

LASER BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE KEKB INJECTOR LINAC

Masanori Satoh^{#, A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Souichi Telada^{B)}, and Kaoru Minoshima^{B)}

^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{B)} Length Standards Section, Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and

Technology (AIST),

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japan

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. A new laser optics aiming the stable beam propagation has been developed for the laser-based alignment system. The new system comprises two convex lenses with different focal length, six flat mirrors, and a flat-parallel glass plate. By using this system, the 300-m-long laser propagating is tested, and its profile is measured. In this report, we present the overview of the new alignment system and its test results in detail.

KEKB 入射器におけるレーザーアライメントシステム

1. 概要

KEKB 電子陽電子入射器（入射器）では、Super-KEKB に向けた入射器ビームの高品質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、500m 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最終目標としている。このために、新規レーザー光学系の構築および 300m 長のレーザー伝送試験をおこなった。本稿では、本アライメントシステムの構成および試験結果について報告する。

2. はじめに

入射器は、4 つの独立したリング（KEKB 電子/陽電子、PF、および 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約 20 年経過したが、現在でも、日々のビーム運転安定化を目指し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 3 リング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（20 ms 間隔）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 リング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、現在建設中の Super-KEKB 計画においては、電子ビーム入射に対して従来の 5 倍の電荷量（5 nC）かつ 5 分の 1 の規格化 rms エミッタンス（20 mm-mrad）という高品質ビームが要求される。このため、近年、アライメントシステムの再構築を精力的に推進している^[4, 5, 6, 7, 8]。

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、100m 長（A, B セクター）および 500m 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（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 10m 長加速管架台を基本とし、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

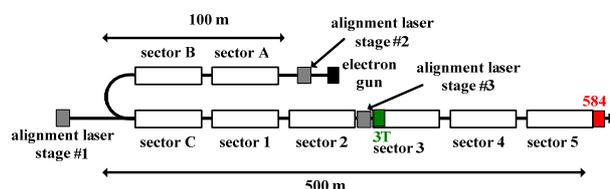


図 1 : KEK 入射器の構成

[#] masanori.satoh@kek.jp

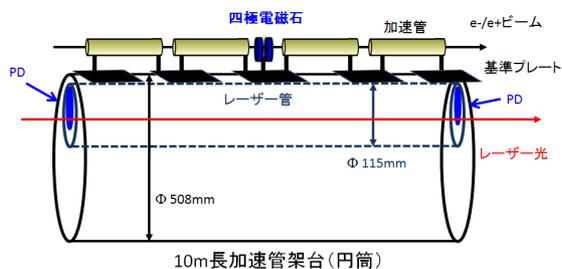


図 2 : 入射器基本ユニットの構成図

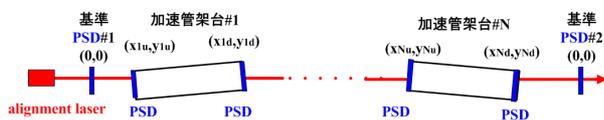


図 3 : レーザーおよび PD によるアライメント方法

る。1 台の架台には、2m 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、空気の揺らぎおよび温度変化に起因す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試験も平行して進めてきた^[9]。

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、二カ所の基準 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、±100 μm 以下のアライメント精度が要求されている。

3.2 レーザーおよび姿勢制御システム

これまで、レーザーダイオードを基本としたファイバー結合型レーザー出射部を、5 軸自動ステージ上に据え付けたタイプのシステムを構築し、種々の試験をおこなってきた。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ともに、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目指した。しかしながら、これまでの実験結果から、ファイバー出射ビームが純粋な TEM00 モードではないことに起因し、長距離伝送時にビームプロファイルが不均一になるという結論を得た。

本アライメントシステム再構築においては、主にレーザー光学系の置き換えをおこなった。レーザー

光源としては、最も理想的なガウシアンビームに近い特性を持つ理由から、赤色 He-Ne レーザー (波長 633 nm、出力 1 mW) を採用した。赤色は、本アライメントシステムで使用している PD の臨界波長に近いので、以前に使用していた緑色レーザーダイオードよりも有利である。レーザー光学系は、これにくわえて、2 枚の凸レンズ、6 枚の平面ミラー、および平行平板ガラスから構成される。これらのコンポーネントは、機械的に安定な光学ブレッダボード (600 mm x 1500 mm x 112 mm) 上に設置されている。図 4 および図 5 に、レーザー光学系の概略図と写真を示す。

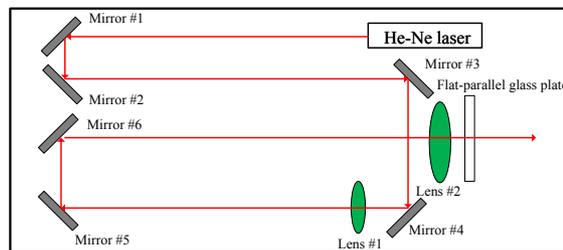


図 4 : レーザー光学系の概略図

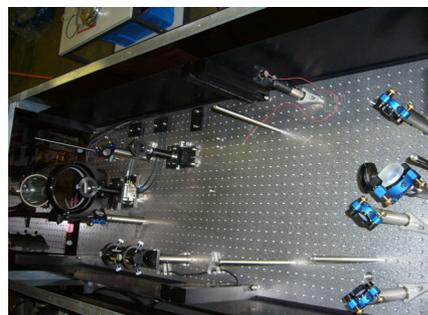


図 5 : レーザー光学系の写真

1 枚目および 2 枚目のレンズは、焦点距離 300 mm (Φ 30 mm) および 1500 mm (Φ50 mm) のものを使用した。レーザーから 1 枚目のレンズまでの距離は約 2050 mm、これより 2 枚目のレンズまでの距離は約 1800 mm となっている。複数の平面ミラーを用いてビーム光路を多数回折り返すことにより、比較的コンパクトな空間で最適なレンズ間距離を実現している。

レーザー光の姿勢制御としては、従来、5 軸の自動ステージを用いていた。このシステムは、姿勢制御の自由度が高まる反面、多段に組み合わせたステージの機械的揺らぎのため、長時間一定の姿勢を保つことが困難であった。このため、基準レーザー光軸の頻繁な調整が不可欠となり、アライメント測定の効率を著しく低下させることとなった。新システムでは、平行平板ガラス (Φ150 mm) を用いて水平および垂直方向のオフセット位置を調整する。レーザー出射角度については、ピエゾ素子を用いて 2 枚目のレンズの水平および垂直方向オフセットを微細調整する。これにより、レーザービームの左右角および仰俯角の高精度制御が可能である。現実的には、最上流 PD の信号を基にオフセット調整をお

こない、最下流 PD の信号を基にして角度調整をおこなう。このような調整を繰り返すことにより、最上流および最下流 PD 中心を通るような参照レーザービーム軸を決定する

3.3 PD および検出装置

PD には、 $\Phi 10$ 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^[10]。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、水平および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 のゲイン測定

アライメント測定に先立ち、500m 直線部に設置されている全 116 台の PD チェンバーを撤去し、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ため、新規品との交換をおこなった。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^[11, 12, 13]。

4. レーザー光伝送試験

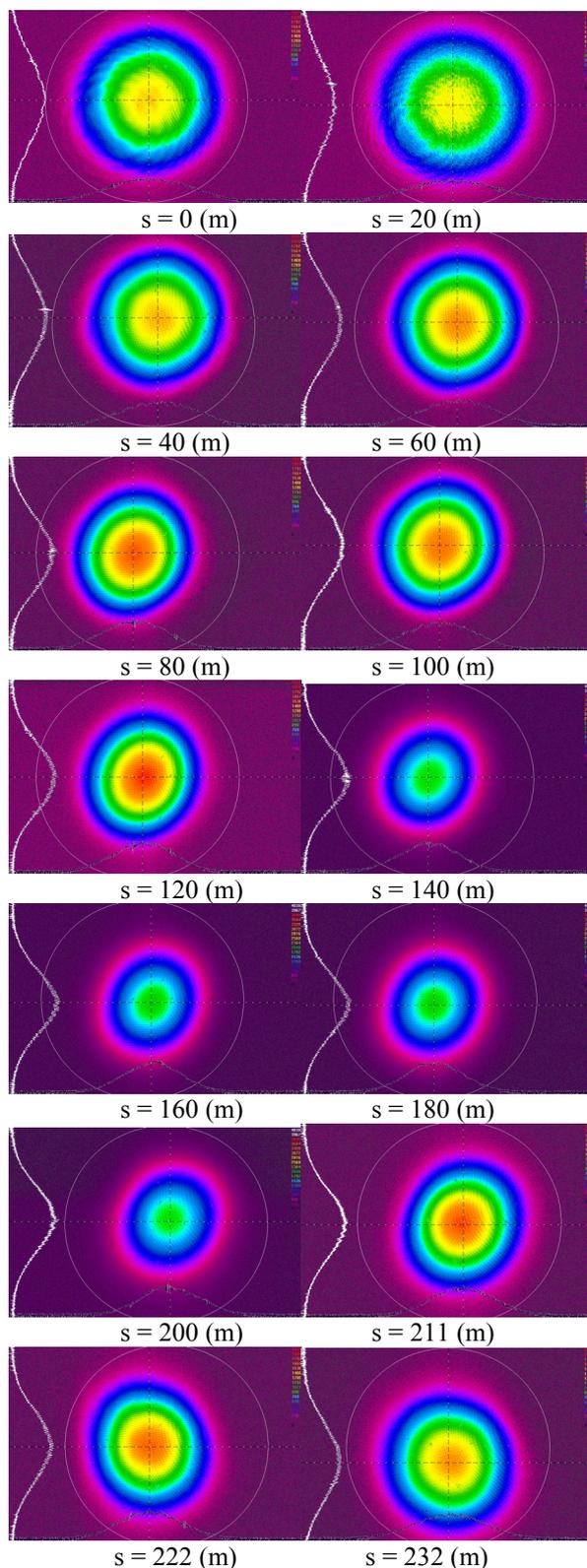
4.1 300m 長伝送試験

前述の新光学系を用いて、300m 長および 230m 長のレーザー光伝送試験をおこなった。はじめに、産業技術総合研究所のレーザートンネル (全長 250 m) において、300m 長試験を実施した。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あり、極めて環境が良好である。本試験中は、空気の揺らぎを極力抑制するために全ての空調をオフにした。このため、実験中のトンネル内温度は $17 \pm 0.2^\circ\text{C}$ の範囲で一定に保持されている。また、300 m の伝送距離を確保するため、途中に大型ミラーを設置して、レーザービームを折り返し伝送させた。

図 6 および図 7 に、300m 長試験の測定結果を示す。図 6 は、20m 毎のレーザービームプロファイルの測定結果を示している。また、図 7 は、同地点での水平および垂直方向の 4σ ビームサイズをプロットしたものである。本図で、エラーバーは 50 回測定した結果の標準偏差を示している。本測定には、大口径ビームプロファイラ (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 が示すように、ビームサイズは出射部および



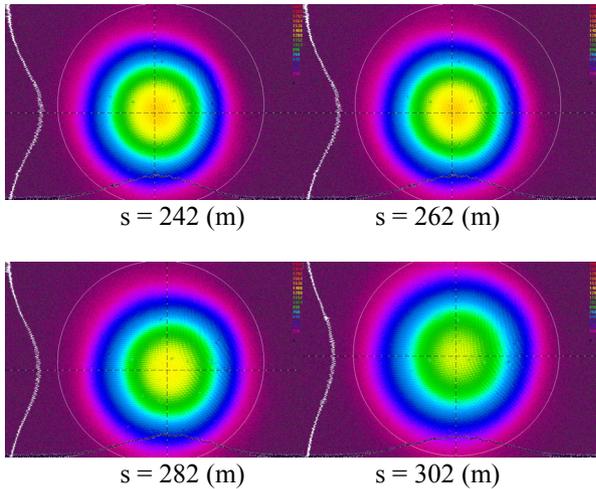


図 6 : レーザービームプロファイルの測定結果 (300 長伝送試験)

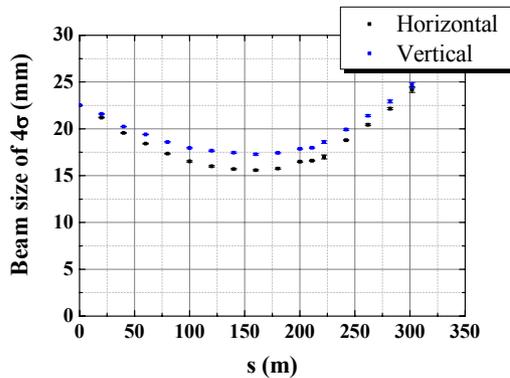


図 7 : レーザービームサイズの測定結果 (300m 長伝送試験)

300m 下流部でほぼ同一サイズになり、中間地点である 150m 地点においてウェストを持つように二枚のレンズ間距離を調整した。また、出射部および終端部では円形であるビームプロファイルが、途中、楕円形状になっている。これは、レーザーがレンズ中心から微少にずれている影響と考えられるが、PD の径はレーザービームサイズと比して十分小さいため、測定への影響は軽微である。しかしながら、測定誤差への影響の定量的解析も進めている。

4.2 230m 長伝送試験

本試験は、レーザー光学系を入射器トンネル内へ移設し、レーザービームの安定性を調べる目的でおこなった。設置場所は、PF および PF-AR リングへのビーム入射に用いている 3T 電子銃ユニット上流であり、図 1 の alignment laser stage #3 位置に対応する。本試験では、空気のゆらぎによるレーザービーム変動を避けるため、レーザー光学系全体をアクリルの箱で覆った。

まず、約 20m 毎の水平および垂直ビームサイズの測定をおこない、図 8 のような結果を得た。本図で、エラーバーは 200 回測定した結果の標準偏差を示している。本試験では、前述の 300m 試験と異な

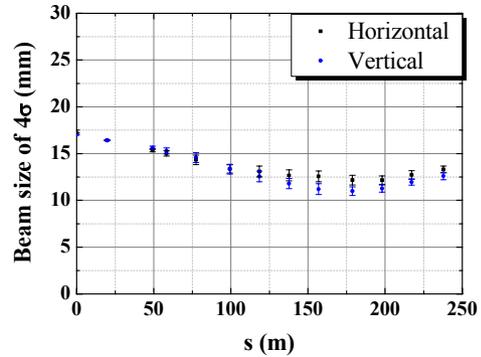


図 8 : レーザービームサイズの測定結果 (230m 長伝送試験)

り、ほぼ最下流にウェストを持ち、かつ全長に渡りビームサイズを小さくするように調整した。このプロファイルを用いることにより、500m 長アライメント測定にも対応可能となり、PD の位置感度係数を増大することが出来る点においても有利である。本試験においても、前述のビームプロファイルを用いてすべての測定をおこなった。

次に、3T 電子銃ユニット下流および最下流である 584 ユニットにおいて、ビームサイズおよび重心位置の安定性を測定した。ビーム出射部から 584 ユニット下流までの距離は、約 230 m である。図 9 に測定結果を示す。本測定結果は、300 点 (約 10 分間) 測定した水平および垂直方向のビームサイズ、ならびにビーム重心位置のばらつきを示したものである。本測定は、3T ユニットから 584 ユニットの間のすべてのレーザー管を接続した状態、かつ大気圧にておこなった。584 ユニット下流における測定では、レーザー出射部からレーザー管の間をアクリルパイプで覆い、さらに厚さ 15 mm のガラス窓をレーザー管入射部に装着 (入射窓) した場合と、これに加えて、レーザー管最下流にも同様なガラス窓を装着 (出射窓) した場合についても測定もおこなった。また、図 10 および図 11 は、図 9 と同時刻における 584 ユニット下流でのビーム重心位置の時間変化をプロットしたものである。

ビーム重心位置の変動は、入射窓およびアクリル

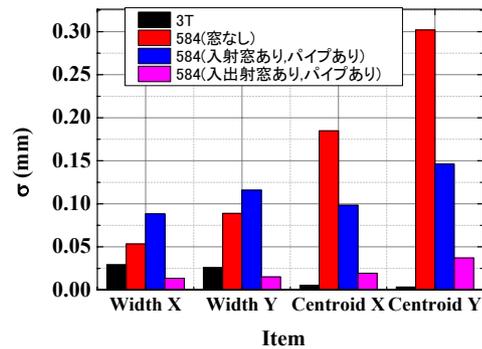


図 9 : 出射部および 230 m 下流地点におけるレーザー光サイズおよび重心位置変動の標準偏差

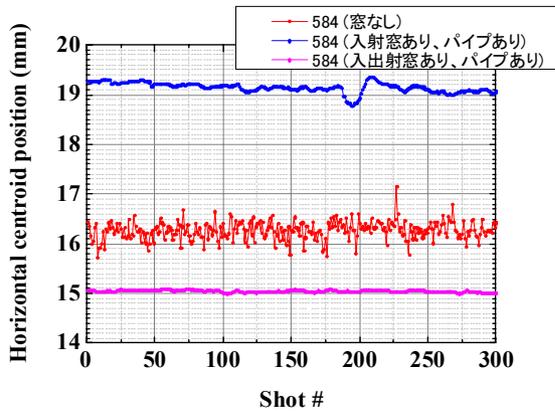


図 1 0 : 230m 下流地点でのレーザー光水平重心位置の変動

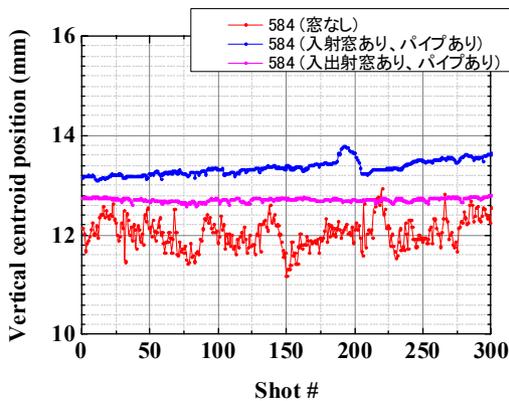


図 1 1 : 230m 下流地点でのレーザー光垂直重心位置の変動

パイプを設置することにより約半分まで抑制することができた。図 1 0 および 1 1 から、特に、速い変動成分が除去されていることがわかる。さらに、出射窓を設置することにより、これらを取り付ける前の約 1/10 に重心位置変動が抑制された。これは、レーザー管内の空気揺らぎを、極限まで抑えた効果である。具体的には、水平および垂直ビームサイズ変動の標準偏差は、それぞれ、 $\sigma_{width, x} = 13.6 \mu\text{m}$, $\sigma_{width, y} = 15.2 \mu\text{m}$ であった。また、水平および垂直方向ビーム重心位置の変動は、それぞれ、 $\sigma_{cent, x} = 19.4 \mu\text{m}$, $\sigma_{cent, y} = 37.1 \mu\text{m}$ であり、これらは測定精度目標値である $\pm 100 \mu\text{m}$ よりも十分小さい。

最後に、長時間レーザービーム安定性に関する測定をおこなった。本測定は、レーザー管内を 10 Pa 程度の中真空状態に保った状態で実施した。図 1 2 は、約 18 時間に渡って、584 ユニット下流へ据え付けたビームプロファイラによる水平および垂直レーザービームサイズの変動をプロットしたものである。同図には、つくば市の外気温もあわせてプロットしている。入射器は、現在夏期保守期間中であり、トンネル内の冷却水および空調の運転時間は 8:00 から 20:00 の間である。それ以外の時間は、冷却水および空調の運転は停止している。図 1 2 より、ビームサイズ変動の幅は、冷却水・空調運転時には

約 $40 \mu\text{m}$ であるが、停止時には約 $10 \mu\text{m}$ であることが確認できる。これは、冷却水および空調の機械振動が、レーザー出射部の架台および測定器に影響を及ぼすためである。しかしながら、平均化処理することにより、このような速い変動を測定値から除去することが可能である。

図 1 3 は、同時刻における、水平および垂直方向のレーザービーム重心位置変動をプロットしたものである。本図は、水平方向の変動は約 0.4 mm であるが、垂直方向の変動は約 2 mm と大きいことを示している。とりわけ垂直方向の変位は、外気温との強い相関が見取れる。これは、温度変化に起因した建物変形により、レーザー設置部の床面が傾き、測定地点でのレーザー重心位置がずれることを示唆している。現在、この原因を詳しく追求するため、レーザー設置部に高精度傾斜測定器を設置し、データ収集を開始した。詳しい測定および解析結果については、次回の学会にて報告する予定である。このような建屋変形自身を抑制することは非常に困難であるため、レーザー出射角の精密フィードバックおよび測定結果の補正について検討している。今回の一連の実験結果から、本測定システムを用いた 500m 長アライメント測定方法の実現性に目途がついたといえる。

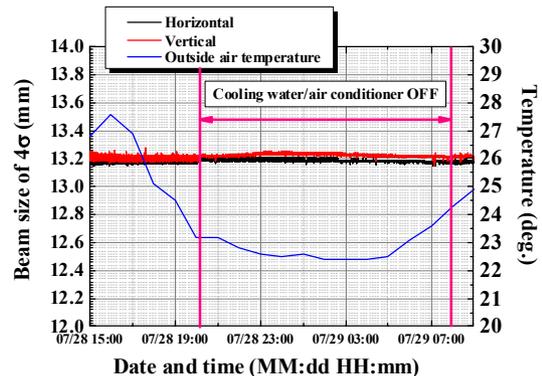


図 1 2 : 230m 下流地点でのレーザービームサイズの長時間変動

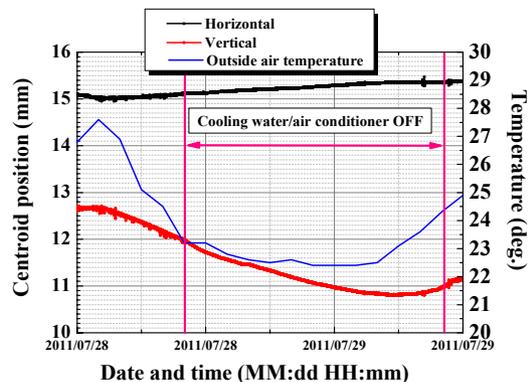


図 1 3 : 230m 下流地点でのレーザービーム重心位置の長時間変動

5. まとめ

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、光学系の再構築をおこなった。本光学系を用いて、300m 長および 230m 長のレーザー光伝送試験をおこない、安定な伝送特性を確認した。これらの結果より、本システムを用いたアライメント計測の実現可能性が確認できた。今夏の長期保守期間中に、230m 長アライメント測定 (3~5 セクター) を実施する予定である。その後、500m 長レーザービーム伝送試験およびアライメント測定を実施する計画である。これらの結果は、水準器を用いた垂直方向アライメント計測^[15]の結果と互いに比較、検証する予定である。また、さらに高精度なアライメント計測をめざし、フレネルゾーンプレートによる測定方式^[16, 17]を並行して開発中である。

謝辞

レーザービーム長距離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。PD ホルダーのリーク試験にご協力いただきました、KEKB 真空グループの白井満氏および柴田恭氏に深く感謝いたします。また、システム全体に関してさまざまな助言および有益な議論をさせて頂きました、KEK 加速器研究施設・加速器第五研究系・榎本収志主幹、古川和朗教授、および(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] 佐藤政則ほか, 日本加速器学会誌 第3巻2号 2006, p. 171.
- [2] 佐藤政則ほか, 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] M. Satoh, T. Suwada, and Eiichi Kadokura, “LASER PROPAGATION CHARACTERISTICS IN LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC”, in Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, August 4-6, 2010, pp. 1175-1179.
- [8] T. Suwada, E Kadokura, and M. Satoh, “LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB

- INJECTOR LINAC”, *ibid.*, pp. 276-278.
- [9] Y. Mizukawa, S. Ushimoto, N. Toyotomi, K. Suzuki, T. Suwada, M. Satoh, and E. Kadokura, “VACUUM MEASUREMENT OF LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM AT THE KEKB INJECTOR LINAC”, *ibid.*, pp. 1180-1184.
- [10] <http://www.osioptoelectronics.com/home.aspx>
- [11] E. Kadokura, T. Suwada, and 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.
- [12] E. Kadokura, T. Suwada, and M. Satoh, “LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM AT THE KEKB LINAC: CALIBRATION OF SILICON PHOTODETECTORS (II)”, in Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, August 4-6, 2010, pp. 1172-1174.
- [13] K. Hisazumi, T. Minami, Y. Mizukawa, T. Suwada, and M. Satoh, “High-Precision Mount Method of Photo Detector in Laser-Based Alignment at the KEKB Injector Linac”, in these proceedings.
- [14] T. Kume, E. Okuyama, M. Satoh, T. Suwada, and K. Furukawa, “Straightness Measurement of the KEK Injector Linac Using a Level”, in Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, August 4-6, 2010, pp. 1168-1171.
- [15] T. Kume, E. Okuyama, M. Satoh, T. Suwada, and K. Furukawa, “DETECTION FOR THE FLOOR LEVEL CHANGE USING A LEVEL” in these proceedings.
- [16] T. Suwada and M. Satoh, S. Terada, and K. Minoshima, “NEW LASER ALIGNMENT WITH FRESNEL LENSES AT THE KEKB INJECTOR LINAC”, in these proceedings.
- [17] T. Suwada, M. Satoh, S. Telada, and K. Minoshima, to be submitted to Appl. Opt.