

レール放射音の音響特性とその評価法

北川 敏樹* D. J. THOMPSON**

Investigation of Radiation Characteristics of the Noise from a Rail

Toshiki KITAGAWA D. J. THOMPSON

Theoretical models, such as TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software) developed in Europe, and microphone array measurements have been widely used to gain better understanding of rolling noise. However, the array measurements are often inconsistent with the TWINS predictions and give less prominence to the rail than the TWINS models. The objectives of this paper are to find out whether the microphone array measurements give a correct estimate of sound power radiated by the rail. Through the analysis of the performance of a microphone array, it is found that a horizontal array cannot detect a large part of the noise from the rail at high frequencies where free wave propagation occurs in the rail. It is concluded that the results obtained by using microphone arrays do not reflect the radiation characteristics of the noise from a rail, and this leads to the underestimation of the contribution of the rail component of noise.

キーワード：転動音，レール放射音，アレイ式指向性マイクロホン

1. はじめに

鉄道騒音は、車輪、レールなど車両、軌道を構成する様々な部位から発生する。鉄道沿線において騒音を効果的に低減するためには、騒音全体に対して大きな寄与を持つ音源を把握することが必要である。

車輪、レールから生じる転動音は、列車速度の広い範囲で主要な音源である。転動音は、車輪・レールの凹凸に起因した加振力が車輪、レールを振動させることによって発生する。転動音予測に関しては、その発生原理に基づいた欧州のTWINSモデル等の理論モデルが構築され、その有効性が確かめられている^{1), 2)}。TWINSモデルによる転動音に対する音源別寄与度評価では、2000Hz以上の周波数域で車輪の寄与が大きく、500～1600Hzにおいてはレールが主要な音源であることが示されている²⁾。

一方、鉄道騒音における音源の位置特定や音源パワーを評価する測定器として、アレイ式指向性マイクロホン（以下、アレイ装置）が広く用いられている。アレイ装置は複数のマイクロホンを配列し、各マイクロホンからの出力を信号処理することによって鋭い指向特性を有する装置である。アレイ装置を用いた転動音に対する測定結果では、500Hz以上において転動音の大部分を車輪放射音の寄与が占めることが報告されている^{3), 4)}。これは、上記のTWINSモデルによる評価結果と合わない。本論文では、アレイ装置による転動音の評価をレール放射音

に着目して検証する²⁾。まずインパルスハンマーを用いてレールを加振し、レールの振動特性を調べる。次に、レールを伝搬する曲げ波の振幅、位相を考慮したレールの音源モデルを構成し、加振器を用いてレールを加振することによってレールまわりに生じる音圧分布を測定し、音源モデルの妥当性を確かめる。最後に、レールの音源モデルを用いて、アレイ装置による転動音の測定・評価における問題点を整理する。

2. レールの振動特性

インパルスハンマーを使って無荷重状態のレールを上下、左右方向に振動させ、レールの振動応答を計測した。試験区間は、バラスト軌道（60kgレール、PCまくらぎ、5N形レール締結装置）である。また、測定基準断面から加振点位置をレール長手方向に0～7m範囲で移動させ、レール振動の距離減衰率を評価した⁵⁾。

軌道の振動を模擬するため、レールに対応する無限長のTimoshenko梁をバネ-マス-バネ系から成る支持体が連続的に支えるモデルを構成した⁶⁾。バラスト軌道の場合では、この支持体は軌道パッド、まくらぎとバラストに対応する。また、軌道モデルに必要なパラメータである軌道パッド等のばね剛性等は実測結果から同定した。

図1は、上下方向にレールを加振した場合の上下方向の周波数応答（モビリティ： v/F 、 v ：振動速度、 F ：力）について、実測結果と軌道モデルによる評価結果を比較したものである。計算結果と実測結果は概ね同じ傾向を

* 環境工学研究部（騒音解析）

** ISVR, University of Southampton, UK

特集：環境技術

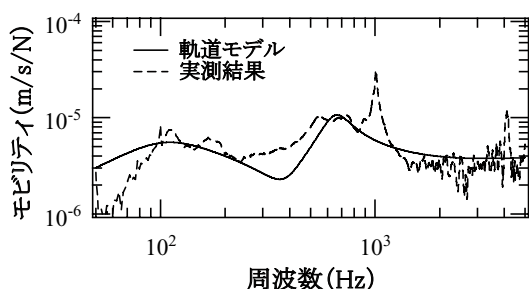


図1 加振点における周波数応答（上下方向）

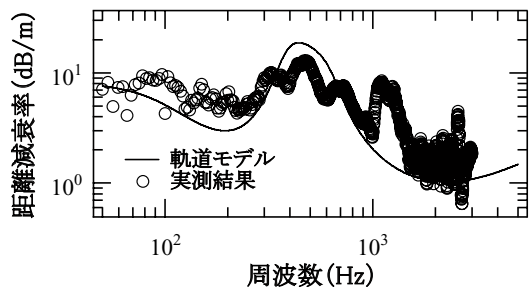


図2 レール振動の距離減衰率（上下方向）

示す。ただし、1000Hz付近では2つの結果が合わない。これは、一次pinned-pinned共振による影響であり、一次pinned-pinned共振では、レール締結間隔がレールを伝搬する曲げ波の半波長に対応する。軌道モデルではレールを支持体が連続的に支えるため、この影響を評価できない。図2は、上下方向のレール振動の距離減衰率である。実測結果と評価結果はほぼ一致する。700Hz以上では、レール振動の距離減衰率が小さくなり、遠方までレール振動が伝搬されることがわかる。

3. レールの音響特性

3.1 レールの放射音モデル

レール振動に伴って発生するレール放射音を模擬するため、レールをN個の単極子が長手方向に一系列に等間隔で配置されたモデルとして考える²⁾。図3に音源モデルと受信点の関係を示す。角周波数 ω における音源 n の体積速度の複素振幅を Q_n 、位置を \mathbf{r}_n とする。また、音源モデルを構成する各音源間には相関関係の有無を考慮する。各音源の体積速度 Q_n は、2章の軌道モデルから得られるレールの曲げ振動の振幅と位相を考慮することによって評価される。音源 n 、受信点 m 間の距離 R_{mn} は $R_{mn} = |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|$ で与えられ、受信点 m での音圧は(1)式で表される。

$$p(\mathbf{r}_m) = j\rho_0 c_0 k \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{4\pi R_{mn}} e^{-jkR_{mn}} \quad (1)$$

ここで、 ρ_0 は空気密度、 c_0 は音速であり、 k は音の波数を示す。また、 $e^{j\omega t}$ は省略した。

図4(a)、(b)は、レールを上下方向に一点で加振した場合における400、1600Hzでのレール振動の振幅分布

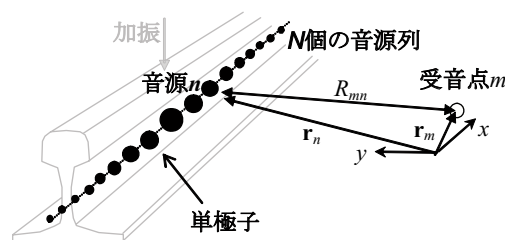


図3 音源モデルと受信点の関係

の計算結果を示したものである。また、図4(c)、(d)に、レールの音源モデルを構成する音源列が相関、無相関である場合に普通マイクロホンで測定されるレール長手方向の音圧分布の計算結果を示した（ただし、2つの音源モデルを構成する各音源の音響パワーは同じ）。これらの結果は、加振点でのレール振動の振幅、加振点正面で測定される音圧で規格化した。400Hzにおける結果では、2つの音源モデルとも加振点近くでの音圧が大きい。この周波数ではレール振動の距離減衰率が20dB/m程度であること（図2）から、レールに分布する音源が加振点付近に局在する点音源的な特性を持つことを示している。1600Hzの場合では、音源モデルを構成する音源の特性によって結果が大きく異なる。無相関音源列から成るモデルの結果は、400Hzの場合と同様であり、加振点まわりで音圧が最大となる。一方、相関性音源列で構成された音源モデルでは、加振点よりも離れた受信点で測定される音圧が最大となり、加振点から見て15°程度の方向に音が強く放射される。1600Hzにおけるレール振動の距離減衰率は1dB/m程度であり、レール長手方向の遠方までレール振動が伝搬するので、レールは線状の音源を形成することが予想される。一般に、構造体を伝搬する曲げ波が音を強く放射する方向は、曲げ波と音の波数の比で決定される。1600Hzでは、2章の軌道モデルからレールの曲げ波と音の波数はそれぞれ6.55rad/m、29.3rad/mであり、レールが強く音を放射する角度は加

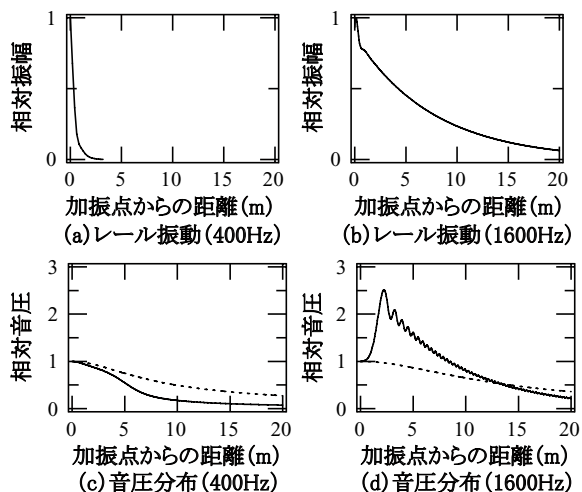


図4 音源分布とレールまわりの音圧分布(5.72m離れ、—：相関性音源列モデル、---：無相関性音源列モデル)

振点から $12.9^\circ (= \sin^{-1}(6.55/29.3))$ である。これは図4 (d)での結果にほぼ一致する。これらから、相関性音源列で構成された音源モデルはレールのような構造体から放射される音の特性を適切に表すことが予想される。

3.2 加振試験による検証

3.2.1 試験概要

レール長手方向の軸を含む水平面におけるレール放射音の特性を、二次元アレイ装置を用いて調査し、3.1節に示した音源モデルの妥当性を検証する。図5は、試験状況を示したものである。この試験は2章での衝撃加振試験と同じ区間で行った。500-2500Hzの1/3オクターブバンドの中心周波数で、加振器を用いて上下または左右方向にレールを振動させた。また、加振器からの音の影響を小さくするため、加振器を吸音箱に入れた。測定に使用したアレイ装置は13本のマイクロホンで構成され、一周波数バンドあたり使用するマイクロホンは9本である。また、マイクロホン間隔は、1250Hz以下の周波数域では0.136mであり、1600Hz以上では0.068mである。アレイ装置はマイクロホン配列軸をレールと平行に配置し、レールからの離れは0.62mである。また、測定位置はレール長手方向に加振点から1.5～5mの範囲である。アレイ装置がその正面に対し $-60^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で鋭い指向特性を持つように各マイクロホンからの出力を遅延和法で信号処理した。図6は、入射波が平面波であると仮定した場合のアレイ装置の指向角度とゲインの関係の例を示したものである。調節された指向角度に鋭い指向性を持つことがわかる。

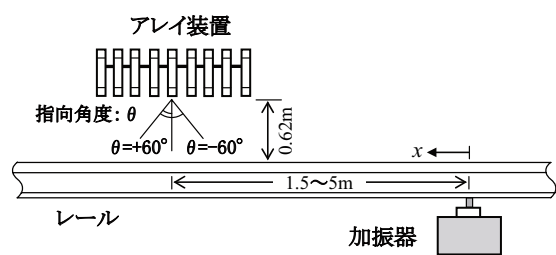


図5 測定概況（上下方向加振の場合）

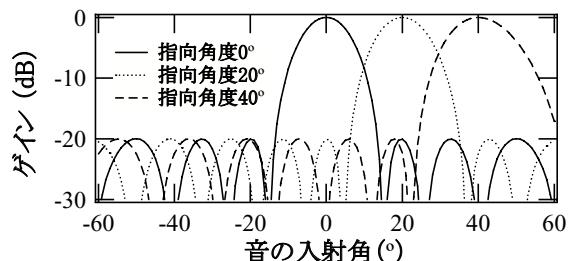


図6 アレイ装置の指向特性

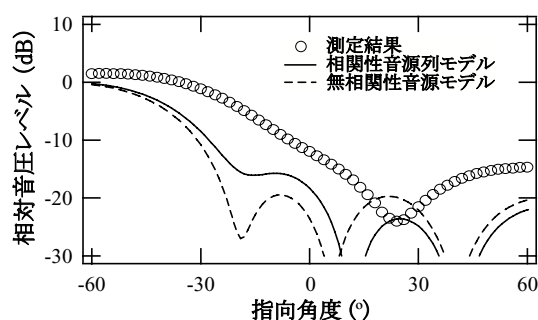
(入射波が平面波である場合を仮定, 1250, 2500Hz)

3.2.2 試験結果と考察

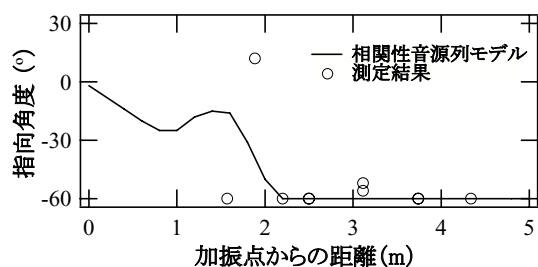
図7 (a) は、500Hzにおいてアレイ装置の指向角度を変えてレール放射音を測定した結果である。また、図7

(a) には、レールに対応する2つの音源モデル（相関音源列または無相関音源列で構成したモデル）に対して3.2.1項で示したアレイ装置を用いて測定した場合における解析結果を併記した。ここで、相対音圧レベルは、アレイ装置による測定結果と9本のマイクロホンによる平均出力のレベル差である。測定結果では、アレイ装置の指向角度が -60° の場合に最大となり、加振点付近に強い音源があることがわかる。これは、レール振動の距離減衰率が大きい（図2）に、音源が加振点付近に局在し、レールが点音源的な特性を持つ音源を構成することを表している。また、音源特性が異なる2つの音源モデルの解析結果が示す傾向は測定結果とほぼ一致し、ピークを形成する指向角度は -60° である。したがって、レール振動の距離減衰率が大きい場合では、音源モデルを構成する音源特性がレール放射音の解析結果に与える影響は小さいと考えられる。図7 (b) は、アレイ装置の位置とその位置でピークとなる指向角度を整理したものである。また、図7 (b) には、相関性音源列で構成された音源モデルでの結果も示した。実測結果と解析結果の傾向はほぼ同じである。また、加振点から2m以上離れた測定点では、測定位置に依存せず、アレイ装置の指向角度が -60° であり、アレイ装置は加振点付近に局在する音源を捉える。

図8 (a) は、800Hzにおける測定結果と2つの音源モデルによる解析結果である。測定結果では、アレイ装置の指向角度が -15° の場合でピークとなる。これは、アレイ装置の指向角度が 0° に調整されている場合、アレイ装置はレールが強く音を放射する部分を捉えられないことを示している。また、測定結果が示す傾向は、相関性音源列で構成される音源モデルによる結果とほぼ同じであ



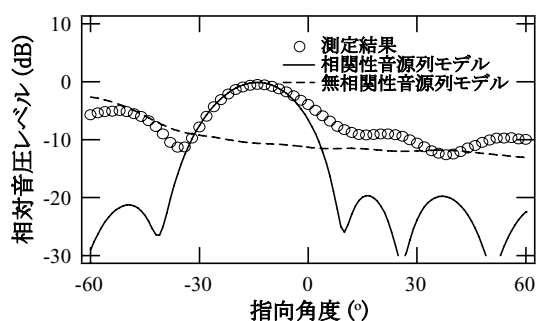
(a)アレイ装置による測定結果 ($x=3117\text{mm}$)



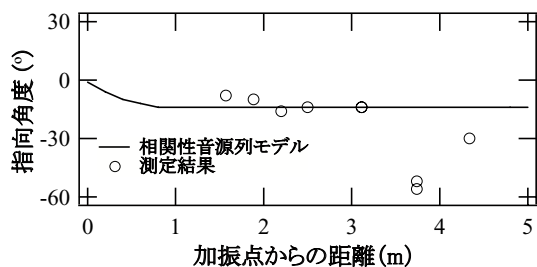
(b)アレイ装置の位置とピークを形成する指向角度

図7 レールからの放射音（上下方向振動, 500Hz）

特集：環境技術



(a)アレイ装置による測定結果 ($x=3117\text{mm}$)



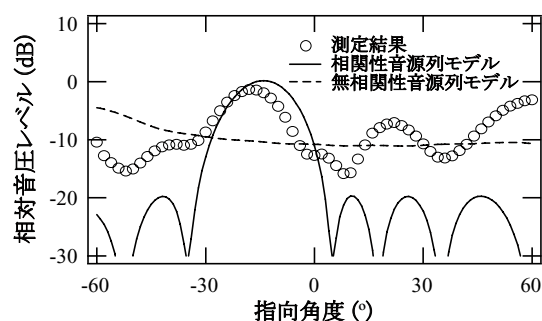
(b)アレイ装置の位置とピークを形成する指向角度

図8 レールからの放射音（上下方向振動，800Hz）

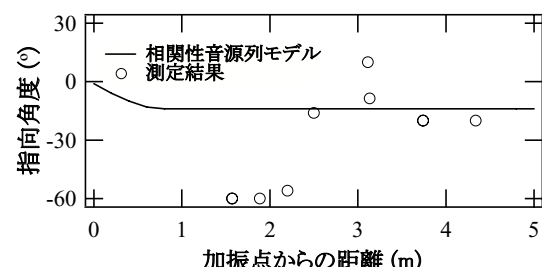
る。また、無相関性音源列による音源モデルの場合では、ピークとなる指向角度は -60° である。図8 (b)は、アレイ装置の位置とその位置で最大ピークとなる指向角度の関係について、実測結果と相関性音源列で構成された音源モデルでの評価結果を比較したものである。評価結果は、実測結果とほぼ同じ傾向であり、また1m以上離れた位置ではピークを形成する指向角度は -15° 程度で一定である。この指向角度は、2章の軌道モデルから求められるレールを伝搬する曲げ波と音の波数の比で決定される音の放射角度 ($14.0^\circ = \sin^{-1}(3.59/14.8)$) にほぼ対応する。これらの結果からは、通常、アレイ装置から見て -15° の方向に強い音源があると解釈される。しかし、実際には、レールは相関性音源列で構成された線音源であることから、アレイ装置の測定結果が必ずしも音源の特性を反映するとは限らないことがわかる。

図9は、測定結果と音源モデルによる解析結果を1000Hzで比較したものである。測定結果では、 -15° 付近のほかに $+15^\circ$ 付近にもピークが現れる。この周波数では、レール振動には一次 pinned-pinned 共振による影響 (2章参照) が現れるため、レール締結間を往復する波動成分を生じる。したがって、この波動成分に対応しレールは2つの方向に音を放射することが考えられる。これに対し、音源モデルによる評価結果では、アレイ装置の指向角度が -15° の場合のみで最大値となる。これは、レールを連続的に支持する軌道モデルの結果を基に構成した音源モデルによる評価のためである。

図10 (a)は、2000Hzでの結果を示したものである。この周波数では、レール振動の距離減衰率が小さいことからレール振動は遠方まで伝搬され (図2)、レールは線

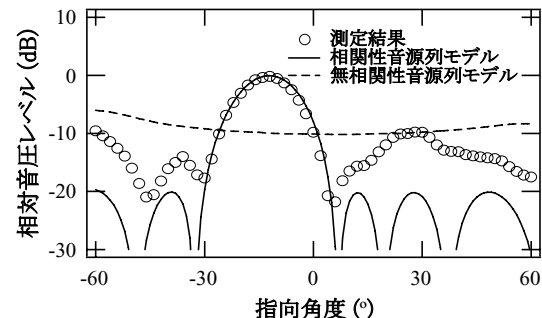


(a)アレイ装置による測定結果 ($x=3740\text{mm}$)

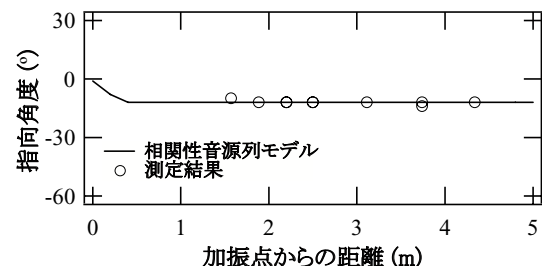


(b)アレイ装置の位置とピークを形成する指向角度

図9 レールからの放射音（上下方向振動，1000Hz）



(a)アレイ装置による測定結果 ($x=3117\text{mm}$)



(b)アレイ装置の位置とピークを形成する指向角度

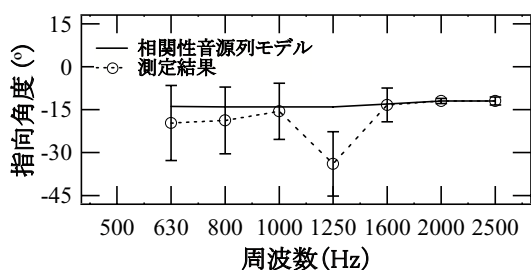
図10 レールからの放射音（上下方向振動，2000Hz）

音源的な特性を持つことが予想される。測定結果では、ピークを形成するアレイ装置の指向角度は -13° である。また、相関性音源列で構成される音源モデルによる結果は、測定結果と同じ傾向を示す。図10 (b)は、2000Hzにおいて、アレイ装置の位置とピークを形成するアレイ装置の指向角度を整理したものである。測定結果、解析結果ともに、測定位置に関係なく、その角度は -13° である。この角度はレールを伝搬する曲げ波と音の波数の比から決定される音の放射角度に対応することから、レール

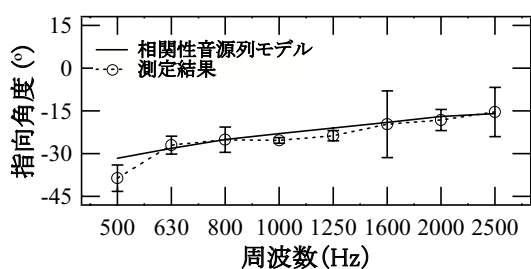
ルが相関性を持つ音源列で構成されることを示している。

また、本論文には示していないが、左右方向のレール振動によって発生する放射音に関しても、同様の傾向が見られた²⁾。測定結果では、レールは20～30°の方向に音を強く放射し、相関性を持った音源列で構成されたモデルによる結果が測定結果と同じ傾向を示した。

図11は、上下、左右方向のレール振動について、アレイ装置の結果でピークを成す指向角度を周波数別に整理したものである。また、測定結果に示した範囲は標準偏差に対応する。測定結果と相関性音源列で構成された音源モデルによる解析結果はほぼ同じである。これらから、レール放射音を模擬するためには、相関性を持った音源列による音源モデルが有効であることが確かめられた。



(a) 上下方向のレール振動による結果



(b) 左右方向のレール振動による結果

図11 アレイ装置の結果で最大ピークとなる指向角度

4. アレイ装置の測定結果に基づく転動音推定の誤差

4.1 転動音推定誤差の評価方法

アレイ装置を用いた測定結果を基に音源解析を行う場合、アレイ装置から既知の距離にある平面に無相関な点音源が一様に分布することを仮定するのが一般的である^{3), 4)}。しかし、3章までの結果から、レール放射音を無相関性音源列と見なすことができないため、この仮定の下で得られた音源解析結果は適切ではないと考えられる。ここでは、相関性音源列、無相関性音源列で構成されたレールの音源モデルに対するアレイ装置による測定結果を基に音源解析を行った場合に得られる2つの音源モデルからの結果の比較を行う。ただし、2つの音源モデルを構成する各音源の音響パワーの総和は同じとする。評価対象とするアレイ装置は、一般的な次元アレ

イ装置の仕様を有するリオン製MY-13型とした⁷⁾。鉄道沿線のアレイ装置を用いた騒音測定を行う場合、アレイ装置はそのマイクロホン配列軸をレールと平行に設置し、その正面方向に鋭い指向性を持つように設計されている（指向角度は0°）ので、同じ設置条件、性能条件で評価を行う。測定位置は、近接側軌道中心から6.25m離れたとした。また、2章での軌道を対象としてレール放射音を評価した。軌道パッドの動的ばね剛性に関しては、上下方向に対して700MN/m、200MN/m、左右方向に対して85MN/m、40MN/mを用いた。標準的なバラスト軌道で使用される上下、左右方向の軌道パッドのばね剛性の組み合わせは（700MN/m、85MN/m）である。また、アレイ装置による結果では、加振点でのレール振動に対して50dB程度小さくなる範囲までのレール長手方向に分布する音源からの寄与を積分した形で評価した。

4.2 転動音の推定誤差に関する評価結果

図12は、音源特性が異なる2つの音源モデルによる転動音の推定結果のレベル差を周波数バンドごとに整理したものである。2つの音源モデルのレベル差は、レールを無相関音源列で構成された音源モデルと見なした場合にレール放射音の評価結果に生じる推定誤差に対応する。図12で正のレベル差は無相関性音源列より相関性音源列で構成される音源モデルからの結果が大きいことを示す。また、図13は、各軌道パッドのばね剛性に対応するレール振動の距離減衰率である。上下方向のレール振動から生じるレール放射音の解析結果では、軌道パッドのばね剛性が700、200MN/mの場合、アレイ装置によるレール放射音の過小評価が生じる周波数域はそれぞれ

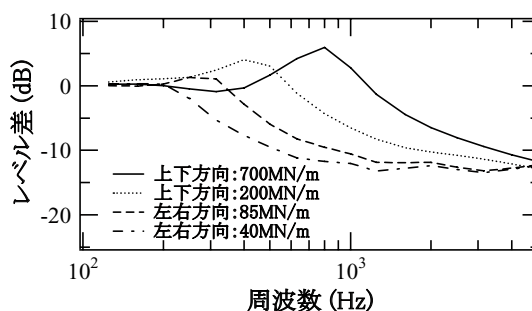


図12 無相関性、相関性音源列モデルのレベル差

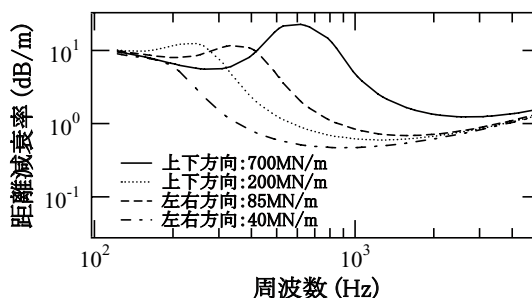


図13 レール振動の距離減衰率

特集：環境技術

1000Hz以上、500Hz以上であり、これらの周波数はレール振動が遠方まで伝搬される周波数に対応する。これらの周波数以上ではレベル差が最大10dB程度になる。左右方向のレール振動によるレール放射音の評価結果も同じ傾向である。ただし、アレイ装置がレール放射音を過大評価する場合も散見する（例えば、上下方向の軌道パッドのばね剛性が700MN/mの場合、800Hz付近）。しかし、この周波数域ではレール振動の距離減衰率が大きく、転動音全体に対するレール放射音の寄与が小さいため、アレイ装置による転動音評価には大きな影響を与えない。

次に、アレイ装置による測定結果から無相関音源モデルに基づいてレール放射音を推定した場合における誤差を確かめる。図12に示したレベル差をTWINSモデルによる転動音の寄与度評価のうち、上下、左右方向からのレール放射音の結果に適用する。図14は、転動音に対してアレイ装置を用いた測定結果から音源別寄与度を推測したものである。普通マイクロホンの結果がTWINSモデルによる結果に対応する。なお、図14に示したTWINSモデルによる結果は文献2)によって実測値との整合性が確かめられたものである。図14(a)より、アレイ装置による測定結果では、普通マイクロホンに比べてレール放射音を過小評価する。その結果、1000Hz以上の周波数域で車輪放射音の寄与が卓越し、レール放射音を大きく上回る傾向になる。これは、アレイ装置を指向角度0°でレール正面に向けて測定を行った場合、レール振動が遠方へ伝搬される周波数域においてレールからの放射音の

大部分をアレイ装置が測定していないためである。したがって、アレイ装置による測定では、転動音に対するレール放射音の寄与を過小評価することになる。また、ケースBの場合では、この傾向がより顕著になる。これは、ばね剛性が低い軌道パッドで構成される軌道の場合、転動音全体に対するレール放射音の寄与が大きいためである。

5. まとめ

レールの振動・音響特性を加振試験等から調査を行った。その結果、レールに対応する音源モデルは相関性音源列で構成することが適切であることが明らかになった。また、アレイ装置を用いた転動音の測定する場合、レール振動が遠方まで伝搬される周波数域では、正面方向に指向性を有するアレイ装置はレールからの放射音の大部分を測定していないことがわかった。これは、アレイ装置による音源解析における音源の前提条件がレール放射音の特性と符合しないためである。このために、アレイ装置による測定結果では、転動音においてレール放射音の寄与を過小に評価する傾向があることがわかった。

文献

- 1) Jones, C.J.C., and Thompson, D.J., "Extended validation of a theoretical model for railway rolling noise using novel wheel and track designs", *Journal of Sound and Vibration*, 267(3), 509-522, 2003.
- 2) Kitagawa, T., "An investigation into inconsistencies between theoretical predictions and microphone array measurements of railway rolling noise", *Ph.D Thesis, University of Southampton*, 2007.
- 3) Nordborg, A., Martens, A., Wedemann, J. Willenbrink, L. "Wheel/rail noise separation with microphone array measurements", *Inter-noise'2001*, The Hague (Netherlands), 2083-2088, 2001.8.
- 4) Van Der Toorn, J.D., Hendriks, H., and Van Den Dool, T.C., "Measuring TGV source strength with SYNTACAN", *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 113-121, 1996.
- 5) Thompson, D.J., Jones, C. J. C., Wu, T. X. & France, G. "The influence of the non-linear stiffness behaviour of rail pads on the component of rolling noise", *Proc. Instn. Mech. Enginrs.*, Vol. 213 Part F, pp233-241, 1999.
- 6) Thompson, D.J., Hemsworth, B., Vincent, N., "Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise, Part 1: Description of the Model and Method". *Journal of Sound and Vibration*, 193(3), 123-135, 1996.
- 7) リオン：MY-13形アレイ式指向性マイクロホン装置、技術資料、1992

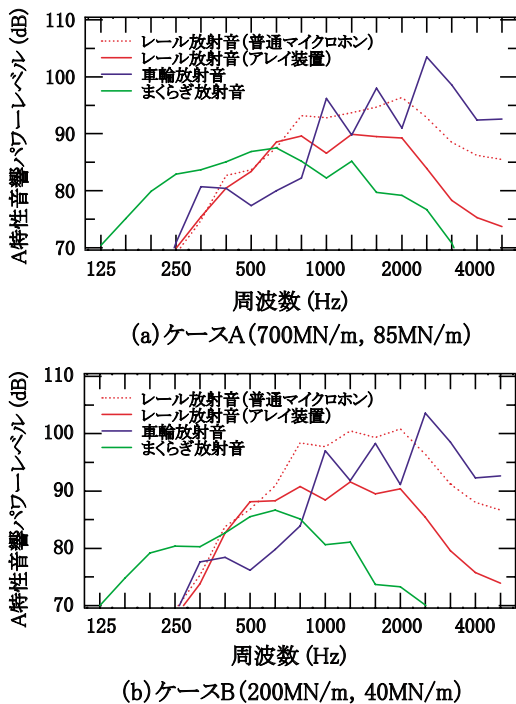


図14 アレイ装置が転動音の測定評価に与える影響（括弧内の値はそれぞれ上下、左右方向の軌道パッドのばね剛性）