

■研究紹介

KEKB ルミノシティの最近の進展とオプティクス・軌道補正

KEK 加速器研究施設

小磯 晴代

haruyo.koiso@kek.jp

2002年5月23日

1. ルミノシティの進展

KEKB 加速器のルミノシティはピーク値、積分値とも順調に伸び、世界最高記録を更新し続けている。5月現在、最高記録は、ピーク値 7.35/nb/sec、1日の積分値 387/pb、に達し、定期メンテナンス、マシンスタディを含めて、Belleグループに月当たり 9.0/fb を保証している。

図1にKEKB稼動開始以来のルミノシティ、蓄積電流の履歴を示す。ここ1年間でルミノシティはほぼ2倍に増加しているのが見てとれる。また、ピーク値達成時のビームパラメータも1年前の値と比較して表1にまとめてあり、パンチ電流増加とともに、ビームビームパラメータも大きな値を達成していることが分かる。性能向上の要因は、

- (1) 大電流の安定な入射蓄積が可能になったこと、
  - (2) ビームパラメータの最適化とそれを維持する道具立てが整ってきたこと、
- に大別できるだろう。

1.1. 大電流運転

(1) の大電流運転に関する昨年夏期シャットダウン以降の改良点を列挙すれば、

- 光電子雲抑制のためのソレノイド増設

LER では、放射光が当たって真空チェンバーから放出される光電子と陽電子ビームとの相互作用による垂直ビーム

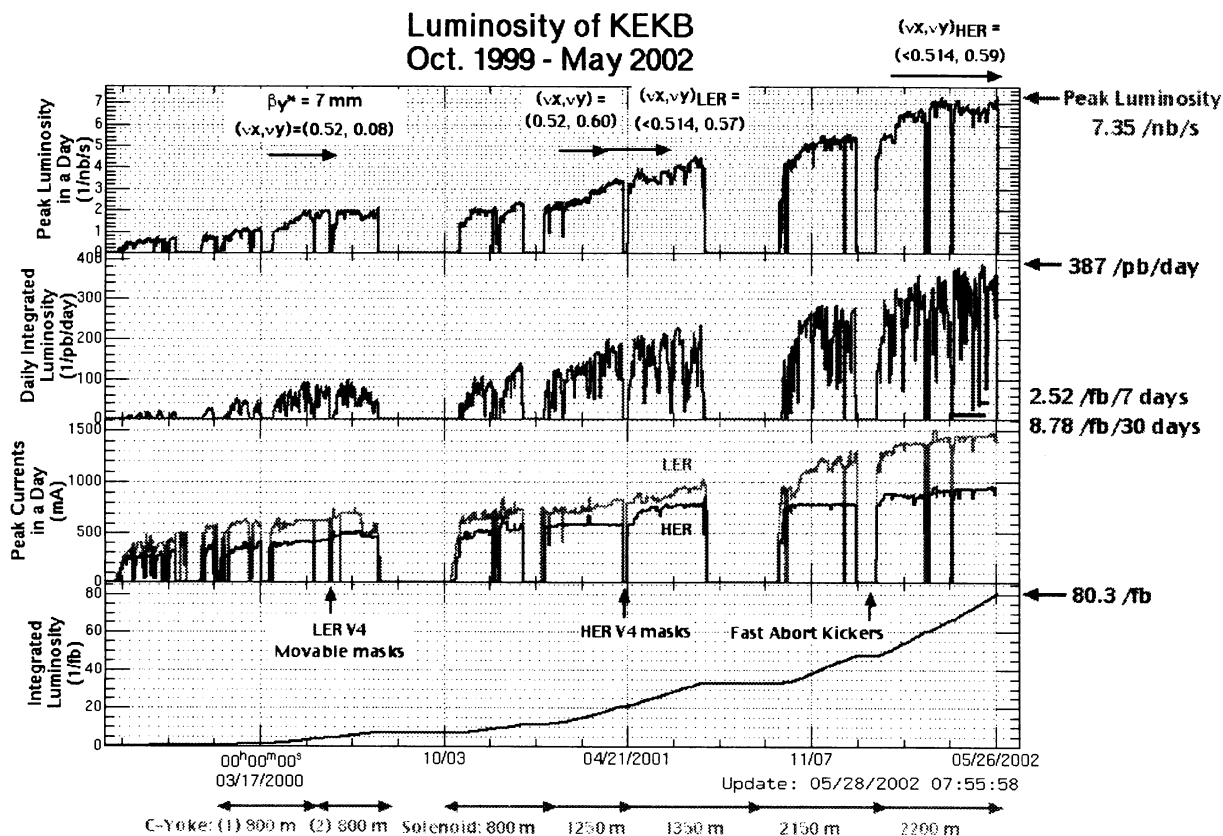


図1 KEKB ルミノシティの変遷 上から、ピーク値、一日の積分値、蓄積電流、全積分ルミノシティを示す。

表1 最高ミノシティ達成時のビームパラメタ (一年前の値との比較)

	5/27/2002			5/2/2001		
	LER	HER		LER	HER	
Horizontal Emittance	18	24	nm	18	24	nm
Beam current	1350	900	mA	854	675	mA
Number of bunches	1224			1154		
Bunch current	1.10	0.74	mA	0.74	0.58	mA
Bunch spacing	2.4			2.4		
Bunch trains	1			1		
Horizontal size at IP $\sigma_x^*$	103	121	$\mu\text{m}$	103	123	$\mu\text{m}$
Vertical size at IP $\sigma_y^*$	2.7	2.7	$\mu\text{m}$	2.6	2.6	$\mu\text{m}$
Emittance ratio $\varepsilon_y/\varepsilon_x$	6.7	4.5	%	5.3	4.0	%
$\beta_x^*/\beta_y^*$	59 / 0.62	61 / 0.70	cm	59 / 0.70	63 / 0.70	cm
beam-beam parameters $\xi_x/\xi_y$	0.079 / 0.049	0.073 / 0.042		0.065 / 0.047	0.048 / 0.029	
Beam lifetime at collision	100 @ 1350 mA	300 @ 900 mA	min.	144 @ 854 mA	259 @ 675 mA	min.
Luminosity (Belle CSI)	7.35			3.84		
Luminosity records per day / 7 days / 30 days	387 / 2524 / 8783			207 / 1302 / 4047		

サイズ増大が深刻な問題となる。ビームまわりに光電子雲が形成されるのを抑制するため、現在、ドリフト空間（磁場のない区間）のほとんどすべて（ $\sim 2,200\text{m}$ ）に 30gausses 以上のソレノイド磁場がかかっており、大電流での急激なビームサイズ増大が抑えられ、衝突電流増加に伴った順調なミノシティ増加が実現されている（ソレノイドは図 1 最下段に示すように順次増設されている）。

#### • HER 新型マスクの設置

マスクヘッドの材質を銅から、アルミと銅の組み合わせ、あるいはチタンに変更し、大電流ビームロス時のマスク損傷を防いだ。

#### • ビームアポートキッカーの高速化

アポートキッカーの立上がりに必要なギャップを 10% から 4.6% に短縮することができ、その分バンチ数増加が可能になった。

#### • ビームロスモニタ整備によるアポートシステムの充実

#### • 加速キャビティ増設と RF パラメタの最適化

- 真空チェンバー冷却システムの強化
- バンチ毎の横方向フィードバックの調整法の確立
- 陽電子 2 バンチ/パルス入射の実用化による入射時間の短縮

などとなる。最後に挙げた 2 バンチ/パルス入射は、4 月下旬以降実用化され、平均入射時間の大幅な短縮（12～13 分 → 6～7 分）をもたらし、積分ミノシティ増加に大きく貢献した（しかし、後で述べる理由によって、現在 2 バンチ入射は止めている）。

### 1. 2. ビームパラメタの最適化

(2) のビームパラメタの最適化について言えば、水平ベータatronチューンを両リングとも半整数共鳴線に近づけたことが、パラメタ選択上の大きな進歩である。チューンの違いによる水平方向オプティカル関数の変化を図 2 に示す。チューンが半整数に近づくに従って、エミッタンスは増加し、 $\beta$  関数は減少しているが、両者が打ち消し合っ

てビームサイズそのものの変化は小さい。ルミノシティ向上には、 $\beta$  関数が減少したことによりビームビームパラメタが実質的に小さくなり、安定度が増したことが大きく寄与していると考えられる。

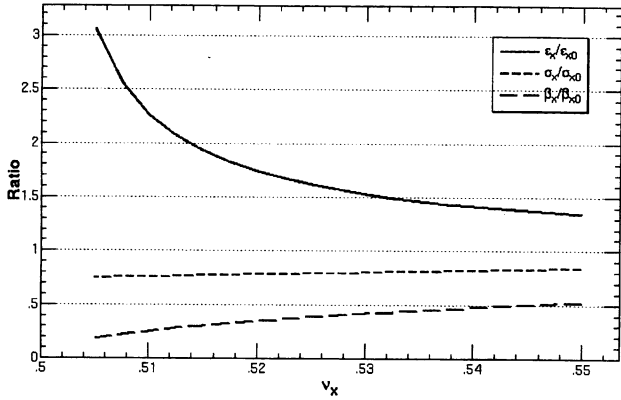


図2 ビームビーム効果による LER 水平オプティクスの変化 横軸は水平ベータトロンチューン、縦軸はビームビームパラメタが 0.075 の場合の  $\beta$  関数、エミッタンス、ビームサイズの相対値を示す。

共鳴線近傍での安定な運転が可能となったのは、

• ゲーテッドチューンメータ (gated tune meter) によるチューン制御の充実

チューンをモニタするため、相手ビームと衝突しない位置にパイロットバンチを入射しておき、ゲートをかけてこのバンチのチューンのみを常時測定する。チューン測定のピークが正確に見えるようにパイロットバンチのみバンチ毎のフィードバックを off にする (図 3)。

- 6 極磁石におけるビーム軌道の水平変位を小さく抑えることによるグローバル  $\beta$  関数補正の改善
- スキュー4 極磁石と 6 極磁石の垂直バンブ軌道の併用によるカップリング補正の改善
- RF 周波数および LER シケインによる軌道長補正による軌道の安定化

などの改良点が挙げられる。

オプティクスおよび軌道補正によってオプティカルパラメタを適正な値に保つことは高ルミノシティを達成し、それを維持するための必要条件である。KEKB のように運転時のチューン  $\nu$  を半整数に近づけると、次式に示すように 4 極磁場誤差による  $\beta$  関数の乱れが増大するため、

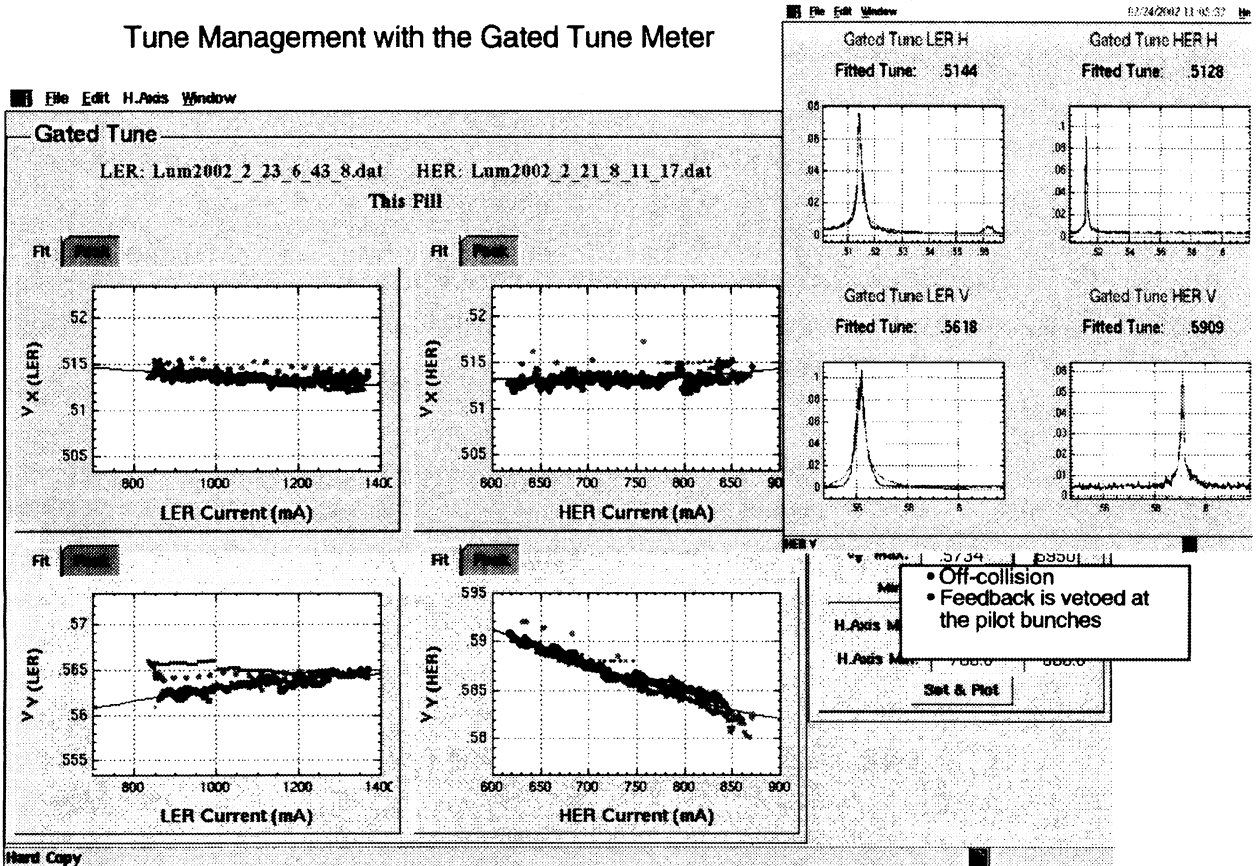


図3 ゲーテッドチューンメーター (gated tune meter) によるチューン制御

$$\frac{\Delta\beta(s)}{\beta(s)} = \frac{1}{2\sin(2\pi\nu)} \sum_i \beta_i \Delta k_i \cos(2\pi\nu - 2|\mu(s) - \mu_i|)$$

補正の出来が悪いと安定領域が著しく制限されてしまう。KEKB で安定な運転を保証するために常時行われているオプティクス補正について以下で説明する。

## 2. KEBK におけるオプティクス補正

KEKB ラティスは、設計段階から一貫して SAD[1]によるモデル計算を基礎に取り扱われている。ラティスのモデルは必要に応じて更新され、ビーム運転には常に出来る限り現実を反映した最新のモデルが提供されている。このオンラインモデルの存在によってオプティクス関係の調整は迅速に、かつ、統一的に行うことが出来る。

KEKB ラティスの特徴の一つは、非入れ子型 6 極磁石ペアによるクロマチシティ補正である。6 極磁石間の転送行列を  $-I'$  とし、

$$-I' = \begin{pmatrix} -I'_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & -I'_{2 \times 2} \end{pmatrix}, \quad -I'_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ * & -1 \end{pmatrix}$$

(\* はゼロでなくともよい)、かつペア間に他の 6 極磁石を置かないことで、6 極磁石による非線形効果がペア間で相殺され、横方向に大きな力学口径が確保されている。リング全体で 52 ペアの 6 極磁石が設置されており (LER には衝突点領域での局所的補正のため、さらに 2 ペア追加されている)、これらの 6 極磁石にバンパ軌道を作ることで、効果的にオプティクスを補正することができる。補正は、リング全体のグローバル補正と物理ラン中にルミノシティを最適化するために行う衝突点近くのローカル補正に分けられる。

### 2.1. グローバル補正

グローバル補正は、メンテナンスなどで磁石初期化を行った場合は必ず、その他、ルミノシティ、ビーム寿命などの性能劣化が激しくローカル補正では回復できない時に、小電流 (~20mA) を蓄積して行う。ステアリング磁石によるキックや RF 周波数の変化で発生する閉軌道のずれを解析し、リング全周の BPM (ビーム位置モニタ) での  $\beta$  関数、 $x$ - $y$  カップリング、およびディスパージョンを求め、モデルからのずれを補正する。コレクタとしては次の 2 種類、

- (1) 4 極磁石およびスキュー 4 極磁石電源の補正ファクタ
- (2) 6 極磁石での水平/垂直バンパによる 4 極/スキュー 4 極成分

を利用している。

### (a) $\beta$ 関数補正

シングルキック軌道  $x_{ik}$  (1 台のステアリング磁石によるキック  $\theta_k$  で発生する閉軌道のずれ、 $k$  番目のステアリングによる  $i$  番目 BPM での軌道) を解析し、 $\beta$  関数を求める。軌道から関数を求めるには、シングルキック軌道の表式、

$$x_{ik} = f_k \sqrt{\beta_i} \cos(\pi\nu - |\mu_i - \mu_k|), \quad f_k \equiv \frac{\sqrt{\beta_k}}{2\sin\pi\nu} \theta_k \quad (1)$$

を(2)、(3)のように書き換え、

$$x_{ik} = \sqrt{\beta_i} \cos(\pi\nu \pm \mu_i) f_k \cos \mu_k \pm \sqrt{\beta_i} \sin(\pi\nu \pm \mu_i) f_k \sin \mu_k \quad (2)$$

$$x_{ik} = f_k \cos(\pi\nu \pm \mu_k) \sqrt{\beta_i} \cos \mu_i \mp f_k \sin(\pi\nu \pm \mu_k) \sqrt{\beta_i} \sin \mu_i \quad (3)$$

式(2)、(3)を交互に用いて、係数部分 (下線なしの部分) は前回のフィット値 (1 回目はモデル値) を代入し、下線部分を最小二乗法

$$\sum_{i,k} (x_{ik,meas} - x_{ik,fit})^2$$

で求めるという操作を収束するまで繰り返す。測定には水平、垂直各々 6 種類のシングルキック軌道を用いる。

補正のためのコレクタは 4 極磁石電源の補正ファクタ (fudge factor) であり、 $\beta$  関数のモデルからのずれを補正するようにほとんどすべての 4 極磁石電源を調整するが、6 極ペアの内側にある 4 極磁石電源は  $-I'$  変換を崩さないように調整対象外としている。補正の例を図 4 に示す。

アーク部のユニットセルを構成している磁石群のように 1 電源に複数の 4 極磁石が接続されている場合、この方法で補正できるのは平均値のみであり、個々の磁石磁場のばらつきまでは補正できない。また、6 極磁石で水平軌道変位があると余分な 4 極成分が発生するため、これも補正を悪化させる要因となる。特に、HER の SD タイプ 6 極磁石 (垂直補正用 6 極磁石) で強磁場のものについては、補正前に水平変位を数百  $\mu\text{m}$  以下に抑えておく必要がある。この点を配慮することにより、HER の垂直  $\beta$  関数補正が改善され、安定領域が広がり、結果的に水平ベータトロンチューンを LER 同様半整数共鳴線に近付けることが出来たと考えられる。

### (b) $x$ - $y$ カップリング補正

6 種類の水平方向シングルキックに伴って発生する垂直方向への回り込み軌道を極小にする。コレクタは SD6 極磁石ペアの垂直対称バンパ軌道とスキュー 4 極磁石電源の補正ファクタである。両者を併用することによって、図 5 に示す様に、特に HER 衝突点近傍のカップリング補正が改善した。

### Global $\beta$ Correction (LER) by fudge factors of quad power supplies

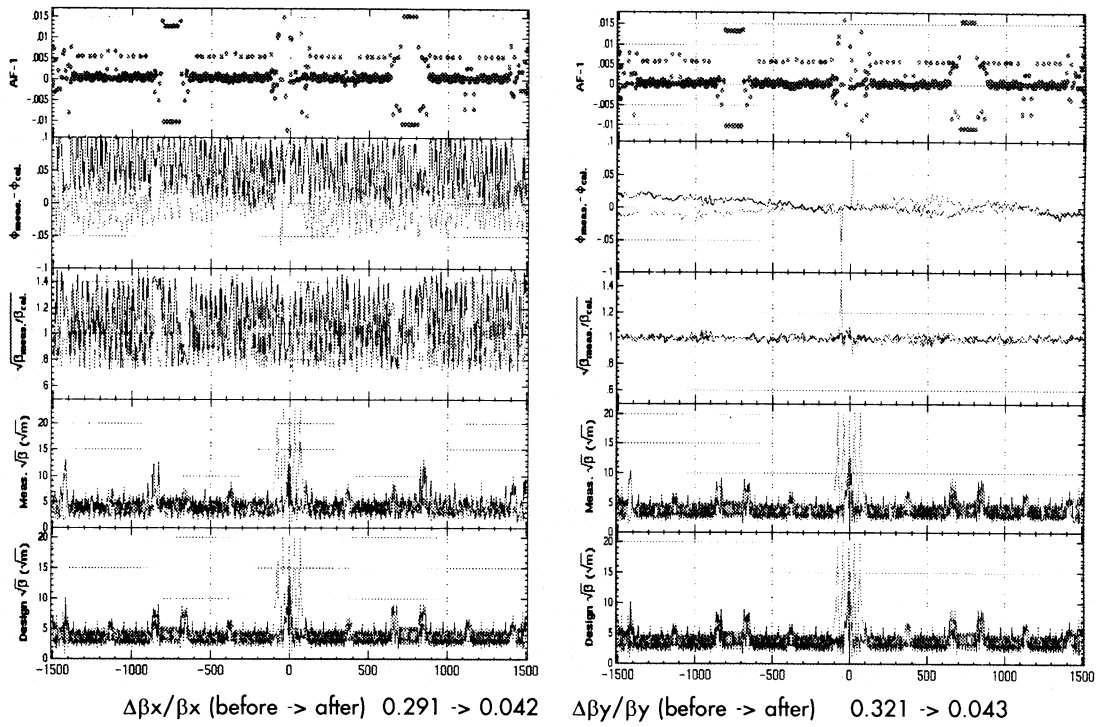


図4 グローバル $\beta$ 関数の補正 グラフは上段から、補正ファクタ、位相のずれ、 $\sqrt{\beta}$  相対値、 $\beta$ 測定値、 $\beta$ モデル値を表している。これは長期シャットダウン後の補正例なので、補正前の $\beta$ 関数の乱れがかなり大きいですが、数回の補正で問題なく収束している。

### Global Coupling Correction(HER) by combination of symmetric bumps at sext pairs and skew quads at IR

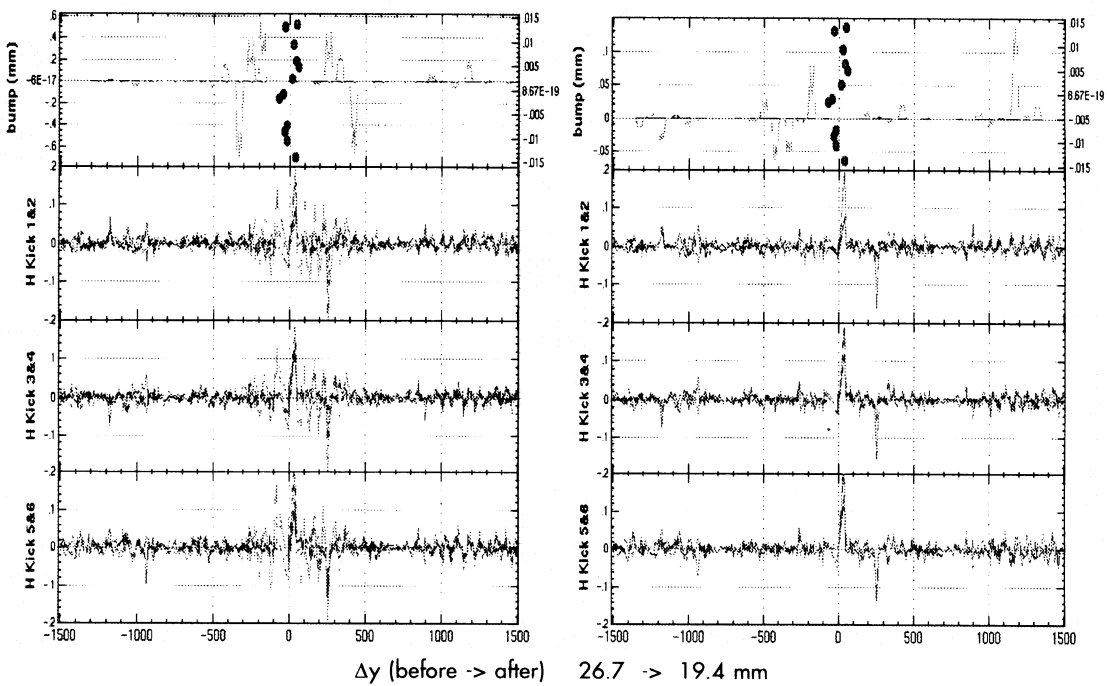


図5 グローバル  $x$ - $y$  カップリングの補正 グラフの最上段は補正に必要な6極バンプとスキュー4極磁石設定値、以下3段は垂直方向への回り込み軌道を示す。

(c) ディスパージョン補正

RF 周波数を微小変化させ (100Hz 程度) 軌道差を測り、ディスパージョン  $\eta_{x,y}$  に換算する。コレクタは水平・垂直補正 6 極磁石 (SF・SD) ペアの反対称垂直バンプ軌道である。-I' 変換で結合されている 6 極磁石ペア間で  $x$ - $y$  カップリングは相殺されるので、カップリング補正に影響を与えない。補正の例を図 6 に示す。

以上 3 種の補正は、相互の干渉が小さく、通常観測される程度のずれを補正するには、1 種類ずつ独立に補正すれば問題ない。オプティクス補正におけるバンプの利用法をまとめると表 2 のようになる。

表 2 6 極バンプ利用法のまとめ

バンプ/6 極極性	対称	反対称
SF 水平バンプ	$\beta$ 関数	水平ディスパージョン
SD 垂直バンプ	$x$ - $y$ カップリング	垂直ディスパージョン

2. 2. IP 近傍のローカル補正 (別名 adiabatic 補正)

ローカル補正は、次の様な調整ノブを用いて、衝突実験中、ルミノシティ、ビームサイズを見ながら随時行われる。

- (a) ウェスト (垂直ベータ関数の極小点)
- (b) 衝突点ティルト (カップリング成分)
- (c) 衝突点ディスパージョン

ローカル補正でオプティクスが変化する領域は衝突点領域および近傍のアーク部に限られている。

(a) ウェスト

衝突点両側の最終収束磁石 (QCS, QC1) の磁場を微調整する。衝突点両側の最終収束磁石間は、垂直方向位相差がほぼ  $\pi$  となっているので両側磁石で

$$\beta_R \Delta k_{1R} = \beta_L \Delta k_{1L}, \quad k_1 = \frac{B' L_{Quad}}{B \rho}$$

となる様にバランスをとって変化させれば、チューンや他の領域のベータ関数にほとんど影響を与えない。ウェストは、両リング独立に設定できる。QCS は両リング、QC1 は HER のみに作用するので、LER のウェスト調整は、QCS で行い、HER が移動した分は QC1 で戻す。HER ウェスト調整は QC1 のみで行い、LER は影響を受けない。

(b, c) 衝突点ティルト、ディスパージョン

従来、スキュー 4 極磁石の調整 (電源補正ファクタの調整) によっていたが、この方法では、他のオプティカル関数に与える影響が無視できず、また、可変範囲が小さい、などの問題点があった。現在は、衝突点両側 6 台ずつの 6 極磁石に垂直バンプを立て、衝突点における 4 パラメタのティルト  $r_1$ - $r_4$  およびディスパージョンとその微分を独立に調整している。ここに  $r_1$ - $r_4$  は  $x$ - $y$  カップリングがある場合、物理座標系からノーマル座標系への変換を表す下記の行列の要素である。

$$\begin{pmatrix} \mu & 0 & -r_4 & r_2 \\ 0 & \mu & r_3 & -r_1 \\ r_1 & r_2 & \mu & 0 \\ r_3 & r_4 & 0 & \mu \end{pmatrix}$$

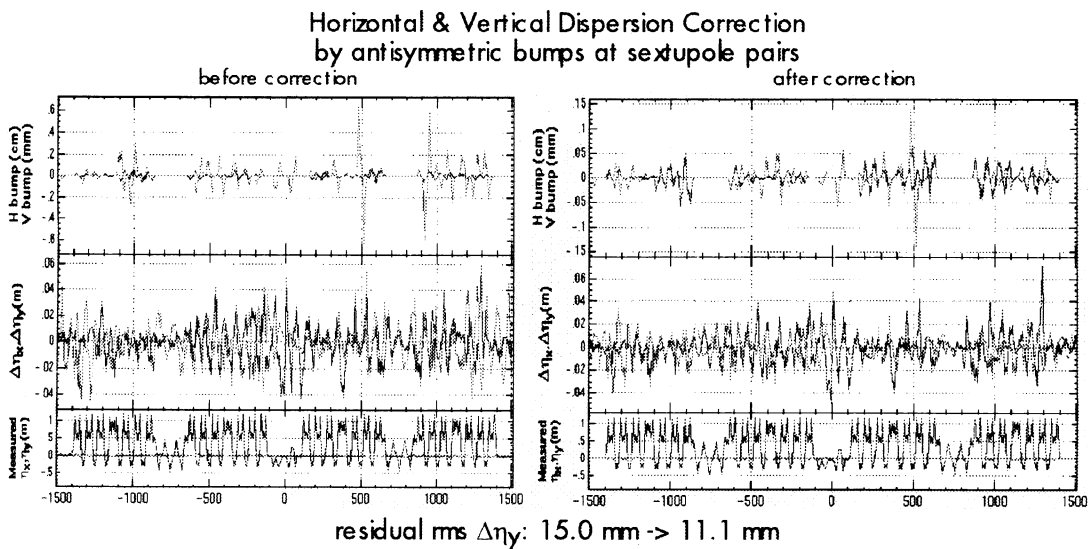


図 6 グローバルディスパージョンの補正 グラフは上段から、補正に必要な 6 極バンプ、ディスパージョンのずれ、ディスパージョン設定値を示す。

### 2.3. 軌道補正

オプティクス補正の結果、リング閉軌道には通常数百mm～数mmのバンプが設定される。以後これを基準軌道(gold軌道と呼んでいる)とし、基準軌道からのずれを最少に保つように10-20秒周期で全周の軌道補正が常に行われている(通称CCC: Continuous Closed-Orbit Correction)。

軌道補正には、水平垂直独立に、各々二百数十台のステアリング磁石が使用され、垂直方向の補正には特に問題は生じてない。一方、水平方向については、補正残差が累積する傾向があり、ルミノシティ低下、ビーム寿命減少、チューン変動などの一因となっている。

水平補正を複雑にしているものの一つに軌道長の変化が考えられる。LERには軌道長を調整するためシケインと呼ばれる4台の偏向磁石から成る特別の区間が設けられており、昨年夏以降、CCCの一環として常時補正に参加している。図7はシケイン磁石設定値の履歴を示しており、周長の変化を反映していると考えられるが、気温などの環境変数との単純な相関だけでは説明されていない。HERにはシケインがないので、軌道長のずれはステアリング設定値を次式のように調整することにより常時補正しており、

$$\Delta L = \sum_i \eta_x \Delta \theta_x$$

ずれが大きくなった場合は、RF周波数を変更して軌道長を合わせる(LERとHERのずれはシケインで調整する)。

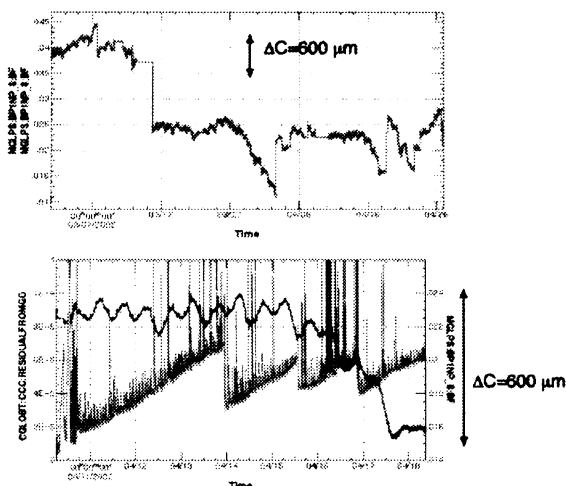


図7 水平軌道補正残差とシケイン設定値

軌道変動によるビーム性能劣化の原因は、6極磁石での水平変位によるオプティクスの乱れだと推察されるが、まだ定量的にすべて理解されているわけではなく、解析が続けられている。対処療法として、補正残差がある程度増大し、性能劣化の兆しが現れた場合、ステアリング設定値を残差が小さい時のものに一旦戻し、改めて補正を重ねると、補正残差は小さくなり、ビーム性能もかなり回復する場合が多い(図7参照)。

### 3. 今後の課題

これまでKEKBでは、4RFバケット毎にバンチを入射する4バケットパターン運転を行ってきたが、今後さらにルミノシティを高めるにはバンチ数増加が必須となってくるだろう。その一つの試みとして3.5バケット運転(4-3-4-3の繰り返し)を何回か試みたが、現在までのところ、図8に示すように3.5バケットでのスペシフィックルミノシティは4バケットの90-93%にとどまっており、蓄積電流を増やしてもルミノシティは4バケットに及ばない。

File 1: Fill#: 8047 Lum2002\_3\_20\_7\_25\_34.dat  
File 2: Fill#: 8068 Lum2002\_3\_22\_6\_42\_3.dat

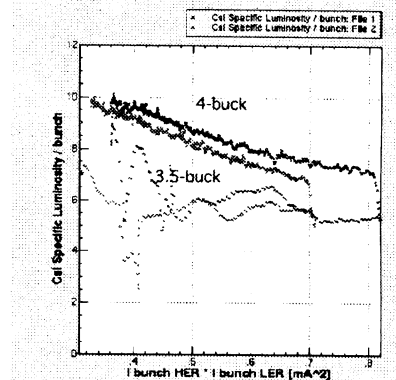


図8 フィルパターンによるスペシフィックルミノシティの違い

また、2バンチ/パルス入射の場合、ライナックとリングのRF周波数が単純な整数比になっていないため、2バンチがリングの49RFバケットに対応することになり、変則的な4バケットパターンに変更しなければならない(RFバケットの番号付けで表現すると、たとえば、0, 4, ..., 44, 49, 53, ...のように本来48となるところを49にずらす。3.5バケットパターンも2バンチ入射に対応できる)。この変則パターンも、通常の4バケットに比べスペシフィックルミノシティは低い。加えて、変則パターンは相対的にバックグラウンドが高いなどの欠点もあり、現在2バンチ入射は中止している。バンチのフィルパターンによるルミノシティの違いが何故生じるか、解明が急がれている。

また、LERへの連続入射モード(物理ラン中に連続的に5Hzで入射する)もBelle側の対応を待って来期再開を検討する。

終わりに、有益なデータと図表を提供して頂きましたKEKBコミッショニンググループの方々に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>