

## KEKB 入射線形加速器トンネル床変動の測定 (2)

### MEASUREMENT OF FLOOR MOVEMENT IN THE KEKB INJECTOR LINAC TUNNEL (2)

田中窓香 \*<sup>A)</sup>、肥後寿泰 <sup>A)</sup>、諏訪田剛 <sup>A)</sup>、柿原和久 <sup>A)</sup>、牛本信二 <sup>B)</sup>、水川義和 <sup>B)</sup>

Madoka Tanaka\*<sup>A)</sup>, Toshiyasu Higo<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>A)</sup>, Kazuhisa Kakihara<sup>A)</sup>, Shinji Ushimoto<sup>B)</sup>, Yoshikazu Mizukawa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> 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 of the order of millimeters are seen at number of expansion joints in the 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 over the beam line of about 600 m in total length. In order to realize this tight alignment requirement, at first, the linac innovated the laser alignment measurement. Using this system, we conducted the initial alignment in 2014, and after it we have been measuring the linac alignment once a few months. As a result of this measurement, we found a few mm of the floor movement at expansion joint over a year. In addition, we report the result of the measurement of the mutual movement of two plates, each ser on either side over the expansion joints. We discuss about the possible strategy way of dealing with the floor movement.

#### 1. はじめに

現在、KEK 電子陽電子入射器では、SuperKEKB へのアップグレードが進められている。SuperKEKB でのエミッタンス保存のため<sup>[1]</sup>、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 (100~200 m) で  $\sigma=0.1$  mm、グローバル (入射器全体 600 m) で 0.3 mm 以下であることが要求されている<sup>[2]</sup>。

入射器は全長 600 m で、8つのセクターから構成されている<sup>[3]</sup>。~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。各ユニット架台の両端には、ユニット内アライメントの基準となる 2 点があり、ここに位置感度のある分割型シリコンフォトダイオード (PD) デテクターが取り付けられている。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準線に来るようにアライメントされる<sup>[4]</sup>。

入射器の建屋は全長約 500 m であり、地下に加速器トンネル、1 階部分にクライストロンギャラリーがある。建築の際、建屋の膨張、伸縮を考慮して、1 セクター約 80 m の床、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<sup>[5]</sup>。また建屋の地上部分は気象変化の影響を受けやすく、地上部と連結したり、地下の温度や水分分布等の影響を直接受けたりして、トンネル内の床も変動することがわかっている<sup>[6][7]</sup>。これは、先述のビームライン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、入射器ではレーザー PD、ダイヤルゲージ、傾斜計、レーザートラッカー等を用いて観測を行っているが、これまで数日~数ヶ月の短期的な測定しか行うことが出来ず、長期的な変動を系統的に調べることが課題となっていた。<sup>[8]</sup>。これを受け、レーザー PD の測定を一年に渡り数ヶ月に一度実施し、そのドリフトを調べた。また、1 年近くかけて行っている Exp. J に設置したダイヤルゲージの測定結果についても述べる。

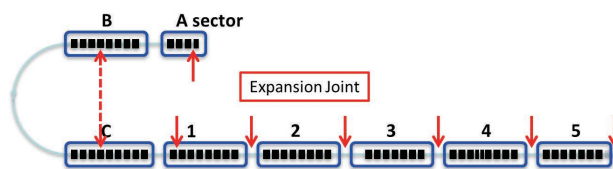


Figure 1: Linac layout.

#### 2. 床変動の測定

##### 2.1 レーザー PD を用いた位置測定

これまで、PD を使ったすべての場所での測定には 1 日オーダーの時間を要するため、加速器運転期間中に頻繁に測定を行うことが出来なかった。夏期メンテナンス等の長期運転停止期間を利用し、1~数ヶ月毎に、2014 年夏から計 8 回測定を行った。C~5 セクターにおいて、2014 年 7 月の位置測定データを基準とした、ビーム断面の水平方向の変化量を Figure 2 に、鉛直方向の変化量を Figure 3 に示す。図中の赤い直線は Exp. J の場所を示している。全体的に 0.1 mm オーダーの変動が見られるが、Exp. J 直近、特に 2 セクターの PD 位置測定値が大きく変動していることがわかる。これは鉛直方向について顕著で、大きいところでは 1 年の間に 2 mm 程度の変動が見られる。なお、3 セクターから 5 セクターにかけての 2015 年 1 月と 4 月の測定結果の大きな差異

\* madoka.tanaka@kek.jp

は、この間に架台のアライメント作業を行ったため生じたものである。

Exp. J 付近の変位の大きい PD について時間変化をプロットしたものが Figure 4、Figure 5 である。途中、架台のアライメント作業を行ったため、2014 年 7 月 10 日と 31 日の間に、またレーザーの通る光軸管の付け直しを行ったため 8 月 25 日と 9 月 18 日の間の大きなずれが生じている。鉛直成分について見ると、2015 年 1 月の測定値を極大値、5 月の測定値を極小として 1 年周期の運動をしているように見える。しかし、特に 1 月の測定の次の測定は 4 月と測定間隔が長いので、この間にも周期的な変動をしている可能性があり、1 年周期で変動していると断定することは出来ない。

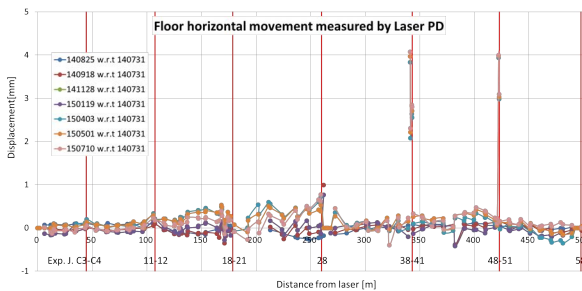


Figure 2: Horizontal laser PD measurement with respect to 20140731.

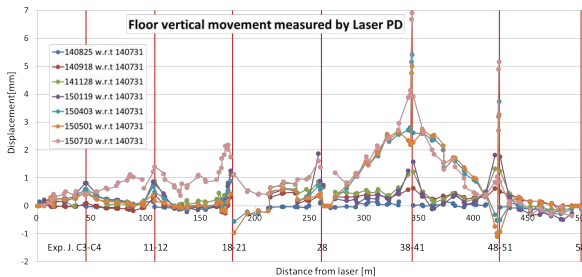


Figure 3: Vertical laser PD measurement with respect to 20140731.

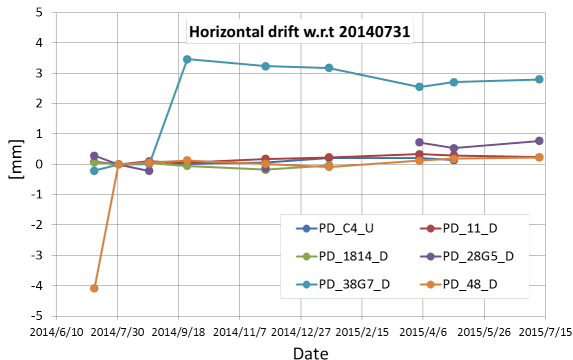


Figure 4: Horizontal drift.

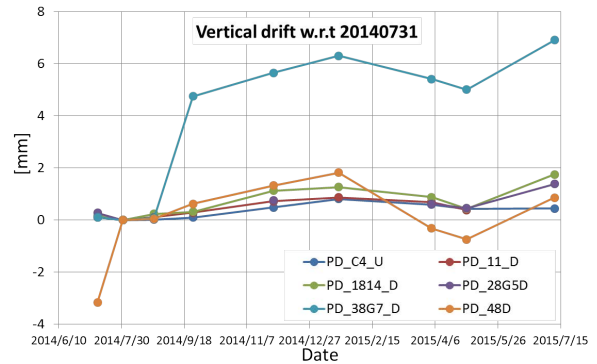


Figure 5: Vertical drift.

## 2.2 ダイアルゲージによる測定

今回、2-8 ユニット下流側の Exp. J において、2014 年 9 月から 2015 年 7 月まで測定を行った。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 6)。ビームラインを挟んで東側 (通路側) と西側 (壁側) にそれぞれ測定装置を設置した。測定期間全体にわたっての結果を Figure 7 に示す。全体的に、2014 年 9 月から測定を始めたのに対し、2015 年 2 月後半をピークとして、2015 年 9 月へ向かってここ数ヶ月で収束へ向かっているような、約 1 年周期の 0.1~0.6 mm の変動が見え変動が見て取れる。2014 年 12 月末から 2015 年 4 月頭にかけては特に変位が大きくなり、最大振幅 0.1 mm 程度の日周期成分もはっきりと見える (Figure 8)。南北方向に注目して見ると、東側と西側で振幅が約 1.5 倍ある。この期間は、入射器全体が運転を停止していた期間に相当し、人の出入りが多かった時期になる。東側と西側で、南北方向 (ビームラインに平行な方向)、東西方向 (ビームラインに垂直な方向) は正の相関を持って動いているのに対し、上下方向については負の相関があり、Exp. J を挟んでねじれるように動いているように見える。また室内の温度変化 (Figure 9) と比較してみると、2014 年 12 月末から 2015 年 4 月頭にかけての時期は、他の時期に比べて室温が 4 °C 前後低くなり、日変化も顕著に現れている。室温のこの変化が床変動の変化に影響しているように見える。

Figure 10 は Figure 7 の 2014 年 9 月から 10 月の期間を切り出したものである。東西両側の東西方向、上下方向に日周期変動がよく見える。東西両方のダイヤルゲージの測定値が 10 月中旬ごろに大きく西側に動いている日があるが、この時、台風の影響で大雨が降り、トンネル内に浸水する被害があった。以前に行った傾斜計を用いた測定により、床の変動に雨が大きく影響することがわかっている [8] が、今回の測定により、東西方向に特に大きく影響することがわかった。また東側、西側共に同じ方向に動くことがわかった。

## 3. 議論

ダイヤルゲージを用いた測定では、約 1 年周期の変動が 2 月後半にピーク値をとっている。これに対し、2-8

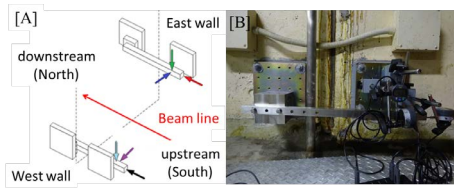


Figure 6: The installation situation of dial gauge at 2-8.

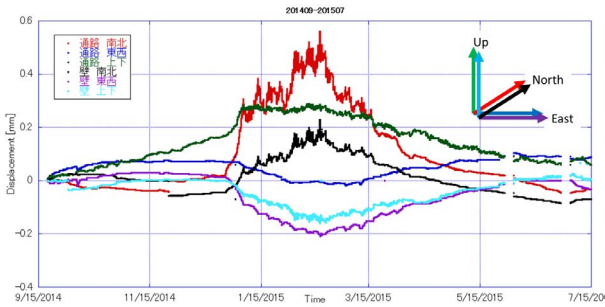


Figure 7: Dial gauge measurement 2014/9-2015/7 at 2-8.

ユニットのレーザー PD の位置測定の結果は、2015 年の 1 月をピークとしている。次の測定日が 4 月 3 日と間が空いてしまっているため厳密に比較することがはできないが、似たような周期を持っているように見える。この変動を理解するために、サンプリング間隔をなるべく小さくしたいが、前章でも述べたとおり、レーザー PD の測定データは手動観測であり、測定に 1 日単位で時間がかかることあり、加速器運転中は測定を行うことが出来ない。この問題を解決するために、自動 PD 計測装置の開発が行われ、一部試験的に導入されている [9]。2-8 ユニットの挟む 2 箇所自動 PD が設置されていて、その 2 点の差をとってプロットしたものと、ダイヤルゲージによる測定結果を比較した図が Figure 11 である。2 月末をピークに変動しているという点では似たような動きをしているように見えるが、東西方向 (DY 方向) は位相が逆転している。また振幅も、PD 計測の方が約 2 倍ある。今後も自動 PD のインストール箇所を増やし、長期的な測定を続けていく。その他、加速ユニット架台

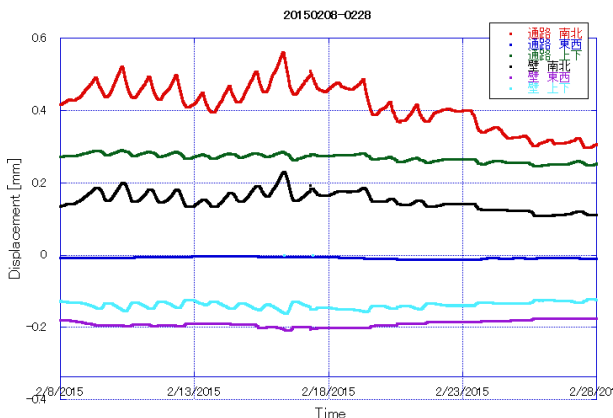


Figure 8: Dial gauge measurement 2015/2 at 2-8.

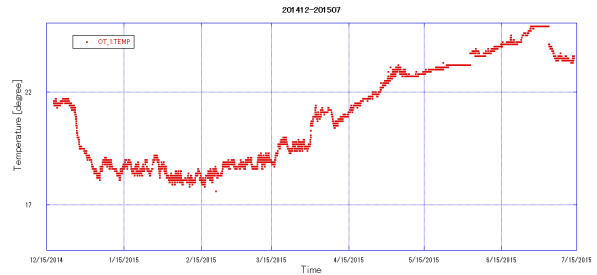


Figure 9: Tunnel temperature 2014/12-2015/7 at 2-8.

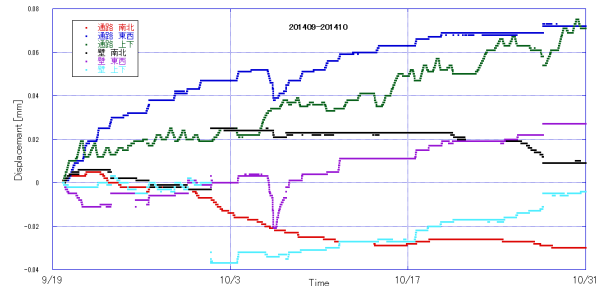


Figure 10: Dial gauge measurement 2014/9-2014/10 at 2-8.

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に架台についても現在議論中である。また、レーザー PD 計測から 3-8 ユニット、4-8 ユニット下流部の Exp. J で大きな変位が見られている。この 2 箇所の Exp. J にもダイヤルゲージを設置し、床変動の様子を観察する予定である。

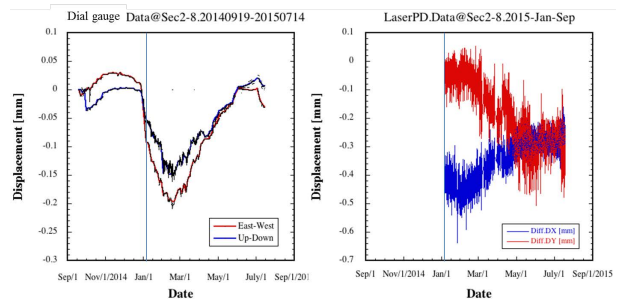


Figure 11: Comparing of dial gauge (left) and laserPD (right).

#### 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。この高精度アライメントを実現するための一歩として、初期アライメントのために、入射器では、基線となるレーザー光軸位置を加速ユニット架台に取り付けられた四分割型シリコンフォトダイオードで検出するシステムを導入している。このシステムを用いて、2014 年には

初期のアライメントを実施し、その頃より1～数ヶ月毎に位置測定を行った。2014年7月のデータを基準とし、1年分の測定データを比較した結果、Exp. J近くのPDの測定値が他所と比べ大きくずれ、また1年周期の変動しているように見えた。また、2-8ユニット下流部のExp. Jを挟んで設置したプレートの相互の動きをダイヤルゲージを用いて測定した。ダイヤルゲージの測定データも、最大0.1～0.6 mm変化し、1年をかけて元の位置に戻るような傾向が見えた。1年の周期の変動を見るにあたって、1年の測定ではデータが足りないのも、これ以降も変動観測を続ける必要がある。加えて、PDのデータで大きく変位しているように見える3-8ユニット、4-8ユニット下流にあるExp. Jにもダイヤルゲージを設置、測定する予定である。

長周期変動の調査のため、現在、リモート操作で測定できるレーザーPD装置の導入を進めている。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。

## 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-kek.kok.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.
- [8] M. Tanaka et al., “Measurement of floor movement in the KEKB injector LINAC tunnel”, SAPI30, PASJ2014, Aomori, Japan, August, 2014.
- [9] T. suwada, “Dynamical Observation of Slow Tunnel Floor Motion at the KEKB Injector Linac”, THOM06, PASJ2015, Tsuruga, Japan, August, 2015.