

KEK つくばキャンパスにおける入射器測量報告 SURVEY REPORT FOR KEK INJECTOR LINAC IN TSUKUBA CAMPUS

岡安 雄一*

Yuichi Okayasu*

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A full-scale network survey for accelerator components in KEK e^+/e^- injector linac has been demonstrated and completed in August 2020. Results of a network analysis, identified issues, and improvements for further precise network survey are discussed.

1. 導入

全長 645 m の KEK 電子陽電子入射器は、上流から 120 m の直線部、33 m のアーク部、492 m の直線部から成る。120 m の直線部は A、B セクター、492 m の直線部は C、1~5 セクターと 8 つのセクターに定義される。更に各セクターは、約 10 m の鋼管を主とした共通架台とその上に搭載された加速管と電磁石、診断系で構成されている。当該入射器は PF、PF-AR、ダンピングリング、そして SuperKEKB (HER/LER) へ振り分け入射している (Fig. 1)。

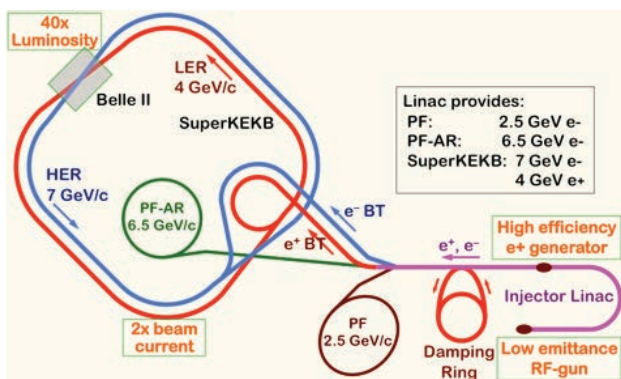


Figure 1: Schematics of KEK accelerator complex in Tsukuba campus.

入射器に関わる直近の経緯を振り返ると、2009 年 4 月に PF/KEKB 同時トップアップ入射の実現、2010 年 6 月に KEKB の運転が終了し、アップグレードに向けた工事を順次開始。2018 年 4 月 SuperKEKB HER/LER 初衝突が実現し、2020 年 5 月には入射器供用開始から 200,000 時間の運転を達成している。

更なる飛躍のひとつとして SuperKEKB の低エミッタンス化を目指しており、Phase 3 (final requirement) として e^+ で 100 (H) / 15 (V) [μm]、 e^- で 40 (H) / 20 (V) [μm] (いずれも normalized) を掲げている [1]。これに対する入射器アライメントの取り組みとして、

- 加速器構成機器のミスアライメントの低減
- 入射器経年変動の体系的な把握
- 変動に対するリアルタイムフィードバック [2]

などが挙げられる。その一環として、2020 年 8 月に入射器全系に対する網測量を実施し、網計算による加速器構成機器の座標分布評価を初めて実施した。本稿では網測量の結果と明らかになった課題、改善点について報告する。

2. 電子陽電子入射器の全系網測量

現在の電子陽電子入射器を構成する機器は、SuperKEKB 計画に向けて 2009 年から開発が着手されたレーザーアライメントにより、精度良く据え付けられている [3]。

この据付調整は、2 つの直線部の先頭、すなわち A セクター及び C セクターの先頭に設置された He-Ne 光源のレーザー (10 mW) を、途中収束系を挟まずに各共通架台を貫通する真空ダクトを伝搬させ、各共通架台の終端に設置された四分割シリコンフォトダイオードで、架台の座標を評価するものである。従って 180° 反転する曲線を描くアーク部には、この手法は適用されない。他方、レーザートラッカー (LT) によるアライメントは局所的な機器据付時に限定して用いられ、アーク部を含めた系統的な測量と経年変動変化の評価という意味では、これまで成されてこなかった。

上記の理由から、2020 年夏に LT とデジタルレベルによる入射器全系網測量を実施した。網測量に使用した LT 及びデジタルレベルの性能諸元は Table 1 の通りである。網測量の要領は、計 3040 点の電磁石、架台、壁床モニュメントの水平・水準座標を計 62 器械点 (~10 m 間隔) で LT 測量し、加えて計 43 点の電磁石水準を計 21 器械点 (~16 m 間隔) でデジタルレベルで往復測量し、環閉補正を行った。デジタルレベルの水準で重み付き網計算を行い、入射器全系の機器座標分布を評価した。環閉補正值は 260 μm であった。網測量及び網計算の詳細は [4, 5] に譲る。網計算による最適化後の平均測量誤差 (σ) は Table 2 の通りである。

* okayasu@post.kek.jp

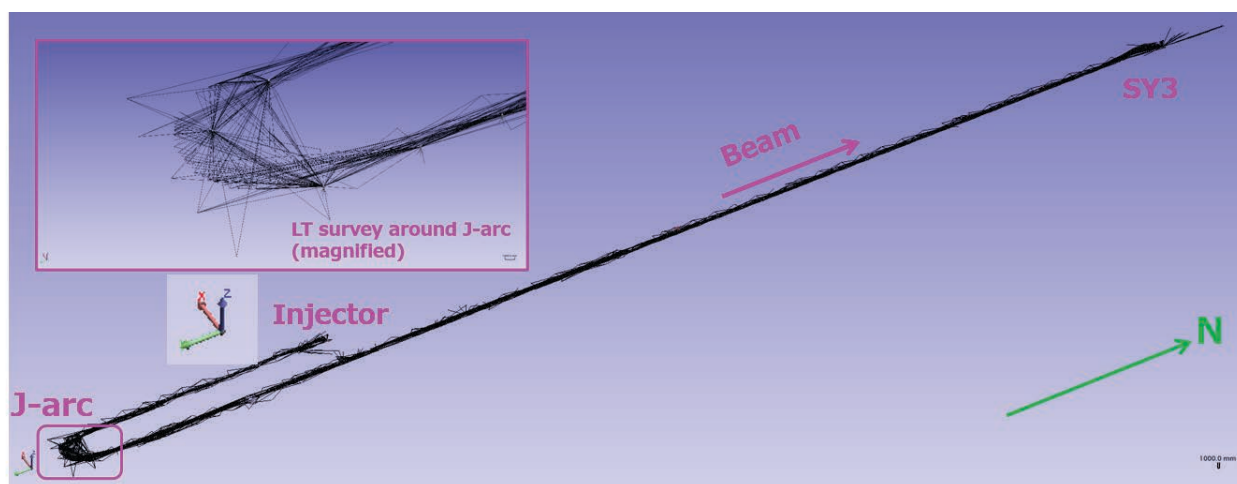


Figure 2: Schematics of the network survey for KEK e^+/e^- injector linac. A cartesian coordinates are defined with the origin at A sector head. y and z axes are beam running and vertical directions, respectively. Note that the beam running direction with this coordinates definition is changed to be negative from exit of the arc section.

Table 1: Typical Specifications of LT and Digital Level Survey Instruments, Number of Survey Points, and Work Periods

LT	Leica AT-401
絶対角度精度 (σ)	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$
絶対距離精度 (σ)	$\pm 10 \mu\text{m}$
測量点数	$\sim 10 \text{ m}$ 間隔 62 器械点、3040 測量点
作業日数	2 週間
デジタルレベル	Trimble DiNi 0.3
水準測量精度 (σ)	0.3 mm (1 km 往復測量)
測量点数	$\sim 16 \text{ m}$ 間隔 21 器械点、43 測量点 (往復)
作業日数	2 日

Table 2: Evaluated Survey Errors for LT and Level Surveys

LT 測量	
水平角度	$2.7 \mu\text{rad}$
垂直角度	$2.5 \mu\text{rad}$
距離	$17 \mu\text{m}$
水準測量	
水準	$5 \mu\text{m}$

3. 測量結果

Figure 3 に網計算で得られた入射器電磁石の水平座標 (x : 黒) と水準 (z : 赤) の分布を示す。 x についてはアーク部の電磁石のデータは含まず、またアークまでの直線部基準を $x = 0 \text{ mm}$ 、アーク出口からの直線部基準を $x = -15000 \text{ mm}$ として差分を表示している。尚、ビーム進行方向の座標 y に関しては議論の対象から除外しているため、記載していない。電磁石はアークへ向かうに従い 16 mm 程度西側へ開き、アーク出口から直線部終

端の第三スイッチャード (SY3) へ向けて緩やかに 2 mm 程度東側へ開くことが判る。尚、KEK 電子陽電子入射器はビームの経路としてはワンパスではあるが、建屋としては Fig. 2 に示すように、A セクターと 1 セクターがバイパス通路のモニュメントで接続され、水平方向の拘束が効いているため、上記の開きは現実に存在しているものと考えられる。水準データについては後述する地球の曲率補正を適用後に述べることにする。

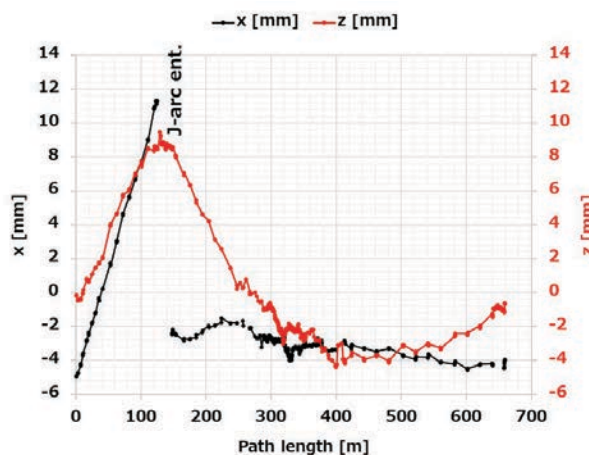


Figure 3: Measured horizontal coordinates (*black*) and levels (*red*) of injector magnets. Note that a geoid height correction is not applied for levels.

他方、測量誤差 (σ) の分布については、Fig. 4 に示す通り、 x (青) はアークの入り口、2/3 セクター境界で極大、A4 ユニット、46/48 ユニット境界で極小となる。 y (赤) 方向の誤差はアークの入り口までの直線部で $50 \mu\text{m}$ 程度で一様分布し、アークの出口以降は $25 \mu\text{m}$ 程度で一様分布であった。前者が後者の 2 倍程度に大きい原因は、空調による空気の対流が大きいためと考えられる。水準 z の誤差はデジタルレベルによる測量データで重み

付き網計算を行っているため、デジタルレベルでの測量点では誤差が小さく、それ以外では概ね $25 \mu\text{m}$ 程度であった。参考までに入射器の室温分布(緑)を重ね書きしたが、測量誤差と室温の明確な相関は認められない。

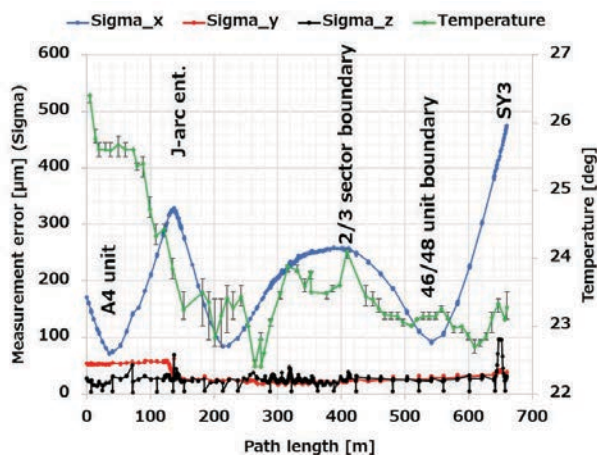


Figure 4: Evaluated measurement errors (σ) for horizontal coordinates (x : blue and y : red) and levels (z : black) of injector magnets. Room temperature distributions (green) are also overlaid.

4. 考察

2. で紹介したレーザー基線で計測された架台の水準データ (PD level) と重複する LT 測量の水準 (LT level) の差分 (dz) から、第一次近似で地球の曲率曲線が得られる。この曲線の定量的な評価は、少なくとも国内の加速器施設としては初めての試みである。

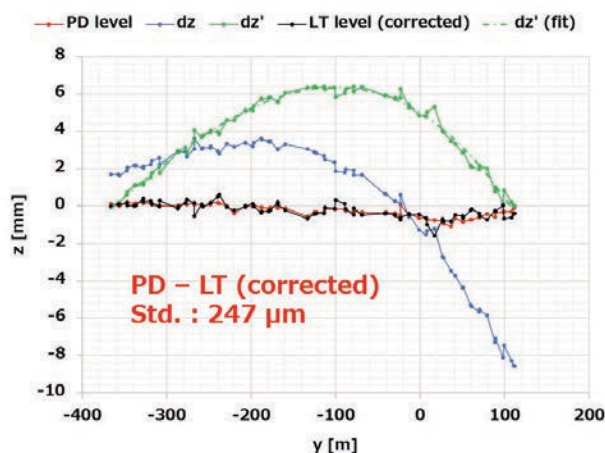


Figure 5: Level survey comparison between PD and LT measurements. Residuals of PD (red) and original LT level data are shown as dz (blue). Pitching correction of $20 \mu\text{rad}$ is applied for dz data to make even levels of both end with PD levels and plotted as dz' (green). Eventually, a geoid height correction (dz' (fit)) is added to the original LT levels (black) and compared with PD level.

Figure 5 に y 軸に沿った PD level (赤)、 dz (青) の分布を示す。 dz の両端の水準を PD level に合致するようにピッチングを $20 \mu\text{rad}$ 調整した分布が dz' (緑) である。 dz' を多項式でフィットし、この多項式を元々の LT 水準データに加えて地球曲率補正を施した分布が黒でプロットした LT level (corrected) である。PD と地球曲率補正を施した LT 水準の差分の標準偏差は $\sim 250 \mu\text{m}$ であった。尚、PD のデータはレーザーアライメントが導入された比較的初期の 2016 年のデータを採用している。その根拠は、座標を測定するシリコンフォトダイオードの放射線損傷の寄与が少ないと推察したためである。現に 2016 年と 2018 年の PD の出力は最大 70% まで低下しており、また 2019 年に至っては $10 \sim 20\%$ まで低下している [6]。PD と LT の水準差分 $\sim 250 \mu\text{m}$ の差異は、1) 上述のシリコンフォトダイオードの出力低下、2) 水準の経年変動が主要因と考えられる。一方、地球曲率補正を施す前の LT 水準に適用した $20 \mu\text{rad}$ のピッチング補正角は、1) 網計算における最適化の過程で LT 測量の水準面が解析的に傾けられた角度、2) 2016 年から建屋全体に生じた有限の角度の傾きのいずれか、若しくは両方と考えられる。後者については、現在各年のレーザー基線の角度補正データの詳細を確認している。

尚、地球を半径 6,371 km の真円と仮定した場合、アーク出口以降の $\sim 490 \text{ m}$ の直線部での地球曲率補正高は $\sim 4.5 \text{ mm}$ であり、今回の測量と解析から得られた $\sim 6 \text{ mm}$ とオーダーは合致する。

地球曲率補正を施す前後での、入射器全電磁石の水準分布を Fig. 6 に示す。黒で示した補正後の水準分布によれば、アーク部入り口直前の B セクターで、 $\sim 1.5 \text{ mm}$ 程度の隆起が認められる。これが事実であれば、アークにおけるビームロスの原因にもなり得ることから、詳細の確認と必要に応じて再アライメントを行う。

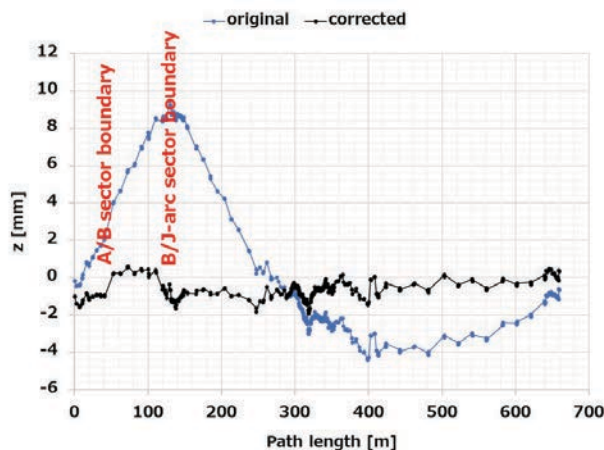


Figure 6: Measured magnet levels along path length before (blue) and after (black) the geoid height correction.

最後に、今回 KEK 電子陽電子入射器で初めて行った網測量を通して判明した改善点について議論し、本稿を締めくくる。前述したとおり、全系網測量は電磁石の他、壁・床に設けられた計 260 点のモニユメントの座標も測量している。本来モニユメントは主たる測量対象である電磁石の測量空間を均等に囲むように配置され、網

測量・網計算の精度を向上させる。しかしながら全系網測量の結果、Table 3 に示すとおり、モニユメントの測量データを網計算から除外した方が、最適化後の精度が良いことが判明した。すなわち、解析の結果は既存のモニユメントの配置が適切でないことを意味する。ちなみに Table 3 中のバイパスとは A セクターと 1 セクターを接続する通路部を指す。現在シミュレーションにより 1) モニユメントの点数、2) 器械点数の最適化を行っている。

Table 3: Survey Error Comparison after the Network Analysis

	Hor. [μrad]	Ver. [μrad]	Dist. [μm]
全モニユメント込み	2.692	2.517	17
東壁モニユメント無し	2.509	2.522	17
西壁モニユメント無し	2.695	2.494	17
床モニユメント無し	2.577	2.417	17
バイパスのみ	2.192	2.273	17
全モニユメント無し	2.187	2.266	17

5. まとめ

SuperKEKB の更なる低エミッタンス化を目指し、現在 KEK 電子陽電子入射器では 1) 機器のミスアライメントの低減、2) 経年変動の体系的な把握、3) 変動に対するリアルタイムフィードバック等に取り組んでいる。

その一環として、2020 年夏に LT とデジタルレベルで入射器の全系網測量を実施した。レーザーアライメントのデータとの差分から、地球曲率曲線を第一次近似で定量的に評価した。これは少なくとも国内の加速器施設としては初の試みである。データと網計算から得られた地球曲率補正高は、地球を真円と仮定した場合のそれと比較し、オーダーで合致した。また据付記録とも整合性が取れた。電磁石の水平方向 (x) の座標については、アーク部へ向かうに従い 16 mm 程度西側へ開き、アーク出口から SY3 へ向けて緩やかに 2 mm 程東側へ開く。水準に関しては、B セクターで 1.5 mm 程度の顕著な隆起が認められた。後者に関しては仮に事実であれば、アーク部におけるビームロスの要因になり得ることから、必要に応じて再アライメントを行う。

全系網測量の結果は、レーザーアライメントのデータと比較して 20 μrad のピッチング補正が必要であり、この角度は網計算における最適化のプロセスで、水準面に傾きが生じた、ないしは建屋全体に有限の傾きが生じたと考えられる。

既設の測量モニユメントの配置は改善の余地があり、現在シミュレーションでモニユメント及び器械点の配置の最適化を行っている。

参考文献

- [1] "The Twenty-Forth KEKB Accelerator Review Committee Report", 20 July, 2020.
- [2] Y. Enomoto *et al.*, "Motor control of magnet support frame

- 1", Proc. 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Jul. 31 - Aug. 3 (2019), pp. 657-660.
- [3] T. Suwada, "High Stabilization of 500-m-Long Laser-Based Fiducial Line for High-Precision Laser-Based Alignment", J. Part. Accel. Societ. Jpn. **10**, No. 4 (2013) 1.
- [4] Y. Okayasu *et al.*, "Analysis for horizontal displacements of SPring-8 storage ring", Proc. 14th Annual Meeting of PASJ, Sapporo, Aug. 1-3 (2017), pp. 771-775.
- [5] Y. Okayasu *et al.*, "An interpretation of SPring-8 ground elevation by the empirical ATL-law approach", J. Inst. **15** (2020) P03033.
- [6] M. Tanaka *et al.*, "The geoid distribution of KEK electron/positron injector linac", Proc. 18th Annual Meeting of PASJ, Aug. 9-12 (2021), to be published.