

# 高速走行する新幹線における低周波空力音の特性

宇田 東樹\*      北川 敏樹\*  
 斉藤 実俊\*\*    若林 雄介\*\*\*

## Low Frequency Aerodynamic Sound from Shinkansen Trains

Toki UDA      Toshiki KITAGAWA  
 Sanetoshi SAITO    Yusuke WAKABAYASHI

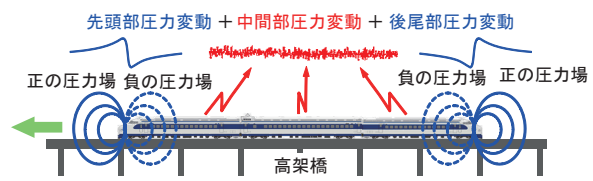
Pressure fluctuation is generated by the high-speed trains and the railway structures in an open section without tunnels. This pressure fluctuation consists of two components, i.e. the aerodynamic component which is generated by the train vehicles and the structure borne sound generated by the railway structures, and the frequency of interest is mainly below 100Hz. In particular, for the aerodynamic component, the characteristics, e.g. noise sources and frequency spectra, are unclear while major aerodynamic sources of Shinkansen noise in the range of 100 to 20kHz are pantographs, bogies and gaps between cars. In this study, a field test using a linear microphone array was conducted in order to make clear the low-frequency aerodynamic sound sources. In addition, a model-scale experiment using a launching facility for train model was carried out to simulate the actual aerodynamic sound and investigate low-noise shapes. Through these tests, the bogie cavities under the train body are identified as one of the major sources. It is also found out that the rounding the cavity edge is supposed to be one of the effective reduction countermeasures against the low-frequency aerodynamic sound.

キーワード：新幹線，低周波空力音，現地測定，発射試験，リニアアレイマイクロホン，台車キャビティ

### 1. 緒 言

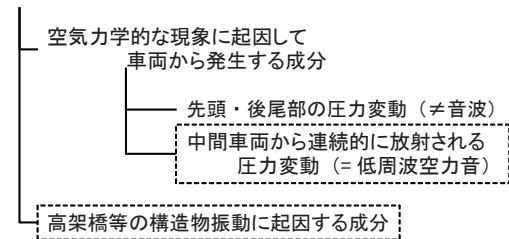
300km/h以上の速度で走行する新幹線車両においては、空力騒音が全体騒音の概ね50%以上を占めると推算される<sup>1) 2)</sup>。新幹線車両から発生する空力騒音のうち、100Hz～20kHzについては、過去に走行試験等で実施された音源探査により、パンタグラフや台車・車間部が主な音源であることが明らかとなっている<sup>1)</sup>。一方、100Hz以下の周波数成分は、明かり区間を新幹線が走行する際に発生する圧力変動であるが、発生源やメカニズムに関する知見が不十分である。この圧力変動は、空気力学的な現象に起因して車両から発生する成分と構造物振動に起因する成分に分けられる<sup>3) 4)</sup>。このうち、車両から放射される空気力学的な成分は、先頭・後尾部の圧力場が誘起する変動と、先頭・後尾部以外の中間車両から連続的に放射される圧力変動で構成されている(図1)。先頭・後尾部の圧力変動は静止した空气中を物体が高速で走行する際に形成される準静的な圧力場(静圧変動)であり、地上に固定された観測点ではパルス状の圧力変動として測定される。この圧力変動の大きさは、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、さらなる低減対策を講じることが困難であるが、その音圧レベルは距離の4乗に反比例してすみやかに減衰する。中間車両から連続的に放射される圧力変動(以下、低周波空力音と呼ぶ)については、先行研究により、音圧レベルが距離の1乗に反比例して遠方まで伝わる音波の性質をもつことがわかっているが、発生源は明確で



(a) 車両から発生する圧力変動の模式図

### 列車通過時の圧力変動



(b) 圧力変動の分類

図1 列車通過時の圧力変動

\* 環境工学研究部 騒音解析研究室  
 \*\* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室  
 \*\*\* 東日本旅客鉄道株式会社

特集：空気力学・騒音

はない。そこで本研究では、低周波の空力音源を特定するため、現地測定ならびに列車模型を高速で射出する発射試験を実施し、現象解明を試みた。

2. 低周波空力音の現地測定

新幹線車両が高架橋等の構造物上を高速走行する場合に発生する 100Hz 以下の圧力変動には、低周波空力音に加え、構造物音も含まれる。このため、低周波空力音の現象解明という観点では、構造物に起因する成分を無視できる方が好ましい。そこで、図 2 に示すような構造物振動を無視できる平地区間を測定箇所を選定し、現地測定を実施した。

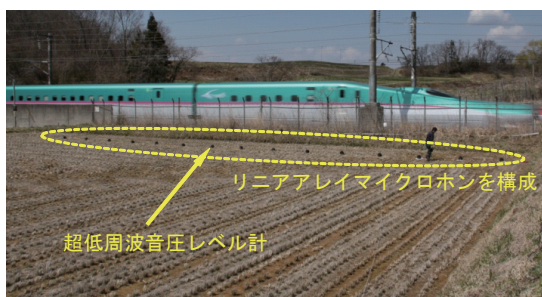


図 2 低周波空力音の測定箇所の例

2.1 周波数特性

低周波空力音の周波数特性や距離減衰特性を調査するため、近接側軌道中心からまくらぎ方向の離れ 6.3 ~ 50m の範囲に複数の超低周波音圧レベル計を配置して測定を実施した。

近接側軌道中心からの離れ 6.3m, 12.5m, 25m の測定点における周波数スペクトルを図 3 に示す。周波数分解能は 0.8Hz、縦軸は一列車通過時の音圧の単発暴露量(以下、単発音圧暴露レベルと呼ぶ)である。図より、6.3m 点では単発音圧暴露レベルは 31.5Hz 帯で極大、12.5Hz 帯で極小をとる周波数特性を有している。12.5Hz 帯以下の成分は測定距離が離れると急激に減衰しており、列車の先頭・後尾部の圧力変動(擬似音波)が支配的と考えられる。一方、12.5Hz 帯以上の周波数は減衰しにくい性質を有している。次節以降に示す距離減衰特性や音源位置などを考慮すると、12.5Hz 帯以上の成分は列車の中間部から連続的に放射される低周波空力音であると考えられる。

2.2 距離減衰特性

6.3m 点を 0dB とした場合の距離減衰特性を図 4 に示す。ここでは低周波空力音に着目するため、12.5 ~ 20Hz 帯のバンドパスフィルタをかけて単発音圧暴露レ

ベルを算出したが、200Hz まで含めても距離減衰特性は変わらないことを確認している。図より、単発音圧暴露レベルは測定距離の概ね 1 乗に反比例して減衰することが確認できる。この距離減衰特性は、線音源の性質と符号することから、先行研究<sup>3)</sup>と同様、低周波空力音の音源は線音源状の性質を有していると考えられる。

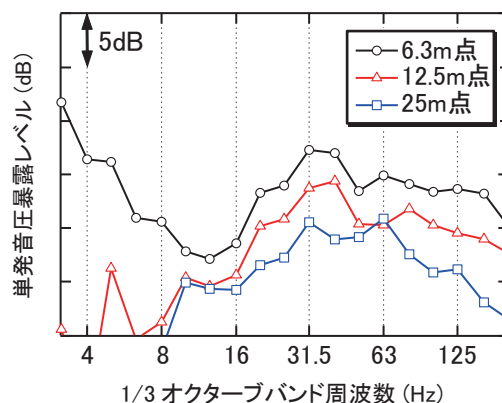


図 3 300km/h 以上で走行する新幹線における圧力変動の周波数分析結果

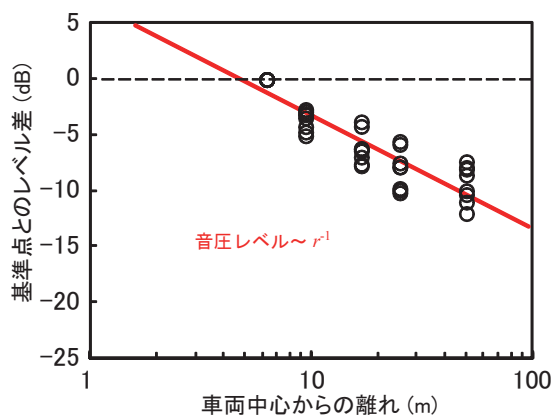


図 4 12.5 ~ 20Hz 帯の距離減衰特性

2.3 音源位置の特定

前節にて列車通過時の低周波空力音が線音源の性質をもつことを確認した。しかし、点音源・線音源という分類は観測点と音源との相対的な位置関係あるいは列車の走行速度によって変化しうる。そこで、詳細な音源位置を特定するため、多数の超低周波音圧レベル計(リオン株式会社製 XN-1J)を直線状に並べてリニアアレイを構成し、音源位置を同定した。低周波音圧レベル計は、図 2 に示すように上り線の近接側軌道中心から 12.5m 離れた位置にレール方向に 2m 間隔で 15 台配列し、式(1)の遅延和演算にもとづくアレイ処理によって 5 ~ 20Hz 帯の指向性出力を算出した。

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

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

ここで、 $b_j(t)$ ：照準点  $j$  による遅延と処理後の音圧（音源から 1m 離れ相当）、 $M$ ：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、 $B_j(t)$ ：アレイマイク設置位置に換算した遅延と処理後の音圧（本研究における指向性出力）、 $r_0$ ：アレイ中心と音源面との距離（12.5m）である。

式 (1) に従って算出した列車通過時の音圧をレベル化（指向性出力）し、同一速度（300km/h 以上）で走行する数本の列車を算術平均した結果を図 5 に示す。これより、車両通過時に観測される指向性出力のレベル変動は、車両長の 25m とほぼ一致する間隔で山谷を繰り返す形をとり、そのピーク位置が概ね車両間の付近に存在することがわかる。低周波空力音は数メートルオーダーの車両の大きな構造に起因して発生すると推定されることから、車両下部の台車部付近が低周波空力音の主要な音源であると考えられる。なお、車両間の隣接台車が分離できていないのはリニアアレイマイクロホンの分解能の限界によるものである。

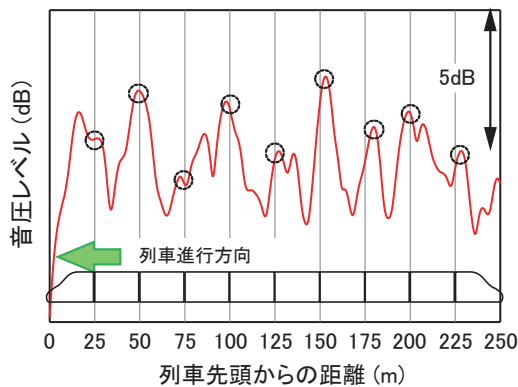


図 5 リニアアレイマイクロホンを用いた列車通過時の音圧レベル変動（5～20Hz 帯）

### 3. 実験的手法による低周波空力音の現象説明

2 章の現地測定によって、列車の台車部あるいは車間部が低周波空力音の音源となりうるということがわかった。そこで、列車通過時に放射される低周波空力音の現象を模型実験で再現する試みの 1 つとして、列車模型を高速で発射して通過時空力騒音を評価する発射試験を実施した。ここでは、新幹線車両下部の台車が格納される空間（以下、台車キャビティ部と呼ぶ）から発生する空力音を測定した。通常、空力音の実験の評価には測定の正確さ・容易さの面から風洞試験を用いることが多い。しかし、本研究が対象とする低周波空力音は 100Hz 以下の

長波長の音波であるため、風洞試験では発生源の特定が難しい。また、地面に対する相対速度の再現や暗騒音の影響により、風洞試験を適用しにくい側面がある。そこで、本研究では列車模型を高速で発射する発射試験を用いることとした。

#### 3.1 列車模型の走行方法

発射試験は、鉄道総合技術研究所が所有する列車模型発射装置<sup>5)</sup>を用いて実施した。

##### (1) 走行方法

本装置は高速回転する複数の駆動輪により供試体を射出する装置であり、列車模型の中心を貫通する直径 5mm のピアノ線 1 本で走行案内する方式を採用している。

##### (2) テストセクション

テストセクション付近の様子を図 6 に示す。地面は、幅 1800mm、長さ 1800mm の構造用合板で模擬した（以下、地面板と呼ぶ）。地面板と列車模型床面との隙間は、模型縮尺に基づく流れの相似則から換算すると 400（軌道上面～車両床面）/70（模型縮尺比）=5.7mm とするべきであるが、走行時のピアノ線のたわみにより地面板と列車模型が衝突する危険があるため、約 10mm に設定した。

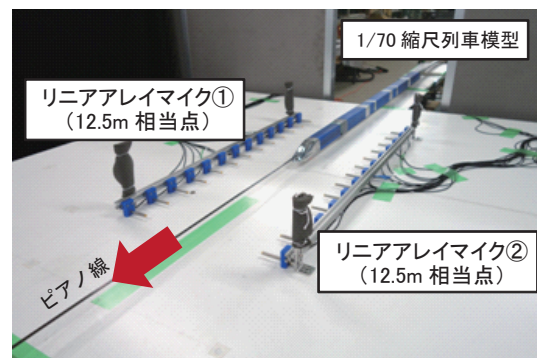


図 6 列車模型の先頭部およびテストセクション付近の様子

#### 3.2 列車模型の構成

トンネル微気圧波の実験の評価等に用いられる縮尺模型は、実形状を模擬した三次元的な列車模型および軸対称の発射体から構成される。このような模型を使用する際は、駆動輪を抜けた直後に発射体を停止させ、列車模型の部分のみがテストセクションを通過する、分離型の発射方式（図 7 上）となる<sup>6)</sup>。しかし、この方式は、発射体を急停止させる際にピアノ線に大きな加振力が作用する結果、ピアノ線からの放射音（暗騒音）が増大する。このため、空力音の測定には適さない。そこで、発射体と列車模型が一体となって走行する「一体型列車模型」を新たに開発した（図 7 下）。これにより、ピアノ線の振動を最小限に抑えながら、列車模型を走行させること

特集：空気力学・騒音

ができ、発射試験において低周波空力音を定量的に評価することが可能となる。

使用した供試体は図8に示す1/70縮尺の実形状列車模型であり、最大で3箇所の隣接台車部を模擬できる構成となっている。測定対象となる台車キャビティ部は、長さ60mm、深さ12mm、幅48mm（現車換算後、長さ4200mm、深さ840mm、幅3360mm相当）とした。

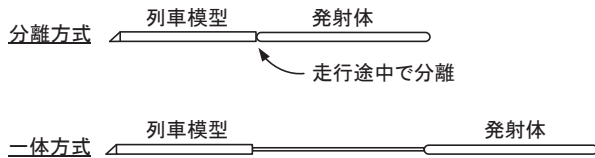
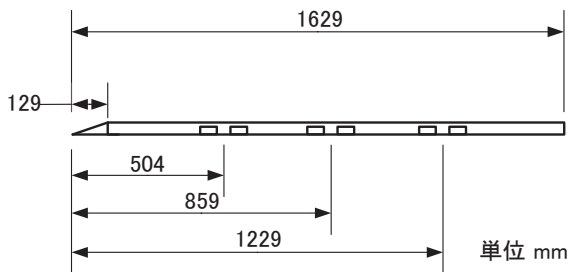
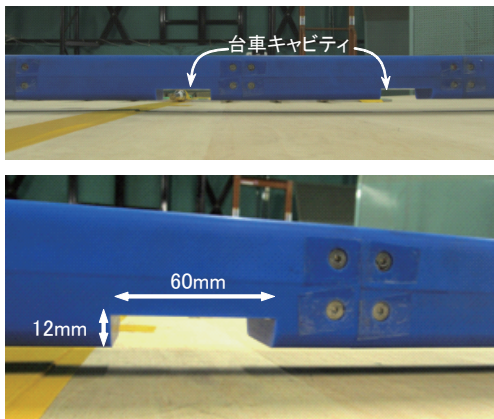


図7 列車模型の発射方式



(a) 列車模型側面図



(b) 台車キャビティ部（側カバーなし）

図8 列車模型の詳細

3.3 列車の走行速度

列車速度は、列車模型に埋め込んだネオジウム磁石が軌道の2カ所に設けたコイルを通過する際に発生する誘導起電力の時間差から算出した。両コイルはテストセクションを挟んで4mの距離をおき、ピアノ線を取り囲むように設置した。射出速度は列車模型や制動設備の制約を考慮して200km/hに設定した。

3.4 測定センサおよび測定項目

測定点の配置を図9に示す。ピアノ線からの離れ

175mm（現車換算後、約12.5m）の位置において、13本の無指向性マイクロホンを地面板上に並べて2組のリニアアレイを構成した。リニアアレイのマイクロホン間隔は80mmである。本アレイは水平方向に一次的に配列しているため、鉛直方向の分解能を持たない。また、得られる結果は周波数帯ごとの音圧レベル変動となる。

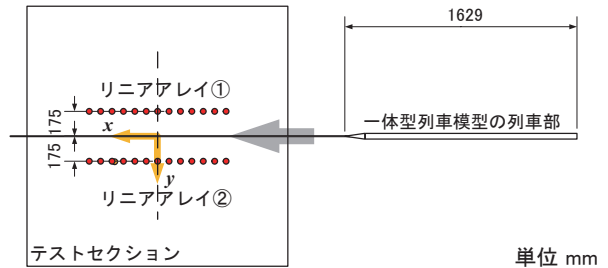


図9 リニアアレイマイクロホンの配置（平面図）

4. 解析方法

図9のリニアアレイ①および②を構成するマイクロホンを無指向性マイクロホンと見立てて、1/3オクターブバンド分析およびリニアアレイによるリアルタイム1/1オクターブバンド分析を実施した。処理方法は2章の現地試験と同様であるが、発射試験では同一条件で複数回の走行の算術平均をとることで測定精度を高めている。

(1) 無指向性マイクロホンの周波数分析

列車模型がマイクロホン直前を通過する時間区間に対して、4次のバターワースフィルタによるフィルタバンクおよびゼロ位相補正を適用してリアルタイム1/3オクターブバンド分析を実施した。分析周波数範囲は現車換算後周波数1～100Hz相当を想定し、模型スケールで70Hz～7kHzとした。時間重み付け特性はF(125ms)に相当する1.78msに設定し、周波数重み付け特性は適用していない。結果は単発音圧暴露レベルで整理した。

(2) リニアアレイによる指向性出力の周波数分析

式(1)と同様の遅延和演算にもとづき、ビームフォーミング計算によって音圧変動を算出した後、リアルタイム1/1オクターブバンド分析を行った。分析の対象周波数は、16Hz帯および現地試験の周波数スペクトルのピークを参考に、31.5Hz帯とした。なお、本リニアアレイマイクロホンによる3dB分解能は2kHzにおいて約100mmである。

5. 結果と考察

5.1 周波数分析および有意差の評価

リニアアレイを構成する合計26本のマイクロホンの測定結果を1/3オクターブバンド分析して平均の周波数

スペクトルを算出した（空間平均に対応）。同一条件で複数回の走行を実施して取得した、複数の平均周波数スペクトルをさらに算術平均して最終的な周波数スペクトルを取得した。

台車キャビティ部を2箇所にした「台車キャビティ部あり」条件および「完全平滑」条件の比較結果を図

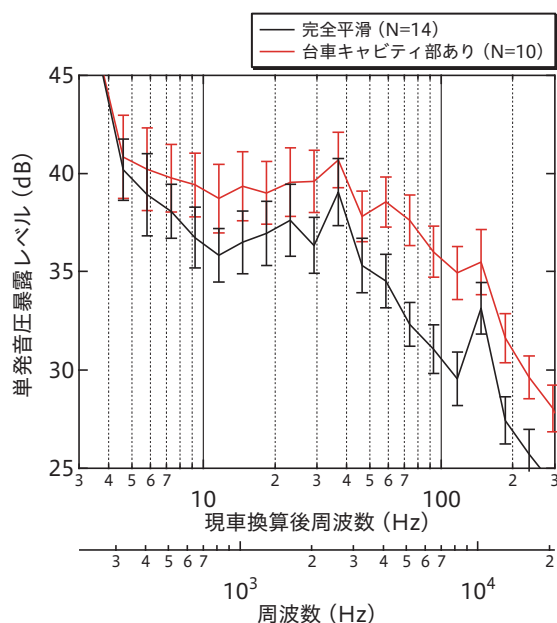


図 10 列車通過時の周波数スペクトル (N は走行回数)

10 に示す。エラーバーは、算術平均を行った複数の試番間の標準偏差( $\pm 1\sigma$ )を表す。「台車キャビティ部あり」と「完全平滑」を比べると、現車換算後 5Hz 以上の周波数帯で「台車キャビティ部あり」が「完全平滑」より大きく、一体型列車模型を用いた本実験により台車キャビティ部付近を音源と想定した比較実験が可能であることが確認できた。また、得られた模型実験の周波数スペクトルは 31.5Hz 付近のピークなど、定性的な傾向が図 3 の現車試験結果 (6.3m 点) と一致している。

### 5.2 リニアアレイマイクロホンの指向性出力

低周波空力音が台車キャビティ部から発生することを実験的に確認するとともに、低減形状の効果を検証するため、リニアアレイを用いた音圧レベル変動を算出した。式 (1) を用いたアレイ処理を行った後、得られた指向性出力の時間履歴を 1/1 オクターブ 1kHz 帯, 2kHz 帯 (便宜上、それぞれ現車換算後 16Hz 帯, 31.5Hz 帯と呼ぶ) の 2 バンドについて周波数分析し、列車模型通過時の音圧レベル変動を求めた。

図 11 には、(ア) 台車キャビティ部等を一切設けない完全平滑条件、(イ) 台車キャビティ部あり (側カバーなし, 簡易台車なし)、(ウ) キャビティ端部を丸め (側カバーあり, 簡易台車なし)、(エ) キャビティ端部を丸め (側カバーあり, 簡易台車あり) の条件における音圧レベルの比較を示す。キャビティ端部の丸め付けは、キャビティ深さを半径とする四分円とした。横軸は列車模型

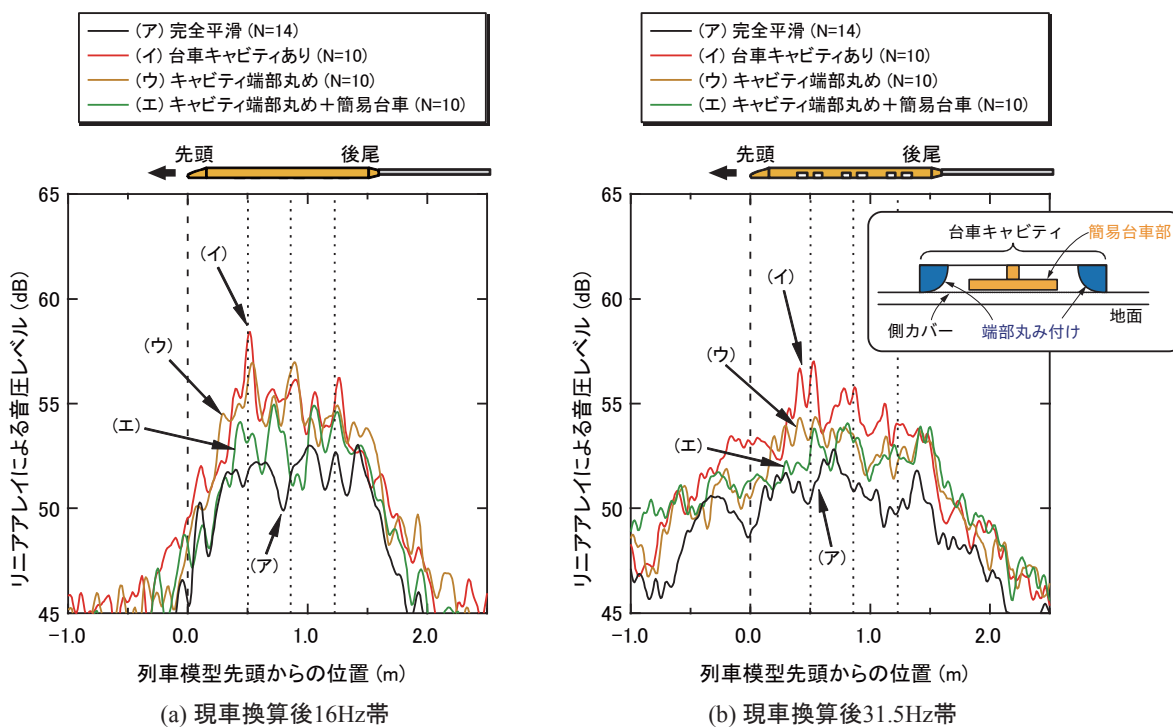


図 11 リニアアレイによる音源探査結果 (走行速度 200km/h) (図中の点線は隣接台車部の中心を表す)

特集：空気力学・騒音

先頭からの距離（後尾車両に向かって正）、縦軸は音圧レベルである。図中の (b) 31.5Hz 帯を参照すると、(イ) の台車キャビティ部を開放した条件では個別のキャビティ部に対応して音圧レベルが増加することがわかる。したがって、本実験により台車部付近から発生する低周波空力音を捉えていると言える。同図の (a) 16Hz 帯を参照すると、31.5Hz 帯と同様、台車キャビティ部付近で顕著なピークが認められる。これらは、現地試験結果の音源探査結果と整合するものであり、本実験により実現象を定性的に再現できていると考えられる。(ウ) のキャビティ端部丸め付けにより、31.5Hz 帯の低周波空力音が低減し、さらに簡易台車部を取り付けた (エ) 条件では、16Hz 帯についても低減効果が認められ、平滑条件に近づく。これらは、キャビティ端部の形状や台車装置の有無（キャビティの容積変化）がキャビティ内および周囲の流れを変化させることを示唆している。次に、最も効果の認められた (エ) の条件について、列車通過時の周波数スペクトルを図 12 に示す。本実験においては、(エ) の丸め付け（簡易台車部あり）により、(イ) の台車キャビティ部ありの標準条件に比べて 5～100Hz の低周波空力音は 1～3dB 程度低減することが確かめられる。また、現車換算後 160Hz 帯以上は両条件の周波数スペクトルがほぼ一致していることから、通常の可聴域の周波数帯については異なる低減対策を講じる必要があると考えられる。

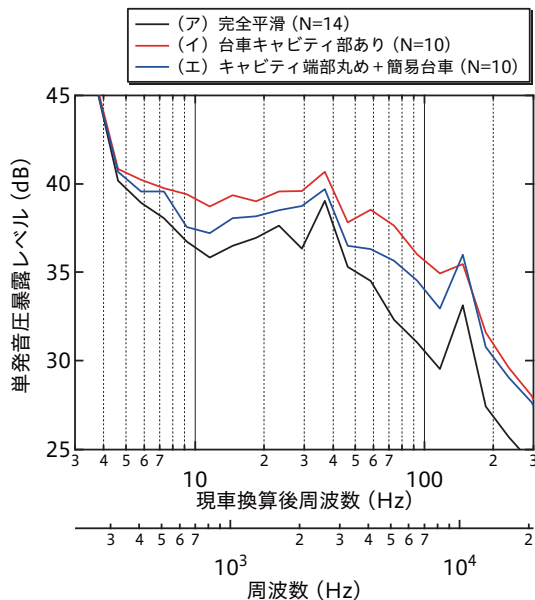


図 12 低周波空力音が低減した条件における列車通過時の周波数スペクトル比較  
(走行速度 200km/h)

6. 結言

新幹線の間車両部から空気力学的な要因により発生する圧力変動（低周波空力音）の現象解明を目的として、現地測定および 1/70 縮尺の実形状列車模型を用いた発射実験を実施した。得られた結論を以下にまとめる。

(1) 現地測定結果より

(a) 防音壁のない平地区間を走行する新幹線の周波数スペクトルは、31.5Hz 帯に極大をもち、軌道中心から 12.5m 離れ以上では低周波側へ向かうほど低下する分布となる。また、低周波空力音は線音源状の音波の性質を有していることを確認した。

(b) レール方向にマイクロホンアレイを構成して音源分布を解析した結果、低周波空力音の発生源の 1 つは台車部付近であることが明らかになった。

(2) 模型発射試験より

(a) 台車部付近が低周波空力音の音源の 1 つであることをふまえ、1/70 縮尺の列車模型を高速で発射する模型実験を行った。台車を格納するキャビティ部を開放した条件では、平滑条件に比べて単発音圧暴露レベルが有意に大きくなり、台車キャビティ部から低周波空力音が発生することを実験的に示した。

(b) 台車キャビティの端部丸め付けやキャビティの容積縮小は低減対策の 1 つとなる可能性があることを確認した。ただし、低減量の定量評価や低減メカニズムに関してはさらなる調査が必要である。

文献

- 1) 栗田健：高速新幹線車両の車外騒音低減に関する研究，早稲田大学学位論文，2012
- 2) 北川敏樹，長倉清，栗田健：高速走行時における車両下部音の音源別寄与度，鉄道総研報告，Vol. 27, No. 1, 2013, pp. 23-28
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 福田傑，飯田雅宣：列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験，日本音響学会誌，Vol. 63, No. 9, 2007
- 6) 斉藤実俊，福田傑：トンネル内における列車通過時圧力変動に関する実験的研究，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 80, No. 819, 2014