

SuperKEKB トンネルレベル変動

TUNNEL LEVEL VARIATION DURING SUPERKEKB CONSTRUCTION

大澤康伸^{#,A)}, 飯沼裕美^{A)}, 増澤美佳^{A)}, 藤山浩樹^{B)}

Yasunobu Ohsawa^{#,A)}, Hiromi Inuma^{A)}, Mika Masuzawa^{A)}, Hiroki Fujiyama^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

Abstract

Effects on the SuperKEKB tunnel level from the construction of new facility buildings and the new tunnel for the KEK PF-AR injector are reported. The tunnel level was surveyed every other month over a year and a half using digital level (DNA03). It was found that the tunnel level is stabilizing slowly after the completion of the construction though the tunnel did not go back to the initial level. The SuperKEKB tunnel motion due to such heavy construction is summarized in this report.

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2013年、2014年度に 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箇所で行われた。またこの他にも SuperKEKB トンネルの一部にわずか2メートル上を横切る形で新しいトンネルが、近接するアドバンスリング (PF-AR)^[4]への直接入射路として建設された。これらの地上部工事とトンネルレベル変動の関係について報告する。

2. 工事概要

2.1 機械棟工事

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れることから、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。機械棟工事とは、SuperKEKB リングの実験棟と実験棟との中間の曲線部に位置し、トンネル外側に堅坑を掘り、地上の機械棟と地下のトンネル内にある電磁石及び真空機器の冷却用に使用するための配管工事である。これらの土木工事は2013年10月から2014年11月中旬まで行われた。

Figure 1は上から見た SuperKEKB 主リング全体図に各工事箇所を示したものである。主リングは Figure 1 右上に示された衝突点 (IP) とリングに沿って時計回りに筑波、大穂、富士、日光の4箇所の実験棟とその両翼約100m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

衝突点から時計回りにそれぞれ3M、6M、9M、12Mと呼ばれている。6M堅坑と富士実験棟の間では PF-AR への直接入射路工事も同時期に行われている。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。



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

Figure 2に6M機械棟堅坑の築造工事と埋め戻し山留解体中の写真を示す。工事はまず掘削する周囲に鋼矢板を打ち込み地中に締切りを作ることから始まった。またこの辺りの地盤が軟弱であるため、セメント系硬化剤と圧縮空気と一緒に噴射させる方式の地盤改良を行ない、ポンプで排水することで地下水低下をさせながら掘削を行った。掘削は、SuperKEKB トンネルレベルである地表下約12mまで行い、それから掘削した堅坑と SuperKEKB トンネルを繋ぐ横孔を掘っている。その後堅坑築造工事及び埋め戻し山留解体が続き、最後に出来上がったトンネル堅坑と既存のトンネルとを貫通させるためのコア抜き工事を行なった。

[#] yasunobu.ohsawa@kek.jp



Figure 2: Vertical shaft at the 6M construction site.

2.2 PF-AR 直接入射路工事

Figure 3 は建設中の PF-AR 直接入射路である。写真は SuperKEKB リング内側から撮影したもので、Figure3 の右側に富士実験棟が位置する。また Figure3 の左側に見える建物は SuperKEKB トンネルへの搬入口のうちの一つである。この写真は掘削工事が終わりトンネル構造体基底部分の工事が行われている時期に撮影された。トンネル両側に土留めの矢板が打ち込まれている様子がわかる。

この入射路は SuperKEKB トンネル一部のわずか 2メートル上を横切ることから SuperKEKB トンネルへ、及び主リング電磁石アラインメントへの影響が懸念されている。

この入射路の建設は KEKB トンネルと同じオープンカット工法を用いて行われた。オープンカット工法とは、地表面を掘り下げ、トンネル構造物を構築し、後で埋め戻す工法である。トンネル本体の土木工事期間は、2013年6月から2014年4月であったが、周辺の掘削が再度行なわれたりしたため関係工事は結局2014年9月まで続いた。



Figure 3: Construction of the new injection tunnel to PF-AR.

3. トンネル高さ変動

前述の工事のトンネルレベルへの影響を調べるために一周 3km にはほぼ等間隔に設けられたレベル基準点の測量を行った。この測量にはデジタルレベル計 (DNA03) を使用している。DNA03 用の基準点設置については参考文献^[5]に詳しく説明してある。デジタルレベル計を導入することでトンネル一周測量にかかる時間が大幅に短縮されている。

トンネルレベル測量は 2013 年 10 月から 2015 年 6 月までの期間に約 2 ヶ月間隔で行われた。Figure 4 にレベル測量結果を示す。横軸は衝突点から反時計周りにとった距離 (S) を、縦軸には各測量結果を 2013 年 10 月データとの差としてプロットしてある。2013 年 10 月以降、トンネルが安定していれば縦軸の値がゼロで一直線になるはずである。しかし実際には大きく凹んでいる箇所が数カ所あり、この箇所が機械棟工事と PF-AR 直接入射路工事に対応している。3M、9M、12M 機械棟では最大で 4mm 近く沈下する動きがあった。6M 機械棟については 7mm 近く動いている事がわかる。地下水排水量が特に多かった 6M 堅坑付近でのトンネルレベル変動が最も大きかったこと、次いで 9M も排水量が多かったことから、地下水の排水とトンネル沈下に何らかの相関関係があるものと推測する。またこれ以外の全体的な傾向として、筑波実験棟に比べて富士実験棟が下がっていく様子が見える。この動きについては KEKB 運転時から判っており、年平均で約 2mm の沈下と言われている。これについては次節で考察する。

3.1 各機械棟直近トンネルでの変動

各工事の影響は、Figure 4 を見ると建設箇所から約 ±100m の区間で顕著であることがわかる。各機械棟の変化を見るために各機械棟を挟んだ 250m の区間を取り出したものが Figure 5 である。この図では局所的な変動を見る為にそれぞれの区間の端の点を基準としてそこからの差をプロットしてある。具体的には 12M 機械棟では衝突点からの距離で 500m、9M 機械棟では 1000m、6M 機械棟では 2000m、3M 機械棟では 2500m を基準にとった。

まず 12M 機械棟直近のトンネルでは、2013 年 12 月では約 1mm 沈下し、2014 年 2 月、4 月、6 月と沈下が 3mm まで進んだ。その後、同年 8 月から 2015 年 6 月まで 2mm 程上昇し、結局 -1mm の高さまで戻ったまま落ち着いてしまったようだ。この機械棟工事の状況はと言うと、2013 年 10 月上旬に締切工事、12 月中旬から地盤改良と掘削工事に入っている。トンネルレベルが 1mm 下がった時期と掘削開始時期が一致している。因にこの堅坑工事は 2014 年 6 月末に終了しているのでその後の 10 ヶ月間はトンネルレベルに大きな変化はなく工事の影響を残したまま安定してしまっただけに見える。

9M 機械棟では、2013 年 12 月まではあまり大きな変化はない。ここでは 2014 年 2 月から 10 月まで

の変化が大きく、12 M 機械棟と同様に最大で 3mm 近く下がった。この機械棟工事は 2014 年 1 月から掘削が開始されていて、やはりこのタイミングでトンネルレベルに変化が出たことが判る。なおこの工事では湧水がなかなか収まらず、工事終了は 11 月中旬となっている。12 月にはトンネルレベルが戻

る傾向が見えるものの 2015 年 6 月までの 6 ヶ月間でトンネルレベルは -1.2mm で停滞しておりその後もこのレベルで安定してしまっている。

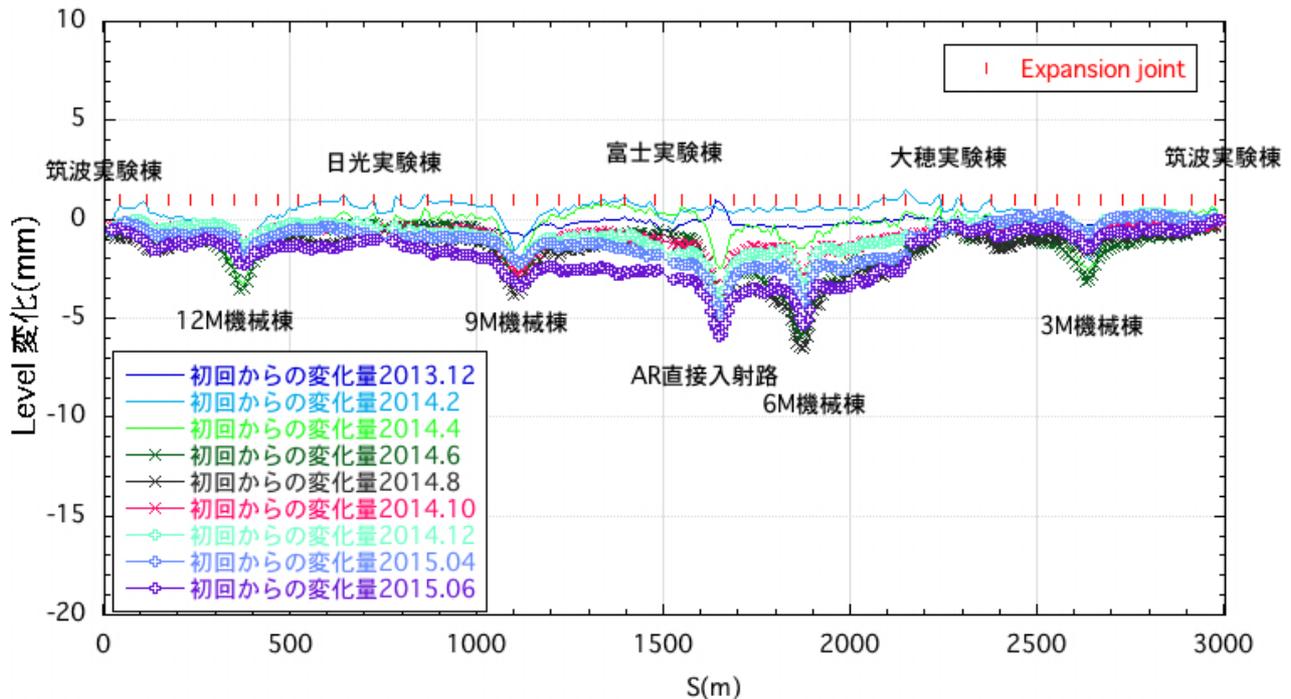


Figure 4: SuperKEKB main ring level change since October 2013 plotted against the distance from the IP.

6M 機械棟では、地下水の湧き出しが多いため、すぐには掘削できずに何度も地盤改良の薬液注入を行っている。地盤改良をしながら 2014 年 3 月中旬から下旬に掘削を始め、途中更に地盤改良しながら 4 月中旬から下旬に掘削した。トンネルレベルもこれに対応して 2014 年 4 月に -1.5mm に下がり始めている。6M 機械棟の完成は 2014 年 10 月末であるが、トンネルレベルもこの時期以降工事前に比べて 2mm 程下がったところで安定してしまっている。

3M 機械棟は 2013 年 12 月中旬に掘削工事が始まり、完成が 2014 年 6 月末である。ここでは最大沈下量が 2mm で、他に比べるとやや小さかった。しかしながら元のレベルまでは戻る様子もなく 2014 年 8 月からは当初より 1mm 程低いレベル近くで安定してしまっている。

どの機械棟工事の影響も落ち着きつつあるが、工事前のレベルには戻っていない。これはトンネル内電磁石の再アライメントが必要であることを示唆する。電磁石アライメントはレベル調整だけにとどまらず水平位置、傾きも影響を受けたと想像する。現在 SuperKEKB 全周の電磁石精密測量結果の解析が進んでおり最終アライメントにてこれらの影響を修正するつもりである。

3.2 PF-AR 直接入射路直下の変動

SuperKEKB 稼働後に PF-AR 50Hz 入射のため、2013 年 6 月から 2014 年 4 月まで、PF-AR 直接入射路トンネルの土木工事が実施された。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、かつ入射路が既存の SuperKEKB トンネルアーク部の僅か 2m 上を通る。一方で SuperKEKB トンネルの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、トンネル躯体築造、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 6 に衝突点から 1500m を固定点としたトンネルレベル変動を示す。掘削工事は 2013 年 10 月から開始され、12 月には掘削が終了している。トンネルの最下部のコンクリート流入も終了している。SuperKEKB トンネルの真上の工事であったため、掘削により土がなくなるとトンネルレベルが上がる様子が見える。12 月ではトンネルレベルは一旦 1.5mm まで上がる。次の 2 月が少し下がっている。2014 年 10 月からは -3mm で安定してしまっている。なおこの区間のトンネルレベル変動については参考文献^[6] に各工事内容との対応をつけて議論されて

いる。機械棟工事の影響同様この区間の電磁石についてはレベル調整の他に水平位置、傾き調整が必要となるであろう。

なお今後の長期的な影響についても引き続き調査する方針である。

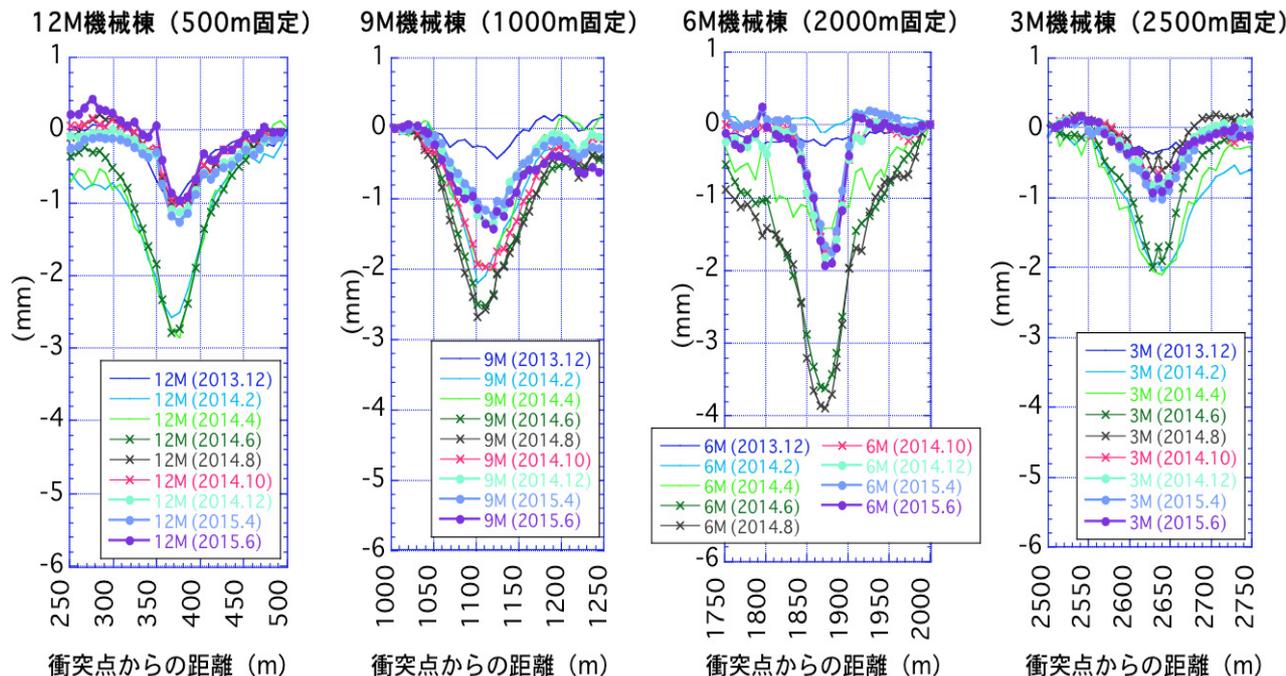


Figure 5: Tunnel level change near the new facility buildings.

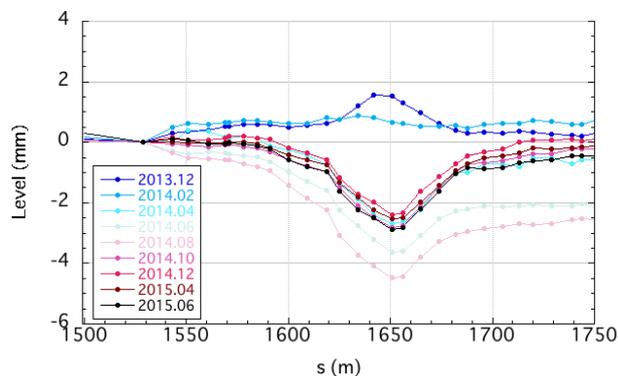


Figure 6: Level change below the PF-AR tunnel.

4. SuperKEKB トンネル長期変動

KEKB では電磁石は 1998 年 12 月の建設終了時では筑波衝突点を基準に同じレベルで設置されていたが各報告^[5,6]にあるように富士実験室と大穂実験室の間のアーク部は衝突点に比べて年々歳々沈下している。Figure 7 に従来のアナログレベル計 (N3) 用基準点の過去およそ 15 年間の測量結果をまとめている。この図には、KEKB の運転期間、運転終了後、そして大震災直後のデータが含まれている。この沈下は年平均で約 2mm であるが 2013 年 2 月から 2014 年 6 月までの 16 ヶ月間で変化が大きくなっていることが判明した。これは平均的な沈下に加えて工事の影響が加わったためであると考えられる。

5. 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 $\pm 0.1\text{mm}$ に入るよう、また傾きについては $\pm 0.1\text{mrad}$ 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。

我々はこれら工事終了後も引き続き数回のトンネル全周レベル測量を行い地上部工事の影響及びトンネルレベルの変動の落ち着き具合についての定量的評価を試みた。結果、工事が終了して場所によっては一年近くが経った今現在でも工事前のレベルには戻っていないことが判った。来年 2 月には SuperKEKB ビーム実験が始まることから、今の電磁石位置を元にして電磁石の修正アライメントを行う予定である。レベル測量はデジタル化したことにより SuperKEKB トンネル 1 周の測量を 3 日間で終了することが可能になった。今夏の電磁石最終アライメント終了後も引き続きビーム運転直前まで定期的にレベル測量を行い、ビーム運転へ役立つ情報を収集・提供するつもりである。

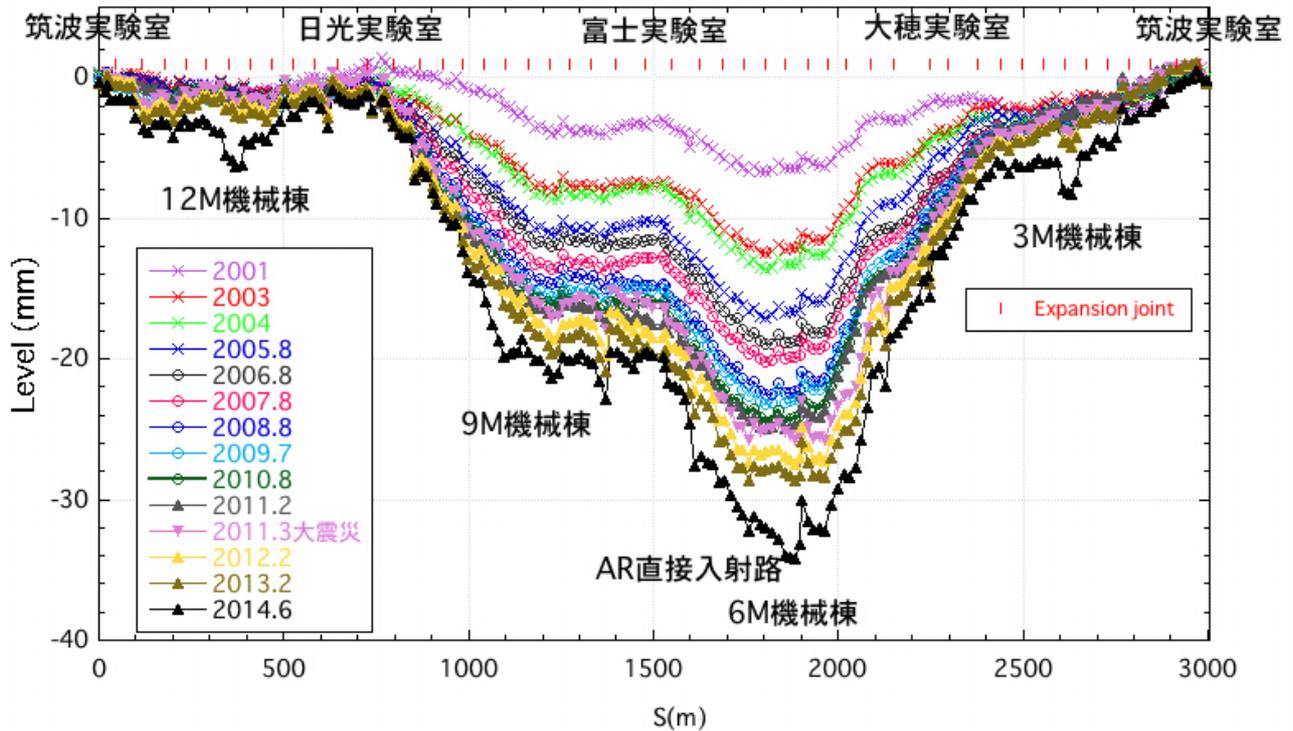


Figure 7: Level change surveyed by analog level(N3).

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] 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] 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.