

J-PARC リニアックにおける建家変動および振動測定

FLOOR DEFORMATION AND VIBRATION MEASUREMENTS OF THE J-PARC LINAC

森下卓俊[#]

Takatoshi Morishita [#]

Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The displacement of the accelerator components induces the beam losses so that the precise alignment is important for the stable beam operation of the high-intensity hadron accelerates. The J-PARC linac has finalized its precise alignment at the end of summer 2006. Since then, the deformation of the accelerator tunnel was small enough to maintain the alignment accuracy for five years without re-alignment. However, the long-term stability of the floor height became worth after that earthquake in March 11th, 2011. Since then, accelerator components in the linac are re-aligned every few years. During the precise survey, sometimes the measured data has significant fluctuation, which is considered due to the vibration of the tunnel floor. Then, the floor vibration was measured using the seismometer and the vibration meters. The long-term deformation of the accelerator tunnel and the property of the floor vibration are described with the relation between the environmental factors.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設である。J-PARC の加速器はリニアック、3GeV シンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、50GeV 主リングからなる。J-PARC リニアックは 2005 年 4 月より加速器機器のインストールを開始し、2006 年 11 月よりリニアック単独でのビームコミッショニング、2009 年より実験施設へのビーム供給を開始した。

インストール後から現在まで、リニアックの大幅な再アライメントは 2011 年、2013 年および 2016 年の合計 3 回実施している。2011 年の再アライメントは東北地方太平洋沖地震の復旧のために行ったものである[1]。このときは建家の変形の度合いが大きかったため、理想的な直線へのアライメントには相当の期間を要することから、早期のビーム加速再開のため、機器の位置調整量が少なくなるように建家形状に沿わせたアライメントを実施した。その結果、300m のリニアックの直線加速部は上流側 40m 程度の所でおよそ 1mrad の折れ曲がり有する形状となっている。

2011 年以降、ゆっくりではあるものの、局所的な建家変動が大きくなり、アライメントの悪化が顕著となったことから、2013 年には環結合型リニアック (Annular-Coupled Structure linac, ACS) のインストールに合わせてリニアック全体の再アライメント、2016 年には直線部前半の再アライメントを実施するに至っている。

J-PARC では例年、7 月から 9 月はビーム運転を停止し、精密測量や再アライメントは本メンテナンス期間中に実施している。主な測量機材はレーザートラッカー、オートレベルおよび水準器などである。作業期間中、時折床の振動に起因すると思われる測定データの揺らぎ (レーザートラッカーの計測ではポイント測定時の大きな RMS 値、オートレベルでは視準時の像の揺れ) に悩まされるこ

とがある。デジタル表示の水準器を使用しているが、その値が大きく (0.02mrad 以上に) 揺らぐことさえある。そこで、昨年より微小振動計と地震計をトンネル内に設置し、床の振動計測を開始した。

本報告では、建家竣工後からの長期的な加速器トンネル床高さの変動計測結果からその特徴を示すとともに、建家振動の成分とその要因について考察する。

2. リニアック建家と計測器の配置

リニアック加速器トンネルには、以下に列挙する測量用モニュメントや常時観測のためのセンサーを配置している。Figure 1 に加速器トンネル形状と機器の配置を示す。

- 床レベル鉞: トンネル通路の溝と機器設置のためのベースプレートに配置。溝のレベル鉞はリニアック全域におよそ 20m 間隔、ベースプレートのレベル鉞は直線部に配置してある。
- 水管傾斜計: 水管傾斜計 (Hydrostatic leveling system, HLS) をおよそ 50m 間隔で配置 [2]。建家連結部 (Expansion Joint, EXJ) には段差状の変動が発生する可能性があることから、その両側に配置している。
- 地震計: 広帯域地震計を設置。帯域は -3dB で 240s ~ 200Hz。
- 微小振動計: 高感度振動検出器を東西、南北、上下方向に合計 3 台、プレートに固定して床に配置。帯域は加速度出力、-3dB で 0.2Hz ~ 150Hz。
- 変位検出器: 第一アーク出口側の建家連結部の下流側床ベースプレートにスーパーインバーロッド (直径 20mm、全長 500mm) を固定し、上流側ベースプレートに差動トランス方式変位センサーを設置して、長手方向 (東西方向) と横方向 (南北方向) に変位を測定している。上下方向は前述の水管傾斜計によって計測している。

[#] takatoshi.morishita@j-parc.jp

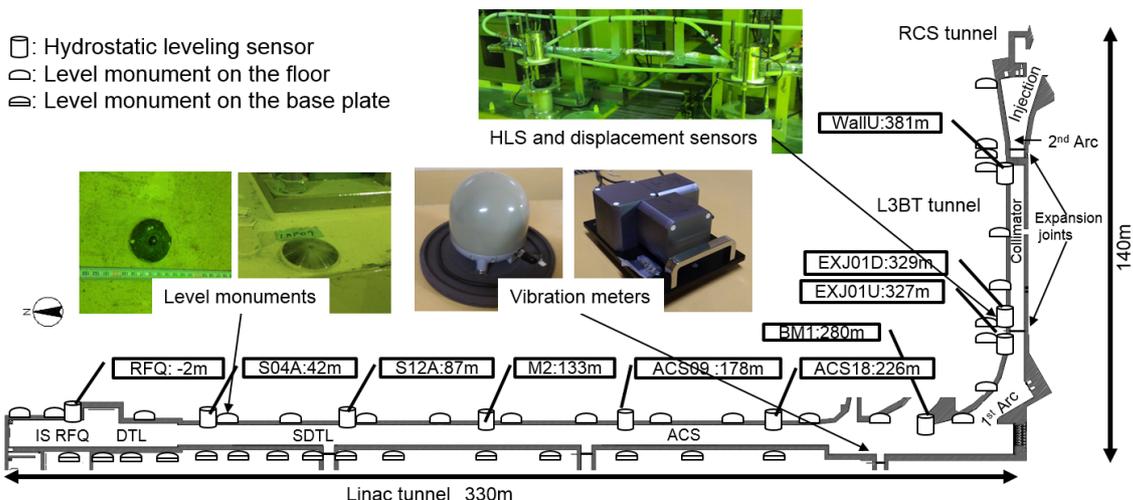


Figure 1: Layout of the J-PARC linac tunnel and instruments.

3. 長期変動

3.1 水準測量

メンテナンス期には建家の高さ変動を把握するため、床レベル鋺の水準測量をほぼ毎年実施している。使用機材はデジタルレベルとバーコード標尺である。Figure 2 に床レベル鋺の比高差年次変動を示す。

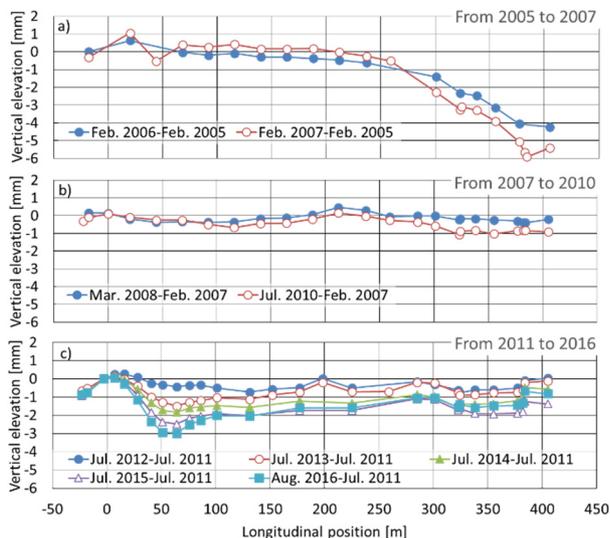


Figure 2: Long term floor elevation since a) Feb. 2005, b) Feb. 2007, and c) Jul. 2011.

Figure 2a)は2005年の建家竣工後から2007年までの変動、2b)は2007年から2010年までの変動、2c)は2011年の地震後から2016年までの変動である。直線部上流のDTL入口付近を長手方向および高さの原点としてデータをまとめた。本図に示すように、過去のデータを3つのグラフに分けたのは、以下に列挙するように、各期間で変動傾向が異なるためである。

- 2005年～2007年:この期間は建設直後に発生しやすい初期変動によって、トンネル下流部(第一アーク以降)の沈下が発生したと考えられる。その大きさは、最初の1年でおおよそ4mm、翌1年間でさらに2mm程度であった。一方で上流側の直線部は±1mm程度であった。[3]
- 2007年～2010年:2009年には測量を実施しなかったもののこの3年間は安定しており、下流部に若干の沈下傾向を残しつつも、±1mm程度の変動に安定化していた。
- 2011年以降:地震後には、直線部上流に局所的な高さ方向の変形が顕著となった。現在までの5年間の定期観測では収束する傾向がみられておらず、今後も定期的な再アライメントが必要であると推測される。

3.2 水管傾斜計によるモニタリング

加速器トンネルに設置してある水管傾斜計は、地震後に水槽の高さを調整し、以後1分間に1回のデータ収集を継続している。現時点ではFigure 2c)に示す床の高さ変動のため、最上流の水槽(Figure 1のRFQ)には他に比べ2mm以上の比高差が生じているが、測定可能レンジは10mmと余裕があるため、水槽の高さは調整していない。Figure 3は2012年1月からの水槽の高さ変動結果を抽出したもので、BM1に対してそれぞれ、上流側のACS09(間隔はおおよそ102m)、下流側にあるWallU(ビームラインに沿った間隔はおおよそ101m)の高低差と、最上流部にあるRFQとS04A(おおよそ42mの間隔)の高低差の変動を示したものである。季節変動が顕著にみられるため、参考までに外気温と降水量を右軸に示した。降雨による地下水位の上昇で、地下トンネルへの浮力変動によると考えられる高さの変動もみられる[4]。季節変動は外気温から1~2カ月程度の遅れ(Spring-8蓄積リングからも同傾向が報告されている[5])を持ちつつ、第一アーク近傍では0.5mm/100m程度の周期的な傾斜発生要因となっていることが分かる。

最上流部(S04A-RFQ)の局所変動は、同方位のACS09-BM1と同じ方向の季節変動成分を持ちつつも、

地震(震度 4 程度であれば年に数回は発生する)などの突発的な要因ではなく、継続的なトンネルの変位によるものであることが確認できた。

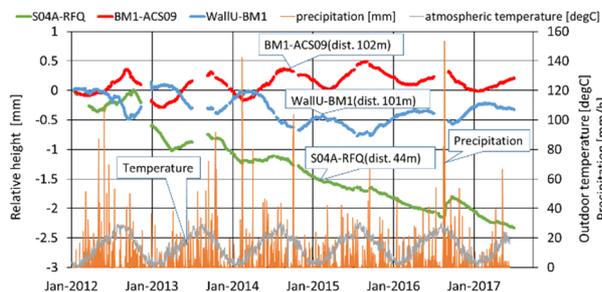


Figure 3: Long term floor tilts along the beam line measured by HLS with environmental factors.

3.3 建家連結部(EXJ)での変動

リニアックトンネルと RCS 主トンネルは L3BT トンネルを介して連結されている。第一アーク出口と第二アーク入口にこれらの建家を連結する EXJ がある。2011 年の地震時にはここで最大で 9mm の段差状のズレが発生しており、変動が集中しやすい箇所である。KEKB 入射器においても連結部での変位計測がなされ、建家のねじれや長期的なアライメントの悪化に影響するほどの変動が報告されている[6]。そこで、第一アーク出口部の EXJ をまたいで変位センサーを取り付けて変動測定を開始した。Figure 4 は 2016 年 7 月末から 2016 年 9 月末までの変位を示したものである。潮汐変動はビーム軸と同じ東西方向のみに見られた。Figure 3 で示した季節変動量は 100m 当たり 0.5mm 程度であったが、2 か月間の観測でも EXJ では短区間(1m 程度)で 0.05mm の変位が見られたことから、局所的な変動が発生していることが分かる。

本データ収集期間中、以下の地震が発生した。

- 2016/7/27 23 時 47 分頃 茨城県北部 M5.4
- 2016/8/19 21 時 7 分頃 茨城県沖 M5.4

共に J-PARC のある東海村では震度 4 であった。このとき、Figure 4 に示すように EXJ では瞬時の変位が発生している。各方向とも 0.03mm 以下の変動であり、直ちにビーム品質に影響する量ではないが、今後もビームロスの発生原因の特定のための一つの情報として、計測を継続する予定である。

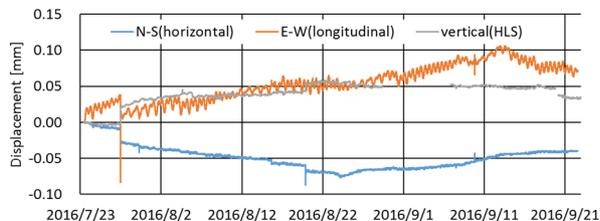


Figure 4: Displacements at the EXJ.

4. 建家振動

4.1 微小振動計による測定

加速器トンネルには水管傾斜計をリニアック全域に配置しているが、時定数は分の領域であるため、精密測量時に問題となる振動の兆候はつかめない。そこで、小型軽量で可搬性の良い微小振動計と、据置型ではあるが広帯域の地震計を導入した。これらは 2016 年 8 月よりトンネル内に設置し、データ収集を開始した。

Figure 5 は微小振動計による測定結果(2016 年 8 月 ~ 10 月)に、風速(気象庁の水戸気象台観測結果より引用)、波浪(全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)より引用、那珂湊の有義波高)を併記したものである。振動の測定結果については、その強度を表す指標として振幅の 1 時間ごとの RMS 値を用いている。8 月末のデータが欠損しているのは、振動が大きくデータロガーのレンジを超過したためである。振動の方向として、東西方向と上下方向を併記してあるが、どちらかといえば上下方向の振動が大きいと言える程度で、大差はなかった。

一方で、明らかに環境との相関が見て取れる。強風と波浪は同期することが多いので簡単に分離はできないが、10 月後半のデータを比較すると、波浪との関連はありそうである(J-PARC リニアックは海岸線から近く、およそ 600m しか離れていない)。波浪の周期は一般に数秒以上であり、使用している微小振動計の帯域外であるため波形をきちんと測定できてはいないが、精密測量作業時に目安としてフィールドで参照するには有用であろう。

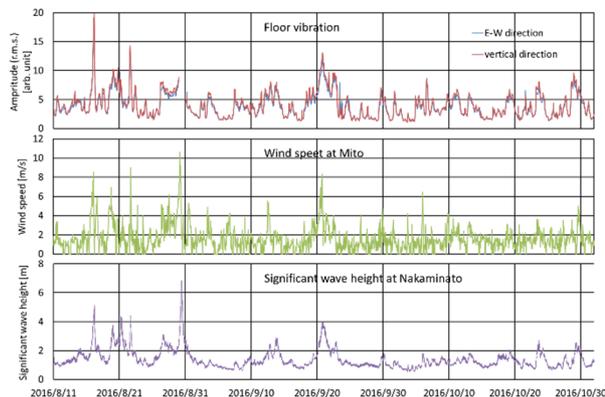


Figure 5: Floor vibration and environmental factors.

4.2 地震計による測定

同期間、微小振動計より低周波側に帯域の広い地震計による測定も行った。地震波形を観測するためのトリガーとは独立に、0.1 秒のサンプリングで 3 次元方向の加速度を継続的に収集している。Figure 6 に台風の影響で波浪が高い 2016 年 8 月 30 日の昼頃と、波浪は低いが風が強い 9 月 3 日昼頃、および平穏な 9 月 5 日早朝の 3 時点における 3 次元方向それぞれの加速度パワースペクトル密度を示す。横軸は秒、加速度の単位は gal である。Figure 7 はこの期間の風速、波浪である。平穏時(9 月 5 日)には 0.3 秒と 2 秒の周期近傍で建家振動が発生していることが分かる。0.3 秒周期の振動は、SuperKEKB の BelleII 検出器ビーム衝突点周辺におい

でも、サーボ加速度計とレーザー干渉計を用いて観測されており、同様な地盤の振動によるものと考えられる[7]。8月30日のスペクトルには6秒～8秒の領域と、10秒～20秒の領域で明らかな振動成分の増加がみられる。

波浪観測データによれば、有義波の周期は12秒程度、平均波の周期は9秒程度であり、これらと近い時間領域にある。一方、9月3日は風が強いものの、上記の周期領域には有意なスペクトルの増加は見られない。しかしながら2秒近傍の領域で振動成分の増加がみられる。

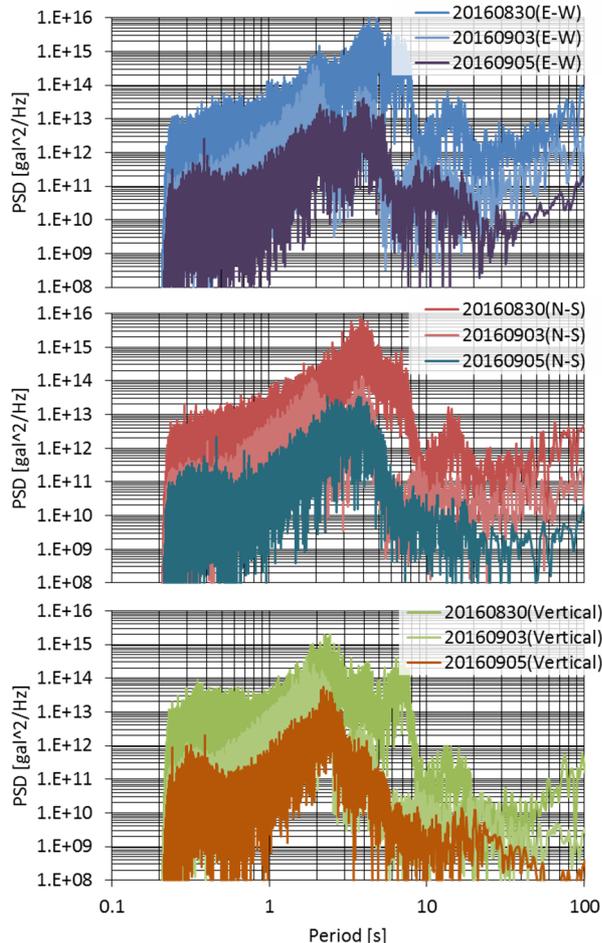


Figure 6: Power spectrum density of the floor vibration.

以上の結果から、振動の要因は以下のように推測される。

- 波浪によって10秒前後の振動が誘起され、建家振動の主たる成分となることがある。
- 風の影響は、より周期の短い2秒以下の領域に建家振動の形で現れる。

平穏な9月5日の東西、南北、上下方向でそれぞれスペクトルの位置が若干ではあるが異なるようである。南北方向のピークより若干周期が短いところに上下方向のピークがあり、東西方向にはその両方を含みブロードなピークが見える。南北に細長い建家の構造が関与していると考えられる。

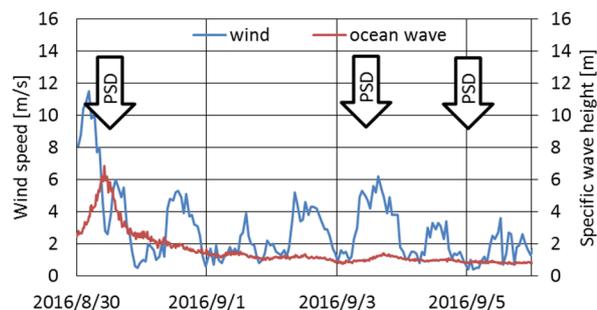


Figure 7: Wind speed and ocean wave height.

5. まとめ

本稿では、J-PARC リニアックで観測した建家変動について、上下方向の長期的な変動傾向と、建家の振動についてその発生要因について検討した。

リニアック加速器トンネル直線上流部の不等沈下は突発的な要因ではなく、継続的な変動によるものであり現在も収束する傾向は見られていない。その他の領域は安定しており、季節変動により0.5mm/100m程度の周期的な傾斜の発生にとどまっている。

加速器トンネルは波浪の影響により10秒前後の周期で振動が発生し、波が高い時には主たる振動成分となる。平穏時の振動は2秒前後の周期で現れており、強風時にはそこから短周期側のスペクトル成分の増加がみられる。

今後、加速器ビーム運転安定化のため、アライメントの悪化の原因となる長期変動と振動計測を継続するとともに、水平方向の長期変動計測への取り組みを検討している。

参考文献

- [1] T. Morishita *et al.*, “地震による J-PARC リニアックアライメントへの影響”, Proceedings of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011, pp. 814-816.
- [2] T. Morishita and M. Ikegami, Nucl. Instrum. Meth. **A602** (2009) 364.
- [3] T. Morishita *et al.*, “J-PARC リニアックにおける DTL/SDTL のアライメント”, Proceedings of 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006, pp. 376-378.
- [4] T. Morishita, ‘Properties of the Vertical Deformation of the J-PARC Linac Tunnel’, Proceedings of 2nd International Symposium on Science at J-PARC, JPS Conf. Proc. 8, 011006 (2015).
- [5] H. Kimura *et al.*, “SPRING-8 蓄積リング収納部床面レベルの長期変位解析”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, August 8-10, 2016, pp.221-224.
- [6] M. Tanaka *et al.*, “KEKB 入射線形加速器トンネル床変動の測定(3)”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, August 8-10, 2016, pp. 1296-1299.
- [7] H. Matsunaga *et al.*, “ナノビーム衝突を目指した相対位置計測および制御技術の検討”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, pp. 307-311.