

# SuperKEKB 入射器におけるミスアラインメント、ジッターによるエミッタンス増大

## EMITTANCE GROWTH BY MISALIGNMENTS AND JITTERS IN SUPERKEKB INJECTOR LINAC

清宮 裕史, 佐藤 政則, 諏訪田 剛, 肥後 寿泰, 榎本 嘉範, 宮原 房史, 古川 和郎

Y. Seimiya\*, M. Satoh, T. Suwada, T. Higo, Y. Enomoto, F. Miyahara, K. Furukawa

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

In SuperKEKB injector linac, photocathode RF gun is used as electron source for low emittance high-charged beam. Main reason of the electron beam emittance blow-up is generally induced by wakefield in acceleration cavities. Off-center charged beam in a acceleration cavity is affected by the wakefield depending on the offset size in the cavity and the beam emittance is increased. The emittance blow-up can be eliminated by appropriate steering magnet control so as to cancel the wake effect in the cavity. We perform particle tracking simulation with both misalignments (quadrupole magnet + acceleration cavity) and jitters (quadrupole and steering magnetic force + beam position). Emittance growth by the misalignments and the beam jitter is evaluated in this report.

### 1. 導入

SuperKEKB は素粒子物理実験のための電子陽電子コライダーであり、デザインルミノシティは KEKB[1] の 40 倍である  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}/\text{s}$  である。高ルミノシティのため、入射器では高品質ビームが要求される。SuperKEKB の Phase1 は 2016 年 2 月から 6 月まで行われ、想定されていた様々な機器やソフトウェアのチェック、真空焼きが大きな問題なく進められ、無事 Phase1 を終えた。2017 年秋からの Phase2 では、最終的に低エミッタンスビームが要求されているため、入射器では Phase2 が終わるまでに低エミッタンスビームの輸送を確立する必要がある。

Fig. 1 は SuperKEKB 入射器の概略図である。入射器は、A, B, J-ARC, 1~5 のセクターから成る。規格化エミッタンスとして、Linac エンドにて 20mm.mrad 以下が要求されている。Linac には 2 種類の電子銃が存在する。一つは、高電荷電子ビーム (10nC) を生成する熱電子銃であり、主に陽電子を生成する目的で用いられる。陽電子ビームは、セクター 1 でのタングステンターゲットに 10nC の電子を衝突させることで生成される。その後、陽電子は damping ring (DR) に輸送され、エミッタンスが減衰される。DR は Phase2 から稼働予定である。最終的に、陽電子は 4GeV まで加速され SuperKEKB の LER(Low Energy Ring) に入射される。もう一つのカソードは、光カソードの RF 電子銃であり、5nC の低エミッタンスビーム (20mm.mrad 以下) を SuperKEKB リングへ輸送する目的で用いられる。この低エミッタンスビームは 7GeV まで加速され、SuperKEKB の HER(High Energy Ring) に入射される。運転は 50Hz、96ns 間隔の 2 バンチで行われる。

HER に入射するための電子ビームには、陽電子のための DR のような強力なエミッタンス減衰要素がない。そのため、エミッタンスを保存するための研究が進められてきた [2, 3, 4]。エミッタンス増大は主に加速管内で生じる wake によって引き起こされる。ビームが加速管

の軸から外れた場所を通過する場合、そのオフセット量に依存した量だけバンチ先頭の電子から生じた wake によって後続の電子が蹴られるためエミッタンスが悪化する。こうしたエミッタンス悪化は、加速管の中心を通るような軌道をステアリングで探し出すことである程度抑制することができる。しかし、4 極磁石や加速管のミスアラインメントだけでなく、電磁石の磁場やビームのジッターによってもエミッタンスは増大する。我々は、現実的な 4 極磁石や加速管のミスアラインメント、4 極磁石、ステアリング磁石の磁場ジッター、ビーム位置ジッターによるエミッタンス増大の評価を行った。

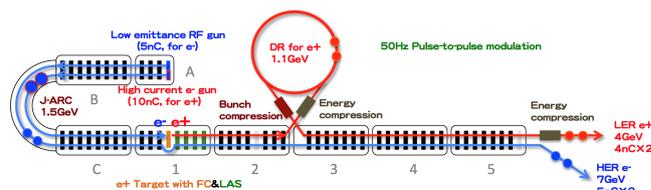


Figure 1: Schematic layout of the SuperKEKB injector linac.

### 2. シミュレーションの設定

SuperKEKB 入射器のセクター C からセクター 5 まで、加速管内の縦と横の短距離 wake 場 [5] を考慮したトラッキングシミュレーションを行った。短距離の wake 場のみを扱うのは、入射器で運転されるバンチ間隔が 96ns かつ S-band 加速管のみで構成されていることから、それ以上の中距離、長距離の wake 場を十分無視できるためである。このレポートでは、シミュレーションは Strategic Accelerator Design[6] で行われた。低エミッタンスチューニングの手順は以下に行った。

1. BPM の測定値が 0 となるようにステアリングを用いて軌道補正

\* seimiya@post.kek.jp

Table 1: Basic parameter set. Aperture values indicate the radius.  $\delta$  is relative momentum deviation.

Parameter	Value	Unit
Initial emittance	10	mm.mrad
Initial charge	5	nC
Initial $\sigma_z$	3/2.35	mm
Initial $\delta$	0.004	-
# of initial particles	40000	-
Distribution	Gaussian	-
S-band accelerator aperture	10	mm

- C セクター始めの 4 つのステアリングを用いて低エミッタンスとなるような値を探す (オフセットインジェクション)

入射器では、BPM のリファレンスポイントは Quad-BPM 法により 4 極磁石の磁場中心で較正されている [7]。シミュレーションは BPM と最寄の 4 極磁石が同じ量だけミスアラインメントしているとして行った。現実的には BPM のリファレンスポイントと 4 極磁石の磁場中心は、およそ  $50\mu\text{m}$  程度のずれがあることが 3BPM で確かめられている [8, 9]。後に図示するように軌道補正後の軌道はピークピークで  $\pm 2\text{mm}$  程度であるため、 $50\mu\text{m}$  という量が低エミッタンスチューニングへ及ぼす影響は十分小さい。軌道補正は、全 BPM の測定値の二乗和が最小になるようにステアリングの磁場値をセットすることで行った。オフセットインジェクションは低エミッタンスを実現できる手法の一つである [10]。エミッタンス増大の主な原因の一つは、加速管の中心からビームがオフセットすることでビームが wake 場によってオフセット量と進行方向の位置に依存して蹴られるためである。そのため一本の加速管のみを考えたとしても、オフセット量を 0 にするか、加速管の入口と出口のオフセット量が異符号になるようにステアリングを調整すれば良いことがわかる。つまり、オフセットインジェクションの目的は  $x, x', y, y'$  を 4 つのステアリングで変化させて wake によるエミッタンス増大を最小限に抑えられる軌道を見つけることにある。シミュレーションでは、5 セクター最後でのエミッタンスを見つつ、最小のエミッタンスとなるステアリング値を滑降シブレックス法で求めた。ここで、同じ架台に乗っている加速管 (4 本) は同じミスアラインメントを仮定した。また、ダブレット 4 極磁石についても同じミスアラインメントを仮定した。ステアリングについては、現実で設定可能なステアリングの最大磁場を超えないように調整を行った。Table 1 は、このシミュレーションにおける基本パラメータである。特に断らない限り、シミュレーションにはこの値を使うこととし、エミッタンスは入射器 END でのエミッタンスを表すこととする。

### 3. エミッタンス増大

目標とするエミッタンスは入射器 END で  $20\text{mm.mrad}$  以下である。エミッタンス補正は、軌道補正とオフセットインジェクションによって行われる。4 極磁石と加速管のミスアラインメントはガウス分布で与えており、

$3\sigma$  以下の値のみを採用している。本レポートでは、エミッタンスは RMS エミッタンスを用いており以下のように定義される。

$$\epsilon_x = \gamma\beta\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}. \quad (1)$$

この式内においては、 $\gamma$  と  $\beta$  はそれぞれローレンツ因子とローレンツ  $\beta$  を表す。

Fig. 2 は、RMS ミスアラインメントが  $0.3\text{mm}$  のときのシミュレーション結果の一例である。青と赤はそれぞれ水平、垂直パラメータを表している。この図の一番上から、それぞれエミッタンス、入射器 END までの通過粒子数、軌道、 $\beta$  関数、ディスパージョン、相対的運動量偏差、パンチ長、4 極磁石のミスアラインメント、加速管のミスアラインメント、ステアリング磁石の  $K$  値を表している。セクター 1 の中心付近からエミッタンスが増加しているが、これはその場所に設置してあるシケインによってディスパージョンが生じたためと考えられる。

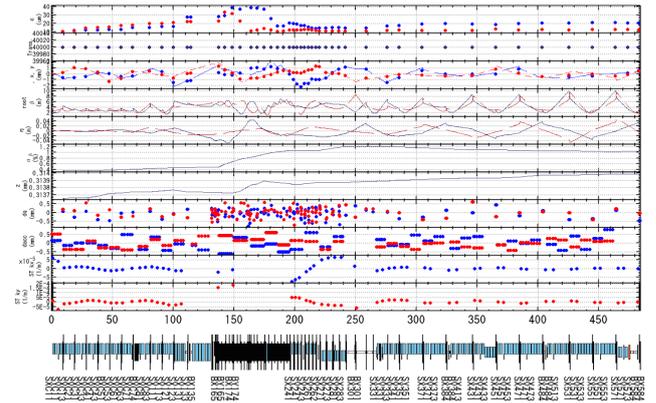


Figure 2: An example of beam parameters from sector C~5 with  $0.3\text{mm}$  RMS misalignment of quadrupole magnets and acceleration cavities.

#### 3.1 ミスアラインメント

RMS ミスアラインメントが  $0.1\text{mm}$ ,  $0.2\text{mm}$ ,  $0.3\text{mm}$  であるとき、それぞれについて 60 種のミスアラインメントセットについてエミッタンス補正を行った。このとき、ジッターは無いとした。ジッターについては次のサブセクションで扱う。Fig. 3 は水平エミッタンス vs. 垂直エミッタンスをプロットしたものであり、左図が 1 バunchの電荷が Phase2 時の  $2\text{nC}$ 、右図が Phase3 時の  $5\text{nC}$  の場合である。 $2\text{nC}$  時には  $0.3\text{mm}$  のミスアラインメントでもエミッタンス増大はほとんど問題にならないが、 $5\text{nC}$  時には大きく影響することがわかる。 $5\text{nC}$  の際、RMS ミスアラインメントが  $0.3\text{mm}$  の場合、エミッタンスが  $20\text{mm.mrad}$  を超えるものが存在する。一方、 $0.1, 0.2\text{mm}$  の場合、エミッタンスが  $20\text{mm.mrad}$  を超えるものは存在しない。そのため、Phase3 では少なくとも  $0.2\text{mm}$  程度以下に RMS ミスアラインメントを抑える必要があることがわかる。(十分密にステアリングが配置されていればエミッタンス成長を抑えることは可

能であるが、現実にはそうならないためどうしてもエミッタンス成長が生じてしまう。)

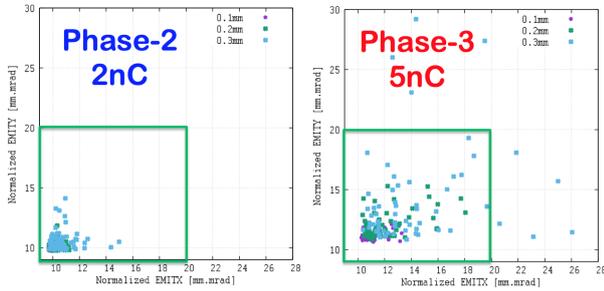


Figure 3: Emittance growth at the linac end for 60 random seed in each RMS misalignment in case of 2nC and 5nC.

Fig. 4 は、加速管もしくは4極磁石のRMSミスアラインメントを0.1mmに固定した際、固定しない方の値を0.1, 0.2, 0.3mmと変化させた時のエミッタンスをプロットしたものである。どちらもエミッタンス成長に寄与するが、4極磁石のミスアラインメントによるエミッタンス成長の影響が大きい。これは、4極磁石のミスアラインメントによって軌道が乱され、より大きな軌道をもつビームが加速管を通過してしまうためと考えられる。つまり、加速管と4極磁石の軸が一致していないと、エミッタンス成長してしまうと考えられる。

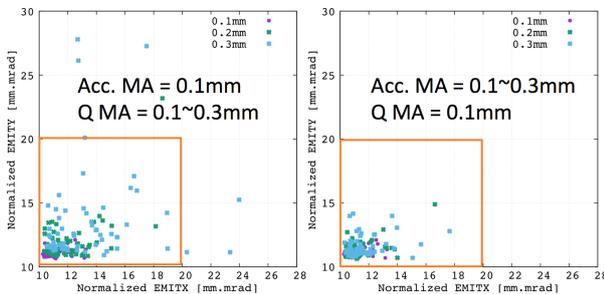


Figure 4: Emittance growth at the linac end for 60 random seed in each RMS misalignment in case that quadrupole or accelerator cavity misalignment is fixed to 0.1mm. "MA" is MisAlignment.

### 3.2 ミスアラインメントとジッター

100種のジッター(ステアリング、4極磁石の磁場ジッター or ビーム位置ジッター)について、前セクションと同様に60種のミスアラインメントにおけるエミッタンス補正を行った。与えたジッターの大きさは以下である。

- $K_Q$  値ジッター / 最大  $K_Q$  値 = 0.32% (peak-peak).
- $K_{ST}$  値ジッター / 最大  $K_{ST}$  値 = 0.08% (peak-peak).
- ビーム位置ジッター = 100 $\mu$ m (ガウス分布).

ただし、 $K_Q$  と  $K_{ST}$  はそれぞれ4極磁石、ステアリング磁石の  $K$  値を表す。

Fig. 5 は、ステアリングと4極磁石の  $K$  値のジッターが存在する場合のエミッタンスを示しており、黒点は100種のジッターのエミッタンス平均値を表したものである。赤ラインはさらに60種のミスアラインメントに対するエミッタンスの平均値をプロットしたものである。黄点はジッターがない場合の60種のミスアラインメントに対するエミッタンスの平均値である。4極磁石の磁場ジッターによる影響よりも、ステアリングの磁場ジッターによる影響が大きく、ジッター量も0.08%と小さいことから高精度なステアリング電源が必要となる。RMSミスアラインメントが0.2mmの際でも、上記のジッターが存在する場合20mm.mrad以下の達成が確実ではないことがわかる。

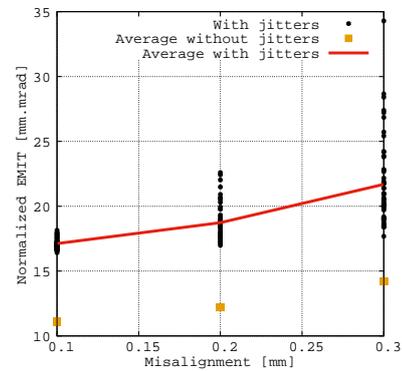


Figure 5: Emittance growth averaged for 100 kinds of jitters (K value) about 60 misalignment.

Fig. 6 は、ビーム位置ジッターが存在する場合のエミッタンスを示しており、黒点、赤ライン、黄点はFig. 5と同様である。図中の3つのヒストグラムは、それぞれのRMSミスアラインメントにおける60 $\times$ 100種のエミッタンスをヒストグラム化したものである。100種のジッターにおけるエミッタンス平均値を見る限り、ビーム位置ジッターが100 $\mu$ m以下ならばRMSミスアラインメントが0.2mmでもおおよそ達成できるように感じるが、ヒストグラムを見ると、ミスアラインメントが0.1mmでも分布の裾が20mm.mradを超えていることがわかる。先ほどのステアリング、4極磁石のジッターについても同様のことが言える。本レポートでは議論しないが、どの程度ならば20mm.mradを超えても許容されるのか今後調査を行う必要がある。また、ビームアングルジッターについては考慮していないため、許容ビーム位置ジッター量はより制限されると考えられる。これについても、今後調査予定である。

Fig. 7 は、電荷ジッターが2%存在する際のエミッタンスを示したものであり、黒点、赤ライン、黄点はFig. 5と同様である。赤ラインと黄点がほぼ同じであることから、2%程度の電荷ジッターによるエミッタンスへの影響は無視できる程度の小さいことがわかる。

### 3.3 測定されたミスアラインメント

入射器では、定期的に加速管を乗せる架台の位置変化をSiフォトダイオード(PD)で測定している。最近では要所要所に自動で架台の位置を測定する自動PDも導入され、年月によって架台がどのように動いている

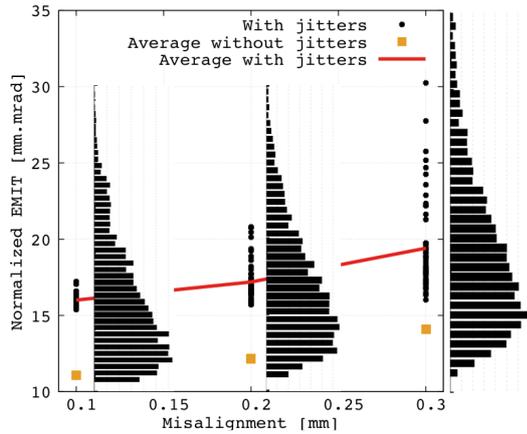


Figure 6: Emittance growth averaged for 100 kinds of beam position jitters in each 60 kinds of misalignments.

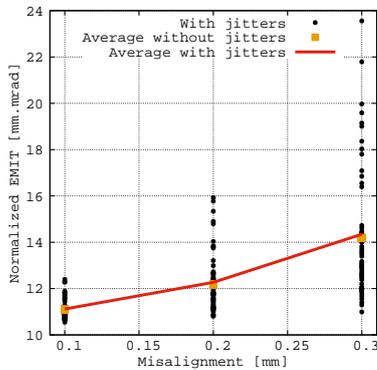


Figure 7: Emittance growth averaged for 100 kinds of bunch charge jitter in each 60 kinds of misalignments.

か測定が行われている [11]。Fig. 8 の左端の図は、PD から推定した加速管のミスアラインメントを表しており、横軸はセクター C からセクター 5 までの距離、縦軸がミスアラインメント量を表している。ここでは、例として 2015 年 4 月と 2016 年 1 月に行った 2 種を載せた。架台から見た加速管のミスアラインメントは、架台自体のミスアラインメント量より小さいと考えられるため、架台から見た加速管の RMS ミスアラインメントは 0.1mm と仮定しエミッタンス補正を行った。つまり、加速管の RMS ミスアラインメントは以下のように記述できる。

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{frame}^2 + \sigma_{ACC}^2}, \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{frame}$  は架台の RMS ミスアラインメント、 $\sigma_{ACC}$  は架台から見た加速管の RMS ミスアラインメントを表す。また、4 極磁石の RMS ミスアラインメントとして 0.2mm を仮定し、ジッターについては考慮していない。左から 2~4 番目の図は、上記のミスアラインメントが存在する際の水平 vs. 垂直方向のエミッタンスを表しており、100 種のミスアラインメント群についてプロットしたものである (黒点)。一方、セクターをまたいだジョイント部付近の架台において大きな位置変化が測定されており、どの程度の変化が許容できる

かを調査するためにジョイント部付近の架台のミスアラインメントを 2 倍、4 倍、8 倍にしてエミッタンス補正を行った。その結果が、それぞれ左から 2 番目、3 番目、4 番目の図の赤点に対応している。デフォルト、2 倍、4 倍の結果は、およそ 20mm.mrad 以下に収まっているが、8 倍の場合には 20mm.mrad を超えるものはいくつも確認できる。ジョイント部における加速管のミスアラインメントは、現状の 4 倍程度ならば許容できる可能性が高いことがわかる。

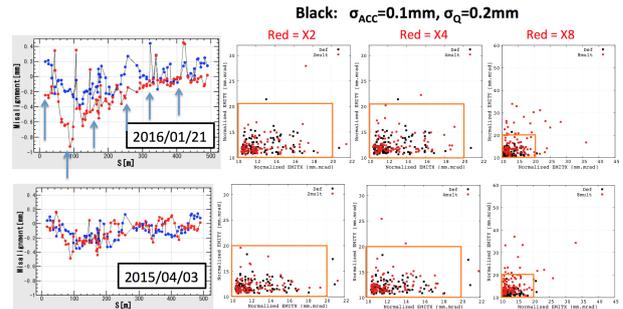


Figure 8: Frame position data measured by Photo-Diode (left-most) and emittance at the linac end in case of default measured misalignment, 2 times misalignment at the sector joint, 4 times misalignment at the sector joint, and 8 times at the sector joint.

#### 4. まとめ

4 極磁石と加速管にミスアラインメントが存在する場合、4 極磁石とステアリング磁石の磁場ジッター、ビーム位置ジッターが存在する場合の低エミッタンスチューニングシミュレーションを粒子トラッキングシミュレーションで行った。その結果から、目標であるエミッタンス 20mm.mrad 以下を達成するためには、少なくとも 4 極磁石と加速管の RMS ミスアラインメントが 0.2mm 以下であること、4 極磁石と加速管の中心軸が 0.2mm 以下で一致していること、ステアリングの磁場ジッターが最大磁場に対して 0.3% 以下であること、ビーム位置ジッターが 100 $\mu$ m 以下であることを満たす必要がある。本レポートのシミュレーションにおいては、ビームアングルジッターを考慮していないため、ビーム位置ジッターはさらに抑える必要があると考えられる。現在の入射器におけるビーム位置ジッターは 100~200  $\mu$ m であるため、位置ジッター減の特定と抑制が必須であり、現在調査が進められている。一方、電荷ジッターが 2% 程度存在してもエミッタンスへの影響は無視できるほど小さいことがわかった。PD 測定も積極的に進められており、現実に即したシミュレーションが可能となりつつある。

#### 5. 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] L. Zang et al., Proc. of IPAC2011, San Sebastian, Spain (2011).
- [3] H. Sugimoto et al., Proc. of IPAC2012, New Orleans Louisiana, USA (2012).
- [4] S. Kazama et al., Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, USA (2015).
- [5] K. Yokoya, " Short-Range Wake Formulas for Infinite Periodic Pill-Box ", 1998.
- [6] Strategic Accelerator Design(SAD) home page, <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [7] M. Masuzawa, et al., Proc. of EPAC2000, Austria Center Vienna.
- [8] T. Suwada et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440, pp.307-319 (2000).
- [9] M. Satoh, et al., Particle Accelerator Society of Japan, WEPS097, 2012.
- [10] A.W Chao, B. Richter Meth. A 178, 1 (1980).
- [11] T. Suwada, et al., Particle Accelerator Society of Japan, TUP134, 2016.