

# Local Orbit Bump を用いた SuperKEKB 最終収束光学系の誤差評価 ERROR ESTIMATION OF SUPERKEKB FINAL FOCUS OPTICS BY USING LOCAL ORBIT BUMP

森田昭夫\*, 小磯晴代、大西幸喜、杉本寛

Akio Morita\*, Haruyo Koiso, Yukiyoshi Onishi, Hiroshi Sugimoto  
KEK

## Abstract

SuperKEKB is an asymmetric-energy electron-positron collider designed to achieve 40 times luminosity of KEKB B-factory. The phase-2 commissioning was carried out from 19th March to 17th July 2018 to confirm the “nano-beam” scheme collision. In the early stage of the phase-2 commissioning, the basic functionality of the final focus quadrupole doublet optics was tested by measuring the orbit response against the local orbit bump around the interaction point. We try to estimate the machine error of the interaction region from the measured local orbit bump response. We report the machine error estimation from the local orbit bump response and comparison with other sources.

## 1. はじめに

SuperKEKB 加速器 [1] は、Belle II 実験のための B 中間子生成を主目的とする非対称エネルギー ( $7 \times 4\text{GeV}$ ) 電子陽電子衝突型加速器であり、前世代の KEKB B-Facility 加速器の 40 倍のルミノシティ  $8 \times 10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の達成を目標としている。SuperKEKB の設計では、KEKB 比で 2 倍の蓄積電流を用い、衝突点垂直ベータ関数  $\beta_y^*$  を絞るとともに垂直エミッタンス  $\epsilon_y$  を小さく抑え  $1/20$  の断面積で衝突させることで、40 倍のルミノシティを狙っている。しかし、典型的な  $\beta_y^*$  の設計値はバンチ長  $\sigma_z$  の約  $1/20$  であり、従来型の衝突方式では砂時計効果によって  $\beta_y^*$  の縮小による有効衝突断面積の縮小が期待できない。この制約から逃れるために、衝突点水平ビームサイズ  $\sigma_x$  を小さくしつつ、交差角を大きくとり、衝突するバンチ同士の進行方向の重なり合いを小さくする “nano-beam” 方式と呼ばれる衝突方式が採用されている。

2016 年に衝突点を除く加速器システム試験を目的とした Phase-1 コミッショニング [2, 3] が行われ、その後の衝突点組み込み作業を経て、2018 年 3 月 19 日から 7 月 17 日にかけて “nano-beam” 方式の衝突を実証するための Phase-2 コミッショニングが行われた。

“nano-beam” 方式の衝突実証には、従来型衝突方式の限界となる衝突点垂直ベータ関数がバンチ長より小さな領域 ( $\beta_y^* < \sigma_z$ ) で衝突点垂直ベータ関数の縮小に伴いルミノシティが上昇することを確かめる必要がある。こうした低  $\beta_y^*$  光学系は、最終収束系を構成する四重極電磁石中のベータ関数が大きいため、マシンエラーの影響を強く受け、精密な光学補正 [4] を必要とする。

最終収束系への本格的な光学補正に先立ち、最終収束系の動作健全性確認のため、最終収束系のステアリング二重極電磁石の励磁に対する軌道応答や衝突点を跨いだ Local Orbit Bump に対する軌道応答の測定が、3 月末から 4 月中旬にかけて行われた。一連の試験により、最終収束系を構成する超伝導四重極電磁石に組み込まれてい

るステアリング二重極電磁石と補正用歪四重極電磁石の配線の入れ替わりや、ステアリング二重極電磁石の極性反転等が判明し、即座に修正が行われた。

この動作確認中に衝突点近傍に立てた Local Orbit Bump の軌道応答には、主に衝突点光学系のマシンエラーが反映されていると考えられる。本稿では、光学モデル上に構築された誤差モデルを用いて Local Orbit Bump の軌道応答からのマシンエラーの抽出を試み、その後のコミッショニングで行われた光学補正パラメータとの比較を報告する。

## 2. LOCAL ORBIT BUMP からの誤差推定

マシンエラーが存在する場合、光学モデル上の計算で閉じている Local Orbit Bump も、実機上では局所化せずに全周にわたる閉軌道の変位を生じる。特に、Local Orbit Bump による軌道応答の漏洩の有無は、Bump 領域内の光学系の誤差と Bump の形成に用いるステアリング二重極電磁石の応答誤差のみに依存している。また、Bump 領域外の四重極電磁石の勾配誤差による影響は Bump の漏洩が小さい場合には抑制されるため、ステアリング二重極電磁石によるシングルキック応答の測定と比較して、Bump 領域外の光学系の歪みの影響を受けにくいと考えられる。最後に Local Orbit Bump を用いた最終収束系の軌道応答測定を確認した時点では、ビーム位置モニタ (BPM) や補正電磁石の結線・極性は確認済みであったが、衝突点近傍の BPM は原点較正を行われていないため、電磁石の磁場中心に対するビームの通過位置情報は信頼出来ない。

本解析では、軌道の変位を用いて最終収束系に存在する四重極モードの誤差を検出すべく、Bump 領域内の最終収束系を構成する各リング 4 台の超伝導四重極電磁石の主四重極/歪四重極モードのパラメータ及び Bump 操作に用いたステアリング二重極電磁石の応答係数を自由度として加速器計算コード SAD [5, 6] 上に構築された光学系の設計モデルの軌道応答を観測結果に当てはめる。この際、誤差は摂動領域にあると仮説し、光学モデルのモデルパラメータによる数値微分から線型モデルを構成し、測定された軌道応答と線型モデルの残差二乗和が最

\* akio.morita@kek.jp

小化するモデルパラメータを決定した。また、解析の入力データとしては、最終収束系を囲む小さな領域に立てられた水平・垂直方向の相異なる Local Orbit Bump から Bump 操作の再現性が良好なものを使用した。

Figure 1 は、HER で測定されたサイン型水平 Local Orbit Bump への軌道応答の一例で、上から順にベータ関数、水平軌道変位、垂直軌道変位、ビームライン上の電磁石の並びが衝突点前後  $\pm 60$  m の領域にわたって描かれている。2/3 段目では、理想的な Local Orbit Bump の形状を黒線、BPM で測定された軌道変位を青点・赤点、パラメータフィットされた光学モデル上の変形した Local Orbit Bump を緑線で表示している。Table 1 に示すのは、特異値分解による最小二乗法で定めた最終収束系の主四重極/歪四重極モードのモデルパラメータの設計値からの誤差 ( $\Delta K1$ ,  $\Delta SK1$ ) を主四重極の設計値  $K1_{design}$  で規格化した値である。表中の QC で始まる名称は、最終収束系を構成する超伝導電磁石名で、3 文字目の 1/2 は衝突点から見た並び順、4 文字目の L/R はリング内側から見た際の左右、5 文字目の E/P は高エネルギー電子リング (HER)/低エネルギー陽電子リング (LER) を示している。最小二乗法を解く際の特異値打ち切りに用いた閾値には、ノイズに対する過剰な当てはめを避けるため比較的大きな値  $5 \times 10^{-2}$  を用いた。この時、HER と LER の軌道応答のフィッティング残差の二乗平均平方根 (RMS) は、それぞれ  $17 \mu\text{m}$  と  $15 \mu\text{m}$  であった。RMS 残差は閾値の変更に対して比較的安定であり、軌道測定時にサンプル毎に  $10 \mu\text{m}$  程度のばらつきがあった点と測定時に平均処理等を施していないことを考えれば概ね良好なフィッティングと考えられる。

### 3. 他のソースから得られる誤差指標

Phase-2 コミッショニング時の最終収束系の誤差指標として、最終収束系設置作業時の磁場測定の解析結果とコミッショニング終了時の光学補正パラメータが挙げられる。

Table 2 に示すのは、最終収束系設置作業時に最終収束系及び検出器ソレノイドを正規の位置に仮組みした状態で行われた磁場測定の結果から、主四重極超伝導電磁石中心から衝突点までビーム軸方向の距離  $L^*$  の設計値からの相対誤差  $\Delta L^*/L^*$  と回転設置誤差  $\Delta\theta$  をまとめたものである。ここで、正の  $\Delta L^*/L^*$  は、電磁石が設計より衝突点から遠方にあることを示している。作業時間の都合から、Phase-2 コミッショニングの運転に使用された光学モデルには、磁場測定から得られた設置誤差は反映されていない。従って、光学モデル上のパラメータに対しては、進行方向の設置誤差は主四重極モードの収束力  $\Delta K1/K1_{design} \sim \Delta L^*/L^*$ 、回転設置誤差は主四重極モードから歪四重極モードへの混合  $\Delta SK1/K1_{design} \sim 2\Delta\theta$  がそれぞれ対応する。

Table 3 及び Table 4 は、Phase-2 コミッショニング終了時点での最終収束系の光学補正係数から主四重極モード ( $\Delta K1$ ) と歪四重極モード ( $\Delta SK1$ ) を項目毎に抜きだし、主四重極モードの設計値  $K1_{design}$  で正規化してまとめたものである。これらの値は、運転時に加速器の応答を光学モデルに近づけるための補正係数なので、光学モデルを基準に測った加速器の誤差と逆符号になって

いる。

### 4. 比較と考察

最終収束系の四重極電磁石と BPM は、HER の QC2LE/QC2RE の配置を除いて、ビーム軸方向に衝突点を中心に対称に配置されており、左右の QC1 電磁石の  $\beta$  関数とベータatron位相はほぼ縮退している。また、QC1 付属の BPM は QC1 電磁石のすぐ内側に位置している。このため、軌道変位が左右の QC1 電磁石間に局在する QC1 電磁石に反対称な誤差モードには、最終収束系外の BPM は感度が無く、QC1 の BPM は誤差源に近すぎるため信号が小さくなる。従って、Table 1 を他と比較する際には、QC1 に関しては QC1L と QC1R を合計した同相モードのみを対象とする。

Table 2 の設置誤差との比較では、進行方向の設置誤差  $\Delta L^*/L^*$  については符号は一致するものの全体的に解析で得られた  $\Delta K1/K1_{design}$  の方が大きな値を示す傾向がある。また、回転設置誤差  $2\Delta\theta$  と解析から得た  $\Delta SK1/K1_{design}$  の比較では、両者のスケールは 2 倍以上異なるものが多く、符号の対応も含め整合しているとは言い難い。

Table 3 の主四重極モードの光学補正との比較では、QC2LE 及び QC2RP について本解析で得た誤差が大きい以外、概ね整合した値となっている。また、Table 4 の歪四重極モードの光学補正との比較では、HER については主四重極モードと同様に、QC2RE に関して本解析で得た誤差が大きい以外は概ね整合しているが、LER については本解析で得た誤差に対して光学補正が逆符号かつ補正量がほぼ 1 桁大きくなっている。

光学補正との比較で、歪四重極モードの一致度が低い点については、誤差推定が水平軌道変位から垂直軌道や垂直軌道変位から水平軌道への回りこみ測定に依存しているため、回りこみによる変位が小さくサンプル毎の軌道変動等で S/N 比が不足している可能性が考えられる。また、QC2RE の一致度の低さについては、最終収束系内の 8 台の四重極超伝導電磁石に重なっているソレノイド磁場の軸が QC2RE のみ他と異なるので、光学モデルのモデリング誤差が原因である可能性も考えられるので、モデリングのより綿密な検討が必要と思われる。

### 5. まとめ

最終収束系の初期動作確認時に測定された Local Orbit Bump に対する軌道応答から、最終収束系のモデルパラメータの誤差を評価し、運転終了時点の光学補正パラメータとの比較を行った。比較の結果、歪四重極パラメータの推定には難があるが、主四重極パラメータに関しては概ね一致していることが確認された。本格的に光学補正を行う前に、初期動作確認で取得したデータの解析結果を補正に適用することで、光学補正の反復を短縮することが可能であると思われる。

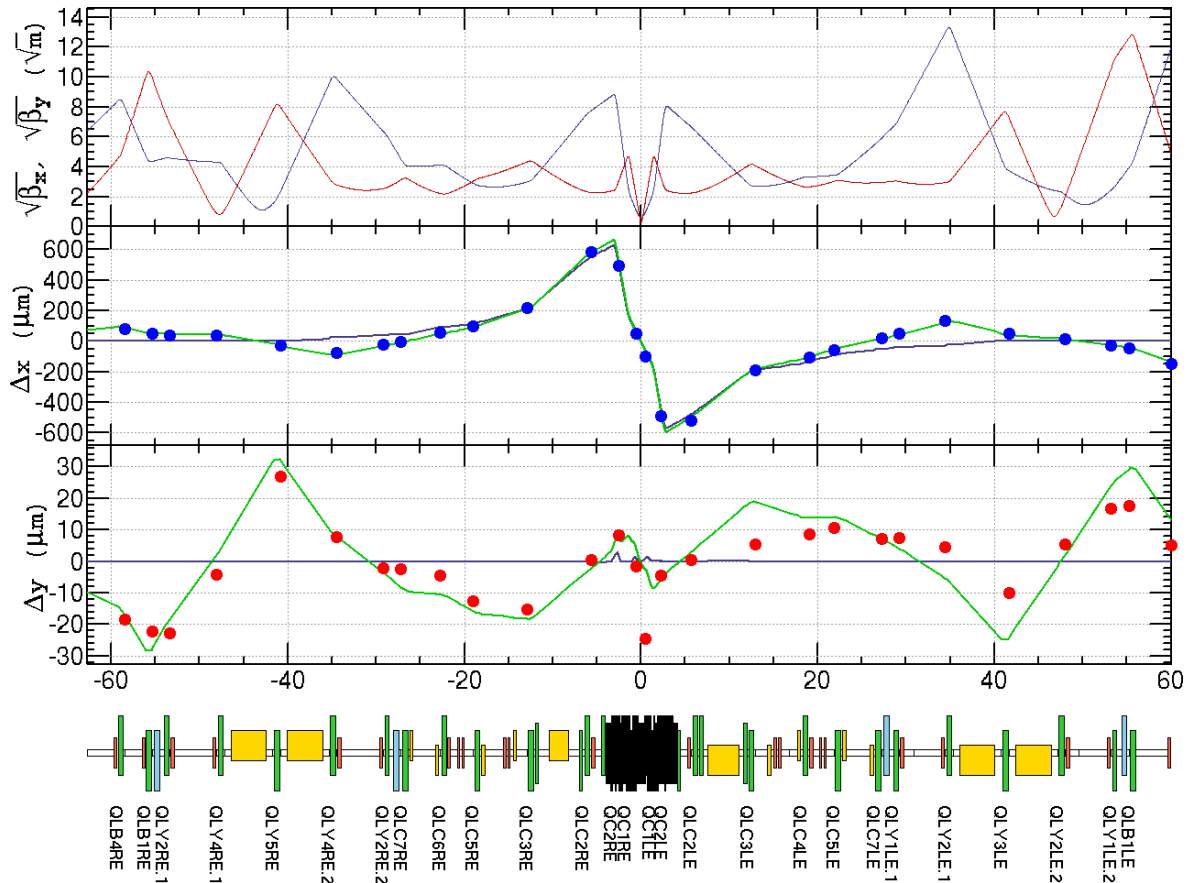


Figure 1: The measured response of a horizontal local orbit bump at the high energy ring(HER). The blue and red lines in the first column show the horizontal and vertical beta-function, respectively. the horizontal and vertical orbit displacements are shown in the second and third columns. The blue and red points show the measured horizontal and vertical orbit displacements, respectively. The black lines show the ideal local orbit bump. The green lines show the local orbit bump modified by the optical parameter fitting.

Table 1: Parameter Fitting Results

Parameter	QC2LE	QC1LE	QC1RE	QC2RE
$\Delta K1/K1_{design}$	$4.9 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$5.7 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-3}$
$\Delta SK1/K1_{design}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$-5.8 \times 10^{-4}$	$-1.1 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-3}$
Parameter	QC2LP	QC1LP	QC1RP	QC2RP
$\Delta K1/K1_{design}$	$4.1 \times 10^{-3}$	$5.4 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$
$\Delta SK1/K1_{design}$	$9.3 \times 10^{-5}$	$-2.4 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-5}$

Table 2: Measured Alignment Error ( $\Delta L^*/L^*$  &  $\Delta\theta$ )

Error	QC2LE	QC1LE	QC1RE	QC2RE
$\Delta L^*/L^*$	$2.67 \times 10^{-4}$	$2.50 \times 10^{-3}$	$5.18 \times 10^{-4}$	$3.21 \times 10^{-4}$
$\Delta\theta$	$-1.54 \times 10^{-3}$	$-1.60 \times 10^{-3}$	$-0.14 \times 10^{-3}$	$0.73 \times 10^{-3}$
Error	QC2LP	QC1LP	QC1RP	QC2RP
$\Delta L^*/L^*$	$1.07 \times 10^{-3}$	$2.07 \times 10^{-3}$	$9.84 \times 10^{-4}$	$5.92 \times 10^{-4}$
$\Delta\theta$	$-4.045 \times 10^{-3}$	$-1.67 \times 10^{-3}$	$2.016 \times 10^{-3}$	$-1.726 \times 10^{-3}$

Table 3: Normal Quadrupole Mode Correction ( $\Delta K1/K1_{design}$ )

Correction	QC2LE	QC1LE	QC1RE	QC2RE
$\Delta L^*$	$-1.3 \times 10^{-4}$	$-1.25 \times 10^{-3}$	$-2.6 \times 10^{-4}$	$-1.6 \times 10^{-4}$
Waist	0.0	$-6.0 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-4}$	0.0
Global-beta	$-4.0 \times 10^{-3}$	$-6.8 \times 10^{-4}$	$-1.0 \times 10^{-3}$	$-4.4 \times 10^{-4}$
Total	$-4.13 \times 10^{-3}$	$-2.53 \times 10^{-3}$	$-6.6 \times 10^{-4}$	$-6.0 \times 10^{-4}$

Correction	QC2LP	QC1LP	QC1RP	QC2RP
$\Delta L^*$	$-5.4 \times 10^{-4}$	$-1.04 \times 10^{-3}$	$-4.9 \times 10^{-4}$	$-3.0 \times 10^{-4}$
Waist	0.0	$2.4 \times 10^{-3}$	$-2.4 \times 10^{-3}$	0.0
Global-beta	$-4.6 \times 10^{-4}$	$-1.9 \times 10^{-3}$	$-7.3 \times 10^{-4}$	$-4.9 \times 10^{-4}$
Total	$-1.0 \times 10^{-3}$	$-5.4 \times 10^{-4}$	$-3.62 \times 10^{-3}$	$-7.9 \times 10^{-4}$

Table 4: Skew Quadrupole Mode Correction ( $\Delta SK1/K1_{design}$ )

Correction	QC2LE	QC1LE	QC1RE	QC2RE
$R2^*$	0.0	$-2.8 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	0.0
Global-coupling	$-1.4 \times 10^{-3}$	$4.8 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$	$-1.5 \times 10^{-4}$
Total	$-1.4 \times 10^{-3}$	$-2.32 \times 10^{-3}$	$3.37 \times 10^{-3}$	$-1.5 \times 10^{-4}$

Correction	QC2LP	QC1LP	QC1RP	QC2RP
$R2^*$	0.0	$-3.5 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$	0.0
Global-coupling	$2.4 \times 10^{-3}$	$-6.5 \times 10^{-4}$	$-5.7 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-3}$
Total	$2.4 \times 10^{-3}$	$-4.15 \times 10^{-3}$	$3.43 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)17K05475により助成されています。

## 参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”, Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A011; <http://ptep.oxfordjournals.org/content/2013/3/03A011.full.pdf>
- [2] Y. Funakoshi *et al.*, “SUPERKEKB PHASE 1 BEAM COMMISSIONING”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2016, pp. 24-28.; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2016/proceedings/PDF/M00L/M00L02.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/M00L/M00L02.pdf)
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, “OPTICS CORRECTION AND LOW EMITTANCE TUNING AT THE PHASE 1 COMMISSIONING OF SuperKEKB”, Proceedings of eeFACT2016, Daresbury, TK, Oct. 2016, pp. 143-146.; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/eefact2016/papers/tut3bh2.pdf>
- [4] H. Sugimoto *et al.*, “Beam optics tuning in SuperKEKB commissioning”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2018, THP002.
- [5] K. Hirata, “AN INTRODUCTION TO SAD”, Proceedings of the 2nd Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop, July 1988, pp. 62-65; <https://cds.cern.ch/record/369760/files/62.pdf>
- [6] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>