

列車走行時に発生する低周波圧力変動の発生源の解明

宇田 東樹* 小方 幸恵*

Identification of Aerodynamic Pressure Fluctuation Generated from Trains

Toki UDA Yukie OGATA

It is known that pressure fluctuations including infrasound are radiated from intermediate vehicles of Shinkansen trains. Previous studies have shown that infrasound consists of the aerodynamic and structure-borne components, and the aerodynamic component is originated in high-speed airflow around vehicles. The mechanism of generating the aerodynamic component, however, has been remained unclear. In this paper, a new methodology applicable to railway field tests is proposed to evaluate low-frequency aerodynamic sound less than 100 Hz. More than 100 trains were measured and ensemble-averaged, and it was shown that low-frequency aerodynamic sound was locally distributed along each whole section between two adjacent bogies and pantograph sections.

キーワード：空力音，低周波圧力変動，現地試験，リニアアレイ，台車部

1. はじめに

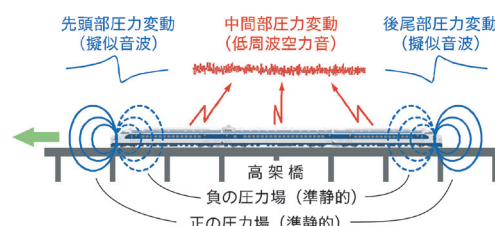
1.1 研究背景および先行研究

トンネルのない明かり区間を列車が高速走行すると、100Hz以下の低周波の成分を含んだ圧力変動が放射される¹⁾²⁾。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の周波数では顕在化しやすい³⁾。また、圧力変動の波長は数m~数十m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。

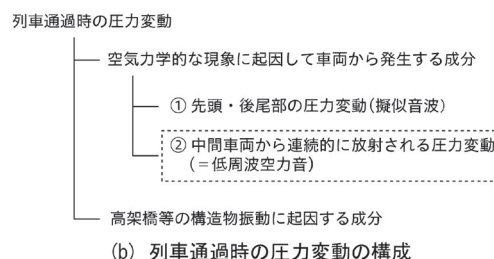
鉄道沿線で観測される100Hz以下の圧力変動は、車両まわりの高速気流によって生じる空気力学的な現象に起因する成分と高架橋等の構造物振動によって生じる成分が複合したものと考えられるが、両者の発生メカニズムは大きく異なる。はじめに、前者の空気力学的な成分について説明する。先行研究¹⁾²⁾によれば、この成分を現象面から切り分けると、①先頭・後尾部の圧力変動、②中間車両から連続的に放射される圧力変動、の2つで構成されることがわかっている(図1)。①は、先頭・後尾部に形成される準静的な圧力場が列車とともに移動することで発生する擬似音であり、地上に固定された観測点ではパルス状の圧力波として観測される。この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乗に反比例してすみやかに減衰する性質をもつ⁴⁾⁵⁾。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¹⁾。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いない。

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って構造物が振動して発生することがわかっている⁶⁾。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²⁾。



(a) 車両から発生する低周波圧力変動の模式図



(b) 列車通過時の圧力変動の構成

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

1.2 本研究の対象と目的

先行研究をふまえ、列車が高速走行する際に発生する圧力変動に関して、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、列車が観測点を通過す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。

本研究では、100Hz以下の低周波空力音の計測評価法を提案し、実車両を対象とした現地測定により、発生源の特定を試みた。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、新幹線沿線の土工区間（高架橋等の構造物がない平地構造の明かり区間）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。

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する。

2.3 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においては、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たため、車両の最先端のノーズ点とは一致しない。そこで、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（リオン製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⁷⁾により求めた。

2.4 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3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。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は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。光軸の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。

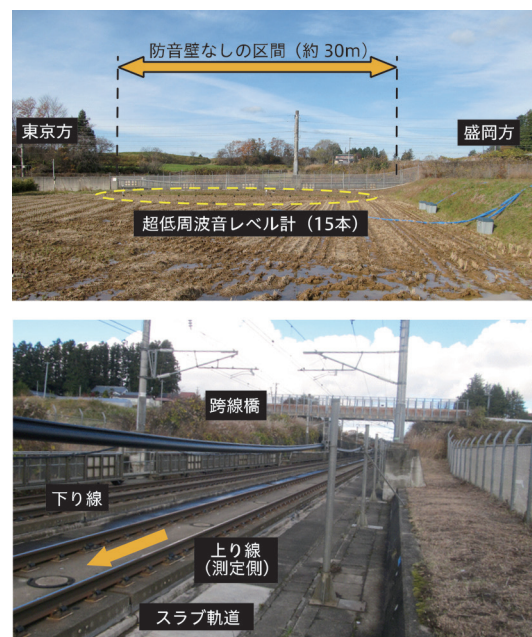


図2 低周波空力音の測定地点

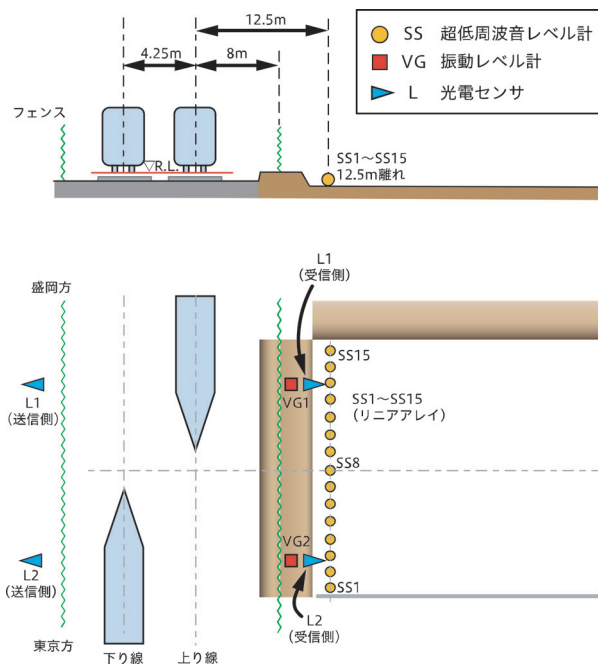


図3 低周波空力音の測定機器配置図

2.5 データの分析方法

リニアアレイによって測定した音圧を用いて、式(1)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。

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

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

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 とマイクロホン 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、 $B_j(t)$: リニアアレイの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、離れ方向は上下線の軌道中心に設定した。

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。

2.6 リニアアレイマイクロホンの指向特性

式(1)にもとづき、本試験で用いたリニアアレイの指向特性 (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 である。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。

3. 低周波空力音の発生源

3.1 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 4 は 2.5 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。車両は 10 両編成、平均列車速度は約 310km/h である。同図より、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、音の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。

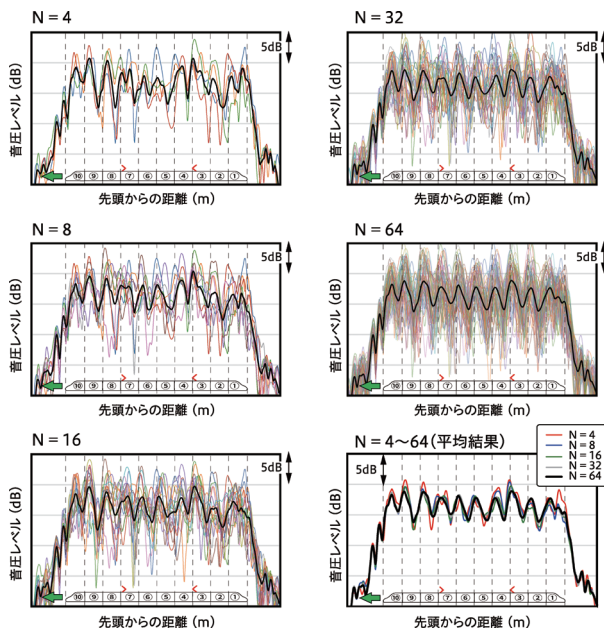


図4 平均列車本数（図中のN）による列車通過時の音圧レベル変動の違い（16Hz帯）

表1 分析列車の条件

図番号	上下	平均列車速度	平均列車本数
図5	下り列車	312 km/h	133 列車
図6	下り列車	270 km/h	45 列車 (A系) 19 列車 (B系)

3.2 低周波空力音の発生源

低周波空力音のレベル変動について、代表的な車両形式を対象に、(1) 63Hz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。図5および図6における分析列車の詳細は表1に示す。なお、列車本数の制約により図5は312km/h、図6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。

3.2.1 63Hz帯における特性

定性的な理解のため、図5に示したレベル変動図の63Hz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（同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ことによると考えられる。なお、先行研究^{8) 9)}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帯についても同様である

3.2.2 16Hz帯における特性

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5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、発生源が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（同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6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。

3.2.3 8Hz帯における特性

8Hz帯（下限周波数5.66Hz、上限周波数11.3Hz）を参照する。発生源は先頭・後尾部および併結部であり、この周波数帯においては、列車の断面積変化が生じるこれらの部位に起因する圧力変動が支配的であることがわかる。

3.2.4 車両形式別の比較

A系編成とB系編成の車両別比較結果を図6に示す。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系編成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系編成の台車側面のカバー高さはA系編成と比べて

400mm程度短く、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。

同図より、63Hz帯の結果では、車両全体にわたってB系編成に比べてA系編成の音圧レベルが小さいことがわかる。この傾向は16Hz帯や31.5Hz帯でも同様で

あり、低周波空力音はA系編成の方が小さい。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系編成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

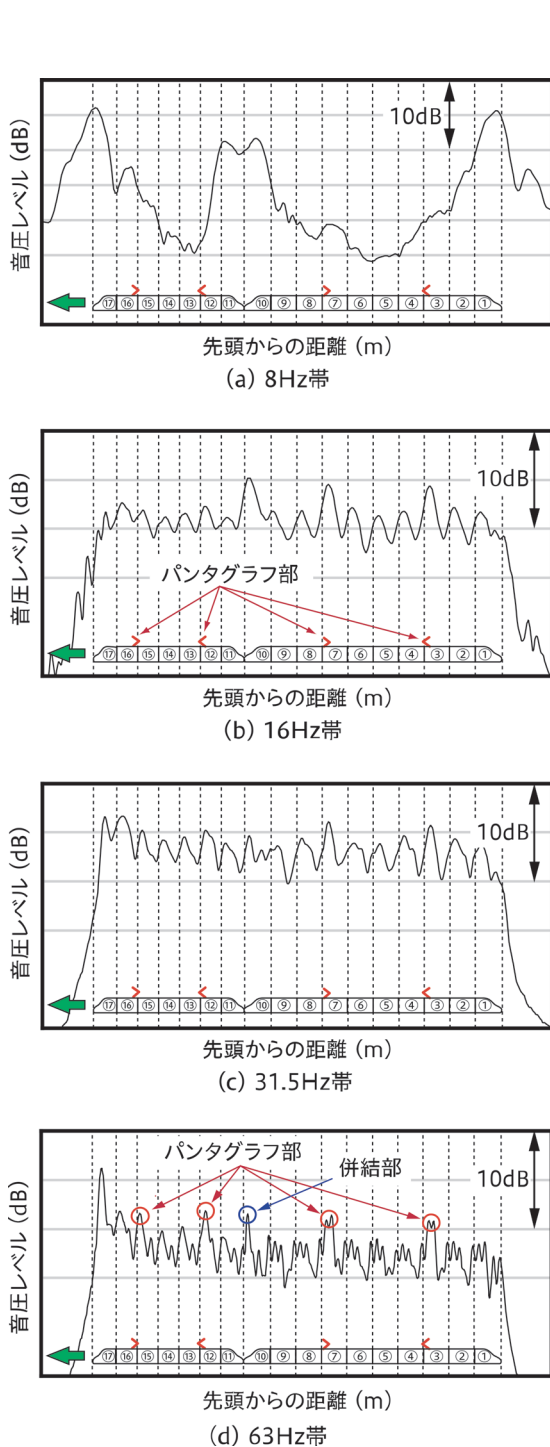


図5 列車通過時の圧力変動
(列車速度 300km/h 以上, 133 列車平均)

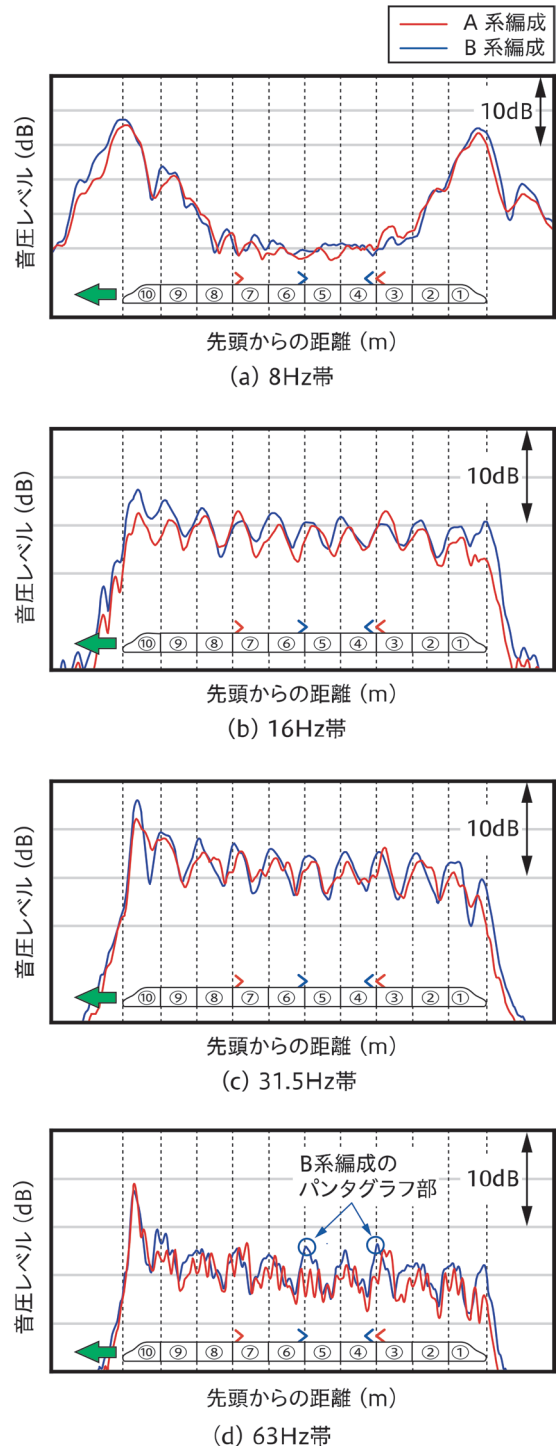


図6 270km/hで走行する2つの車両の圧力変動の比較
(パンタグラフ位置はA系編成が3号車と7号車、B系編成が4号車と6号車)

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系編成とB系編成は台車カバーの形状が異なり、A系編成の台車カバーの方がB系編成より台車部を覆う面積が大きく、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、車両間隙部がほとんど平滑化されているA系編成の方が車両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。

以上の一連の考察から、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るべき課題であるが、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。

4. まとめ

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) 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。
- (2) 1/1オクターブバンド8Hz帯（5～20Hzの低い側の周波数に対応）の要因は、先頭・後尾部および併結部における列車の断面積変化に起因して発生する圧力変動であると考えられる。
- (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

ていると推定される。

- (4) 1/1オクターブバンド31.5～63Hz帯の低周波空力音は、車両床下と地面の間に形成される乱流境界層の影響を受け、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認められた。

謝辞

本研究における走行試験の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社の栗田氏、若林氏をはじめ関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) 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, pp.2275-2282, 2007
- 2) 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, pp.5-10, 2009
- 3) 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
- 4) 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, pp.47-52, 1996
- 5) 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, pp.3082-3089, 2004
- 6) 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), pp.I_821-I_832, 2013
- 7) 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, pp.297-300, 2012
- 8) 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, pp.39-44, 2009
- 9) 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, DOI:10.1299/transjsme.15-00161, 2015