

# SuperKEKB の初期コミッショニングにおけるビーム光学の測定とその補正 BEAM OPTICS MEASUREMENT AND CORRECTION AT THE INITIAL COMMISSIONING OF SUPERKEKB

杉本寛、大西幸喜、森田昭夫、小磯晴代、船越 義裕、生田勝宣

Hiroshi Sugimoto, Yuki Yoshi Ohnishi, Akio Morita, Haruyo Koiso, Yoshihiro Funakoshi, Katsunobu Oide  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

The SuperKEKB operation has started after over 5 years of upgrade. The initial beam commissioning without the final focus system started on February 1st 2016 and finished on June 28th 2016. This commissioning period was mainly devoted to vacuum scrubbing and tuning of both hardware and software. Low emittance tuning is also one of the key items, since the low emittance beams are essential to achieve the target luminosity of  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Optics correction including hardware and software calibration was carried out on a daily basis to reduce the vertical emittance. After the series of optics tuning, we obtain about 10 pm vertical emittance in the positron ring. The vertical emittance in the electron ring is estimated to 20 ~ 80 pm according to a X-ray monitor while estimation based on measured optics indicates the emittance is similar to that of the positron ring.

## 1. はじめに

SuperKEKB [1] は電子 (HER)-陽電子 (LER) の衝突型円形加速器であり、世界最高のピークルミノシティ  $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  を達成した KEKB 加速器 [2, 3] の後継機である。2010 年から約 5 年間のアップグレード期間を経て 2016 年 2 月より調整運転を開始した。コミッショニングは 3 つの期間 (Phase1、Phase2、Phase3) に分けられている。Phase1 ではビーム最終収束系は設置されず、ビーム衝突実験は 2017 年秋以降に予定されている Phase2 から開始される。Phase1 は主に真空焼きやハードウェアの立ち上げ及び各種ビームスタディに充てられる。Phase1 における運転パラメータを Table 1 に示す。2016 年 6 月 28 日に Phase1 のビーム運転を終了し、現在は Phase2 コミッショニングに向けて最終収束系の設置作業などが行われている。

Phase1 におけるビーム光学上の課題は低エミッタンス調整である。加えてビーム調整上最も困難が予想される最終収束系が設置される Phase2 に向けて、マシンのその他の部分の理解を深めることも大きな目的となる。Phase1 では約 10 pm、可能であれば 5 pm の垂直エミッタンスを目指してビーム光学の補正が行われた。本発表では Phase1 コミッショニングにおけるビーム光学の測定と補正及びそれに関連するスタディに関して報告する。

## 2. 測定及び補正手法

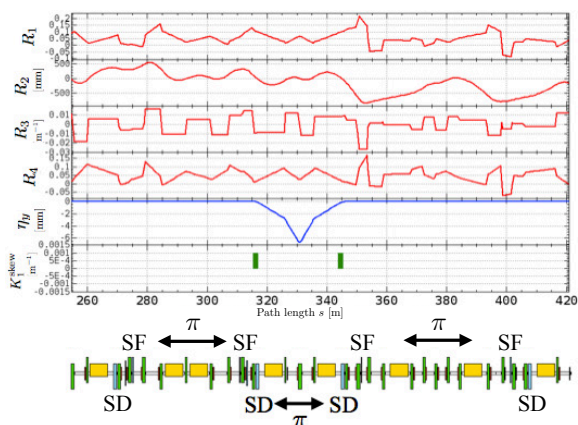
Phase1 では閉軌道応答に基づいた光学測定を行い、ビーム水平方向 (X) と垂直方向 (Y) のベータatron振動の結合 (XY カップリング)、ベータ関数、分散関数の補正が行われた。ベータ関数はベータatron位相の異なる各方向 6 つのステアリング電磁石に対する軌道応答を解析することで求めた [4]。SuperKEKB では補助電源を使うことでほぼ全ての四極電磁石を独立に調整できるが、Phase1 の期間は主電源単位で四極電磁石を調整することでベータ関数の補正を行った。

Table 1: Machine Parameters as of June 2016

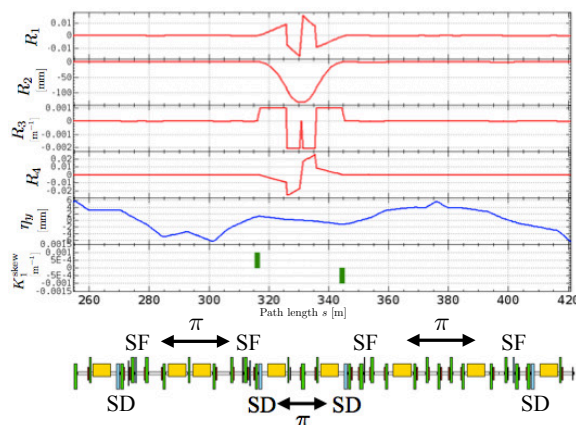
Parameter	HER	LER	Unit
$E$	7	4	GeV
$I$	0.87	1.01	A
$N_{\text{bunch}}$	1576	1576	
$\varepsilon_x$	4.6	1.8	nm
$\alpha_p$	$4.44 \times 10^{-4}$	$2.45 \times 10^{-4}$	
$\sigma_E$	$6.30 \times 10^{-4}$	$7.52 \times 10^{-4}$	
$V_c$	12.61	7.65	MV
$U_0$	2.43	1.76	MeV
$\tau_s$	29	23	msec
$\sigma_z$	5.3	4.6	mm
$\nu_s$	-0.0253	-0.0192	
$\nu_x$	45.530	44.430	
$\nu_y$	43.570	46.570	

XY カップリングの補正に関しては水平方向のステアリングによる軌道摂動で発生する垂直方向への軌道の回り込みを抑える。補正には後述する六極電磁石の歪四極補助コイルを用いる。測定に要する時間を鑑み、6 種類の軌道摂動に対して垂直方向への軌道の回り込みを補正した。分散関数は加速空洞の周波数を基本周波数 509MHz に対して  $\pm 100 \sim 200$  Hz 程度変化させ、そのときの軌道変化率から求める。水平方向の分散関数はアークセルの六極電磁石に水平方向の軌道バンプを作ることで補正する。垂直方向の分散関数に関しては XY カップリングと同様に六極電磁石の歪四極補助コイルにより補正する。補正に必要な磁場の調整量やバンプ軌道の高さは設計ラティスの応答行列の特異値分解と測定した光学パラメータにより算出した。全ての補正計算は加速器用総合計算コード SAD [5] を用いて行った。

前身の KEKB では XY カップリング及び垂直分散の調整は六極電磁石に垂直方向のバンプ軌道を作る



(a) XY-Coupling ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ) corrector



(b) Vertical dispersion ( $\eta_y$ ) corrector

Figure 1: Orthogonal correctors for XY-Coupling and vertical dispersion.

ことで行っていた。SuperEKKB では電子雲不安定性の対策としてアンテチェンバーが採用されており、垂直方向のシンクロトン放射光がアンテチェンバー部に照射されるのをなるべく避けなければならない。このため SuperKEKB では光学補正に垂直方向のバンブ軌道を使わず、その代わりに六極電磁石へ歪四極補助コイルが新たに導入された。

SuperKEKB のアークセルは KEKB と同様に Non-Interleaved Sextupole スキーム [6] が採用されている。すなわち六極電磁石のペアは色収差補正に無用な非線形キックを互いにキャンセルするように配置されている。ペア間のベータatron位相が  $180$  度であるという特性から、Fig. 1(a) に示した様に、六極電磁石ペアに歪四極磁場を対称に励磁すると垂直分散がペア間に局在し、XY カップリングの独立な調整ノブとして使える。これとは逆に歪四極磁場を反対称に立てる励磁パターンは垂直分散の独立な調整ノブとして使える。一般に歪四極磁場は XY カップリングと垂直分散の両方を変化させるため両者の補正問題を同時に解く必要があるが、Non-Interleaved Sextupole スキームの特性を使うことで、これらを独立な問題として扱えるため調整が容易になる。

### 3. BEAM BASED ALIGNMENT

Phase1 のビーム調整は各種測定システムのキャリブレーションなどと平行して行われた。ここではビーム位置モニタ (BPM) の原点校正について報告する。各 BPM の原点は所謂 Beam Based Alignment(BBA) [7] によって決定した。すなわち、ステアリングでビーム軌道を変えながら各 BPM に対応する四極電磁石の磁場値を変化させることで、四極磁場に対してビームの位置変化率がゼロになる BPM の読み値を見つけた。SuperKEKB には約 900 台の四極電磁石が設置されており、それら全てに BPM が取り付けられている。各 BPM の水平方向と鉛直方向の原点を決定する必要があるため、最低でも  $900 \times 2 = 1800$  回という大量のデータ測定が必要となる。測定は主に真空焼きの合

間や深夜の時間帯に SAD を使って開発されたソフトウェアによって半自動的に行われた。測定データは BPM のオフセットとして測定システムに組み込み、それに基づいて軌道やビーム光学の補正を行った。

SuperKEKB にはビームが四極磁場のオフセンターを通ることで発生する軌道を押さえ込むだけの十分な数のステアリングが設置されているが、なるべく磁場中心を通すことで無用な分散関数の発生を抑え

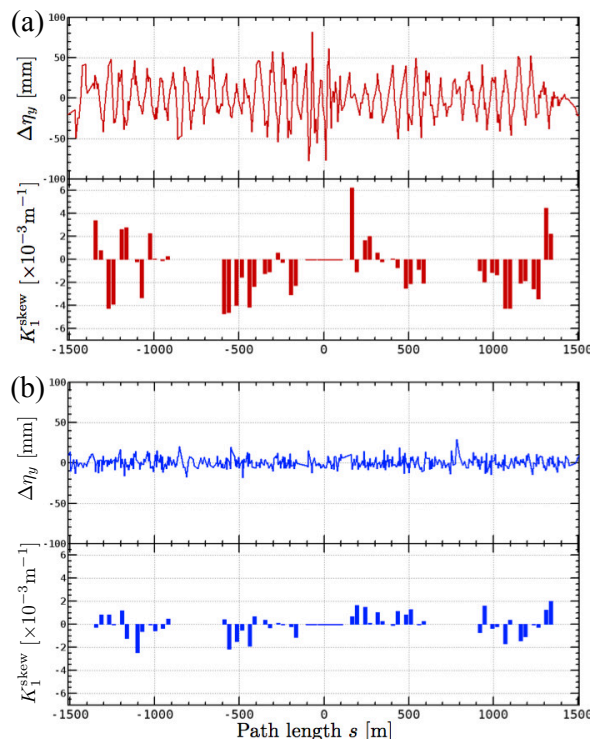


Figure 2: Residual vertical dispersion  $\Delta\eta_y$  and distribution of the corrector strength  $K_1^{\text{skew}}$  in HER (a) before and (b) after BBA.

ることができる。また四極電磁石の磁場中心にビームを通すことは最寄りの六極電磁石の磁場中心を通すことに繋がる。垂直エミッタンスが悪化する主要因はビームが六極磁場のオフセンターを通ることによって発生する垂直分散およびXYカップリングであるため、この原点校正により垂直エミッタンス源を減らすことができる。

六極電磁石の設置誤差によるビーム光学の乱れは原理的には前述の歪四極補助コイルによって補正することができるが、現実には補正磁場の強度がハードウェアの定格を超えてしまうといった問題が発生し得る。Figure 2はBBA前後のHERの垂直分散関数及び歪四極補助コイルの強さの分布である。BBAを行う前は補正磁場の強さが電源の定格から決まる上限に接近している状況であり、これ以上の垂直分散の補正が行えなかった。BBAを行うことで補正に必要な磁場値は低減し、さらなる補正が可能となった。

#### 4. LOW EMITTANCE TUNING

垂直エミッタンスの調整にはXYカップリングの補正が重要である。Figure 3(a)はLERの補正前のXYカップリングの測定結果であり、6つの水平方向のステアリングで与えた摂動に対して発生した垂直方向のビーム軌道を示す。縦軸は水平方向に発生したビーム軌道の2乗平均平方根(rms)で規格化してある( $\Delta\tilde{y} = \Delta y / \Delta x^{\text{rms}}$ )。ここで $\Delta x^{\text{rms}}$ は1.5 mm程度であ

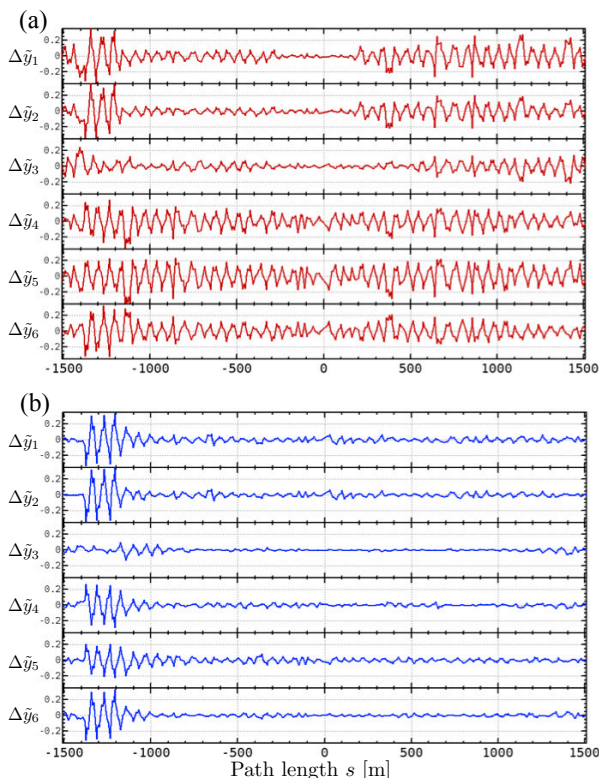


Figure 3: Measured XY-Coupling of the LER ring (a) before and (b) after correction.

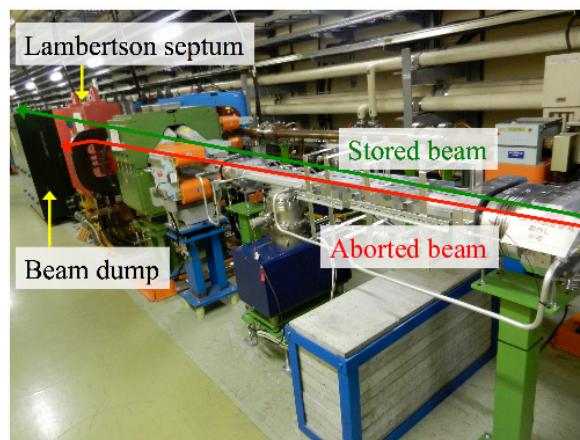


Figure 4: LER Beam abort system with Lambertson septum magnet.

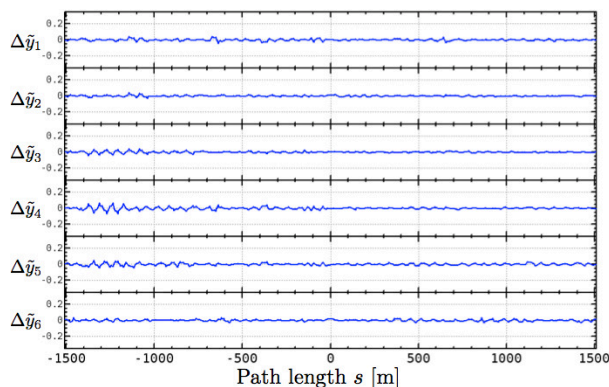


Figure 5: Measured XY-Coupling after installation of the permanent magnet.

る。Figure 3(b)は歪四極補助コイルにより補正した後の測定結果である。Phase1のコミッシュニングの期間を通じて六極電磁石の歪四極補助コイルによる光学補正がうまく機能することが実証された。

#### 4.1 Lambertson 電磁石の漏れ磁場

Figure 3(b)の $s = -1300$  mの辺りに既存の歪四極補助コイルでは補正できないXYカップリングが残っていることが分かる。この領域はFig. 4に写真を示したビームアポートシステムが設置されている。調査の結果、このXYカップリングはアポートされたビームをビードンプに向けて垂直方向にキックするDCセプトラムマグネット (Lambertson 電磁石) の磁場が貯蔵ビームのビームラインに漏れていることが原因であった。この漏れ磁場を補正するために Lambertson 電磁石の近くに常磁性マグネットを設置することを検討した。まず、測定されたXYカップリングを解析することでこの漏れ磁場を補正するために必要な歪四極磁場の強度を見積もった。その評価に基づき強磁性体であるフェライトマグネットをビームラインに取り付けた [8]。Figure 5にフェライトマグネット設置後のXYカップリングを示す。フェライトマグネット

Table 2: Summary of Optics Corrections

Optics parameter	LER	HER
$\Delta y^{\text{rms}} / \Delta x^{\text{rms}} [10^{-3}]$	9	6
$\Delta \eta_x^{\text{rms}} [\text{mm}]$	8	11
$\Delta \eta_y^{\text{rms}} [\text{mm}]$	2	2
$(\Delta \beta_x / \beta_x)^{\text{rms}} [\%]$	3	3
$(\Delta \beta_y / \beta_y)^{\text{rms}} [\%]$	3	3

を取り付けたことで、アポルト領域付近のXYカップリングが劇的に改善していることが分かる。LERほどビーム光学への影響は大きくはないが、HERでも同様の問題が観測されたため、フェライトマグネットを設置することで対策を施した。各種ビーム光学パラメータの補正結果を Table 2 にまとめる。

## 5. 到達エミッタンス

### 5.1 X線ビームサイズモニタによる評価

Figure 6 は LER の垂直エミッタンスの履歴である。垂直エミッタンスは X 線ビームサイズモニタによって測定したビームサイズ  $\sigma_y$  と X 線発光点でのベータ関数の設計値 ( $\beta_y^s = 67 \text{ m}$ ) から  $\varepsilon_y = \sigma_y^2 / \beta_y$  により評価した。Phase1 コミッシュングではビーム光学補正と各種ハードウェア及びソフトウェアの調整が反復的に行われた。ビーム光学の改善に伴いエミッタンスも改善し、Phase1 の期間中に約 10 pm まで到達することができた。一方、HER に関しては測定ビームサイズは  $40 \mu\text{m}$  程度であり、そこから推定される垂直エミッタンスは 120 pm となる。Table 2 に示した様に XY カップリングと垂直分散は少なくとも LER と同程度には補正されている。HER は LER に対してビームエネルギーが高いため、LER より垂直エミッタンスが大きくなることは考えられるが、桁で大きいとは考えにくい。

この問題を調査するために各種データ解析、ビームスタディが行われた。LER とここでは X 線発光点のベータ関数  $\beta_y^s$  を変えたビームサイズ測定に関して簡単に述べる。Figure 7 はビームサイズの 2 乗を縦軸に  $\beta_y^s$  を横軸にプロットしたものである。測定は  $\beta_y^s = 4, 8, 14 \text{ m}$  に対して行った。Figure 7 から明らかに  $\sigma_y^2(\beta_y^s = 0) \neq 0$  であり、ビームサイズ測定に何らかのオフセットが含まれていることを示唆している。測定データを直線でフィットし切片を求め、測定ビームサイズからオフセットを差し引いて垂直エミッタンスを再評価すると  $\varepsilon_y \sim 65 \text{ pm}$  となる。但し、この種の評価の結果は解析に用いる仮定やモデル式、測定データの処理方法などに依存することが分かっており、それらの評価結果は  $\varepsilon_y = 20 \text{ pm}$  から  $80 \text{ pm}$  程度の範囲でばらつく。

### 5.2 測定オプティクスによる評価

X 線ビームサイズモニタとは独立に垂直エミッタンスを見積もるために、測定されたビーム光学パラメ

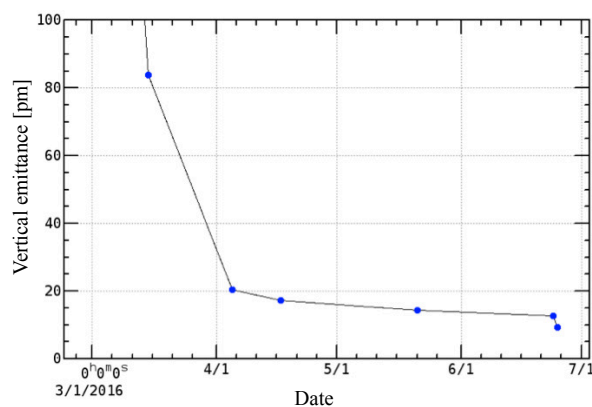


Figure 6: History of the vertical emittance of the LER ring evaluated with a X-ray beam size monitor.

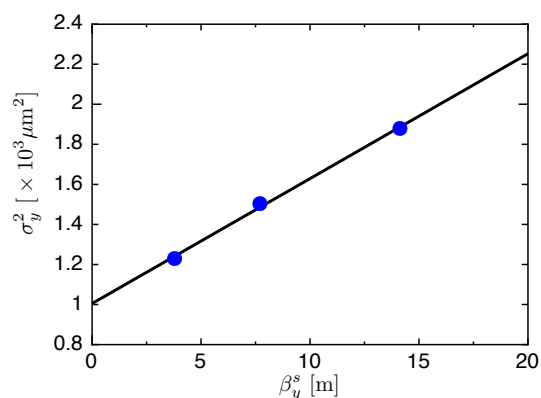


Figure 7: Squared beam size of the electron beam as a function of the beta function at the X-ray source point.

タに基づく評価を行った。具体的には、SAD 上の設計ラティスにマシンエラーを加えることで、測定された XY カップリング及び垂直分散を再現するエラー付きモデルラティスの構築を試みた。想定したマシンエラーは、六極電磁石の垂直方向設置誤差、四極電磁石の回転誤差、偏向電磁石の回転誤差、Lambertson 電磁石の漏れ磁場(歪四極磁場)である。これらをフィッティングパラメータとして、測定された XY カップリング及び垂直分散を再現するエラー付きモデルラティスを最小二乗法により決定する。フィッティングの残差が十分に小さく且つ BPM の密度が十分であれば求めたエラー付きモデルラティスの光学パラメータは現実のラティスの値をよく再現することが期待される。SuperKEKB の場合、BPM 間の位相は典型的には 35 から 40 度程度でありリング全周の光学パラメータを推定するのに十分に密であると考えられる。但し、得られた光学パラメータや垂直エミッタンスはフィッティングの残差の分だけの不定性が残る。

Figure 8 に HER の垂直分散の解析結果を示す。エラー付きモデルラティスは測定データのある程度再現できている。フィッティングの残差は垂直分散で 1 mm 程度であり、数 pm の垂直エミッタンスや光学パラメータの詳細な分布を議論することは難し

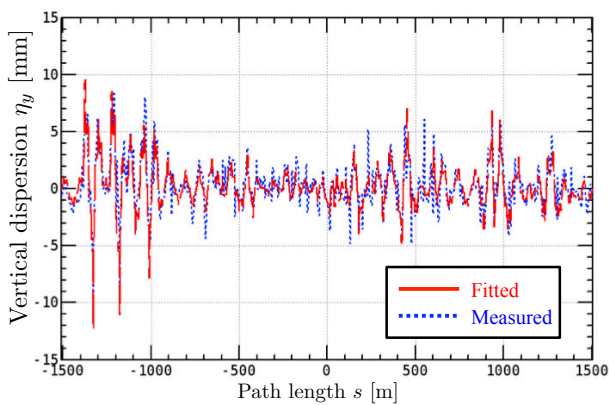


Figure 8: Fitting result of measured vertical dispersion in HER. The solid and dashed lines represent fitted and measured vertical dispersions, respectively.

いと考えられるが、エミッタンスのオーダーの見積もりには有用であると考えられる。このエラー付きモデルラティスでX線ビームサイズモニタによる測定と同様に、発光点のビームサイズとベータ関数から垂直エミッタンスを評価すると  $\varepsilon_y \sim 4 \text{ pm}$  となる。LER に関して同様の解析を行うとフィッティングの残差は HER と同程度で  $\varepsilon_y \sim 4 \text{ pm}$  となるため、実際の HER の垂直エミッタンスは LER と同程度ではないかと推測される。

## 6. まとめ

SuperKEKB の Phase1 コミッショニングにおけるビーム光学補正に関して報告した。Phase1 におけるビーム光学上の課題は垂直エミッタンスの調整である。垂直エミッタンスを可能な限り小さくするためにビーム光学補正がソフトウェアの整備とハードウェアのキャリブレーションなどと共に日々行われた。

ビーム光学の測定はステアリングや加速空洞の周波数に対するビーム軌道の応答を用いて行われた。垂直エミッタンスに特に重要な光学パラメータである XY カップリングと垂直分散は、SuperKEKB で新たに導入された六極電磁石の歪四極補助コイルを使うことで補正した。六極電磁石ペア間の位相が 180 度であるというアークセルの特性から XY カップリングと垂直分散を独立に制御できることが実証された。

BBA 法に基づいて約 900 台の両リングの BPM の原点を校正した。これにより、光学補正に必要な補正磁場が弱くなり、既存の補正用電磁石の電源定格内で光学補正をすることができた。

特に LER においてビームアポート領域の Lambertson 電磁石の漏れ磁場が垂直エミッタンス調整の妨げとなったが、Lambertson 電磁石の近くに常磁性マグネットを設置することで対処した。

Phase1 期間中に到達できた垂直エミッタンスに関しては、X線ビームサイズモニタの測定結果から LER に関しては 10 pm 程度である。HER に関しては X線ビームサイズモニタに依ると評価結果は  $\varepsilon_y = 20 \text{ pm}$  から 80 pm 程度の範囲でばらつく。一方、測定した

ビーム光学パラメータの解析からは LER と同程度であると考えられる。

## 参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 03A011 (2013).
- [2] KEKB Design Report, KEK Report 95-7.
- [3] T. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 03A001 (2013).
- [4] A. Morita *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 072801 (2007).
- [5] K. Oide, Nucl. Inst. Meth. A 276, 427 (1989); <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [6] K. Oide and H. Koiso, Phys. Rev. E 47, 2010 (1993).
- [7] M. Masuzawa *et al.*, Proc. of EPAC2000, 1780.
- [8] N. Iida *et al.*, (private communication).