

ESTIMATION OF TUNNEL SUBSIDENCE EFFECT ON SUPERKEKB

Akio Morita*, Haruyo Koiso, Yukiyo Ohnishi, Katsunobu Oide, Hiroshi Sugimoto,
High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The SuperKEKB uses the tunnel which was used for the KEKB B-factory. The tunnel subsidence during 10 years KEKB operation was reached about 25mm. In order to keep high luminosity, the vertical emittance growth due to tunnel subsidence should be suppressed by applying orbit and optics correction. In the following paper, the estimation of the vertical emittance growth by tunnel subsidence and the feasibility of the orbit and optics correction are reported.

SuperKEKB でのトンネル沈下の影響評価

1. はじめに

SuperKEKB^[1,2,3]は、KEKB B-factoryの40倍のルミノシティーを目標とした新しい非対称エネルギー電子-陽電子衝突型加速器である。SuperKEKBの主リングの建設は、KEKB B-factoryで使われたトンネル(KEKBトンネル)内にて現在進行中である。

1998年からのKEKB B-factoryの運転で、KEKBトンネルに不等沈下が起こったことが観測されている。図1に示すのは、隔年で測定されているトンネル内に設置された電磁石の垂直変位の空間分布である。ここで、図中に示す垂直変位の基準は、 $s = 0$ にある衝突点(IP)である。KEKB B-factory加速器のビームラインは建設の時点では、ほぼ同一平面上にアライメントされていた。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、KEKBトンネルの沈下は依然として進行中である。

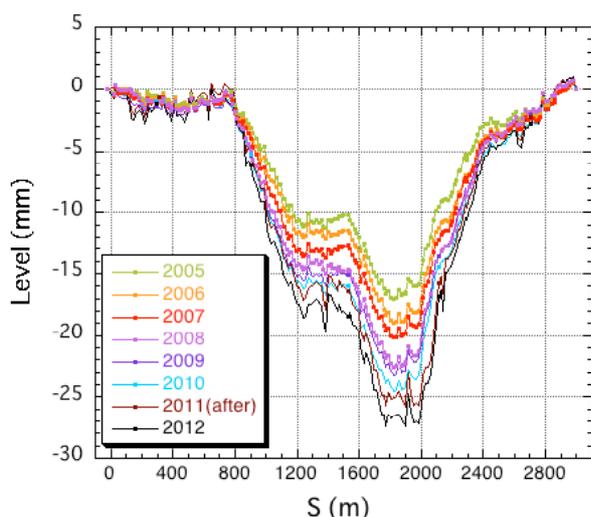


図1: 主リングのビームラインレベルの変動 縦軸はビームラインの垂直変位、横軸は陽電子リングの向きにIPからIPまでを一周する向きに測った軌道長である。

* akio.morita@kek.jp

設計ルミノシティー $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成するために、SuperKEKBではIPの β 関数をKEKBに比べて20倍絞らなければならない。従って、SuperKEKBの光学系は、KEKBに比べてマシンエラーに対して敏感になっている。高いルミノシティーを維持するためには、トンネル沈下によって生じる閉軌道の歪みや光学関数の歪みを補正する必要がある。リング中の各種の調整要素には、SuperKEKBの運転期間中に生じるトンネル沈下を補正するのに十分な可変範囲が必要である。

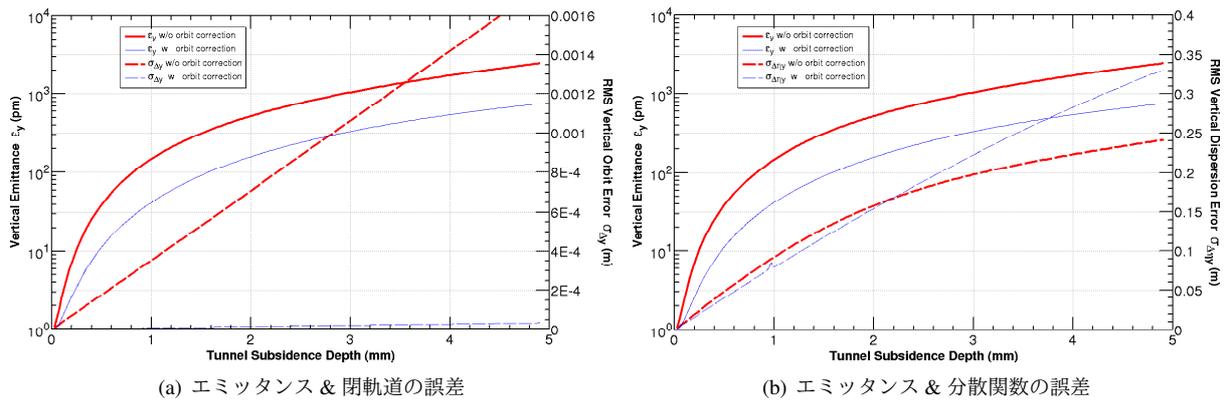
以下では、トンネル沈下に伴う光学系への影響評価と光学補正による影響の軽減効果について報告する。

2. トンネル沈下による光学系への影響

シミュレーションを行なうために、SuperKEKBの設計に使われている加速器計算コードSAD^[4]上に構築された加速器モデルに対して、トンネル沈下をビームライン上の機器のミスアライメントとして導入する。計算モデルを単純化するために、トンネルの変形に伴う水平方向の変位や傾斜はモデルには反映していない。ビームライン上の個々の機器の沈下量は、IPの位置を固定して、測定データをスプライン補間して相対沈下量を与えている。沈下量の経年変化に関しては、沈下量の分布の変化は小さいとみなし、典型的な実測値にスケール因子を掛けて模擬している。IPを囲む検出器ソレノイドと補償ソレノイド、および超伝導四重極電磁石ダブレットによる最終収束系からなる $\pm 4\text{m}$ の領域は、IPに対して固定されていると見なし、沈下シミュレーションからは除外する。実運転では、IPの位置が最終収束系の幾何学配置で決定され、性能に対して深刻な影響を及ぼすこの領域での相対アライメントは、各種のフィードバックにより一定の精度まで補償される事が前提となっている。

SuperKEKBには閉軌道を補正するために、QF型の四重極電磁石毎に水平ステアリング電磁石、QD型の四重極電磁石毎に垂直ステアリング電磁石が設置されており、歪四重極電磁石を除く全ての四重極電磁石にはビームポジションモニタ(BPM)が取り付けられている。本シミュレーションでは、閉軌道を沈下してゆく四重極電磁石に追従させるためにトンネルと共に沈下したBPMの中心へ向かって閉軌道補正を行なっている。

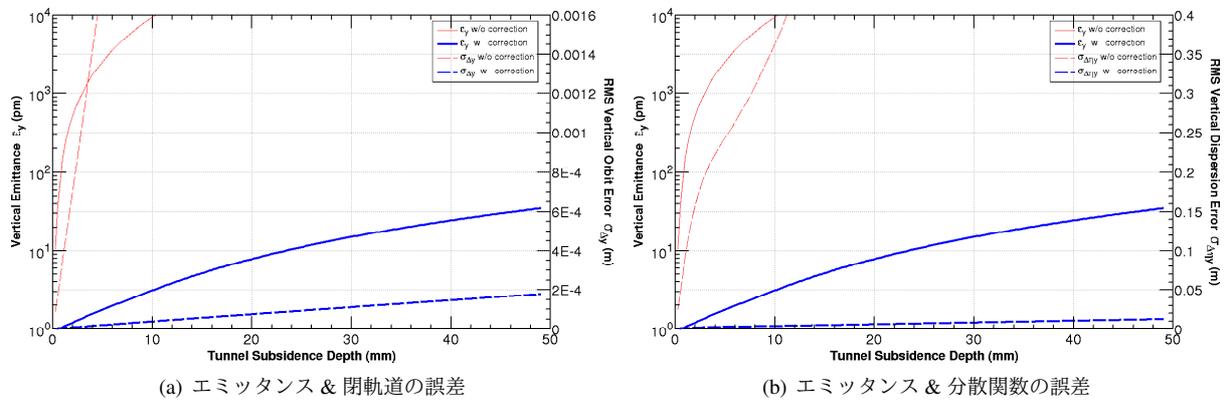
図2は、SuperKEKBの高エネルギーリング(HER)のトンネル沈下に伴う垂直エミッタンス、垂直軌道と垂直分散関数の歪みの分散の振る舞いを示したものである。



(a) エミッタンス & 閉軌道の誤差

(b) エミッタンス & 分散関数の誤差

図 2: 閉軌道補正の無しと有りの場合の垂直方向のエミッタンス、閉軌道と分散関数の誤差 緑色は、赤が閉軌道補正無し、青が閉軌道補正有りを示し、線種は、実線が垂直エミッタンス、破線が垂直軌道の誤差 (a) もしくは垂直分散関数の誤差 (b) の分散を表している。



(a) エミッタンス & 閉軌道の誤差

(b) エミッタンス & 分散関数の誤差

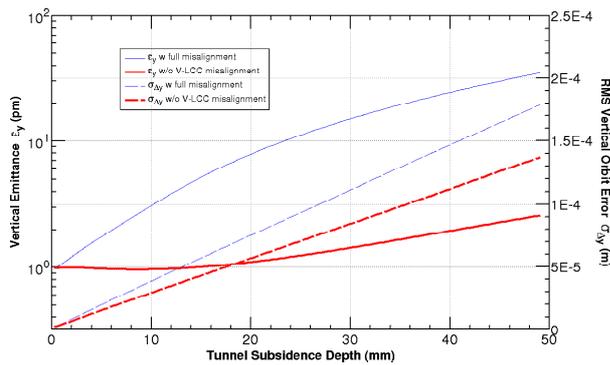
図 3: 光学補正無しと有りの場合の垂直方向のエミッタンス、閉軌道と分散関数の誤差 緑色は、赤が光学補正無し、青が光学補正有りを示し、各軸と線種は、前出の図 2 と同様。

本稿では、低エネルギーリング (LER) についての結果は扱わないが、その振る舞いは定性的には HER の振る舞いと同等である。最大沈下量の増加に伴い垂直エミッタンスは急激に増加する傾向にあり、閉軌道補正無しでは、最大沈下量 200 μ m 付近で 5pm を越える。これは、設計ルミノシティ達成の障害となる劣化である。図 2(a) に破線で示される垂直方向の閉軌道の変位は、閉軌道補正の導入によって大きく改善しているが、実線で示される垂直エミッタンスの改善は設計ルミノシティ実現には程遠いものである。図 2(b) に破線で示される垂直分散関数の歪みは、トンネル沈下量が小さ領域では、閉軌道補正の導入による優位な変化は見られず、トンネル最大沈下量が 2.2mm を越えた領域では、閉軌道補正の導入によって明らかな垂直分散関数の劣化が起こっており、アーク部の水平分散関数に匹敵するこの垂直分散関数の歪みは目標とする垂直エミッタンスを達成する妨げになっている。この垂直分散関数の劣化は、分散関数を考慮せずにトンネルと共に沈下した BPM の中心へ向かって閉軌道補正を行っていることから生じる副作用と考えられる。従って、設計ルミノシティを達成すべく垂直エミッタンスの劣化を抑えるためには、垂直分散関数の補正とカップリング補正が必須となる。

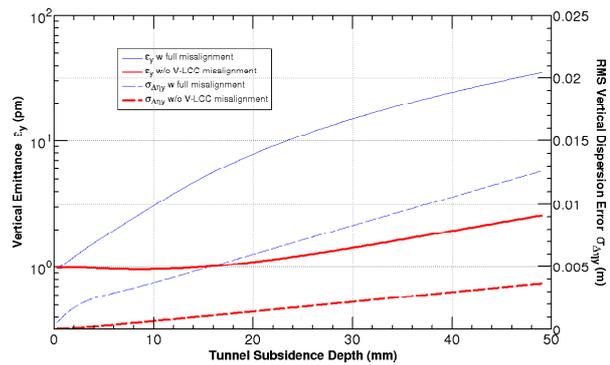
3. トンネル沈下の光学補正

SuperKEKB では、IP のカップリングパラメータを制御するために衝突点領域 (IR) に歪四重極電磁石が設置されている。また、大域的なカップリングパラメータと垂直分散関数を補正するために、リングのアーク部にある六重極電磁石の補助巻線を使った歪四重極補正電磁石が用意されている。図 2 に示された垂直エミッタンスの劣化を垂直分散関数とカップリングの補正によって回復できることを確かめるために、これらの歪四重極電磁石を用いた最も単純な垂直分散補正とカップリング補正をモデルに導入した。カップリングパラメータ等の BPM で直接観測できない光学パラメータの測定過程を模擬する計算資源を節約するために、補正パラメータを計算するための各種光学パラメータは、トンネル沈下を反映させたモデルから直接求めている。また、測定に伴う統計誤差はモデル化していない。この測定仮説は、現実の測定よりも多くの情報を与えてしまうが、利用可能な自由度の範囲で補正が可能かどうかを確かめるには十分な仮定である。

図 3 には、光学補正の適用による垂直エミッタンスの改善が示されている。KEKB 運転期間の後半で観測されている 2mm/年の平均沈下速度を仮定した場合、改善後の垂直エミッタンスは約 6.5 年で 5pm を越えてし



(a) エミッタンス & 閉軌道の誤差



(b) エミッタンス & 分散関数の誤差

図 4: 2 種の沈下モデルでの垂直方向のエミッタンス、閉軌道と分散関数の誤差。線色は、赤が図 2,3 と同様の沈下モデル、青が V-LCC 近傍の沈下を除外したモデルを示し、各軸と線種は、前出の図 2 と同様。

まう。光学補正の導入によって、垂直エミッタンスの増加は 1000 分の 1 以下に抑制されているが、SuperKEKB の設計ミノシティーを達成するのに必要な垂直エミッタンスの目標値 (HER では、7.8pm) を実現するには、まだ不十分である。

試行錯誤の結果、図 3 に示されている垂直エミッタンスの劣化が、垂直方向の局所色収差補正 (V-LCC) 領域と IP と V-LCC を結ぶマッチング領域でのミスアライメントを取り除くことで改善できることが発見された。前出の沈下モデルと V-LCC 近傍の沈下によるミスアライメントを除外したモデルとの比較を図 4 に示す。さらに、図 5 で示すのは、補正パラメータの依存性の側面からの 2 種の沈下モデルの比較である。図中では、元のモデルを “with full misalignment”、V-LCC 近傍のミスアライメントを除外したモデルを “w/o V-LCC misalignment” と表記している。V-LCC 近傍のミスアライメントを除外したモデルの垂直エミッタンスは、25 年相当の 50mm の沈下量で 3pm 以下に保たれており、ルミノシティー設計上の要求を満足している。2 種のモデル間での垂直エミッタンスの違いは、元のモデルの垂直分散関数に、V-LCC 近傍のミスアライメントを除外したモデルの 3 倍の誤差がある事に起因すると考えられる。加えて、元のモデルの垂直分散関数の誤差の振る舞いには、沈下量 3mm 近傍で特異な振る舞いが見られる。V-LCC のミスアライメントを取り去る前と後のモデルでは、IR 部の歪四重極電磁石の強さの振る舞いかたが大きく異なっており、その振る舞いは沈下量 3mm 近傍で見られる垂直分散関数の誤差の振る舞いと相関している。これらの事実から、V-LCC のミスアライメントに起因する誤差に対して、我々の施した簡素なカップリング-分散補正アルゴリズムが、IR 部の歪四重極電磁石に対する誤った補正量を与え、結果として垂直分散関数を劣化させていることが示唆される。

4. まとめ

垂直アライメントエラーに最も敏感な領域の一つである V-LCC 近傍での沈下が無視できるほど小さい場合には、KEKB トンネル沈下に伴う垂直エミッタンスの増加を光学補正を施すことで設計許容範囲に抑制することが可能である。また、V-LCC 近傍から生じる垂直

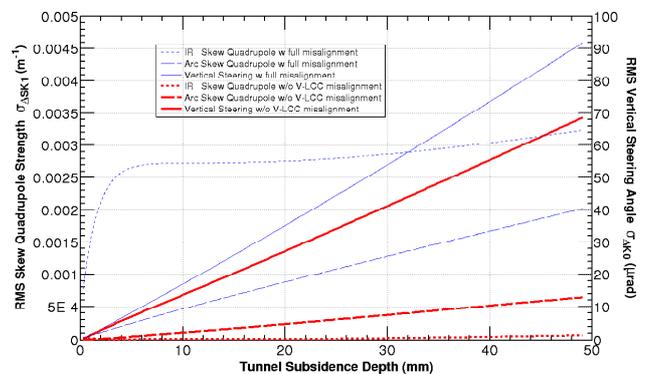


図 5: 2 種の沈下モデルでの補正パラメータの沈下量依存性。横軸はトンネルの最大沈下量、縦軸は各種補正パラメータの rms 強度を示す。線色は、図 4 と同様であり、実線は、垂直ステアリング電磁石の rms 補正量を示し、破線と点線は、それぞれ、アーク部と IR 部の歪四重極電磁石の rms 補正量を示す。

エミッタンスの増加を十分抑制するには、単純な補正アルゴリズムでは不十分であり、その改良が必要である。別の可能性として、V-LCC 近傍の精密アライメントによる誤差の低減や、ビームサイズモニターを併用し垂直ビームサイズを極小化する歪四重極パラメータを探索する等の方法も考えられる。

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. Oide, Nucl. Inst. Meth. A276, 427(1989), <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>