチャー ϕ 20mmを超えた粒子は、ロスしたものとして扱う。

4. エミッタンス成長

低エミッタンス調整後における粒子トラッキングシミュレーションの結果の1つを図5に示す。ただし、この結果には電磁石の磁場ジッターやビーム変動は含ま

れていない。図の青と赤は、それぞれ水平、垂直方向のパラメータを表す。図5の上から順に、エミッタンス、通過した粒子数、ビームの軌道、4極磁石の水平ミスアライメント、加速管の水平ミスアライメント、ステアリング磁石のK値をビームラインに沿ってプロットしたものである。水平エミッタンスは、大きなディスパージョンが発生するJ-ARCで一時的に増加する。入射器終端部にて水平/垂直エミッタンスは24/10 μ mであり、目標とする値である40/20 μ m以下を満足する。

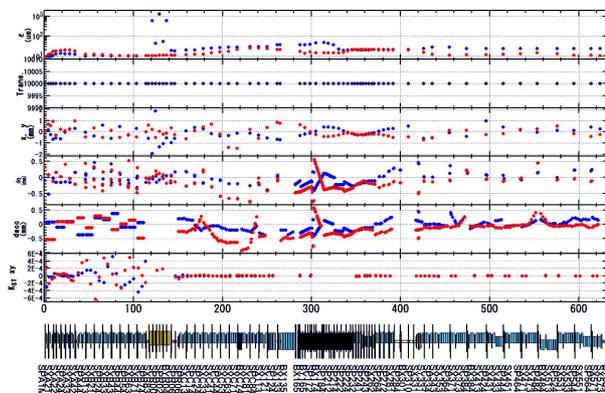


Figure 5: An example of simulation settings and results.

図5の設定を基本に、磁石の磁場ジッターやビーム変動を与えてシミュレーションを行った。磁石の磁場ジッターとしては、4極磁石とステアリング磁石の設定可能な磁場最大強度に対して、それぞれ 8×10^{-4} and 10^{-4} のジッターをpeak to peakで与えた。これらの値は、それぞれの電源に要求されている精度である。また、6次元ビーム変動として次の量をガウス分布で与えた。 $\{dx, dx', dy, dy', dz, d\delta\} = \{10 \mu\text{m}, 1 \mu, 10 \mu\text{m}, 1 \mu, 0.03 \text{ mm}, 0.03\%\}$ ここで、ビーム位置、角度ジッター(dx, dx', dy, dy')はAセクターのBPMにて実測した値と同程度の量を設定した。また、ビーム進行方向の位置ジッター(dz)は、要求されている加速管の位相安定度と一致するように、ビーム進行方向の相対的運動量偏差は $d\delta$ はJ-ARCにおける相対的運動量偏差と一致するように設定した。図6は、これらのジッターが存在するときのエミッタンスの計算結果を表しており、50ショットのエミッタンスをプロットしたものである。緑点はジッターとして6次元ビーム変動のみ存在する場合、青点は4極磁石の磁場ジッターのみ存在する場合、黄点はステアリング磁石の磁場ジッターのみ存在する場合、赤点はこれら3種のジッターが存在する場合の入射器終端部のエミッタンスを表している。ジッター込みのエミッタンスを50ショットのビームの全粒子から求めると、ビーム変動のみの場合27/15 μ m、4極磁石の磁場ジッターのみの場合37/16 μ m、ステアリングの磁場ジッターのみの場合54/22 μ m、これら3種のジッター存在下では74/28 μ mとなる。ステアリングの磁場ジッターの影響が支配的であり、エミッタンスへの影響を抑えるために、より適切なディスパージョンの抑制や β 関数のマッチングが必要と考えられる。それでも目標エミッタンスに届かない場合、ステアリング磁石用の高精度な電源を新たに用意する必要がでてくる。

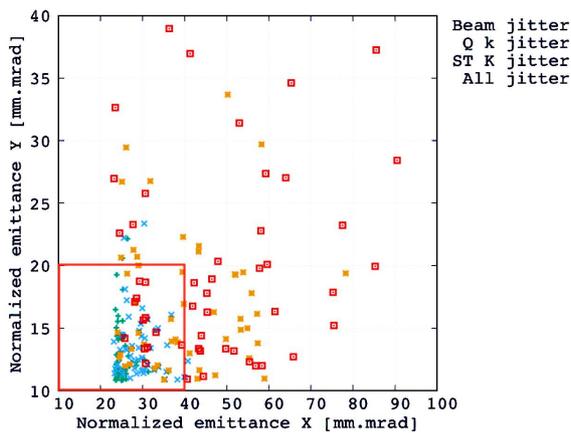


Figure 6: Emittance growth by beam, quadrupole, and steering jitters.

5. ビーム変動の原因調査

ビーム位置ジッターが存在する場合、バンチごとに軌道がふらつくためビームのエミッタンスがバンチごとにジッターすることになる。そのため、ビーム変動の抑制は低エミッタンス調整に欠かせない。図7の上図は入射器の各BPMで実測したビーム位置ジッターであり、下図は各BPMにおけるビーム位置と電荷の相関係数を示したものである。青、赤が、それぞれ水平、垂直を表している。入射器ではビームにエネルギーを与えながら輸送するため、ジッター要因がなければ β 関数などにも依るが基本的には断熱効果によりビーム位置ジッターも小さくなるはずである。そのためビーム輸送の際に目に見えて位置ジッターが増加していれば、そこに何らかの原因が存在するはずである。150m部のJ-ARCでは、ディスパージョンがおよそ0.8m存在するためバンチごとのエネルギージッターが軌道ジッターとして見えていると考えられる。エネルギージッターに換算すると、この測定では0.1%となる。J-ARC後の位置ジッターが増加しており、ディスパージョン漏れが疑われる。J-ARC前後でバンチごとのエネルギージッターが不変と仮定するとおよそ0.04mのディスパージョン漏れが存在していたことになる。また、陽電子ターゲット前後のSP15TとSP165の間で位置ジッターが増加していることがわかる。リングに電子ビームを輸送する際は陽電子ターゲットの穴に電子ビームを通すが、その穴の直径が2mmと若干小さい。図7の下図では、陽電子ターゲット前後にて相関係数が大きく増加していることがわかる。そのため、ターゲット穴でビームが削れてビームの位置がジッターしているように見えていると考えられる。以上から、位置ジッターを減らすためにはJ-ARC後のディスパージョン漏れをなくすことやバンチごとのエネルギージッターを抑えることが有効であると考えられる。ターゲット前の位置ジッターを抑制できれば、ターゲットによる位置ジッターの増加も抑えられるはずである。

ビーム位置のドリフトについても原因調査を行った。図8の上図は、数時間のAセクター（上流部）の地上温度とHV(High Voltage)ステーションの温度をそれぞれ緑、赤で示したものである。温度測定と同時にビーム位置も測定しており、その結果が図8の中図になる（BPM

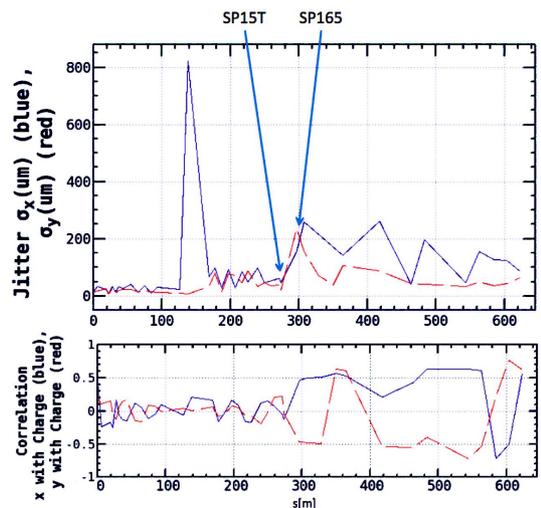


Figure 7: Beam position jitter in the linac and correlations between beam positions and charge. Blue and red show horizontal and vertical correlations, respectively.

は無作為に選択)。温度とビーム位置を比較すると、温度の動きとビーム位置のドリフトが相関を持っているように見える。実際にこれらの各BPMにおける相関係数を示したものが図8の下図になる。これらの3つの図は、図8の上図、中図の測定時間を3分割して、それぞれ温度と位置の相関をとったものである。青、赤が、それぞれ水平、垂直を表しており、3つの相関係数図の左端が測定序盤、右端が測定終盤を表す。測定序盤では、HVステーションの温度が安定しているためビーム位置との相関係数は小さい。しかし、HVステーションの温度が揺らぎ出した中盤、終盤においては相関係数が大きくなっているのがわかる。そのため、HVステーションの温度が軌道ドリフトに大きく寄与していることが明らかになった。現在、HVステーションの空調の見直しが進められている。

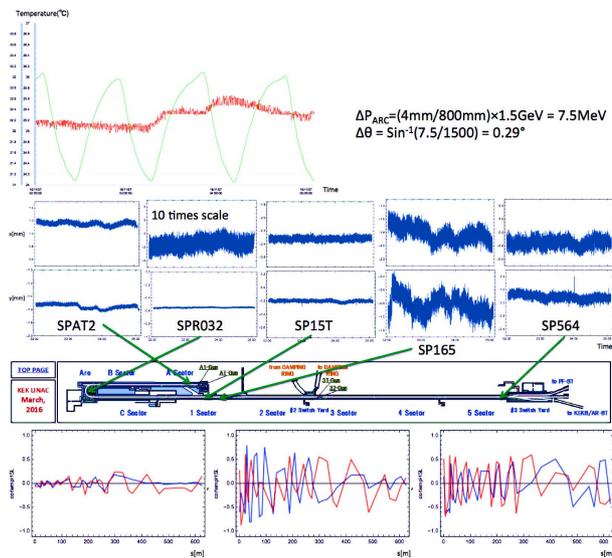


Figure 8: Temperature around electron gun, beam position jitter, and these correlations.

6. まとめ

現実的なマシンエラー、ビーム変動の下、SuperKEKBへ輸送される電子ビームのエミッタンスを粒子トラッキングシミュレーションを行い評価した。4極磁石と加速管のミスアラインメントは、A~Bでは0.2mm、J-ARC部では0.1mmのミスアラインメント、C~5セクターはレーザーPDによる測定値を用いた。また、ステアリング磁石、4極磁石の磁場ジッターは、それぞれの最大磁場に対して0.01%、0.08%を設定し、6次元ビーム変動として、 $\{dx, dx', dy, dy', dz, d\delta\} = \{10 \mu\text{m}, 1 \mu, 10 \mu\text{m}, 1 \mu, 0.03 \text{ mm}, 0.03\%\}$ を仮定した。これらの条件下において、ステアリング磁石の磁場ジッターによるエミッタンス増大が支配的であり、この影響を抑制しない限り要求エミッタンスを満たせないことが示された。これを抑制するためには、より適切なディスパージョン漏れを抑えるマッチングや軌道調整、 β 関数のマッチングなどが必要と考えられるが、それでも要求を満たせない場合はステアリング磁石の電源をより高精度な物に交換する必要がある。

ビーム位置ジッターは、位置ジッターによる入射効率の低下だけでなくバンチごとの軌道が変化することでエミッタンスジッターも引き起こす。実測した位置ジッターから、J-ARC後、陽電子ターゲット後に急激にジッターが増加していることがわかった。それぞれ、J-ARC後のディスパージョン漏れ、ターゲット穴でのビームロスが原因であることを示唆する結果を得た。この位置ジッターの低減には、ディスパージョン漏れの抑制が効果的と考えられる。また、ビーム位置ドリフトには電子銃室のHVステーションの温度が大きく依存していることが判明したため、空調の見直しが進められている。

7. 謝辞

This work was partly supported by JSPS KAKENHI Grant Number 16K17545.

参考文献

- [1] KEKB Design Report, KEK Report 95-7.
- [2] K. Furukawa *et al.*, "PROGRESS OF 7-GeV SuperKEKB INJECTOR LINAC UPGRADE AND COMMISSIONING", presented at IPAC2017, Copenhagen, Denmark, paper TUPAB004.
- [3] L. Zang *et al.*, "KEKB LINAC WAKEFIELD STUDIES OF COMPARING THEORETICAL CALCULATION, SIMULATION AND EXPERIMENTAL MEASUREMENT", in *Proc. of IPAC2011*, San Sebastian, Spain, paper MOPS058.
- [4] H. Sugimoto *et al.*, "DESIGN STUDY ON KEK INJECTOR LINAC UPGRADE FOR HIGH-CURRENT AND LOW-EMITTANCE BEAMS", in *Proc. of IPAC2012*, New Orleans Louisiana, USA, paper TUPPC021.
- [5] S. Kazama *et al.*, "EMITTANCE PRESERVATION IN SUPERKEKB INJECTOR", in *Proc. of IPAC2015*, Richmond, VA, USA, paper MOPWA053.
- [6] Y. Seimiya *et al.*, "EMITTANCE GROWTH BY MISALIGNMENTS AND JITTERS IN SUPERKEKB INJECTOR LINAC", in *Proc. of IPAC2016*, Busan, Korea, paper THPOR040.

- [7] K. Yokoya, "Short-Range Wake Formulas for Infinite Periodic Pill-Box", 1998.
- [8] K. Bane, LCC-0116, SLAC-PUB-9663, March, 2003.
- [9] CST home page; <https://www.cst.com>
- [10] Strategic Accelerator Design(SAD) home page; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [11] A. W. Chao and B. Richter, *Nucl. Instr. Meth. A* 178, 1 (1980).
- [12] M. Masuzawa *et al.*, "BEAM-BASED CALIBRATION OF BEAM POSITION MONITORS AND MEASUREMENTS OF THE SEXTUPOLE MAGNET OFFSETS AT KEKB", in *Proc. of EPAC2000*, Vienna, Austria, paper 1780.
- [13] T. Suwada *et al.*, "Real-time observation of dynamic floor motion of the KEKB injector linac with a laser-based alignment system", *PRST-AB*, 20, 033501 (2017).