高速走行する列車から発生する明かり区間圧力変動の発生源

宇田 東樹^{*1}, 北川 敏樹^{*1}若林 雄介^{*2}, 栗田 健^{*3}Identification of aerodynamic pressure fluctuations
generated from high-speed trains passing an open sectionToki UDA^{*1}, Toshiki KITAGAWA^{*1},Yusuke WAKABAYASHI^{*2} and Takeshi KURITA^{*3}^{*1} Railway Technical Research Institute

2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

^{*2, *3} East Japan Railway Company

2-479 Nisshin-cho, Saitama-shi, Saitama 331-8513, Japan

Received: 22 April 2019; Revised: 20 August 2019; Accepted: 14 October 2019

Abstract

It is known that pressure fluctuations are generated from intermediate vehicles of Shinkansen trains. Those pressure fluctuations involve the infra-sound phenomenon with a wavelength longer than several meters. Past studies showed that the infra-sound consists of the aerodynamic and structure-borne components, and the aerodynamic component is originated in the high-speed airflow around vehicles. The generating mechanism of the aerodynamic component, however, had been remained unclear. In this paper, a new methodology applicable to railway field tests is proposed to evaluate low-frequency aerodynamic sound less than 100Hz. A field test was conducted at a flat land without noise barriers, in which fifteen ultra-low frequency microphones constituting a linear microphone array were arranged in line along rails. In order to determine the frequency spectrum and distance decay rate, another five ultra-low frequency microphones were deployed at measurement points 8.7m to 50m apart from the nearest track center. The reason why the flat measurement site was selected was to suppress the bridge noise and focus on the aerodynamic noise during a train passage. On processing the microphone array signal to identify sound sources in field tests, much attention should be paid for the number of averaging; the number of averaging were limited so that sound source identification was difficult in practice. In this analysis, therefore, more than 100 trains were measured and ensemble-averaged to clarify the relationship between the number of averaging and precision of determining sound sources. Our field test campaign showed that low-frequency aerodynamic sound was locally distributed around all sections between two neighbouring bogies and pantograph sections.

Keywords : Shinkansen, Bogie sections, Field test, Low-frequency aerodynamic noise, Linear microphone array

1. 緒 言

1・1 研究背景および先行研究

トンネルのない明かり区間を列車が高速走行すると、100Hz以下の低周波成分を含む圧力変動が放射される(高見他, 2007)(高見, 菊地, 2009). この圧力変動は、振幅・持続時間あるいは周波数等の条件によっては周辺の家屋の窓や建具のガタツキを生じることがあり、特に5~20Hzの周波数ではガタツキが発生しやすいことが知られ

No.19-00179 [DOI:10.1299/transjsme.19-00179], J-STAGE Advance Publication date : 23 October, 2019

^{*1} 正員, 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)^{*2} 正員, 東日本旅客鉄道(株) (〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479)^{*3} 正員, フェロー, 東日本旅客鉄道(株)

E-mail of corresponding author: uda.toki.92@rtri.or.jp

ている(中野, 1994). また, 発生する圧力変動が音波として伝播する場合, その波長は 3.4m 以上に達し, 防音壁のかさ上げなど地上側の対策を行っても十分な低減効果は期待できない. このため, 圧力変動の発生源である車両側の対策が必要である.

鉄道沿線で観測される 100Hz 以下の圧力変動は, 車両まわりの高速気流によって生じる空気力学的な現象に起因する成分と高架橋等の構造物振動によって生じる成分が複合したものと考えられるが, 両者の発生メカニズムは大きく異なる. はじめに, 前者の空気力学的な成分について説明する. 先行研究(高見他, 2007)(高見, 菊地, 2009)によれば, この成分を現象面から切り分けると, ①先頭・後尾部の圧力変動, ②中間車両から連続的に放射される圧力変動, の 2 つで構成されることがわかっている(図 1). ①は, 先頭・後尾部に形成される準静的な圧力場が列車とともに移動することで発生する擬似音であり, 地上に固定された観測点ではパルス状の圧力波として観測される. このパルス状の圧力波は, 先頭・後尾部の断面積変化率および列車断面積によって決まり, 低減対策を講じることは容易ではないが, 圧力波の振幅は距離の 2 乗に比例してすみやかに減衰する性質をもつ(菊地他, 1996)(土肥, 小川, 2004). ②の中間車両から連続的に放射される圧力変動については, 鉄道沿線の現地試験にもとづく周波数特性や距離減衰特性の分析により, 30Hz 前後に極大をもつこと, 遠方まで伝わりやすい線音源状の音波の性質を有していることが明らかになっている(高見他, 2007). しかし, 対象とする音波の波長が 10m 以上に及ぶため, 発生源を明確に特定することはできておらず, 現時点では車両側に対する有効な低減対策が効率的に検討できていない状況にある.

一方, 列車が高架橋等の構造物上を高速走行する際に発生する成分については, 車輪とレール間で生じた加振力により構造物が振動して発生することがわかっている(渡辺他, 2013). また, 空気力学的な圧力変動と構造物音の寄与度については, 31.5Hz 帯以上の周波数帯は構造物音が大きく, 25Hz 帯以下では空気力学的な圧力変動の寄与が大きいとの示唆が現地試験により得られている(高見, 菊地, 2009).

Fig. 1 Overview of pressure fluctuations during the passage of a high-speed train.

1・2 本研究の対象と目的

列車が高速走行する際に発生する圧力変動に関して, 1・1 節の緒言に述べた先行研究をふまえ, 車両まわりの高速気流に起因して中間車両から放射される圧力変動を本論文の研究対象と定める. この圧力変動は, 列車が観測点を通る際に連続的に放射され, 音波の性質を有していることから以下では低周波空力音と呼ぶ. 本研究の目的は, 実車両を対象とした現地測定により, 100Hz 以下の低周波空力音の計測評価法を提案するとともに, 発生源の特定および周波数・距離減衰特性を示すことであり, 発生メカニズムの解明に向けた重要な知見になると考えられる. また, 鉄道の沿線環境では窓や建具のガタツキやすい 5~20Hz の周波数帯を評価対象とすることがあるため, この帯域に着目した考察も行う.

2. 現地試験による低周波空力音の測定

2・1 試験概要

本研究では, 低周波空力音を対象とするため, 構造物音の無視できる条件が望ましい. そこで, 新幹線沿線の明かり区間において, 高架橋等の構造物がない平地構造の直線区間を測定箇所を選定した. 軌道構造はスラブ軌

道である。測定点の周囲に音場を乱すような大きな構造物はなく、測定点付近の約 30m に限っては部分的に防音壁のない区間である。具体的な地上条件等は表 1 に示すとおりである。

Table 1 Details of the measurement site.

Measurement site	Flat land without noise barriers
Measurement line	Inbound line
Track structure	Concrete slab track

2・2 低周波空力音の音源探査

本研究では数 Hz 程度の超低周波数域を計測することのできるマイクロホン（超低周波音圧レベル計，リオン製 XN-1J）をレール方向に多点配列してアレイ（以下，リニアアレイと呼ぶ）を構成し，低周波空力音の音源探査を試みた。リニアアレイの最大展開領域は測定地点の制約からレール方向に 28m とした。マイクロホンをレール方向に配列することで車両の進行方向に沿った音源分布が得られる。ただし，本リニアアレイはレール方向のみに展開している。このため，鉛直方向には分解能はもたず，車両の上部と下部の音源識別はできない点に注意が必要である。

2・3 低周波空力音の周波数特性，距離減衰特性

車両から発生する低周波空力音の周波数特性，距離減衰特性を把握するために，上り側の軌道中心線から離れる方向の距離 8.7m～50m の位置（以下，離れと記載することがある）に 5 本の超低周波音圧レベル計（RION 製 XN-1J）を配置し，周波数特性および距離減衰特性を分析した。

2・4 列車速度と列車位置の検知方法

低周波空力音の音源探査は移動する列車の位置・速度とマイクロホンのデータを正確に同期させる必要がある。通常は，車輪の通過を検知する車軸検知装置をレールに取り付けることが多い。しかし，本研究における現地測定は測定期間が長期にわたると予想されたため，保安上の点から軌道内に立ち入る必要のない方法をとる必要がある。そこで，さく外から光電センサを用いた列車位置検知を行った。

使用した光電センサ（オムロン E3Z-LT66）は，送信側から照射する LED ダイオードによる赤色光を受信側のセンサで受け取る遮断・透過型である。最大反応距離は 60m であるため，上下線の軌道を挟んで光が十分に届く性能を有している。また，光電センサの遮断時応答速度は 1ms 以下であり，応答速度の遅れによる列車位置のずれは無視できる。光軸はレールレベルから 1m 程度の高さに設定し，車両の最先端のノーズ点とは一致しない。このため，列車位置の決定に際しては，車両によって光が遮断された時間の中心点を列車編成中心の基準点とし，列車速度から列車の最先端ノーズ位置を決定した。また，列車速度は地盤振動計（RION 製 VM-53A）による列車通過時の鉛直方向振動レベルを自己相関解析(太田他，2012)により求めた。

2・5 測定機器配置

図 2 に測定箇所付近の様子，図 3 に現地の測定機器配置図を示す。測定項目は以下の 2 つである。

(1) 低周波音

リニアアレイを構成する音源探査用の超低周波音圧レベル計は，図中の SS1～SS15 に示すように，上り線の近接側軌道中心から 12.5m 離れ，レール方向に 2m ピッチで 15 本（全長 28m）設置した。また，周波数特性・距離減衰特性用の超低周波音圧レベル計は，まくらぎ方向に沿って上り線軌道中心から 8.7m (SU1) の防護金網近傍，12.5m 点 (SU2)，25m 点 (SU3)，37.5m 点 (SU4) および 50m 点 (SU5) の合計 5 点に設置した。リニアアレイ用の SS8 マイクロホンは 12.5m 点 SU2 マイクロホンと兼用している。低周波音の測定は自然風の影響を受けやすい点を考慮し，いずれのマイクロホンも全天候型ウィンドスクリーンを装着した状態でほぼ平坦な稲田の地面上に直置きした。

(2) 光電センサおよび地盤振動計

光電センサは送信側を下り線側フェンス付近、受信側を上り線側フェンス付近に設置した。光軸ずれや外乱による測定不良に備えて光電センサは2組セットした。地盤振動計も受信側光電センサの近傍に設置した。

(a) Carefully selected flat measurement site suitable for evaluating infra-sounds. No obstacles which can affect the sound propagation are found.

(b) Measurement line is inbound line in the front. The track is slab concrete. The fence is not expected to reduce the sound pressure.

Fig. 2 Pictures of the measurement site.

Fig. 3 Illustration of sensor arrangement in side and plan views.

SU1 to SU5 are used to evaluate the distance decay and SS1 to SS15 are used to determine the sound source. These microphone data are synchronized with photoelectric sensors indicated as L1 and L2 in order to detect the train position.

2・6 データの分析方法

無指向性マイクロホン(超低周波音圧レベル計)の周波数分析およびリニアアレイによる音源探査を実施した。以下、分析方法を説明する。

(1) 無指向性マイクロホンによる低周波数域の周波数分析

周波数分析を行う時間範囲は列車の先頭部が SU1～SU5 マイクの測線を通過する 2.5 秒前～列車の後尾部がマイクの測線を通過する 2.5 秒後に設定した。マイクロホンで測定した音圧の時間波形に対して、デジタル演算でリアルタイム 1/3 オクターブバンド分析を行い、時間重み付け特性 F (125ms) を適用して基準音圧でレベル化した。一般的に、低周波音の測定評価には時間重み付け特性 S (1 秒) が用いられるが、本研究では車両の長手方向の音源分離を目的としている。このため、3 秒程度の列車の通過時間を考慮し、時間重み付け特性 F を採用した。

1/3 オクターブバンドのフィルタバンクには、4 次のバターワースフィルタを用いた。得られた 1/3 オクターブ周波数バンドごとの音圧レベル変動 $Lp(t)$ から、式(1)により音圧レベルの単発暴露量 (以下、単発音圧暴露レベル LE と呼ぶ) を求めた。

$$LE = 10 \log_{10} \left(\int_{T_0}^{T_1} 10^{\frac{Lp(t)}{10}} dt \right) \quad (1)$$

ただし、 T_0 : 先頭部が観測点を通過する 2.5 秒前、 T_1 : 後尾部が観測点を通過した 2.5 秒後である。各列車に対して求めた単発音圧暴露レベルを同一の車両型式、同程度の列車速度で算術平均し、各車両型式の周波数分析結果とした。

(2) リニアアレイによる低周波数域の音源探査

2m 間隔で配置した 15 本の無指向性マイクロホンを用いてリニアアレイを構成し、式(2)にもとづいた移動音源に対するビームフォーミング処理により音圧変動を計算した。

$$b_j(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_{mj}(t) p_m \left(t + \frac{r_{mj}(t)}{c} \right) \quad (2)$$

$$B_j(t) = b_j(t)/r_0$$

ここで、 $b_j(t)$: 照準点 j による遅延と処理後の音圧変動、 M : マイクロホン数、 $r_{mj}(t)$: 照準点 j とマイク m との距離、 p_m : マイクロホン m で観測された音圧、 c : 音速、 $B_j(t)$: アレイマイク設置位置に換算した遅延と処理後の音圧変動、 r_0 : アレイ中心と音源面との距離 (12.5m)、である。照準点の位置は、高さ方向がレールレベル、レール方向は列車の走行速度によらず 0.4m 刻みに設定し、離れ方向は SU1～SU5 の測線と軌道中心の交点に設定した。

各列車に対して求めた音圧 $b_j(t)$ をもとに 1/1 オクターブバンドで周波数分析し、音圧レベルを算出した後、同一の車両型式、同程度の列車速度で算術平均し、各車両型式の音源探査結果とした。

2・7 リニアアレイマイクロホンの指向特性

式(2)にもとづき、本試験で用いたリニアアレイマイクロホンの指向特性を計算した結果を図4に示す。片側-3dB分解幅は、8Hz帯：22m、12.5Hz帯：10m、16Hz帯：7.4m、20Hz帯：5.8m、25Hz帯：4.5m、31.5Hz帯：3.6mとなる。一車両の長さが25m、隣接2台車の中心間距離が7.5mであることを考慮すると、8Hz帯については一車両長さ程度の音源分解能である。16Hz帯以上については、車両間に存在する音源を互いに分離する性能は有しているが、隣接2台車の音源を分離できる性能はない点に注意する。

Fig. 4 Array pattern for the uniform linear array based on a numerical simulation.

The 3dB resolution for 16Hz is estimated to be 7.4m.

3. 結果および考察

3・1 低周波空力音の基本的な特性

測定点からみて遠隔側となる下り線を走行する列車について、式(1)によって周波数スペクトルを算出した。その後、300km/h以上で走行する66列車（同一の車両形式）の算術平均をとった平均周波数スペクトルを図5に示す。図中のSU1～SU5の順に近接側軌道中心からの離れ距離（8.7m、12.5m、25m、37.5m、50m）が大きくなり、4.25mは図3にあるように上り線と下り線の距離に相当する。

図より、単発音圧暴露レベル（LE）は31.5Hz帯～40Hz帯で極大をとることが特徴的である。この周波数帯以下では、低周波数域へ向かうほど音圧レベルが低下するため、建具のガタツキやすい周波数に対応する5～20Hz帯については右肩上がりとなり、優先的に対処すべき周波数帯は20Hz帯であることがわかる。5Hz帯前後より低い周波数帯は再び音圧レベルが増大している。これは列車先頭および後尾部に形成される準静的な圧力場が観測点を通る際に観測される1波の圧力パルスによる擬似音波と考えられる（図1(a)を参照）。なお、31.5Hz帯～40Hz帯のピークを生じた詳細なメカニズムについては、この結果のみでは判断できないため、数値シミュレーション等を活用した説明が必要である。

Fig. 5 Averaged frequency spectra of 66 Shinkansen trains passing in the outbound line above 300km/h. The prominent peak is observed in the frequency range of 31.5Hz to 40Hz band. The sound pressure level less than 5Hz band is extremely increased because of the pseudo sound wave at the leading and trailing section.

次に、距離減衰特性を示した図 6 を参照する。ここで、距離減衰のべき乗則は次のように算出した。

$$L_1 - L_2 = 10 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^m \quad (3)$$

$\left(\begin{array}{l} L_1 : \text{下り線軌道中心からの距離 } r_1 \text{ における音圧レベルまたは POA 値} \\ L_2 : \text{下り線軌道中心からの距離 } r_2 \text{ における音圧レベルまたは POA 値} \end{array} \right)$

1~4Hz 帯のパーシャルオーバーオール (POA) 値に帯する距離減衰のべき指数 m は約-4.6 であり、点湧き出し近傍の流体力学的な距離減衰 (理論値: -4.0) に近い。したがって、5Hz 帯以下の成分は前述のように、列車の先頭・後尾部によるパルス状の圧力変動 (擬似音波) であると考えられる。一方、5~20Hz 帯および 31.5Hz 帯の距離減衰のべき指数 m は約-1.0 であった。これは、線音源の距離減衰 (理論値: -1.0) と一致することから、これらの周波数帯は 5Hz 帯以下と異なる発生源・物理現象であることがわかる。

Fig. 6 Averaged distance decay of 66 Shinkansen trains passing in the outbound line above 300km/h. Partial overall levels for 1 to 4Hz band and 5 to 20Hz band are calculated with SU2 microphone set as a reference. The distance decay in 1 to 4Hz band is found to be proportional to the power of negative four, whereas the distance decay in 5 to 20Hz band is proportional to the power of negative one.

3・2 低周波空力音の発生源の特定

3・2・1 音源の特定に必要な列車本数

移動音源に対する音源探査を行う際、列車の進来に合わせて音源探査の照準点を移動させて周波数分析の平均回数を確保することが多い。しかし、低周波音を分析対象とする場合、分析したい周波数の音波の周期が長いために、このような平均化を施すことは難しい。例えば、リニアアレイを用いて 320km/h で通過する音源を見通し角 45 度の範囲で追尾すると、追尾できる時間は $(2 \times 12.5 \times \tan(45^\circ/2)) / (320/3.6) = 0.116$ 秒となる。これは、1kHz の音源であれば音波の 100 波分となるが、20Hz の音源では高々 2 波分にしかならず、列車のような移動音源の低周波数域を対象とした音源探査の測定精度を落とす大きな要因となる。したがって、移動音源に対する低周波数域の分析では、平均回数を確保して周波数分析のばらつきを抑える必要がある。一般に、平均回数の平方根に反比例して標準偏差が低減する。仮に 1 列車あたり 4dB の偏差をもつ車両について、音源の同定精度を 1dB 以内に収めるためには少なくとも 16 列車以上の平均が必要と見積もられる。以上の検討をもとに、本研究では実際の列車を対象に、同一形式・同一速度の列車測定本数を変化させて音源位置の同定精度のばらつきを把握した。

図 7 は 3・4 節に示した手法で求めた列車通過時の音圧レベル変動について、1/1 オクターブバンドの 16Hz 帯を例にとって平均列車本数に対する依存性を示したものである。図中の細線は測定した列車それぞれに対応する音圧レベル変動、太線はそれらを算術平均した音圧レベル変動である。車両編成は単独編成、平均列車速度は約 310km/h である。図より、4 本程度の平均列車本数では音圧レベルのばらつきが大きく、発生源を明確に特定することができないが、平均本数を増加させるとばらつきが徐々に抑えられ、64 列車の算術平均をとると、車両長 25m おきに周期的なレベル変動のピークが明確に認められるようになる。これは、列車通過時の低周波空力音を精度よく評価するには数本程度の平均本数では不十分であることを例証している。当該測定場所における列車通過時の音圧レベル変動は 1σ の標準偏差で 4dB 以下に収まることが確認されているため、16 列車以上の平均本数を確保するとリニアアレイの音圧レベルが 1dB 以内の推定誤差に収まると考えられる。

Fig. 7 Sound pressure level during Shinkansen trains passing depending on the number of averages, N. The frequency band of interest is 16Hz. In the case of N=4, the SPL variation doesn't sufficiently correspond with the vehicle. When N is larger than 16, the SPL variation becomes suppressed and their peak positions falls between vehicles.

3・2・2 低周波空力音の発生源

代表的な車両形式を対象として、低周波空力音のレベル変動について述べる。車両の台車位置や主要寸法は図8に示す。図9の車両は列車長約400mの17両併結編成、図10の車両は列車長約250mの10両単独編成の列車である。以下、表2に示した測定条件について、(1)125Hz帯に関する考察、(2)16Hz帯（5～20Hzの高周波側）に関する考察、(3)8Hz帯（5～20Hzの低周波側）に関する考察、(4)異なる車両形式の比較、の順にそれぞれ説明する。

Fig. 8 Schematic figure of leading and intermediate vehicles. Bogie cavities are indicated with red rectangular.

Table 2 Measurement and analysis condition.

Figure	Direction	Averaged train velocity	Average count
Fig. 9	Outbound	312 km/h	133 trains
Fig. 10	Outbound	270 km/h	45 trains (Series A)
			19 trains (Series B)

(1) 125Hz帯における基本特性

定性的な理解のため、図9に示したレベル変動図の125Hz帯を参照する。平均列車本数は133本、平均通過速度は312km/hである。顕著なピークは、列車先頭部と併結部付近、3号車・7号車および12号車・16号車の集電装置（図中の車両屋根部の赤折れ線部分、パンタグラフ本体および遮音板）付近に認められる。また、編成全体にわたって、列車先頭から後尾に向かうほど音圧レベルが小さくなる傾向がある。この傾向は上り線の場合にも同様であった。これは、車両床下と地面の間に形成される乱流境界層が1～2両目にかけて急速に成長し、それ以降もわずかながら発達を続けるため、乱流境界層の発達状況に対応して台車部付近の流入流速も減少するためと考えられる。なお、先行研究(井門, 2009)(宇田他, 2015)によれば、車両側から観測した車両床下の流速は2～3両目でほぼ一定になる車両形式も存在するが、4両目以降の流速がわずかに低下し続ける車両形式もあることがわかっている。また、これらの基本特性は31.5Hz帯や63Hz帯についても同様である。

(2) 16Hz帯に関する考察

建具のガタツキやすい周波数である5～20Hzのうち、高い周波数に対応する1/1オクターブバンド16Hz帯（下限周波数11.3Hz，上限周波数22.6Hz）に着目する。

図9の16Hz帯の結果を参照すると、ピークが観測される低周波空力音の発生源は、いずれも車両と車両の間に存在することがわかる。したがって、車両間間隙部を含め、台車部付近が発生源であると考えられる。さらに詳しくみれば、各車両の前位側台車部付近に位置する傾向もわかるが、この原因については現時点では判明していない。また、集電装置位置（図中の車両屋根部の赤折れ線部分、パンタグラフ本体および遮音板）においても音圧レベルのピークは増大しており、16Hz帯の低周波空力音は集電装置からも発生していると考えられる。他の台車部付近のピークレベルに対する増分は3dB程度であることから、台車部付近で発生する低周波空力音と集電装置から発生する低周波空力音は同程度の大きさと推定される。一方、図10の16Hz帯を参照すると、集電装置部の音源は、他の台車部付近とほぼ同等であるとわかる。このような併結編成と単独編成にみられる違いは、集電装置から発生する低周波空力音の大きさが異なるためではなく、編成長の長い方が車両床下の乱流境界層が発

達し、台車部付近の低周波空力音が低下するためと考えられる。なお、列車本数の制約により図9は312km/h、図10は270km/hの結果となっているが、いずれも車両まわりの流れは十分に発達した乱流となっており、両者の知見は一般性を失わないと考えられる。

以上の音源部位に関する考察から、車両の中間部から放射される低周波空力音の発生源は台車部付近（車間部含む）および集電装置であることがわかった。台車部付近の発生源のさらなる絞り込みは今後、詳細な模型実験等を通じて明らかにすべき課題であるが、台車部付近が音源とすれば、台車キャビティ形状あるいは台車キャビティ空間によって誘起される圧力変動が要因となっている可能性が考えられる。

(3) 8Hz 帯に関する考察

8Hz 帯（下限周波数 5.66Hz, 上限周波数 11.31Hz）を参照すると、発生源は先頭・後尾部および併結部であり、この周波数帯は列車の断面積変化が生じるこれらの部位から発生する圧力変動が支配的であるとわかる。

(4) 車両形式別の比較

A 系列車と B 系列車の車両別比較結果を図10に示す。A 系列車と B 系列車の走行速度はいずれも約 270km/h であるが、台車側面のカバー形状、車両間間隙部（隙間：500mm）のフサギ状況やパンタグラフ部の形状が異なる。A 系車両の台車側面のカバーは車両側面の下部まで完全に覆われたフルカバー形状であり、車両間間隙部のフサギについても車両上面・側面・側面下部ともに平滑化されている。一方、B 系車両の台車側面のカバーは A 系車両と比べて 400mm 程度高さが短く、車輪の下半分が見通せる形状である。車両間の間隙部も側面を除き、開放された形状となっている。

図より、125Hz 帯の結果では、ほぼ車両全体にわたって B 系に比べて A 系の音圧レベルが小さいことがわかる。この傾向は 63Hz 以下でも同様であり、低周波空力音は A 系の方が小さい。また、建具のガタツキやすい周波数 5~20Hz に対応する 16Hz 帯は先頭・後尾・台車部のいずれも A 系の方が音圧レベルは小さいことがわかる。これらの違いを詳細に議論するには台車部・車両間間隙部付近の詳細な要素試験や車両全体の床下流れに関する数値解析が必要と考えられるが、車両床下の流速分布の違い以外で推察できることとして、①台車カバー形状の違い、②車両間間隙部のフサギ状況の違いが挙げられる。①については、A 系と B 系は台車カバーの形状が異なり、A 系車両の台車カバーの方が B 系車両より台車部を覆う面積が多く、広範な周波数帯にわたって低周波空力音の発生が抑制された可能性がある。②についても、車両間間隙部がほとんど平滑化されている A 系車両の方が車両間間隙部から発生する空力音が小さく、低周波空力音が小さくなったと考えられる。

Fig. 9 Ensemble averaged pass-by SPL for Shinkansen trains running above 300km/h. 133 trains are averaged in order to suppress the variation in SPL. 8Hz band has peaks around the leading and trailing vehicles and coupled section, whereas the peaks are located between each vehicle in more than 16Hz band. This result validates our methodology and clearly demonstrates the source positions.

Fig. 10 Comparison of the ensemble averaged pass-by SPLs between two typical rolling stocks running at 270km/h. Note that the line drawing of the train is series A with pantographs at cars No.3 and No.7 and series B has pantographs at cars No.4 and No.6. As a whole, SPLs of series A are smaller than that of series B, which means infra-sound can be reduced by optimizing the shape of rolling stocks.

4. 結 言

車両まわりの高速気流に起因して中間車両から放射される圧力変動（低周波空力音）に関して，実車両を対象とした現地測定により，100Hz 以下の低周波空力音の計測評価法を提案した．この手法を用いて，発生源の特定を試みた結果，以下の知見を得た．

(1) 防音壁のない平地区間を 300km/h 以上で走行する新幹線の周波数スペクトルは，31.5Hz 帯～40Hz 帯に極大をもち，低周波側へ向かうほど低下する分布となることを現地試験により示した．低周波音の評価対象として 5～20Hz を想定した場合，20Hz 付近が優先的に低減すべき周波数となる．また，5～20Hz の低周波空力音は，距離の-1 乗に比例して減衰する線音源状の音波の性質を有していることを確認した．

(2) 現地測定において，100Hz 以下の低周波数域を対象とする場合，レール方向 28m 程度の広範な範囲にリニアアレイを展開したうえで，16 列車以上の平均本数を確保すると標準偏差 1dB 以内の推定誤差に収まると考えられる．また，現行列車では 4 本程度の平均列車本数では音圧レベルのばらつきが大きく，低周波数域の発生源を明確に特定することができないことも確認した．

(3) 1/1 オクターブバンド 16Hz 帯（5～20Hz の高い側の周波数に対応）の低周波空力音は台車部付近（車間部含む）が発生源であると考えられる．車両まわりで乱流境界層が発達する影響により，列車先頭から遠ざかるほど音圧レベルは小さくなる．また，16Hz 帯の低周波空力音は集電装置（パンタグラフ本体および遮音板含む）からも発生していることと推定される．

文 献

- 土肥哲也，小川隆申，列車まわりの近傍圧力場に関する理論的考察，日本機械学会論文集B編，Vol.70, No.700(2004)，pp.3082–3089.
- 井門敦志，車上側および地上側からの計測による車両床下流れの評価，鉄道総研報告，Vol.23, No.7(2009)，pp.39-44.
- 菊地勝浩，鷹崎徹，飯田雅宜，列車が明かり区間を通過する際に発生する低周波圧力波の特性，日本機械学会論文集B編，Vol.71, No.708(2005)，pp.2013-2021.
- 菊地勝浩，内田一男，中谷浩二，吉田康夫，前田達夫，柳澤三憲，三次元境界要素法による列車通過時の圧力変動解析，鉄道総研報告，Vol.10, No.2(1996)，pp.47-52.
- 中野有朋，超低音(聞えない音)―基礎・測定・評価・低減対策，技術書院(1994).
- 太田達也，後藤賢光，福島昭則，新幹線走行時の地盤振動波形を用いた走行速度の測定，日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，秋季(2012)，pp.297-300.
- 高見創，菊地勝浩，明かり区間走行時に生じる高速列車の低周波音分析，鉄道総研報告，Vol.23, No.7(2009)，pp.5-10.
- 高見創，菊地勝浩，前川博，栗田健，若林雄介，高速列車が明かり区間を走行する際に生じる低周波音，日本機械学会論文集B編，Vol.73, No.735(2007)，pp.2275–2282.
- 宇田東樹，若林雄介，栗田健，岩崎誠，山崎展博，井門敦志，スラブ軌道区間における新幹線車両下部の流速分布，日本機械学会論文集，Vol.81, No.830(2015)，DOI:10.1299/transjsme.15-00161.
- 渡辺勉，曾我部正道，徳永宗正，車両/軌道/構造物の各種パラメータが鉄道RCラーメン高架橋の部材振動特性に及ぼす影響に関する数値解析的検討，土木学会論文集A2(応用力学)，Vol. 69, No.2(応用力学論文集 Vol.16)(2013)，pp.I_821-I_832.

References

- Doi, T. and Ogawa, T., Theoretical study on the near pressure field around a train, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.70, No.700 (2004), pp.3082–3089 (in Japanese).
- Ido, A., Measurement of under-floor air flow on board the train and on the ground, RTRI Report, Vol.23, No.7(2009), pp.39-44 (in Japanese).
- Kikuchi, T., Takasaki, T. and Iida, M., Characteristics of low-frequency pressure waves radiated from a train passing an open section, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.71, No.708(2005), pp.2013–2021 (in Japanese).
- Kikuchi, T., Uchida, K., Nakatani, K., Yoshida, Y., Maeda, T. and Yanagizawa, M., Numerical analysis of pressure variation under train passage using the boundary element method, RTRI Report, Vol.10, No.2(1996), pp.47-52 (in Japanese).
- Nakano, A., Ultra low-frequency sound (inaudible sound)-basics • measurement • evaluation • mitigation measures, Gijutsu Shoin (1994) (in Japanese).
- Ohta, T., Goto, M. and Fukushima, A., Determination of Shinkansen super-express railway speed by ground vibration measurement, Proceedings of the 2012 Autumn meeting, The institute of noise control engineering of Japan (2012), pp.297-300 (in Japanese).
- Takami, H. and Kikuchi, K., Analysis of wayside low-frequency noise from a high-speed train, RTRI Report, Vol.23, No.7(2009), pp.5–10 (in Japanese).
- Takami, H., Kikuchi, K., Maekawa, H., Kurita, T. and Wakabayashi, Y., Low-frequency noise radiated from a high-speed train passing an open section, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.73, No.735 (2007), pp.2275–2282 (in Japanese).
- Uda, T., Wakabayashi, Y., Kurita, T., Iwasaki, M., Yamazaki, N. and Ido, A., Velocity profile under Shinkansen vehicle on slab track, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.830(2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00161.
- Watanabe, T., Sogabe, M. and Tokunaga, M., The study by the numerical analysis about the influence that various parameters of the vehicle / track / structure give to member vibration properties of the reinforced concrete rigid frame viaduct, Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, Series A2, Vol.69, No.2(2013), pp.I_821-I_832 (in Japanese).