

KEKB 入射器におけるビーム軌道ジッターに基づくビーム安定性の研究

諏訪田 剛¹

高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

現在、KEKB 入射器は、順調に KEKB リングへの入射を行っている。これは、電子陽電子ビームの切替え時のパラメータの安定な再現性、また、ビーム軌道や rf 系のフィードバック及び幾つかのビーム監視システムを導入したことにより、徐々にビームの安定化がなされてきたことによる。しかしながら、入射中にビーム軌道を注視していると突然の軌道変動を見ることがあり、依然として原因不明な変動要因が存在しているものと思われる。本報告は、このように入射器のビーム安定性を高めるための新しい手法を紹介し、幾つかの解析結果を示す。

1. はじめに

加速器においてビーム安定性を如何に確保するかは重要な課題である。加速器の設計段階においては、要求されるビーム仕様に従い各構成要素の安定性は、技術的に検討され試験がなされている。しかしながら、加速器という1つの複雑な複合体として運転を行う上では、様々な予期しない不安定要素が入り込み、かつそれらが、構成要素に複雑に伝達して行き、最終的にはビーム不安定に至ってしまう。この場合、不安定要因が微小であるほど原因の特定が困難となる。特に、高エネルギー加速器の場合は、大型ゆえにその構成要素が多くなるので、不安定要因を突き止めるのは容易ではない。KEKB 入射器においても例外ではなく、予期しない原因不明なビーム不安定を見かけることがある。このようなビーム不安定に対し、どのようにアプローチし、原因を特定して行けばよいのかを議論してみたい。

2. ビーム変動要因の分類

加速器におけるビーム変動要因を捕える方法として、図1のような分類が考えられる。図1(a)は、変動要因を変動場所、変動速さ(周波数)、変動振幅の3次元座標で特定しようとするものである。変動速さは、パルス的(Full Rate)なものから、中間速さ(Middle)を経て、最終的には、季節変化に伴うような周期の長い変動の速さが考えられる。また、周期的ではないが、突然(ステップ的)に変化する(Step, Error Pulse)変動も考えられる。このように変動速度で変動要因を分類すると構成要素の特定に対し見

通しがよくなる。図1(b)は、構成要素を変動速度の大きさに分類したものである。このように、ビームの変動要因は、多技に渡るのでその原因特定は決して容易ではなく、ビーム変動を時間領域或いは周波数領域において、構成要素との相関を取ることにより地道に調べることが重要である。

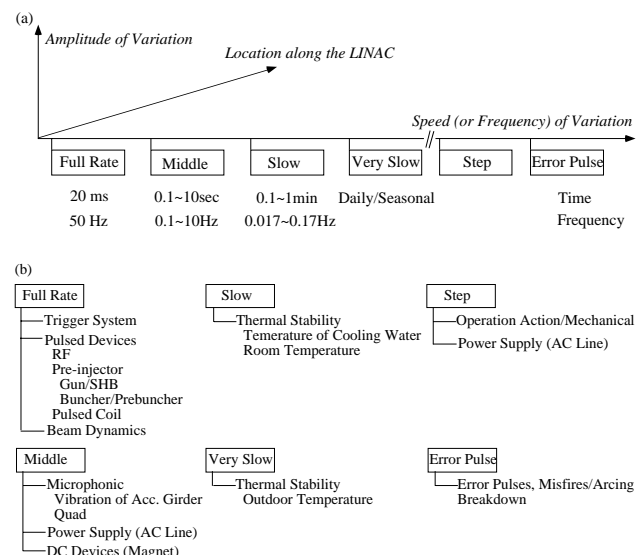


図1：ビーム変動要因の分類。図1(a)はビーム変動要因を変動場所、変動速さ(周波数)、変動振幅という3つのパラメータで3次元的に表したものである。図1(b)は、変動要因を与える構成要素を変動速さによって分類したものを示す。

3. ビーム安定性解析

3.1 ビーム軌道ジッターの測定

ここでは、変動要因として、パルス毎に生じるビーム軌道のジッターを取り上げることにする。パルス毎の軌道安定性を調べることは、前節で述べた構成要素の周期的変動やステップ的な変動、さらには、ウエーク場の影響も見えると予想され重要な指標を与える。ただし、入射器^[1]においては位置モニタ(BPM)の性能から、パルス毎(50Hz)のデータ取得は不可能なため、測定の速さとしては、中間速さ(2Hz)で変動要因を調べることになる。

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

3.2 軌道ジッターに基づく位相空間の解析

ビーム軌道は、多数の BPM により常に監視されているが、何らかの変動要因により常にジッターしている。この軌道ジッターを定量化するために、ジッターによるビーム軌道の位相空間上での拡がりを考える。この位相空間上で軌道ジッターの拡がりを面積として捕えそれをジッターエミッタンスと呼ぶことにする。BPM で計測するのは、あくまでビームの電荷重心なので、本来のビームエミッタンスを与えるのではないので注意する必要がある。しかしながら、ジッターエミッタンスとビームエミッタンスは、ジッターの源が上流にあればいずれ加速器のオプティクスに整合して行くのでお互いに相似的な相関があると考えられる。

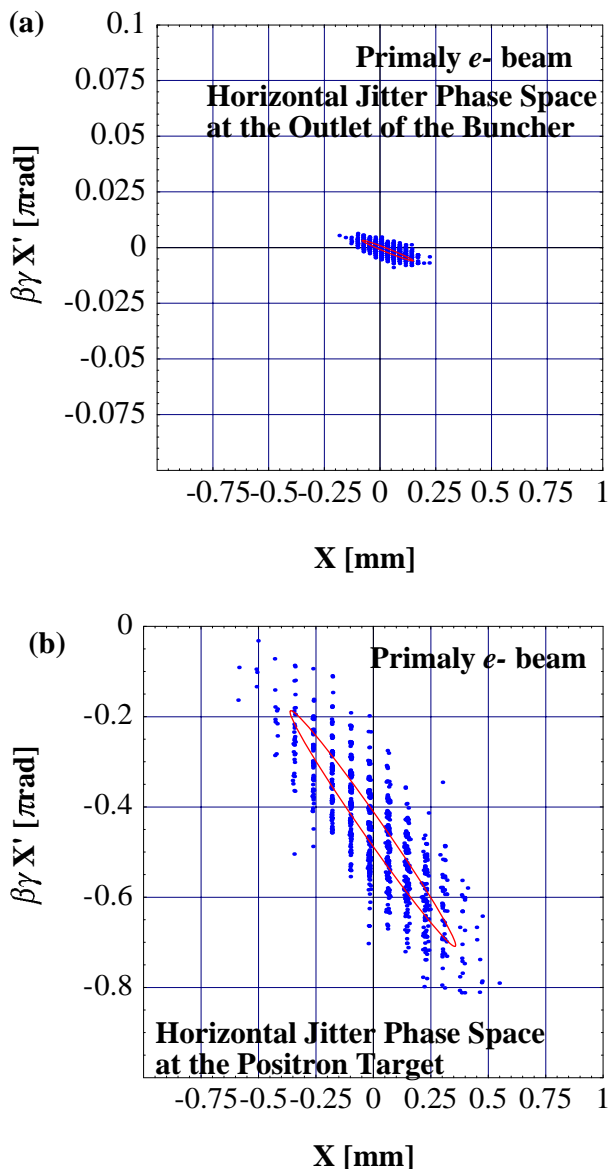


図2：陽電子生成用1次電子ビームの軌道ジッターの位相空間上での拡がりを表す。図2(a)はバンチャー出口での、図2(b)は陽電子ターゲット前の位置モニターでの計測結果を示す。

図2(a)は、入射器の大電流1次電子ビーム (~10nC/bunch) のバンチャー直後の BPM で測定した水平方向のジッターエミッタンスを、図2(b)は、陽電子ターゲット前のジッターエミッタンスをそれぞれ示す。測定は、2秒毎にデータ取得を行い、約40分間の蓄積データを示す。図中横軸は、BPM で測定した軌道ジッターによるビーム位置の変化を示し、縦軸は、軌道角度のジッターである。角度ジッターは、簡単のために、隣接する BPM との軌道位置の差を BPM 間距離で割ったものとしている。この取り扱いは、厳密ではないが(本来は、ラティスに基づき導出すべきである)、Q電磁石のキック角が大きくなり、かつ BPM 間距離が大きければそれほど間違っていない。また、ジッターエミッタンスのビームエネルギーによる規格化を考慮し、エネルギーを掛けている。図中の楕円は、2シグマの拡がりをもったエミッタンス楕円である。図中一定の測定点間隔が見えるのは、BPM の1ビット分解能 (0.08mm, BPM 位置分解能 $\sigma \sim 0.1$ mm) を表している。このように、ジッターエミッタンスは、明らかに増大しており、その増大率は、136倍にもなる。ちなみに、セクタB終端での増大率は、約40倍で、本来のビームエミッタンスの増大率(約10倍)に比べて大きい。

このジッターエミッタンスをビームライン長(入射部出口から陽電子ターゲットまで)を横軸としてその増大の様子をプロットしたものを図3に示す。各測定点は、50点の軌道測定データを用いてジッターエミッタンスを計算しプロットしたものである。

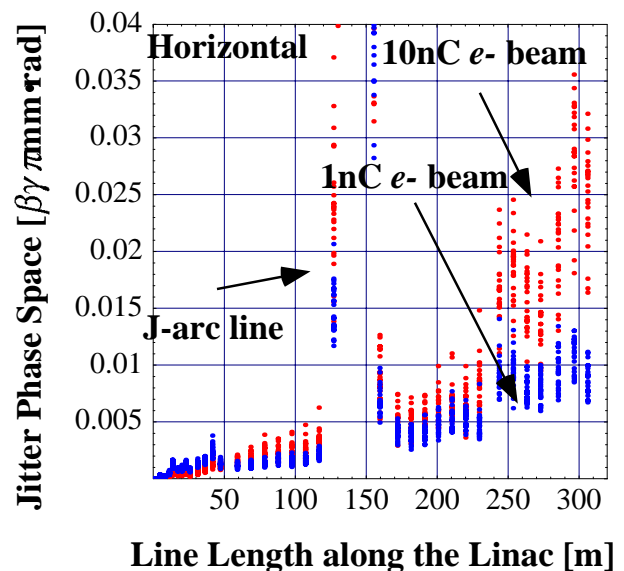


図3：バンチャー出口から陽電子ターゲットまでの1次電子ビーム(10nC)及び電子ビーム(1nC)の水平方向ジッターエミッタンスの変化の様子を示す。

図では、比較のために1nC電子ビームのデータも同時にプロットした。この図から明らかに大電流電子ビームに対しては、入射部出口から徐々にジッターエミッタンスが増大し、しかも1nC電子ビームに比べてその増大率は大きい。これは、最上流にジッ

ター源があり、横ウエーク場でさらにジッターが増幅された結果であると考えられる。図中 130m 付近からジッターエミッタンスがステップ的に増大しているのは、入射器の J アーク部における測定を示し、そこでは、エネルギージッターによる軌道変動も加算されるからである。J アーク部出口の所では、アクロマティックなラティスとなっているのでジッターエミッタンスはもとのレベルまで戻っている。ただし、ジッターエミッタンスのベースラインは、J アーク後も徐々に増大し、陽電子標的までほぼ単調に増加している。また、240m の所（セクタ C と 1 の接合部）に明らかなステップが見えていて、ジッター源が存在しているのがわかる。

3.3 オプティクス診断

ジッターエミッタンスも同様に、Twiss パラメータ (α, β, γ) が定義でき、ジッターエミッタンスの大きさと傾きから計算できる。図 4(a)は、セクタ AB における、水平ベータ関数の変化を示す。図中には、ラティスから計算されるベータ関数も同時に示した。このように、セクタ A においては A1 を省き、実測値は、ほぼ計算によるラティスベータ関数を再現しているが、セクタ B においてはベータ関数の不一致が見えている。

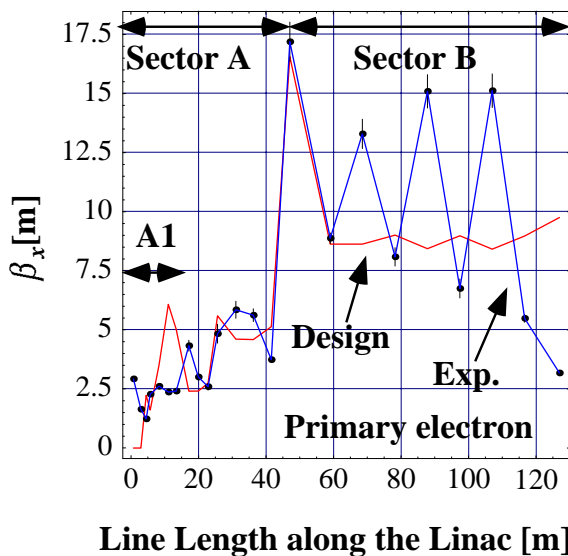


図 4：バンチャー出口から J アーク入口までの 1 次電子ビーム (10nC) の水平ベータ関数の変化の様子を表す。

3.4 オプティクス整合

オプティクスの整合度を定量化するために、整合度パラメータを導入する。オプティクス整合とは、ラティスの Twiss パラメータとビームの Twiss パラメータがどれだけ一致しているかを示す指標で、ここでは、M.Sands の定義 (文献 [2] を参照のこと) に従う。整合度には、エミッタンス楕円の半径 (長軸) 方向の長さ (振幅) と回転角度 (位相) の 2 つのパラメータがある。ビームの Twiss パラメータがラテ

イスのそれと完全に一致しているならば、振幅及び位相の整合度は、それぞれ、1 及び 0 となる。ここでは、振幅の整合度の変化を図 5 に示す。この図から、セクタ A 1 及び、セクタ B の終端部には、ステップ的な不整合があり、しかもその度合いが大きい。セクタ B の終端部は、J アーク部への整合部となっていて、一旦に一回程度ワイヤースキャナを用いて整合されるが、オプティクス整合が崩れている可能性がある。しかしながら、注意しないとイケないのは、このような不整合は、本来のオプティクス不整合以外の変動要因からでも生じる現象である。このように、変動要因の特定を行うには、不整合が生じている付近で、あらゆるジッター源との相関をとることにより調査すべきである。

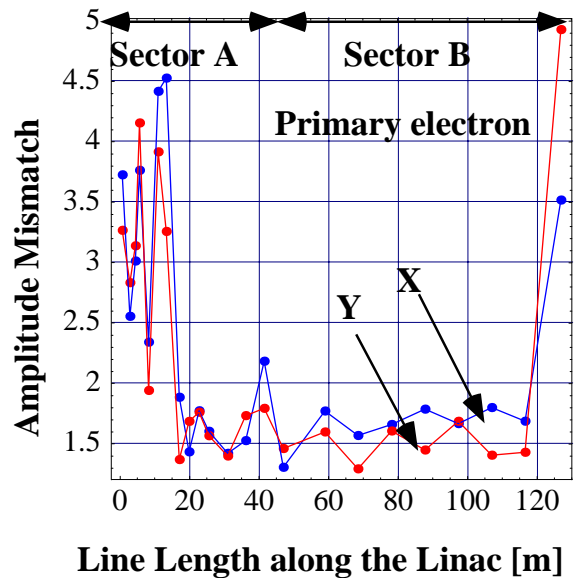


図 5：バンチャー出口から J アーク入口までの 1 次電子ビームのジッターエミッタンスの振幅整合度の変化を示す。

4. まとめ

本報告では、加速器のビーム安定性を悪化させる変動要因を変動場所、変動速さ (周波数)、変動振幅という 3 次元の要素で表し、その変動要因を誘起する構成要素を変動の速さに従い分類した。特に、時間領域における解析手法であるパルス毎に生じる軌道ジッターを用いて、ビームのジッターエミッタンスを導入することにより、変動場所、変動振幅及びベータ関数の不整合が定量化できることを示した。この方法は、BPM を用いて非破壊でオンラインモニタリングすることが出来るのが特徴である。この手法を用いて、ビーム安定性の研究をさらに進める予定である。

参考文献

- [1] I.Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18, 1996.
- [2] M.Sands, "A Beta Mismatch Parameter", SLAC-AP-085 (1991).