

NEW LASER ALIGNMENT WITH FRESNEL LENSES AT THE KEKB INJECTOR LINAC

Tsuyoshi Suwada¹ and Masanori Satoh,

Accelerator Laboratory, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Souichi Telada and Kaoru Minoshima,

Length Standards Section, Metrology Institute of Japan, AIST, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japan

Abstract

Focusing characteristics of a He-Ne laser at the focal region with a circular Fresnel zone plate have been experimentally investigated at the KEKB injector linac. The laser wave passing through the Fresnel zone plate with the focal length of 66.7 m propagates for a 268-m-long distance at atmospheric pressure. A new laser-based alignment system uses the Fresnel zone plates as the alignment targets, and the transverse displacements of the focusing spot of the laser are measured as a function of the transverse displacements of the target by a detector installed at the focal point. The systematic studies on the focusing characteristics and alignment precision have been successfully performed in this experiment. The experimental results are in good agreement with theoretical calculations, and the alignment precision of the target has been obtained to be less than $\pm 30 \mu\text{m}$. In this report, we describe the experimental investigation on the laser propagation and focusing characteristics with the circular Fresnel zone plate at the focal region in detail.

KEKB入射器におけるフレネルレンズを用いた 新しいレーザーアライメント

1. 概要

KEK電子陽電子入射器（入射器）では、次世代Bファクトリー計画(SuperKEKB)に向けた入射器高度化の検討を進めている。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。

従来のシステムは、レーザーをアライメントの基準線とし、加速管架台の両端に設置した四分割光センサー(PD)によりレーザー軸の垂直方向における二次元変位を計測する方法である。SuperKEKBのような10年を越える運転では、PDの放射線劣化が予想されるので従来法では長期のシステム安定性を期待することは難しい。フレネルレンズ(FL)を用いた新しいレーザーアライメントは、従来法のもつ困難を解消し、かつ長期間にわたるシステムの安定性を保持すると考える。本稿では、新システムの従来法との比較、FLの動作原理とその予備的実験を紹介し、入射器への応用可能性を報告する。

2. はじめに

入射器のアライメントシステムは、レーザー光線をアライメントの基準線とし、加速管架台の両端に設置した四分割PDを用いてレーザーの強度重心の二次元変位を計測することで、架台のアライメントを

行う方法である。この方法に基づき、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長直線部のアライメント計測実験を行っている[1]。その結果判明したことは、1)レーザーの伝送途中では、レーザー光学系に基づきスポットサイズが変化する。このサイズ変化が、PDの変位に対する感度係数を敏感に変化させること、2)放射線劣化によるPDゲインの変化が著しいこと、3)レーザーの出射角度の安定性(*pointing stability*)が、測定精度に大きく影響すること、4)500m長の距離伝送では、現在のPD(直径10mmφ)では高分解能の達成が困難であること、などが主な要因となり現システムの再構築にあたり新しい方法の導入が必要であろうとの考えに至った。

他方、FLを用いたアライメントシステムでは、集光点が高精度に一致するように調整された2つの基準となるFL標的の中心点を結んで基準直線が作られる。第3のFLの変位は、その基準線からの変位を逐次計測することにより得ることができる。この方法は、逐次三点法と呼ばれ、最も基本的なアライメント計測技術で光学的にも実現可能である。この技術は、SLACの建設時にパノフスキーにより採用された方法で新しい方法ではないが、前述した多くの困難を解消する方法である。

入射器の500m長直線部の高精度アライメントとその常時モニターを目標とするには、システムが放射線劣化することなく、高い安定性と計測の簡便性を有していることは言うまでもない。本方式は、逐次

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

三点法という最も基本的な計測方式であり、さらに集光点を計測する測定器は入射器終端に1台据え付けるだけでよい、という観点から次期計画では有望な方式であると考えられる。しかしながら、入射器の現有システムに代わり新たなシステムを導入するには、幾つかの困難を克服する必要がある再構築はそう簡単ではない。そこで、筆者らは逐次三点法に基づくFLを用いたレーザーアライメントシステムの入射器への適用可能性を調べるために基礎実験を行なうこととした。

3. フレネルレンズの動作

FLは、フレネルゾーンプレート(FZP)とも呼ばれ、マイクロ波からX線とガンマ線まで広範な波長領域において単色の光を鋭く集光するレンズとして動作することが知られている。レンズ面には、光の透過帯と遮断帯が交互に並び、いわゆるフレネルゾーン(FZ)を形成する[2]。透過帯を通過する光は、そこで回折され焦点面に集光される。このことが、FLが回折レンズとも呼ばれる所以である。円環をなす各透過帯からの回折光の振幅を焦点面で積分すると鋭い幅をもったスポットが形成されるという特徴をもつ。一方、透過帯が格子状の場合は、極めて鋭い幅をもった輝線が十字状に形成されるという特徴をもつ。

FL上のFZのピッチはレーザー波長とレンズの焦点距離により決まり、スポットの鋭さはFZの数により決まる。FZの数が大きいほどスポット径が小さくなり分解能は向上する。しかし、同時にレンズ口径を大きくする。現実的にはレーザー伝送路の真空化を考慮すると真空パイプの口径に対しレンズ口径を余り大きくできないことに注意する必要がある。このように、FZの最適数は真空パイプ口径との関係で決めるべきである。このFLを従来のPDに代えてアライメント標的として応用すれば、放射線劣化の問題が著しく軽減され、かつPDゲインの変動監視という複雑なシステムも不要になり、システム全体を簡便にできる。

ガウス型レーザーの伝播とFLの集光作用の理論的な取扱いは、実験データを検証する上で重要であるが文献[3]にすでに報告しているのでそちらを参照してほしい。

4. 原理実証実験

4.1 実験セットアップ

実験は、産業技術総合研究所のレーザートンネル(全長250m)で行われた。このトンネルは、地下1階にあるレーザー計測専用のトンネルで極めて環境がよい。本実験中は、空気の揺らぎを極力抑制するために全ての空調をオフした。その結果、実験中のトンネル温度は $17 \pm 0.2^\circ\text{C}$ の範囲で一定に保持された。図1にレーザー伝送光学系と実験セットアップを示す。

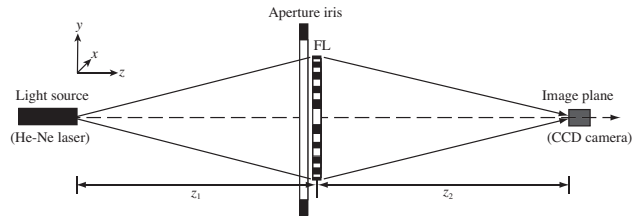


図1：レーザー伝送光学系と実験セットアップ

光源には、市販のHe-Neレーザー($\lambda=632.8\text{nm}$, 出力10mW)を用いた。光源から $z_1=125.07\text{m}$ の地点にFLを、FLから $z_2=142.78\text{m}$ の地点(焦点面)にCCDカメラを設置した。レーザーの総伝送距離($L=z_1+z_2$)は、 $L=267.85\text{m}$ である。FLから11cm手前には、分解能測定用に絞りを設置している。ここで、図には示していないが、 L がトンネル全長を越えてしまうため、FLから87.81m下流の地点に反射ミラー($150 \times 150\text{mm}^2$)を置き、レーザーを上流に向かって跳ね返している。CCDカメラには、市販の計測装置(Ophir社製、12bit、速度2Hz)を用いた。このカメラは、口径($36 \times 24\text{mm}^2$)が大きくアライメント用の大口径レーザーのプロファイル計測に適している。

4.2 フレネルレンズ

図2に開発した同心円環からなるFLを示す。

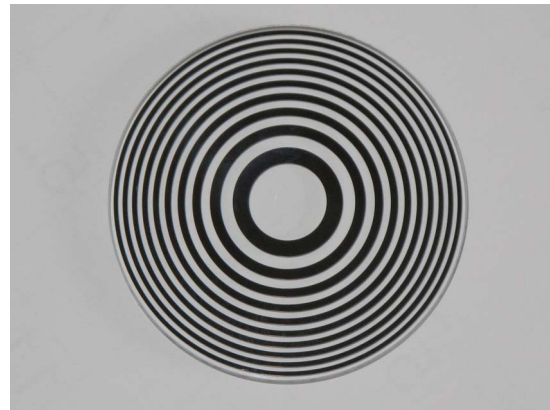


図2：フレネルレンズ(直径60mmφ)

図に示すFLは、光の透過帯(透明)と遮断帯(黒)が同心円状に交互に並んだパターンをもち、中央が開いた中央開口型FLと呼ばれる。FLの基板には、耐放射線性を有する合成石英ガラス(信越石英社製:Suprasil-P30, 厚さ:4mm, 直径:60mmφ, 屈折率:1.456)を用いた。この基板の片面に、半導体加工に用いられるフォトリソ技術によりクロム(厚さ $0.2\mu\text{m}$)を真空蒸着し遮断帯を形成した。フォトリソの焼付け精度は高く、各円環中心のガラス基板中心に対する精度は $\pm 10\mu\text{m}$ 以下である。また、各円環の半径精度は $\sim 2\mu\text{m}$ 程度で、アライメント計測の全体精度に占める割合は充分小さい。

中央円環を $m=1$ として外側に向かって円環番号を付けると、円環の外半径(r_m)は、高次項を無視して

($f \gg m\lambda/4$)以下に示す式で表すことができる。

$$r_m = \sqrt{m\lambda f} \quad (1)$$

ここで、 m :円環番号、 λ :レーザー波長、 f :FLの焦点距離である。このように、FL上には計20本($N=20$)の透過帯と遮断帯が交互に形成されている。ここで、中央開口(透過帯)の半径は、 $r_1=6.50\text{mm}$ 、最外円環(遮断帯)の半径は、 $r_{20}=29.06\text{mm}$ である。 f は、光学でよく知られた以下の式で表され、レーザーの伝送距離 z_1, z_2 が与えられると簡単に計算できる。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \quad (2)$$

ここで注意したいのは、設計した円環は、本来のHe-Neレーザーではなく半導体レーザー($\lambda=635\text{nm}$)用に設計したので、今回の実験には最適設計になっていないことである。しかし、この効果は、 $f=66.7\text{m}$ に対し $\sim 0.3\%$ 程度の違いを及ぼすだけなので原理実証実験としては問題ないだろう。

5. 実験結果

5.1 焦点深度の測定

入射器の500m直線部には、38ユニットの加速管架台が並ぶ。各加速管架台の両端にFLがアライメント標的として固定される。Q架台等も含め約130台のFLがレーザー基準に沿って設置されアライメント標的となる。測定点で鋭い集光点を得るには、(2)式に従い構成要素が精度よく配置される必要がある。このように、FLの軸方向における設置精度は、システムを構築する上で重要な量となり、FLの焦点深度の測定から知ることができる。すなわち、焦点面の距離 z_2 からの相対距離を dz_2 として、 dz_2 の変化に対するスポット幅の変化から焦点深度を測定することができる。実験結果を図3に示す。

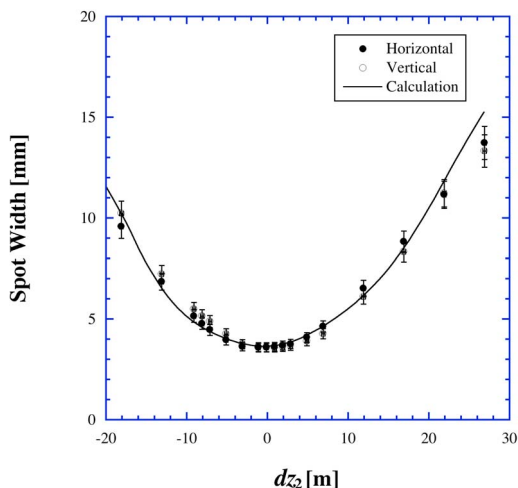


図3： dz_2 の変化に対するスポット幅の変化(焦点深度の測定)

ここで、スポット幅は、各軸へ投影した積分プロ

ファイルのrms幅の4倍として定義しているの、ほぼ全幅に近い幅である。図中の実線は、計算に基づく結果を示し、実験結果と理論計算との一致が極めてよい。この測定から、スポット最小幅の2倍を焦点深度とするとその幅は $\sim 27\text{m}$ となる。この幅をFLの設置精度の許容範囲と考え、加速管架台の長さの単位である1ユニット長(9.6m)を考慮すると、 ± 1.4 ユニット以上の幅に相当し、FLの設置精度としては十分な長さであることがわかる。

5.2 集光特性の測定

円環数の最適値を求めるために円環数を変化させてスポット幅の変化を調べた。この測定では、FL直前に設置した絞りの口径を調整することで円環数を制限することにした。測定結果を図4に示す。

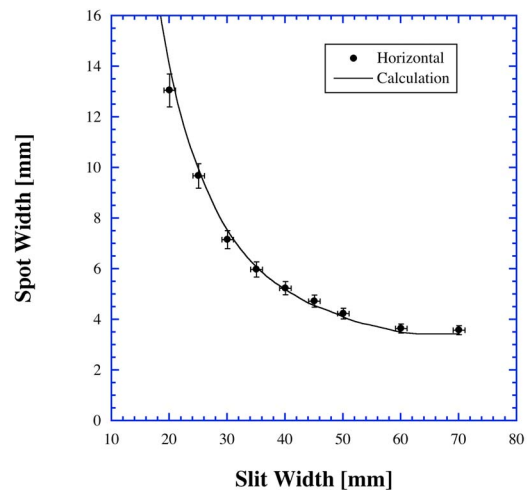


図4：絞りの開口径を変化させたときのスポット幅の変化(集光特性の測定)

開口径が最大の時の円環数は $N=20$ である。最小スポット幅の2倍の幅は、 $N=6$ の円環数で得られる。円環数は、FL直径が大きいほど多くの円環が可能となるが、現実的には、FL直径の最大径は、光軸管内径(110mm)に制限されること、また、500m長への拡張を考慮すると焦点距離が今の約2倍となることから、最適円環数は、 $N\sim 10$ と考えてよいだろう。

5.3 FLの横変位と回転に対するスポットの応答測定

FLの横方向の変位に対するスポット応答の測定は、アライメント計測を定量化する上で重要な測定となる。FLをX軸方向に変位させて焦点面でスポットの強度分布のピーク位置の変化を測定した。測定結果を図5(a)に示す。測定データの直線フィットからFLの1mmの横変位に対しスポットのピーク位置の変位は2.153mmである。この結果は、FLの集光特性を示すもので、焦点面では拡大率 $M=2.153$ で集光点のピーク位置の変位が拡大されることを示している。この拡大率は、理論的に導出可能でレーザー光学系

により決まるパラメータである[3]. このように、500m長直線部のアライメントシステムの構築においては、FLごとに拡大率パラータの管理が必要となる。

図5(b)は、ピーク位置の変位から直線フィットデータを差し引いた後、拡大率で除算した変位量を計算し、FLの横方向の変位に対するこの変位量の変化をしたものである。この結果が、アライメントの測定精度を与える。データは、大気の揺らぎにより若干の揺動が見えるが、平均値を考慮すると±30μm以下の精度が充分達成していることを示す。実際のシステム構築においては、レーザー光路は金属パイプを使って真空に封じられるので、この揺動はさらに抑制されることが期待できる。この結果から、目標とする精度±0.1mm以下のアライメントは充分達成可能であろう。

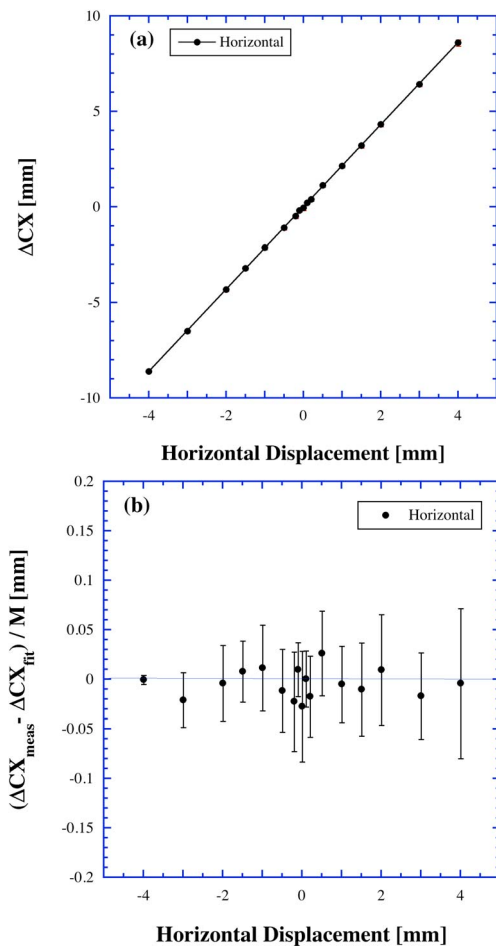


図5：FLの横方向変位に対する(a) 集光スポットのピーク位置の変化と(b)ピーク位置の変位からフィット直線を差し引き、かつ拡大率Mで除算した変位量の変化

次に、図6にFLをy軸の回りに反時計方向に回転させたときの集光スポットのピーク位置の変化を示す。この測定は、FLがレーザーの進行方向に対し傾きをもって設置された場合のアライメント測定に与

える影響を示すものである。データを直線でフィットしたときの傾きは~36μm/degreeである。軸方向の単位長あたりの応答に書き直すと0.25μm/degree/m (又は14μm/rad/m)である。500m長直線部の最大長500mを考慮して、FLの回転方向の設置精度を3.3mrad (設置精度/半径=0.1mm/30mmで計算)とすると焦点面でのスポットのピーク位置は、~23μmシフトすることになる。このシフト量は、かろうじて許容できる量である。

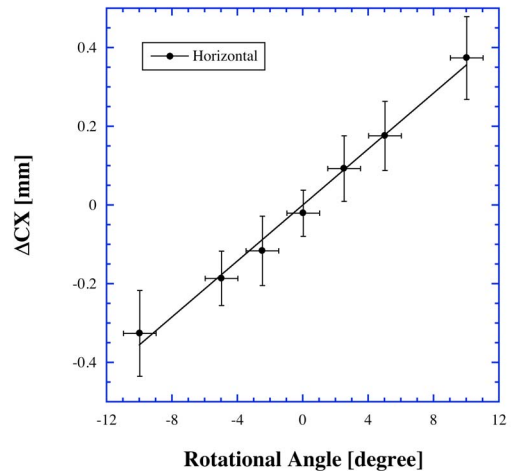


図6：FLをy軸の回りに反時計方向に回転させたときの集光スポットのピーク位置の変化

6. まとめ

大気中でHe-Neレーザーを268m長伝送させて、フレネルレンズを用いた集光特性を実験的に検証した。系統的な一連の実験で得られた集光特性は、ガウス型レーザーの伝送特性を考慮したフレネルレンズ理論の計算結果とよく一致することを確認した。アライメント計測の精度は、大気中での測定にも関わらず多数回測定による平均データから±30μmが得られた。焦点深度は~27m、FLの回転に対するスポットのピーク位置応答として14μm/rad/mが得られた。今回の結果は、入射器のアライメントシステムとして充分応用可能であることを示すものである。今後は、次世代Bファクトリー計画であるSuperKEKBに向けた高精度アライメントシステムの再構築のための詳細設計に移行する。

参考文献

- [1] T.Suwada *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 123301 (2010).
- [2] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, seventh (expanded) edition (Cambridge University Press, New York, 1995), p. 413.
- [3] T.Suwada *et al.*, to be submitted to Appl. Opt.