

KEKB 入射器トンネルにおける微小床面変動と ATL 則の検証

MINUTE FLOOR MOTION AND TEST OF THE ATL LAW AT THE KEKB INJECTOR LINAC TUNNEL

諏訪田剛*

Tsuyoshi Suwada*

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

Abstract

A new remote-controllable sensing system for a laser-based alignment system is in development to measure slow dynamic displacements of the tunnel floor in real time at the KEKB injector linac. Although the injector linac had initially been aligned with a laser-based alignment system, we have found that, based on recent real-time observations, the transverse displacements of the tunnel floor to the laser axis caused by dynamic ground motion are not negligibly small compared with the required alignment tolerance, in terms of the straightness of the beam line. Based on linear regression analyses performed using displacement data recorded during a nearly eight-month period, it was found that the temporal evolution of the displacement data is in good agreement with the ATL law, in which the results show direct experimental verification for complex ground motion. This report describes direct verification of the ATL law based on the experimental results for the tunnel floor of the KEKB injector linac.

1. はじめに

計算機制御により自動駆動する四分割光ダイオード (QPD、全9台) を KEKB 入射器のトンネル床面に分散配置し床面の変動計測を 2016 年 1 月から本格的に開始した。本システムにより初期アライメント後の加速ユニットと床面の局所的な変位傾向の定量化が可能となる。また、複数台の変動データの相関解析を行えばトンネル全長に渡る床面変動の時空相関の定量化が可能となり、初期アライメントの有効性も議論できる。

約半年 (2016 年 1 月 7 日 - 7 月 17 日) に渡る計測結果を 2016 年の本学会 [1, 2] に報告した。本報告により入射器アライメントの要求値を遥かに上回る床面の動的変動が長期観測により明らかになった。さらに入射器全長に渡る変位ベクトルの相互相関を解析したところ複雑に相関していることも明らかになった。この結果は半年間でさえ初期アライメントの保持が極めて困難であることを示す。

床面変動の主要因は複雑な地面変動に起因するが、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 則による地盤拡散など様々な要因の寄与が考えられる。また地面変動を通して 500m 長の入射器建屋が変形し床面変動がさらに増幅され、最終的に加速ユニットの変位が増大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。このような変動要因によると短期的には複雑な床面変動を示すが、長期的には ATL 則による地盤拡散を省く要因は周期的変動として寄与すると考えられる。

他方、ATL 則による地盤拡散に基づく変動は非周期的変動として寄与する。周期関数を用いたフーリエ級数解析を適用すれば周期的変動要因と非周期的変動要因を分離することができ、それぞれの変動要因の定量化が可能となる。

ここで ATL 則による地盤拡散とは地盤の拡散運動に

基づく不規則な地面変動のことを意味し、その変動の大きさが ATL 則 (後述) に従うことが地球物理学の分野では広く知られている。フェルミ研究所の Shiltsev [3, 4] は世界の主要な加速器施設における地面変動データを解析したところ ATL 則がよく成立しており、次世代の大型加速器計画の検討に有用な法則になり得ることを初めて検証した。

入射器では、2016 年 1 月以来 9 台の QPD を 500m 長直線部に沿って分散配置し床面の動的変動の長期連続観測を継続している。この観測により ATL 則の直接的検証が可能となる十分なデータが蓄積された。Shiltsev は世界の主要な加速器施設において様々な方法により計測された時系列データを解析することで ATL 則の検証を行った。

特に SLAC において得られた時系列データは SLAC のレーザーアライメントシステムに基づき、その計測技術は我々のものとほぼ同様である。我々の時系列データは SLAC のそれに比べより広範な時空における ATL 則の直接的検証という観点のみならず、地面変動の非周期的成分の定量化を可能にする。このような定量化は SuperKEKB に向けたビーム安定性及びビーム制御への重要な指標となる。

2. KEKB 入射器における変動観測システム

図 1 に入射器のビームライン全体構成図を示す。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 AB ライン (ライン長 125m, 光軸長 132m) 及び C5 ライン (ライン長 488m, 光軸長 500m) からなる総長約 600m の電子陽電子線形加速器である。C5 ライン直線部に沿って 9 台の自動 QPD (最終点の基準 QPD584D を省く) を設置し加速ユニットと床面の変位計測を継続している。9 台の内、2 台は新たに床面に設置した基準 QPD (REF1UA, 28REFUA, 584D は独立化予定) であり他 7 台は手動 QPD との置き換えである。

*tsuyoshi.suwada@kek.jp

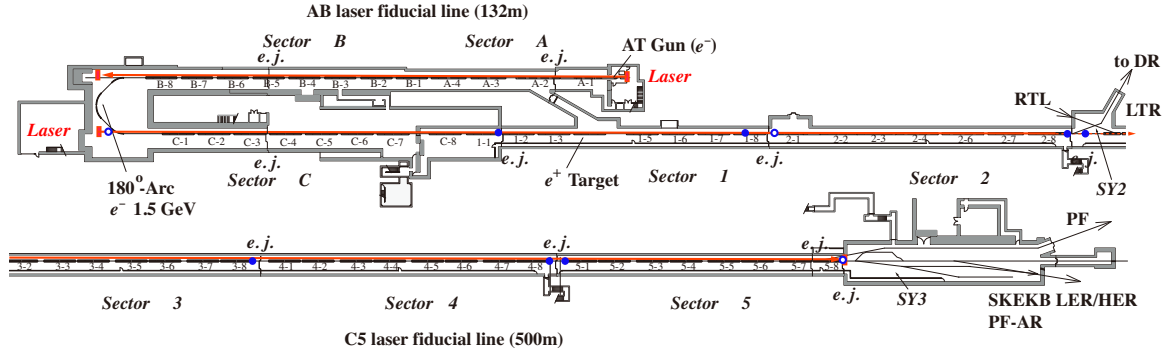


Figure 1: Schematic layout of the KEBB injector linac and laser fiducials for two long straight sections. The abbreviation, *e.j.*, indicates an expansion joint between the building blocks of the linac. The two arrows (red) show the laser-based fiducials for two long straight sections. The solid circles (blue) represent the remote-controllable QPDs and the open circles (blue) represent the reference remote-controllable QPDs fixed at the tunnel floor.

Table 1: Summary table in the locations of the remote-controllable QPDs and expansion joints (*e.j.*) along the injector linac from the laser source

QPD	<i>e.j.</i>	<i>L</i> [m]
REF1UA		1.74
	C3D	44.31
11DA		106.11
	11D	106.72
1814DA		177.04
	1814D	178.39
21UA		180.17
28G6DA		259.07
	28G6D	259.64
28REFUA		263.32
38DA		339.58
	38G5U	341.60
48DA		419.08
	48G5U	421.11
51UA		423.65
	57G7U	498.01
584D		499.94

表1に自動QPDと建屋継目(*e.j.*)の位置をレーザー光源からの距離(*L* [m])としてまとめた。入射器のレーザーアライメントシステムの詳細については別報告を参照してほしい[5]。

3. ATL則とは何か

地殻の不規則な拡散運動に基づく地面変動要因としてATL則が知られている[3]。ATL則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点間の変位の分散($\langle dz^2 \rangle$)は近似的に(1)式で与えられる。

$$\langle dz^2 \rangle \approx AT^\alpha L^\beta. \quad (1)$$

ここで $\alpha \approx 1$ と $\beta \approx 1$ が近似的によく成立することが検証されている[3]。*A*は地殻の特質に依存する比例定数である。これまでの世界各地での測定によると

$A \sim 10^{1 \pm 1} \text{ nm}^2/\text{s}/\text{m}$ として記述できることが知られている[4]。(1)式が成立する時空の大きさはかなり広く、目安として距離的には1m~10km、時間的には分~年の範囲でよく成立することが検証されている。

不規則な拡散運動に基づく地面変動とは、物理的には古典的ブラウン運動のことで拡散方程式(次元)により表される。

$$\frac{\partial \rho(t, z)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho(t, z)}{\partial z^2}. \quad (2)$$

ここで $\rho(t, z)$ は時刻*t*、座標点*z*における粒子数密度(総粒子数は N_0)を表し、*D*は拡散度合いを表す拡散定数である。最も単純な拡散方程式の解は

$$\rho(t, z) = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{z^2}{4Dt}\right], \quad (3)$$

である。

ある時刻で空間的に広がった粒子数密度にある粒子群の中の個別粒子の運動において、次の時刻では右に移動するか左に移動するかが確率的に不規則である場合、粒子群は時間と共に拡散して行くことが示される。拡散の度合いは拡散定数の大きさで決まる。粒子群の空間的な広がりを表す分散($\langle dz^2 \rangle$)を計算すると

$$\langle dz^2 \rangle \equiv \int_{-\infty}^{\infty} z^2 \rho(t, z) dz = 2Dt, \quad (4)$$

を得る。この関係式は粒子群の空間的広がりの分散が時間に比例して発展することを意味する。 $AL = 2D$ とおけばATL則により不規則な拡散運動に基づく地面変動が記述できることが理解できる。

このようにATL則によると特別な力学モデルを導入することなく外力のない粒子群のブラウン運動として地面変動が記述できることは驚くべきことである。ATL則の物理モデルの考察自体が面白い研究テーマとなるが、本報告ではこれ以上の深入りはできない(興味ある人は[4]の参考文献を参照してほしい)。

ここでの興味は、これまで蓄積された地面変動の時系列データを解析することでATL則の直接的検証を行うと同時に、変動の大きさを決める比例定数*A*を導出することにある。

4. 回帰モデルによる時系列データの解析

時系列データの解析には回帰分析を適用することで過去のデータを再現するだけでなく将来のデータを推定することができる。ここでは最も単純な線形回帰モデルを導入する。 n 番目の時系列データに対し目的変数を z_n とし、複数の説明変数を v_{nk} としたとき z_n を v_{nk} の線形和の形式で以下のように表す。

$$z_n = \sum_{k=1}^m a_k v_{nk} + \epsilon_n. \quad (5)$$

ここで a_k は v_{nk} に対する回帰係数を、 m は v_{nk} の和の次数を表す。 ϵ_n は v_{nk} の線形和では表すことのできない残差(統計的変動や非周期的成分のこと)を表す。

地面変動時系列データに線形回帰モデルを適用し説明変数として周期関数と時間に関し比例傾向成分を適用すると

$$z_n = a + \sum_{k=1}^m b_k \sin\left(\frac{2\pi kn}{T_0}\right) + \sum_{k=1}^l c_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{T_0}\right) + d \cdot n + \epsilon_n, \quad (6)$$

となる。ここで a は線形回帰モデルのオフセットを表し、 b_k と c_k は正弦と余弦周期関数の係数をそれぞれ表し、 l と m は正弦と余弦周期関数の次数(和の個数、 $l = m$ 又は $l = m - 1$) をそれぞれ表す。また T_0 は基本周期を表し、 $d \cdot n$ は比例傾向成分¹を表す。時系列データをこのような周期関数と比例傾向成分の和として線形回帰させると拡散運動する成分や統計的変動を ϵ_n として分離することが可能となる。

5. 解析結果

5.1 時系列データの解析

約8ヶ月(2016年1月7日-8月26日)に渡り連続計測した時系列データの解析を行う。連続計測は12時を正時基準として4時間毎に行われた[2]。この間に蓄積されたQPD当たりのデータ点数は1364点である。時系列データには主に計算機不調に伴う欠損や不適切データ(レーザー光軸安定化フィードバック不調など)が存在するが、これらに関しては回帰分析に基づきデータ点の補間を行えるかぎり復活させることにした[2]。この補間操作はデータ解析に対し本質的には寄与しないことに注意しておく。

図2(a),(b)に入射器中央に設置された基準QPD28REFUAにおける水平(x),垂直(y)方向の時系列データをそれぞれ示す。データ点は計測開始点がゼロとなる相対変位量としてプロットしている。時系列データの時間変化は一見すると複雑で不規則のようにも見える。当該期間の変位の最大変化量は $\Delta_x^{max} \sim 0.5$ mm 及び $\Delta_y^{max} \sim 0.6$ mm である。最大変化量はQPDの設置位置に強く依存する。

¹筆者は直接 Shiltsev 氏に比例傾向成分の物理的根拠を問い合わせたが不明だという。

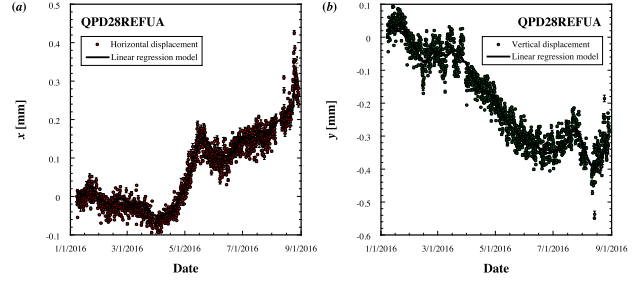


Figure 2: Time traces of (a) the horizontal (x) and (b) vertical (y) displacements of QPD28REFUA during the term Jan.07-Aug.26.2016.

5.2 線形回帰モデルの次数決定

時系列データに線形回帰モデル(6)式を適用し周期的成分の次数を決定した後、周期的成分と非周期的成分の分離を行う。周期的成分の次数は、一般的に χ^2 分析により決定されるが、多説明変数を含む線形回帰モデルでは従来の χ^2 分析は適切ではなく多説明変数の次数を含んだ拡張された χ^2 分析が必要となる。赤池情報量基準(AIC: Akaike Information Criterion)に基づく分析は拡張した χ^2 分析に対応し最適次数の決定を可能にする。AICの定義及び算出方法の詳細については参考文献[6]を参照してほしい。

図3は基準QPDの時系列データに(6)式を適用したときの次数 m に対する AIC_x (AIC_y) の変化を示す。ここでは特に $m = l$ 、基本周期 $T_0 = 3.1536 \times 10^7$ s ($=1$ y) としている。またAICの変化に対し2次曲線による

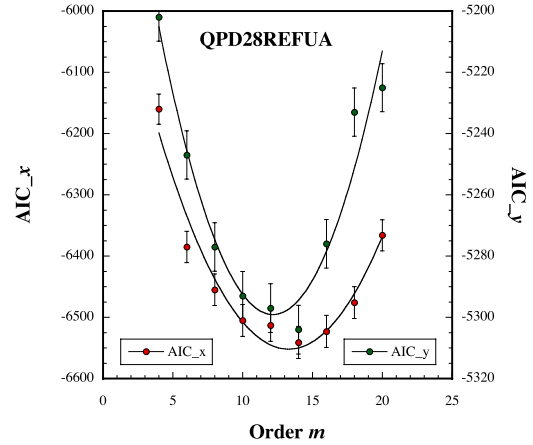


Figure 3: Variations in (a) the x and (b) y AICs calculated for QPD28REFUA as a function of the order m in a linear-regression analysis.

フィットも同時にプロットした。フィットによるとAIC最小値における次数 m が x, y 方向で少し異なっているが、ここでは簡単のためAIC最小値を与える次数 m を方向によらず採用することにした($m = l = 14$)。

線形回帰モデルによるフィットを図2に同時にプロットしている。この結果、線形回帰モデルによるフィットが時系列データをよく再現していることがわかる。次数 $m = 14$ の意味するところは、基本周期を1年とするので考慮すべき最短周期が $T_0/14 \sim 26$ 日となることであ

る。すなわち日較差や26日より短周期の変動成分は考慮されない回帰モデルになっている。

5.3 ATL 則の検証

次数が決まれば線形回帰モデル (6) 式における定数が全て決定される。時系列データから線形回帰フィットとの差分を取れば非周期的成分 (統計的変動を含む) の寄与が得られる。図 4 (a) (図 4 (b)) は基準 QPD28REFUA における x (y) 方向の残差二乗 (ϵ_n^2) を計算しその分布をプロットしたものである。

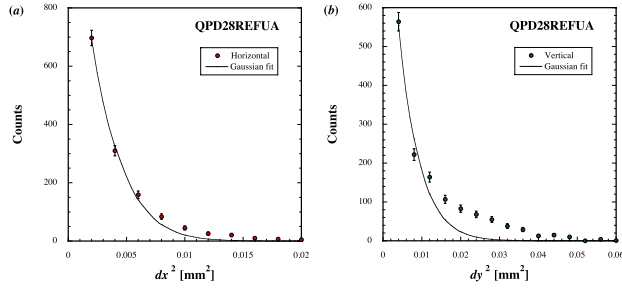


Figure 4: Distribution plots of (a) the x and (b) y square residuals based on the linear-regression analysis in the time traces of the displacements of QPD28REFUA. The solid lines are Gaussian-function fits of the data.

図中の曲線はガウス分布によるフィットを示す。この結果から非周期的成分の平均値はゼロに近く分布の裾野がガウス分布より明らかに大きく広がっていることがわかる。ガウス分布の中心部の広がりやレーザー光軸の安定性に起因する統計的変動を示し、分布の裾野の広がりが非周期的成分の寄与を示している。

図 5 (a) (図 5 (b)) は基準 QPD28REFUA における残差二乗の時間変化を両対数プロットしたものである。図

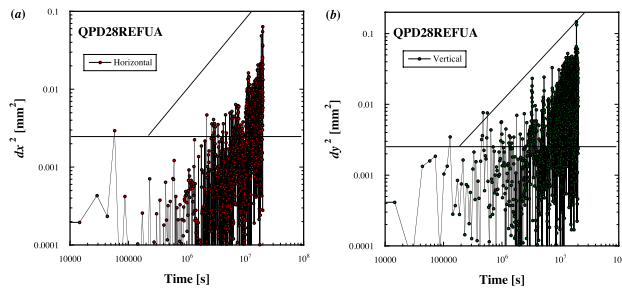


Figure 5: Loglog plots of (a) the x and (b) y square residuals in the time traces of the displacements of QPD28REFUA.

中の実線は $dz^2 \propto T$ を表す直線を示し、水平の実線はレーザー光軸の安定性に基づく測定限界を示す。この結果から残差二乗が時間にほぼ比例して発展していることが推定できる。

図 6 (a) (図 6 (b)) は基準 QPD28REFUA における残差二乗の分散 (rms) の時間変化を両対数プロットしたものである。本結果から時系列データの非周期的成分がうまく分離され ATL 則によく従うことがよくわかる。ATL 則における比例定数 AL はフィットにより得られ

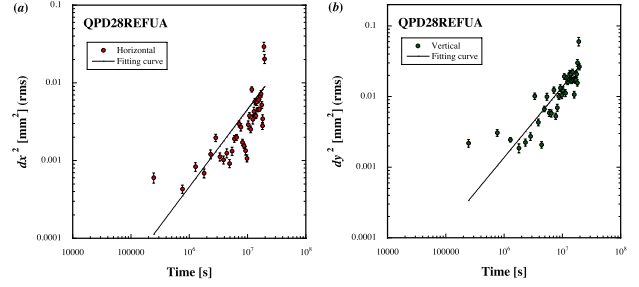


Figure 6: Loglog plots of (a) the x and (b) y square residuals (rms) in the time traces of the displacements of QPD28REFUA.

た。表 2 に x 及び y 方向の残差二乗の分散 (rms) の時間発展に対する比例定数をまとめておく。

Table 2: Proportional constants (AL , rms) of the ATL law obtained for QPD28REFUA

QPD	$A_x L / 10^3$	$A_y L / 10^3$	Units
28REFUA	0.46 ± 0.06	1.4 ± 0.2	$[\text{nm}^2/\text{s}]$

残差二乗の分散 (rms) の時間発展に対する比例定数を 2 点間距離 L で除算すれば ATL 則における比例定数 A が得られる。ここで注意したいことは、レーザーアライメントシステムにおけるレーザー光軸は 500m 長直線部のレーザー光源と最終端にある基準 QPD584DA に固定されることである。すなわちレーザー光軸は端点で固定される。両端点は地面変動により変位するが、その変位量を直接的に計測することはできない。このようにレーザー光軸自身も時間とともに変動することに注意すべきである。

図 7 (a) (図 7 (b)) は基準 QPD58DA (光軸固定点) における残差二乗の分散 (rms) の時間変化を両対数プロットしたものである。この結果は、レーザー光軸が終端 QPD

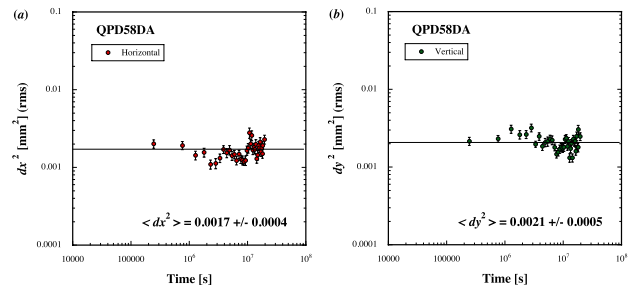


Figure 7: Loglog plots of (a) the x and (b) y square residuals (rms) in the time traces of the displacements of QPD58DA.

中心に安定して固定されたことを示すものである。

光源点を基準とした距離 L_1 における z 変位の残差二乗を dz_1^2 とすると ATL 則により $\langle dz_1^2 \rangle = ATL_1$ である。一方、光軸固定点における z 変位の残差二乗を dz_2^2 とおくと ATL 則により $\langle dz_2^2 \rangle = ATL$ である。光軸変動の効果は QPD28REFUA の位置における z 変位の残差二乗として焼き直し、距離でスケールさせて単純和を

取ると (7) 式が導出される。

$$\langle dz^2 \rangle = \langle dz_1^2 \rangle + (L_1/L)\langle dz_2^2 \rangle = 2ATL_1. \quad (7)$$

この式が光軸自身の変動効果を含んだ式となっており、レーザーアライメントにおける実際の計測量と ATL 則とを関係づけることになる。表 3 に x 及び y 方向の ATL 則における比例定数をまとめた。

Table 3: Proportional constants (A , rms) of the ATL law obtained for QPD28REFUA

QPD	A_x	A_y	Units
28REFUA	0.9 ± 0.1	2.6 ± 0.2	$[\text{nm}^2/\text{s}/\text{m}]$

図 8 (a) (図 8 (b)) は、 x 及び y 方向の残差二乗の分散 (rms) の時間変化を重ねた図を片対数プロットしたものである。この結果は床面変動に対する非周期的成分の寄

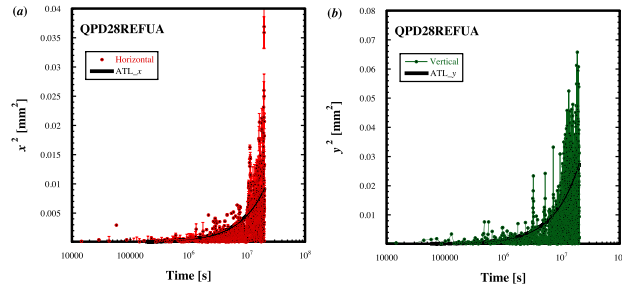


Figure 8: Semilog plots of (a) the x and (b) y square residuals in the time traces of the displacements of QPD28REFUA.

与が決して小さくないことを示している。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竹田等により水管傾斜計を用いて計測された結果 ($A_y = 40 \text{ nm}^2/\text{s}/\text{m}$) に比べ約一桁小さいことを確認した [7]。

5.4 考察

床面変動に対する非周期的成分の時間発展解析を基準 QPD に対し行った。しかし設置位置に対する比例定数 AL の依存性 (空間発展解析) はどうであろうか。このことを確かめるために、図 9 (a) (図 9 (b)) に QPD21UA に対し同様な解析を行った後、残差二乗の時間変化を両対数プロットした。

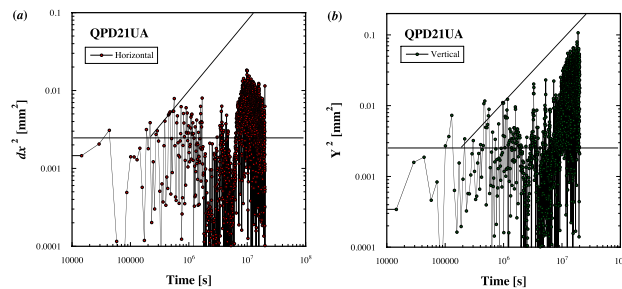


Figure 9: Loglog plots of (a) the x and (b) y square residuals in the time traces of the displacements of QPD21UA.

この結果によると残差二乗の時間変化は明らかに線形ではなく大きく歪んでいる。この歪みは明らかに短周期成分の寄与によるものではなく ($T \gg T_0/14$) 複雑な振る舞いをしている。残念ながら、他の QPD に対しても基準 QPD を省き同様な振る舞いを示し、比例定数 AL の L 依存性を有用な形式で導くことができなかった。

測定対象となる QPD は基準 QPD を省き全て建屋継目から 2 m 以下の近距離に設置されている。他方、基準 QPD28REFUA のそれは 4 m 以上離れていることである。クライストロンギャラリーと加速器トンネルが一体となった 8 つの建屋を 7 箇所建屋継目で接続した総長 500m の建屋の地下トンネルに入射器本体は設置されている。各建屋の膨張収縮は建屋継目である程度吸収されるが、吸収されない分は建屋全体の変形となりトンネル床面を動的に変動させることになる。すなわち建屋継目に働く複雑な力学が近くの QPD の変動測定に少なからず影響し、他方 4 m 以上離れた基準 QPD には比較的影響が小さかったのではないかと推定している。もしそうであれば建屋継目から遠く離れて自動 QPD を増設すればこの問題に対するヒントが得られると考える。

従来では QPD 変位を x 軸と y 軸に分けて議論しているが、トンネルの床面変動は建屋自体の複雑な動的変形を介した効果として出現しているようにも見える。すなわち建屋の動的変形を介して床面変位が x 軸から y 軸へ、またはその逆へと変位ベクトルの回転として複雑な変動をするのであれば、地面変動による床面変動という素直な描像が隠れてしまっている恐れがある。床面変位を変位ベクトルとして解析すれば見通しがよくなることは既に検証されている [2]。今回の ATL 則の検証においても変位ベクトルを導入し解析すれば比例定数 AL の L 依存性を有用な形式で導出できるかもしれないが今後の課題としたい。

6. まとめ

計算機駆動する複数の QPD を入射器のトンネル床面に分散配置し床面の変動計測を本格的に開始した。約 8 ヶ月に渡る連続観測結果を用いて ATL 則の検証を行ったところ、入射器中央に固定した基準 QPD による床面変動の時間発展が ATL 則によく従うことが検証された。

この結果は床面変動に対する非周期的成分の寄与が決して小さくないことを示しており、入射器の高精度アライメントにも大きく影響する可能性がある。今後も自動 QPD を増設し床面のデータ点を逐次増やす予定である。

参考文献

- [1] T. Suwada, Proc. 12th Annual Meeting of PASJ, Aug. 5-7, 2015, pp. 129-133.
- [2] T. Suwada *et al.*, Proc. 13th Annual Meeting of PASJ, Aug. 8-10, 2016, pp. 1291-1295.
- [3] V. Shiltsev, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 094801 (2010).
- [4] V. Shiltsev, Phys. Rev. Lett. 104, 238501 (2010).
- [5] T. Suwada *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 20, 033501 (2017).
- [6] 北川源四郎, 時系列解析入門 (岩波書店, 2005), p. 55.
- [7] S. Takeda *et al.*, Proc. 2nd APAC, Beijing, China, 2001, pp. 740-742.