

KEKB 入射器における高精度レーザーアライメントのための 500m 長レーザー長基線の伝送及び安定性特性

PROPAGATION AND STABILITY CHARACTERISTICS OF A 500-M-LONG-DISTANCE LASER-BASED FIDUCIAL LINE FOR HIGH-PRECISION LASER-BASED ALIGNMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC

諏訪田剛^{#,A)}, 佐藤政則^{A)}, 寺田総一^{B)}, 美野島薫^{B)}

Tsuyoshi Suwada^{#,A)}, Masanori Satoh^{A)}, Souichi Telada^{B)}, Kaoru Minoshima^{B)}

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{B)} Length Standards Section, Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japan

Abstract

A laser-based alignment system with a He-Ne laser has been newly developed in order to precisely align accelerator units at the KEKB injector linac. The laser beam was first implemented as a 500-m-long fiducial straight line for alignment measurements. We experimentally investigated the propagation and stability characteristics of the laser beam passing through laser pipes in vacuum. The pointing stability at the last fiducial point was successfully obtained with the transverse displacements of $\pm 40 \mu\text{m}$ level in one standard deviation by applying a feedback control. This pointing stability corresponds to an angle of $\pm 0.08 \mu\text{rad}$. This report contains a detailed description of the experimental investigation for the propagation and stability characteristics of the laser beam in the laser-based alignment system for long-distance linear accelerators.

1. はじめに

現在 KEKB 入射器では、次期計画 SuperKEKB[1] に向けた入射器増強と高度化が進行中である。高精度アライメントは入射器の高度化に向けた最も重要な項目の 1 つである。先の東北大地震による入射器の被害は甚大であったが、迅速な復旧を経てビームライン後半部 (全長の約 1/3) を利用して放射光リングへの入射が続けられてきた。しかし、ビームライン前半部 (全長の約 2/3) のアライメントは大きく変位したままである。2013 年 7 月から夏期保守に入り入射器増強が本格的に開始されアライメント作業も佳境に入っている。

筆者等は 2009 年度より SuperKEKB に向けた高精度レーザーアライメントシステムの開発を続けてきたが、最大直線部のアライメントに必要な 500m レーザー長基線の安定化によようやく成功した。アライメントの光軸となる長基線には He-Ne レーザー (10mW) を用いた。長基線を安定化させるために新たなレーザー光学系を構築し、さらに計算機制御によるフィードバックを導入することで光軸の安定性を飛躍的に高めることに成功した。この結果、500m 直線部の終端における光軸の位置安定性は $40 \mu\text{m}(1\sigma)$ レベルとなり入射器に要求される精度を充分満足することを確認した。これは角度安定性に焼き直すと $0.08 \mu\text{rad}(1\sigma)$ に相当する。本成果は現在進行中であるアライメント作業に威力を発揮しており、入射器のみならず次世代の長距離線形加速器にも充分応用可

能な技術である。

2. 入射器におけるレーザーアライメント

2.1 概要

入射器は、180 度偏向部 ($E=1.7\text{GeV}$) を挟んで 2 本の直線部 (100m 及び 500m 長) からなる総長 600m の電子陽電子線形加速器である[2]。各直線部の最上流にはレーザー光源が置かれ、独立してアライメントを行うことができる。

基本となる加速ユニット (9.6m 長) には、耐震構造を有する 8.44m 長の円筒構造 (ステンレス鋼, 直径 50.8cm) をもった架台が設置される。架台上に 4 本の 2m 長 S バンド加速管を搭載する。架台内面上部に光軸管 (直径 11.5cm) を平行して挿入し二重同軸構造としている。架台両端には、光軸測定用の四分割型シリコンフォトダイオード (QPD, 直径 10mm) を内蔵したホルダーがフランジを介して装着される。隣り合う架台間は短管で接続され光軸管全体は真空に保持される。真空保持は光軸安定化のために必須である。長さの異なる変則的な架台を含み総計 48 台の加速ユニットが直線上に並び 500m 長直線部を構成する。一方、100m 長直線部には総計 12 台の加速ユニットが直線上に並ぶ。

入射器のアライメントシステムは、レーザーをアライメントの光軸とする。加速ユニットの両端に設置した QPD にレーザーを照射しその強度重心を光軸に垂直な平面上で計測すれば加速ユニットの光軸に対する変位を測定することができる。この測定に

[#] tsuyoshi.suwada@kek.jp

基づき光軸からの変位量がゼロになるように加速ユニットは機械的に調整される。一方、加速ユニット上の加速管に対してレーザートラッカーを用いて局所的にアライメントを行う。両端の QPD から取り出した基準座にターゲットを置き、2点を結ぶ直線を基準線として加速管のアライメントを行う。このように、入射器のアライメントは、加速ユニットに対する長距離アライメントとユニット内加速管に対する短距離アライメントという二段構えのアライメントからなる。両者は独立して実施することが可能である。

長距離アライメントに対し光軸の安定化は極めて重要である。アライメント精度を 0.1mm とすると、光軸の角度安定性は $0.2\mu\text{rad}$ が要求される。このような微小角は高精度傾斜計でも測定は困難である。これまでの筆者等の努力は如何にして光軸を安定化させるかということに尽きる。

2.2 レーザー光学系

前任者のシステムを引き継いだ 2009 年当初は、光源の放射線損傷を危惧した結果、クライストロンギャラリーに光源を置き、光ファイバーを通してレーザーをトンネル内へ引き入れるというシステムであった。ファイバーから出射するレーザーを適度な倍率で拡大した後、光軸管に入射させるという構想であった。構想に従い光ファイバーから出射するレーザーを通常の光学系に伝送させるために様々な試みを行ったが全て失敗に帰した[3]。これは、ファイバーからレーザーを取り出す光学系にばかり気を取られ光学系全体を如何に堅牢に安定化させるかということ、さらに光軸の簡便な調整機構まで気が回らなかったからである。

このような経緯のもとに産総研のレーザー計測の専門家に共同研究を依頼し、議論の末によりやく光学系を完成させた。議論で明らかになった基本的な考え方は、(1)よく枯れた He-Ne レーザーを用いること、(2)堅牢で面積の大きな光学架台を用いること、(3)光学系内の光路長はできるだけ長く取りレーザー径の安定化を図ることであった。このような考え方を基に構築したのが C5 ライン用のレーザー光学系(図 1)である。

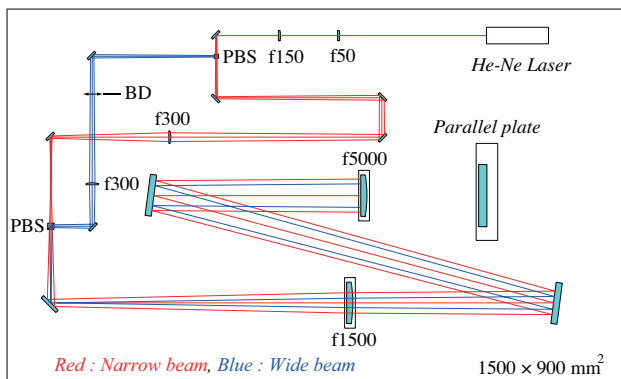


Figure 1: Laser source and input optical system; PBS: polarizing beam splitter, BD: beam dumper.

He-Ne 管とその光学系を市販の光学定盤 ($1500 \times$

$900 \times 112 \text{mm}^3$) 上に並べトンネル内の大気雰囲気中に設置した。温度や気圧など環境要因の変化に起因する空気の擾乱を避けるために光学系全体をアクリルカバーで覆い、さらにその上からビニールシートを被せた。

架台床面 ($1500 \times 500 \text{mm}^2$, PHC 杭 1m 深さ) は、トンネル床面とは 100mm の間隙をあけて縁切りされ、日較差による建屋変形に起因する床変動の影響を直接的に受けないようにしている。床面には 20mm 厚の鉄板を打ち込み、これに剛性の高い鉄架台を固定し、この上に光学定盤を固定している。このように架台全体を堅牢にすることは光軸の安定化には極めて重要である。

レーザーの伝送には幾つかの球面平凸レンズと反射ミラーを用いて屈折光学系を構築した。構築した光学系はスプリッターを用いてレーザーを分岐し、異なる光学系を伝送させることができる。このことで二種類の径をもったレーザーを独立に生成することができる。一つは本システムで用いる細径レーザー(赤線)、他はフレネルレンズ方式アライメント用の太径レーザー(青線)である。現在、後者は開発途上なので本システムでは用いない。管から 10cm 後のレーザー径は $W_x \approx W_y \approx 0.83\text{mm}$ (4σ で幅を定義)、発散角度は $\theta_x \approx \theta_y \approx 0.7\text{mrad}$ である。5枚の球面平凸レンズ(焦点距離: $f = 50, 150, 300, 1500, 5000\text{mm}$)によりレーザー径は徐々に拡大され光学系出口のレーザー径は $W_x \approx W_y \approx 29\text{mm}$ となる。管から出口までの伝送距離は $\sim 5.5\text{m}$ である。このような比較的長い伝送距離はレーザー径の安定化を図るためである。

光学系で生成したレーザーは、 500m 長に渡り接続された光軸管(鉄又は SUS)に入射し 500m 長レーザー長基線として光軸を形成する(図 2)。光学系直後と入射器終端には光軸の基準点となる QPD が設置される。すなわち、光軸は 2 台の基準 QPD の中心を通過するよう調整される。光学系直後の QPD を始点 QPD ($z=6.3\text{m}$) を呼び、入射器終端の QPD を終点 QPD ($z=500\text{m}$) 呼ぶ。このように、光軸は墨出し用の墨に対応する。

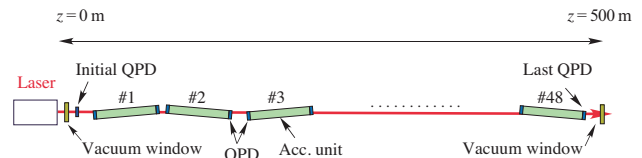


Figure 2: Schematic layout of the laser-based alignment system.

2.3 光軸のフィードバック制御

光軸の入射調整は、始点 QPD に対する平行移動と終点 QPD に対する入射角度の調整により行う。光学系最終段に位置する平行平板(OPB, AR コート付, 厚さ 20mm , 直径 150mm)の屈折を利用し平板を水平(x)又は垂直(y)軸の回りに回転させれば光軸の平行移動(角度は変化しない)が可能になる。この原理に基づき平行平板を手動で回転させて光軸を調整する。一方、球面平凸レンズの屈折を利用し光学系最終段に位置する $f5000$ レンズ(BK7, BMAR コート付, 直

径 100mm)を x 又は y 軸方向に平行移動させれば光軸の入射角度の調整(平行移動はしない)が可能になる. この原理に基づき終端 QPD の中心に光軸を合わせる. 光軸の角度調整は計算機によるフィードバック(FB)制御が可能である. 光軸調整は、始点及び終点 QPD に対し何度かこの操作を繰り返すことで行われる.

図 3 にレーザー光軸の入射角度を安定化させるための FB 制御機構を示す.

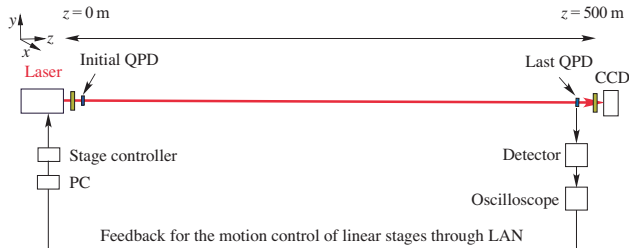


Figure 3: Feedback control system for stabilizing the laser pointing at the last QPD.

終点 QPD から出力する 4 つの光電流信号は検出器に入力される. 検出器は抵抗(10k Ω)を通して電流を電圧に変換しアナログ演算回路に入力する. 4 信号のアナログ演算により QPD 中心からの光軸の変位に比例した水平又は垂直信号が電圧として出力される[4]. 出力をデジタルオシロスコープに入力し電圧値を光軸データとして FB 制御用の PC で取得できるようにしている. 測定ノイズを低減させるためにオシロ上で平均操作(100 回)を行い、あらかじめ測定した感度係数を乗じて終点 QPD 中心に対する光軸の x 又は y 位置が演算される. オシロ上の光軸データは、LAN を通じて FB 制御用 PC に 3 秒毎に送信される. PC 上では $f5000$ 用ステージの移動量が計算され RS-232C 通信を通してコントローラーがステージを制御する. 一連の計測とステージの移動は FB により終点 QPD 中心に光軸が常に一致するように自動で制御される. 制御パラメータは、一回当たりのステージ移動量と光軸位置の測定回数である. これらは FB 制御が安定に動作するように実験的に調整された. このように光軸の自動制御機構を導入したことで光軸の入射角度がようやく安定化された.

ここで $f5000$ 用ステージについて触れておく. 光軸の入射角度安定性は少なくとも $0.2\mu\text{rad}$ 以下が要求される. これを実現するには、さらに 1 桁小さな分解能でステージを制御する必要がある. すなわちステージには 20nrad 程度の分解能が要求される. 開発当初は S 社の piezo ステージを採用した. このステージは piezo 素子により直接的に駆動される. しかし、piezo 素子の駆動分解能は充分であった ($100\text{nm}/\text{step}$) が、まるで豆腐のように不安定な振らつきが見られステージ自体を安定化させることができなかった. そこで採用したのが Newport 社のピコモーター付ステージ(M-562-XYZ[5])である. これはパルスモーターでドライブシャフトを回転駆動させる機械的なステージである. シャフトを piezo 素子で擦るようにして回転させる. 従って駆動していない時の安定度は、機械的要因で決まるのでしっかり

と固定している限り低下することはない. piezo 素子の駆動分解能は $30\text{nm}/\text{step}$ である. ただし欠点は、摩擦力でシャフトを回転させるため駆動毎にしばしば数ステップ程度の滑りがあることである. しかしこの程度であれば実用上の問題はない. このステージを用いて $f5000$ レンズを平行移動させて光軸の入射角度(ステップ数)に対する 500m 終点での位置感度係数を計測した. その結果、 $x(y)$ 方向の位置感度係数は $0.9 (0.37)\mu\text{m}/\text{step}$ であった. これは角度感度係数に焼き直すと $1.8 (0.73) \text{ nrad}/\text{step}$ に相当する(図 4). 得られた感度係数は、光軸を充分小さなステップで制御可能なことを意味する. これでようやく準備が整ったのである.

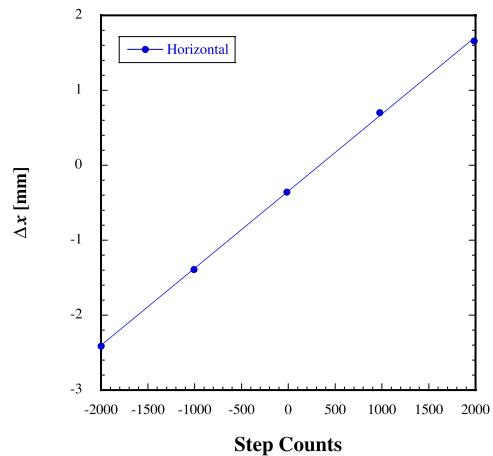


Figure 4: Horizontal position sensitivity of the laser axis at the last QPD as a function of step counts of the $f5000$ linear stage.

3. レーザー光軸安定化実験

3.1 レーザーの伝送特性

光軸方向のレーザー径の変化は、QPD の感度を決める重要なパラメータである. 感度を上げるにはできるだけ小さなレーザー径で QPD に照射するのが望ましい. しかし、光学系出口で入射レーザー径を決めればガウスレーザー光学に従い伝送途中のレーザー径の変化はウエスト点位置を除いて決まってしまうのである. ウエスト点位置は、光学系全体の焦点距離を調整すれば決まる.

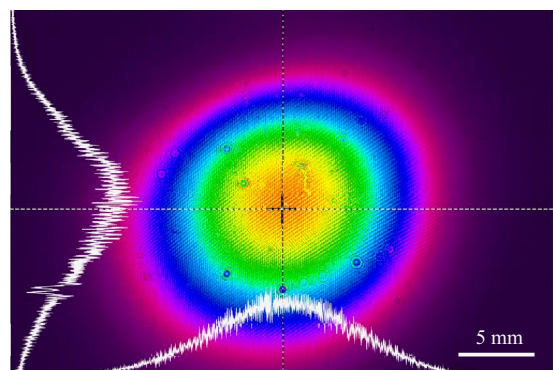


Figure 5: Intensity profile of the laser beam at $z=500\text{m}$. A scale bar is 5mm.

QPD の感度をできるだけ一様にするために光軸に沿うレーザー径の変化はウエスト点を中心として対称的にするのが望ましい。f5000 レンズを光軸方向に平行移動させながら、CCD カメラで終点 QPD 位置でのレーザー形状を取得し画像処理を施すことでレーザー径を計測した。この調整により x、y 方向の直径はそれぞれ $W_x \approx 21.2\text{mm}$ 、 $W_y \approx 17.8\text{mm}$ となった。得られたレーザー形状を図 5 に示す。光学系出口のレーザー形状は真円に近いが、終端 QPD のそれはやや楕円形状である。これはミラーやレンズの曲率の不均一が原因であろう。しかしレーザーコアはガウス形状に近く強度重心の測定には問題ない程度である。

伝送途中のレーザー形状を直接的に観測することは困難であるが、感度校正用の可動 QPD (光軸に垂直な平面上で機械的に可動) がセクター毎に挿入されている。これを利用すれば QPD の感度測定からレーザー径を推定できる。測定された光軸方向に沿うレーザー径の変化を図 6 に示す。

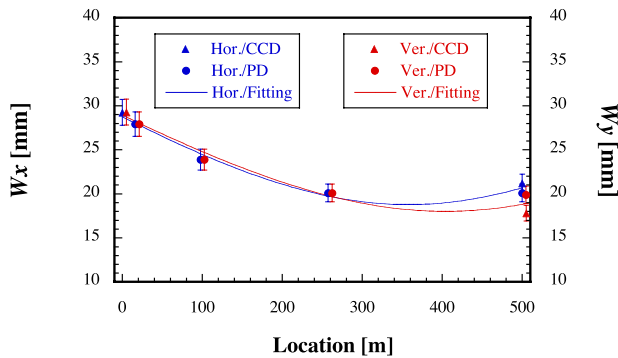


Figure 6: Variations in the x and y beam widths along the linac.

入出力端のデータ (三角印) は CCD による直接測定を示し、伝送途中のデータ (丸印) は QPD の感度測定の結果に基づく。ガウスレーザーの伝送光学によると以下に示す関係式で光軸 (z 軸) に沿うレーザー径の変化を記述することができる。

$$W_x(z) = W_{x0} \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_{r0}}{z_{Rx}} \right)^2}$$

ここで $W_x(z)$ は軸方向に沿う x 方向のビーム径を、 W_{x0} はウエスト点 ($z=z_{r0}$) におけるビーム径を、 z_{Rx} はレーリー長を示す。y 方向のビーム径も同様に記述できる。最小自乗法からこれらのパラメータを解析したところ、x(y) 方向のレーリー長は $z_{Rx}=308\text{m}$ ($z_{Ry}=321\text{m}$) となり、ウエスト点 $z_{r0}=358\text{m}$ ($z_{r0}=399\text{m}$) におけるレーザー径は $W_x \approx 18.8\text{mm}$ ($W_y \approx 18.0\text{mm}$) であった。得られた結果は調整不足のため対称的とは言いがたいが、結果として終点 QPD でのビーム径が小さくなり実用上は問題ない。

3.2 レーザー光軸の安定性特性

FB 制御のパラメータを最適化した後、始点と終点 QPD 中心に光軸を調整し FB 制御を動作させ光軸安定化の連続試験を行った。図 7 に FB ON (4h)

OFF(9.5h)時の連続試験結果を示す。

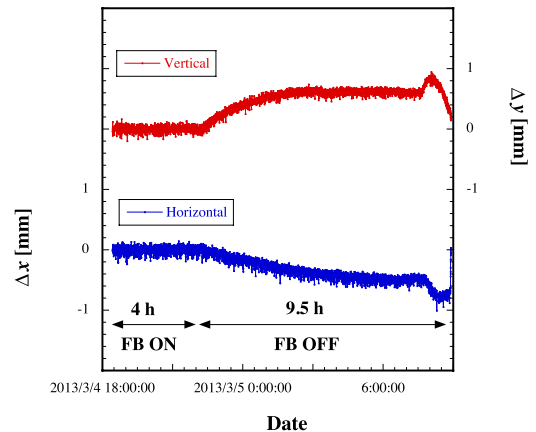


Figure 7: Time traces of the x and y position displacements of the laser beam at the last QPD with the feedback control on and off during 13.5 hours.

この結果から FB 制御の効果が一目で理解できるであろう。ここで注意したいのは、FB 制御はあくまでもゆっくりとした光軸変動の安定化に効果があり、速い変動には追従できないことである。これは FB の速度が光軸データの取得時間で制限されることに起因する (最大速度 0.33Hz)。その証拠に速い変動 (変動線の太さ) は改善されていない。データ取得時にはレーザー強度も同時に取得されるが、強度変動は 5%程度である。この強度変動がレーザーのポインティング安定性を決めており、光軸の速い変動はポインティング安定度に起因すると考えている。

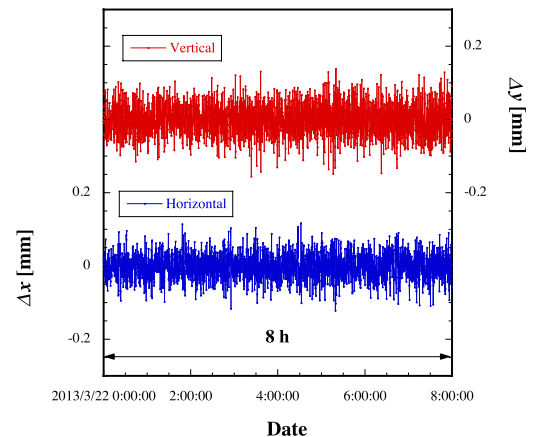


Figure 8: Time traces of the x and y position displacements of the laser beam at the last QPD with the feedback control on during 8 hours.

図 8 に FB ON 時(8h)の連続試験の結果を示す。このデータを分布図に焼き直した結果を図 9 に示す。分布図の幅から光軸の安定性を推定することができる。光軸の x 方向の変動は明らかなガウス分布をしており光軸のポインティング安定性は統計的な要因に基づいていると考えてよい。この測定から x (y) 方向の光軸の位置安定性は、ガウス分布と仮定すると平均位置は測定限界以下の変位である。一方、標準偏差に対し $\sigma_x=33(41)\mu\text{m}$ が得られた。角度安定性に

焼き直すと $\sigma_{\theta_x} = 66(82) \text{ nrad}$ に相当する。得られた安定度は入射器に要求されるアライメント精度を充分満足する。なお、3日間を越えるFB連続制御でも一切の調整なく同様な安定度が得られている。

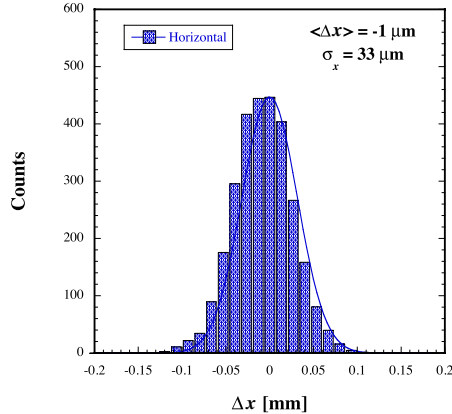


Figure 9: Horizontal position displacement distribution at the last QPD in the pointing stability of the laser beam with the feedback control on.

次に議論しておきたいことはFB動作中のステージの動きである。データ取得時にはステージの動きも同時に取得している。ステージの動きを見ると x (y)方向に概ね $380(830) \mu\text{m/day}$ の割合で特定の方向に変位し続けていることがわかった。さらにステージの y 方向の動きは x 方向に比べ2倍以上の速さで変位している。 x (y)方向のステージの動きは光軸を常に東側(天井側)に変位させているように見える。ステージの動きはFB制御により光軸が終点QPD中心に一致するように安定化させる。光軸の感度測定で符号に従うと光軸の動きはステージの動きと同じ符号で変位する。このことを調べるために約1ヶ月間ステージの動きを連続観測したがその変位は折り返すことはなかった。光学系近傍の環境パラメータも同時に測定したが明らかな相関を見いだせなかった。得られた環境パラメータの測定値は、トンネル温度の変化: $22.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度の変化: $29 \pm 20\%$ 、気圧の変化: $1005 \pm 15 \text{ hPa}$ であった。さらにタリベル傾斜計を用いて光学架台の変動も同時に計測したが傾斜変動は計測限界($1 \mu\text{rad}$)以下であった。このように現時点ではFB制御時に見られるステージの特定方向への動きの原因を特定するには至っていない。

入射器は、クライストロンギャラリーとトンネルが一体となった8つの建屋を7箇所のジョイントで接続した総長500mの建屋の地下トンネルに設置されている。各建屋の膨張収縮はジョイントである程度吸収されるが、吸収されない分は建屋全体の変形となりトンネル床面を動的に変動させることになる。仮に建屋が変形すると、測定基準となるQPD自体が動的に変位することを意味し、光軸も一見安定化しているように見えても実は動的に変動している可能性も考えられる。もしこのことが本当であればアライメントそのものが意味を成さなくなるので大きな問題を提示している。

3.3 レーザーアライメントの誤差評価

レーザーアライメントには、光軸の統計的な安定度の他に幾つかの系統的な誤差を伴う。ここでは想定される誤差要因をまとめた後、期待されるアライメント誤差を評価する。

QPDは、まず専用のホルダーに装着され、そのホルダーが加速ユニットの端面にフランジを介して装着される。テストベンチでのオフライン校正によりホルダー中心に対するQPD中心の一致が検定される(QPD装着誤差) [6]。ホルダーの装着誤差は、はめ合い精度で決まる(ホルダー装着誤差)。これらはQPDの装着に関わる機械的誤差である。さらに測定時のQPDは光軸ラインへ蝶番構造を通して手動で挿入される。挿入時の位置再現性が誤差要因となる(QPD挿入誤差)。光軸の位置測定時には検出器の電気的なオフセットが測定誤差となる(オフセット挿入誤差)。レーザー形状のガウス分布からのずれは光軸の強度重心の誤差要因となる(レーザー形状誤差)。以上が系統誤差となり実測によりこれら全てを検証した。系統誤差の大きさを表1にまとめた。このように系統誤差を考慮してもレーザーアライメントの精度は0.1mmを充分満足する。

Table 1: Expected error sources in the laser-based alignment measurement

種類	要因	誤差 [μm]
系統誤差	QPD 装着誤差	10
	ホルダー装着誤差	30
	QPD 挿入誤差	30
	オフセット誤差	12
	レーザー形状誤差	10
	合計(自乗和平方根)	46
統計誤差	光軸安定性	40

4. まとめ

入射器における高精度レーザーアライメントに向けて新たなレーザー光学系を構築し、さらに計算機制御によるフィードバックを導入することにより500m長の長基線レーザーの安定性を飛躍的に高めることに成功した。得られた光軸の安定度は標準偏差で $\sigma \approx 40 \mu\text{m}$ であった。これは角度安定性に焼き直すと $\sigma_{\theta} \approx 80 \text{ nrad}$ に相当する。本成果は、現在SuperKEKBに向けた入射器高度化に貢献している。

参考文献

- [1] Y.Ohnishi, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A011.
- [2] M.Akemoto, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A002.
- [3] T.Suwada and M.Satoh, Proceedings of the 6th PASJ, JAEA, Aug. 5-7, 2009, pp.79-81.
- [4] T.Suwada, et al., Rev. Sci. Instrum. **81**, 123301 (2010).
- [5] See <http://www.newport.com>.
- [6] K.Hisazumi, et al., Proceedings of the 8th PASJ, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011, pp.771-775.