

# デジタルレベルを用いた SuperKEKB メインリングトンネルにおける長期変位測定 REPORT ON LONG-TERM DISPLACEMENT OF THE SuperKEKB MAIN RING TUNNEL

長崎岳人<sup>#</sup>, 増澤美佳, 植木竜一, 中村衆, 大澤康伸

Taketo Nagasaki<sup>#</sup>, Mika Masuzawa, Ryuichi Ueki, Shu Nakamura, Yasunobu Ohsawa  
KEK

## Abstract

The SuperKEKB accelerator is an asymmetric energy electron-positron collider that collides electrons at 7 GeV and positrons at 4 GeV. The main ring tunnel is located approximately 10 meters underground and has a circumference of approximately 3,000 meters, forming a circular shape with four sides flattened into straight lines. The straight sections and the underground fourth-floor laboratories connected to them have piles driven into the foundation, but the arc sections are placed in the ground without piles, in a free state. Additionally, the tunnel itself was constructed approximately 40 years ago for the Tristan experiment, and no major modifications have been made to the tunnel, including during the KEKB era, which was the predecessor to this experiment. The relative height of the tunnel itself, which is affected by ground movement, is important for the stable operation of the accelerator. Therefore, to investigate the long-term changes in the tunnel's overall level, as well as the effects of the mechanical building expansion and the PF-AR direct beam transport line constructed across the main ring during the renovation for SuperKEKB, annual level surveys of the tunnel have been conducted using a Leica DNA03 digital level. Additionally, we have also conducted measurements of the relative height of the electromagnets installed within the tunnel. This paper reports on the status of tunnel level changes to date, as well as a comparison between tunnel level and electromagnet height.

## 1. SuperKEKB 加速器トンネルの概要

SuperKEKB[1-3]加速器は 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させる非対称エネルギー電子陽電子衝突型円形加速器である(Fig. 1)。加速器ラインのトンネル周長は約 3000 m で、4 辺が直線に潰れた円形を成している。加速器は地下 10 m に設置されており、実験機器の設置箇所である地下 4 階の各実験室と、接続する直線部には基礎として杭打ちを行っているがアーク部については杭なしで地中にフリーの状態で置かれている。加えて、トンネルは一つが長さ約 60 m 程度の物を 50 個程度繋いだ構造をしており、その連結部は外力に対する抵抗力が相対的に弱い構造となっている。トンネル建設から半世紀近くが経過し、また 2011 年の東日本大震災ではつくば市の震度は 6 強を記録した。SuperKEKB 用の電磁石は平均数tの質量を有しており、レーザートラッカーを用いて $\pm 100 \mu\text{m}$  の設誤差を許容範囲と設定してアライメントを実施している。運用中の電磁石の数は 2600 台に上るため、毎年全台の測量を実施することが困難なことからトンネルの高さ変動値を測量することで間接的に電磁石の設置精度を担保することを目指している。

### SuperKEKB までの経緯

1981 年より TRISTAN 加速器用トンネルの建設を開始。前身となる KEKB 実験が 1998 年から 2010 年まで運用。

SuperKEKB に向けて改造を開始。電磁石の配置換え、アライメント等を実施。また 2013 年から 2014 年にかけてトンネルに近い地上部に敷地面積 400 m<sup>2</sup> 程度の二階建てコンクリート製構造である新機械棟を計4箇所建設[4]。

<sup>#</sup> tnaga@post.kek.jp

既存のトンネルと接続するための堅坑と横穴掘削を実施した際に地下水対応としてディープウエルによる組み上げを実施。また、富士実験室南側トンネルの 2 m 上を跨ぐ形で PF-AR 直接入射路が開削工法により建設。2016 年より Super KEKB 運転開始。

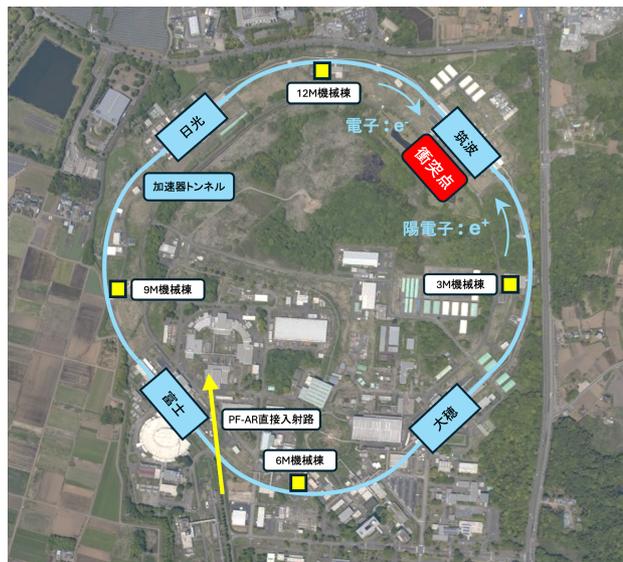


Figure 1: Schematic diagram of SuperKEKB main ring and Labs.

## 2. トンネル高さや電磁石の高さの測定方法

KEK では夏季シャットダウン中の期間において、Super KEKB トンネルの高さ全周を年に 1 度の頻度で 2

つの方法で測定している。そのうちの 하나가 Leica 製のデジタルレベル計 DNA03 (Fig. 2, Table 1)を用いた手法である。数m間隔ごとにトンネルの内壁にデジタルレベル計用ターゲット台座を設置しており、大型三脚に搭載したデジタルレベル計にて2点以上見通せる箇所から測定することでトンネル全周の相対的な高さを得る。各基準点の測定は光学標準器にて方向を定めたのち、複数回の平均値により導出する。ターゲットは重力を利用して常に同じ垂直度合いで設置できるデザインとしている。リング全周でおおよそ 350 点の測量点を設置しており、全周測定だけでも数日の作業時間を要する。また電磁石自身の高さや傾きを測量する際には、各電磁石上面に設置されたレーザートラッカー用ターゲット台座面を使用している。これは電磁石を設置する際に使用しており、高精度に製作されていることから、デジタルレベル用ターゲットまたはレベルニック傾斜計を設置することで再現性を確保している。



Figure 2: Measurements taken with a digital level mounted on a portable tripod in the SuperKEKB tunnel.

Table 1: Specification of the Digital Level DNA03

1 km 往復標準偏差	0.3 mm
測定範囲	1.8 m – 60 m (トンネル内 25 m 程度)
最小表示	10 μm
距離測定精度	1 cm / 20 mm (500 ppm)
国土地理院認定	1級水準儀

### 3. 結果と解析

#### トンネル全周の相対高さ

トンネル全周の相対的な高さ測量結果を Fig. 3 に示す。高さ基準点は、筑波実験棟に設置された衝突点より時計回りに進んだ 3000 m 付近の箇所としている。デジタルレベルによる測定を開始した 2013 年からの変化として、基本的に全域で沈下傾向である。特に衝突点から

の距離 1000 から 2000 m 付近では沈下傾向が著しく、少なくとも SuperKEKB 建設時の 2013 年から大きいところで  $-15 \text{ mm}$  程度の変化が生じていることになる。加えて、局所的な沈下を生じている箇所として新設した小型機械棟4箇所(3M、6M、9M、12M)とAR 直接入射路の影響を確認できる。

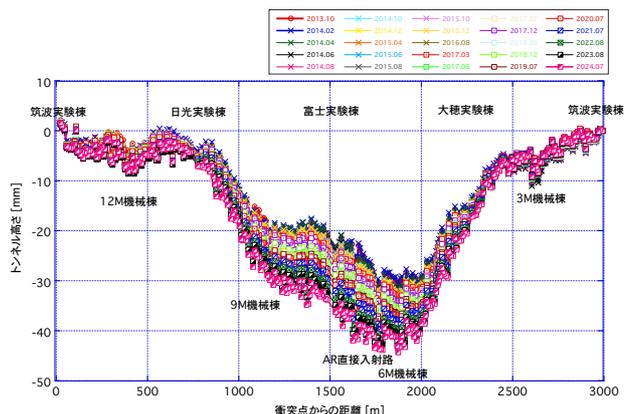


Figure 3: Result of relative height measurement of the SuperKEKB main ring tunnel.

また、約 50 個存在する各トンネルセクションでの現状の傾き絶対量を、トンネルセクション中心からの距離で規格化した値で表示した図を Fig. 4 で示す。結果、各トンネルセクションにおいて中心から距離が一番遠いトンネル接続部において相対的に大きい傾きをとなることが分かる。これは接続部が中心部に比べてトンネル自体の形を保持する能力が相対的に低い影響により変形していると考えられる。一方、2013 年ごろと 2024 年には分布に大きな変化がないことが確認された。

#### トンネル全周各年の変化量

各年度の一年ごと変化量を衝突点からの距離を横軸として Fig. 5 に示す。2013 年から 2014 年にわたる、2014 前年変化における変化は沈下傾向として非常に変化量が大きく、また局所的な動きが複数点存在する。これは各機械棟と PF-AR 直接入射路を新たに建設した影響と想定している[5]。また、2015 年には構造物の建設や地面の戻し作業を行なった影響として、特に 6M と 9M 付近で回復傾向の動きをしていることがわかる。2016 年以降の変化としては距離 1600 m 付近を中心に大きな構造的変化として沈下傾向となっている。

各トンネルセクションにおける中心からの距離による影響を明らかにするため、各年の傾き変化の絶対量との関係を Fig. 6 に示す。2024 年は全体的な動きとしてトンネルが水平に沈下している傾向である一方、2015 ではトンネル接続部での傾きが大きく変化した動きを記録しており、2014 年もややその傾向である。これらの結果より各トンネルセクションの現状は、2013 年から 2014 年にかけての Super KEKB 建設時の建物工事の影響によりトンネル接続部の保持力が弱いために相対的に傾きが大きくなり、それ以降の近年はその形を保持したまま各トンネルが水平に沈下していると予想され、またその沈下量は 1600 m 付近が相対的に大きい動きとなっている。

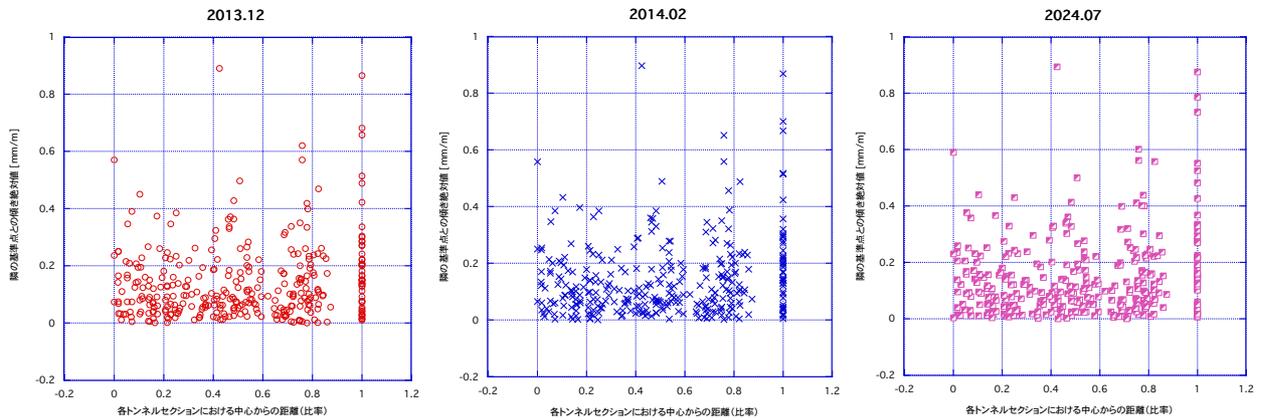


Figure 4: Dependence of distance from the center about inclination in each tunnel section.

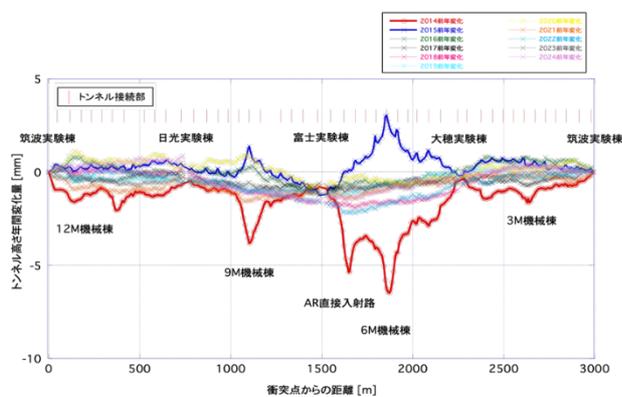


Figure 5: Result of annual displacement of the SuperKEKB main ring tunnel.

### トンネル相対高さ と 電磁石の高さ

衝突点からの距離 100-600 m 並びに 1600-2100 m 付近における一部の電磁石群に関して、レーザートラッカー用基準面にデジタルレベル計ターゲットを設置することで電磁石自体の相対的な高さを測量した。測定した電磁石は基本的に同型であり、またビーム軸中心からの距

離は地面へ垂直方向に対して等しい配置となっていることから、単純にビーム軸の高さとも見做せる。各測量組 (A, B) とトンネルの相対の高さの関係 Fig. 7 を示す。どちらの測量組においても、電磁石とトンネルそれぞれの分布が似ていることから、大局的な動きに関してはトンネルの動きに追従して電磁石が動いていることが確認された。また 6M 並びに 12M 機械棟の局所的な変位も電磁石に存在することも明らかになった。

### トンネル相対高さ と 電磁石の傾き

レベルニック傾斜計を用いて各電磁石におけるトンネル方向の傾きと 2013 年からのトンネルの高さ変化量との比較を Fig. 8 にて示す。電磁石の傾きに対して、各機械棟建設による局所的な影響がいまだに残っている事が確認できる。また、トンネルの接続部に相関した電磁石の傾きが確認できることから、構造に起因した傾き成分が存在する。一方、幸いなことに 1000 から 2000 m 付近のトンネル高さの大局的な変動は電磁石の傾き設置精度に対しては大きな影響を与えていない事が確認されている。

## 4. まとめと展望

SuperKEKB 建設時より定期的実施してきたトンネル高さのデジタルレベル測定に関して、2024 年分まで含め

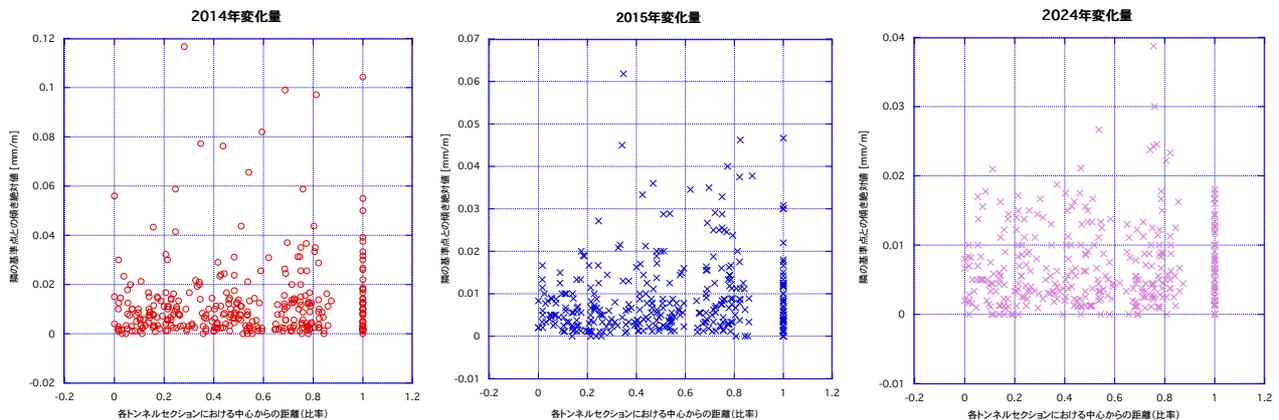


Figure 6: Dependence of distance from the tunnel center about annual displacement in each tunnel section.

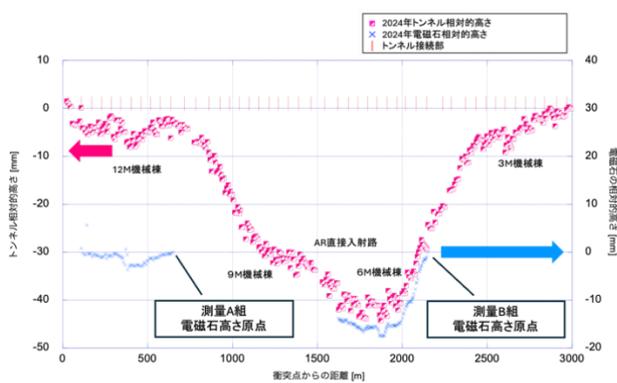


Figure 7: Result of relative height measurement of the SuperKEKB main ring tunnel and magnet.

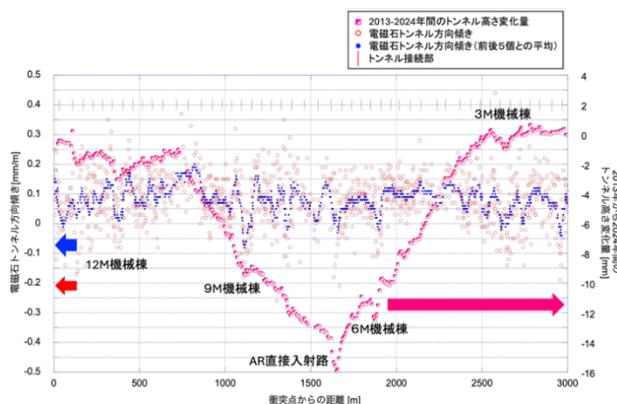


Figure 8: Result of displacement of the SuperKEKB main ring tunnel and tilt of magnet.

て解析を行なった。各1年間の変化としては、2014年と

2015年の変化量は局所的かつ値も大きかったが、2023年からの一年間を含む近年は、太極的かつ1-2mm程度の変化に落ち着いている。各トンネルセクション内での変化としても当初はトンネル接続部の傾き変化量が大きかったが、近年は場所依存性が小さくなっている。また、今回新たに実施したマグネット高さの測定と比較して、対極的にマグネットはトンネルと同等の動きをしていると想定される。加えて、レベルニックを用いた電磁石自体のトンネル進行方向の傾きと比較し、トンネル構造との関係を明らかにした。

今後の発展として、現状年に数回しか実施できない電磁石の測定において24時間モニターの導入等を実施し、トンネル内測定の常時監視システムの構築を目指す。

### 謝辞

本論文中にて、株式会社日立テクノロジーアンドサービス様が測定したデータを使用しています。この場にて感謝申し上げます。

### 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] 大澤他, “SuperKEKB トンネルレベル変動”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan.
- [5] M. Masuzawa, “SuperKEKB Main Ring Tunnel Motion”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan.