

## KEK 入射線形加速器トンネルの長周期床変動 MEASUREMENT OF LONG-PERIOD FLOOR MOVEMENT IN THE KEK INJECTOR LINAC TUNNEL

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>、榎本嘉範<sup>A)</sup>、牛本信二<sup>B)</sup>、水川義和<sup>B)</sup>、久積啓一<sup>B)</sup>  
Madoka Tanaka<sup>\*A)</sup>, Toshiyasu Higo<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>A)</sup>, Kazuhisa Kakihara<sup>A)</sup>,  
Yoshinori Enomoto<sup>A)</sup>, Shinji Ushimoto<sup>B)</sup>, Yoshikazu Mizukawa<sup>B)</sup>, Keiichi Hisazumi<sup>B)</sup>

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

<sup>B)</sup>Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

### Abstract

KEK electron/positron injector linac has started the injection to SuperKEKB rings. For the emittance preservation through the linac, high accuracy alignment is required. The fiducial for the measurement is defined by the 500 m laser passage in vacuum. We assess each girder position this laser reference line by detecting the laser position with quadrant photodiodes made of silicon semiconductor. The measurement so far has made us realize that the floor moves in a year-long period. After initial alignment with using this measurement system, we have to suppress the misalignment by this floor movement. We have measured the floor movement for recent two years typically in every two weeks and even in every 4 hours at 20 or so special positions. This measurement shows the year cycle and the location dependence on location along the linac tunnel. In the present paper, we will report the result of measurements and show some analyses of this movement feature.

### 1. 入射器のアライメントシステムについて

SuperKEKB への入射線形加速器でのエミッタンス保存のため、直線部の各コンポーネントのアライメント精度はベータatron波長級の長さである 100~200 m 内ではランダムミスアライメントの許容値として  $\sigma=0.1$  mm、入射器全体 600 m では  $\sigma=0.3$  mm 以下であることが要求されている [1,2].

入射器は Fig. 1 に示すように全長 600 m で、8つのセクターから構成される。約 100 m の直前部を持つ A-B セクターと約 500 m の C~5 セクターが 180 度 ARC 部によって繋がれている。基本的に各セクターは 8つの加速ユニットから構成され (ただし A セクターを除く)、加速管などの各加速ユニットに属するビームラインハードウェアは約 9 m の高剛性の架台の上に搭載されている。この架台の両端には、ユニット内アライメントの基準とする 2 点が設けられ、四分割型シリコンフォトダイオード (Quadrant silicon Photo-Diode、以下 QPD) デテクターが取り付けられている。アライメントはこの QPD の電気的中心を基準点として、ビームラインに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行う [3]。この方法で入射器の全ユニットは 2014 年に初期アライメントを終えている。

全長 500 m にわたる入射器の床や建屋は、建設当初、床や建屋の膨張、伸縮の逃げを考慮して、おおよそ 1 セクターにわたる約 80 m 毎の高剛性の部分を、それらの相対位置変動を許す低剛性の Expansion joint (以下 Exp. J) 部で繋ぎ合わせるように造られている (Fig. 1)。建屋の地上部分は気象変化の影響を受け変動しやすいため、ビームラインのある地下トンネルも、地上部分との運動や、地下の温度や水分分布等の影響を受けることがわかっ

ている [4,5]。これは、先述したビームラインコンポーネントのアライメントの要求値を満たす上で問題になっている。この変化を定量的に評価するため、これまでレーザーと QPD、ダイヤルゲージ、傾斜計、レーザートラックによる測量などで観測を行ってきた。

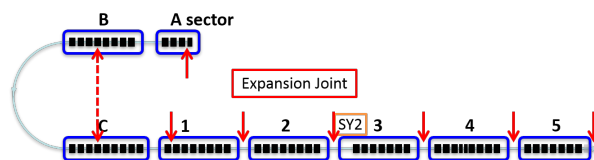


Figure 1: Linac layout. Exp. J are shown red arrows.

### 2. レーザーアライメントシステムを使った架台位置測定

#### 2.1 概要

レーザー光軸が形成する基準線は、位置が安定しているレーザー発射部の点と、最下流に設けた入射器からビームトランスポートラインへの起点となる基準点を結んだ直線である。後者の点にレーザーを安定に固定するためには 0.1 mm/500 m ~  $10^{-9}$  rad 級の安定性を要求されるが、光学系でこれを実現するのは難しいため、測定の直前にレーザーが末端の QPD の中心を通るようにレーザーのポインティング角度にフィードバックをかけている。QPD はレーザーが中心を通るべき位置に取り付けられているので、QPD でのレーザー中心からのずれを計測することで、架台のレーザー光軸基準からのずれを測定することができる。2014 年の初期アライメント以降、この QPD の位置測定を不定期に行ってきたが、位置の変化をより詳細に調査するために、2016 年からは約 2 週間に 1 度の間隔で測定を行うことにした。ただし、2017

\* madoka.tanaka@kek.jp

年夏のメンテナンス期間には、5月中旬から4ヶ月半にわたりレーザー光軸管が取り外されたため、測定を行っていない。また、このときレーザーの基準となる終端のQPDを下流に271 mm移動しているが、全長の500 mに対して1%以下の変更であるため、測定に問題視するレベルの影響はない。

変動を時間的に稠密に、またビーム運転期間中も含めて詳細に測定するために、一部のQPDは挿入、引抜と測定自動化を進めた[6, 7]。まず2016年に、特に大きな変動が見えてきていたExp. J直近の10ヶ所のQPDを自動測定可能なものに入れ替えた。その後、床、建屋の全体の動き、特に高剛性部分と軟剛性のExp. J部周辺の特徴を理解するため、2017年初頭、4-5セクター間のExp. Jを挟んで5台ずつ、計10台のQPDを自動型と交換した。これらは4時間毎の定期測定を行っている。

レーザーアライメント計測には、レーザー光軸の横方向の広がりに関連する位置ずれに対するQPDの感度情報が必要であり、これはレーザー光軸の長手方向距離に依存する。Horizontal、VerticalのPD位置[mm]は感度係数S[mm]と測定値H(V)、QPDの各象限での測定値 $V_1 \sim V_4$ [V]を用いて次のように定義される。

$$H = \frac{V_1 - V_2 - V_3 + V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \quad (1)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2 - V_3 - V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \quad (2)$$

$$Pos_{x(y)} = S_{x(y)} \cdot H(V) \quad (3)$$

今回、感度係数は2016/3に測定したものを、リモートQPDに関しては2017/10に測定したものを使用している(Fig. 2)。しかし、レーザートラッカーで測量しながら架台をVertical方向へ1.6 mm移動した際、QPDの測定での移動量は0.9 mmとなり、トラッカーの測定結果の1/2倍程度となった。このため、定量的にレーザーQPDシステムを使うことには改善の余地があると言わざるを得ない。この意味で、今回示す測定結果は、感度把握に関する大きな誤差を取りされていないことに留意しなければならない。ただし、各種相対的な動きに関しては議論できる部分も大きく、また定期的に感度計測を行うことを通じて感度を確実に把握、管理する方向への改善の余地はある。

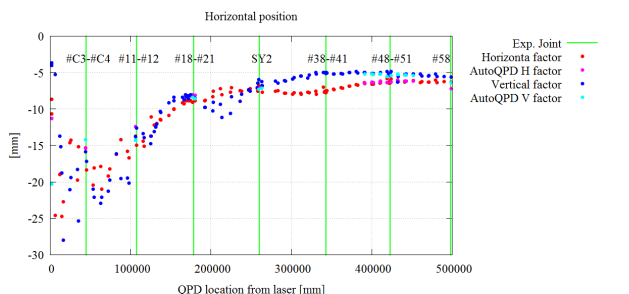


Figure 2: QPD sensitive factor.

## 2.2 測定結果

2017年4月から5月にかけての3回分のQPDの位置測定結果をFig. 3、Fig. 4に示した。2014年の初期アライメントの際にレーザー基準上に調整しているが、0.2~0.3 mm程度の局所的な変動を除けばなめらかにつながっている事がわかる。この局所的な変動の要因を把握する必要があるが、現段階でははっきりとわかっていない。

測定全期間にわたるQPDの測定結果を載せる。定期測定を開始した2016年4月からの変化のHorizontal方向、Vertical方向の結果がそれぞれFig. 5、Fig. 6である。2年間の変動は概ね±0.5 mmの範囲内に収まっている。図中の縦の緑の線はExp. Jの場所であるが、Horizontal方向では2-3セクター間、4-5セクター間のExp. Jで他より大きく変位しており、Vertical方向では全Exp. Jにおいて大きく変位をしていたり、変位の方向が逆であったりと、Exp. J部以外の部分と違う動きをしているように見える。

Figure 7に各QPDでの連続する2回間の測定結果の差のRMSを示す。HorizontalもVerticalも概ね0.05~0.1 mm程度である。Verticalに関しては、3-4セクター、4-5セクターのExp. J部では、特に値が大きくなっている。また、年周期変動は2週間ではほとんど見えない程度だと考えられるので、この量は不確実性を示している。終端QPDが±0.05 mm以内に入ればフィードバックを停止し測定を開始させているので、特に下流側に関してはこの程度の測定誤差はあるものと考えられる。

以下、特徴的な動きを持つVertical方向について検討する。

4セクター中央部から5セクター中央部まで、4-5セクター間のExp. Jを挟んだQPDの時間変化を見る(Fig. 8)。Exp. Jに最も近いQPDは上流側がPD\_48G7U(2017夏に取り外されたため、以降はPD\_48DA)、下流側がPD\_48G7D(同PD\_51UA)である。Exp. Jを直近のQPDは上流側と下流側は同じように動いて、それ以外の場所より2倍程度変位量が大きい。Exp. J直近から少し離れたところから中央部までも、Exp. Jを挟んで同じような動きをしている。またExp. Jの直近とそれ以外では逆位相の動きをしているように見える。

Figure 8から建屋中央部とExp. J部周辺を抽出したものと、3セクターの建屋中央部、3-4セクター間のExp. J部の動きをFig. 9に示す。3-4、4-5セクター間Exp. J部は同じ動きをしている。それに対して、3、4、5セクター中央部は中央部同士で同じように動いている。

QPDの測定値の時間変化が年周期を持っているように見えるので、sin関数でのフィットを試みた。Horizontal方向は、2017/10以降測定値の動きの様子がそれ以前から変わったため、フィット出来なかった。Vertical方向について4セクター両端(PD\_41U、PD\_48D)と中央部の2点(PD\_44D、PD\_45D)のQPDについてフィットした結果がFig. 10、Table 1である。Exp. J直近のPDはほぼ365日周期(±数日程度)で変動しているように見える。それに対し、建屋中央部のQPDについては年周期の動きは見られない。振幅は中央部に対してExp. J部は5~10倍の大きさがある。中央部の変動はエミッタンスに大きな影響がなくても、Exp. J付近の変動は無視

できないものである可能性が大きいですが、発散せず、年周期で元の位置に戻ってきている様子が見られるため、定期的な架台の調整で補える可能性がある。

なお、本稿では詳しく述べなかったが、2017年10月以降、特に Horizontal 方向について2017年5月以前とは変動の様子が異なっているように見える。これを論じるにはまだ十分な測定結果が得られていないので、2週間毎の計測は継続している。

Table 1: The Result of Sin Function Fit

PD Name	Cycle [day]	Amplitude [mm]	RMS [mm]
PD_41U	369±11	0.18±0.03	0.10
PD_44D	38±8.4	0.033±0.03	0.070
PD_45D	532±39	0.074±0.02	0.10
PD_48D	368 ± 4.8	0.30 ± 0.019	0.078

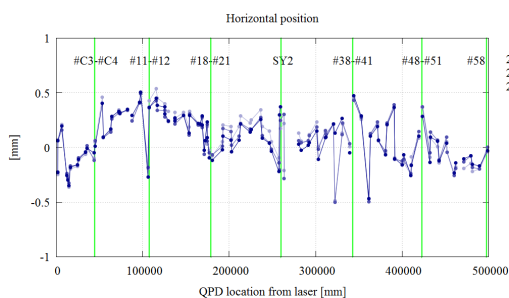


Figure 3: Horizontal QPD position.

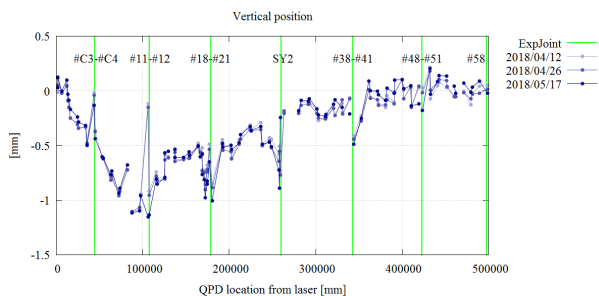


Figure 4: Vertical QPD position.

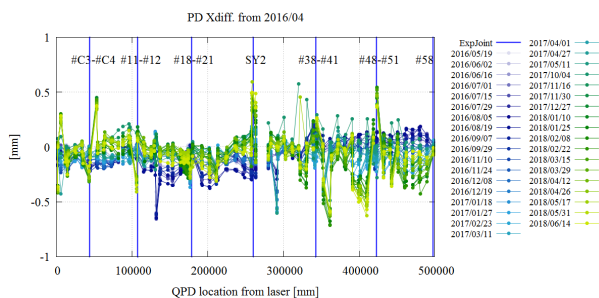


Figure 5: Horizontal position displacement from 2016/4.

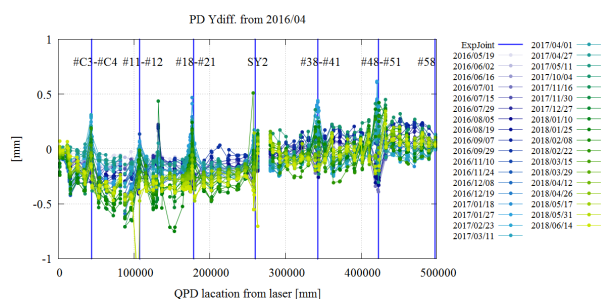


Figure 6: Vertical position displacement from 2016/4.

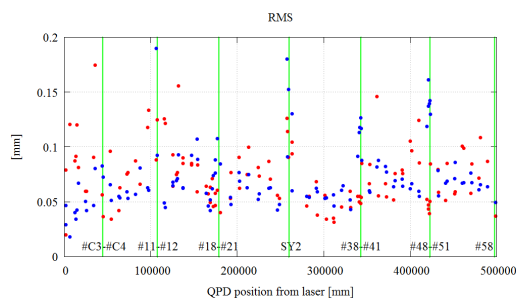


Figure 7: RMS of the difference between two consecutive measurements.

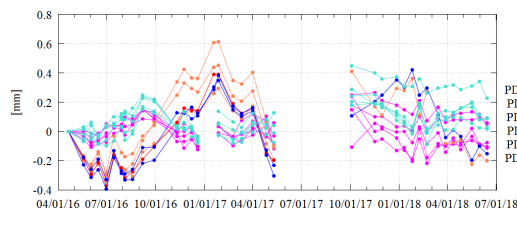


Figure 8: QPD Vertical displacement between 4-5 sector from 2016/4.

### 3. まとめ

初期アライメント基準となるレーザーと架台に取り付けられた QPD を使った架台位置測定を行い、2014年に完了した初期アライメントからのずれ量の測定を2016年4月から2年にわたって約2週間に1度行った。特に Vertical 方向について、Exp. J 付近において、全体の動きと逆位相であったり、変位が大きい様子が確認された。Exp. J 部直近と建屋中央部に注目して解析を行った結果、Exp. J 部の QPD は年周期で変動しており、建屋中央部に比べて2倍程度の大きさで変動していることがわかった。しかし、これまでの測定では変動の特徴が捉えきれない QPD もある。特に2017年10月以降、それまでの動きとは様子の違うものが見られる。これらの変動を理解するために、2週間毎の計測は継続している。それ以外にも、QPD 測定結果とトラッカー計測データと相違や、放射線の影響による QPD の劣化の程

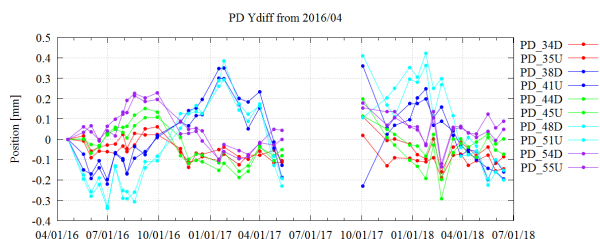


Figure 9: QPD Vertical displacement Exp. J and the center of building from 2016/4.

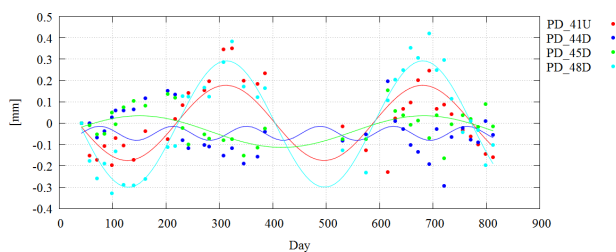


Figure 10: The result of sin fit of 4 sector.

度など、測定、解析を行うにあたって不完全なところがある。レーザーの安定性についても完全に把握しきれていない。これら問題を解決して、より正確な QPD と架台、床の動きを把握する必要がある。

## 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-kekb.kek.jp/MAC/2014/>
- [3] 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).
- [4] T. Higo, “Linac alignment”, ICFA Mini-Workshop on Commissioning of SuperKEKB and e+/eColliders, KEK, Tsukuba, November, 2013; <http://kds.kek.jp/confRegistrationFormDisplay.py?confId=\12760>
- [5] M. Tanaka *et al.*, “Linac alignment for SuperKEKB injector”, TUPRI090, IPAC2014, Dresden, Germany, June, 2014.
- [6] T. Suwada, “Dynamical Observation of Slow Tunnel Floor Motion at the KEKB Injector Linac”, THOM06, PASJ2015, Tsuruga, Japan, August, 2015.
- [7] T. Suwada *et al.*, “Dynamical Observation of Slow Tunnel Floor Motion at the KEKB Injector Linac (II)”, TUP134, PASJ2016, Chiba, Japan, August, 2016.