

LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC: DESIGN OF THE OPTICAL SYSTEM

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

Abstract

A new alignment system is under development at the 500-m-long KEKB injector linac. The new system is strongly required in order to increase the stability and to create the high-quality electron and positron beams towards the next-generation of B-factories because the previous alignment system has become obsolete. The basic design of a laser optics system in the laser-based alignment system is summarized along with some numerical results in this report.

500m長KEK電子陽電子入射器におけるアライメント：光学系の設計

1. 概要

KEK電子陽電子入射器(以下、入射器)では、アライメントシステムの再構築を計画している。入射器のアライメントシステムは、1995年のKEKB改造時に再構築され精力的に測定されたが、1998年6月を最後に行われていない。これは、測定系の簡便性の欠如やシステムの老朽化が主な理由である。次期計画(Super KEKB)に向けた入射器の高度化に伴い、アライメントの重要性が再認識され、システム全体が再度見直されることになった。本報告では、レーザーアライメントシステムにおける光学系の設計について検討結果をまとめる。

2. はじめに

1993年に始まったKEKB計画への入射器改造[1]から16年が経過したが、現在でも運転の高度化と安定化をめざして日々の向上が続けられている。

その中の重要項目の1つが、同時連続入射の達成である。入射器は、2台のKEKBリング(KEKBe⁻, KEKBe⁺)と2台の放射光リング(PF, PF-AR)に電子・陽電子ビームを供給している。ルミノシティアマシンであるKEKBリングのさらなる高度化をめざして、2004年1月に連続入射が始まり、積分ルミノシティの飛躍的な向上に貢献している。一方、放射光リングでは、より安定な運転をめざしてトップアップ運転の要求が高まり、2004年春から検討が開始された。複数の下流リングへの同時連続入射のもとでは、各リングの蓄積電流は、ほぼ一定に保持されるので、より安定した実験が可能となりその期待は大きい。

同時連続入射を入射器から見ると、エネルギーの異なる入射ビームをパルスごとに切り換え、複数の下流リングに同時に連続入射を行うことを意味する。これは、計算機のマルチタスクと同様で、ビームの最大繰返し(50Hz)を上限として、パルス電磁石を利用

して入射ビームを高速に振分けることで行われる[2]。この新しい入射方式は、従来方式に比べいっそう高度なビーム制御能力を要求する。残念ながら、PF-ARへの同時入射は、技術的困難さから見送られたが、2005年夏、PF入射路の新規建設(Phase-I)が行われた。その後、KEKBe⁻/PFへの同時連続入射(Phase-II)を達成し[3]、2009年4月、最終目標であるKEKBe⁺/KEKBe⁻/PF(Phase-III)への同時連続入射がようやく実用レベルに到達した[4]。

このような複雑な入射方式に対し、より安定な入射を目指して、アライメントの重要性が再認識されるようになった。入射器では、レーザー光を利用したアライメントが基本となるが、同時に、高精度水準器を利用した新しい方式も開発を始めている[5]。

3. アライメントシステムの概要

入射器は、180度偏向部(エネルギー1.7GeV)を挟んで100m長と500m長の直線部からなる総長600mの線形加速器である。2つの直線部には、それぞれ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[6]。入射器の典型的な基本ユニットを図1に示す。

基本ユニットは、耐震構造を有した10m長の円筒構造(ステンレス鋼、直径50.8cm)の架台とその上に搭載する4本の2m長Sバンド加速管からなる。円筒構造の中には、レーザー光軸管(直径11.5cm)が挿入され、二重同軸構造となっている。両端には、四分割型シリコンフォトダイオード(PD、直径10mm)による光検出器が装着される。フランジ接続された光軸管は、真空にすることが可能である。

長さの異なる変則的な架台も含み総計58台の架台が直線上に並び、500m長直線部を構成する。放射線損傷を避けるために、LD励起固体レーザー(CW出力

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

20mW、 $\lambda=532\text{nm}$)をクライストロンギャラリーに設置し、単モードファイバーで地下の直線部始点まで誘導している。ファイバー先端を位置決めステージに固定し、凸凹レンズを組合せたレンズでビーム径を拡大し、光軸管の中心軸上に入射する。

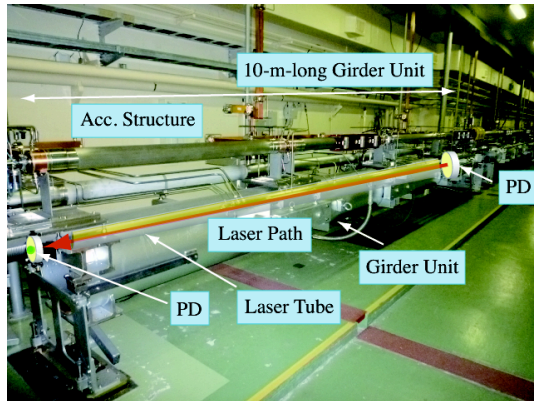


図1：入射器の基本ユニット

専用のホルダーに装着されたPDの倒起は、蝶番を通した手動で行うことができる。レーザー光の強度重心をPDで計測し、光軸に対する水平・垂直方向の相対的な変位を4つの電流信号から測定する。

4. 光学系の再設計

ここでは、レーザー光の入射調整を容易にする設計を念頭に置き、光学系に起因する誤差要因を明らかにする。

4.1 レーザー光の入射

レーザー光源は、He-Neレーザー($\lambda=632.8\text{nm}$)を想定している。従来の固体レーザーは、He-Neに比べ波長が短いので、同じ光学系であればレイリー長をより長くできるという長所がある。しかし、He-Neの有する利点の方が多い。例えば、シリコンPDの波長に対する感度特性によると、He-Neは、感度が2倍である。これは、ファイバーでレーザー光を誘導する場合、同じS/Nを得ようとすれば、2倍の出力がレーザーに要求されることを意味する。図2にレーザー光の入射部を示す。

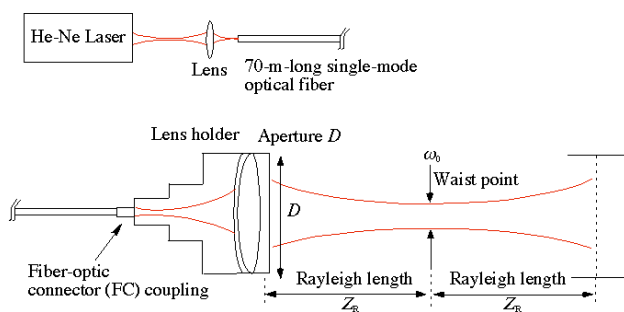


図2：レーザー光の入射部と集光されたレーザー光伝播の模式図

放射線損傷を避けるためにレーザー光源をギャラリーに設置する。光源から $2\text{mm}\phi$ のサイズで出射したレーザー光は、レンズでファイバーコア径($3.5\mu\text{m}\phi$)まで集光されファイバーに入射する。入射効率は、レンズ収差とレーザー光のポインティング安定性により決まるが、20~30%が予想され最も損失が大きい部分となる。レーザー光は、70m長ファイバーで伝送後、トンネル内に設置したFC結合が可能なファイバー結合型レンズを通して光サイズを拡大して光軸管に直接入射する。このようなファイバーとレンズの一体型構造が、レーザー光の入射調整を格段に容易にすると期待する。

4.2 レーザー光の伝播

PDが受光するレーザー光の強度重心測定において、レーザー光のサイズ変化は、測定感度を決定する主要因となり、アライメントの測定精度に影響を与える。このことから、軸方向のサイズの変化を知ることがきわめて重要となる。ここでは、大気の影響を無視したレーザー光の自由空間中の伝播を議論し、軸方向に変化する光サイズの最適化を行う。

レーザー光の自由空間中の伝播は、ガウスビーム光学に従い、レーザー光の波長(λ)、最小径(ω_0)とレイリー長(Z_R)という特徴的な物理量で記述される。その関係式を式(1)と(2)に示す。

$$Z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}, \quad (1)$$

$$D = \pi\sqrt{2}\omega_0, \quad (2)$$

図2に示すように、有限の開口径(直径 D)をもつレンズやスリットで平行に集光されたレーザー光は、 Z_R 後に最小径となり、再び Z_R 後に対称的に発散する伝播をする。これは、衝突リングの衝突点におけるビームの振る舞いと同様である。

軸方向のサイズは、レーザーの入射点での開口径 D からウエスト点で最小径 ω_0 まで変化する。これらのパラメータは、基本的にレーザー波長とレイリー長により決まる。測定感度をできるだけ一定にするには、サイズの変化を最小にすることが望ましい。波動光学に基づいた最低次のガウスビームの伝播を計算すれば、軸方向のサイズの変化を評価できる[7]。

サイズ変化の対称性からレイリー長を入射器全長の半分(250m)にとり、最小径が中間点に来るようにすれば、サイズの変化を最小限に抑えることができる。図3にその計算結果を示す。ただし、レイリー長付近の焦点距離をもつ幾つかの光学系におけるガウス光の伝播を計算したものである。軸方向のサイズ変化を入射点のサイズを調整しながら計算したところ、ある程度対称点をずらしたほうが、全体的なサイズ変化を抑制できることがわかった。計算結果によると、99%の光強度領域を考慮すれば、中央でのサイズは、最小値(7.6mm , $\sigma=1.5\text{mm}$)を示し、両端

で最大値(37mm, $\sigma=7.3\text{mm}$)となり、サイズ変化を最小にして、かつ、ほぼ対称的なサイズ変化をする特定の光学パラメータが存在することがわかった。

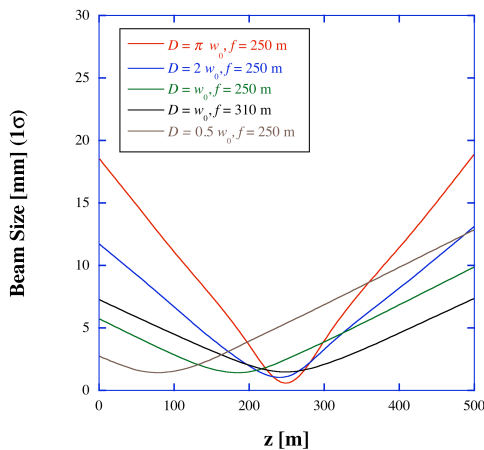


図3：軸方向のビームサイズの変化

4.3 レーザー光の回折

よく知られるように、有限の開口径をもつ集光レンズを光が透過するとき、伝播波形は、回折により著しく歪んでしまう。特に、回折によるビーム形状の変形は、PDの測定感度に影響を与えアライメントの誤差要因となる。回折の効果は、4.2節に述べた解析と同様に評価できる[7]。図4にその計算結果を示す。

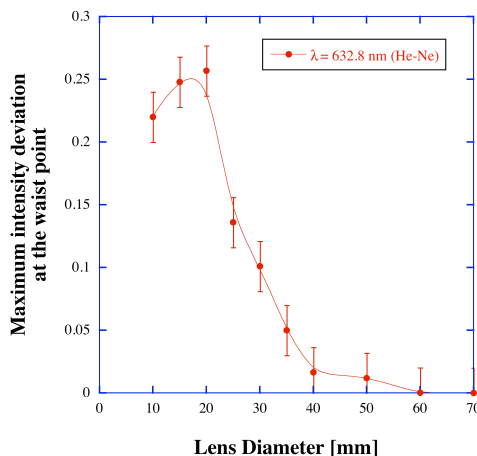


図4：集光レンズの開口径の変化に対する回折効果

回折効果を定量化するには、ガウスビーム強度分布を表すガウス関数からのずれの最大点における割合を評価するとよい。レンズ口径を大きくするに従い、ずれの最大点における割合が小さくなることがわかる。この解析結果により、70mm以上の集光レンズ口径が必要であることを意味する。

4.4 集光レンズの収差

光ファイバーで誘導したレーザー光のサイズは、レンズにより拡大される。レンズ光学でよく知られた収差解析によると、横方向の光強度分布は、収差

の影響を受けて歪んだガウス分布となる。この効果は、光サイズを変化させて、PDの測定感度の変化を通してアライメントの誤差要因となる。

ここでは、ザイデルの収差の中で基本となる3次の球面収差を評価すれば充分である。他の収差の影響は充分小さい。ただし、厳密には波動光学に基づいた収差を評価すべきであるが、ここでは、簡単のためよく知られた幾何光学に基づく光線追跡法[8]により評価することにした。図5にその計算結果を示す。解析では、図2に示すようなフラウンホーフェル型の対物レンズを取上げ、パラメータの最適化を行った。解析結果によると、最大1mm程度の収差が残り完全にこれを打ち消すことができない。この球面収差が、アライメントの誤差要因となるのである。球面収差の平均二乗偏差(0.6mm)を考慮すれば、効果的なサイズ変化を評価でき、アライメント誤差の大きさを評価することができる。本稿で議論した誤差要因と期待されるアライメント誤差の大きさは、別稿にまとめている[9]。

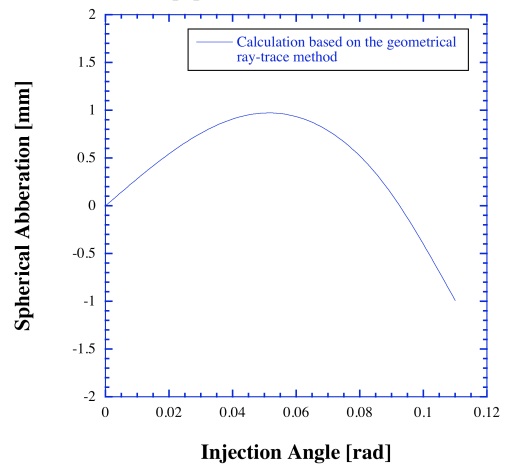


図5：最適化されたフラウンホーフェル型対物レンズの球面収差

5. まとめ

入射器では、アライメントシステムの再構築が進行中である。本稿では、特にレーザーとその光学系の再検討を行い、光学系に起因する誤差要因を明らかにした。現在、本稿で検討したレーザー光学系を構築中である。

参考文献

- [1] 榎本収志, 他, 日本加速器学会誌 第6巻1号 2009, p.69.
- [2] 佐藤政則, 日本加速器学会誌 第3巻2号 2006, p.171.
- [3] 佐藤政則, 日本加速器学会誌 第5巻2号 2008, p.144.
- [4] N. Iida, *et al.*, *Procs. of the PAC'2009*.
- [5] T. Kume, *et al.*, presented in this meeting.
- [6] Y. Ogawa, *et al.*, *Procs. of the PAC'95*, p.2087.
- [7] A.E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, California, 1986), p.777.
- [8] 久保田広, 光学 (岩波書店, 1974), p.179.
- [9] T. Suwada, *et al.*, presented in this meeting.