

KEKB 入射器における遅いトンネル床面変動の動的観測 (II) DYNAMICAL OBSERVATION OF SLOW TUNNEL FLOOR MOTION AT THE KEKB INJECTOR LINAC (II)

諏訪田剛*、榎本嘉範、柿原和久、三川勝彦、肥後壽泰

Tsuyoshi Suwada*, Kazuhisa Kakihara, Katsuhiko Mikawa, Toshiyasu Higo

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

Abstract

New remote-controllable sensing system in a laser-based alignment system are in progress to measure slow displacements of the tunnel floor in real time due to dynamic ground motion at the KEKB injector linac. Two remote-controllable quadrant photodiodes (QPDs) were installed at the middle location of the 500-m-long straight section in summer shutdown of 2014, and other seven QPDs were further installed in summer shutdown of 2015 just near plural locations of expansion joints along the linac tunnel. The real time measurement has pursued to take data during nearly a half year since 7 January 2016. Based on recent observations on the displacement data, we have found that the transverse displacement amplitudes of the floor level to the beam axis are not negligibly small in comparison with those in the required alignment in terms of straightness of the beam line. Based on the preliminary analysis, the growth rates of the displacements in the transverse directions (displacement vector) over the whole length of the tunnel floor were derived, and especially, the cross-correlations between the displacement vectors depending on the locations were analyzed. In this report, the experimental results and present status are described in detail in the laser-based alignment system with new remote-controllable QPDs.

1. はじめに

現在のアライメントシステムは手動計測を基本とするので動的に変化する加速ユニットの変位を効率的に計測することは極めて困難である。このことから遠隔制御が可能な動的変位計測システムの導入を2014年より順次進めている [1]。2014年9月遠隔制御光センサー(自動 QPD)2台を入射器の最長直線部中央部に設置した。この2台を用いて2015年1月から加速ユニットと床面の動的変位計測を開始した [2]。2015年9月、さらに7台を最長直線部に沿って分散配置し、2016年1月から合計9台の自動 QPD による動的変位計測を開始した。加速ユニットと床面の変位傾向を長期間計測することにより初期アライメント後の局所的な動的変位の定量化が可能となる。また、複数台の変位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。

本学会では、約半年間(2016年1月7日-7月17日)に及ぶ入射器トンネルの床面変動の連続観測、特に500m長の入射器トンネル床面の動的変動と相関解析について報告する。

2. トンネル床面の動的変動観測システム

入射器の長基線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 [3]。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(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。

図に示すようにC5ライン直線部に沿って9台の自

動 QPD を設置し加速ユニットと床面の動的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 であり残7台は手動 QPD との置き換えである。表1に自動 QPD のレーザー光源からの設置位置(L [m])と建屋継目(*e.g.*)の位置(L [m])をまとめた。

入射器では3台の基準 QPD (REF1UA, 28REFUA, 584D) を床面に直接固定している。ただし基準 QPD_584D については現在ユニット端面に装着しているが将来的には床面に固定し独立させる予定である。アライメントの基準を2台の基準 QPD (REF1UA, 584D) の中心点を結ぶ直線とし光軸が定義される。特に QPD_REF1UA を始点 QPD と呼び QPD_584D を終点 QPD と呼ぶ。レーザーの立ち上げ時にはこれらの基準 QPD の中心点を通るようにレーザー光学系が調整され光軸の入射角度と入射位置が調整される。

光軸は計算機フィードバック制御により終点 QPD の中心点に常に固定されるが、基準となる始点 QPD には光軸が固定されないことに注意されたい。これはレーザー光源の床面と始点 QPD の床面を積極的に縁切りすることで、建屋変形に伴う光源床面への直接的な影響が緩和されるようにしているので積極的に光軸を固定するようにはしていない。しかしながら、光源床面のゆっくりとした地面変動の影響を受け、わずかではあるが光軸が動的に変位していることがわかってきたので、将来的には始点 QPD においても光軸を固定すべく計算機フィードバック制御の導入を検討している。

入射器はクライストロンギャラリー(地上)とトンネル(床面は地下5.65m)が一体となった8つの建屋が7箇所の建屋継目で接続され総長500mの建屋(二階建構造)からなる。地面変動や環境温度の変化に起因する各建屋の膨張収縮は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

*tsuyoshi.suwada@kek.jp

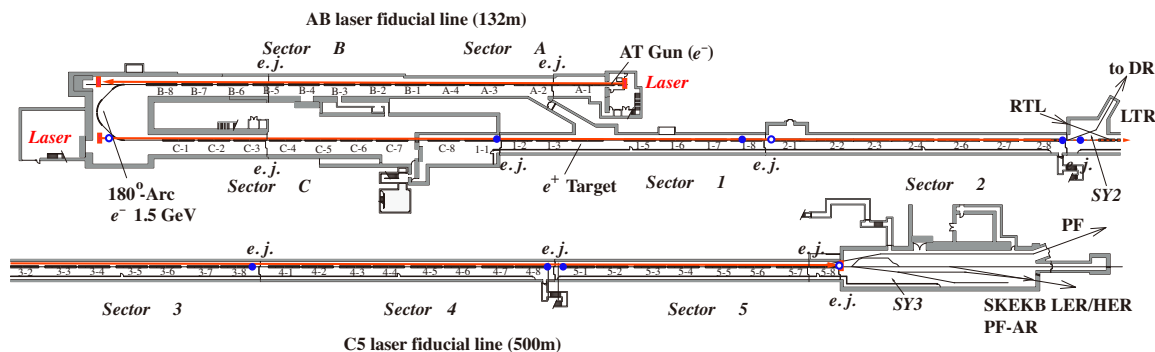


Figure 1: Schematic layout of the KEKB injector linac and laser fiducials for two long straight sections. The abbreviation, *e.j.*, indicates an expansion joint between the building blocks of the linac. The two arrows (red) show the laser-based fiducials for two long straight sections. The solid circles (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. Some measurement results, the maximum norm (r_m) of the displacement vector and the maximum slope (s_r) in the variations in the time traces of the norm, are also summarized depending on the QPD locations.

QPD	<i>e.j.</i>	L [m]	r_m [mm]	s_r [$\mu\text{m}/\text{day}$]
REF1UA		1.74	0.19	3.3
	C3D	44.31	—	—
11DA		106.11	0.55	5.5
	11D	106.72	—	—
1814DA		177.04	0.65	5.1
	1814D	178.39	—	—
21UA		180.17	0.47	4.2
28G6DA		259.07	0.65	6.6
	28G6D	259.64	—	—
28REFUA		263.32	0.44	4.1
38DA		339.58	0.68	4.1
	38G5U	341.60	—	—
48DA		419.08	0.88	4.6
	48G5U	421.11	—	—
51UA		423.65	0.84	5.1
	57G7U	498.01	—	—
584D		499.94	—	—

的に変動させることが予想される。これまでの静的な変位計測から継目近くの床面変動が特に大きいことがわかっている。このような理由で9台の自動 QPD を建屋継目近くに設置することにした。自動 QPD の計算機制御による駆動システムについては別報告を参照してほしい [1].

3. 遅いトンネル床面の動的変動観測

3.1 自動 QPD による連続観測

午前 0 時を基点として 4 時間毎にデータ取得プログラムが動作し上流 QPD より下流に向かって順次データ

取得を行う。各 QPD から引き出した 4 チャンネルの光電流を電流電圧変換回路で電圧に変換した後、電圧信号を Linux-based PLC/ADC に入力する。PLC 上では 4 チャンネルの ADC データから光軸位置と光軸強度 (4 電圧値和) が算出される。このようなデータ取得が 1000 回繰り返され、これらの演算結果と 4 つの電圧値に対する平均と標準偏差がレジスターに格納される。光センサーを光軸まで駆動する測定法では一時的にレーザー光を破壊するので、この間フィードバック制御が停止し光軸の安定性が維持できなくなる。従って各 QPD のデータ取得前には必ずフィードバック制御を動作させ光軸が安定するのを確認した後測定を開始するようにしている。QPD 毎の測定時間はフィードバック制御による光軸確認測定を入れても 30 秒程度で全 QPD の総測定時間は今のところ 5 分程度である。

9 台の各自動 QPD による加速ユニットの約半年に渡る動的変位の測定結果を図 2 に示す。ここで取得した時系列データの総数は $N = 1139$ である。図 2(a)、図 2(b) は変位ベクトルの測定量 (x, y) をノルムと角度に焼き直した変位ベクトル (r, θ) の時間変化をそれぞれ示す。図中の黒点は測定点を示し、その標準偏差を色彩で示した。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 軸正としているので、 x 軸正から反時計回りに変位ベクトルの角度を表す。ここではデータ点は測定開始点からのベクトルの差分として表していることに注意されたい。このことから変位ベクトルのノルムの時間変化から増加率がわかり、また変位ベクトルの角度の時間変化から変位の向きの時間変化が一目でわかる。

従来では変位ベクトルを水平軸と垂直軸に分けて議論していたが、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することに注意すべきである。すなわち建屋の動的変形を介して変位ベクトルが x 軸から y 軸へ、またはその逆へと変位ベクトルが複雑に回転することになるので、地面変動による直接的な床面変動という素直な描像が隠れてしまう恐れがあるからである。

まず光源に最も近い基準 QPD_REF1UA の変位ベクトルのノルムは抑制されており最大変位は $r_m \sim 0.2$ mm である。他方基準 QPD_REF1UA を省き、いずれの自

動 QPD においても変位ベクトルのノルムは増加している。さらに基準 QPD_28REFUA の上下流で増加の様子が異なっている。すなわち 3 月 29 日頃を基点として上流 QPD ではノルムが増加し始めるのに対し下流 QPD では測定開始日よりすでにノルムが単調に増加していることがわかる。変位ベクトルの最大増加率は QPD 位置に応じて $s_r \sim 4.1 \mu\text{m/day}$ から $s_r \sim 6.6 \mu\text{m/day}$ である。ノルムの変位傾向を見るとは短期的には微細構造が見られるものの季節的な要因と考えられる長期的な遅い変動に従いゆっくりと変化しているように見える。7 月 4 日頃を基点としノルムの減少傾向がようやく見え始めた。

観測期間中の変位ベクトルのノルムの最大値を表. 1 にまとめた。最大変位 r_m は QPD 位置により異なり基準 QPD_REF1UA を省いて $r_m \sim 0.47 \text{ mm}$ から $r_m \sim 0.88 \text{ mm}$ に広がっている。約半年ではあるが局所的には床面の最大変位は継目の近くで $r_m \sim 0.9 \text{ mm}$ 程度であることがわかった。観測された最大変位はアライメントに対する要求値を遙かに越える大きさである。このように、計算機制御によるビーム軌道フィードバックの導入、あるいはアクティブムーバーを用いた加速ユニットのアライメントの自動補正を今後の方針として導入の検討が必要となるであろう。

次に変位ベクトルの角度の動きを見ると面白い現象が生じていることがわかる。すなわち測定開始から 3 月末頃(QPD 位置に応じて多少異なる)まで角度の振れ幅が大きい。ここで注意してほしいのは変位ベクトル角度は $0-2\pi$ で定義されるので、特に QPD_21UA、QPD_28G6DA、QPD_38DA、QPD_48DA、QPD_51UA に見られる $0-2\pi$ 間の飛躍は無視して頂きたい。このように QPD_1814DA と QPD_28REFUA の時間変化を見ると短時間の大きな飛躍が見られる。この飛躍に相当する期間のノルムの変化は 0.2 mm 以下で大きな変化は見られていない。このような事象は変位ベクトルの回転として捉えることができ、床面のねじれを示す現象であろう。4 月以降になると角度の時間変化はかなり落ち着くようになるが、変位ベクトルのノルムが単調増加を開始していることがわかる。このような変位ベクトルの複雑な時間変化の起源を問うことはできないが、床面変位をベクトルで見ると従来のような x 軸、 y 軸を独立に見た変位とは異なる様相が見えるようになってきた。

3.2 欠損及び不適切データの取扱い

データ収集システムの停止によりデータ取得に欠損が生じ、また計算機不調により光軸安定化制御が停止し光軸が変位してしまい適切なデータが取得できなかったことが生じた。このような場合、該当区間のデータは基本的には無効データとして処理される。しかし FFT 解析や ATL 解析などデータに欠損があるとその解析自体が困難となる場合は欠損データを回帰分析で解析されたデータを用いて補間することにした。時系列データを扱う回帰分析とデータ補間の方法についての詳細は別報告を参照してほしい [2]。無効データの比率は自動 QPD ごとに異なり概ね $2\sim 26\%$ であった。

4. データ解析

4.1 多変量ベクトルによる相関解析

複数台の自動 QPD による多変量ベクトル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。

$$\langle \vec{\mu}(i) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \vec{d}_n(i), \quad (1)$$

$$\hat{C}_k(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=k+1}^N (\vec{d}_n(i) - \langle \vec{\mu}(i) \rangle) \cdot (\vec{d}_{n-k}(j) - \langle \vec{\mu}(j) \rangle), \quad (2)$$

$$\hat{R}_k(i, j) = \frac{\hat{C}_k(i, j)}{\sqrt{\hat{C}_0(i, i)\hat{C}_0(j, j)}}. \quad (3)$$

ここで $\langle \vec{\mu}(i) \rangle$ は i 番目変量ベクトル $\vec{d}_n(i)$ (n 回目測定量)の平均を表し、 $\hat{C}_k(i, j)$ は時間遅延 k としたときの i, j 番目二変量ベクトルの内積の分散を表す。 \hat{R}_k は \hat{C}_k を時刻 $k=0$ とした場合の自己共分散関数 \hat{C}_0 で規格化した統計量を表す。すなわち $k=0$ の場合は現在の時刻における相関を表し、 $k \neq 0$ の場合は過去の時刻における相関を表すことに注意されたい。また、 $\hat{R}_k \sim 1$ の場合は強い正の相関を表し、 $\hat{R}_k \sim 0$ の場合は無相関を表し、 $\hat{R}_k \sim -1$ の場合は強い負の相関を表す。

4.2 解析結果

図 3 に QPD_28REFUA を基準とした各 QPD との相互相関関数 \hat{R}_0 の時間変化をまとめる。QPD_REF1UA を省き \hat{R}_0 の時間変化には微細構造が見られるものの各 QPD までの距離に依存して平均的には $\hat{R}_0 = 0.48\sim 0.67$ に広がり比較的強い正の相関を示していることがわかる。このことは入射器全長に渡り大局的に見てトンネル床面がコヒーレントな変動を示していることを意味する。また \hat{R}_0 の時間変化には所々微細な構造が見られる。この微細構造は多少の分散が見られるものの入射器全長に渡り相互相関関数の強さが余り減衰せずに保持されていることもわかる。

QPD_REF1UA との \hat{R}_0 の平均値は $\hat{R}_0 \sim 0.06$ となりほぼ相関が無いことを示す。QPD_REF1UA との \hat{R}_0 は最も近い QPD_11DA との相互相関関数を比較しても同様に相関の強さは零近くを示し QPD_REF1UA だけが他の QPD と切り離されているようにも見える。

相互相関関数の解析によると QPD_REF1UA を省きどの組み合わせをとっても平均的には強い正の相関を示すことがわかった。建屋継目の効果が大きいと建屋毎の変位はこの継目にある程度吸収され相互相関関数の大きさは抑制されるはずである。しかし、計測結果は継目の効果が小さいことを示し、床面は概ね全長に渡り一体的に変位していると考えてよい。しかし微細構造をよく見ると相互相関関数は不規則に変化しており、極端な場合相関の強さが零近くにまで落ち込んでいると

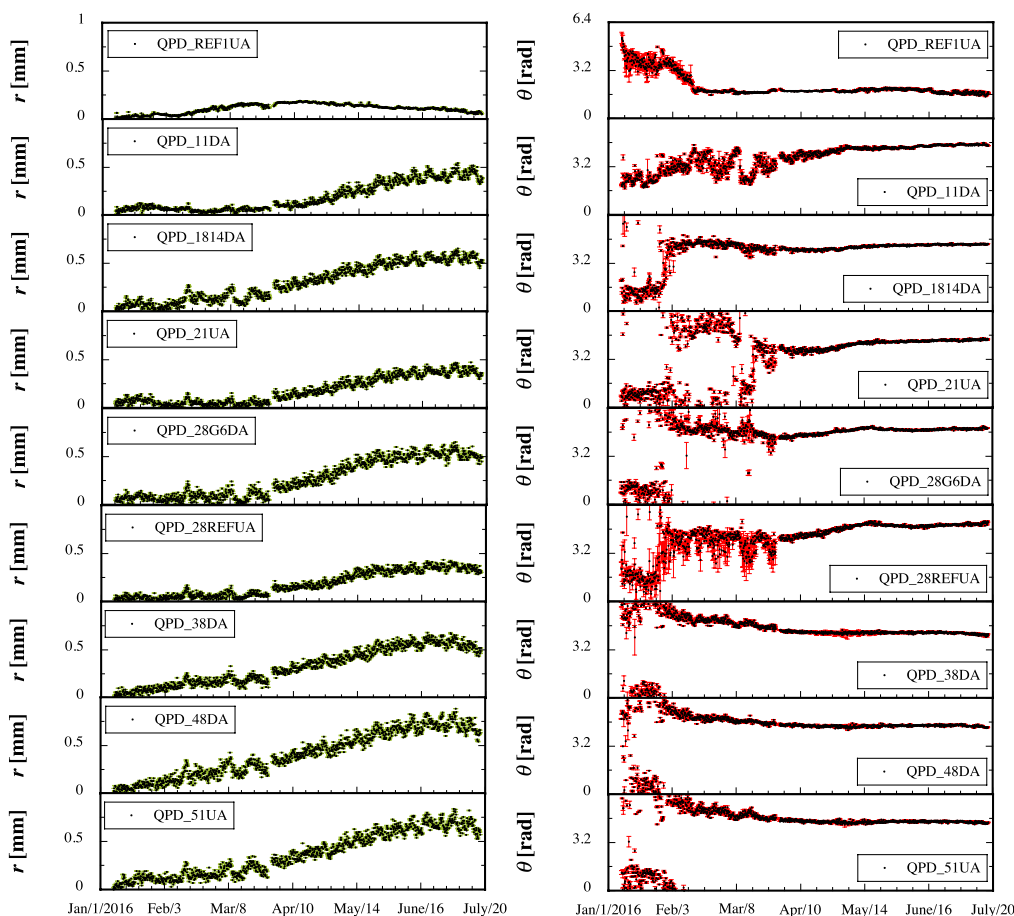


Figure 2: Time traces of (a) the norm and (b) the angle in the displacement vector measurements of the accelerator units with remote-controllable QPDs installed along the C5 straight section during the term Jan.07-July.17.2016. It should be noted that the angle of the displacement vector is defined in the range of 0 to 2π rad.

ころも見られる. このような点では床面は局所的には無相関に変位していることになる.

図 4 に全 QPD を用いた瞬間的な相互相関関数の強度分布を示す. ここで縦横軸は QPD 位置を表している. 図 4(a) は 2016 年 2 月 15 日午前 0 時の相互相関関数の強度分布を示し比較的強い正の相関を示す. この現象はトンネル床面全体がコヒーレントに変位していることを意味する. 図 4(b) は 2016 年 2 月 27 日午前 8 時の相互相関関数の強度分布を示し比較的弱い相関を示す. この現象はトンネル床面が局所的に独立して変位し、全体としてはインコヒーレントに変位していることを意味する. 図中の原点を通る 45 度線に沿うデータ点は自己相関関数を表すので $R_0 = 1$ であることに注意されたい.

複数ヶ所の自動 QPD で取得した変位ベクトルから入射器トンネルの複雑な変動現象を解析し、このような興味ある現象を見いだしたことは初めての成果である. 複雑な変動現象の起源を問うことはできないがこのような変動現象が現在ではリアルタイムで観測できるようになっている.

5. 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、入射器全長にわたり自動 QPD を 9 台設置し床面変動の連続観測を継続している. 約半年間の観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変位が明らかになった. また、入射器全長に渡る変位ベクトルの相互相関を解析し入射器全長に渡る床面変位の動的相関を明らかにした. 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ている. ビームによる軌道補正の検討と或はアクティブムーバーを用いた加速ユニットの自動補正の試験を開始した. 本夏期保守時に自動 QPD をさらに 10 台増設し動変位計測の精度を向上させた後、今後のアライメントシステムの目指す方向を決めたい.

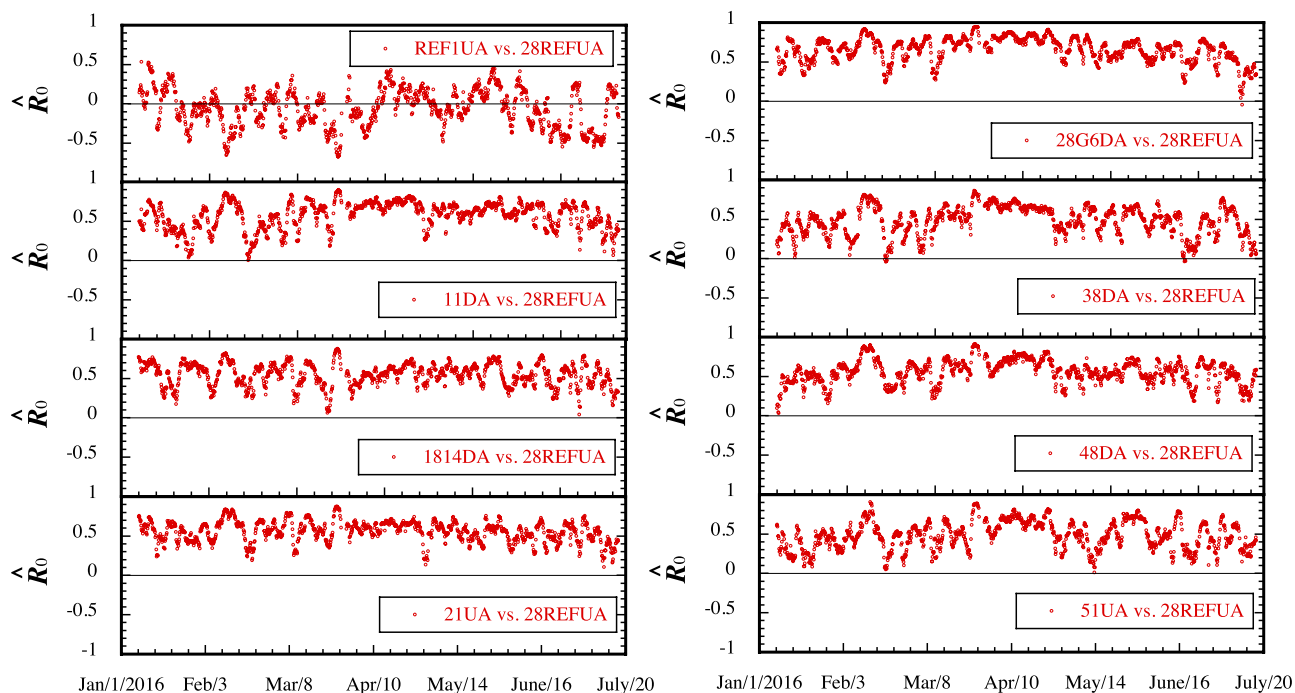


Figure 3: Time traces of the cross-correlation function in the displacement vector measurements of the accelerator units along the C5 straight section during the term Jan.07-July.17.2016. Here, the reference QPD is defined by QPD_28REFUA.

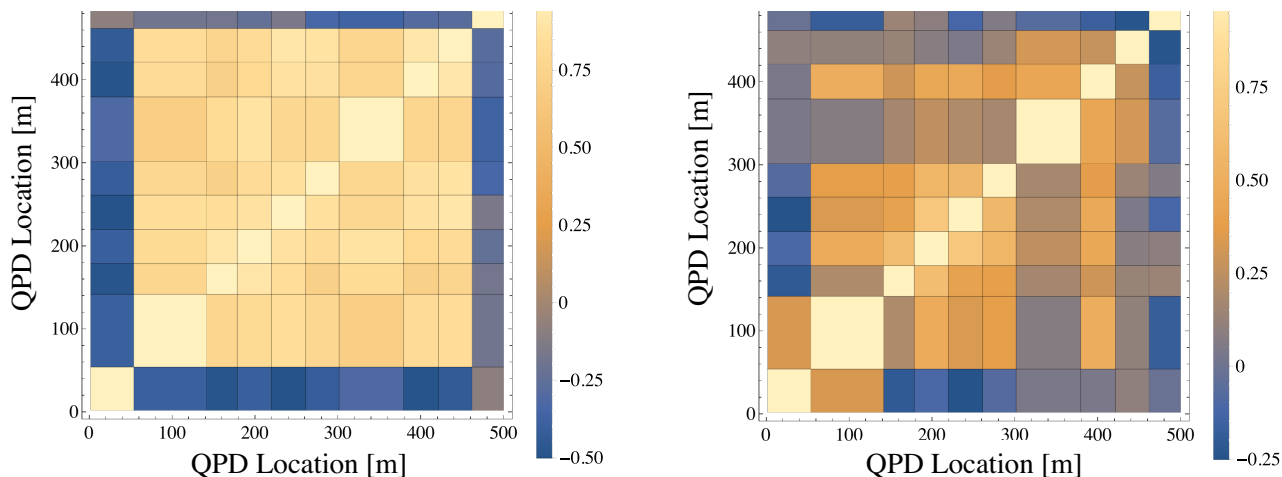


Figure 4: Intensity distributions in the cross-correlation function between all the QPDs in the displacement vector measurements of the accelerator units along the C5 straight section obtained at (a) Feb.15.2016, 0:00 am and (b) Feb.27.2016, 8:00 am. It should be noted that any correlation functions on a straight line tilted at 45 degree passing through the axis origin are defined as a self-correlation function, that is, $\hat{R}_0=1$.

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,” ; Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, pp.895-897.
- [2] T. Suwada, “KEKB 入射器における遅いトンネル床面変動の動的観測,” ; Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, pp.129-133.
- [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).