

KEKB 入射線形加速器トンネル床変動の測定

MEASUREMENT OF FLOOR MOVEMENT IN THE KEKB INJECTOR LINAC TUNNEL

田中窓香^{*A)}、肥後寿泰^{A)}、柿原和久^{A)}、諏訪田剛^{A)}、榎本収志^{A)}、佐藤政則^{A)}、菅原龍平^{A)}、吉田光宏^{A)}、
牛本信二^{B)}、木村康一^{B)}、鈴木和彦^{B)}

Madoka Tanaka^{*A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Kazuhisa Kakihara^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Masashi Enomoto^{A)}, Masanori Sato^{A)},
Ryuhei Sugahara^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Shinji Ushimoto^{B)}, Koichi Kimura^{B)}, Kazuhiko Suzuki^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

Abstract

We understand that the floor of beam line tunnel of the KEK electron/positron injector linac is moving according to the climate condition in conjunction with an above-ground part. Significant movements are seen at number of expansion joints in tunnel. For the emittance preservation through the injector linac of SuperKEKB, the local misalignment is required to be within 0.1 mm in sigma, while global one with in 0.3 mm in sigma. In order to realize this tight alignment requirement, it is necessary to grasp the characteristic of the floor movement. This time, the floor movement was measured by the following four methods; quadrant photodiodes with laser fiducial line, laser tracker, tilt meters, and micrometers. In this paper, we will report summarize these data.

1. はじめに

現在、KEK 電子陽電子入射器では、SuperKEKB のためのアップグレードが進められている。SuperKEKB のエミッタンス保存のため^[1]、入射器の直線部分での各コンポーネントのアライメント精度は、ローカルで $\sigma = 0.1$ mm、グローバルには 0.3 mm 以下であることが要求されている^[2]。

KEK の入射器 Linac は全長 600 m で、8 つのセクターから構成されている^[3]。~100 m の上流直線部 (1.5 GeV、セクター A-B) と、それに続く~500 m の下流直線部 (5.5 GeV、セクター C-1-2-3-4-5)、及びこれらを繋ぐ 180 度 ARC によって構成されている。各セクターは加速ユニット 8 台で構成されており、各加速ユニットに属する加速管などのビームライン要素は約 9 m 長の剛性の高い架台の上に搭載されている。各ユニット架台は両端の基準とする点に位置感度のあるフォトダイオード (PD) デテクターが取り付けられており、この基準点をビームラインと平行な基準軸として定義するレーザー基線上に来るようにアライメントされる^[4]。

入射器の建屋は全長約 500 m あり、地下にトンネル、1 階部分にクライストロンギャラリー、その上に鳩小屋と呼ばれる電源ケーブルや排水管を通すスペースがある。建築の際、建屋の膨張、伸縮を考慮して、1 セクター約 80 m の建物を繋ぎ合わせるように作られたため、Figure 1 のように複数の結合部 (Expansion joint、ジョイント部) を持つ。2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、この結合部に大きな負担がかかり、トンネル内が浸水する被害が起きている^[5]。また建屋の地上部分は気象変化の影響を受けやすく、地上部と連結してトンネル内の床も変動することがわかっている^{[6][7]}。よって、先述のビームライン各コンポーネントのアライメント精度を満たす上で問題になっている。この変化を定量的に見積もるため、レーザー PD、レーザートラッカー、傾斜計、ダイヤルゲージの 4 つの観測手段を用い

てジョイント部の動きを観察した。

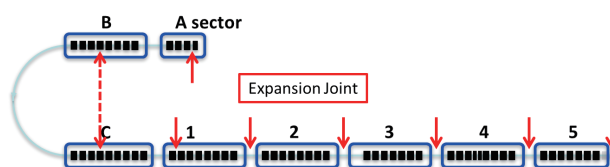


Figure 1: Linac layout.

2. 床変動の測定

今回、測定を行った場所を Table 1 に示す。

Table 1: The Measurement Location

Laser tracker	C-2 sector
Laser PD	C-2 sector
Tilt meter	B sector & C sector
Micrometer	C3, C4 & 28 units

2.1 レーザートラッカーによる測定

C セクターから 2 セクターにかけて、各ユニット架台に取り付けられている PD デテクターから伸びた腕に置かれたリフレクターの位置をレーザートラッカーで測定した。結果を Figure 2 に示す。これは C セクターから 2 セクターにかけて測定したデータと、約半月後に 2 セクターから C セクターにかけて測定したデータの差をとったものである。鉛直方向の注目してみると、ジョイント部で最大 0.5 mm の変動が見られる。

2.2 レーザー PD による測定

C セクターから 2 セクターにかけて、2014 年 7 月 11 日レーザー PD の測定を行った。その後、約半月後の 7 月 30 日にもう一度レーザー PD の測定を行った。この

* madoka.tanaka@kek.jp

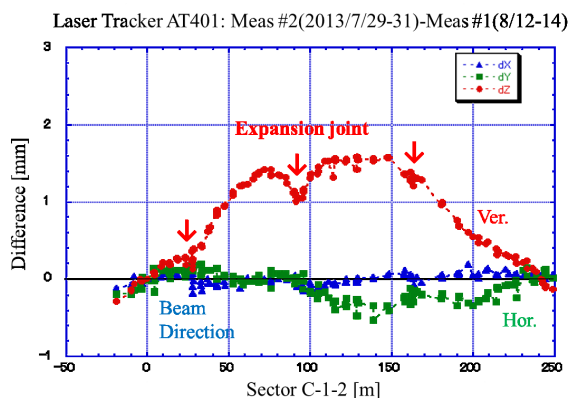


Figure 2: Difference between two tracker measurements.

2回の測定結果を Figure 3 に示す。なお、この2回の測定の間には架台の調整を行った 21~23 ユニットの結果は省いてある。図中の矢印にジョイント部が存在する。後に測定を行ったほうが全体的に PD の電圧値の絶対値が大きくなっているが、特にジョイント部において差が大きくなっている様子がわかる。電圧測定値を長さに変換すると、この差は 0.2~0.8 mm となる。

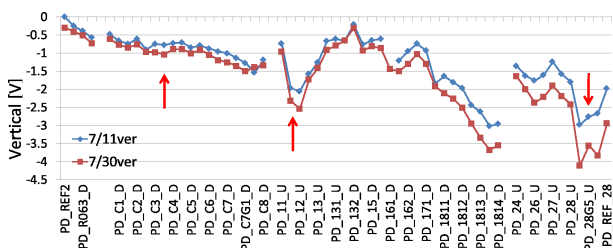


Figure 3: Laser PD measurements along C-2 sector.

2.3 傾斜計による測定

C4 ユニット上流にあるジョイント部の下流側に傾斜計を設置した (Figure 4)。ビーム軸に平行な方向の結果を Figure 5 に示す。概ね 0.01 mrad の日周期変動が見られる。測定器同士の距離が近いので、ほぼ同じ結果が得られると考えていたが、実際には L1、L2 と L3、L4 では異なった動きをしているように見える。L3 と L4 については振幅が小さく、日変化はあまり見られない。またドリフトも他の 2 つに比べて大きい。

また、この測定器間中のつくば市の天気を調べると、25日から26日にかけて日照量が少なく、一時雨が降っている。傾斜計の測定結果を見ると、25、26日は他の日に比べて日変化の振幅が小さい。この測定期間ではこの日にしか雨が降らなかったが、床の傾斜については天候が大きく影響していることがわかる。

次に、Figure 6 のように、B5 ユニット内にあるジョイント部を挟んで測定を行った結果が Figure 7、Figure 8 である。傾斜計の設置場所は B2、B4、B6、及び B8 ユニットの upstream 側で、X はビームラインに平行な方向、Y はビームラインに垂直な方向である。B4 と B6 の結果を比べると、ジョイント部を挟んで対称的な動きをしていることがわかる。1日の変動振幅も 0.02 mrad 程度と

なっている。しかし、B2 及び B8 ユニットの結果を見ると、ほとんど日変化は見られない上、B2 と B4、B6 と B8 の間にも相関は見られない。Y 方向については、それぞれ日変化している様子がわかるが、B4 と B8 には相関係数 0.83 と強い相関が見られたほかは、特に相関は見られなかった。同じ建屋内にある B2 と B4、B6 と B8 はそれぞれ逆の傾きを持っていることから建屋が東西にねじれるように変動していることがわかる。

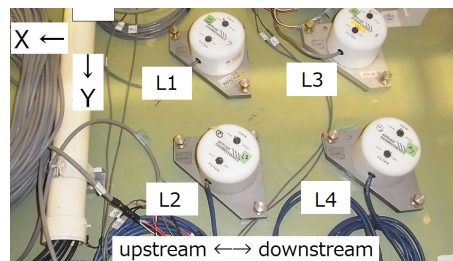


Figure 4: Array of the tilt meters near C4.

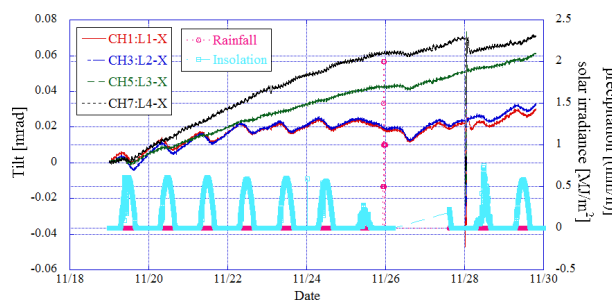


Figure 5: Tilt of the floor along the beam direction close to C4 unit, precipitation and solar irradiance.

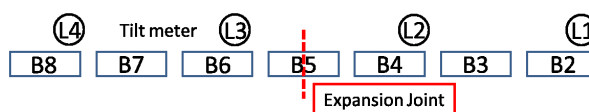


Figure 6: The sensor positions of the tilt meters along B sector.

2.4 ダイヤルゲージによる測定

ジョイント部を挟んだ左右の壁にステンレスの板を設置し、長さ 50 cm ほどのステンレスの棒を取り付け、その棒にダイヤルゲージを設置するという方法で 2 つの壁の相対的な変動の観測を行った (Figure 9)。C3-C4 間のジョイント部においてダイヤルゲージ測定を行った際の上下方向の結果が Figure 10 である。1日の間では 0.015~0.030 mm の変動があり、1週間で見ると 1日あたり約 0.001~0.005 mm ドリフトしている。

次に、28 ユニット下流側のジョイント部を跨ぐように、Figure 11 のようにダイヤルゲージを設置した。結果を以下の Figure 12 に示す。西側では上下、南北、東西の 3 方向全てにおいて 0.01 mm 以内の変動が見られた。これは先に述べた C3-C4 ジョイント部での動きに比べると小さいが、同じように日周期変動している様

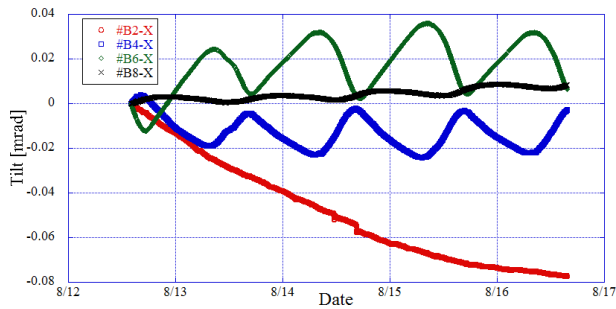


Figure 7: Tilt of the floor along the beam direction in B sector.

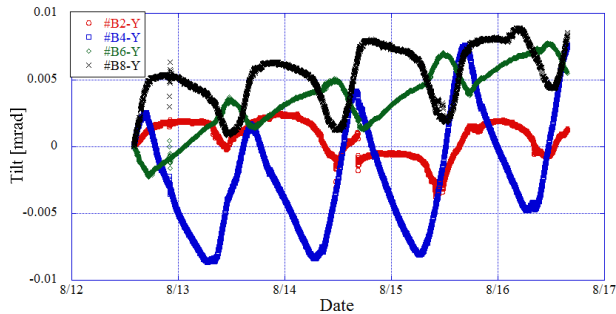


Figure 8: Tilt of the floor in the direction perpendicular to the beam in B sector.

子が見える。これに対し、東側では、ほとんど変動が見られず、西側と東側の動きにも相関が見られなかった。これは予想に反する。今回の結果が正しければ、28のジョイント部付近ではほとんど床変動がなく、運転に影響はないものと考えられることができるが、データの欠損などもあり、まだデータが十分とは言えないので、引き続き観測を続けていく必要がある。

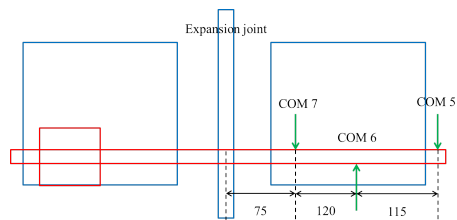


Figure 9: The sensor positions of the micrometers between C3 and C4.

3. 議論

レーザー PD の測定結果とダイヤルゲージの測定結果を比較してみると、レーザー PD では C3-C4 ジョイント部より 28 ジョイント部の方が大きく動いているように見えるが、ダイヤルゲージでの測定結果はその通りではない。測定日が一致していないため、簡単に比較することはできないが、測定方法によって結果が異なって見えるのは、測定器のドリフトが影響していると考えられるが、定かではない。引き続き各ジョイント部において測定を行い、詳細を知る必要がある。

今回、最長で半月ほどの期間でしか測定を行って

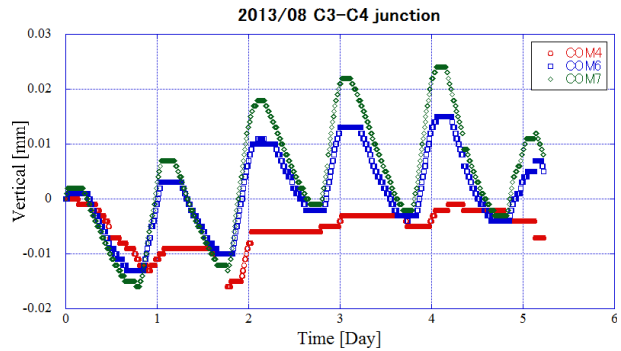


Figure 10: Floor motion between C3 and C4.

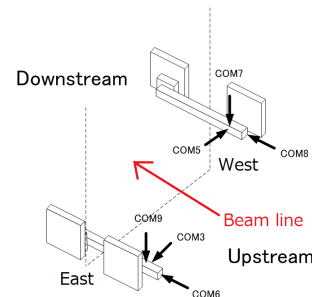


Figure 11: The sensor positions of the micrometers near C8 unit.

ないが、長周期の床変動も調べる必要がある。レーザー PD による測定は手動であり、入射器の運転が停止している時にしか行うことができないため、長期にわたっての変動を見ることができない。今後、自動のレーザー PD 測定システムを導入し、長期にわたってのドリフトを測定する準備をしている。PD の放射線劣化といった問題点もあるが、Figure 13 のように、リモート操作で PD を出し入れ出来るような装置を開発中である。コストの問題も有り、一度にすべての PD をこのような装置に切り替えることはできないが、長期変動を観察出来ることが期待される。加速ユニット架台の前後にムーバーを取り付け、運転中でもリモート調整できるような架台についても現在議論中である。

また、入射器では水管傾斜計を導入するための試験的な観測を終え、本格的に導入している最中である (Figure 14) [6]。水管傾斜計を用いることによって、床面の長時間変動を観測することが出来る。

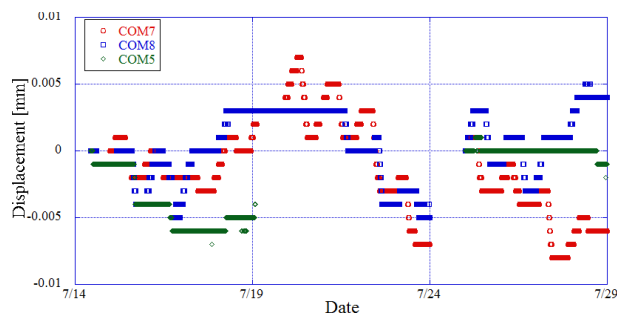


Figure 12: Floor motion between expansion joint close to 28 unit.

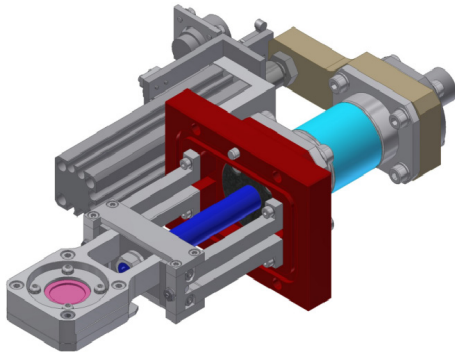


Figure 13: Design of the automatic push-pull PD device.



Figure 14: Hydrostatic leveling system.

4. まとめ

SuperKEKB へのアップグレードのために、全長約 600 m の KEKB 電子陽電子入射器では、グローバルで $\sigma=0.3$ mm、ローカルで $\sigma=0.1$ mm の精度のアライメントが要求される。この精度を満たすために、ビームラインがあるトンネルの床の変動の状況を知る必要がある。今回、著しい変動が見られる、建屋の expansion joint 部付近の変動の詳細を把握するため、入射器のアライメント基線となるレーザーと四分割型シリコンフォトダイオード、レーザートラッカー、傾斜計、ダイヤルゲージの 4 つの手段で床変動の測定を行った。

観測データを解析したところ、最大で $20 \mu\text{m}$ 程度の床変動が日周期で起きていることがわかった。また、各方法において、日周期変動だけでなく 1 週間～半月におけるドリフトも見られた。しかし、これより長い期間において継続した測定はなされていないため、長期変動についてはまだ良くわかっていない。今後、リモート操作できる PD と水管傾斜計を導入し、長期床変動について調べる予定である。また、各ユニット架台にムーバーを取り付け、随時アライメントするシステムを導入することも検討中である。

5. 謝辞

本研究にあたって放射線化学センター穂積憲一氏に多大な気象データを提供して頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

[1] K. Furukawa et al., “High-Intensity and Low-Emittance Upgrade of 7-GeV Injector Linac Towards SuperKEKB”, TUPME010, IPAC2013, Shanghai, China, May, 2013.

- [2] M. Satoh, “Injector commissioning”, The 19th KEKB Accelerator Review Committee, KEK, Tsukuba, March, 2014, <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2014/>
- [3] I. Sato et al., “KEK Report 95-18”, National laboratory for high energy physics, March, 1996.
- [4] T. Suwada et al., “Propagation and stability characteristics of a 500-m-long laser-based fiducial line for high-precision alignment of long-distance linear accelerators,” Rev. Sci. Instrum. 84, 093302 (2013).
- [5] A. Enomoto et al., “Quick Recovery of the KEK e+/e- Injector Linac from the Great East Japan Earthquake”, WEPPD064, IPAC2012, New Orleans, USA, 2012.
- [6] T. Higo, “Linac alignment”, ICFA Mini-Workshop on Commissioning of SuperKEKB and e+/e- Colliders, KEK, Tsukuba, November, 2013, <http://kds.kek.jp/confRegistrationFormDisplay.py?confId=12760>
- [7] M. Tanaka et al., “Linac alignment for SuperKEKB injector”, TUPRI090, IPAC2014, Dresden, Germany, June, 2014.