

## SuperKEKB 入射器におけるエミッタンス保存

### EMITTANCE PRESERVATION IN SUPERKEKB INJECTOR

風間 慎吾<sup>#,A)</sup>, 杉本 寛<sup>A)</sup>, 佐藤 政則<sup>A)</sup>, 吉田 光宏<sup>A)</sup>, 小川 雄二郎<sup>A)</sup>

Shingo Kazama<sup>#,A)</sup>, Hiroshi Sugimoto<sup>A)</sup>, Masanori Satoh<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>A)</sup>, Yujiro Ogawa<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Organization (KEK)

#### Abstract

Injector linac at KEK is now under the way to produce high current and low emittance beams for SuperKEKB. The target luminosity for SuperKEKB is 40 times higher than that of KEKB. Short-range transverse wakefield and dispersive effects at the linac cause an emittance growth, and longitudinal wakefield effect enlarges an energy spread of the beams. In this paper, we will report simulation studies of the emittance preservation issues and how to suppress the increase of the energy spread of the beams.

#### 1. はじめに

現在、KEK では SuperKEKB に向けた加速器全体のアップグレードが行われている。SuperKEKB では、KEKB の 40 倍という非常に高いミノシティを達成するために、低エミッタンス化によるダイナミックアパーチャーの減少とビーム寿命の減少が起こる。これに対応するため、電子陽電子入射器(図 1 参照)は高電荷・低エミッタンス化が求められており、電子ビームは電荷 5 nC、水平/垂直方向エミッタンス 50/20 mm-mrad、陽電子ビームは 4 nC、100/20 mm-mrad が要求性能となっている。表 1 は SuperKEKB の入射に必要な電子ビームの要求性能を示しており、SuperKEKB では、低エミッタンスを達成すると同時に、0.1%という非常に小さいエネルギー分散を実現する必要があることが分かる。電子源をフォトカソード RF 電子銃<sup>[1,2,3]</sup>に改造し、陽電子源にはダンピングリングの設置を行うことで、初期エミッタンスの改善は可能であるが、加速管からの横ウェーク場や四重極磁石のミスアライメントなどによりエミッタンスは悪化する。加速管からの横ウェーク場による横エミッタンスの増加は、バンチ長を短くすることで抑制可能であるが、一方でバンチ長を短くしすぎると縦ウェーク場によりエネルギー分散が生じる。このように、SuperKEKB の実現に向けて重要なパラメータであるエミッタンスとエネルギー分散は相反する関係になっており、マシンスタディーやシミュレーションに基づいた評価が必要不可欠である。本論文では、これらの現状について報告する。

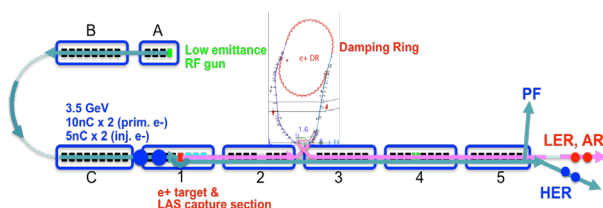


Figure 1: Layout of injector linac at KEK.

<sup>#</sup> shingo.kazama@kek.jp

Table 1: Required Parameters for SuperKEKB

	KEKB(e <sup>+</sup> /e <sup>-</sup> )	SuperKEKB(e <sup>+</sup> /e <sup>-</sup> )
Beam Energy [GeV]	3.5 / 8.0	4.0 / 7.0
Bunch Charge [nC]	1.0 / 1.0	4.0 / 5.0
Emittance [mm-mrad]	2100 / 300	20 / 20
Energy Spread [%]	0.1	0.1

#### 2. エミッタンス保存

##### 2.1 アライメント

SuperKEKB で要求されるエミッタンスを実現するために、入射器の各コンポーネントの設置精度としてローカルには  $\sigma = 0.1$  mm、グローバルには  $\sigma = 0.3$  mm が要求されている。入射器は最大直線部で 500m あり、グローバルなアライメントは、He-Ne レーザーを用いて計測が行われ、ローカルなアライメントは、レーザートラッカーを用いて計測されている<sup>[4]</sup>。A セクターから B セクターにかけての現在の四重極磁石のアライメントを図 2 の下部に示す。グローバルなミスアライメントとしては、最大約 1.5mm のズレが観測され、さらにローカルなミスアライメントとしては 0.5mm のズレが観測された。これは要求値に比べて非常に大きなズレであり、このミスアライメントの下では B セクターの終端部でのエミッタンス( $\epsilon_x/\epsilon_y$ )は、初期のエミッタンスのそれぞれ、5/2 倍にも悪化することが、elegant<sup>[5]</sup>を用いたシミュレーションにより判明した(図 2 上部)。エミッタンスを保存するためにどの程度までミスアライメントを減らさなくてはいけないのか調べるために、今のミスアライメントの形を保ったまま大きさだけを縮小させて、B セクターの終端部でのエミッタンスがどう変化するかシミュレーションにより求めた。図 3 は、B セクターの終端部でのエミッタンスをミスアライメントの縮小割合の関数で表したものである。AB セクターでのエミッタンス増加を 10-20%程度まで許すとすると、ミスアライメントは

現状の約 20%まで小さくしなければならないことが分かった。これを実現するために、現在水管傾斜計を用いた上下方向の位置測定とアクティブムーバーによる補正の検討を行っている。

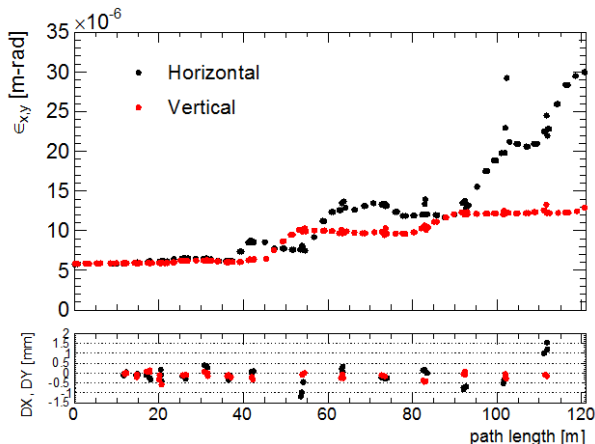


Figure 2: Emittance and the magnitude of misalignment of quadrupole magnets as a function of path length.

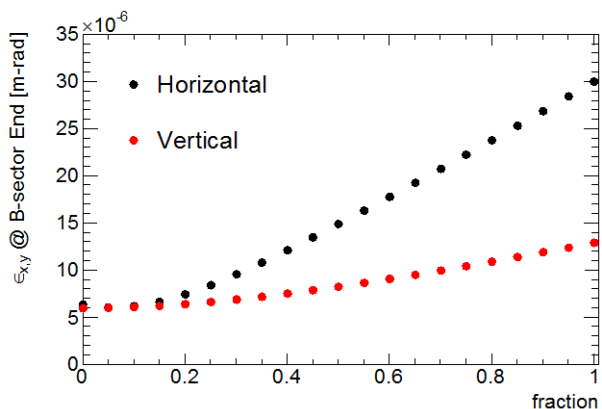


Figure 3: Emittance at the end of B-sector as a function of the fraction of the misalignment.

## 2.2 エミッタンスの電荷依存性

SuperKEKB に向けたコミッシュニング<sup>[6]</sup>の段階では、電子ビームの電荷量は要求値である 5nC へ向けて段階的に増加して行くため、エミッタンスの測定も様々な条件下で行われることが予想される。そのため、ある決まった電荷量のビームにおいて、横ウェーク場と四重極磁石のミスアライメントのどちらがよりエミッタンスの増加に効いているのか知ることはコミッシュニング時において重要であると考えられる。仮にミスアライメントを現状の約 20-60%程度まで低減させることができた場合、エミッタンスの増加に対する電荷量の依存性がどうなるのかシミュレーションを行い評価した。図 4 は、横ウェーク場の効果のみ、または四重極磁石のミスアライメントの効果のみを考慮した場合において、B セクター終端でのエミッタンスをビームの電荷量の関数で表し

たものである。低電荷では横ウェーク場によるエミッタンス増加は、ミスアライメントの効果に比べて小さいが、電荷量が 1nC を超えると横ウェーク場の効果がより顕著になってくることが分かった。

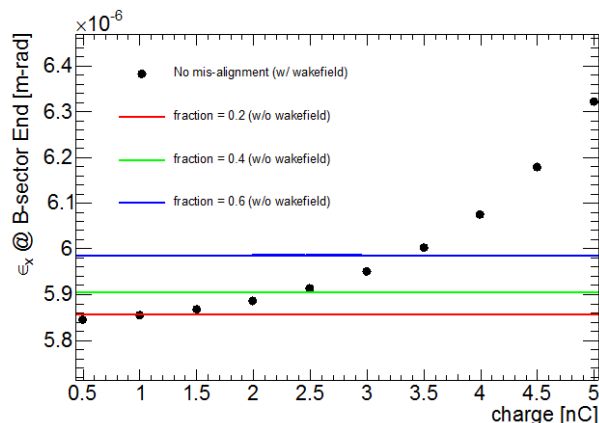


Figure 4: Emittance at the end of B-sector as a function of a beam charge.

## 3. エネルギー分散

### 3.1 縦ウェーク場によるエネルギー分散

バンチ長を短くすることで横方向エミッタンスの悪化を防ぐことができるが、短くしすぎると縦ウェーク場の影響でエネルギー分散が増大する。そこで、バンチ長を変化させたとき、C セクターから 5 セクターにかけてエネルギー分散がどの程度増加するかシミュレーションを行い確認した。図 5 はバンチ長と 5 セクター終端部でのエネルギー分散の関係を表したものである。

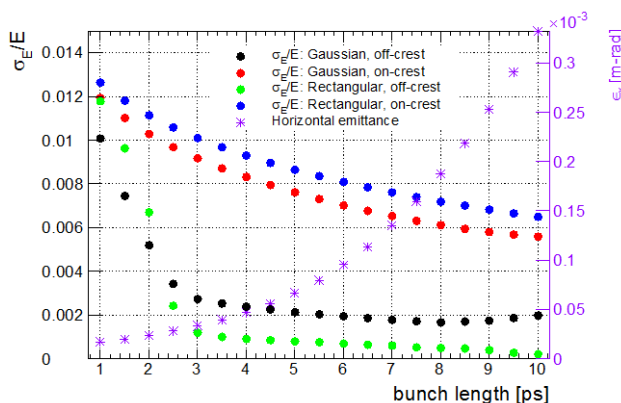


Figure 5: Energy spread and horizontal emittance at the end of 5-sector as a function of a bunch length.

図 5 に示されるように、時間方向の分布がガウシアンの場合、RF の位相を傾けても SuperKEKB の要求値である 0.1%という非常に小さなエネルギー分散を達成することは不可能であることが分かった。しかし、時間方向の分布をガウシアンから矩形波に変え、

更に RF の位相を傾けることでエネルギー分散を大幅に抑えることができることが分かった。ただし、RF の位相を傾けることは加速電圧の低下につながるため、加速電圧のマージンがどれだけ存在するのかによってどの程度位相を傾けることができるのかが決まる。図 5 から SuperKEKB のエミッタンスの要求値を満たすためには、バンチ長は 4ps 以下でなければならないことが分かるが、この場合 0.1% のエネルギー分散を達成するためには、RF の位相を約 35 度ずらす必要があり、加速エネルギーのマージンに換算すると 1GeV 程度余裕がなければならないことが分かった。

### 3.2 バンチ反転

加速エネルギーのマージンには現実的には限界があり、それで補填しきれないエネルギー分散は他の方法で相殺する必要がある。図 6 に表されるように、C セクターの先頭で予め逆のエネルギー分散をつけておくことで、5 セクター終端部でのエネルギー分散を相殺することができる。

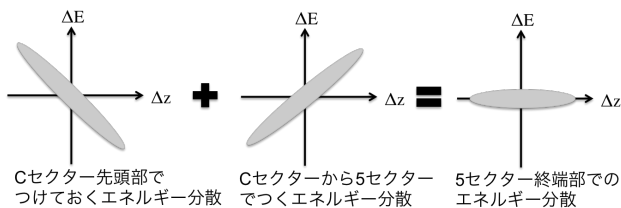


Figure 6: Mechanism that cancels the energy spread at the 5-sector end.

実際に C セクターの先頭で予め逆のエネルギー分散をつけて、C セクターから 5 セクターにかけて elegant を用いたトラッキングシミュレーションを行ったところ、図 7 に示されるように、エネルギー分散が減少して行く様子が確認された。シミュレーションの条件としては、C セクター先頭でのビームエネルギーとして 1.5GeV、ビームの時間方向の分布は矩形波(幅 4ps)を用いており、初期のエネルギー分散の量は、RF の位相をどれだけ傾けられるかに応じて変えてある。

### 3.3 エネルギー分散と J-Arc でのエミッタンス

C セクターの先頭部で 3.2 で述べたエネルギー分散をつける方法として、J-Arc にビームが入射する前までに予め図 8 に表される様なひだ状のパイプにビームを入射し、パイプの縦ウェーク場によってエネルギー分散をつける方法<sup>7)</sup>が検討されている。その際に問題となるのが、J-Arc 入射前でのエネルギー分散があまりにも大きいと J-Arc でエミッタンスが爆発的に増大してしまうことである。そこで、elegant を用いたシミュレーションにより、J-Arc で

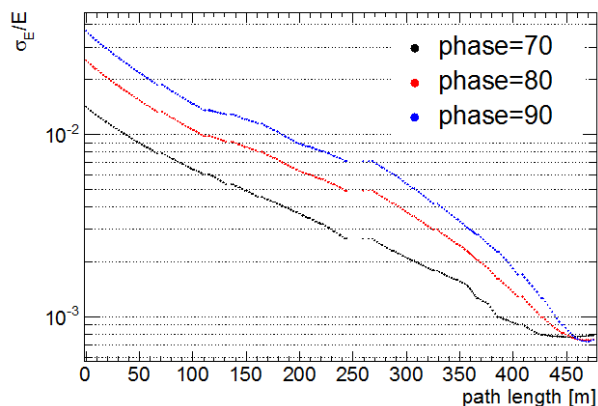


Figure 7: Energy spread of beams as a function of the path length.

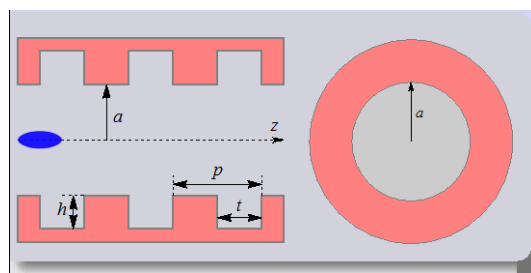


Figure 8: Schematic view of the corrugated pipe that will be used to make an energy spread of beams.

エミッタンスを保存するためには、エネルギー分散としてどの程度まで許されるのか確認を行った。図 9 は、J-Arc 終端でのエミッタンスを J-Arc 入射前でのビームのエネルギー分散の関数で見たものであり、SuperKEKB のエミッタンスの要求値を満たすためには、エネルギー分散は 3% 以下に抑えなければならないことが分かった。

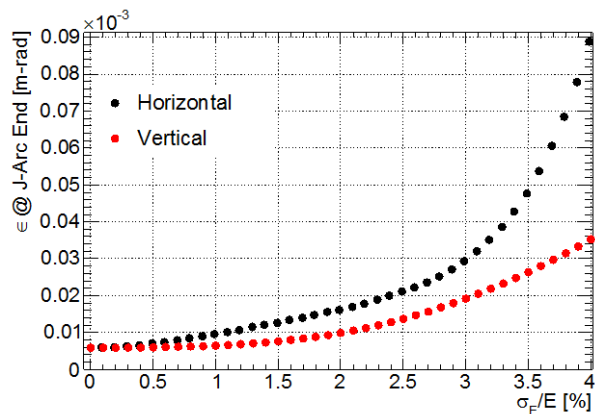


Figure 9: Emittance at the end of J-Arc as a function of an energy spread at the start of J-Arc.

## 4. まとめ

SuperKEKB の実現に向けて重要なパラメータであるエミッタンスとエネルギー分散は相反する関係になっており、*elegant* を用いたシミュレーションにより、それぞれ要求値を満たすための条件のスタディーを行った。エミッタンス保存のために重要な要素の一つであるミスアライメントは、現状の値が要求値よりも大きくズレており、将来的には現在の20%程度まで低減させる必要があることが分かった。0.1%という非常に小さいエネルギー分散を達成するためには、ビームの時間方向の分布は矩形波にする必要があり、さらにバンチ反転を行ってエネルギー分散を相殺させる必要があることが分かった。しかし、J-Arc でのエミッタンスの爆発的な増加を抑えるためには、許されるエネルギー分散には上限があり、J-Arc への入射される前までのエネルギー分散は、少なくとも 3%以下にする必要があることが分かった。

## 参考文献

- [1] Z. Zhou, et al., “Laser system upgrade for RF gun at SuperKEKB”, in these proceedings.
- [2] R. Zhang, et al., “Improvement of the laser system for RF-Gun at SuperKEKB injector”, in these proceedings.
- [3] T. Natsui, et al., “Commissioning of High-Charge, Low-Emittance, RF Gun for SuperKEKB”, in these proceedings.
- [4] S. Ushimoto, et al., “Present status of the alignment of KEK LINAC for SuperKEKB”, in these proceedings.
- [5] M. Borland, “*elegant*: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation”, Advanced Photon Source LS-287, September 2000.
- [6] M. Satoh, et al., “Present status of SuperKEKB injector linac commissioning”, in these proceedings.
- [7] P. Emma, et al., “Experimental Demonstration of Energy-Chirp Control in Relativistic Electron Bunches Using a Corrugated Pipe”, Phys. Rev. Lett. 112, 034801 (2014).