

SuperKEKB 主リングトンネル変動

SUPERKEKB MAIN RING TUNNEL MOTION

増澤美佳[#], 安達利一, 飯沼裕美, 大澤康伸, 川本崇
Mika Masuzawa[#], Toshikazu Adachi, Hiromi Inuma, Yasunobu Ohsawa, Takashi Kawamoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Effects of the construction of new facility buildings along the SuperKEKB tunnel are reported. The tunnel level changes due to the newly excavated tunnel for the KEK PF-AR injector, which are continuously monitored by the SuperKEKB HLS (Hydrostatic Leveling Sensor) system, are also shown. The SuperKEKB tunnel motion due to such heavy construction is summarized, along with the effects of the uncontrolled tunnel temperature on magnet alignment.

1. はじめに

現在 SuperKEKB^[1,2,3]主リングトンネル内では電磁石及び基準点の精密測量を行い電磁石の精密アライメントの準備を進めている。一方地上部では SuperKEKB 用機械棟増設に伴った掘削工事を始めとする土地改良、地下水くみ上げ、埋め戻し、防水等の大規模な工事がトンネルに沿った4箇所で行われている。またこの他にも SuperKEKB トンネル部のわずか 2 m 上を横切る形で新しいトンネルが近接する PF-AR (アドバンスリング)^[4]への直接入射路として建設中である。今回 HLS で常時モニタしている PF-AR 直接入射路真下のトンネルの垂直方向の動きを地上部での工事進捗状況と対応をつけて発表する。またトンネル全周の精密測量から見えてきた機械棟建設工事の影響についても報告する。さらに、トンネル内空調は KEKB 運転終了から長期間に渡ってほとんど運転停止状態で、現在トンネル内の温度変化は一年を通して 10°C を越えている。地上部へつながる実験棟や搬入口から流れ込んでくる空気の影響で、トンネル内温度は、例えば冬場で 14°C と加速器運転時の温度よりも 10°C 以上も下がってしまっている。このような温度変化によるトンネル変動についても示す。

2. SuperKEKB 主リング周辺の工事

2013 年より SuperKEKB 建設に伴う機械棟及び電源棟増設工事が開始した。機械棟には電磁石や真空パイプの冷却用純水を送るポンプシステムが設置させることから、工事は地上部構造物だけではなく SuperKEKB トンネルへ直接アクセスする堅坑工事も含んでいる。一方でトンネル内では SuperKEKB 電子・陽電子リング基準点の精密測量、引き続き電磁石の設置やアライメント作業を地上部工事と平行して進めなければならない。地上部工事の精密アライメントへの影響を把握するためにトンネル内に設けられた基準点の測量を行った。

Figure 1 は上から見た SuperKEKB 主リングに各工事箇所を加えた図である。主リングは衝突点(IP)と筑波、大穂、富士、日光の4つの実験棟、各実験棟の両翼にある片側約 100 m の直線部、及び実験棟と実験棟をつなぐ4つのアーク部で構成されている。増設された機械棟からトンネルへアクセスする堅坑は IP から時計周りにそれぞれ 3M、6M、9M、12M と呼ばれている。また 6M 堅坑と富士実験棟の間では PF-AR への直接入射路工事が行われている。因に堅坑掘削の際には地下水が湧き出て来たためディープウエルを設置しウエルに流入する地下水を水中ポンプで排水している(ディープウエル工法)。



Figure 1 : SuperKEKB main ring indicated in blue and the construction sites on the ground surface.

2.1 機械棟工事の影響

機械棟工事のトンネルへの影響を調べるために一周 3 km にほぼ等間隔に設けられたレベル基準点の測量を行った。この測量には DNA03 を使用した^[5]。Figure 2 にレベル測量結果を示す。横軸は IP から反時計周りにとった距離(S)を、縦軸には 2013 年 10 月データとそれから 8 ヶ月後の 2014 年 6 月のデータの差をプロットしてある。衝突点、日光実験棟、富士実験棟、大穂実験棟はそれぞれ S で 0、750、1500、2250 m に対応している。

[#]mika.masuzawa@kek.jp

トンネルが安定していれば縦軸のゼロのところ
で一直線になるはずであるが、見てのとおり大きく
凹んでいる箇所がある。実はこれが機械棟工事、
及び次節で述べる PF-AR 直接入射路工事が行
われている場所に対応している。工事との関連
性は明らかではあるが、トンネルレベルが下
がる理由については現在調査中である。地下
水排水量が特に多かった 6M 堅坑付近での
トンネル沈下が最も大きかったことから地下
水の排水と何らかの関係があるものと推測
する。Figure 3 は 12M 堅坑掘削工事の写
真である。

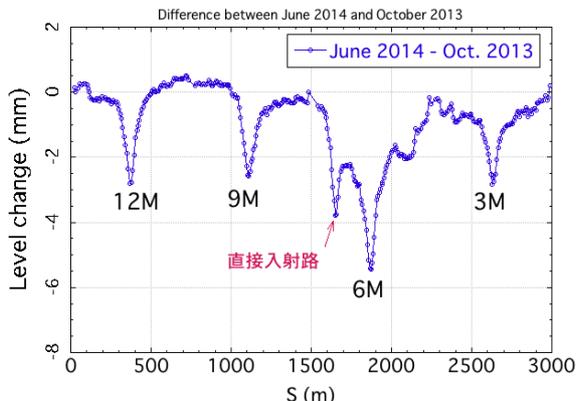


Figure 2: SuperKEKB main ring level change since October 2013 plotted against the distance from the IP.



Figure 3: Vertical shaft at the 12M site.

2.2 PF-AR 直接入射路工事の影響

SuperKEKB 稼働後の PF-AR 50Hz 入射を実現
するため、2013 年 6 月から 2014 年 4 月にか
けて PF-AR 直接入射路トンネルの土木工事が
実施された。Table 1 に PF-AR 直接入射路の
建設スケジュールをまとめる。

この工事箇所は SuperKEKB 主リングの富
士実験棟と大穂実験棟の間で (Figure 1) 有
る。より詳細な位置関係及び入射路トンネル
の断面を Figure 4 に示す。Figure 4 より入
射路が SuperKEKB トンネルアーク部の 2 m
上を通っていることがわかる。SuperKEKB
アーク部には杭打ち構造が無くトンネル
躯体が直接地盤の上に設置されている。よ
って入射路工事 (杭打ち、鋼矢板打設、掘削
、トンネル

体築造、埋め戻し等) による SuperKEKB 電
磁石精密アライメントへの影響が懸念され
る訳である。



Figure 4: New beam transport line for PF-AR.

Table 1: Construction schedule of the new beam transport line for PF-AR.

工期	工事内容
2013.6~7	PHC 杭打設工
2013.7~8	鋼矢板打設工
2013.9~10	掘削工
2013.10~2014.1	トンネル築造工
2013.12~2014.2	埋戻し工事
2014.2~4	鋼矢板除去 その他

2.2.1 HLS 増設

SuperKEKB 主リングではトンネルレベル
変動をモニタするために 2011 年から HLS
(Hydrostatic Leveling System) 設置を進
めてきた^[6]が、今回の工事の影響による
レベル変動を精査するため、工事区間下
のトンネル内に新たな HLS を設置する
事にした。センサには既設置のものと同
様の BINP 製静電容量型を採用し、トン
ネル内側の壁 (Figure 5) に沿って 19
台設置した。これらのセンサは直接入
射路工事区間を挟む約 80m の範囲に
約 4~5m 間隔で設置されている。うち
14 台は一つのトンネルユ

ニット内に、富士実験棟側の2台と大徳実験棟側の3台はそれぞれエクспанションジョイント(トンネルの熱収縮・膨張を吸収するために約60mおきに設けられたジョイント部: Figure6)を挟んで隣のトンネルユニットに設置した。今回のHLSセンサの設置範囲をFigure7に示す。



Figure 5: BINP HLS sensor.

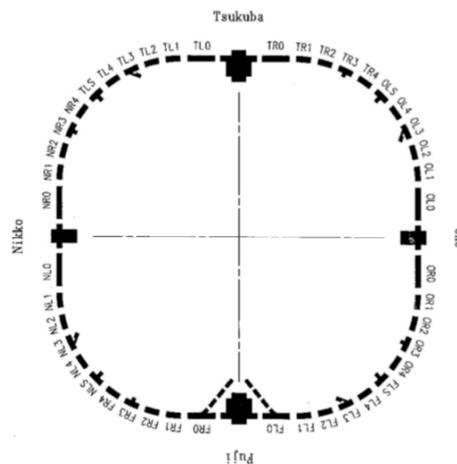


Figure 6: Expansion joints in the SuperKEKB tunnel.

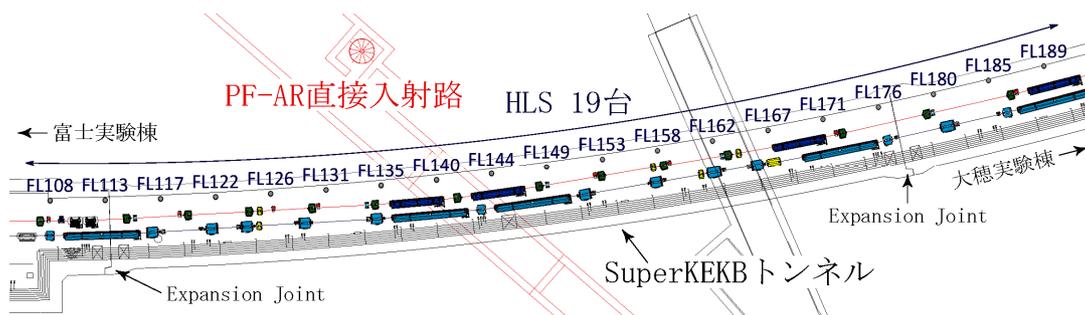


Figure 7: HLS sensor locations. The new PF-AR tunnel is indicated in red.

2.2.2 HLS データ

工事が始まった頃の2013年6月末からデータ収集を開始し主な地上工事が終わった現在もデータを取り続けている。Figure8に大徳実験棟に一番近い“FL189”センサを基準とした各センサの相対レベルを時間軸に対してmm単位で示す。因にデータ取得時に全センサ出力値をゼロにセットしてある。またデータ名の数字の部分には各センサの設置位置を

メートル単位で表している。例えば“FL140”付近が直接入射路トンネル直下にあたり、基準の“FL189”はそれより49m程大徳実験棟側に寄った場所に置かれている。Figure9は同じデータを横軸にIPからの距離をとり奥行きが時系列になるようにプロットし直したものである。Table1に示す工事の工程と、このHLSから得られたレベル変動とを見比べてみると工事の内容との関連づけが出来る。

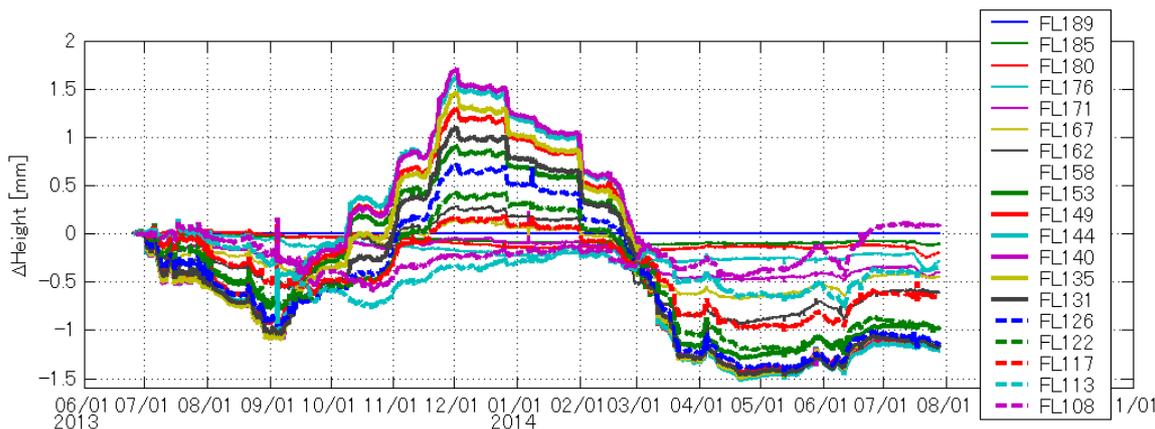


Figure 8: HLS data since June 2013. The relative height with respect to the sensor “FL189” is plotted in time series.

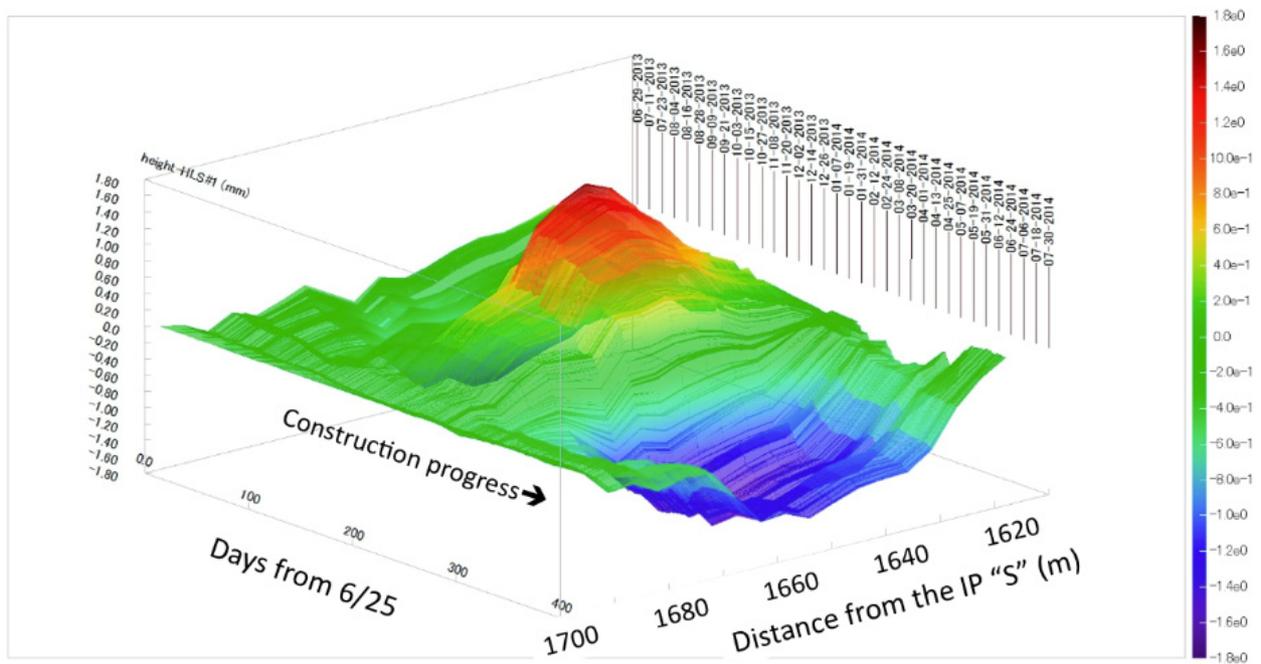


Figure 9: Tunnel level change plotted against S .

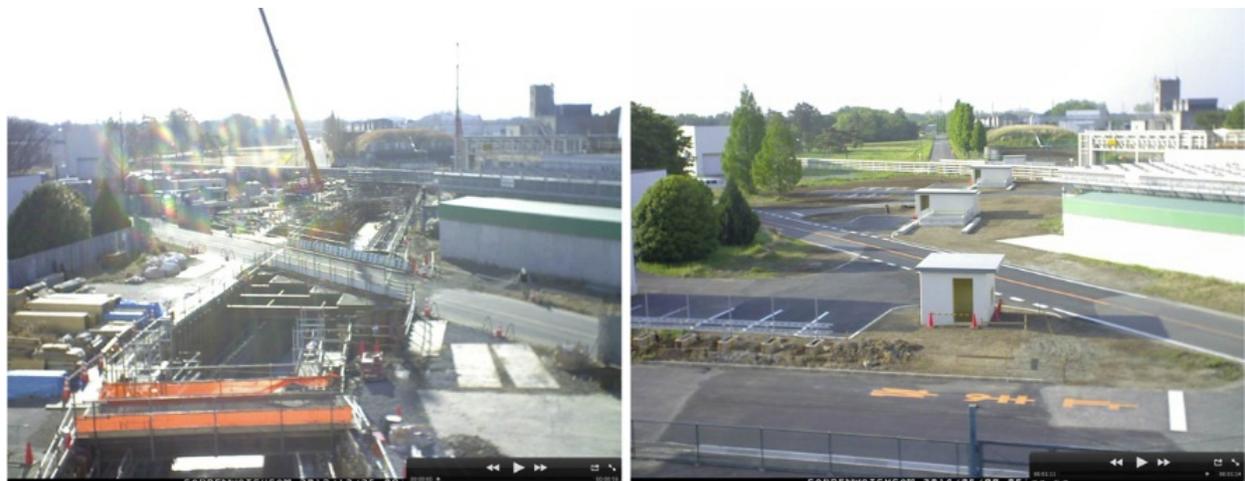


Figure 10: Construction work of the new beam transport line to the PF-AR in December 2013 (left) and May 2014 (right).

例えば工事初期では SuperKEKB トンネル周辺への杭打ち及び鋼矢板打設の影響によると思われるレベル低下（最大で 1mm）が観測されている。その後、掘削が始まり SuperKEKB トンネル上部の土砂が取り除かれるに連れレベル変動は上昇に転じている。この時トンネル工事の真下に当たる“FL140”付近では工事開始時期と比較して 1.7mm 程上昇した。最大上昇時に対応する写真が Figure 10 の左で、土が取り除かれてトンネル基底部分がむき出しになっている。続いて入射路トンネル築造、土砂の埋め戻し工事に入ると再びレベルは低下し始め、工事が終わる頃（Figure 10 右側の状態）に最大で当初より 1.5mm 低下している。ここで沈下は底を突いたように見受けられる。また Figure 9 から掘削時の隆起よりも埋め戻しによる沈下の方がより広範囲に

渡って起きていることもわかる。この間のレベル変動量は peak-to-peak で約 3mm に及ぶ。この変動が一つのユニット内で起きていることからユニットそのものが工事により変形したと考えられる。その後レベルは徐々に上昇し始め当初の値に戻りかけていたように見えていたが、この1ヶ月余りは変化がなく工事前の元の値に戻る気配は今のところない。今後この入射路には電磁石を始めとする加速器コンポーネントが据え付けられることから、SuperKEKB トンネルへの影響を引き続き注意深く監視していく予定である。

3. トンネル温度変化の影響

現在空調が停止中であるためトンネル内温度変化は一年を通して 10℃以上になっている。2013 年 9

月から 2014 年 7 月までのトンネル内温度を Figure 11 に示す。次にこのトンネル温度変化に起因すると思われるトンネルレベル変動の例を日光直線部の約 300 m について Figure 12 に示す。横軸は IP からの距離で 750 m 付近が日光直線部の中心にあたる。2013 年 10 月のレベル測量時からの変動量が 2014 年 2 月と 2014 年 6 月についてプロットされている。

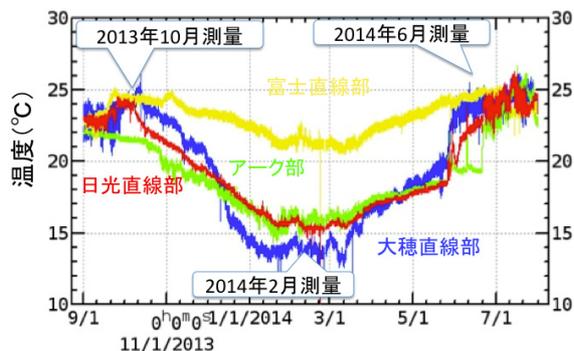


Figure 11: Tunnel temperature at various locations.

2 月のデータ (図中の青線) で 1mm 近い凸凹が 4 箇所で見出されているが、この凸凹は 6 月 (図中の赤線) の測量時にはほとんど消えてしまっている。この凸凹の位置は実はトンネルエクспанションジョイントの位置に対応していることがわかった。Figure 11 にある日光直線部の温度変化のパターンに着目すると、10 月と 6 月の温度が両方とも 25°C であるのに対し 2 月はそれよりも 10°C 近くも低いことがわかる。従ってこの温度変化がレベル変動を引き起こしたのだと考える。

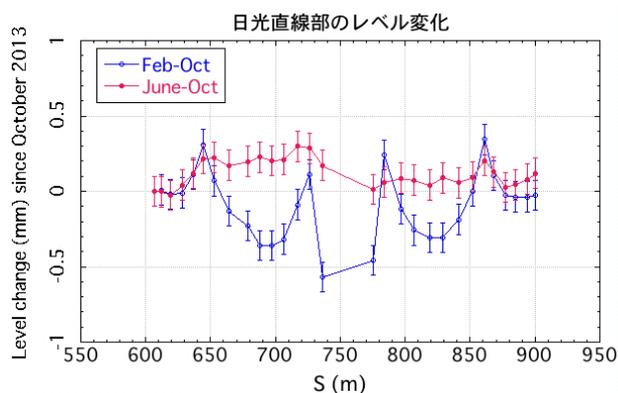


Figure 12: Tunnel level change at the Nikko straight section since October 2013.

元々エクспанションジョイントは主にビーム進行方向の膨張・収縮を吸収し、トンネル周長を一定に保つために設けられたものである。今回のレベル測量により初めてトンネルの一つのユニットの両端が上がるような形でも変形が起こることがわかった。変形量も 1mm 程あり、一般的に高さ方向の局所的なミスアライメントがビーム性能により大きく影響すると言われていることを考えると、最終的な精密アライメント時にはトンネルの温度管理が必要不可欠であることは明らかである。

4. まとめ

SuperKEKB では KEKB 同様電磁石を精密にアライメントしなければならない。水平、垂直位置については設計値に対して ± 0.1 mm に、また傾きについては ± 0.1 mrad に入るように電磁石位置を調整する。しかしながら諸般の事情から地上部の大規模な工事が SuperKEKB 主リング建設と同時期に始まってしまったことにより電磁石据え付け中にトンネルが変動し精密アライメントが困難な状況になっている。そこで今回我々は数回に渡ってトンネル全周のレベル測量を行い、また一部については HLS を設置してトンネルレベルを常時モニタすることにより地上部工事の影響の定量的な評価を試みた。

地上部四箇所の機械棟増設工事の影響は当初想定していたよりもはるかに広範囲で見られる。これは堅坑工事でその部分の土砂がなくなった影響だけではなく、むしろ地下水をくみ出したことによる影響が大きいのではないかと推測される。この変動がいつ収まるのか、あるいはそもそも元 (例えば KEKB 運転時) に戻るのかについての予測は難しい。

PF-AR 直接入射路の工事の影響については HLS システムにより常時モニタすることが出来ている。地上部の大きな工事は終了したが入射路真下のトンネルレベルは未だ下がったままである。

またトンネル温度は空調が停止されているため大きく変動をしている。レベル測量の結果一トンネルユニット内でも局所的にミリ単位の大きな高さ変動があることが判明した。

以上を踏まえると SuperKEKB 精密測量及び電磁石アライメントは地上部工事の影響が落ち着いてから、かつ空調が入ってから行うべきである、という結論に達する。一方で工期というものがあるので変動が落ち着くのを延々と待つ訳には行かない。このような状況で我々に出来るのは、(1) 定期的な測量やモニタ、(2) ビーム運転直前に可能 (必要) な範囲で修正アライメントをかけること、(3) ビーム周回後の変動については変動量をビーム運転にフィードバックしてビーム性能向上につなげることで、ではないだろうか。いずれにしてもトンネル温度が一定に、しかもビーム運転時と同じ 25°C に設定されていなければ要求されているアライメント精度を保証することは出来ない。

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, Sep. 2011, THPZ007, p. 3693, 2011.
- [4] http://imss-festa.kek.jp/2012/oral_abst/PF_takaki.pdf
http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/31_1/genjo.pdf
- [5] Y. Ohsawa, et al., "デジタルレベル測量器を用いたトンネルレベル測量" 平成 26 年度総合技術研究会, Sapporo, Sep. 4-5, 2014.
- [6] T. Kawamoto, et al., "Measurement of KEKB Tunnel Level", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.