

高精度レーザーアライメントのための 500 m 長レーザー長基線の高安定化

諏訪田 剛^{*1,2}

High Stabilization of 500-m-Long Laser-Based Fiducial Line for High-Precision Laser-Based Alignment

Tsuyoshi SUWADA ^{*1,2}

Abstract

The development of alignment techniques is particularly essential for long linacs to stabilize the acceleration and transportation of particle beams with higher charge intensities, to preserve the beam quality and to increase the injection efficiency of the beams into storage rings. Alignment measurements with a resolution of ± 0.1 mm cannot be easily performed for long linacs (> 100 m) while conventional optical alignment systems with a high-precision telescope and a laser tracker, etc. are widely used for relatively short linacs (< 100 m). The laser-based alignment technique is an alternative method to accurately locate accelerating devices of the long linac on a straight line, where the laser beam can be used as a long fiducial straight line. Such laser-based alignment technique was implemented at the construction stage of the KEK injector linac in 1982; however, the high stabilization of the long laser-based fiducial line has not been realized even until now. A laser beam with higher stabilization has been implemented as a 500-m-long fiducial straight line for alignment measurements by the injector linac group in March 2013. We experimentally investigated the propagation and stability characteristics of the laser beam passing through laser pipes in vacuum. Pointing stability at the last fiducial point with the transverse displacements of $\pm 40 \mu\text{m}$ level in one standard deviation by applying a feedback control was successfully obtained. This pointing stability corresponds to an angle of $\pm 0.08 \mu\text{rad}$. This system is now fully exhibiting the successful results for the high-precision alignment of the injector linac currently in progress.

1. はじめに

現在 KEKB 入射器では、次期計画 SuperKEKB¹⁾ に向けた入射器増強と高度化が進行中である^{1,2)}。この中で高精度アライメントは高度化に向けた最重要項目の1つである。先の東日本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いる。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復旧作業と同時に SuperKEKB に向けた入射器増強が本格的に開始されアライメントが佳境に入った。

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継続してきた。この結果、最大直線部のアライメン

トに必要な 500 m 長レーザー長基線の安定化に成功した。本成果により高精度アライメントのための道具立てがようやく準備されたことになる。本成果は、高精度アライメント用のレーザー長基線としては世界でも最長クラスである。

アライメントの光軸となる長基線には He-Ne レーザー（10 mW）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、さらに計数機制御によるフィードバックを導入することで光軸の入射角度に対する安定性を飛躍的に高めることに成功した。この結果、500 m 長直線部の終端における光軸の位置安定性は $40 \mu\text{m}$ (1σ) レベルとなり入射器アライメントに要求される精度を満足することを検証した。本成果は、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。

*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp)

*2 総合研究大学院大学 The Graduate University for Advanced Studies School of High Energy Accelerator Science

2. 入射器におけるレーザーアライメント

2.1 入射器増強の概要

SuperKEKB ではリング衝突点において鉛直方向にナノメートルサイズ ($\sigma_y \sim 60 \text{ nm}$) までビームを絞り電子と陽電子を衝突させるナノビーム衝突機構が採用された¹⁾。これは極めて野心的な機構で KEKB に比べ衝突ルミノシティを 40 倍にも向上させることを目標とする。このことでビーム寿命 ($\sim 10 \text{ min}$) の大幅な低下が避けられなくなり入射ビームの大電流化と高輝度化が要求された。表 1 に SuperKEKB における電子及び陽電子入射に要求されるビームパラメータの仕様をまとめる。

入射器では、入射ビームの要求仕様を満たすために次の三つが最重要項目として現在開発が進行中である。(1) 電子に対し従来の熱電子銃からレーザー RF 電子銃に変更し大電流と低エミッタンス化を同時に行う、(2) 陽電子に対し陽電子源の収束磁場を強化し、かつダンピングリング (DR)

を新設することにより高輝度化を図る、(3) 500 m 長直線部の高精度アライメントである。達成目標は KEKB の仕様に対し電流量で 4～5 倍、エミッタンスで 15～200 分の 1 である。SuperKEKB では、入射ビームの長距離にわたる安定した加速・輸送を行うにはウェーク場の適切な抑制と高度なビーム制御が必要となる。高精度アライメントは、入射ビームに対する高度なビーム制御を行う上で欠かせない技術である。詳細なシミュレーション計算によると要求されるアライメント精度は $100 \mu\text{m}$ (1σ) である。

2.2 アライメントの概要

入射器は、180 度偏向部 (エネルギー 1.7 GeV) を挟んで 2 本の直線部 (125 m 長 AB ライン及び 475 m 長 C5 ライン) からなる総長 600 m の電子陽電子線形加速器²⁾である (図 1)。各直線部の最上流にはレーザー光源を置き、独立してアライメントを行うことができる。

入射器は 8 つのセクター (76.8 m 長) から構成され、各セクターは基本的に 8 台の加速ユニット (9.6 m 長) から構成される。加速ユニットには、耐震構造を有する 8.44 m 長の円筒型架台 (外径 508 mm, 肉厚 7.9 mm, 鉄/SGP500A, SS400 相当品) が設置される (図 2)。架台上には 4 本の 2 m 長 S バンド加速管が搭載される。架台内面上部にはレーザー光軸管 (外径 114.3 mm, 肉厚 3 mm, ステンレス鋼/SUS304TP 60A-10S) が平行して挿入され溶接により固定される。架台と光軸管は二重同軸構造を形成し、環境の変化に対する光軸管の軸方向の温度変化が緩和されるようにしている。レーザー光の反射や散乱を抑制す

表 1 SuperKEKB における入射ビームの諸元表¹⁾

ビームパラメータ	要求仕様	
	電子	陽電子
エネルギー [GeV]	7	4
バンチ電荷 [nC]	5	4/10*
加速バンチ数	2	2
エミッタンス ($\gamma\epsilon$) [μm]	20	10
エネルギー広がり [%]	0.08	0.07
バンチ長 [mm]	1.3	0.5#

* 陽電子生成用 1 次電子ビームの電荷量

DR 出射後にバンチ圧縮をする場合

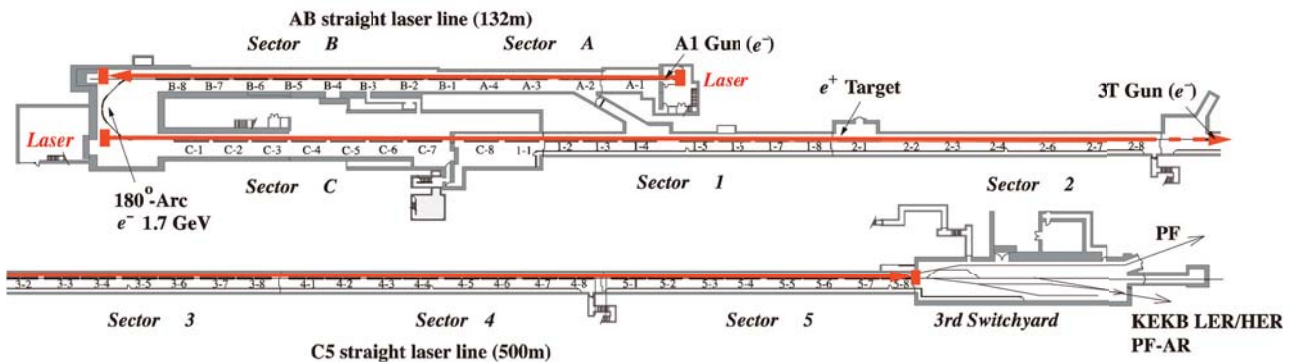


図 1 KEK 入射器のビームライン全体配置図とアライメント用レーザーの輸送路 (赤線)

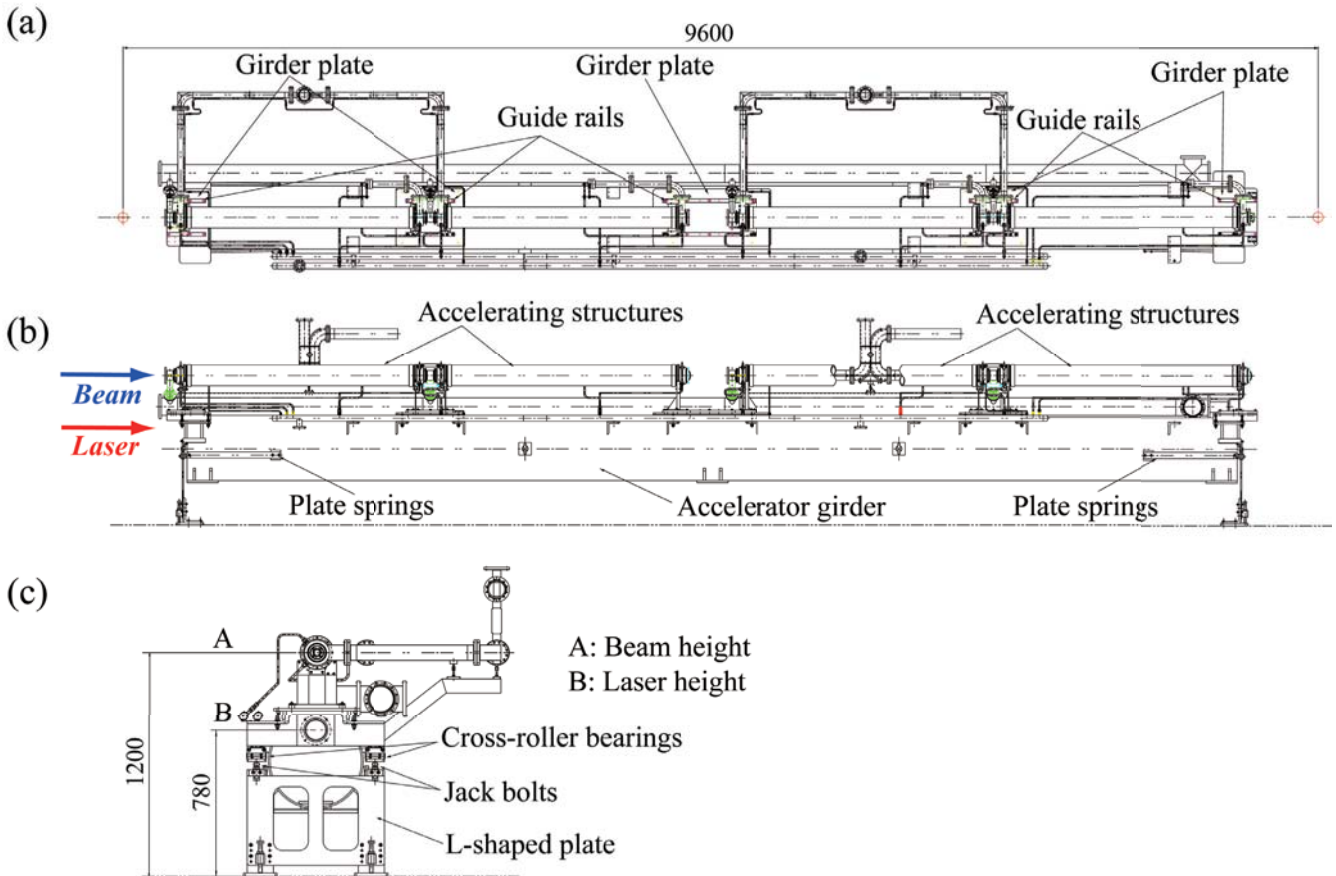


図2 加速ユニットの機械図面. a: 上面図, b: 側面図, c: 正面図.

るために光軸管の内面には黒色塗装を施している。

隣り合う架台間は同一径の単管がフランジ接続され、光軸管の始点及び終点には真空窓としてそれぞれ 20 mm 及び 15 mm 厚の合成石英を装着している。500 m 長に及ぶ光軸管全体は、2 台の 1000 l/min スクロールポンプ (AB ラインは 1 台) で真空が保持される。到達真空度は、引き始めから約 18 (8) 時間を経て C5 (AB) ラインでは 4 (3) Pa 程度である。光軸管の真空保持は光軸の安定化には必須である。

長さの異なる変則的な架台を含み計 48 台の加速ユニットが直線上に並び C5 ライン直線部を構成する。一方、AB ライン直線部には計 12 台の加速ユニットが直線上に並ぶ。

光軸測定用の四分割型シリコンフォトダイオード (QPD: Quadrant silicon Photo-Diode, 直径 10 mm) が中心に装着された QPD ホルダーがフランジを介して加速ユニットの両端に接続される

(図3)。ホルダーと架台との接続は隙間嵌めとし、嵌め合い公差は $\phi 130 (-0.043/-0.068)$ mm である。レーザー光の反射や散乱を抑制するために光軸管のみならずホルダー内面にも黒色塗装を施している。

入射器のレーザーアライメントシステムは 30 年以上も前の建設時に整備されたものである。本研究では、レーザー光学系の新たな導入を省き、放射線損傷した QPD の交換や光軸管の真空リークの修復を経てほぼそのまま再利用している。結果として全体の約 1/3 (70 台) に相当する QPD センサーの交換を余儀なくされた。交換時のホルダー中心に対する QPD の取り付け精度はアライメントの誤差要因となるが、本研究を通して高精度な取り付け手法を新たに開発した³⁾。

レーザーアライメントでは、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計測することで加速ユニットの光軸に対する変位を測定する。この原理に基づき光軸からの



図3 光軸測定用の四分分割型シリコンフォトダイオード。QPDはサブホルダーの中心に装着される。右手に見えるレバー(蝶番)を手動で回転させるとサブホルダーが回転しQPDが直立(又は倒立)する。ホルダー内径: ϕ 130 mm.

変位量がゼロとなるように加速ユニットの変位を機械的に調整する⁴⁾。

一方、加速ユニット上の加速管に対し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。この計測には、ターゲット用の基準座が必要となる。これには専用のQPD基準位置取り出しジグを用いて、QPDを利用して基準位置を移すことで基準座の位置が高精度に決まるようにしている。ジグはQPDホルダーに隣接して嵌め合い構造によりフランジ接続され、加速ユニットに対し直角横方向にアーム状(400 mm長)に張り出している。基準座をこのジグの先端部に設けている。トラッカーによる計測では、加速ユニットの両端に取り付けたジグ先端の基準座にターゲットを置き、ターゲット間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。基準座の加工精度は、三次元形状測定により $\pm 20 \mu\text{m}$ (1σ)レベルであることが検証されている。

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。加速ユニット間には四重極電磁石(Q電磁石)が搭載された専用架台が設置される。専用架台の変位は長距離アライメントで調整され、Q電磁石の変位は短距離アライメントで微調整される。

これまで余り注意が払われてこなかった光軸の

安定化は、レーザーアライメントにおいては極めて重要である。単純に500 m長にわたるアライメント精度を $100 \mu\text{m}$ とすると光軸の角度安定性は $0.2 \mu\text{rad}$ が必要である。このような微小角度の変化は高精度傾斜計でも測定は困難である。開発当初、500 m長の光軸安定化の困難さは想像もできなかった。このように、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。

2.3 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、レーザー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加速器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る。本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⁴⁾。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の構築まで気が回らなかったからである。簡便に光軸が調整できる光学系の構築とその安定化の実現の困難さがわかったのはかなり後のことである。

このような経緯のもとに独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)のレーザー計測の専門家に共同研究を依頼し、議論の末によう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)基本モードの断面形状が最もガウス分布に近い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)光学架台上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。

(1)に関し、当初はレーザーダイオード(波長660 nm)を光ファイバーに結合させクライストロンギャラリーから加速器トンネル内へ誘導する方式を試作した⁴⁾。ファイバーから出射したレーザーを球面ミラーと平面ミラーを組み合わせた反射光学系を $340 \times 162 \text{ mm}^2$ の大きさの架台上に搭載し光軸管への入射を試みた。約80 m長のセクターCでテストした結果、レーザー径の縦横比が想定以上に大きいこと、さらに光軸管を真空

にしてもレーザー光軸の十分な安定度が得られないことがわかった。これは、ファイバーの切断面が一様ではなかったこと、架台が小さく軽量すぎて堅牢ではなかったことなどが起因している。さらに、He-Ne レーザーをファイバーに結合させることも検討したが、ファイバーに対する安定かつ高い入射効率を維持することがレーザー管の熱変形により困難であろうとの結論に至った。

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 4) である。

He-Ne 管とその光学系を市販の光学定盤 (1500 × 900 × 112^t mm³) 上に並べ大気雰囲気中でトンネル床面にこれを設置した。温度や気圧などの環境要因の変化に起因する空気の流れの擾乱を極力抑制す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 × 500 × 1750^t mm³) は、トンネル床面とは 100 mm の間隙をあけて縁切りされ、地中には 1 本の PHC 杭 (深さ 5 m, 外径 450 mm) を打ち込んでいる。これは、日較差による建屋変形に起因する床面変動の影響を直接受けないようにするためである。この架台床面に 20 mm 厚の鉄板を打ち込み剛性の高い鉄架台を固定し、この上に光学定盤を固定した。このように架台全体を堅牢にしたことで光軸を初めて安定化させることができたのである。

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組み合わせ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できるようにしている。このことで二種類の異なる径をもつレ

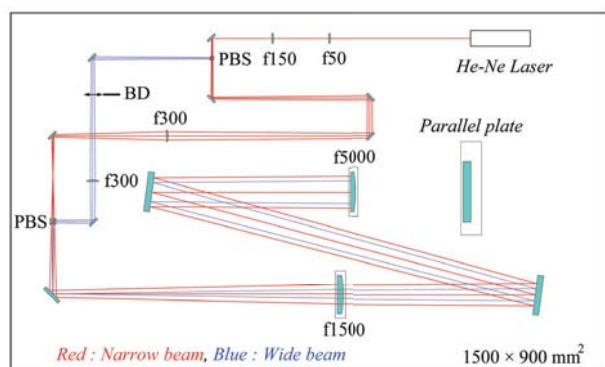


図 4 光学架台上に配置されたレーザー光源と光学システム. PBS: 偏光ビームスプリッター, BD: ビームダンパー.

ザーを個別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) であり、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。後者は開発途上なので本システムでは用いないが、後章で少し触れることにする。He-Ne 管の出射口から 100 mm 後のレーザー径は $W_x \approx W_y \approx 0.83$ mm (4 σ で幅を定義) であり、発散角度は $\theta_x \approx \theta_y \approx 0.7$ mrad である。5 枚の球面平凸レンズ (焦点距離: f=50, 150, 300, 1500, 5000 mm) によりレーザー径は徐々に拡大され光学系終端のレーザー径は $W_x \approx W_y \approx 29$ mm (図 8 a) である。この結果、管から終端までの伝送距離は ~ 5.5 m となった。このような比較的長い伝送距離でレーザー径を徐々に拡大させれば、局所的に生じる空気の流れの擾乱や光学レンズの振動といった外乱に対するレーザー径の安定性をより高めることができる。入射レーザーの焦点距離は、f5000 レンズを光軸方向に動かすことで調整することができる。

光学系で生成されたレーザーは、真空中に引かれた光軸管に入射しレーザー長基線として 500 m 長の光軸を形成する (図 5)。光学系直後と入射器終端には光軸の基準点を決める QPD が床面に固定されている。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 ($z=6.3$ m) と呼び、入射器終端の QPD を終点 QPD ($z=500$ m) と呼ぶ。このように長基線を光軸として調整すれば加速ユニットの変位を機械的に調整することができる。

2.4 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 (反射防止膜付, 厚さ 20 mm, 直径 150 mm) の屈折を利用して平板を水平 (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)

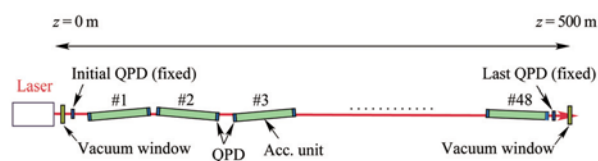


図 5 レーザーアライメントの概念図。アライメント前の加速ユニットの配置と形成されたレーザー光軸。

が可能となる。この原理に基づき光軸が始点 QPD の中心に一致するように平行平板を手動で回転させる。一方、球面平凸レンズの屈折を利用して光学系最終段に位置する f5000 レンズ (BK7, 反射防止膜付, 直径 100 mm) 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) が可能となる。この原理に基づき光軸を終点 QPD の中心に合わせる。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。

堅牢な光学系を構築した後、光軸の安定性を測定したところ、(1) レーザーのポインティング不安定性に起因すると考えられる速い変動 (秒のオーダー)、(2) 不規則な変動、(3) 30 分毎の変動、(4) 日較差を要因とする変動、そして、(5) これらより遥かに長い時間の変動が見られた。当初は (1) の変動を危惧したが、幸いにもこの変動は大きくないことがわかった。(2) は環境要因のわずかな変動に伴う空気の流れの擾乱が起因していると考えられる。(3) は空調のオンオフ制御によることがわかり停止したところ消失した。(5) に関しては原因を特定できていない (3.4 節で述べる)。ここに至り初めて計算機による FB 制御の導入を検討せざるを得なくなったのである。検討の結果、(1) の変動要因を省けば光軸の変動はゆっくりしており単純な計算機 FB 制御で安定化が充分可能であることがわかった。

図 6 にレーザー光軸の入射角度を安定化させるための FB 制御システムを示す。

終点 QPD から出力する 4 つの光電流信号は検出器の信号処理回路に入力される。信号処理回路では抵抗 (10 k Ω) により電流信号が電圧信号に

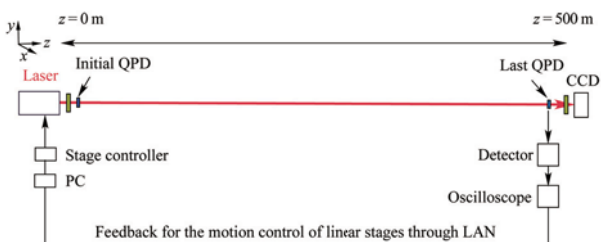


図 6 レーザー光軸の入射角度を安定化させるためのフィードバック制御システム。

変換されアナログ演算回路に入力される。4 信号のアナログ演算により光軸の QPD 中心に対する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⁾。出力信号はデジタルオシロスコープに入力され電圧値が計測される。測定ノイズを低減させるためにオシロスコープ上で平均操作 (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。オシロスコープ上の光軸データは、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 レンズ用ステージの移動量が計算され RS-232C を通じてコントローラが制御されステージが移動する。一連の計測とステージの移動量は FB 制御により終点 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、一回に進む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。光軸の自動制御機構を導入したことで光軸がようやく安定化された。

ここで f5000 レンズ用ステージについて触れておく。光軸の入射角度を安定化するには少なくとも 0.2 μ rad 以下の安定度が必要となる。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微細に制御する必要がある。すなわちステージには少なくとも 20 nrad 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。piezo 素子の駆動分解能 (100 nm/step) は充分であったが、動作中は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。そこで最終的に採用したのが Newport 社のピコモーター付ステージ (M-562-XYZ⁵⁾) である。このピコモーターは、シャフトを piezo 素子で擦るようにして回転させる。従って駆動停止時の安定度はピコモーターの機械的構造で決まり、しっかりとステージ位置を保持するので安定性が低下することはない。piezo 素子の駆動分解能は 30 nm/step で充分である。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。この程度であれば実用上の問題はない。このステージの上に f5000 レンズを搭載し、 x 又は y 軸方向に平行移動させ

ることで光軸の入射角度に対する終点 QPD での位置感度係数を計測した。図 7 a, b に x , y 方向の位置感度係数の測定結果をそれぞれ示す。 x (y) 軸方向の位置感度係数は 0.9 (0.37) $\mu\text{m}/\text{step}$ である。これは角度感度係数に焼き直すと 1.8 (0.73) nrad/step に相当する。この結果は、要求される光軸の角度安定度 0.2 μrad に対し入射角度が x (y) 軸方向に約 110 (270) 倍の分解能で制御可能なことを示す。

本光学システムは、 x , y 軸方向に対称な屈折光学系を構成するので、位置感度係数も対称になるべきである。しかしながら、測定結果によると約 2.5 倍の違いが生じた。これは、屈折光学系を構成する球面平凸レンズ群のアライメントや各レンズの曲率半径の不均一性等がその要因として想定

されるが、明らかな要因の特定には至っていない。

しかし、得られた感度係数は、要求される光軸安定度を充分小さなステップで制御可能なことを意味している。これでようやく準備が整った。

3. レーザー光軸の安定化

3.1 光軸の伝送特性

光軸方向のレーザー径の変化は、光軸の変位に対する QPD の感度を決定する重要なパラメータである。QPD の感度を向上させるにはできるだけ小さなレーザー径で照射するのが望ましい。しかし、ガウスレーザー光学に従うと光学系出口で入射径を決めれば伝送途中のレーザー径の変化はウエスト点を除いて物理的に決まってしまう。ウエスト点は、光学系の焦点距離を調整すれば決まる。

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、終点 QPD におけるレーザー形状を CCD カメラで取得し画像処理を施すことでレーザー径を計測した。この調整により終点 QPD における x , y 方向のレーザー径はそれぞれ $W_x \approx 21.2 \text{ mm}$, $W_y \approx 17.8 \text{ mm}$ であった。得られたレーザー形状を図 8b に示す。

光学系出口のレーザー形状は真円に近いが (図 8a), 終点 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性が原因であろうと思われる。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する) 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⁴⁾。測定された軸方向に沿うレーザー径の変化を図 9 に示す。

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⁶⁾。

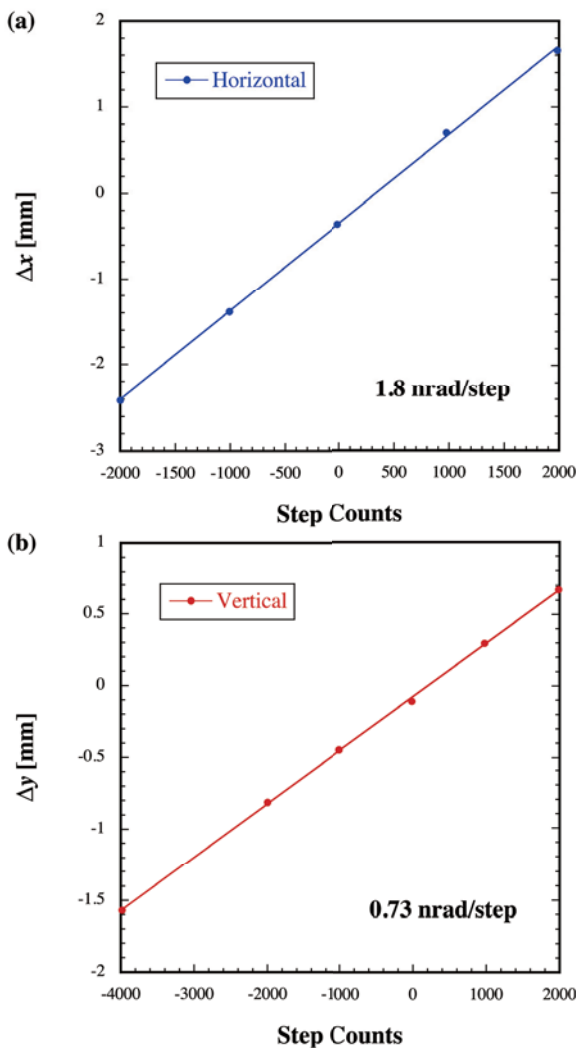


図 7 レーザー光軸の終点 QPD における a: 水平感度係数と b: 垂直感度係数の測定結果。

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

ここで $W_x(z)$ は軸方向に沿う x 方向のビーム径, W_{x0} はウエスト点 ($z = z_{x0}$) におけるビーム径, z_{Rx} はレーリー長をそれぞれ示す. 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

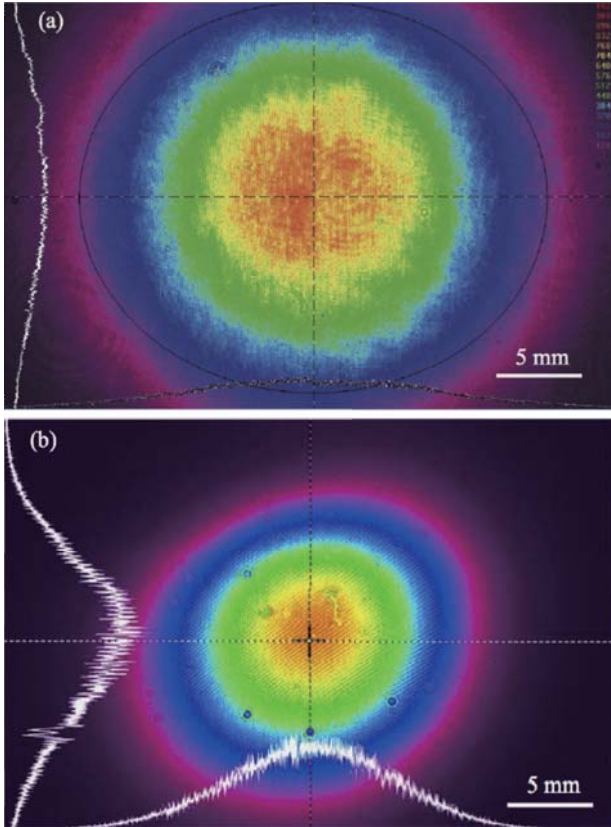


図8 CCDカメラで取得したレーザーの強度分布. a: $z = 0$ m (光学系出口), b: $z = 500$ m (終点 QPD). スケールバーは 5 mm.

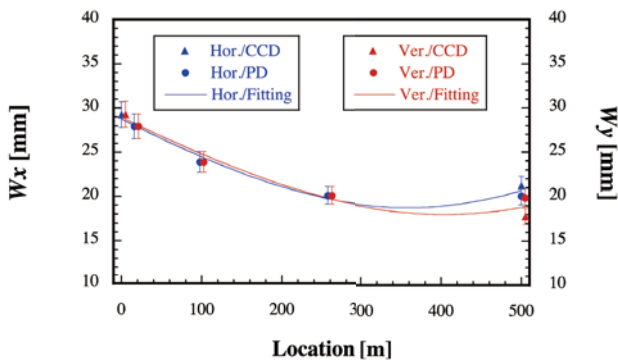


図9 光軸に沿った水平・垂直方向のレーザー径の変化. 水平・垂直データ点はお互いの重なりを避けるために軸方向に少しずつずらしてプロットしている.

パラメータを解析したところ, x (y) 方向のレーリー長は $z_{Rx}=308$ m ($z_{Ry}=321$ m) となり, ウェスト点 $z_{x0}=358$ m ($z_{y0}=399$ m) におけるレーザー径は $W_x \approx 18.8$ mm ($W_y \approx 18.0$ mm) であった. 得られた結果は調整不足のため対称的とはいえないが実用上の問題はない.

3.2 光軸の安定性特性

FBの制御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 を動作させて光軸安定化の連続試験を行った. 図10に FB ON/OFF 時の連続試験の結果を示す.

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ていないことである. これは FB 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 (3 秒毎). その証拠に FB 制御の ON/OFF に関わらず速い変動 (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, 光軸の速い変動はこのことによると考えている.

図11に FB-ON 時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12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. 光軸の変動はほぼガウス分布をしているので光軸のポインティング安定性は統計的な

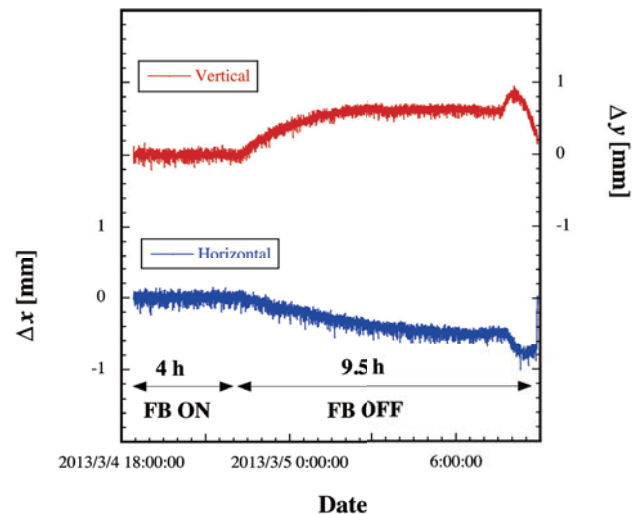


図10 終点 QPD における x, y 軸方向の光軸変位の時間変化. 前半は FB-ON (4 時間), 後半は FB-OFF (9.5 時間).

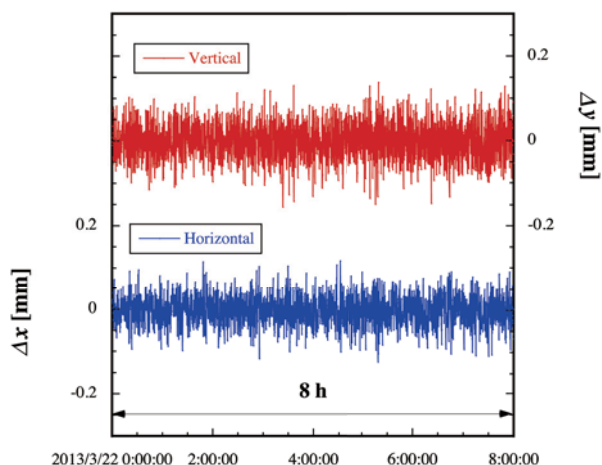


図 11 FB-ON 時の終点 QPD における x, y 軸方向の光軸変位の時間変化 (8 時間).

要因に基づくと考えてよい. この測定から x (y) 方向の光軸の位置安定性は, ガウス分布と仮定して平均位置は測定限界以下の変位である. 一方, 標準偏差による x (y) 方向の変位に対し $\sigma_x=33 \mu\text{m}$ ($\sigma_y=41 \mu\text{m}$) が得られた. 角度安定性に焼き直すと $\sigma_{\theta_x}=66 \text{ nrad}$ ($\sigma_{\theta_y}=82 \text{ nrad}$) 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している. なお, 3 日間を越える FB 制御の連続試験でも一切の調整なく同様な光軸の安定度が達成された.

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, 光軸安定度を定める統計誤差の他に幾つかの系統誤差を伴う. ここでは想定される誤差要因をまとめ, レーザーアライメントに伴う誤差を評価する.

光軸の変位を測定する QPD の設置位置は系統的な誤差要因となる. 専用のサブホルダー中心に装着された QPD は, そのホルダーが加速ユニット端面にフランジを介して装着される. テストベンチ校正において QPD は, サブホルダー中心に QPD 中心が一致するように装着される (QPD 装着誤差)³⁾. 加速ユニットに対する QPD ホルダーの装着は, 嵌め合い公差で決まる (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を通して手で挿入される. 挿入時の直立位置の再現性 (QPD 挿入誤差) が機械的な誤差要因となる.

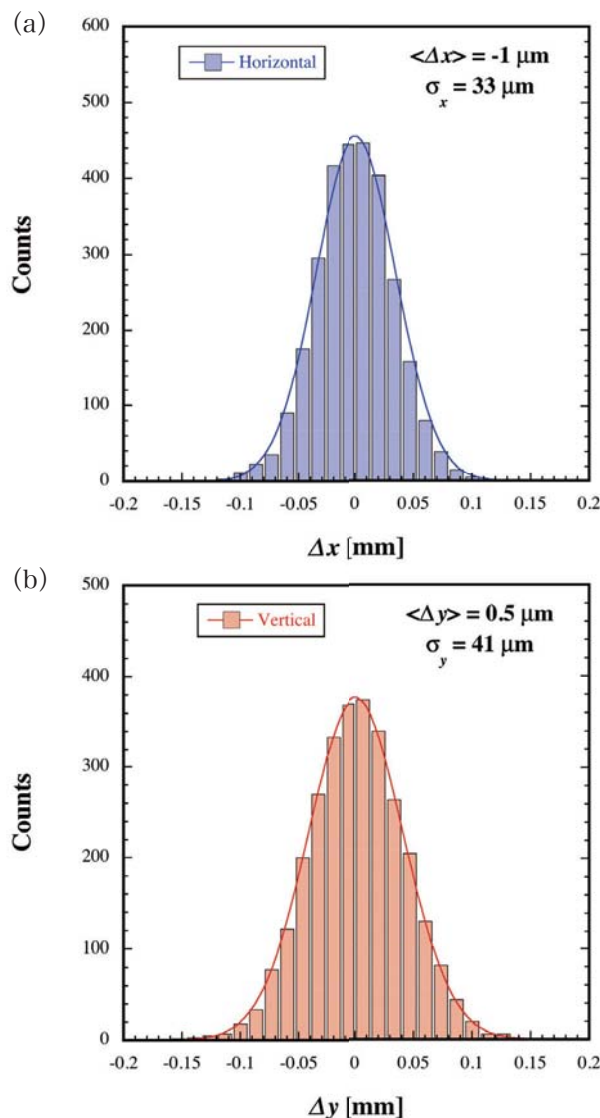


図 12 FB-ON 時の終点 QPD における a : x 軸及び b : y 軸方向の光軸の変位分布.

加速ユニットの変位測定時は QPD 検出器の電氣的オフセットが誤差要因となる (オフセット誤差). さらに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測定誤差となる (レーザー形状誤差). 以上がレーザーアライメントに関わる系統的な誤差要因である.

ここで QPD 検出器について少し触れておく. アライメント時は, AB 及び C5 ラインに各 4 台の検出器が使用される. 各ラインの始点 (光軸監視用) と終点 (光軸 FB 用) に各 1 台を置き, 加速ユニットのアライメント計測用に 2 台を使用する. 各ラインの同時作業を想定して全 8 台の検出器を保有している.

QPDの4つの光電流は信号処理回路の抵抗(10 kΩ)により電圧に変換され、後段のアナログ演算回路で水平及び垂直信号が出力される⁴⁾。4つの抵抗値のばらつきは、水平及び垂直信号の電氣的オフセットとして誤差要因となる。この抵抗には通常の金属皮膜抵抗(精度1%, 温度係数50 ppm)を用いている。しかし、これでは精度不足なので抵抗値を揃えるために約千個の中から選別を行い、抵抗値が±0.02%以下の精度で一致するように厳密に選別した。このようにして全8台のQPD検出器が改修されたのである。

レーザーアライメントに関する誤差要因は系統的な誤差要因を含め全て実測により検証された。本論文で議論した光軸安定性を統計誤差とし、実測した系統的な誤差要因とその大きさを表2にまとめる。

系統誤差を自乗和平方根により合計すると46 μmとなる。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要求精度を充分満足することを検証した。

検証されたレーザーアライメントの精度は要求精度に対し少し余裕をもたせている。この余裕がレーザートラッカーによる短距離アライメントに与えられる許容誤差となる。短距離アライメントの誤差要因をここで述べることはしないが、アライメント全体の誤差は、短距離アライメントの誤差要因を考慮しても要求精度を満足することを検証している。

3.4 FB動作中のステージの動き

ここで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f5000レンズ用ステージの動きも同時に取得している。図13に2013年3月4日から29日までのFB動作時に取得されたステージの位置変化を示す。途

表2 レーザーアライメントにおける誤差要因の評価

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

中で何度かステージのオフセット調整をしているが、ステージの動きを見るとx(y)方向に概ね380(830) μm/dayの割合で特定の方向に変位し続けていることがわかる。

x(y)方向のステージの動きは光軸の進行方向に対し常に東側(天井側)を向いている。当然のことながら、FB動作中の光軸は終点QPD中心に常に一致するように安定化されている。光軸の感度測定に符号に従うと光軸の動きもステージと同じ符号で変位していることを意味する。ステージの変位に感度係数を乗じると終点QPDにおける光軸変位の補正量に焼きなおすことができる。その変位の速さはx(y)方向に概ね11(10) mm/dayに対応するが、この補正量は非常に大きい。

このことを確認するために3月16日から3月17日にかけて再度光軸を調整した後、同様にFBを動作させて連続測定したがステージの変位は折り返すことなく同様な変位の速さで推移した。このとき、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。この間に取得した環境パラメータの測定値は、トンネル温度の変化: 22.5 ± 0.5°C, 湿度の変化: 29 ± 20%, 気圧の変化: 1005 ± 15 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 μrad)程度であった。

He-Ne管の熱変形に伴う光軸の入射角度の変動も疑われ、管自体を90度又は180度回転させ

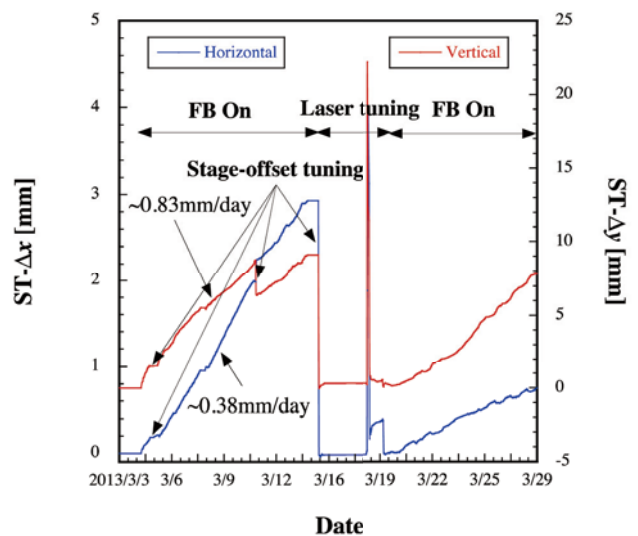


図13 2013年3月4日から29日までのFB動作時に取得されたステージのx及びy方向の位置変化。

て光軸変動を連続測定した。もし管の熱変形が原因であれば、光軸変動の向きが入れ替わるはずである。しかし、この測定にも関わらず明らかな相関を見いだせなかった。この現象が2.4節で述べた光軸の長時間変動のことである。残念ながら現時点ではこの現象の要因を特定するには至っていない。

クライストロンギャラリーと加速器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、入射器本体は設置されている。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变形となりトンネル床面を動的に変動させることになる。仮に各建屋が独立に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になる。このことにより、FB制御により一見安定化された光軸が実は動的に変動している可能性が考えられる。もしこのことが本当であればアライメント自体が意味を成さなくなる可能性があり大きな問題を投げかけている。QPDの駆動を全自動化し光軸の連続測定を行えばこの問題に対するヒントが得られると思われるが今後の課題としたい。

4. 今後の課題

本研究により500m長レーザー長基線の高安定化が実現され入射器の高精度アライメントの準備が整った。システム全体の開発に携わることでわかったことであるが、本システムは入射器の初期アライメントとしては有効であるが恒久的には余り優れたシステムとは言い難い。これは、ビームラインのすぐ側に多数のQPDが設置されるので、放射線損傷が大きければ四分割された各素子のゲインにばらつきが生じ測定精度を低減させてしまう恐れがある。これには、QPDゲインを常にオンラインで監視すればよいが総計200ヶ近くの監視システムの構築は予算的にも容易なことではない。さらにQPD自体が透明ではないので、加速ユニットの計測時には光軸が遮られる。従って、この間FB制御を停止させる必要があり、光軸の高安定化が損なわれてしまうことになる。

このことから、レーザーアライメントシステムを恒久的に使用するには耐放射線性の高いシステムが望まれる。SLACのレーザーアライメントシ

ステムは、このような要求を満足する優れたシステムである⁷⁾。SLAC線形加速器の架台は、入射器と同様な12.192m長の円筒パイプ(アルミ、直径609.6mm)からなる。1セクターは8台の加速ユニットからなり、総計240台の架台が設置される。全30セクターから構成される電子陽電子線形加速器の総長は3kmである。SLACでは円筒パイプ自体が光軸管になっており、架台両端には正方形型のフレネルレンズ(1辺355.4mm)が装着されている。この方式では、レーザーは直接的な光軸とはならない。入射器のような細い平行ビームではなく、複雑な光学系を用いずにレーザー管から直接光軸管にレーザーを入射している。この結果、レーザーは発散ビームとなりレンズ全体に照射される。フレネルレンズはレーザーを集光し3km終端で鋭い集光点を作る。この集光点がアライメントの基準点となる。加速器に沿った始点、中間点及び終点に床面から同様なレンズを設置し、終端に作られる3つの集光点を一致させることでアライメントの長基線が形成される。この長基線を光軸として加速ユニットの変位が計測されることになる。このように、SLAC方式ではフレネルレンズは受動素子として用いられるので放射線損傷の恐れがほとんど無い。さらにレーザーは終端から入射され、集光点の計測に利用するCCDカメラは電子銃の上流に設置されている。このような計測機器の配置は放射線損傷の恐れを著しく低減させる。また、レンズに照射されるレーザーの波面は球面波なので、光軸が多少変動したとしても集光点の変位は高次の項が寄与するだけなので、光軸安定化のための特別なFB制御を必要としない。

このようなSLAC方式は、システム自体が極めて高い耐放射線性と安定した光軸をもつ恒久的なシステムと言える。欠点としては、KEKB入射器に比べ口径の大きな円筒架台を真空に引く必要があり真空システムがより大きくなること、また、レンズの焦点距離は架台位置に応じて固定されるので、架台位置を任意に変更することが困難であることが上げられる。しかしSLAC方式は、このような欠点にも関わらず優れた方式だと考える。我々も入射器の恒久的なレーザーアライメントシステムとしてSLAC方式を利用すべく原理実証実験を開始した⁸⁾。

5. まとめ

筆者等は、レーザー光学系を新たに構築し、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高精度レーザーアライメントに必要な500 m 長レーザー長基線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 $40 \mu\text{m}$ (1σ) レベルである。これは角度安定性に焼き直すと 80 nrad に相当する。本成果は次世代の長距離線形加速器にも応用可能な技術であり、ダム事業やトンネル構築など高精度な長基線を必要とする大規模土木事業への貢献も期待できる。

本研究は、佐藤政則准教授 (KEK 加速器), 寺田聡一主任研究員 (AIST 計測標準計測部門) との共同研究により行われました。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、KEK 加速器研究施設

の菅原龍平名誉教授と同施設長生出勝宣教授には有益な御議論を頂きました。また、理化学研究所の松井佐久夫博士と高輝度光科学研究センターの木村洋昭博士には、多大なる協力と御意見を頂きました。深く感謝を申し上げます。

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) K. Hisazumi, et al.: Proceedings of the 8th PASJ, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011, pp.771-775.
- 4) T. Suwada, M. Satoh and E. Kadokura: Rev. Sci. Instrum. **81**, 123301 (2010).
- 5) <http://www.newport.com> for Newport
- 6) A. E. Siegman: Lasers (University Science Books, California, 1986), p. 665.
- 7) R. B. Neal (ed.): The Stanford Two-Mile Accelerator (W. A. Benjamin, New York, 1968), pp. 821-885.
- 8) T. Suwada, M. Satoh, S. Telada and K. Minoshima : Rev. Sci. Instrum. **83**, (2012) 053301.