

# 曲線区間で発生する 10kHz を超える高周波音の現象解明

川口 二俊\* 北川 敏樹\* 熊倉 孝雄\*\*

Investigation of High-frequency Noise Above 10 kHz Generated on Curved Sections of Railway Lines

Tsugutoshi KAWAGUCHI Toshiki KITAGAWA Takao KUMAKURA

An understanding of the wheel/rail noise has been made by measurements and theoretical models. The wheel/rail noise significantly influences wayside noise in the frequency range from 250 Hz to 8 kHz. Some studies show that, when a train runs on a gentle curve, the wheel/rail noise is greater than the usual rolling noise by 5dB or more, and this is closely related to the occurrence of the noise of higher frequencies above 10 kHz. In this paper, an attempt to investigate the mechanism of noise by running tests was made. As a result of the tests, it is found that during the train passage through a curve, the wheels on the outside rail are the most important source and, after the train passage, the outside rail is the predominant source. Furthermore, the vibrational properties of a rail at high frequencies were experimentally examined using a shaker. It is confirmed that free wave propagation occurs in the rail at higher frequencies above 10 kHz owing to low decay rates.

キーワード：鉄道騒音，車輪・レール間騒音，現車走行試験，レール振動特性

## 1. はじめに

鉄道の一部の曲線区間で、列車通過に伴って 10kHz 以上の高い周波数成分の音（以下、高周波音）が顕著に発生し、沿線騒音全体に対して大きな影響を及ぼす事例が報告されている<sup>1) 2)</sup>。これまでに、高周波音が車輪・レール間騒音（車輪、レールの相互作用によって発生する音であり、転動音、レール継目部などでの衝撃音および急曲線区間でいきり音に分類される）に関連するものであること、一部の急曲線で発生するいきり音（主成分 2～8kHz）<sup>3)</sup> とは周波数範囲が異なることなどが明らかにされている。本研究では、在来線の曲線区間で実施した振動・騒音測定試験の結果から、高周波音の発生メカニズムを調査した<sup>4) 5)</sup>。調査においては、高周波音に占める車輪放射音、レール放射音の寄与度、天候（晴天時または雨天時）による高周波音の発生状況およびレール振動の伝搬特性に関する評価を行った。

## 2. 現車測定の概要

在来線の曲線区間において、レール振動、騒音を測定した。図 1 に曲線区間の概要を示す。曲線区間に設けた 2 つの測線の概要は以下の通りである。

- 測線 A：緩和曲線，カント量 0～70mm
- 測線 B：円曲線半径 300m，カント量 70mm

\* 環境工学研究部 騒音解析研究室

\*\* 東日本旅客鉄道株式会社

なお、曲線区間にはロングレールが敷設されている。列車は、直線区間から測線 A を通過した後、測線 B を速度 60km/h 程度で走行する。また、測線 A、B 間の距離は 80m である。列車は、先頭から T,T,M,M,T,M,M,M,M,T (T は付随車，M は電動車) の 10 両編成である。2 測線の外軌、内軌側レールの頭部には、振動加速度計 (RION PV-90I) を設置し、上下、左右方向のレール振動を測定する。また、測線 A の両側レール、測線 B の内軌側レールの近傍には 1/2 インチマイクロホン (RION UC-30) を設置して音圧を測定する。なお、振動加速度計、騒音計の測定周波数範囲の上限は 20kHz である。図 1 に示す測線 A、B 間の 3 つの測線はレール振動の伝搬特性の調査に使用した。この詳細は 5.1 節で述べる。

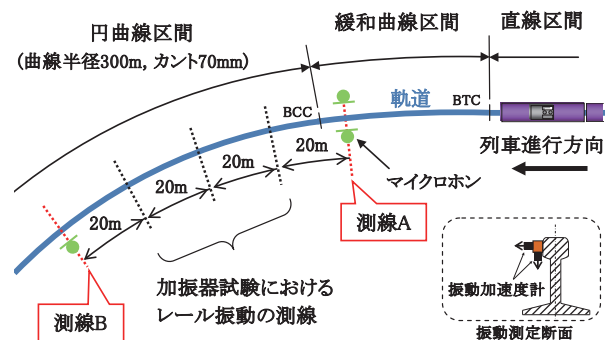


図 1 曲線区間における高周波音の現地測定試験の概要

## 3. 現車測定結果

測定データは時間重み付け特性 F (Fast) で整理した。

特集：環境工学

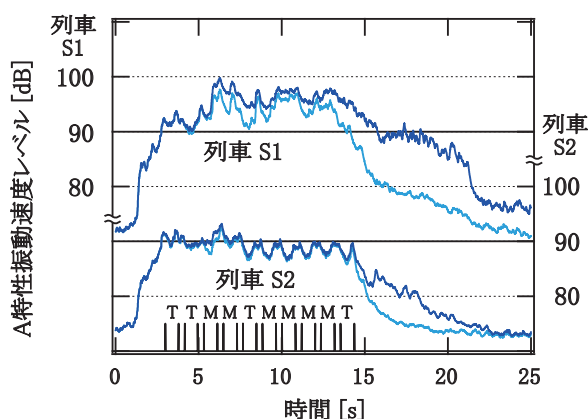
レール振動に関しては、振動加速度を振動速度に変換し、周波数重み付け特性 A で評価した。2 測線における各測定点の結果は、代表列車 1～2 本の時間レベル変動で示す。また、高周波音に関連する影響を確認するため、10kHz バンド以上の周波数成分を含む測定周波数全域の結果と 8kHz バンド以下の周波数成分の結果を併記した。3.1 節～3.3 節では、測線 A の測定結果を、3.4 節では測線 B の結果を示す。

3.1 上下方向のレール振動

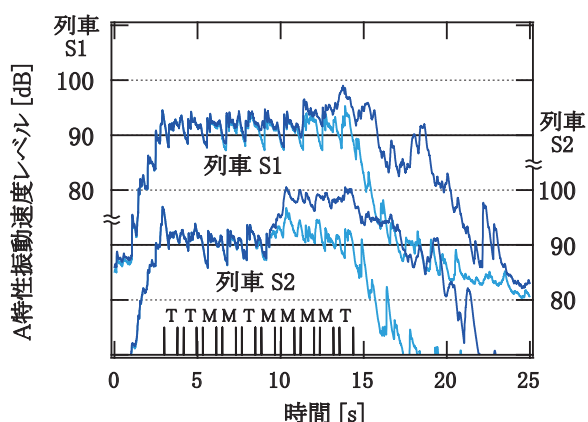
図 2 は上下方向のレール振動の測定結果を示したものである。外軌側レールでの結果では、列車通過に伴って振動レベルが変動する。レベル変動での小さな山部分は、隣接する 2 台車が振動加速度計の直上を通過した際の測定結果に対応し、谷部分は各車両の間部に対応する。列車通過時、10kHz 以上の周波数成分を含む結果と 8kHz 以下の結果の差は小さい。したがって、列車通過時の外軌側レールでは、10kHz 以上の振動成分がレール振動全体に及ぼす影響は小さい。ただし、S1, S2 列車ともに台車部に対応する山部分の高さが必ずしも同じではない。その山部分の高さは、T 車、M 車に依存しないことから、T 車と M 車の諸元（車輪踏面の凹凸や車輪形式など）の違いによる転動音（主成分 250Hz～4kHz）の差異が原因ではない。よって、台車部に対応する山の高さが列車によって異なる一因には、きしり音（主成分 2～8kHz）に関連した事象が生じていることが考えられる。

列車通過後では、10kHz 以上の周波数成分を含むレール振動は 8kHz 以下の結果に比べて最大 5～10dB 程度大きい。これは、遠方で生じた 10kHz 以上の周波数成分のレール振動が測線 A に伝搬したことを示している。また、10kHz 以上を含むレール振動は 8kHz 以下の結果に比べて緩やかに減少し、最後部台車が測線 A を通過した後 7～8 秒ほど経過すると振動レベルの減少する傾きが変わる。これは、車輪位置、軌道の曲率半径などに依存して車輪・レールに作用する加振力が変化するためと予想される。

内軌側レールにおける 10kHz 以上を含む結果では、列車通過時、台車部に対応する小さな山部分と緩やかな山部分が現れる。これは、外軌側レールの結果とは異なる。列車通過時、緩やかな山部分は列車後部に現れる傾向があり、この山部分では 10kHz 以上の周波数成分を含む結果と 8kHz 以下の結果に 5dB 程度の差を生じる。この山部分の影響によって列車通過後も 10kHz 以上を含む結果が大きく、8kHz 以下の結果とのレベル差は外軌側の結果よりも大きい。また、最後部台車通過後から 6 秒ほど経過すると振動レベルは急激に減少し始め、これは外軌側の結果で同様の事象を発生する時刻よりも早い。この原因には、外軌、内軌側で車輪、レールに加振力が作用する範囲が異なることが考えられる。



(a) 外軌側レール



(b) 内軌側レール

図 2 測線 A における上下方向のレール振動

(—: 8kHz 以下の周波数成分の結果, - - : 10kHz 以上の周波数成分を含む結果, 時間軸上のパルスは台車中心位置を示す)

3.2 左右方向のレール振動

図 3 は左右方向のレール振動の測定結果である。外軌側レールでの場合では、列車通過時、10kHz 以上を含む結果と 8kHz 以下の結果はほぼ同じである。列車通過後、10kHz 以上を含む結果は緩やかに減少し、最後部台車が通過して 7～8 秒ほど経過すると振動レベルは急激に減少する。この事象が生じる時刻は上下方向の結果とほぼ同じである。内軌側レールの結果では、上下方向振動での結果と同様に、列車後部に緩やかな山部分が現れ、10kHz 以上を含む結果は 8kHz 以下の結果に比べて 5～10dB 程度大きい。列車通過後も、10kHz 以上を含む結果が 5dB 以上大きく、最後部台車が測線 A を通過してから 6 秒ほど後に振動レベルの傾きが変わる。

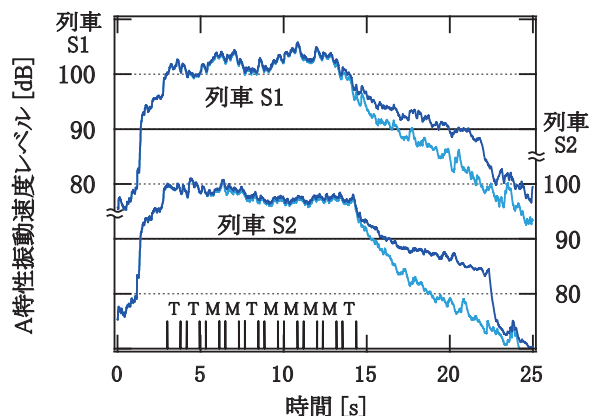
3.3 レール近傍騒音

図 4 はレール近傍での騒音の測定結果を示したものである。外軌側の結果に注目すると、列車通過時の 10kHz 以上を含む結果に顕著なピークが現れ、これは高周波音に対応する。また、2 つの列車でこのピークの大きさや発生位置は必ずしも同じではない。外軌、内軌側のレール

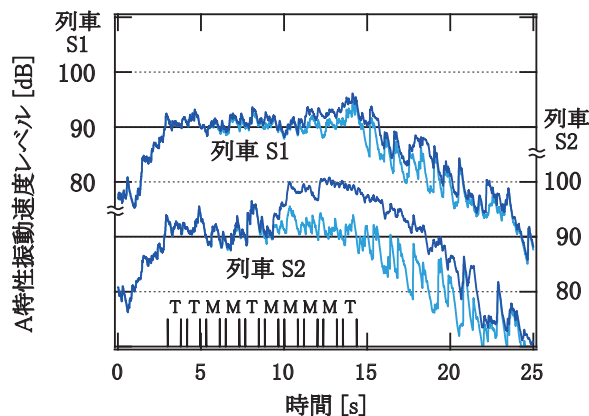
ル振動にはこのピークに対応するレベル変動がないことから、このピークは車輪振動に起因するものである。内軌側の結果においても、外軌側の結果と同じ台車位置でピークを形成する。また、このピークの形状に関しては外軌、内軌側の結果でほぼ同じであるが、ピークでのレベルは外軌側の結果が大きい。これらから、内軌側での結果に現れるピークは、外軌側車輪で発生した音による影響と考えられる。

列車通過時のレベル変動の谷部分には、10kHz 以上を含む結果が 8kHz 以下の結果に比べてやや大きい場合もある。また、内軌側のレール振動で生じた緩やかな山部分の影響は、外軌側、内軌側での騒音の結果には見られない。したがって、列車通過時にレール放射音がレール近傍騒音全体に与える影響は小さいと考えられる。

列車通過後は、10kHz 以上の周波数成分の音がレール近傍騒音全体に影響を与えている。これは、レール振動に起因した放射音である。外軌側測定点と内軌側測定点の結果を比較すると、両者はほぼ同程度である。また、最後部台車の通過から 7～8 秒程度経過すると、外軌、内軌側での騒音レベルはともに急激に減少する傾向にある。

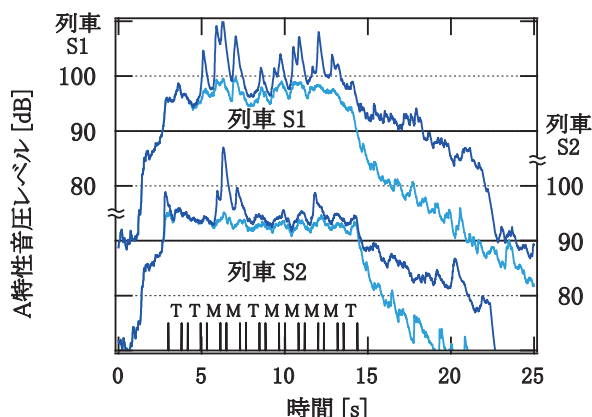


(a) 外軌側レール

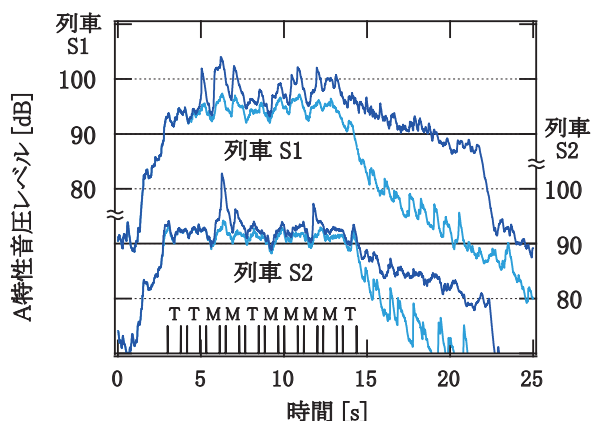


(b) 内軌側レール

図3 測線 A における左右方向のレール振動  
(—: 8kHz 以下の周波数成分の結果, - : 10kHz 以上の周波数成分を含む結果, 時間軸上のパルスは台車中心位置を示す)



(a) 外軌側レール近傍点



(b) 内軌側レール近傍点

図4 測線 A におけるレール近傍騒音

(—: 8kHz 以下の周波数成分の結果, - : 10kHz 以上の周波数成分を含む結果, 時間軸上のパルスは台車中心位置を示す)

これは、外軌側レールの振動でこの事象を生じる時刻とはほぼ同じであり、列車通過後の騒音全体に対して外軌側レールの放射音を与える影響が大きいことを示している。

### 3.4 測線 B におけるレール近傍騒音

図5は測線 B における内軌側のレール近傍騒音の測定結果である。列車通過時、台車部に対応する山部分で、10kHz 以上を含む結果と 8kHz 以下の結果のレベル差は最大 3dB 程度であり、高周波音がレール近傍騒音全体に影響を与えている。本報告では示していないが、レール振動には 2 つの結果に差がなかったことから、測線 A と同様に、これは車輪放射音に対応すると考えられる。ただし、測線 A での結果とは異なり、顕著なピークは形成しない。また、通過前後では、10kHz 以上を含む結果は 8kHz 以下の結果よりもやや大きい程度であり、高周波音に対するレール放射音の寄与は小さいと考えられる。通過後 2～3 秒ほど経過すると、騒音レベルの傾きが変化する傾向にある。これは、測線 A と同様に、列車通過後に生じる騒音が外軌側のレール振動に起因していることを示している。

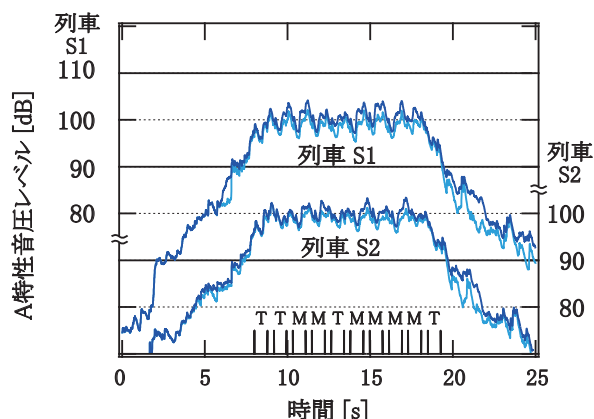


図5 測線 B における内軌側レール近傍騒音

(—: 8kHz 以下の周波数成分の結果, - - : 10kHz 以上の周波数成分を含む結果, 時間軸上のパルスは台車中心位置を示す)

### 3.5 高周波音に対する車輪放射音, レール放射音の寄与度

3.1 節から 3.3 節までの結果から, 高周波音がオーバーオールレベルに大きな影響を与えていた測線 A の測定結果を用いて音源別寄与度の試算を行った。列車通過後は外軌レールのみが音を放射すると仮定し, 測線 A におけるレール近傍騒音での車輪・レールの音源別寄与度を次の手順で評価する。図 6 にそのフローを示す。

- (1) 列車通過後の測定結果 (最後部台車は測線から 20 ~ 100m 離れた位置) で, 外軌側のレール振動 (上下方向と左右方向のパワー和) とレール近傍騒音の周波数バンドごとの差 ( $\Delta L(f)$ ,  $f$ : 周波数) を求める。
- (2) 列車通過時のレール振動 (上下方向と左右方向のパワー和) から (1) で求めた  $\Delta L(f)$  を差し引いて, レールからの放射音を求める。
- (3) レール放射音以外 (車輪放射音) の寄与は, 騒音の実測値と上記手順によるレール放射音の推定値との差として評価する。

騒音の評価は, 一列車通過時の単発騒音暴露レベルで行う。図 7 に上記手順によって得られた外軌側のレール近傍音に対するレールと車輪の放射音の寄与である。これは, 測線 A を通過する 13 列車の測定結果を算術平均したものである。図中で実測値よりも上記手順で求めたレール放射音の寄与が大きい場合には, その他の放射音の寄与を 0 とした。また, 図中の T 車に対応する値は, 一編成中の T 車間対応部で高周波音を発生していない単発騒音暴露レベルから 10 両相当の値に換算したものであり, 主に転動音の寄与を示している。図 7 より, 10kHz 以上の周波数域では, 主音源は車輪であり, 全体音は車輪放射音の寄与でほぼ占められることがわかる。8kHz 以下では, T 車の結果と全体音の実測結果に差がないことから, その他の放射音は主に転動音で構成される。なお, T 車と M 車の寄与が含まれる実測結果に差

がないことについては, 図 4 のレベル変動から T 車と M 車の台車部の通過に伴う山部の高さがほぼ同じであることに対応する。また, T 車の結果と全体音の実測結果の比較から, 5kHz 以上の周波数域において, 高周波音の影響が現れていることがわかる。

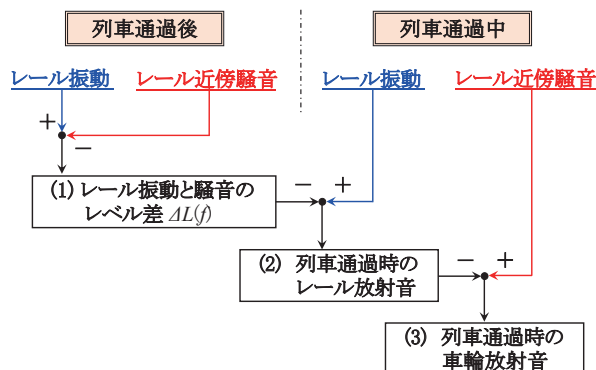


図6 音源別寄与度の評価方法

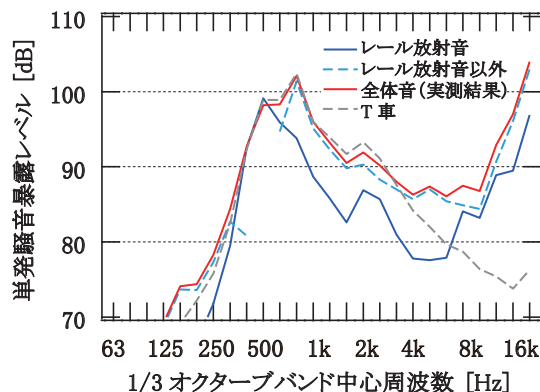


図7 高周波音に対する音源別寄与度の推定結果 (外軌側レール近傍騒音, 13 列車のパワー平均値)

### 4. 雨天時における高周波音の発生状況

図 8 は雨天時での測線 A におけるレール近傍騒音のレベル変動図である。10kHz 以上を含む結果と 8kHz 以下の結果は同じである。また, 列車通過後も, 10kHz 以上を含む結果が継続して大きくなる傾向にはない。本報告では示していないが, レール振動においても 10kHz 以上を含む結果と 8kHz 以下の結果は同じであった。したがって, 雨天時には, 高周波音に関係する現象は発生していない。これは, 高周波音の発生が車輪・レール間の接触状況に依存することを示している。

### 5. レール振動の距離減衰特性

現車走行時のレール振動と騒音の測定結果において, 列車通過後に 10kHz 以上を含む結果が継続して大きくなる傾向が見られた。これはレール振動の伝搬距離に対する減衰 (距離減衰) が小さく, 振動が遠方まで伝搬し

ていることを示していると考えられる。そこで、レール振動の距離減衰率を定量的に評価するため、以下に示すようなレール加振試験を実施した。

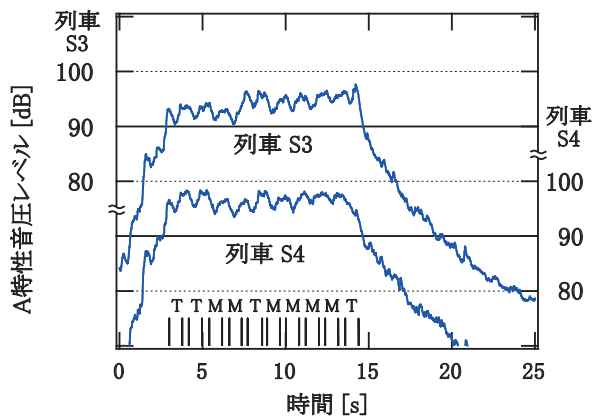


図8 雨天時におけるレール近傍点騒音

(測線 A, 外軌側レール近傍騒音, —: 8kHz 以下の周波数成分の結果, - : 10kHz 以上の周波数成分を含む結果, 時間軸上のパルスは台車中心位置を示す)

### 5.1 レール加振試験の概要

測線 B の外軌側レール頭部の上面あるいは側面に圧電式加振器 (Wilcoxon F7) を設置し、レールの上下・左右方向に加振力を与えた。加振条件はピンクノイズによる定常加振で、加振力の周波数範囲の上限は 20kHz である。レール加振時において、測線 A, B および測線 A, B 間に 20m 間隔で設けた 3 つの測線 (図 1 参照) のレール頭部の上下、左右方向の振動を測定する (以下、加振器試験)。また、加振器の性能上、10kHz 以下の周波数域におけるレール振動については SN 比が不足したことから、10kHz 以下の加振力にはインパルスハンマ (Dytran 5800B) による衝撃加振力を用いた (以下、ハンマ試験)。図 9 はハンマ試験における加振断面および振動測定断面の位置である。測線 B を含む 15 断面での上下、左右方向の加振に対する測線 B の上下、左右方向の振動を測定した。ハンマ試験に際し、加振力と各測定点における振動加速度とのコヒーレンスが 0.8 以上になるよう留意した。2 つの試験による測定データは、1/3 オクターブバンド中心周波数ごとの振動加速度レベルあるいは周波数応答関数 (アクセラランス  $a/F$ ,  $a$ : 振動加速度,  $F$ : 加振力) として整理した。

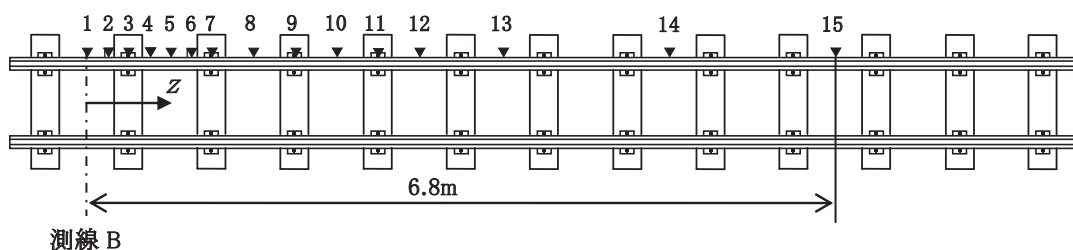


図9 ハンマ試験におけるレールの加振断面位置

### 5.2 距離減衰率の算出方法

加振器試験およびハンマ試験での測定データを基に、以下の手順でレール振動の距離減衰率を算出した。

#### (1) 加振器試験

測線 B を基点として測線 A の方向のレール長手位置を  $z$  とする。加振点位置  $z = 0$  (測線 B) からある測線の位置  $z$  における振動加速度を  $A(z)$  とすると、 $A(0)$  と  $A(z)$  の関係は以下で近似できる<sup>6)</sup>。

$$|A(z)| \approx |A(0)|e^{-\beta z} \quad (1)$$

ここで、 $\beta$  は波数の虚数成分 (減衰に関わる成分) である。式 (1) より、レール長手方向における振動成分を積分すると以下となる。

$$\int_0^{\infty} |A(z)|^2 dz \approx |A(0)|^2 \int_0^{\infty} e^{-2\beta z} dz = |A(0)|^2 \frac{1}{2\beta} \quad (2)$$

式 (2) より、距離減衰率  $\Delta$  [dB/m] は以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \Delta &= -20 \log_{10} e^{-\beta} \approx 8.686\beta \\ &\approx \frac{4.343}{\int_0^{\infty} \frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} dz} \approx \frac{4.343}{\sum_{i=1}^N \frac{|A(z_i)|^2}{|A(0)|^2} \Delta z_i} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $N$  は測定断面数 (= 5)、 $\Delta z_i$  は測定断面間の距離 (= 20m) である。

#### (2) ハンマ試験

インパルスハンマによる力を入力、レールの振動加速度を出力とした場合の周波数応答関数 (アクセラランス) を求める。振動測定点 (測線 B) を加振した場合のアクセラランスに対する他点加振時のアクセラランスのレベル差と、測線 B からの各加振点の距離の関係から距離減衰率を求める。この場合、式 (3) の  $A(z)$  は、振動測定点 (測線 B) を基点とした加振点位置  $z$  におけるアクセラランス、 $N$  は加振点総数 (= 15)、 $\Delta z_i$  は加振点位置の間隔に対応する。

### 5.3 距離減衰率の算出結果

図 10 は加振器試験とハンマ試験による測定結果から算出したレール振動の距離減衰率である。同図より、10kHz バンドの距離減衰率を見ると、2 つの試験での結

特集：環境工学

果は概ね一致している。よって、2つの試験による距離減衰率の結果は妥当と考えられる。10kHzバンド以上の周波数域における距離減衰率は、8kHzバンド以下の周波数域の結果と同等あるいはそれ以下である。これは、現車走行時のレール振動で確認されたように、列車通過後も振動が継続することに対応する。10kHzバンド以上の周波数域の距離減衰率は、加振方向によらず周波数が高くなるほど小さくなる傾向を示し、20kHzバンドでは、0.01～0.03dB/mである。10kHz以上の周波数域で距離減衰率が低下する理由は不明であり、今後の調査が必要である。

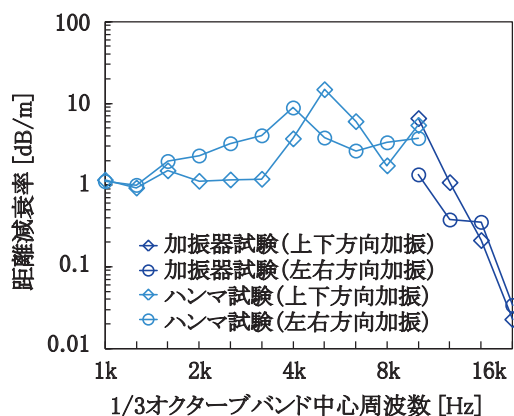


図 10 レール振動の距離減衰率の周波数特性 (加振方向と応答評価方向は同じ)

5.4 現車試験結果による距離減衰率の算出

現車走行時のレール振動の結果を用いた距離減衰率の算出を試みる。この場合の距離減衰率は、最後部台車が測線 B を通過してからレール振動が継続する時間の測線 A、B におけるレール振動のレベル差と測線間距離  $z_{AB}$  (=80m) を基に求める。距離減衰率  $\Delta$  [dB/m] は、下式のようになる。

$$\Delta = -10 \log_{10} \left( \frac{|A(z_{AB})|^2}{|A(0)|^2} \right) \cdot z_{AB}^{-1} \quad (4)$$

ここで、 $A(0)$ 、 $A(z_{AB})$  は、それぞれ測線 B、A における振動加速度である。

図 11 は現車走行時のレール振動から算出した距離減衰率である。同図より、10kHz以上の周波数域の距離減衰率は列車によってややばらつきはあるが、加振試験での結果(図 10 参照)と同様に周波数が高いほど低下する傾向である。ただし、図 11 に示す距離減衰率は、全周波数域において加振試験での結果よりもやや低い。この理由として、10kHzバンド以下については、距離減衰率の評価時間(最後部台車が測線 B を通過してからレール振動が継続する時間)における測線 A のレール振動の SN 比が不十分であった(測線 B から測線 A へ伝搬するレール振動の減衰が大きく、測線 A では測定下限値を下回っていた)ためと考えられる。12.5kHzバンド以上については、レールに作用する加振力の状況が加振

試験の条件と異なるためと推察される。20kHzバンドの上下方向の距離減衰率が16kHzバンドよりも高い理由については不明であるため、今後の精査が必要である。

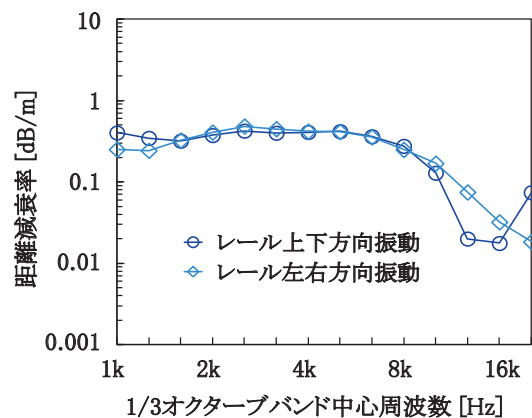


図 11 現車走行時のレール振動から算出した距離減衰率の周波数特性 (列車 5 本の算術平均値)

6. まとめ

在来線の 2 つの曲線区間でレール振動、騒音を測定し、これらの測定結果から 10kHz 以上の高い周波数成分の音の発生メカニズムを調査した。その結果、列車通過時における主要な音源は外軌側の車輪であり、列車通過後では主に外軌側レールから音が放射されることが明らかになった。また、12.5kHz バンド以上のレール振動の距離減衰率は、10kHz バンド以下のそれよりも小さくレール振動はより遠方まで伝搬することが明らかになった。

文献

- 1) 廣江正明, 鴨志田均ほか: 高周波音を含む鉄道騒音の計測 - 最近の測定事例 -, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.127-130, 2010
- 2) 緒方正剛, 桶田昌良ほか: 鉄道騒音に含まれる高周波音の調査結果, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp.45-48, 2010
- 3) Rudd, M.J., Wheel/rail noise-Part II: Wheel squeal, Journal of Sound and Vibration, 46(3), pp.381-394, 1976.
- 4) 川口二俊, 上妻雄一ほか: 鉄道の曲線軌道で発生する高周波音に対するレール・車輪振動の寄与度評価, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp.75-78, 2012
- 5) 川口二俊, 北川敏樹ほか: 鉄道の曲線区間で発生する高周波数域のレール振動特性, 第 22 回環境工学総合シンポジウム, pp.77-80, 2012
- 6) Jones C.J.C., Thompson D.J. and Diehl R.J.: The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation, Journal of Sound and Vibration, 293, pp.485-495, 2006.