

# 明かり区間走行時に生じる高速列車の低周波音分析

高見 創\* 菊地 勝浩\*

## Analysis of Wayside Low-Frequency Noise from a High-Speed Train

Hajime TAKAMI Katsuhiro KIKUCHI

The authors have performed laboratory experiments and field measurements to investigate a low-frequency noise generated at wayside from a high-speed train running. The measurements indicate the observed low-frequency sound source consisting of three types of mechanism, which is a pressure variation around the nose and tail parts of the train, the low-frequency acoustic pressure waves aerodynamically caused by the train itself and viaduct structure-borne sound. The measurement conducted at higher-speed region has revealed that the major sound source of the low-frequency noise was attributable to aerodynamically generated unsteady noise, which is analogous to a line source.

キーワード：高速列車，低周波音，通過時圧力変動，構造物音，空力音

### 1. はじめに

近年、工場や風力発電設備からの騒音問題として時折取り上げられる低周波音とは、周波数が20 Hz以下の超低周波音を含む1～100 Hz程度の圧力変動（低周波空気振動）を指している。一般にこのような低周波音は、人の感覚閾値が高く（感じ難く）、可聴域の騒音と比べ問題になることは少ないものの、家屋などの建具の共振周波数と近い副次的なガタつき音を生じる場合や、大きな音圧レベルにおいては人体に対して圧迫感や耳鳴りなどの生理的・心理的影響を及ぼす場合がある。また、その波長の長さから可聴域の騒音のような防音・遮音対策は困難である場合が多く、環境問題となる例も報告されている<sup>1)</sup>。

新幹線に代表される高速鉄道の沿線では、列車がトンネルへ突入する際に生じるパルス状の圧力波により、低周波音問題を引き起こす事例が報告され、既に対策が行われている<sup>2)</sup>。一方、明かり区間沿線で観測される低周波音は、図1に示す二つの現象へ分けることができる。

一つは、列車通過時圧力変動<sup>3)</sup>と呼ばれる現象である。これは高速走行にともない、主に列車の先頭部や後尾部に生じ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る。

もう一つは、列車が通過している間、継続して観測される音響学的な波動現象（以降、低周波音波<sup>5)</sup>）である。低周波音波の音源には、道路交通では高架橋の床版振動による構造物音と、大型車がジョイント部を通過する際

の衝撃音による発生機構が示されている<sup>4)</sup>。しかし、ロングレールが広く採用される高速鉄道では道路交通のジョイント音に相当する衝撃音は生じていないと考えられ、逆に自動車よりも数倍の速度で走行することから、道路交通にはなかった列車周りの空気の乱れによる空力音が、構造物音に加わると考えられている。

本稿では、試験的に営業速度を上回る高速で明かり区間を列車が通過した際に、沿線で観測される低周波音の測定結果を模型実験の結果と比較しながら分析し、その一般的な特性を示す。

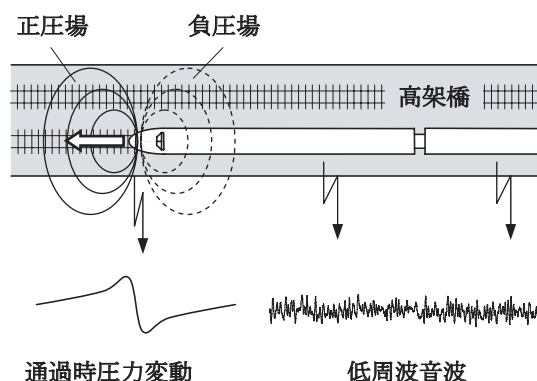


図1 明かり区間沿線で観測される低周波音

### 2. 音源特性の検討

通過時圧力変動の圧力振幅は、簡易的に列車先頭部を一点わき出しで近似したポテンシャル理論から、次式で表される<sup>3)</sup>。

\* 環境工学研究部（空気力学）

特集：環境技術

$$P_f(\mathbf{x}, t) = -\frac{\rho_0 U^2 A_0 \cos(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{2\pi |\mathbf{x} - \mathbf{y}|^2} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}$ ：観測点の位置、 $\mathbf{y}$ ：わき出しの位置、 $\rho_0$ ：空気密度、 $U$ ：列車速度、 $A_0$ ：列車断面積、 $\cos(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ：観測点とわき出しの位置とを結んだ線が列車の先頭から後尾へ向かう軸となす角による余弦。式(1)から通過時圧力変動の大きさは、列車速度の2乗で増加し、観測距離の-2乗で減衰する特性がある。

次に、低周波音波の音源のうち、コンクリート高架区間における構造物音に関しては、レール頭頂面（車輪と接する面）と車輪踏面（レールと接する面）の粗さ、輪重（平均的には車両重量を車輪の数で除した値）に依存する。それらの条件を固定した場合、構造物音の音圧  $P_{w,s}$  は半経験的に次式で見積もられる<sup>6)</sup>。

$$P_{w,s} \propto \frac{U^{1.5}}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

ここで、 $r$  は観測点と高架橋構造物の距離である。式(2)から構造物音の大きさは、列車速度の1.5乗程度で増加し、観測距離の-0.5乗程度で減衰する特性がある（ただし、高架橋の桁を音響学的な線音源とみなせる場合）。

残る低周波音波の音源のうち、空力音に関しては、集電装置等から生じるエオルス音や、車間などの空隙から生じるキャビティ音が既に知られている。しかし、これらを音源とする場合、数百 Hz 以上の周波数に比較的鋭いピークを持つのが一般的である。一方、低周波音波は周波数幅が広く、その発生箇所も指向性マイクアレイによる過去の測定結果<sup>5)</sup> などから、特定の部位ではなく列車全体に分布しているものと推測している。以上を踏まえ、実験的に調べた低周波音波の空力音源の特性について述べる。

2.1 模型実験方法

実車周りの極めて高いレイノルズ数の流れ場を、模型実験で完全に再現することは非常な困難をとまなう。しかし、中間列車の（台車や集電装置による凹凸がない）一般部を音源とし、列車周りの流れ場は先頭付近の早い段階で臨界レイノルズ数を超え、車体表面の大部分は乱流境界層に覆われていると見なせるならば、乱流遷移させた縮尺模型による実験が有効と考えられる。ただし、音波の発生機構には、レイノルズ数に加え、主流マッハ数の影響（圧縮性）が含まれると考えられるため、模型と実車のマッハ数は可能な限り揃える。

列車模型の先頭形状は、実車と等価な断面積変化をもつ単純な軸対称形状とし、中間部は径の一樣な円断面で、等価断面積へ置き換えた場合の直径縮尺比は1/100程度とする。ここで、先頭部の三次元的な形状の影響は、流れの大きな剥離が無い前提であれば、中間部で生じる

低周波音波へ及ぼす影響はほとんど無いと考えられる。また、先頭形状が通過時圧力変動へ及ぼす影響についても、観測距離が列車の先頭部の長さ程度よりも離れれば、通常無視できる。

空気力学的現象を実験的に調べる場合、測定の容易さ・確かさの面から、流体を動かし模型を静止させて行う風洞装置を用いるのが一般的である。しかし、ここで対象とするような微小な音波を調べる場合には、ファン騒音や模型を固定する治具等による風切り音が無視できなくなり、また、模型に近接した流れ場中にマイクを置くことが困難であるなどの問題がある。このため、模型周りの基本的な流れ場は風洞実験で調べ、模型からの音波発生特性は、実際に模型を静止流体中で高速走行させることで調べる。

2.2 風洞実験結果

実験に用いた風洞は、図2に示す鉄道総研所有の回流型小型低騒音風洞である。吹き出し口の幅は720mm、高さは600mm（縮流比6）、主流速度0～150km/hである。実験は開放測定部にて行い、模型の全長が主流のポテンシャルコアに入っていることをあらかじめ確認した。なお、装置の制約からレイノルズ数が低いため、模型の先端で攪乱を導入し（トリッピングワイヤ、厚さ0.15mm、幅2mm）、乱流遷移を早めている。

流速の測定は、ミニチュアI型熱線プローブ（DANTEC55P11、熱線部の長さ1.25mm）を、主流に対して約45°の角度で模型表面の境界層中に挿入して行う。計測データは、サンプリング周波数10kHzでPC上へ記録し、乱流統計量を求める際には20秒間の平均操作を行う。

境界層統計量の測定結果を、図3(a)に示す。ここで、 $\delta$ ：境界層厚さ、 $\delta^*$ ：排除厚さ、 $\theta$ ：運動量厚さ、 $\sqrt{u_{0.4}^2}/U_\infty$ ：乱れ強さ（ $u_{0.4}$  は境界層厚さの40%の位置における変動流速、 $U_\infty$  は主流速度）、 $H_{12} = \delta^*/\theta$ ：形状係数。

層流と乱流を形状係数  $H_{12}$  から判別すると、流れの初期においては層流（ $H_{12} \geq 2.6$ ）を示すが、模型先端からの長さ  $x \approx 200\text{mm}$  程度から乱流へと遷移しはじめ、下流では平板境界層における乱流の理論値（ $H_{12} = 1.4$ ）へ

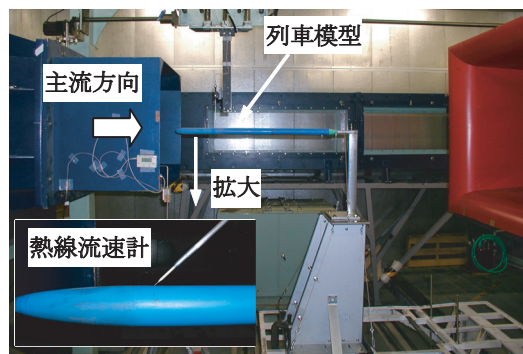


図2 風洞実験

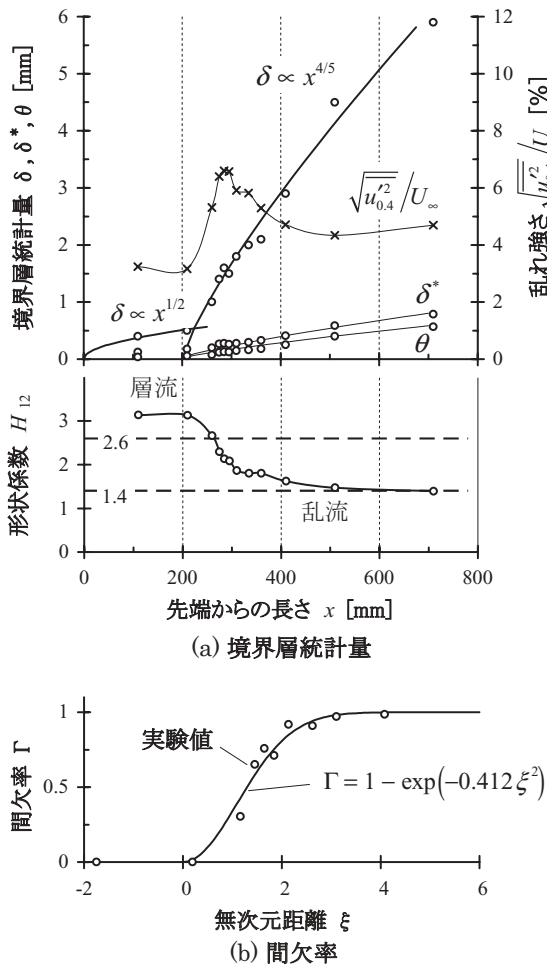


図3 列車模型表面の境界層統計量

と漸近する。流れが乱流へ遷移して以降の境界層厚さの発達は、平板乱流境界層における理論値 ( $\delta \propto x^{4/5}$ ) と等しい。また、流れが層流から乱流へ遷移する際には、遷移機構の強い渦構造により、乱れ強さが急激に大きくなる<sup>6)</sup>。

図3 (b) に、流速変動  $u'_{0.4}$  から求めた間欠率  $\Gamma$  (一定時間内に占める乱流変動の時間の割合) の分布を示す。なお、 $\xi = (x - x_0) / x_l$  で定義される無次元距離 ( $x_0$ : 遷移開始位置,  $x_l$ : 遷移領域の長さ) である。ここで、遷移開始位置は、図3 (a) の形状係数の変遷から見積もる。図3 (b) から、間欠率の分布は、レイノルズ数に依存しない理論曲線<sup>8)</sup> とほぼ一致している。したがって、模型周りの境界層遷移過程は、平板境界層の遷移過程と大きな違いはなく、流れは排除厚さを基にしたレイノルズ数  $Re_{\delta^*} \approx 500$  程度で層流から乱流へ遷移しはじめ、遷移領域の長さ  $x_l \approx 50\text{mm}$  程度下流において、乱流へ遷移するものと推定される。

### 2.3 移動模型実験結果

図4に示す移動模型装置は、通常、トンネル微気圧波に関する実験に使用しているもので、風洞実験に用いた

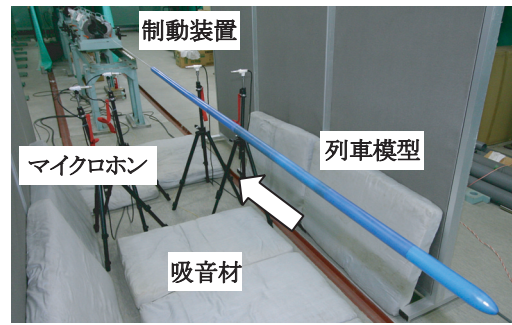
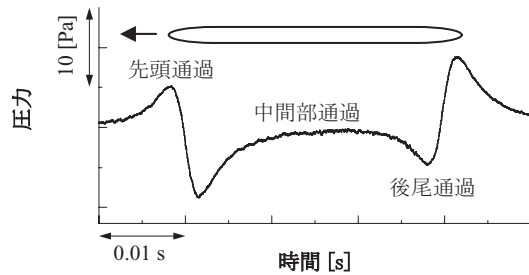
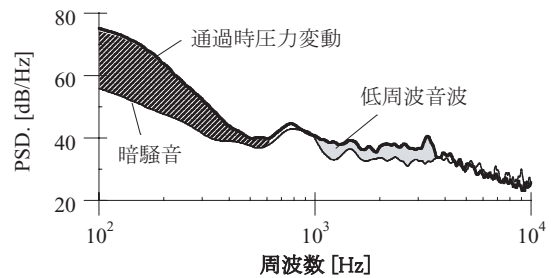


図4 移動模型実験



(a) 圧力変動波形



(b) 圧力変動の周波数分布

図5 列車模型通過時の圧力変動

軸対称列車模型を回転輪で射出し、静止流体中をピアノ線に沿って高速で走行させることができる。風洞実験と同等のレイノルズ数  $Re_{\delta^*} \approx 500$  で乱流境界層へ遷移しているとすれば、初期攪乱を入れない模型の遷移開始位置は、 $x_0 \approx 450\text{mm}$  程度と推定される。したがって、模型全長に占める乱流境界層の割合は、模型の全長が2.5mの場合80%程度となり、模型表面の大部分は乱流境界層に覆われていると見なすことができる。

測定は、精密騒音計 (有効周波数20~20,000 Hz) を同時に4台用いて、列車模型がマイクロホン正面を通過する際の圧力変動を記録する。実験は、同一条件について6試番行い、統計量の平均化操作を行う。

代表的な観測波形として、列車速度300km/h、走行軸からの距離  $r = 200\text{mm}$  の場合を図5 (a) に示す。圧力変動波形には、列車模型の先頭部・後尾部の通過に対応した通過時圧力変動が観測される。しかし、模型中間部で生じる低周波音波は、ごく微小なため圧力変動波形からは明確ではない。

図5 (b) は、複数試番のパワースペクトルのパワー一

特集：環境技術

均をとり、暗騒音と比較した結果である。この図から、500Hz以下の通過時圧力変動の成分に加え、1kHz～4kHz付近に暗騒音よりも5～10dB程度有意に大きい低周波音波の成分が認められる。

ここで、通過時圧力変動と低周波音波の特性を調べるため、図5(b)から現象別に周波数帯域を見積もり(通過時圧力変動500Hz以下、低周波音波800～5,000Hz)、帯域フィルタによりそれぞれの特徴的な波形を取り出す。取り出した通過時圧力変動に相当する波形は、先頭部で0一正一負一0のようなパルス波となるため、この正負の差を通過時圧力変動の振幅値( $P_f$ )とする。一方、低周波音波に相当する波形は、連続的な波となるため、列車が通過する間の実効値をとり、低周波音波の振幅値( $P_w$ )とする。

図6は、それぞれの振幅値の特性を示したものである。図6(a)より、観測距離が離れるほど通過時圧力変動と低周波音波は小さくなり、その減衰率は走行速度によらず、 $P_f \propto r^{-2}$ 、 $P_w \propto r^{-0.5}$ を示す。また、図6(b)より、走行速度が高いほど通過時圧力変動と低周波音波は大きくなり、その乗則は観測距離によらず  $P_f \propto U^2$ 、 $P_w \propto U^3$  程度を示す。なお、図6(a)の  $r < 100\text{mm}$  において、 $P_w \propto r^{-0.5}$  の傾向は外れて見えるが、これは観測距離が近く、通過時圧力変動と低周波音波の周波数が近接して、 $P_w$  の分離が正しく行われていないためである。

ここで得られた通過時圧力変動の特性は、式(1)と等しく、模型実験の妥当性が確かめられる。一方、低周波音波に関する特性は、物体表面の圧力変動を二重極の音源として捉え、これが模型に沿って線音源上に並んだと考えた場合の音響学的な特性と一致している。このような音源の推測は、車両表面に発達する乱流境界層を音源と仮定し、表面圧力変動の実測値から求められた文献<sup>9)</sup>の特性とも矛盾しない。

ここで、通過時圧力変動を式(1)で見積もり、低周波音波の音源を模型表面に発達する乱流境界層と仮定するならば、模型と実車の間に、周波数に関して次の相似則が成り立つ。

$$\text{通過時圧力変動の周波数}^{10)} \quad f_f \propto \frac{U}{r} \quad (3)$$

$$\text{低周波音波の周波数} \quad f_w \propto \frac{U}{\delta} \quad (4)$$

ただし、乱流境界層における壁面変動圧力の周期は、平板境界層の特徴的な構造であるバースト・スイープ周期に比例するものと見なす<sup>11)</sup>。

式(3)(4)に基づき、模型実験で得られた周波数を実車換算した結果を表1に示す。なお、模型実験における境界層厚さのオーダー(10mm)は2.2節の風洞実験から推定し、実車における境界層厚さのオーダー(1m)は車体表面の壁面せん断応力を実測した結果から推定した値である。実験結果と現地実測値の比較は次章で行う。

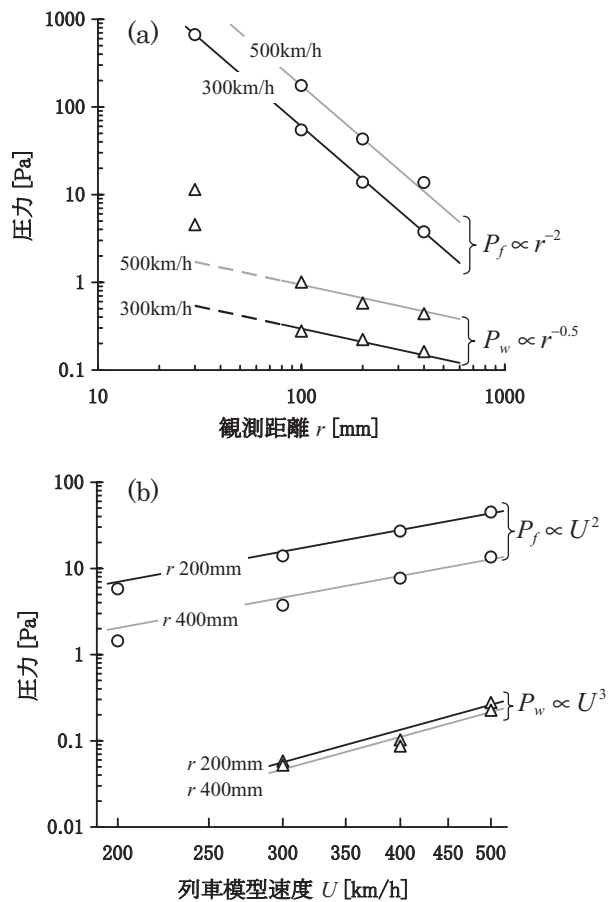


図6 模型実験による音源特性

表1 模型実験結果の実車換算

	$f_f$	$f_w$
模型実験結果 $U = 300\text{km/h}, r = 0.2\text{m}$	< 500 Hz	1 k ~ 4 kHz
現地換算値 $U = 270\text{km/h}, r = 29\text{m}$	< 3 Hz	9 ~ 36 Hz

### 3. 現地測定

新幹線の明かり区間沿線における低周波音の測定結果を、模型実験の特性を元に分析した例を示す。

#### 3.1 測定方法

高架区間における測定器の配置例を図7に示す。ここで、観測距離  $r$  は列車中心と観測点を結ぶ直線距離である。低周波音の測定には、超低周波音圧レベル計(有効周波数0.2～1,000Hz)、または環境省マニュアルに準拠した低周波音圧レベル計(有効周波数1～500Hz)を使用する。また、構造物音の影響を調べるため、桁下面の振動加速度を測定し、積分器を通して振動速度に換算する。これらの測定データは、列車の通過時間を測る車軸通過信号とともに、時間歴波形として記録する。

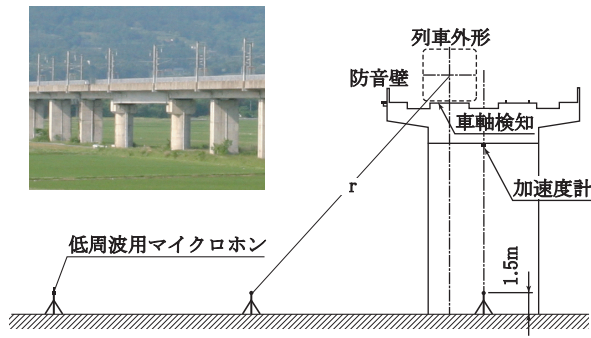


図7 測定器の配置例

3.2 現地測定結果

図8は、併結された列車が速度270km/hで通過する際に、 $r = 29\text{m}$ の沿線で観測した圧力変動のパワースペクトル密度を、同条件の複数列車についてアンサンブルパワー平均し、時間-周波数平面上に色の濃淡でマッピングしたものである。図中の通過時圧力変動および空力音は、表1の現地換算した $f_f$ 、 $f_w$ に対応している。すなわち、先頭部・併結部・後尾部に生じる3Hz以下の成分は、通過時圧力変動によるものであり、10～60Hz程度に幅広く分布する低周波音波は、高架区間で鋭いピークを持つ構造物音に空力音が重なったものであることが分かる。

なお、構造物音の周波数ピークは、併結列車の前後編成でわずかに異なる。これは台車軸距により決まる加振周波数(≡列車速度/軸距)が、前側編成は(i)の33.3Hzに対し、後側編成は(ii)の30.0Hzであるため、構造物の振動モードに違いが現れるためと推測される。

ここで、複数の列車が通過する際に放射される音の相互相関をとることによって、定常的に放射される音の周波数を調べ、さらに一列車の音と構造物振動速度の相関をとることによって、構造物音の寄与が大きい周波数帯を調べる。信号間の振幅二乗コヒーレンス関数は、次式で定義される。

$$C_{p_1 p_2}(f) = \frac{|S_{p_1 p_2}(f)|^2}{S_{p_1}(f)S_{p_2}(f)}, \quad C_{pv}(f) = \frac{|S_{pv}(f)|^2}{S_p(f)S_v(f)} \quad (5)$$

ただし、 $S(f)$ ：周波数 $f$ に関するパワースペクトル密度関数(添え字 $p$ ：圧力変動、 $v$ ：振動速度)、 $S_{p_1 p_2}(f)$ ：同観測点における二列車の圧力変動の相互スペクトル密度関数、 $S_{pv}(f)$ ：圧力変動と振動速度の相互スペクトル密度関数である。なお、コヒーレンス関数は列車速度が等しい場合(270 km/h ± 0.35%)の組み合わせを全て求めた後、それらを平均化して表す。

図9に示す相関解析の結果から、高架区間を走行する際には、50Hzをはじめとして圧力変動の相関値(図中黒線)の高い周波数は複数あり、それら周波数の多くは、圧力変動と構造物振動の相関値(図中赤線)が高い周波数とも一致する。すなわち、高架区間では列車の通過にと

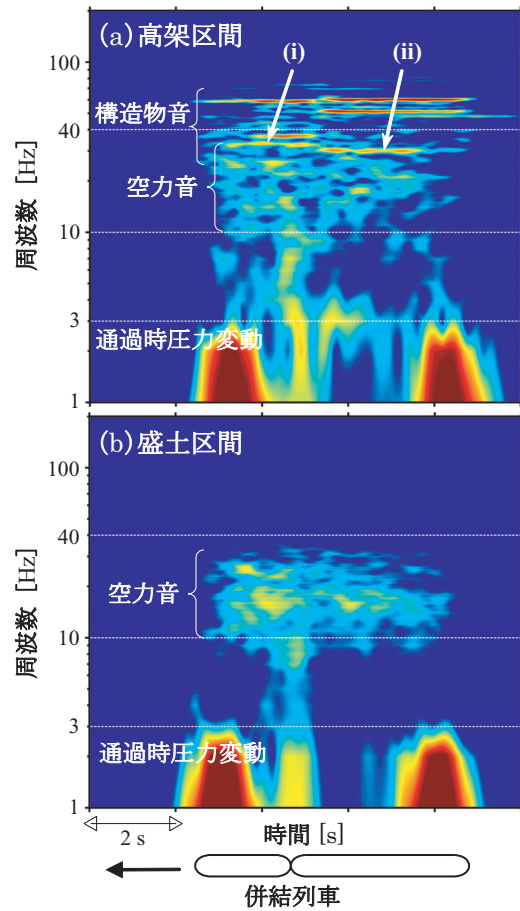


図8 現地の測定例

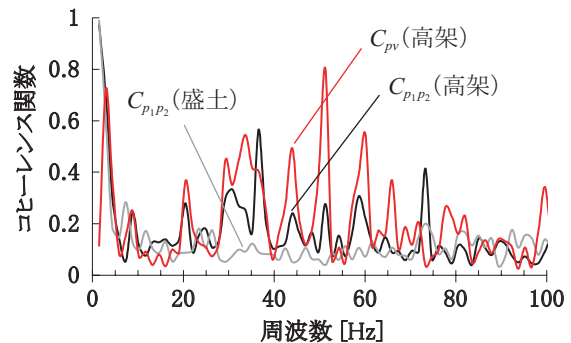


図9 信号間の相関

もない定常的に発生する低周波音波があり、そのような低周波音波は高架橋振動ともなる構造物音の影響が大きいことが分かる。

一方、盛土区間においては、圧力変動の相関値(図中灰線)がほぼ無相関を示す。すなわち、盛土区間では定常的に発生する構造物音は少なく、図8(b)で幅広い周波数に観測される低周波音波は、模型実験の換算周波数 $f_w$ ともほぼ等しいことから、空力的な要因によるものと考えられる。

3.3 沿線における低周波音の特性

図10は、高速鉄道の沿線における低周波音の一般的な特性を推定したものである。ここで、 $L$ ：低周波音圧レ

特集：環境技術

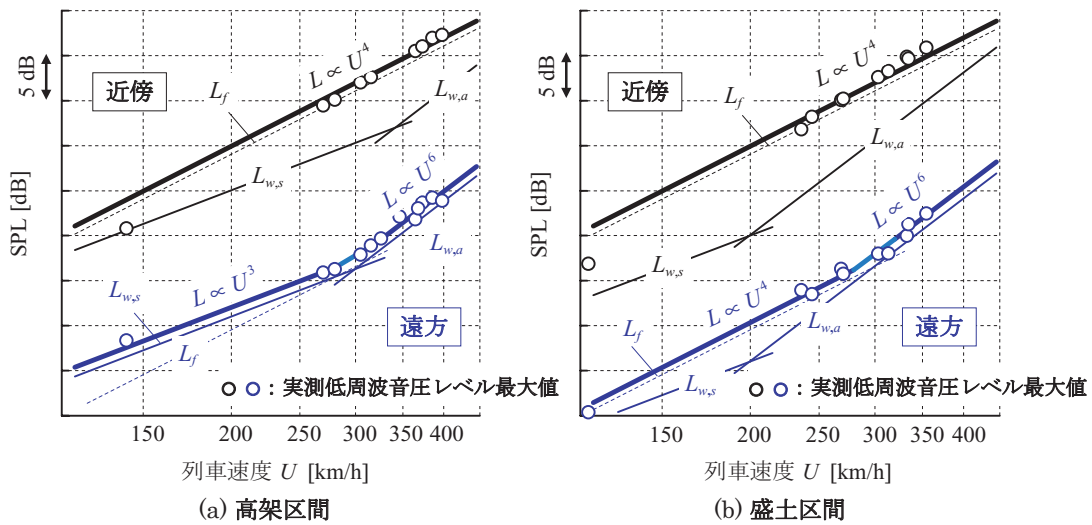


図 10 沿線における一般的な低周波音の特性

ベル最大値（平坦特性 1～100Hz，動特性 FAST，プロットは実測値）， $L_f$ ：通過時圧力変動成分， $L_{w,s}$ ：低周波音の構造物音成分， $L_{w,a}$ ：低周波音の空力音成分を表す。

- (1) 近傍場 ( $r/d \leq 12$ ,  $d$ ：列車断面積と等価な円の直径) と遠方場 ( $r/d > 12$ ) を比較すると，近傍においては構造物の種別によらず通過時圧力変動が低周波音のレベル最大値を決定する。したがって，高架区間と盛土区間で差は生じない。
- (2) 遠方においては，構造物や列車速度によって，支配的な要因が異なる。高架区間においては 300km/h 程度以下の領域で構造物音の影響が現れ，盛土区間よりも低周波音のレベル最大値が大きい。しかし，300km/h 程度を超える高速域では空力音成分の影響が強く，高架区間と盛土区間でレベル値の差は生じにくい。

4. まとめ

高速列車が明かり区間を通過する際に，沿線で観測される低周波音を模型実験と比較しながら分析し，一般的な特性を示した。その結果，列車速度が 300km/h を超えるような高速列車に関しては，空力的な要因による低周波音の低減が，沿線における全体低周波音の低減には重要と考えられる。

謝 辞

本研究の現地測定にあたっては，JR 東日本研究開発センター・先端鉄道システム開発センターにお世話になった。ここに記し感謝の意を表する。

文 献

- 1) 環境省環境管理局大気生活環境室：低周波音問題対応の手引書，2004
- 2) 小澤智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No.1121, 1979
- 3) 菊地勝浩，飯田雅宣：列車通過時圧力変動の簡易な数値計算法，日本機械学会論文集 (B)，Vol.71, No.708, pp.58-65, 2005
- 4) 環境管理局大気生活環境室：低周波音防止対策事例集，2002
- 5) 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)，Vol.73, No.735, pp.103-109, 2007
- 6) 長倉清，善田康雄：新幹線沿線騒音予測手法，鉄道総研報告，Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000
- 7) 前川博，渡辺大輔，尾崎幸玄：TS 波と斜行波によって励起された圧縮性境界層の遷移機構に関する研究，ながれ，Vol.24, pp.543-551, 2005
- 8) S. Dhawan and R. Narashimha: Some properties of boundary layer flow during the transition from laminar to turbulent motion, J. Fluid Mech., Vol.3, pp.418-436, 1958.
- 9) W. F. King III: On the boundary layer contribution to way-side noise generated by high-speed tracked vehicles, InterNoise 94, 1994.
- 10) M. S. Howe: On the infrasound generated when a train enters a tunnel, J. Fluids and Structures, 17, pp.629-642, 2003.
- 11) W. W. Willmarth and L. K. Sharma: Study of turbulent structure with hot wires smaller than the viscous length, J. Fluid Mech., Vol.142, pp.121-149, 1984.