

LASER PROPAGATION CHARACTERISTICS IN LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC

Masanori Satoh^{1, A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Eiichi Kadokura^{A)}

^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A new laser-based alignment system is under development at the KEKB injector linac. Towards the Super-KEKB project, the new system is strongly required for increasing the operation stability and enhancing the quality of electron and positron beams. The new laser optics for the generation of so-called Airy beam has been developed for the laser-based alignment system. The new system comprises a flat mirror with two apertures of different diameter and spherical mirror. By using this system, the 100-m-long laser propagating is tested, and its profile is measured. It is confirmed that the measured profile has a good agreement with the simulation result. We report the overview of the new alignment system, the preliminary test result, and the simulation result in detail.

KEKB入射器におけるアライメント用レーザーの伝送特性実験

1. 概要

KEKB電子陽電子入射器（入射器）では、Super-KEKBに向けた入射器の高度化にともないアライメントの重要性が再認識され、アライメントシステムの再構築をおこなっている。今回の再構築においては、500 m長直線部の精密アライメントおよび常時モニターの運用を目標としている。このために、新規レーザー光学系の導入および100 m長のアライメント実験をおこない、レーザー光の伝送特性を測定した。本光学系は、2つの連続したスリットを用いてレーザー光をガウスビームからエアリービームに変換するものである。100 m長直線部のアライメント実験で得られたレーザーの伝送特性は、シミュレーション上で精度よく再現され、ガウスビームの伝送特性を保持していることを確認した。本稿では、100 m長直線部におけるエアリービームの伝送特性実験とその解析結果について報告する。

2. はじめに

入射器は、4つの異なるリング（KEKB電子/陽電子、PF、PF-AR）へビームを供給している。1993年に始まったKEKB計画のための入射器改造から16年が経過したが、現在でも、日々のビーム運転安定化を目指し様々な改善が継続しておこなわれている。KEKBリングへは、2004年初めより連続入射運転を開始し、積分ルミノシティの向上に大きく寄与した。一方、PFリングでは、放射光リングにおいて近年主流になりつつあるトップアップ運転への要望が高まっていた。このため、2004年より、KEKB・PFリングへの同時トップアップ運転を目標とし、入射器の機器パラメーターをパルスごと（最大50Hz）に切り替えるためのアップグレード計画を開始した。

2005年夏の新PF-BT建設を皮切りに、KEKB電子/PFへの同時入射を達成し^[1, 2]、2009年4月には、KEKB電子/陽電子およびPFへの3リング同時トップアップ入射を実現した^[3]。このような複雑な運転方式において、より安定なビーム運転を目指すために、アライメントの重要性が再認識されることとなった。また、Super-KEKBの電子ビーム入射においては、現状の5倍の電荷量(5 nC)かつ5分の1の規格化エミッタンス(20 mm-mrad)のビームが要求される。このため、昨年度よりアライメントシステムの再構築が精力的に進められている^[4, 5, 6]。

3. レーザーアライメントシステム

3.1 システム構成

入射器は、180度偏向部を挟み100 m長(AおよびBセクター)および500 m長(C~5セクター)の2つの直線部から構成される全長600 mの線形加速器である(図1)。2つの直線部には、それぞれレーザー光源が置かれ、独立したアライメント計測が可能である。レーザーを用いたアライメントシステムは、入射器建設当初に導入されたものであり、レーザー出射部および検出部から構成される。入射器の加速管架台の上流および下流側には、四分割光ダイオード(Photo-Diode; 以下、PD)が設置されている。

図2に、入射器基本ユニットの構成図を示す。基本ユニットは、円筒形(Φ508 mm)の10 m長加速管架

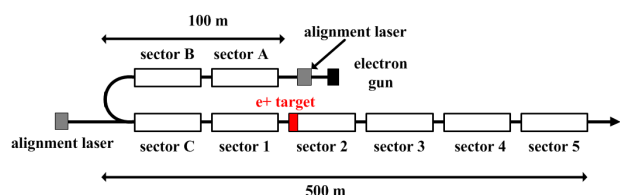


図1：KEKB入射器の構成

¹ E-Mail: masanori.satoh@kek.jp

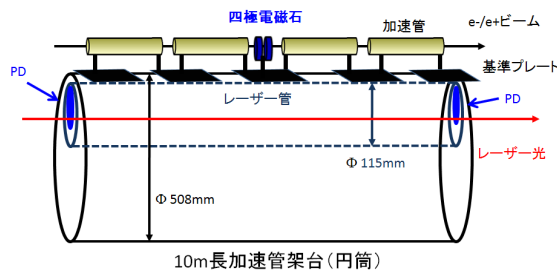


図2：入射器基本ユニットの構成図

台を基本とし、この上部には、加速管および電磁石を設置するための基準プレートが設けられている。1台の架台には、2 m長加速管が4本設置され、基本ユニット8台で1つのセクターが構成される。加速管架台の内部には、アライメント用レーザー管(Φ115 mm)が設置されており、上下流側にはPD用チェンバーが設置される。このように、レーザー管を二重管構造としたのは、空気の揺らぎによるレーザー光の変動を抑制するためである。さらなるレーザー光安定化を目指し、レーザー管内を真空状態にするための予備試験が平行して進められている^[7]。

図3に、本システムを用いたアライメント方法の概要を示す。本方式では、二箇所の基準PD位置において中心を通るようにレーザー光軸を調整し、各PD上でのレーザー位置を計測する。これにより、基本ユニットの基準レーザー光軸からの相対位置が測定される。基本ユニット内のアライメントについては、加速管架台のPD中心、加速管中心および基準プレート間の相対位置が事前にアライメントされているため、ユニット間のアライメントを実行すると、加速管および電磁石のアライメントも必然的に達成されることとなる。入射器では、加速管設置誤差による横方向ウェーク場の影響や、四極電磁石設置誤差によるビーム変位の影響から、±0.1 mm以下のアライメント精度が要求されている。

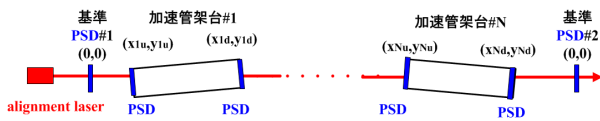


図3：レーザー及びPDによるアライメント方法

3.2 レーザーおよび姿勢制御システム

今回のアライメントシステム再構築においては、主にレーザー出射部の置き換えをおこなった。出射部は、赤色レーザーダイオード(波長660 nm)、自動ステージおよび後述する光学系ユニットから構成される。レーザーおよび光学系ユニット間はシングルモードファイバー(コア径3.5 μm)を用いて接続し、レーザー自身に起因するビーム位置不安定性を抑制するとともに、モードスクランブラによるクラッドモードの除去をおこなっている。また、ファイバー接続方式の採用によって調整の簡便化を図ると共に、レーザーおよび電源を放射線の影響が少ない地上部へ設置し、ビーム運転中においてもアライメント測

定をおこなうことを可能とした。

3.3 PDおよび検出装置

PDには、Φ10 mmの四分割シリコンフォトダイオード(OSI Optoelectronics社製 SPOT-9D)を用いている^[8]。PDチェンバー側部には稼働レバーが装備されており、測定箇所以外においては、PDホルダーを機械的に倒してアライメントレーザー光を下流側へ通過させる。

PD面上にレーザー光を照射すると、各シリコンフォトダイオードには検知した光強度に比例した電流が流れる。この電流値は、検出装置を用いて読み出され、割り算回路による演算処理の後、レーザー光の重心位置として計測される。本検出装置は、前面のメーターパネルにより、水平および垂直方向に対応した重心位置を目視にて読みとることが可能である。また、パネル背面のBNC端子より、各ダイオードに流れた電流および水平・垂直位置に対応した電圧を出力することができるため、オシロスコープを用いた測定値のデジタル化が可能である。

3.4 PDの劣化試験

アライメント測定に先立ち、500 m直線部に設置されている全116台のPDユニットを撤去し、テストベンチにおいて感度誤差測定をおこなった。この結果、約2割のPDに5%以上のダイオード間感度誤差が認められたが、これらのものは新規品と交換することとした。新規のPDは、PDチェンバーへ精度良く取り付けることが要求されるが、この方法の詳細は他稿を参照されたい^[12]。

4. アライメントレーザー光学系

4.1 概要

図4に、本実験で使用したレーザー光学系の概略図を示す。本光学系は、平面ミラーおよび球面ミラーがプレート上(162 mm x 340 mm)に配置されたものである。シングルモードファイバー先端から出射したレーザー光が、図5中の経路1のように、まず平面ミラー中央にある開口を通過し、適当な大きさに広がったビームが球面ミラー(口径および焦点距離: 152.4 mm)で反射される。その後、経路2に沿って進んだレーザー光は、平面ミラーにて45°の角度に反射され、経路3に沿って下流へ導かれるものである。

図5は、平面ミラー部の拡大概略図を示したものである。本光学系では、ファイバーの先端部は、中央にΦ1 mmの開口をもつ平面鏡の前面より6 mm後方の位置に固定した。ファイバー先端部には、第1アパーチャーとしてワッシャー(開口径Φ10 μm、厚さ100 μm)を取り付け、積極的な回折を発生させる。第1アパーチャー部で回折されたレーザー光は、その後、第2アパーチャーとしての平面ミラー開口部

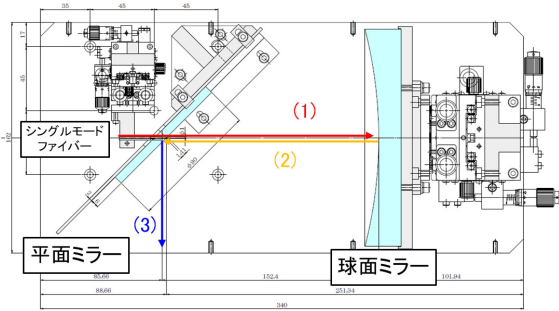


図4：レーザー光学系の概略図

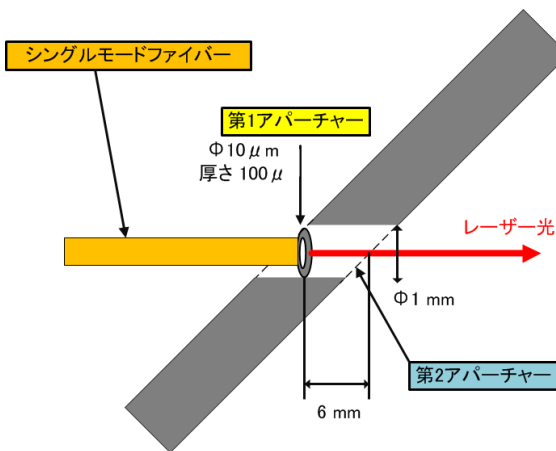


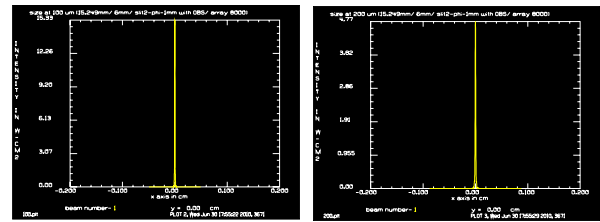
図5：平面ミラー部の拡大図

($\Phi 1 \text{ mm}$)において、サイドローブビームの回折パターンが断ち切られる。これにより、小口径のメインローブビームのみを伝搬させることが可能となっている。本方式では、2つの開口を用いたエアリービームの生成をおこなっているが、これは、小口径かつ回折に強いビームを生成・伝搬するための方法である^[10]。また、レーザー光の径は、平面および球面ミラー間距離を変化させることにより、微調整が可能である。

4.2 レーザー光プロファイルシミュレーション

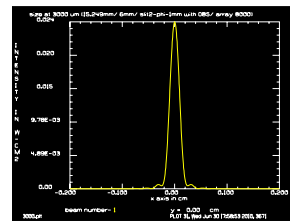
図6は、本光学系でのレーザー光プロファイルシミュレーションの結果を示している。シミュレーションには、計算コードGLAD Ver. 5.5(Applied Optics Research社製)を使用した^[11]。本図において、 s は、ファイバー出射面からの距離を表したものであり、(a)は第1アパーチャー部、(d)は第2アパーチャー部でのレーザー光プロファイルを示している。

図中の(e)は、ファイバー出射面から10 mm下流位置でのプロファイルを表している。比較のため、第2アパーチャーが無い場合の同位置におけるプロファイルを(f)に示す。これらを比較すると、第2アパーチャーを設けることにより、サイドローブビームの伝搬を抑制し、メインローブビームのみが伝搬されていることが確認できる。



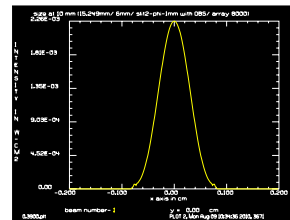
(a) $s = 100 \mu\text{m}$

(b) $s = 200 \mu\text{m}$



(c) $s = 3 \text{ mm}$

(d) $s = 6 \text{ mm}$



(e) $s = 10 \text{ mm}$

(f) $s = 10 \text{ mm}$ (第2アパーチャーが無い場合)

図6：光学系球面ミラー部までの水平方向レーザー光プロファイルのシミュレーション結果

5. レーザー光伝送試験

上述の光学系を用いて、100 m長のレーザー光伝送試験をおこなった。本試験は、図1のABセクター部の大気中でおこない、プロファイル測定には大口径ビームプロファイラー(Ophir Optonics社製)を使用した。本器は、最大測定ビーム径24 mm x 36 mmかつピクセル数4000 x 2672の分解能を有し、PCとUSB接続することにより、ビームプロファイル・重心位置・水平および垂直方向ビーム径を測定することが可能である。

図7に、レーザー光プロファイルの測定結果を示す。図中の s は、平面ミラー反射面からの距離を示しており、0.5~100 mまで約20 mおきのプロファイルを測定した。図7-(a)は、中心部のレーザー光強度がほぼゼロになっていることを示しているが、これは、平面ミラー開口部においてレーザー光が反射されないことを示している。しかしながら、下流においてはこのような分布は見られなくなり、ガウシアンビームとして伝搬されていることが見て取れる。

図8に、実験に使用した光学系をモデルとした水平・垂直方向ビームプロファイルのシミュレーション結果を示す。ここで、 s は測定結果と同様に平面ミラー反射面からの距離を示しており、1~100 mまで10 mごとの計算結果を示した。図7-(c)および図8-(c)は、20 m地点での測定およびシミュレーション結

果を表している。両者を比較すると、干渉縞のパターンに類似性が見られるものの、プロファイルのアスペクト比および干渉縞の幅などが一致していない。本実験に置いては、球面ミラーへのビーム入射がミラー中心に対して斜入射しているため、測定で見られるようにレーザー光が楕円形をしているものと考えられる。また、干渉縞幅の不一致は、シミュレーションにおいては回折の効果のみを考慮し、球面ミラーでの収差の影響を考慮していないことに起

因すると考えられる。しかしながら、20 mよりも下流地点においては干渉縞が見られないなど、シミュレーションによって、測定ビームプロファイルが再現可能であることを示している。

図9は、レーザー光サイズの測定結果およびシミュレーション結果をプロットしたものである。ここでのビームサイズは、強度分布をガウシアンフィットしたものの 4σ として定義している。本シミュレーションでは、レーザー光が球面ミラーの中

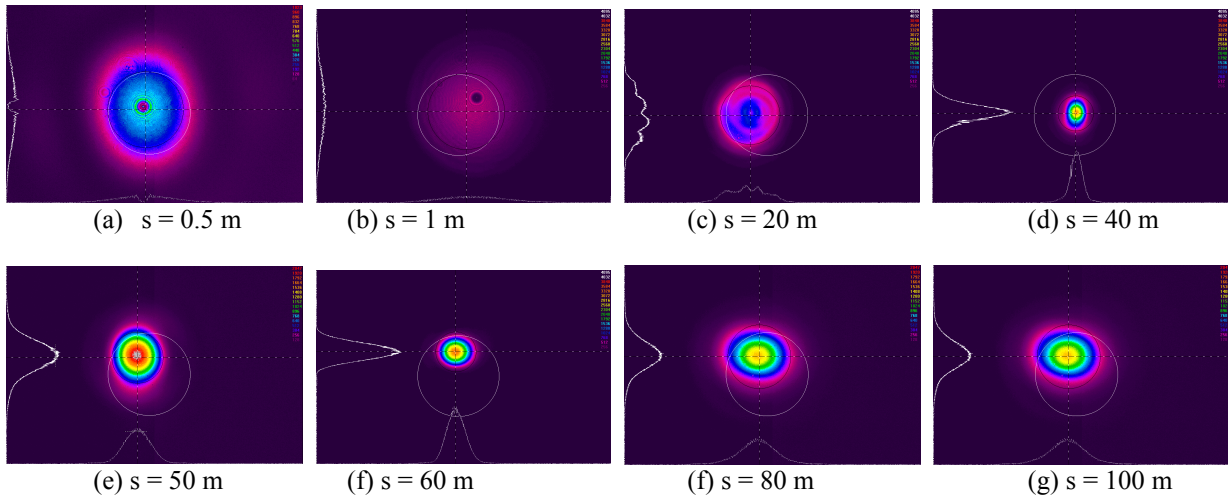


図7：100 m長ABセクターにおけるレーザー光プロファイルの測定結果（大気中）

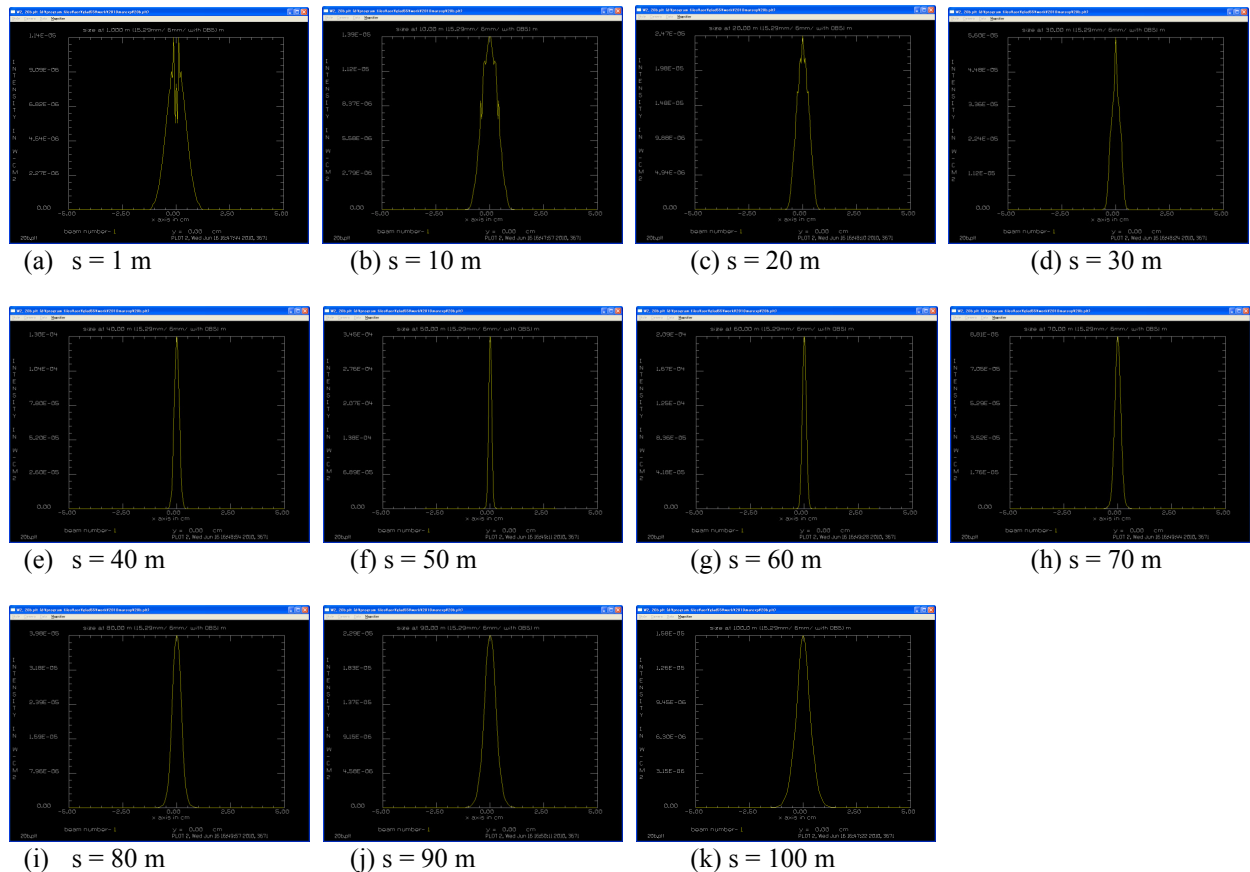


図8：水平・垂直方向レーザー光プロファイルのシミュレーション結果

心に直入射していると仮定しており、水平・垂直方向のビームサイズは完全に一致している。一方、前述のように、測定結果における水平・垂直方向ビームサイズの差異は球面ミラーへの斜入射に起因している。今後は、斜入射の効果を考慮した精密なシミュレーションをおこなうことにより、実験結果の完全な再現をめざす予定である。しかしながら、これらの結果は大局的には一致しており、本シミュレーションコードを用いた最適光学系の設計は妥当であると考えられる。

また、測定結果に示したようなレーザー光およびPDを用いて、Cセクター(図1)のアライメント計測をおこなったが、詳細は他稿を参照されたい^[13]。さらに、入射器では、アライメントテレスコープおよび水準器を用いた方法^[14]によるアライメント計測もおこなっており、レーザーによる方法と相互補完的な関係となっている。このように、異なる方法を用いた測定は、アライメント計測結果の信頼性の検証に大変有用であると考えられる。

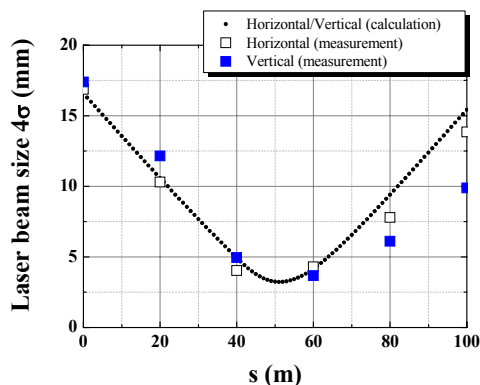


図9：レーザー光サイズの測定およびシミュレーション結果

6. まとめと今後の課題

入射器では、Super-KEKBへ向けて、レーザーアライメントシステムの再構築をおこなっている。これにともない、光学系の再設計を進めており、予備的なレーザー光伝送試験をおこなった。本試験で用いた光学系は、平面および球面ミラーから構成され、平面ミラー部に設置した径の異なる二種類の開口により、エアリービームを生成するものである。本方式を用いることにより、小口径かつ回折しにくいメインローブビームの伝送が可能となる。本光学系を用いて、100 m長のレーザー光伝送試験をおこない、シミュレーション結果との比較をおこなった。本シミュレーション結果は、測定結果を良く再現しており、本計算コードでの光学系設計の妥当性が確認された。

今後は、さらに高精度な測定結果との一致を目指して、収差の影響および球面ミラーへの斜入射の影響を取り入れた高精度なシミュレーションをおこなう予定である。また、これと平行して、500 m長伝送のための最適光学系の設計を進めていく予定であ

る。さらに、Super-KEKBの電子ビーム入射に関する要求エミッタンスの実現が、どの程度の加速管設置誤差まで許容できるかについても、計算機シミュレーションによる検討を進めていく予定である。

謝辞

レーザー伝送試験および準備作業に協力して頂きました、(株)三菱電気システムサービスの皆様に感謝致します。また、システム全体に関して様々な助言を頂きました、(株)トヤマの飯野陽弼氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 佐藤政則, 日本加速器学会誌 第3巻2号 2006, p. 171.
- [2] 佐藤政則, 日本加速器学会誌 第5巻2号 2008, p. 144.
- [3] 菊池光男, 飯田直子, 大西幸善, 小川雄二郎, 紙谷琢哉, 古川和朗, 三増俊広, “KEKB-HER, LELB-LER, PFの三リングへの同時入射に成功”, 日本加速器学会誌 第6巻3号 2009, p. 231.
- [4] T. Suwada and M. Satoh, “LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC: DESIGN OF THE OPTICAL SYSTEM”, in Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, Japan, Aug. 5-7, 2009, pp. 79-81.
- [5] T. Suwada and M. Satoh, “LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC: DESIGN OF THE MEASUREMENT SYSTEM”, *ibid.*, pp. 82-84.
- [6] M. Satoh et al., “LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC”, *ibid.*, pp. 1159-1161.
- [7] Y. Mizukawa, S. Ushimoto, N. Toyotomi, K. Suzuki, T. Suwada, M. Satoh, E. Kadokura, “VACUUM MEASUREMENT OF LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM AT THE KEKB INJECTOR LINAC”, in these proceedings.
- [8] <http://www.osioptoelectronics.com/home.aspx>
- [9] E. Kadokura, T. Suwada, M. Satoh, “LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC: CALIBRATION OF SILICON PHOTODETECTORS”, in Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, Japan, Aug. 5-7, 2009, pp. 94-96.
- [10] S. Wang, Q. Lin, D. Zhao, Q. Chen, “How to get Airy disc from Airy pattern”, *Optics & Laser Technology* **31**, pp. 437-441, 1999.
- [11] <http://www.aor.com>
- [12] E. Kadokura, T. Suwada, M. Satoh, “LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM AT THE KEKB LINAC: CALIBRATION OF SILICON PHOTODETECTORS (II)”, in these proceedings.
- [13] T. Suwada, E. Kadokura, M. Satoh, “LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC”, in these proceedings.
- [14] T. Kume, E. Okuyama, M. Satoh, T. Suwada, K. Furukawa, “Straightness Measurement of the KEK Injector Linac Using a Level”, in these proceedings.