

特集2 KEKB Bファクトリーのコミッショニング

KEKB ラティスの特徴とオプティクス補正

小磯 晴代*

Lattice and Optics Correction

Haruyo KOISO*

1. ラティスの特徴

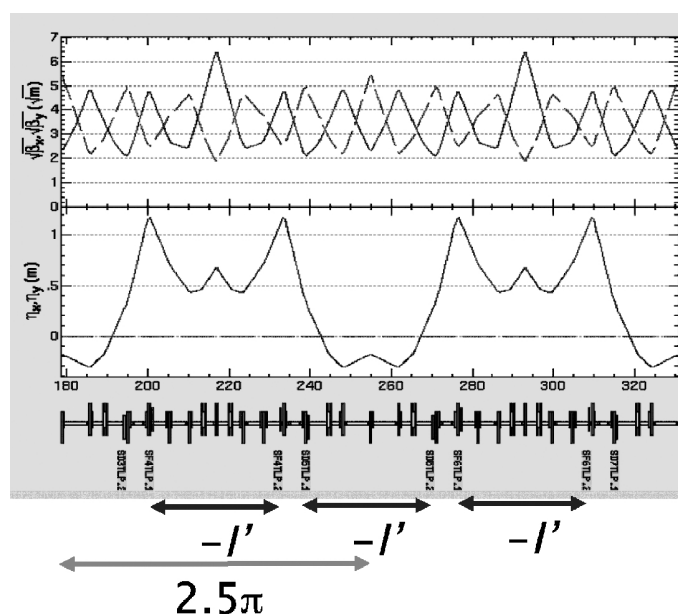
衝突点垂直ベータ関数 β_y^* を 1 cm 以下に絞ったオプティクスで、十分な力学口径を保ち、パラメタの調整範囲もできる限り広く確保すること。これが KEKB ラティスに対する要求である。この要求を満たすように、「 2.5π セル構造 (図1)」、「 $-I'$ 変換で結合された、重なり合わない六極対による色収差補正」、「衝突点領域での局所的色収差補正」等々、KEKB のラティスは多くの利点を持つ先進的な設計になっている¹⁾。

どのように優れたラティスも、計算機上の設計だけで作業が完結するはずはなく、建設・ビーム運転の期間を通して、ハードウェア及びコミッショニング・グ

ループとの地道な共同作業によって始めて真価が発揮される。磁場測定の結果を取り入れる等、可能な限り加速器モデルの精密化を図っても、現実の加速器では必ず誤差がある。したがって、実際の運転でラティスが本来の威力を発揮するには、ビームを用いたオプティクス補正が不可欠である。

2. オプティクス補正方法

オプティクス補正の方法は、ビーム運転を行いながら試行錯誤を重ねて開発されてきた。基本的な考え方は、rf 周波数シフトあるいは一カ所の dipole kick で発生する軌道の変化分がモデルどおりになるように補正する、という極めてシンプルなものである。補正に使う corrector は、四極磁石電源の補正ファクター

図1 2.5π セル構造.

* 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
(E-mail: haruyo.koiso@kek.jp)

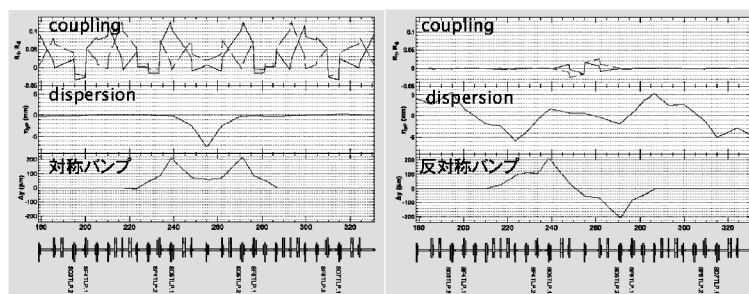


図2 六極バンブ. (上) x - y カップリング・パラメタの一部, (中) 垂直ディスページョン, (下) 垂直バンブ軌道.

(四極磁場を微調整するわけだが, ほとんどの電源には複数の磁石が繋がっている, 平均を補正することになる) と, KEBK ラティスの特徴を生かした六極対でのバンブ軌道 (水平バンブで四極成分, 垂直バンブで歪四極成分が発生する) である^{2,3)}. 通常は, x - y カップリング, ディスページョン, ベータ関数をこの順番で補正する.

- x - y カップリング補正—12 種類の水平方向キックによって発生する垂直軌道を, 六極対での垂直方向対称バンブ (二つの六極磁石で同じバンブ高) と歪四極磁石 (衝突点領域にのみ配置されている) で補正する.
- ディスページョン補正—rf 周波数シフトさせたときの軌道差から, ディスページョンを求め, 六極対での水平および垂直方向反対称バンブ (二つの六極磁石で同じ絶対値, 逆符号) で補正する.
- ベータ関数補正—水平垂直それぞれ 6 種類のシングルキック軌道からベータ関数を求め, 主に四極磁石電源の補正ファクターを調整して補正する. 六極対の水平方向対称バンブを併用する場合もある.

KEBK では, 六極対は $-I'$ 変換で結ばれ, しかも間に別の六極は配置されていないので, 垂直方向対称バンブによって x - y カップリングを, 水平 (直方) 方向反対称バンブによって水平 (直方) のディスページョンを, 水平方向対称バンブによってベータ関数を, ほぼ独立に補正することができる (図2). このようにパラメタを適当な部分空間に分離して補正できるのは, KEBK ラティスの大きな利点である.

3. 実際のオプティクス補正

長期シャットダウン後の立ち上げ時はもちろん, 2 週間毎の定期メンテナンス後も, 磁石を初期化しオプティクス補正を行ってから, ルミノシティ・ランを開始する. 毎回~2 時間をかけて, 両リング全周の, x - y

カップリング, ディスページョン, ベータ関数を補正するが, 補正手順は全て運転パネルに組み上げられており, 実際の操作は測定開始と補正值の設定のボタンを押すだけになっている.

測定・補正の 1 サイクルはベータ関数の場合最も長く 7~10 分かかる. もちろん, 測定途中に外乱があると正しい補正はできないので, 高速化は重要な課題である. また, 現在の補正は小電流 (30 mA) でのみ行っている, 大電流運転 (1600 mA) の場合との相違は常に問題視されている.

ベータ関数補正のために電源に与えている補正量は 10^{-3} ~ 10^{-2} とかなり大きい. 磁石・電源に本来想定される誤差の 10 倍以上である. オプティクス補正で, 誤差がどこにあるかと可能な手段 (この場合は四極磁場の微調) で補正し, 安定なビーム運転状態を実現することを第一とした結果である. 誤差の原因が特定できないからといって, 立ち止まっているわけにはいけないので, 妥当な方針であると思う. もちろん, 誤差の原因を突き止める努力は常に続けている.

KEBK において, 設計と現実との間で相違が大きいパラメタの一つが, 水平方向チューン ν_x である. 設計時には ν_x 端数部は ~.52 を想定していたが, 実際にはルミノシティ向上のために, どんどん半整数共鳴線に近づいていった. LER で ~.505, HER では ~.509, が現在の動作点である. この動作点の近くにはシンクロトロン・ベータトロンの共鳴線 $2\nu_x + \nu_s = \text{integer}$ も存在し ($\nu_s \sim -.025 / -.021$ (LER/HER)), 寿命・ビームサイズ両方に大きな影響を与えている. このような共鳴線近傍でのビームの安定性は, オプティクス補正と次に述べる六極設定の良し悪しに大きく左右される.

4. 六極磁場の最適化

六極は対ごとに別の電源に接続されているので, LER で 54, HER で 52 もの自由度がある. 計算機上

でこの自由度を駆使して力学口径の広いものを探す
が、残念ながら、計算で良いものが実際にも良いとは
限らない。モデル計算で候補を 5, 6 種類またはそれ
以上用意しておき、最終的にはビームに訊いてみるこ
とになる。

最近の判定方法では、先に述べたシンクロトロン・
ベータトロン共鳴線 $2\nu_x + \nu_s = \text{integer}$ を飛び越すよう
に ν_x を下げたとき (bungee jump と呼んでいる)、
ビームロスが最も少ないものを採用することにして
いる。その後は、ルミノシティ調整の一環として、寿
命・ビームサイズ・ルミノシティを総合的に判断して
六極を微調整する。

off-momentum オプティクスを測定し (例えば, rf
周波数シフトさせて on-momentum の場合と同様に
ベータ関数を測定), 測定値を再現する様に六極電源
に補正ファクターを導入しているが, off-momentum
オプティクスのモデルはまだ現実との食い違いが大き
い。

5. 加速器計算コード SAD の役割

ラティスの設計において計算コードの果たす役割は
非常に大きい。使用する計算コードがどのような機能
を持っているかによって、ラティスそのものの性能も
決まってくる。

KEKB のラティスは、1986 年頃から KEK で開発
されてきた加速器のための総合計算コード SAD
(Strategic Accelerator Design)⁴⁾を用いて設計され

た。線形オプティクスのマッチング、色収差補正にお
ける六極の最適化、シンプレクティック条件を保持し
た 6 次元位相空間でのトラッキング等、設計・シミュ
レーションに関連する作業は、全て SAD による統
一的環境のもとに進められた。ラティス設計の過程で
新たな機能が必要になると、ほとんどの場合直ちに
SAD に実装されてきた。

さらに KEBB のビーム運転をも担うため、SAD に
は、EPICS とのインターフェースや Tcl/Tk を利用
したグラフィック・ユーザー・インターフェースも組
み込まれ、現在、設計・シミュレーションからビーム
制御まで含む統合環境が出来上がっている。SAD に
よるオンライン加速器モデルに基づいた精密なビーム
制御は、高ルミノシティ達成には欠かせないものであ
る。実際に、先に述べたオプティクス補正のための運
転パネルを始め、SADScript (SAD がサポートする
Mathematica-like なインタープリタ言語) で記述さ
れた数々の運転ソフトが実用化され、ビーム調整に生
かされている。

参考文献

- 1) 生出勝宣, 「KEKB が切り拓いたもの」, 本誌.
- 2) K. Akai *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.*, **A499**, pp. 191-227 (2003).
- 3) A. Morita *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **10**, 072801 (2007).
- 4) <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>