

SuperKEKB 主リングにおける電磁石アライメント方針の検討 EXAMINATION OF MAGNET ALIGNMENT POLICY FOR SUPERKEKB MR

森田昭夫 *^{A)}、小磯 晴代 ^{A)}、大西 幸喜 ^{A)}、生出 勝宣 ^{A)}、杉本 寛 ^{A)}
Akio Morita *^{A)}, Haruyo Koiso ^{A)}, Yuki Yoshi Ohnishi ^{A)}, Katsunobu Oide ^{A)}, Hiroshi Sugimoto ^{A)}
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

SuperKEKB is an asymmetric-energy electron-positron collider under constructing aimed to achieve 40 times luminosity of KEKB B-factory. The vertical emittance required by the luminosity design is 8 ~ 11 pm including beam-beam effect. In order to achieve low vertical emittance, the quality of the magnet alignment is important. The distortion of the KEKB B-factory tunnel reused for SuperKEKB is about 25 mm in the vertical direction by subsidence during 10 years operation. SuperKEKB is designed to reuse the beamlines of KEKB B-factory as possible as except the interaction region. The alignment policy for the magnets on the reused beamlines is an issue related with both the vertical emittance and the construction schedule. The alignment policy is chosen to satisfy both keeping the required vertical emittance and avoiding a large amount of re-alignment working.

1. はじめに

SuperKEKB^[1,2,3] は、KEKB B-factory で達成されたルミノシティの 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目標として建設中^[4] の非対称エネルギー電子-陽電子衝突型加速器である。SuperKEKB の主リング建設では、KEKB B-factory で使われたトンネル (KEKB トンネル) と衝突点 (IP) 近傍の約 300m の直線部 (筑波直線部) を除くビームラインを再利用する。KEKB B-factory 加速器のビームラインは、建設時に水平面上にアライメントが行なわれたが、長期メンテナンス期間中のビームライン測量データから、KEKB トンネルに不等沈下が起こったことが確認されている。図 1 に示すのは、隔年で測定されているビームラインの垂直変位を IP から陽電子ビームの方向に一周分描いたものである。ここで、図中に示された垂直変位は、 $s = 0 \text{m}$ にある IP 近傍の測量基準点から測られている。KEKB B-factory 加速器の運転が終了した 2010 年時点で、トンネルの最大沈下量は、ほぼ 25mm に達している。最も沈下が激しい地点での平均沈下速度は、約 2mm/年であり、2013 年現在も KEKB

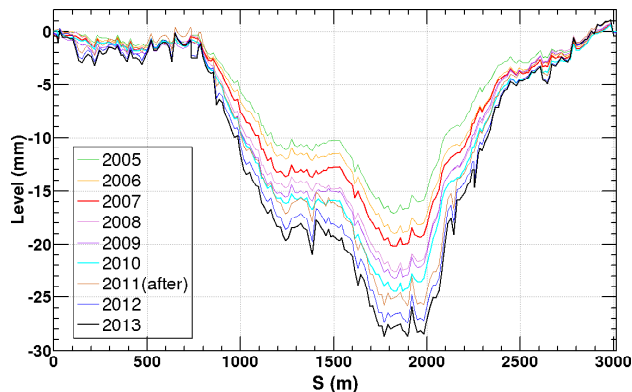


Figure 1: History of Beamline Level Level is the relative vertical displacement from the interaction point (IP). S is the orbit path length measured from the IP toward to the positron beam direction.

* akio.morita@kek.jp

トンネルの沈下は依然として進行中である。2011 年のデータは、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災後の測量によるもので、震災前の 2010 年の測量から 2011 年の測量の間で見られる他の年度間と異なる大きな局所的な変位は、トンネルのエクспанションジョイント部が震災で動いたことに起因すると思われる。既設のビームラインを完全に撤去して再構築が行なわれる筑波直線部は、図中では左端 $s = 0 \text{m}$ から約 150m と右端 $s = 3016 \text{m}$ から約 150m の領域に相当し、IP に対する相対変位が比較的小さな領域である。

SuperKEKB の設計では、 $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のルミノシティを達成するために、nm 級の水平エミッタンスと 0.25% 程度の小さなカップリングパラメータを要求しており、ビーム・ビーム効果込みで 10 pm 以下の垂直エミッタンスを実現する必要がある。ビームラインのアライメントは垂直エミッタンス性能の限界に影響するため、アライメントポリシーはルミノシティ設計の要求を満足しなければならない。同時に、全長約 3km のビームラインの 9 割近くを占める再利用区間に対するアライメントポリシーは、アライメント作業のスケジュールに大きな影響を与える。

以下では、アライメント誤差からの光学系への影響評価とスケジュール的な影響を加味した決定した SuperKEKB のアライメントポリシーについて報告する。

2. アライメントと垂直エミッタンス

大域的で滑らかビームラインレベルの変位に関しては、光学補正に対して変位が断熱的で有れば設計ルミノシティに対して十分なレベルまで垂直エミッタンスを補正可能であることが分かっている。^[5] また、運転初期のトンネル変形に関しては、ビームラインの精密測量データに基づく変形モデル上で光学補正計算を行なうことで、事前に補正を行なうことも可能である。

したがって、光学系の垂直エミッタンス性能を制限する変位としては、軌道やカップリングを補正するためのステアリング電磁石や歪四重極電磁石の配置に近い若しくは短い空間周波数を持つ変位や、光学補正の繰り返し周期より短い時間で変化する変位が考えられる。後者の時間的に早い変位の原因となり得るトンネルの振動に

関しては、垂直エミッタンスに深刻な影響を及ぼす振幅のものは現時点までに収集された観測データからは見つかっていない。また、地震等に起因する地殻変動による不連続な変位の発生に関しては、光学系の測定からおおよその位置を推定した上で、現場にて周辺のビームラインの精密測量と再アライメントで対応するほかない。故に、ランダムな垂直方向のアライメントエラーによる光学補正後の垂直エミッタンスに与える影響が、エラーの空間分布でどのように変わるかの評価を行なった。

加速器計算コード SAD^[6] 上に構築したシミュレーションモデルでは、最終収束系を除くビームライン上の偏向電磁石、四重極電磁石、六重極電磁石にランダムな垂直アライメントエラーを与え、これを理想的な加速器モデルの線形応答を用いた閉軌道補正とカップリング分散補正を施した。アライメントエラーの分布は、分散 $100\ \mu\text{m}$ のガウス分布を短距離でのアライメントエラーを抑制するための 2 次低域通過フィルター (LPF) で処理したものを使用した。光学補正における観測情報としては、ビームポジションモニタ (BPM) でのビームの位置情報と垂直分散及び 2 つのカップリングパラメータ

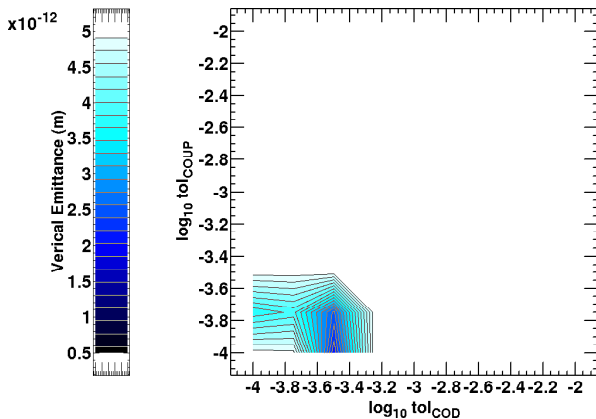


Figure 2: Vertical Emittance Contour Plot after Optics Correction for Random Alignment Error with $\lambda_c = 10\ \text{m}$. The horizontal and vertical axis show the tolerance of singular value decomposition (SVD) for the closed orbit correction and coupling-dispersion correction, respectively.

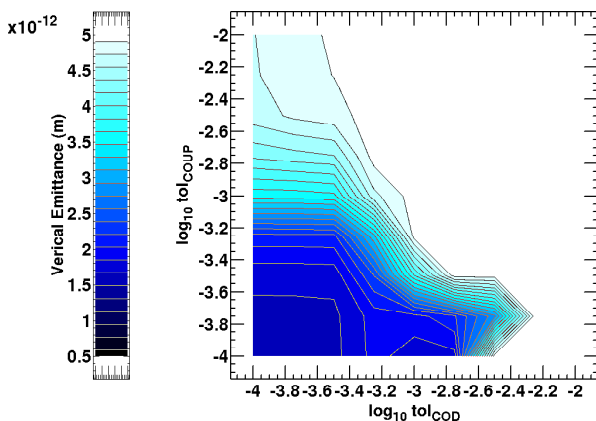


Figure 3: Vertical Emittance Contour Plot after Optics Correction for Random Alignment Error with $\lambda_c = 80\ \text{m}$

R_1, R_2 を与え、補正子として垂直ステアリング電磁石と六重極電磁石に組み込まれた歪四重極巻線を用いた。想定した観測量の内、ビームの位置情報と垂直分散は、BPM による直接測定が可能であり、2 つのカップリングパラメータによる情報量は水平軌道の摂動に対する垂直軌道の応答から推定できる情報量とほぼ等しい。

図 2,3 に示すのは、LPF 遮断波長 λ_c に 10, 80 m を設定したランダムなアライメントエラーに対する光学補正後の垂直エミッタンス分布の $\langle \epsilon_y \rangle + 3\sigma_{\epsilon_y}$ で描いた等高線図で、縦軸・横軸はそれぞれカップリング-分散補正と閉軌道補正で用いた特異値分解のしきい値である。元の垂直エミッタンス $1.5\ \text{pm}$ に対して、図 2 に示すような遮断波長が短い場合は垂直エミッタンスの増加を抑えられないが、図 3 に示すように 80 m 程度の遮断波長があれば比較的広い SVD 閾値で垂直エミッタンスを $3\ \text{pm}$ 以下に抑えられる。図 4 に示すのは、20 年分高低差 50 mm のトンネル沈下が $\lambda_c = 75\ \text{m}$ 程度の滑らかさで起こった状況での光学補正後の垂直エミッタンスの予測値で、図 3 同様に比較的広い SVD 閾値で垂直エミッタンスを $3\ \text{pm}$ 以下に抑えられる。以上から、光学補正後の垂直エミッタンス性能へは、波長 80 m 以下の構造のアライメントエラーが大きく影響し、近距離でのアライメントのばらつき制御が重要であることが分かる。

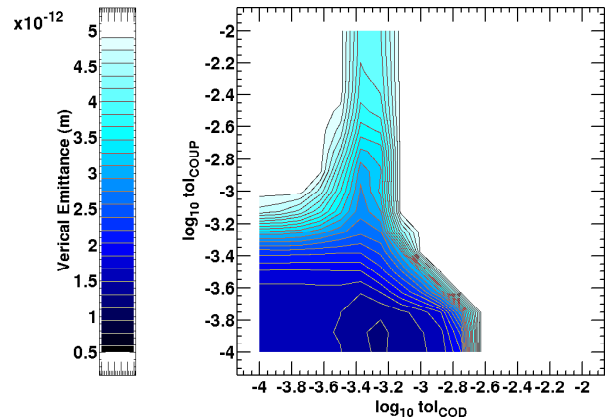


Figure 4: Vertical Emittance Contour Plot after Optics Correction for 20 years Tunnel Subsidence with $\lambda_c = 75\ \text{m}$

3. アライメントポリシー

最も単純なアライメントポリシーは、KEKB B-factory 建設時と同様に全てのビームラインを水平面上に並べることである。このポリシーでは、運転初期に大域的なビームライン変形に伴う光学系の歪みを考慮する必要が無い代わりに、図 1 の 2013 年の測量結果を基準にすると最低でも $\pm 15\ \text{mm}$ 程度のレベル修正が必要となる。既設の高周波空洞等の大きなレベル修正が困難な装置を考慮した場合、電磁石のレベル修正量の最大値は更に大きくなる上に、電磁石の架台の調整範囲にも制限があるため、架台によっては改造やシム挿入等の作業も必要となる。

レベル修正量を緩和する方法として、筑波直線部を除くレベル修正が困難な高周波空洞が設置されている 3 直線部を通る傾斜した平面へ並べるポリシーが考えられる。図 5 に示すのは、図 1 に示した測量データを 3 直

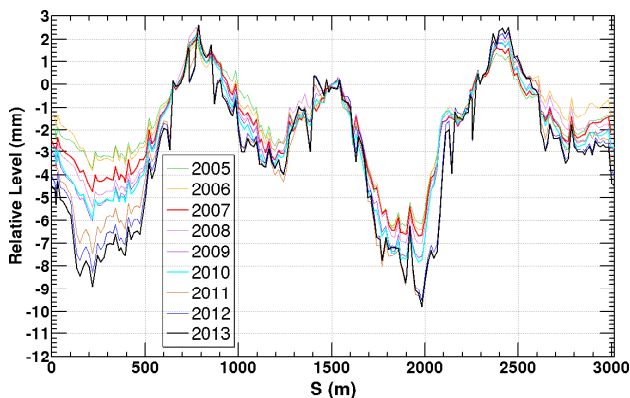


Figure 5: Beamline Level on Tilted Plane defined by 3 Reference Point. Relative Level is the relative vertical displacement from the tilted plane. 3 reference point of the tilted plane are chosen from 3 straight section where RF cavity is installed.

線部から1点ずつ代表点を選び、3つの代表点を通る傾斜した平面からの高さである。図5に示す2013年の測量結果から必要なレベル修正量の最大値は、約10mmと、水平面へアライメントする場合と比べて3分の2に抑えることができる。また、高周波空洞が設置されている3直線部の平均レベルを4mm程度修正するのであれば、レベル修正量を±6mm程度まで圧縮できる。

KEKB B-factory から再利用される架台や SuperKEKB 向けに新作される架台のレベル調整機構の特性として、約1mmを越えるレベル調整では目標値への収束を得るために必要な架台の調整と再測量の繰り返しが増える傾向にあり、アライメントの作業量的(スケジュール的)な観点からは、大きなレベル修正を要する区間が短いことが好ましい。同一平面上にアライメントを行なうこれら2つのポリシーでは、収束の時間がかかる調整量の大きな区間がビームライン全長の半分以上を占めるため、作業量的な観点では望ましいものではない。

アライメントに関するエラーシミュレーションからは大域的かつ滑らかな垂直変位が光学補正後の垂直エミッタンスへ与える影響は、適切な補正が施せる場合には局所的な垂直アライメントの乱れによる影響と同程度かそれ以下であることが予言されている。この予言に基づいて、光学補正後の垂直エミッタンスを維持しつつアライメント作業量を圧縮するために SuperKEKB では、大域的なトンネルの変形には手を付けない以下の3項目からなるアライメントポリシーを採用した。

- 既設ビームラインを再利用する区間は、測量で得られたビームラインレベルを低域通過フィルタで平滑化した曲線を目標とする
- 新設ビームラインを設置する筑波直線部は、IPを基準とした水平面を目標とする
- 再利用区間と筑波直線部を結ぶ中間領域は両区間を滑らかに結ぶ曲線を選ぶ

ただし、再利用区間の目標曲線の生成に使う測量データからは、震災によるトンネルジョイント部の変位の影響を受けたと思われる標本点を除外した。図6に示され

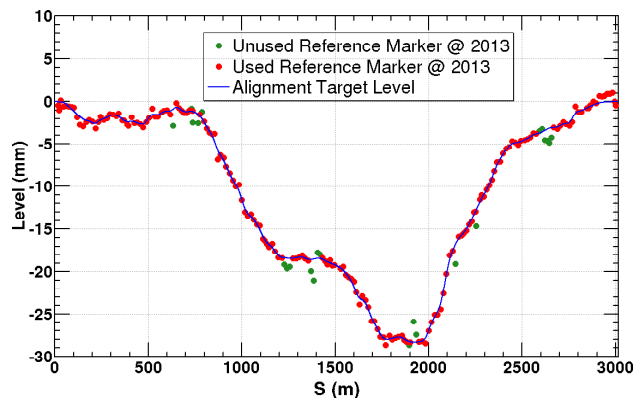


Figure 6: Alignment Target Level and Latest Measurement Reference Marker. The red and green points are the measured level of the reference markers at 2013. The blue line is the alignment target level built from a part of the measured reference markers shown as the red points.

るのは、2013年の測量データとそれを元に定められたビームラインレベルの目標曲線である。このアライメントポリシーの元では、図6に緑色の点で示される目標曲線作成時に除外された測量基準点周辺の僅かな区間を除いて、殆どの区間で必要とされるレベル修正量が±1mm以下となる。これにより、再利用区間のアライメントから光学補正後の垂直エミッタンスに影響する短波長の凹凸を取り除きつつアライメント作業量の最小化を実現した。

4. まとめ

SuperKEKB では、設計性能を達成するための垂直エミッタンスへの要求値を達成しつつ、建設スケジュールに対するビームラインのアライメント作業の影響を最小化するための既設のビームラインの大域的な変形を可能な限り修正しないアライメントポリシーを定めた。

5. 謝辞

本稿の執筆にあたり、リング全周にわたる良質な測量データを提供してくれた KEKB 電磁石グループに謝意を表したい。

参考文献

- [1] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1
- [2] M. Masuzawa, "Next Generation B-factories", IPAC 2010, Kyoto, May 2010, FRXBMH01, p. 4764 (2010)
- [3] Y. Ohnishi, "Lattice Design of Low Emittance and Low Beta Function at Collision Point for SuperKEKB", IPAC 2011, San Sebastian, September 2011, THPZ007, p. 3693 (2011)
- [4] K. Akai, "Construction Status of the SuperKEKB Rings", 10th Annual Meeting of PASJ, Nagoya, August 2013, SUP006
- [5] A. Morita, "Estimation of Tunnel Subsidence Effect on SuperKEKB", 9th Annual Meeting of PASJ, Osaka, August 2012, THPS028, p. 930 (2012)
- [6] K. Oide, Nucl. Inst. Meth. A276, 427(1989), <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>