

KEKB 入射器における遅いトンネル床面変動の動的観測

DYNAMICAL OBSERVATION OF SLOW TUNNEL FLOOR MOTION AT THE KEKB INJECTOR LINAC

諏訪田 剛*

Tsuyoshi Suwada*

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Department of Accelerator Science, Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

The initial alignment of all the accelerator girder units was successfully finished on the basis of the high-precision laser-based alignment system in this March 2015 at the KEKB injector linac. Based on the initial alignment, the transverse displacements of the girder units were well aligned along an ideal fiducial laser axis. It is, however, troublesome to measure all the displacements of the girder units with a photo-sensor due to the manual operation scheme. This is a reason why we developed a remote-controlled measurement system for the girder units because more information on their dynamical motion owing to complex ground motion may be obtained, which is frequently described with a characteristic fractal law with the displacement variance $\langle dz^2 \rangle$ scaling with time T and space L intervals as $\langle dz^2 \rangle = AT^\alpha L^\gamma$ with both exponents close to 1 ($\alpha \simeq \gamma \simeq 1$). The obtained data over a half year during January to July 2015 on the dynamical motion of the girder units (or tunnel floor level) were analyzed on the basis of the ATL law with the use of a standard regression analysis, and then, the validity of the initial alignment will be discussed in detail.

1. はじめに

KEKB 入射器では長基線レーザーアライメントシステムの開発が 2009 年度に始まり 2013 年 3 月に終了した。その後、本システムを用いた初期アライメントが精力的に実施され、2015 年 1 月全セクターに渡る加速ユニットの初期アライメントをようやく完了した。初期アライメントとは、長基線レーザーを基準として加速ユニットを直線上にアライメントすることを意味する。本システムでは、加速ユニットの上下流端面に取り付けた光センサーのレーザー基準に対する変位がゼロとなるよう加速ユニットのアライメントが行われる。この測定は手動でセンサーを倒し測定後はセンサーを戻すという根気のいる作業で自動化はされていなかった。

これまで、加速ユニットの変位を継続して測定してきたが、その変位が時間とともに大きくなっていることが明らかになった。本現象の要因は地面変動と考えられるが、地面変動と一口に言っても外気温、日照、気圧、地下水の変位、海洋潮汐、波浪、ATL 則による地盤拡散等様々な要因が寄与する。さらに地面変動を通して 500m 長の入射器建屋が変形しトンネルの床面変動に変換され、最終的に入射器の加速ユニットが変位するという極めて複雑な過程が動的に作用すると考えられる。

現在の手動計測システムでは複雑に変化する全加速ユニットの動的変位を効率的に計測することは極めて困難である。このような経緯から計算機制御による加速ユニットの動的変位計測システムを導入することにした^[1]。遠隔制御が可能な光センサー 2 台を入射器の 500m 長直線部の中央に位置する建屋継目を挟んだ上下流に設置し、2015 年 1 月から加速ユニットと床面の変位計測を部分的ではあるが開始した。現在のところ相関要因を計測するセンサー類がないので相関要因の特定は困難であるが、加速ユニットと床面の変位傾向を長期間計測することで初期アライメント後の動的変位の定量

化が可能になる。将来的には本システムを入射器全長に拡張することで入射器全体の動的変位の定量化が可能になり、初期アライメント自体の有効性を議論できる。

本学会では、2015 年 1-7 月まで約半年間に及ぶ入射器トンネル床面の動的変動の連続観測とその解析結果について報告する。特に初期アライメントの有効性について議論する。

2. 長基線レーザーアライメントシステム

入射器は、180 度偏向部(エネルギー 1.5 GeV)を挟んで 2 本の直線部(125m 長 AB ライン及び 475 m 長 C5 ライン)からなる総長 600m の電子陽電子線形加速器である(図 1 参照)。各直線部の最上流にはレーザー光源を置き、独立して加速ユニットのアライメントを行うことができる。入射器のレーザーアライメントシステムは 30 年以上も前の建設時に整備されたものであるが、本研究ではレーザー光学系の新たな導入^[2]を省き、放射線損傷したセンサーの交換やレーザー光軸管の真空リークの修復を行い旧システムをほぼそのままの形で再利用している。

レーザー光軸の測定には四分割型シリコンフォトダイオード(QPD: Quadrant silicon Photo-Diode、直径 10 mm)が用いられる。QPD センサーをホルダー中心に装着した QPD ホルダーがフランジを介して加速ユニットの両端に接続されているので、QPD センサーにレーザーが照射されるとその強度重心が計測され加速ユニットの光軸に対する変位がわかる。この原理に基づき光軸に対する変位量がゼロとなるように加速ユニットの変位が機械的に調整される^[2]。

レーザーアライメントにおいて、レーザー光軸の安定化は極めて重要である。単純に 500 m 長にわたるアライメント精度を 100 μm とすると光軸の角度安定性は 0.2 μrad が必要である。このような微小角度の変化は高精度傾斜計を用いても測定は困難である。度重なる試行錯誤を経て安定した新たなレーザー光学系の開発に初め

* tsuyoshi.suwada@kek.jp

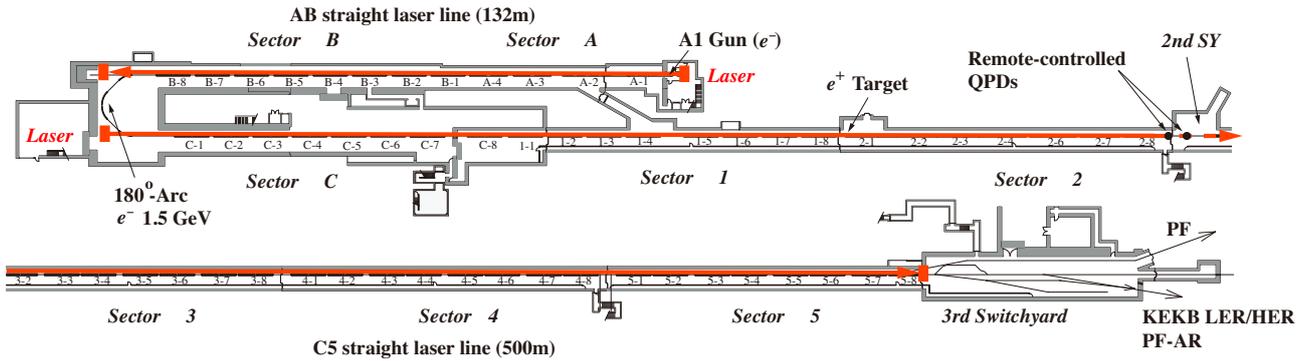


Figure 1: Schematic layout of the KEK injector linac and two independent laser fiducial lines shown as red arrows for the AB and C5 straight sections in the laser-based alignment system. The solid circles are shown as two remote-controlled QPDs installed at the 2nd beam switchyard.

て成功した^[3]。光学系で生成されたレーザーは、真空中に引かれた光軸管に入射し長基線レーザーとしてC5ラインに対し500m長の光軸(ABラインに対し132m長)を形成する。光学系出射端と直線部終端には光軸の基準点を決めるQPDが床面に固定されている。すなわち、光軸は2台の基準QPDの中心を通過するよう調整される。このように長基線を光軸として調整すれば加速ユニットの変位を機械的に容易に調整することができる。

光軸の入射角度は計算機によるフィードバック制御(FB)が可能になっており、FBによる入射角度の安定化により光軸の高安定化により成功した^[3]。光軸の伝送特性や安定性特性については別に報告しているのので参照してほしい^[3]。

3. トンネル床面の動的変動観測システム

C5ライン長直線部のほぼ中央に位置する2セクター終端(第2SY)に遠隔操作が可能な2台のリモートQPDを設置した。2セクター終端の建屋継目は上流のレーザー光源から259.64m下流に位置し、この継目から0.57m上流と3.68m下流にQPDが位置している。上流QPD(QPD28G6DA)は加速ユニット28の下流端に固定され、下流QPD(QPD28REFUA)は床面に固定された。この様子を図2に示す。

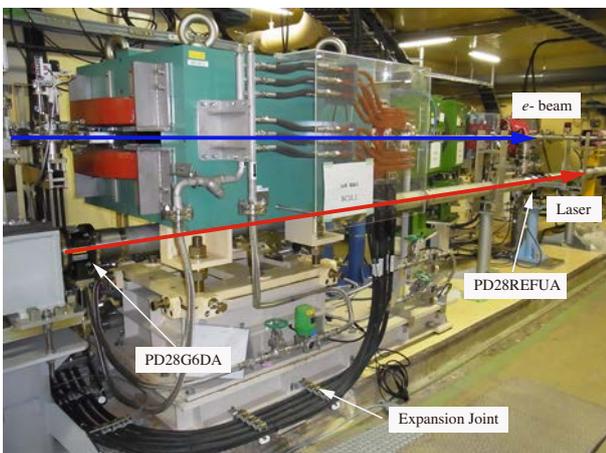


Figure 2: Remote-controlled QPDs installed at the 2nd SY.

レーザーアライメントはレーザー光軸を基準とするが、実は地面変動により光軸自身も変動する。光軸は始点及び終点QPDに固定されるので、地面変動が大局的である限り入射器の動的変位の大きさは入射器中央で最大となることが予想される。さらに第2SYでは新ダンピングリングへの輸送路が接続するので入射器と輸送路双方の共通基準点を設けている。このような理由からまずは第2SYにおける床面変動の調査を行うことにした。

QPDの遠隔操作は、スクリーンモニタ用のハードウェアを踏襲し、圧搾空気での駆動を制御するニューマチック方式とした。QPDによる自動計測システムの詳細は別の報告を参照してほしい^[1]。ここでは一連のデータ収集の流れについてまとめておく。

- (1) 毎定時にプログラムを起動し、レーザー光軸FBを停止して上流QPDを挿入する。
- (2) 上流QPDの変位を500回計測し平均値と標準偏差を算出する(時間~30秒)。
- (3) 上流QPDを挿入してから60秒後にこれを抜去し、さらに30秒後にレーザー光軸FBを再開する。
- (4) 定時から5分後にレーザー光軸FBを停止して下流QPDを挿入する。
- (5) 下流QPDの変位を500回計測し平均値と標準偏差を算出する。
- (6) 下流QPDを挿入してから60秒後にこれを抜去し、さらに30秒後にレーザー光軸FBを再開する。
- (7) 定時から10分後に終点QPDの変位データ(100回計測平均値と標準偏差)とFB用ステージの位置データを取得し全データをディスクに格納する。

4. 遅いトンネル床面変動の動的観測

4.1 光軸の安定性

トンネル床面の動的変動の観測は、制御ソフトウェアの調整を経て2015年1月5日に開始した。観測期間中のレーザー光軸は入射角度に対するFB制御により常時終点QPD(QPD584D)の中心に固定され、常に光軸安定性が確認された。得られた結果を図3に示す。光軸のQPD584Dにおける水平(x)及び垂直(y)方向の変位と光軸強度の時間変化を図3(a)、(b)、(c)にそれぞれ示す。ここで光軸強度はQPDの4チャンネルの出力和[mV]と

して定義される。

光軸の x 及び y 方向の変位分布をガウスフィットした結果、光軸の変位安定性はそれぞれ $\sigma_x \sim 30 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_y \sim 29 \mu\text{m}$ であった。また光軸の強度安定性は $\sigma_{int} \sim 1.2\%$ であった。得られた変位分布幅はレーザーのポインティング安定性から生じる分布幅に一致し、本システムにおける光軸安定性の限界を示す。光軸強度に若干の時間変化が見られるが、分布の広がりには変位安定性で説明でき放射線損傷に起因するものではないことが理解できる。

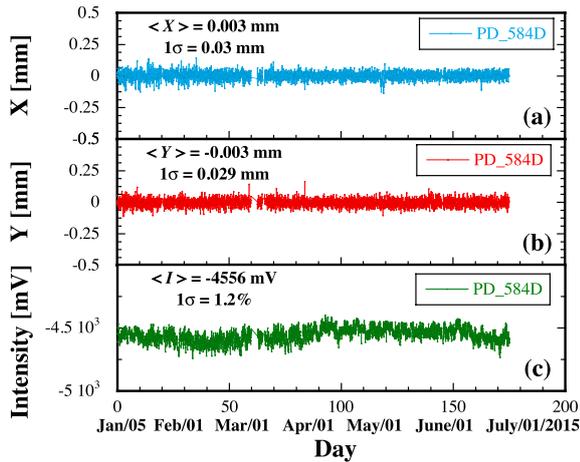


Figure 3: Time traces in the x and y displacements of the laser axis ((a) and (b)), and (c) the intensity at the final QPD with a feedback control on during 5/Jan.–5/July/2015.

4.2 リモート QPD の動的変動

約半年に渡る 2 台のリモート QPD の動的変動の結果を図 4 に示す。図 4(a)((b)) は上流 QPD の $x(y)$ 方向の時間変動を、図 4(c)((d)) は下流 QPD の $x(y)$ 方向の時間変動をそれぞれ示す。図中の黒点は測定点を示し、その標準偏差を色彩で示している。座標軸の向きは、それぞれビームから見て右手を x 軸正、天頂の向きを y 軸正としている。

測定開始から約 80 日後 (3 月 26 日頃) には x 方向に折り返しが見え始め、 y 方向には階段状の変化が見えている。約 147 日後 (6 月 2 日頃) には x 方向に急激な折り返しが見える。このような長期に渡る遅い変動は季節的な要因によると考えられる。本測定により初めてこのような折り返し点の存在が示された。

最初の折り返し点前 (後) までの x 方向変位の勾配は、上流 QPD に対し $\sim 5.6 \mu\text{m}/\text{day}$ ($\sim 5.8 \mu\text{m}/\text{day}$)、下流 QPD に対し $\sim 3.7 \mu\text{m}/\text{day}$ ($\sim 5.8 \mu\text{m}/\text{day}$) である。二番目の折り返し点後の x 方向変位の勾配は、上流 QPD に対し $\sim 24 \mu\text{m}/\text{day}$ 、下流 QPD に対し $\sim 24 \mu\text{m}/\text{day}$ である。また観測期間中の x の最大変位幅は上流 QPD に対し $\sim 0.54 \text{ mm}$ 、下流 QPD に対し $\sim 0.6 \text{ mm}$ である。一方、最初の折り返し点までの y 方向の時間変化は上流 QPD に対し $\sim 8.7 \mu\text{m}/\text{day}$ 、下流 QPD に対し $\sim 6.7 \mu\text{m}/\text{day}$ である。また観測期間中の y 方向の最大変位幅は上流 QPD に対し $\sim 0.98 \text{ mm}$ 、下流 QPD に対し $\sim 0.68 \text{ mm}$ である。観測された最大変位幅はアライメントの要求値を遥かに越える大きさであるが、時間的変動の勾配として

はビームを基本とする軌道フィードバックにより制御可能であると考えられる。

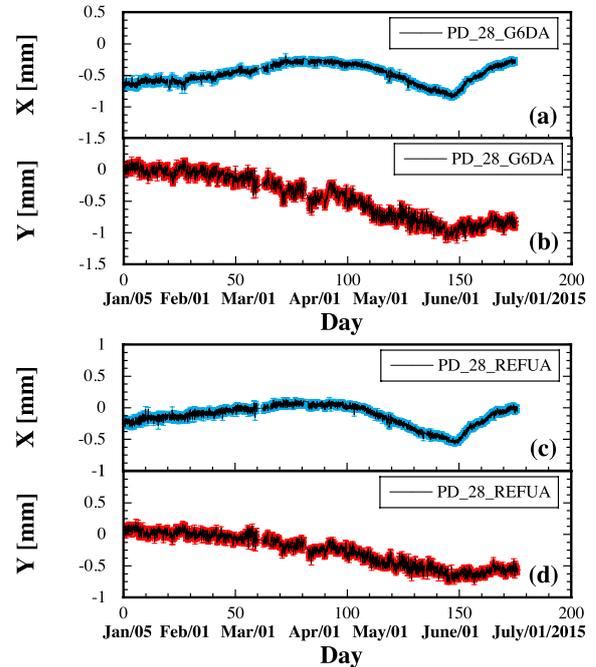


Figure 4: Time traces in the horizontal and vertical displacements of the upstream ((a) and (b)) and downstream ((c) and (d)) remote-controlled QPDs during 5/Jan.–5/July/2015.

4.3 欠損及び不適格データの取扱い

図 4 を見て明らかなように所々にデータが白抜きに欠損していることがわかる。これは計算機の不調に起因する FB 制御の停止や QPD データ収集システムの停止によるものである。また、データ収集システムが正常に動作しているにもかかわらず FB 制御の停止により光軸に変位が生じた場合など、該当区間のデータを捨てることにした。さらに、光軸の強度安定性に対する条件を課し解析精度をより高めることにした。以下にデータの取捨選択条件をまとめておく。

- (1) 終端 QPD に対する光軸変位安定性の要求
 $|x| \leq 0.1 \text{ mm}$ 、 $|y| \leq 0.1 \text{ mm}$.
- (2) 終端 QPD に対する光軸強度安定性の要求
 $4.45 \text{ V} \leq \sum_{i=1}^4 |V_i| \leq 4.7 \text{ V}$.
- (3) リモート QPD に対する強度安定性の要求
 $4.1 \text{ V} \leq \sum_{i=1}^4 |V_i| \leq 5.1 \text{ V}$ (PD28G6DA),
 $4.7 \text{ V} \leq \sum_{i=1}^4 |V_i| \leq 5.16 \text{ V}$ (PD28REFUA).

これらの選択条件を課したときの無効データの比率 (欠損データも含む) は概ね 8~9% であった。

5. データ解析

5.1 回帰分析

時系列データの解析には回帰分析に基づいた手法が適用される^[4]。回帰分析によれば一つ (又は複数) の説明変数と一つの目的変数に対し過去の相関関係を求め、説明変数から将来の目的変数を推定することができる。最

も単純には説明変数と目的変数が同一の1変数時系列データとして記述する自己回帰過程 (AR 過程) が知られている。

説明変数を k 回前の過去変数 $z[n-k]$ とし、重みを回帰係数 a_k とし、目的変数を将来変数 $z[n]$ として、 $z[n]$ を $z[n-k]$ の線形和で以下のように表す。

$$z[n] = \sum_{k=1}^m a_k z[n-k] + \epsilon[n] \quad (1)$$

ここで m は考慮する過去変数の次数を示す。 $\epsilon[n]$ は $z[n]$ の予測誤差で正規分布に従う独立な確率変数であると仮定される。

AR 過程の次数 m は最小自乗法に基づき予測誤差の自乗和が最小になるように定められる。すなわち、(2) 式に示す時系列データの規格化分散値 $\hat{\chi}^2$ を最小化する回帰係数 a_k を求めることに帰着される。

$$\hat{\chi}^2 = \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} \left(z[n] - \sum_{k=1}^m a_k z[n-k] \right)^2 \quad (2)$$

ここで N は時系列のデータ数を示す。次数 m の決定には最小自乗法による最適化が必要である。時系列データのデータ数と回帰係数の次数をむやみに大きくすると標準的なルーチンによる $\hat{\chi}^2$ の最小化は困難となるので注意が必要である。

このような最小化問題に対し、ハウスホルダー変換と呼ばれる変換行列を用いた効率のよい最小化手法が開発されている。この手法によると回帰係数 a_k の最小自乗解が逐次計算により一次方程式の解として求められる。詳細は参考文献^[4]を参照してほしい。

5.2 モデル化

回帰分析では時系列データのモデル化が必要である。ここでは (3) 式に示すように将来変数である床面変動 $z[n]$ が年間を通した周期関数と ATL 則に基づく地盤拡散による地面変動の振幅和によりモデル化できるものとした。

$$z[n] = \sum_{n=1}^N \left[\sum_{k=1}^m (a_k \sin[k\omega n] + b_k \cos[k\omega n]) + c + d\sqrt{n} + \epsilon[n] \right] \quad (3)$$

ここで ω は変動の角周波数、 a_k と b_k はそれぞれ周期関数 \sin と \cos の振幅係数、 c はオフセット定数、 $d\sqrt{n}$ は ATL 則に基づく地面変動の振幅を表す (詳細は後述)。従って最小化すべきパラメータ数は $2(m+1)$ となる。

5.3 相関解析

床面の動的変動は 4.25 m 離れた 2 カ所の QPD でほぼ同時に計測される。この結果、得られるデータは多変量時系列データへと拡張される。多変量データの特徴を捉えるには相異なる変数間の関係 (相関解析) が重要となる。相関解析では、二変量の類似性を表す統計量として相互共分散関数 \hat{C}_k (cross-covariance function) と相互

相関関数 \hat{R}_k (cross-correlation function) が以下のように定義される。

$$\hat{\mu}(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_i[n], \quad \hat{\mu}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_j[n] \quad (4)$$

$$\hat{C}_k(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=k+1}^N (z_i[n] - \hat{\mu}(i)) \times (z_j[n-k] - \hat{\mu}(j)) \quad (5)$$

$$\hat{R}_k(i, j) = \frac{\hat{C}_k(i, j)}{\sqrt{\hat{C}_0(i, i)\hat{C}_0(j, j)}} \quad (6)$$

ここで $\hat{\mu}(i)$ は i 番目変数データの平均を、 $\hat{C}_k(i, j)$ は時間遅延 k としたときの二変量 (i, j) 間の平均的な分散を表す。 \hat{R}_k は \hat{C}_k を $k=0$ の場合の自己共分散関数 \hat{C}_0 で規格化した統計量を表し、 $\hat{R}_k=1$ の場合は強い相関を、 $\hat{R}_k=0$ の場合は無相関を、 $\hat{R}_k=-1$ の場合は負の相関を意味する。

5.4 ATL 則

前節でも述べたように周期的要因以外にも地殻のランダムな拡散に基づく地面変動要因が知られている^[5]。このモデルによると任意に離れた 2 点間距離を L 、任意の時刻を基点とした経過時間を T とすると任意の方向に対する 2 点間の変位の自乗平均 $\langle dz^2 \rangle$ は (7) 式で与えられる。

$$\langle dz^2 \rangle = ATL \quad (7)$$

ここで A は地殻の性質 (場所により異なる) に依存する比例定数で、これまでの測定によると $A (= d^2) \sim 10^{-5 \pm 1} \mu\text{m}^2/\text{s/m}$ として記述できるとしている。(7) 式が成立する時空の大きさの目安はかなり広く、距離的には 1 m ~ 10 km、時間的には分 ~ 年の範囲で満足することが検証されている。

本論文では ATL 則の検証というよりも、このモデルが正しいとした場合に入射器における初期アライメントにどのような影響を与えることになるのかを定量的に評価することにある。

5.5 周波数解析

不規則に見える時系列データであってもフーリエ解析により周波数成分に分けることができる。床面変動のパワースペクトル密度 $P(\omega)$ [mm^2/Hz] はフーリエ変換により以下の式で定義される。

$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-T/2}^{T/2} z[t] e^{-j\omega t} dt \right|^2 \quad (8)$$

この物理量は各地で測定され経験式として以下のように表される^[6]。

$$P(f) = \frac{k^2}{f^2(1+f^2)} \simeq \frac{k^2}{f^2} \quad (9)$$

ここで、 k は場所に依存する定数で周波数領域 $f = 10^{-9} \sim 10^{-3} \text{ Hz}$ では $k = 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ mm}/\sqrt{\text{Hz}}$ が適用される。

フーリエ解析を基本とするパワースペクトル密度によると時系列データの時間情報が完全に消失してしまう。これは時系列データを定常解として解析するからである。ウェーブレット解析は時系列データの時間情報を残しながら周波数解析を可能にするという優れた手法の一つである^[7]。本解析を応用する目的は時系列データの非定常的な周波数成分を高精度に捉えることにある。

6. 解析結果

約 176 日に渡り取得した時系列データの総数は $N = 4203$ であった。規格化分散値 $\hat{\chi}^2$ の最小化を行った結果、AR 過程の基本周期 $T = 4200$ h、次数 $m = 160$ を決定した。このとき、基本周波数は $f_{min} = 6.6 \times 10^{-8}$ Hz、計算機能力の限界から最大周波数は $f_{max} = 160 \times f_{min} = 1.1 \times 10^{-5}$ Hz とした。ATL 則に基づく拡散係数 A の解析結果を表 1 にまとめる。

Table 1: Diffusion Coefficients A at the Linac Tunnel

QPD	Horizontal		Vertical		units
	$\hat{\chi}^2$	A_x	$\hat{\chi}^2$	A_y	
上流	0.39	19 ± 1	2.3	110 ± 5	$[\text{nm}^2/\text{m/s}]$
下流	0.45	6.5 ± 0.3	0.47	57 ± 3	$[\text{nm}^2/\text{m/s}]$

係数 A_y に対し今回の測定結果は、トリスタントンネルで水管傾斜計により計測された竹田等の結果と概ね一致していることを確認した^[8]。

半年間の床面変動を周期成分と ATL 則に基づく成分に分けて解析した結果を表 2 にまとめた。ここで、全体及び周期的とは半年間の変動の peak-to-peak 値を示し ATL 則では rms 値を示すことに注意してほしい。 y 方向にはさらに日較差による変動 ($\Delta y \sim \pm 0.08$ mm) も加わることに注意されたい。

今回の測定により初期アライメントを実施しても半年後には許容アライメントを遥かに越えてしまうことがわかった。しかし変動の速さは充分遅いのでビームによる軌道フィードバックで軌道安定化を計ることは可能かもしれない。

Table 2: Summary of the Fluctuational Amplitudes of the Tunnel Floor

変動成分	QPD28G6DA		QPD28REFUA		units
	Δx	Δy	Δx	Δy	
全体	0.57	1.1	0.63	0.80	[mm]
周期的	0.65	0.64	0.69	0.50	[mm]
ATL 則	0.38	0.91	0.23	0.66	[mm]

2カ所の QPD の相関解析によると x 、 y 方向の相互相関関数はそれぞれ $\hat{R}_0^x = 0.9$ 、 $\hat{R}_0^y = .99$ となり高い正の相関を示すことがわかった。2台の QPD は建屋継目を挟んで設置されている。継目の効果が大きいと建屋毎の変位はこの継目に吸収され2台の QPD の相互相関は抑制されるはずである。しかし、計測結果は逆に大きく継目の効果が小さいことを示した。この結果から、入射器中央の継目を挟んだ床面は一体的に変位していると考えてよい。

図 5(a) 及び (b) にそれぞれ上流 QPD の x 及び y 方向変位のフーリエ解析結果を示す。 x 方向のフーリエ解析

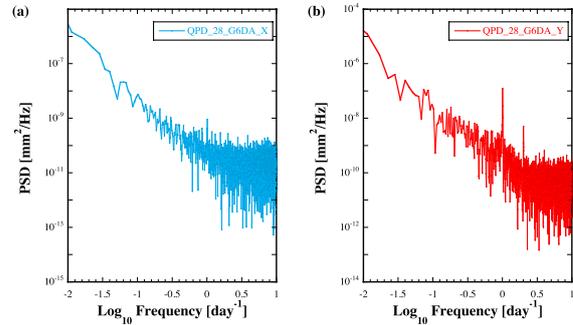


Figure 5: Fourier analysis results in the x (a) and y (b) displacements of the upstream remote-controlled QPD.

結果によると明瞭なピークは見えていないが、 y 方向の結果によると太陽と月の地球に対する相対速度で生じる日周期 (K_1 : 日月合成日周潮) と半日周期 (M_2 : 主太陰半日周潮) に明瞭なピークが見える。

パワースペクトル密度の周波数特性は (9) 式でよく記述でき、その解析結果を表 3 にまとめる。

Table 3: Frequency Characteristics of the Dynamical Fluctuation of the Tunnel Floor

QPD	Horizontal $P(f)$	Vertical $P(f)$
上流	$6.9 \times 10^{-21}/f^2$	$3.4 \times 10^{-22}/f^2$
下流	$3.9 \times 10^{-21}/f^2$	$1.4 \times 10^{-20}/f^2$

7. まとめ

全セクターに渡る加速ユニットの初期アライメント終了後、入射器第 2 SY において床面変動の連続観測を開始した。半年間の計測結果によるとアライメントに対する要求値を遥かに越える床面の動的不安定化が明らかになった。この結果は、半年に渡る初期アライメントの保持が極めて困難であることを示し、ビームによるアライメントが不可欠となることを意味する。本夏期保守時にリモート QPD を増設し入射器全体の動的不安定化計測を続行し、ビームによるアライメントの可能性をさらに追求するつもりである。

参考文献

- [1] T. Suwada, *et al.*, “KEKB 入射器における長基線レーザーアライメントシステムを利用したトンネル床面変動の動的測定システムの開発”, Presented in this meeting.
- [2] 諏訪田剛, 日本加速器学会誌「加速器」10 (4) 2013, p.1.
- [3] T. Suwada, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 84, 093302 (2013).
- [4] 北川源四郎, 時系列解析入門 (岩波書店, 2005).
- [5] V. Shiltsev, Phys. Rev. Lett. 104, 238501 (2010).
- [6] S. Takeda, *et al.*, Proceedings of the 3rd IWAA, Annecy, France, 1993, pp. IV/225-231.
- [7] 日野幹雄, スペクトル解析ハンドブック (朝倉書店, 2004), p. 66.
- [8] S. Takeda, *et al.*, Proceedings of the 2nd APAC, Beijing, China, 2001, pp. 740-742.