

SuperKEKB コミッショニングにおけるビーム光学の調整 BEAM OPTICS TUNING IN SUPERKEKB COMMISSIONING

杉本寛*, 大西幸喜, 森田昭夫, 小磯晴代

Hiroshi Sugimoto*, Yukiyo Onishi, Akio Morita, Haruyo Koiso
High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

SuperKEKB is an electron-positron collider opens a new luminosity frontier. We started the second stage of beam commissioning named Phase 2 on March 19, 2018 and successfully finished on July 17, 2018. The first beam collision in SuperKEKB is observed on April 26 after a series of machine tuning. One of the most important task in Phase 2 is a verification of novel collision scheme named nano-beam scheme, in which the vertical betatron function at the interaction point is much smaller than the bunch length of the beam. Beam optics correction performs a key role in both low emittance tuning and squeezing the betatron function at the interaction point. We have squeezed the vertical betatron function down to 2 mm in both rings finally in Phase 2. However, the minimum betatron function in collision operation is 3 mm due to the limited time of commissioning duration. The achieved peak luminosity is $5.6 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, and no fundamental difficulties are found so far. We report in this paper the strategy and performance of optics correction in Phase 2.

1. はじめに

SuperKEKB [1] は 7 GeV の電子リング (HER) と 4 GeV の陽電子リング (LER) のから構成される衝突型円形加速器である。設計ピークルミノシティは前身の KEKB 加速器 [2] の 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。ビームコミッショニングは三つの期間 (Phase 1,2,3) に分けられている。2016 年の 2 月から 6 月にかけて実施された Phase 1 はビーム衝突のない調整期間であり、各種機器の立ち上げ、ビームパイプの真空焼きだし、低エミッタンス調整などが行われた [3]。Phase 1 終了後、ビーム最終収束系のインストール期間を経てコミッショニングの第二段階である Phase 2 を 2018 年 3 月から開始した [4]。

SuperKEKB では砂時計効果を抑えつつ衝突点でのビームサイズをバンチ長以下に絞るためにナノビーム

スキーム [5] を採用している。ナノビームスキームによるビーム衝突は世界初の試みであり、その原理検証は Phase 2 の主要な目標の一つである。そのためには衝突点の垂直方向のベータ関数 β_y^* をバンチ長 (約 6 mm) より小さい値まで絞り込むための調整が必要である。またナノビームスキームで高ルミノシティを達成するためには低エミッタンスビームが必須であり、同様に低エミッタンス調整も重要な課題となる。

Figure 1 に両リングの $\beta_{x,y}^*$ (設定値) の履歴を示す。我々はまずビーム蓄積の確認を目的とした比較的ベータ関数の大きいビーム光学系で運転を開始した。ビームの蓄積を確認後 $(\beta_x^*, \beta_y^*) = (200, 8)$ mm のビーム光学系に対して調整を行い 4 月 26 日に SuperKEKB として初めてのビーム衝突を確認した。その後、ナノビームスキームの検証を目指しベータ関数を段階的に絞っていった。

Phase 2 で最終的に到達できた最小ベータ関数は両リングとも $\beta_y^* = 2$ mm である。ビーム衝突実験に関しては $\beta_y^* = 3$ mm まで絞った状態で比較的安定に運転が行えることを確認した。到達ピークルミノシティは $5.6 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。ピークルミノシティの向上のためにはビーム電流の増加も含めてさらなる衝突調整が必要であるが、今のところナノビームスキームに原理的な困難は見つかっていない。

本論文では Phase 2 におけるビーム光学パラメータの測定及び補正の結果に関して報告する。全てのビーム光学計算は加速器用総合計算コード SAD (Strategic Accelerator Design) [6] を用いて行った。

2. ビーム光学関数の測定

HER 及び LER にはそれぞれ約 450 台の四極電磁石が設置されており、それら全ての直近にビーム位置モニタ (BPM) が据付けられている [7]。BPM の原点は直近の四極電磁石もしくは六極電磁石の磁場中心を通す様にビームを使って校正されている [7-10]。この原点校正によってビームが磁場中心を通る様に軌道を監視及び補正する

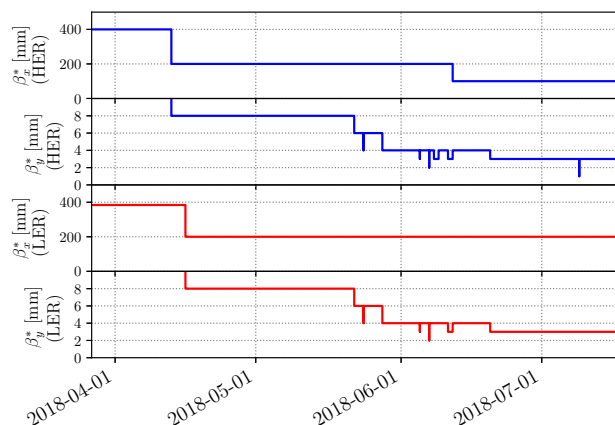


Figure 1: History of beta squeezing during Phase 2.

* hiroshi.sugimoto@kek.jp

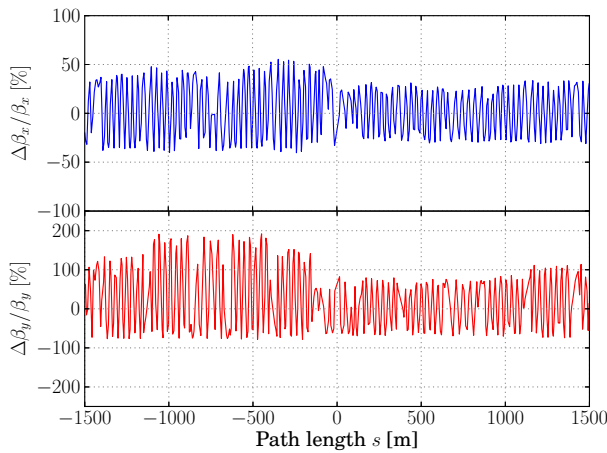


Figure 2: Measured beta-beating before optics correction at the early stage of LER commissioning, where the interaction point is located at $s = 0$.

ことが可能となり、四極磁場や六極磁場のオフセンターを通ることで発生する無用なビーム軌道や光学の乱れを最小限に抑えることができる。

ここではベータ関数、分散関数、ベータトロンカップリング (XY 結合) の測定方法に関して簡潔に述べる。ベータ関数はステアリングによる閉軌道の応答を解析することで求める [11]。測定には水平方向、垂直方向それぞれ 6 種類の異なる軌道応答を用いた。分散関数の測定は加速空洞の周波数を基本周波数 509 MHz に対して ± 500 Hz 程度変化させ、そのときの軌道変化率及び運動量圧縮率の設計値から評価する。XY 結合は 4 つの光学パラメータ $r_{1,2,3,4}$ によって定式化できるが、閉軌道の応答から精度よく決定することは容易でない。そこでステアリングでビームを水平方向に蹴ったときに発生する垂直方向の軌道とその加速器モデルによる予測値との差 ($\Delta y = \Delta y^{\text{meas}} - \Delta y^{\text{model}}$) を XY 結合のエラーの指標にする。

Figure 2 に Phase 2 のごく初期のビーム光学補正前の LER のベータ関数の測定例を示す。この例から分かる様にビーム光学補正の前のベータ関数は非常に大きく乱れている。Phase 2 運転ではビーム入射や衝突調整の間にビームが最終収束電磁石 (QCS) のコイルに当り QCS のクエンチを引き起こすという問題に直面した。この問題に対して粒子検出器 (Belle II) へのバックグラウンド低減のために設置されている可動式のコリメータを狭めることで対処した。ベータ関数の絞り込みを進めると、その平方根に比例しコリメータを狭めていく必要があるためより入射条件が厳しくなる。QCS のクエンチを最大限防いだ上で入射効率を確保するためには入射調整だけでなくリングのビーム光学の補正が非常に重要であった。ベータ関数の絞り込みも含めて何らかのビーム光学の変更時にはその都度ビーム光学を測定を行い、必要であれば補正を施した。

3. ビーム光学関数の補正

各 BPM での光学パラメータの測定値からなるベクトル χ^{meas} をその設計値 χ^{model} に補正するための調整パ

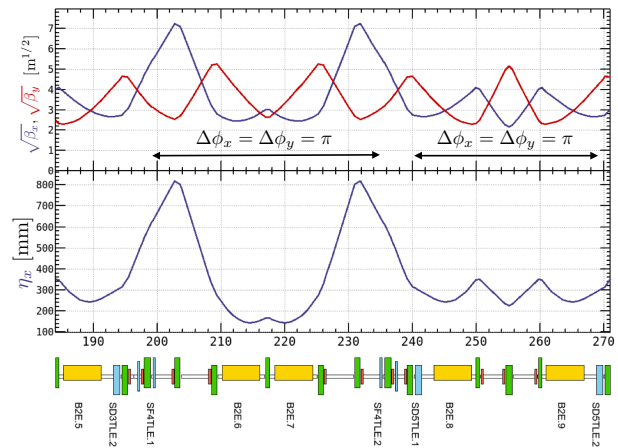


Figure 3: Design beam optics of the SuperKEKB arc section.

ラメータ (ノブ) の調整量のベクトル $\Delta \mathbf{k}$ を連立方程式

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{k} = -(\chi^{\text{meas}} - \chi^{\text{model}}) \quad (1)$$

を解いて求める。ここで \mathbf{A} は $A_{ij} = \partial \chi_i / \partial k_j$ からなる応答行列である。ここでは SAD で数値計算したモデル加速器の応答行列を用いて補正を行う。一般に行列 \mathbf{A} は正方行列ではない。従って、Eq. (1) を最小二乗の意味で解く。この際、一般化逆行列は行列 \mathbf{A} を数値的に特異値分解することで求める。

3.1 リング全体の大域的な補正

ベータ関数は全周の四極電磁石をノブとして調整することで補正する。SuperKEKB では補助電源を使うことでほぼ全ての四極電磁石をノブとして独立に制御できるが、Phase 2 では主電源単位のみで調整を行った。水平分散に関しては主に六極電磁石に水平方向のバンパ軌道が発生させることで調整を行う。XY 結合と垂直分散に関しては六極電磁石に巻かれた歪四極補助コイルを使って補正する。

Figure 3 に示したように SuperKEKB のアークセルは KEKB と同様に Noninterleaved Sextupole スキーム [12] が採用されている。六極電磁石ペア間のベータトロン位相が 180 度であると同時にペア間のベータ関数と分散関数が等しい設計となっている。従って、六極電磁石ペアに歪四極磁場を対称 (反対称) に励磁すると垂直分散 (XY 結合) がペア間に局在し、XY 結合 (垂直分散関数) の独立なノブとして使える。衝突点領域付近の外側のマシンエラー (主に六極電磁石の垂直方向設置誤差) による XY 結合と垂直分散の乱れに関しては、これらの独立ノブにより効率的に補正できる。

Phase 1 との違いは衝突点前後 ± 4 m のビーム衝突領域 (IR) の存在である。IR を含む直線部は筑波直線部と称され、QCS によって発生する巨大な色収差を補正するために局所色収差補正部が水平及び垂直方向に設置されている。局所色収差補正部の六極電磁石は磁場が強く、その点のベータ関数も大きいため、マシンエラーがビーム光学に与える影響が非常に大きい。従って筑波直線部の光学補正は SuperKEKB にとって非常に重要な調整項

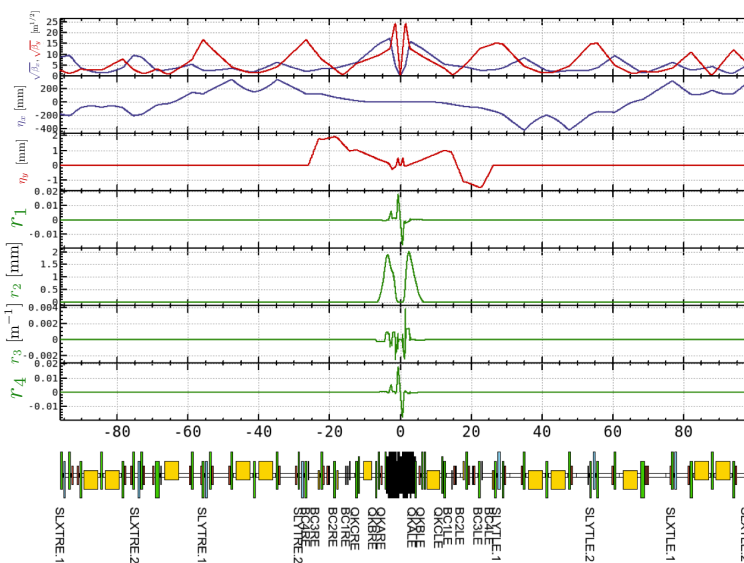


Figure 4: Design beam optics ($\beta_{x,y}, \eta_{x,y}, r_{1,2,3,4}$) of the Tsukuba straight section.

目である。Figure 4に LER の筑波直線部のビーム光学を示す。IR には粒子検出器が発生するソレノイド磁場が存在する。ソレノイド磁場による XY 結合と垂直分散を最小限に抑えるために、補償ソレノイドが設置されており、その分布は IR でのソレノイド磁場の積分値が消える様に最適化されている。IR 外側への XY 結合と垂直分散のマッチングには QCS の補正用歪四極コイルと IR 両側の歪四極電磁石及び垂直ベンドを使う。IR 近傍の XY 結合と垂直分散を補正するためにはこれらの歪四極電磁石を調整ノブとして使う。アーク部のノブと違い XY 結合と垂直分散の両方に影響を与えることに留意しなければならない。

ここでは両者を同時に補正するというアプローチをとる。具体的には垂直分散および XY 結合 (垂直方向の回り込み軌道) のモデル値からの残差の二乗和を $\Delta\eta_y^2, \Delta y^2$ とした場合に $\Delta\eta_y^2 + w^2\Delta y^2$ を最小にするノブの調整量を求める。ここで補正パラメータ w は XY 結合の補正の重みである。光学補正では Eq. (1) にパラメータ w を考慮した上で解く。重み w は経験的に決める必要があり、Phase 2 では $w = 500$ 程度の値に選んだ。

Figure 5 にビーム光学補正前後の HER 全周の XY 結合と垂直分散関数の残差 (設計値との差) を示す。XY 結合に関しては水平方向に発生したビーム軌道の二乗平均平方根 (rms) で規格化してある ($\Delta\tilde{y} = \Delta y / \Delta x^{\text{rms}}$)。同時補正により IR のビーム光学の乱れが他の領域と遜色ない程度まで補正できることが分かる。ベータ関数と水平分散に関しても四極電磁石を用いた同時補正が効果的であった。Figure 6 にビーム光学補正前後の LER 全周のベータビートと水平分散の残差を示す。Phase 2 における各種ビーム光学パラメータの補正結果を Table 1 にまとめる。

3.2 衝突点の光学調整

衝突点におけるビーム光学パラメータは原理的には近傍の BPM の値から推定することはできるが、衝突点は

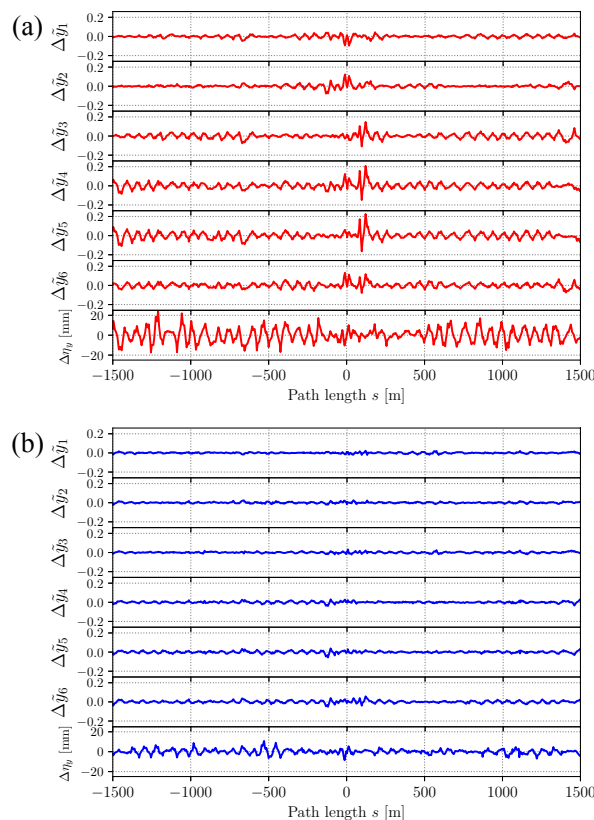


Figure 5: Measured XY-coupling and vertical dispersion function before (a) and after (b) optics correction in HER.

ベータ関数が小さいために精度に限界がある。また衝突点の光学パラメータの最適値は両ビームの軌道の相対的な関係によって変わり得る。従って最終的にはビーム衝突状態でリノシティやビームサイズを見ながら各種ノ

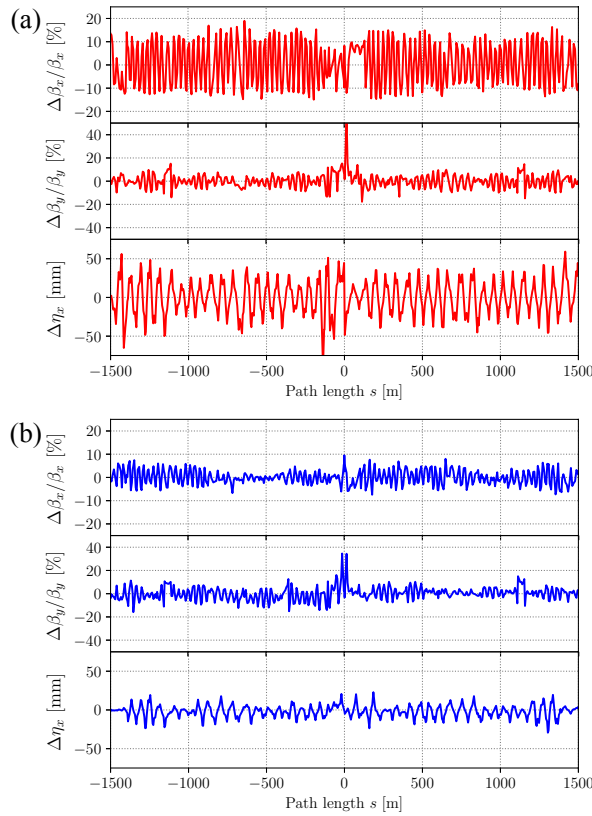


Figure 6: Measured beta-beating and horizontal dispersion function before (a) and after (b) optics correction in LER.

ブの最適値を探ることになる。

Phase 2 では β_y^* を 6 mm から 4 mm に絞ってもルミノシティが増大しないという問題に直面した。シンクロベータ共鳴やビームビーム不安定性も疑われたが、調査の結果、両ビームが幾何学的に設計通りに交差していないことが主な原因であることが示唆された。そのため大電流でルミノシティ調整を行う前にビームビーム効果が問題になりにくい低バンチ電流領域で衝突点の光学パラメータのスキャンを行った。主にはベータ関数が最小(ウェイスト)となるビーム進行方向の位置及び衝突点における XY 結合 (特に r_2 パラメータ) の調整である。衝突点の XY 結合は QCS の歪四極補正コイルの中で衝突点に最も近い左右 2 つのコイルの磁場を反対称に変えることで調整する。ベータ関数のウェイストの位置に関してはメインの四極磁場を同様に衝突点の左右で反対称に

Table 1: Summary of The Optics Correction

Optics parameter	LER	HER
$(\Delta\beta_x/\beta_x)^{\text{rms}}$ [%]	2	3
$(\Delta\beta_y/\beta_y)^{\text{rms}}$ [%]	4	3
$\Delta y^{\text{rms}}/\Delta x^{\text{rms}}$ [10^{-3}]	14	8
$\Delta\eta_x^{\text{rms}}$ [mm]	10	9
$\Delta\eta_y^{\text{rms}}$ [mm]	4	3

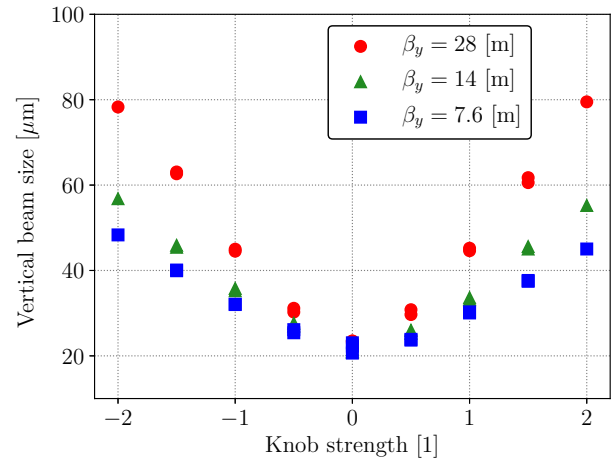


Figure 7: Vertical beam size of the electron beam as a function of strength of vertical dispersion knobs with three different beta functions at the X-ray source point.

変えることで調整する。これら衝突点の光学パラメータのスキャンを繰り返すことで、ルミノシティは徐々に改善していった。

3.3 垂直エミッタンス

SuperKEKB にはビームサイズ監視のために X 線ビームプロファイルモニタが両リングに各 1 台設置されている。Phase 1 において HER のビームサイズがビーム光学測定から推定される値より非常に大きいという問題があった。各種調査の結果、モニタシステムに何らかの要因による smearing 効果があり、それによって測定可能な最小ビームサイズが決まっていることが示唆された [13, 14]。Phase 1 から Phase 2 に向けて放射光取り出しラインの窓の交換など測定系の改良が行われた。その一方で、Phase 2 では X 線発光点のビームサイズを大きく変更してその挙動を調べるために一部の四極電磁石を転極した。この改造により Phase 2 ではより広範囲で X 線発光点のベータ関数を変えることが可能になった。

Figure 7 にビームスタディの結果の一例を示す。ビーム衝突を行っていない状態で既述のアーク部の歪四極を用いた垂直分散ノブを変えながらビームサイズを測定した結果である。測定は X 線発光点のベータ関数を $\beta_y = 28, 14, 7.6$ m の場合に行った。このスタディではベータ関数を変える度にビーム光学補正を行なった。発光点のベータ関数が大きくなることで確かに測定ビームサイズのノブに対する応答がより鋭くなることが分かる。ところが測定ビームサイズの最小値は β_y の値にはほとんど依存しない。

ビーム寿命測定なども含めた詳しいデータ解析によると少なくとも $6 \mu\text{m}$ 程度の smearing 効果があることが分かっている。Phase 1 の測定系では smearing 効果は $30 \mu\text{m}$ 程度と見積もられており、Phase 1 に比べて smearing 効果は減っていることが分かった [15]。Smearing 効果が $6 \mu\text{m}$ 以上であると考え、少なくとも電子ビームの垂直エミッタンスは 19 pm 以下であると言える。LER に関しても垂直分散ノブを変えた同様のスタディが

行われ、現在データの解析が進められている。

4. まとめ

SuperKEKB Phase 2 におけるビーム光学関数の調整に関して報告した。Phase 2 では世界初の試みであるナノビームスキームを検証するためにベータ関数の絞り込みを行った。ベータ関数の絞り込みは光学補正を行いながら徐々に行うことが肝要であった。我々は Phase 2 の期間中に β_y^* をバンチ長 6 mm に対して、 $\beta_y^* = 3$ mm で安定なビーム衝突を実現し、単独ビームでは $\beta_y^* = 2$ mm まで絞り込むことに成功した。

リング全体の大域的な光学補正はビーム光学パラメータがモデル加速器に近づく様に四極、歪四極磁場及びビーム軌道を調整することで行った。衝突点の光学パラメータの補正は低バンチ電流でビーム衝突を行い、ルミノシティおよびビームサイズを見ながらノブの最適値を探した。

Phase 1 で問題となった HER のビームサイズ測定に関して改良された測定系でスタディを行い、Phase 1 に比べて smearing の効果が $6 \mu\text{m}$ に改善されていることを確認した。この結果から電子ビームの垂直エミッタンスは少なくとも 19 pm 以下であると考えている。

謝辞

本研究の一部は、科学研究補助金 基盤研究 (C) 17K05475 により助成されています。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 03A011 (2013).
- [2] T. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 03A001 (2013).
- [3] Y. Funakoshi, in Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 24-28.
- [4] Y. Ohnishi, WEOLP01 "Report on SuperKEKB Commissioning in Phase 2" in these proceedings.
- [5] C. P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy, Mar. 16-18, 2006.
- [6] K. Oide, Nucl. Inst. Meth. A 276, 427 (1989).; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [7] M. Arinaga *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 03A007 (2013).
- [8] M. Masuzawa *et al.*, in Proc. of EPAC2000, Vienna (Austria, 2000), pp. 1780-1782.
- [9] M. Tejima, in Proc. of IBIC2015, Melbourne (Australia, 2015) pp. 267-272.
- [10] H. Sugimoto *et al.*, in Proc. of IBIC2017, Michigan (USA, 2017) pp. 141 - 145.
- [11] A. Morita *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 072801 (2007).
- [12] K. Oide and H. Koiso, Phys. Rev. E 47, 2010 (1993).
- [13] E. Mulyani *et al.*, in Proc. of IBIC2016, Barcelona (Spain, 2016) pp. 524 - 527.
- [14] H. Sugimoto *et al.*, in Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 24-28.
- [15] J. Flanagan *et al.*, (private communication).