

# KEK 電子陽電子入射器における地球曲率 THE EARTH CURVATURE OF KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

田中窓香\*, 岡安雄一, 紙谷琢哉

Madoka Tanaka\*, Yuichi Okayasu, Takuya Kamitani  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

The KEK electron-positron injector consists of two straight sections ( $\sim 100$  and  $\sim 500$  meters) via 180 degrees of arc section. Accelerator components for both straight lines are precisely aligned with a reference He-Ne laser measuring their coordinates by quadrant silicon photo-diode mounted on one end of each girder. A full-scale survey for the injector was demonstrated by a laser tracker and a digital level and the first weighted-network analysis was done in August 2020. The first measurement data of the earth curvature along the beam line was evaluated by subtracting both the above data sets.

## 1. 入射器のアライメント概要

KEK 電子陽電子入射器は、SuperKEKB の HER、LER、PF、PF-AR の 4 つのリングにビームを供給する線形加速器である。SuperKEKB への入射のエミッタンス保存のため、直線部の各機器のアライメント精度は、ベータatron 波長に相当する長さである 100~200 m 内の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]。

入射器は南北に伸び、全長約 600 m で、8 つのセクターから構成されている。約 100 m の直線部を持つ A-B セクターと、約 500 m の C-1~5 セクターが、J-ARC と呼ばれる最南端の 180 度に折り返す ARC 部によって繋がっている (Fig. 1)。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、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 の架台の上に搭載されている。ユニット内アライメントの基線となる He-Ne レーザーは、架台の下に設置された、ビームラインに並行したレーザー用の真空ダクト内を通っている。架台の両端に四分分割シリコンフォトダイオード (Quadrant silicon Photo-Diode、以下 QPD) のディテクターが取り付けられ、レーザーが QPD の中心を通るように全架台をアライメントする。この方法で 2014 年に初期アライメントを終えている [3]。初期アライメント後も定期的に QPD とレーザーの位置関係を測定することで架台の位置変化を観察していた。現在はレーザーを伝搬させるための真空ダクトの不調によりレーザーアライメントシステムは休止していて、今後の入射器のアライメントの方針とともに活用方法については議論中である。

## 2. 入射器における地球曲率の決定

前セクションで述べたとおり、入射器の直線部はレーザーによって据付、調整されており、この直線は地球重力の影響を受けない。一方レーザー tracker やデジタルレベルといった重力方向を基準とした機器での測定では、入射器に沿って器械点を移動させながら測定する必

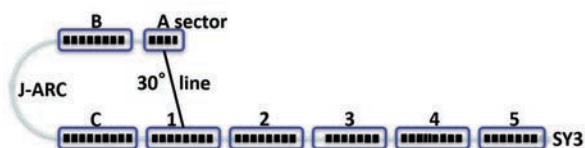


Figure 1: A schematic layout of the KEK  $e^+/e^-$  linac accelerator.

要があるため、各器械点を頂点とした多角形状のデータとなる [4]。この多角形は地球の曲率に沿ったものになり、すべての器械点でのデータをつなぎ合わせたものは、地球の曲率を描く。

入射器では 2020 年にレーザー tracker (Leica AT-401) とデジタルレベル (Trimble DiNi Digital Level 0.3) を用いて入射器全系の網測量を行った [5]。測量結果のうち、QPD 測定と重複する架台の水準が Fig. 2 の赤いプロットである。A-B セクターの点については J-ARC 中央の電磁石の点を中心に折り返している。これを見ると、南端から北端までに渡る緩いカーブを描いている。このデータと、2019 年以前に測定していたレーザー基線と QPD を使った架台水準の測量結果と比較することで、原理的には入射器直線部における地球の曲率の情報を得る事ができる。

### 2.1 レーザー基線と QPD を用いた架台位置測定と網測量の比較

レーザー基線を用いたアライメントでは、J-ARC に置かれたレーザー光源の直後にある点と終点 (#58) の 2 点の QPD の中心を通るレーザーで基線が定義されている。初期アライメントではすべての QPD の中心をレーザーが通るように架台を調整しているので、本来はこの直線上に架台が載っているはずであるが、実際は差異が生じている。この基線からの差分を見ることで架台の座標を知ることができる [6]。この QPD の水準と、網測量で得られた水準との差分から入射器直線部における地球の曲率を求めることができる。QPD の測定データは直近の 2019 年 3 月のものを使用している (Fig. 2 の橙)。QPD の水準データと網測量の水準データの差分が Fig. 2 の紫のプロットになる。このデータの始点と終点の水準を、

\* madokat@post.kek.jp

QPD の測定結果と同じ直線上に合わせたものが Fig. 3 の青いプロットである。このプロットに多項式フィッティングを行うと、極大点での高さ  $h$  は 7.6 mm となった。一方、Fig. 3 中の水色の曲線は、地球を 6371 km の真円として扱った場合の地球の曲率である。C-5 直線部 500 m に対して、中心の 250 m 地点で補正高  $h$  は 4.9 mm となる [4]。推定した値とオーダーで一致しており、第一次近似で地球曲率に沿った曲線を得ることができた。QPD 測定と得られた曲線を使った補正後の LT の水準データとは、240  $\mu\text{m}$  以内で一致している。

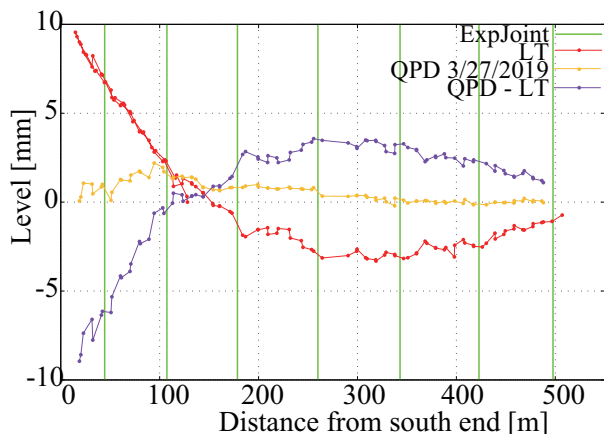


Figure 2: Level data of QPD (orange) and LT (red) are compared. Residuals of QPD and LT are also overlaid (purple). Locations of expansion joints are represented as green lines.

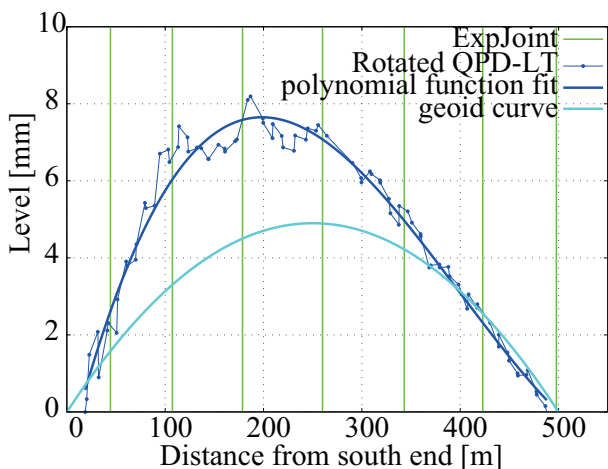


Figure 3: A polynomial fit for residuals of QPD levels and LT (blue). Light blue line represents the earth curvature in the case the earth radius of 6371 km. Locations of expansion joints are represented as green lines.

## 2.2 得られた曲線に対する考察

本来、このように QPD による測定結果と網測定の結果を比較するとき、架台の変位差を可能な限り消すため、同時期に測定することが望ましい。そのため 2016 年か

ら蓄積してきたデータの中から、今回の解析では最新の QPD 測定データを用いたが、1 年以上の時間が空いてしまっている。2016 年以降の他の日付のデータを選択し、同様にフィッティング、比較した結果を Fig. 4、Table 1 に示す。このように、測定年によって値にばらつきが生じてしまっている。

LT 測定における QPD 点の水準の測定誤差は全点平均で 30  $\mu\text{m}$  であった [5]。QPD 測定では各象限 1000 回ずつデータを読み取った平均値を使っている。各 QPD の 1000 回の測定の  $\sigma$  を Fig. 5 に示す。最大で 18  $\mu\text{m}$  程度となっている。 $\sigma$  のばらつきは発散する方向に偏っているように見える。また、2017 年、2019 年の値が 2016 年、2018 年に比べて大きく、ばらつきも大きくなっている。これには以下の 4 つの原因が考えられる。

まず第一に、 $\sigma$  の値はレーザーの安定性の影響を受ける。レーザー光源の近くにある搬入用大扉の開閉があるとレーザーが安定しない。大扉の開閉が頻繁だった場合、 $\sigma$  が大きくばらつく可能性がある。なお、QPD の出力電圧の  $\sigma$  が一定値より大きいものは測定し直している。第二に、QPD 測定による架台の位置の基線からの差分が測定ごとに異なるため、2020 年の網測量結果と架台の位置が大きく異なっている可能性が挙げられる。これはかねてから問題となっている建屋の経年変動によるものと考えられる。また QPD は放射線に弱く、放射線劣化による出力の低下については課題となっていた [7]。その他にも、大気パージを行う際に吸い込んだ埃や真空ダクト内の塗装が剥がれたごみなどが QPD に付着しても出力が低下してしまう。実際に、2016 年 3 月と 2018 年 9 月の測定の QPD の全象限の合計出力を比較すると、平均で 92 %、最大で 70 % まで減少している。2019 年以降のデータに関しては 2016 年から 10~20 % まで減少している。大きく減少してしまった理由はわかっていない。

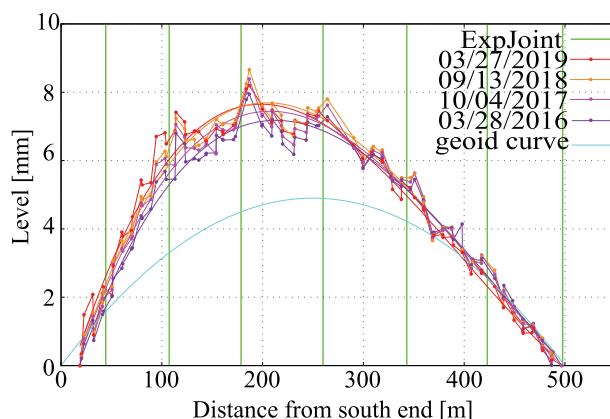


Figure 4: Evaluated the earth curvature with several years of QPD data are compared. The geoid curve (light blue) with the earth radius of 6371 km is also overlaid. Locations of expansion joints are represented as green lines.

## 3. まとめ

KEK 電子陽電子入射器は、最大 500 m の直線部を持つ全長 600 m の線形加速器である。2020 年にレーザー

Table 1: Evaluated Correction Height with Several Years of QPD Data

Date	Correction height [mm]
03/28/2016	7.1
10/14/2017	7.4
09/13/2018	7.7
03/27/2019	7.6

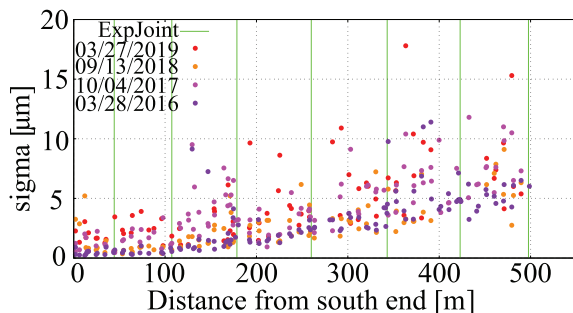


Figure 5: Standard deviation of QPD measurements with several years of QPD data are compared. Locations of expansion joints are represented as green lines.

トラッカーとデジタルレベルを用いて入射器ビームライン全系の網測量を行った。得られた水準データは重力の影響を受けて緩いカーブを描く。このデータと過去に測定していたアライメント基線となるレーザーと QPD を用いた架台位置測定との比較を行うことで、入射器直線部における地球曲率に沿った曲線を定量的に評価した。QPD の水準から LT の水準を引いたものを多項式でフィッティングした結果、500 m の直線部で最大 7.6 mm の補正高を持つ曲線が得られた。地球半径を 6371 km としたときの補正高 4.9 mm とオーダーで一致した。得られた曲線は入射器直線部における地球曲率に沿った曲線として妥当であると考えられる。

## 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, pp. 1583-1585.
- [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] H. Kimura, “高エネルギー加速器セミナー OHO’13 アライメント”, Text of High energy accelerator seminar OHO, Tsukuba, Japan, Jul. 2013; <http://accww2.kek.jp/oho/OHOtxt4.html>
- [5] Y. Okayasu, “Survey report for KEK Tsukuba Campus injector”, WEP008, PASJ2021, Aug. 9-12, 2021, to be published.
- [6] M. Tanaka *et al.*, “Measurement of long-period floor

- movement in the KEK injector LINAC tunnel”, WEP136, PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, pp. 740-743.
- [7] T. Suwada, “High Stabilization of 500-m-Long Laser-Based Fiducial Line for High-Precision Laser-Based Alignment”, 加速器 vol. 10, No. 4, 2013, pp. 1-12.