

LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC

Tsuyoshi Suwada¹, Masanori Satoh, and Eiichi Kadokura,
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A new laser-based alignment system for the precise alignment of accelerator components along an ideal straight line is under development for the Super KEKB project at the KEKB injector linac. The laser propagation characteristics both in vacuum and at atmospheric pressure have been systematically investigated in an 82-m-long straight section of the injector linac. The laser-based alignment measurements based on the new laser optics have been carried out with a measurement resolution of ± 0.1 mm level by using existing laser detection electronics. The horizontal and vertical displacements from the reference laser line are in good agreement with those measured using the standard telescope-based optical alignment technique. In this report, we describe the experimental study in detail along with the basic designs and the recent developments in the new alignment system.

KEKB入射器におけるレーザーアライメント実験

1. 概要

KEK電子陽電子入射器 (KEKB入射器)では、次世代Bファクトリー計画に向けた入射器高度化の検討が進められている。アライメントシステムの再構築は、入射器高度化に向けた重要な課題の一つである。目標は、500m長直線部の精密アライメントとその常時モニターが可能なシステムを再構築することにある。2010年春の保守期間中、レーザー光学系と真空系を新たに導入し100m長直線部を利用してアライメント計測実験を行った。測定した各加速管架台の変位は、標準的な光学的手法であるアライメントテレスコープによる測定結果ときわめてよく一致し、今回導入したシステムが有効であることを確認した。本稿では、入射器におけるレーザーアライメントシステム開発の現状と100m長直線部を利用したアライメント計測の実験結果について報告する。

2. はじめに

入射器のアライメントシステムは、レーザーを基準線に用いる方法である。基本システムは30年以上も前に構築され、その後、改良がなされてきたが、老朽化が主な理由で現在では利用不能な状況である。システム概要、レーザー光学系及び測定系の基本的な設計検討は、すでに報告されている[1-4]。この報告に基づき2010年度は、新レーザー光学系を導入し、500m長直線部の精密アライメント計測を目指す。

3. 新レーザー光源と光学系の導入

厳しい放射線損傷をさけるためにレーザー光源をトンネルから遠ざける必要があり、光ファイバー伝送が可能な光源を導入した[1]。光源には、ファイ

バー結合が容易な市販のレーザーダイオード(LD, Mitsubishi Electric, ML101J27, $\lambda=660\text{nm}$, 最大連続出力120mW)を使用した。LD出力面に非球面レンズを密着させ、単一モードファイバー(コア径 $\phi 3.5\mu\text{m}$)の先端を集光位置に固定し接着剤で固めてファイバーを結合した。ファイバー端位置の最適化後の結合度は約20%である。光源に結合したファイバーの他端を図1に示すように反射型光学系に結合させ、ビームエキスパンダーとして動作する光学系を開発した。

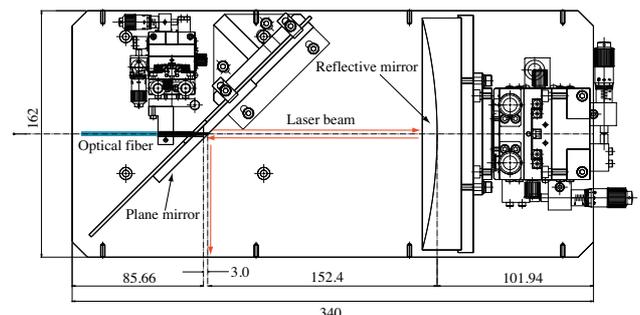


図1：光ファイバーに結合した反射光学系

ファイバーは、中央に $\phi 1\text{mm}$ の開口をもつ平面鏡の反射面から6mm後方の位置に固定された。ファイバー端面には $\phi 10\mu\text{m}$ の開口をもつワッシャー(厚さ $100\mu\text{m}$)を取り付けている。これは、ファイバー先端から出射するレーザーを積極的にワッシャーで回折させ、直後の平面鏡の開口部を利用して周辺の回折パターンを切断し回折光の芯だけを通す光学系になっている。このビームはAiryビームと呼ばれ、径の小さなビームを生成するための工夫である。

平面鏡を通過したビームは、対向する球面反射鏡(口径 $D=152.4\text{mm}$, 焦点距離 $f=152.4\text{mm}$)により反射

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

と収束がなされ、平面鏡で90°度反射され光軸管に入射する。ビーム径は、平面鏡(固定)に対する反射鏡の位置を変えることで調整できる。

4. レーザーアライメント実験

4.1 実験セットアップ

実験は、入射器500m長直線部頭部に位置するCセクターで行われた。実験セットアップを図2に示す。

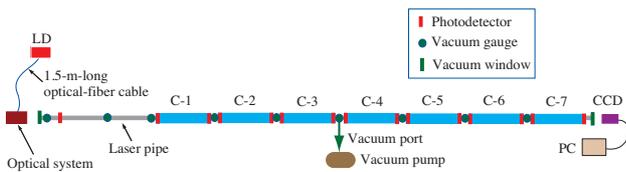


図2：レーザーアライメント実験セットアップ

レーザー伝送距離は82m、C-1-C-7間ビームライン長は66mである。縁切りした床面に光学架台を設置し、その上に光源と5軸ステージを並べて設置した。5軸ステージは、直線移動(軸(z)、水平(x)・垂直(y))と回転移動(水平、スイベル)のステージからなり、それらを垂直に積重ねた上に反射光学系を固定した。光源からファイバー接続された反射光学系は、5軸ステージの微細な調整により光軸管への入射角度と位置が調整できる。光源の底面にはペルチェ素子を取付けて温度制御(23°C)を行った。トンネル温度は、空調により23±0.1°Cの範囲内で制御される。局所的な空気の流れをできるだけ抑制するために、光学架台を含んだ光源全体を保温材で覆った。

レーザーは、合成石英ガラス(φ115mm, 20mm)の入射窓を通して光軸管(φ115mm)を伝送し、C-7終端の出射窓(同ガラス, φ115mm, 15mm)を出てCCDカメラで計測される。真空引口は、ラインほぼ中央のC-3-C-4間に設け、排気能力が1000l/minのスクロールポンプで光軸管全体を真空に引いた。ほぼ10m間隔で9台のピラニーゲージを設置し光軸管の真空特性を測定した。光軸管の内径はφ115mm、全体積は847.2lである。加速管架台の両端には4分割光ダイオード(PD, φ10mm)が取り付けられ、レーザーの強度重心を検出し、ビーム軸に垂直な面内で架台の変位を計測できる。

4.2 光軸管の真空特性

図3に大気圧から始まる光軸管真空特性の時間変化を示す。真空度は、約10分後に~25Paに達し光軸管表面から出るガス放出と釣合い排気能力が落ちる。2時間後には~5Pa, 20時間後には飽和真空度~3Paに達した。この測定により、大きな真空リークがないこと、圧力分布がライン全長にわたりほぼ一定であることがわかり、レーザー伝送の安定化には問題のないレベルであることを確認した。

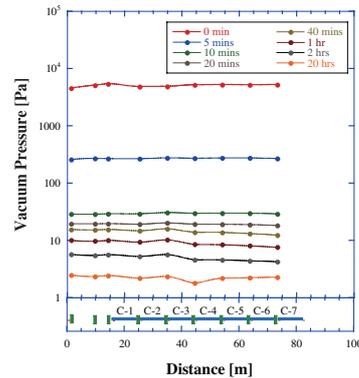


図3：光軸管(Cセクター)全体の真空値の時間変化

4.3 レーザーの伝送特性

トンネル温度の変化や空調の動作により空気密度が変化し、わずかな空気の流れが局所的に生じる。このような外乱は、屈折率の変化を通してレーザー伝送に影響を与える。光軸管の真空特性とレーザー伝送特性は、安定なレーザー基準を作るのに重要なパラメータとなる。これらの特性を計測するために、真空度と伝送安定性の時間変化を同時計測した。図4、(a)にレーザービーム径(x)の時間変化を、(b)に真空度とレーザー強度重心位置(y)の時間変化を示す。

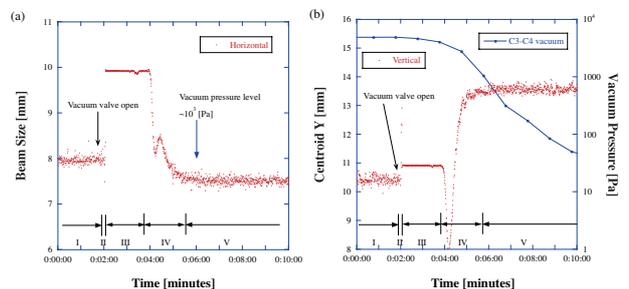


図4：(a) レーザー径(x)の時間変化、(b)光軸管真空度とレーザー重心位置(y)の時間変化。領域I,IVは定常状態、II-IVは過渡状態、IIIは測定範囲外を示す。

真空バルブを解放した瞬間には、入出射ガラス窓が強く大気に押されると同時に鉛直方向に付いた引口を通して空気の流れが急速に生じる。図4は10分間の時間変化を示すが、約2分間の過渡的なビームの動きの後、定常状態に移行することがわかる。特に、y方向の過渡的な動きが大きく(図4(b))、定常後のオフセットは~3mmである。ビーム径(4σ)も同様に過渡的な変化を経て定常値に近づく。

ビームの各パラメータは、1000Pa以下の真空領域で定常値に落ち着いた。この結果により要求される真空度を500m長の全領域に単純に外挿すると2台の真空ポンプで十分であることを示し、大規模な真空システムの導入は必要ないことがわかった。

4.4 ビーム径の計測

ビーム径は、PDの応答感度に影響を与える重要

なパラメータである。軸方向のビーム径の変化は、反射光学系のパラメータとガウス伝搬光学に従う。これを検証するために反射光学系の調整を兼ねて大気中でビーム径の変化を測定した。反射光学系は、120mの伝送長のほぼ真中にウェストが形成されるように球面反射鏡の位置と角度を調整した。図5に光源から20mごとに測定したビーム径の変化を示す。測定結果は真空中のビーム径に換算しているのに注意してほしい。また、 x, y ビーム径がやや異なるのは、球面反射鏡のわずかな傾きによるものである。

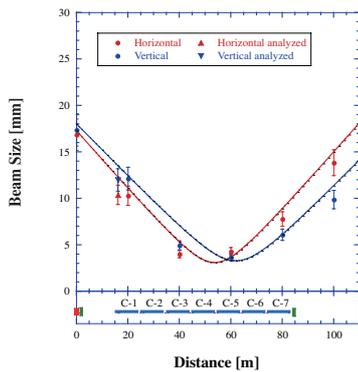


図5：軸方向のビーム径の変化。丸点は測定値，三角点はPD校正による解析値，実践はガウスビームの伝送光学に従う最小自乗法による最適曲線を示す

C-1入口には、ビーム軸に垂直な面内で可動する可動型PDが挿入されている。このPDを利用してレーザー入射位置(固定)に対するPD校正を行い、解析結果から算出されるビーム径とC-7終端での二点の測定値を使って大気データを真空データに規格化した。レーザー伝送シミュレーションは、真空データの結果をほぼ再現し、この解析が正しいことを裏付けた。

4.5 4分割フォトダイオードの応答校正

レーザー光軸を固定し軸方向に垂直な面内で格子状にPDを変位させ応答感度を校正した。図6にPDを x 方向に0.5mm刻みで ± 3 mmの範囲($y=0$ mm)を変位させたときの強度重心(x, y)の測定値の変化を示す。

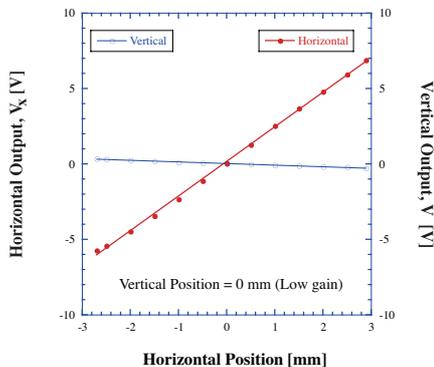


図6： x 方向のPD変位に対するレーザー強度重心の変化 (検出器の (x, y) 出力[V]を示す[2])

校正により強度重心の測定値(V_x, V_y)の変化からPD変位(x, y)を算出するための校正曲線を得ることができる。強度分布に2次元のガウス関数を用いて解析を行い全PDの校正曲線を得た。

4.6 加速管架台のアライメント計測

アライメント計測の前にレーザー基準線を作る必要がある。光軸管に対するレーザーの入射角度と位置を微調整し、C-1入口とC-7出口のPD中心が光軸に一致($V_x=0, V_y=0$)するように基準線を作った。この作業後、計測を2日にわたり4回の測定を行い、データの再現性を確認した。

図7に x 方向アライメント計測の結果を示す。 y 方向も同様な計測結果を得た。データは、4回測定の平均値を示す。全データの平均値からのズレは ± 0.1 mm以内に入り、測定の信頼性を確認した。

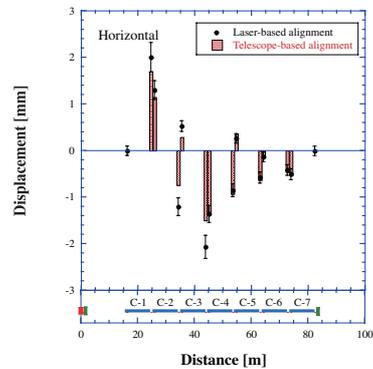


図7： x 方向アライメント計測結果

計測結果は、望遠鏡を用いた光学測定の結果(棒グラフ)ともよく一致し、今回のレーザーアライメント計測技術の信頼性を裏付けた。一方、詳述できなかったが、本実験を通して幾つかの課題を見いだした。例えば、レーザー基準線の軌道安定性が欠けたことである。CCDカメラの測定結果によるとC-7終端では、光源ステージの不安定性に起因して $\Delta x \sim 0.4$ mm(pp)程度の揺らぎが常に存在したことが、また、ライン全長にわたる平行ビームの生成が、強い回折により実現できなかったことなど、課題は多い。

5. まとめ

82m長ビームラインを使って新たに導入したレーザー光源、反射光学系及び真空システムの実験を行い、新システムが問題なく動作することを確認した。今回の計測結果は、 ± 0.1 mmレベルのアライメント計測が充分可能であることを示し、新しいレーザー光学系が有効であることを確認した。

参考文献

- [1] 諏訪田剛, 佐藤政則, 第6回日本加速器学会 2009, p.79.
- [2] 諏訪田剛, 佐藤政則, 第6回日本加速器学会 2009, p.82.
- [3] 佐藤政則, 他, 第6回日本加速器学会 2009, p.1159.
- [4] 門倉英一, 他, 第6回日本加速器学会 2009, p.94.