

転動音を予測して 低減する

鉄道騒音は、軌道や車両を構成する様々な要素から発生します。平地の直線ロングレール区間を電車が走行する場合、在来鉄道騒音は主に主電動機ファン音と転動音から構成されます。特に、最新車両では、騒音全体に占める転動音の寄与が大きくなっています。今後、在来鉄道の騒音を低減するためには、転動音に重点をおいた対策が必要です。ここでは、転動音に関する特性や転動音の予測法の概要を説明し、この予測法を用いて転動音における車輪・軌道に係わるパラメータの影響を整理します。



北川 敏樹
Toshiki Kitagawa
環境工学研究部
騒音解析研究室
主任研究員
[専門分野] 鉄道騒音

鉄道騒音の音源について

鉄道騒音にはどのような音源があるでしょうか。車輪がレール上を転がる時に生じるゴロゴロという転動音、電車や気動車に搭載された駆動装置や歯車装置から出てくる音、鉄橋やコンクリート高架橋などから発生する構造物音、また高速で走行する新幹線車両から発生する空力音などがあり、その音源は多岐にわたっています。それでは、鉄道沿線での騒音を効果的に低減する

ためにはどのようにしたら良いでしょうか。それは、沿線での騒音に対して大きな影響を持つ音源を見極め、その音源に対して対策を施すことです。

図1は、在来鉄道の電車がコンクリート高架橋のロングレール区間を走行した場合に、鉄道沿線での騒音全体に対する各音源の寄与を推定した結果です。この場合、沿線騒音は主に転動音、構造物音と主電動機ファン音で構成されます。主電動機ファン音は、電

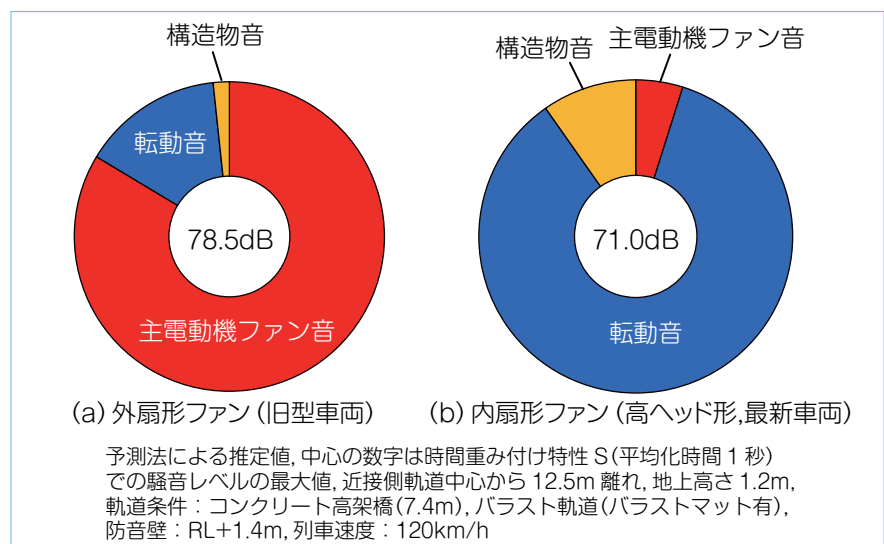


図1 在来鉄道における騒音の音源別寄与度

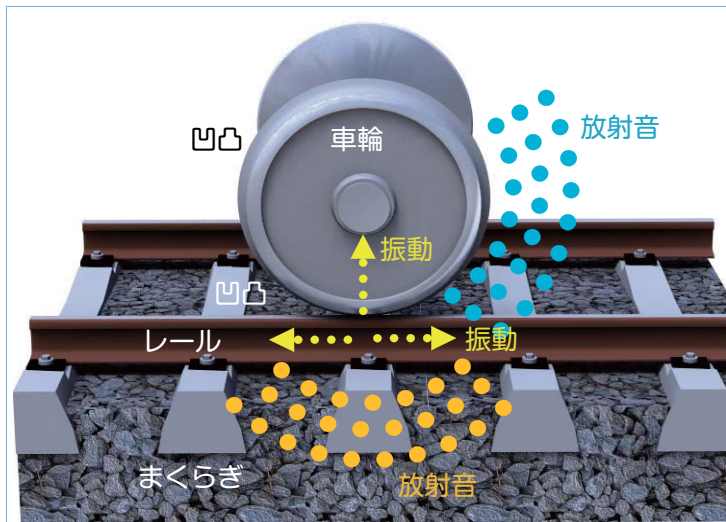


図2 転動音の発生メカニズム

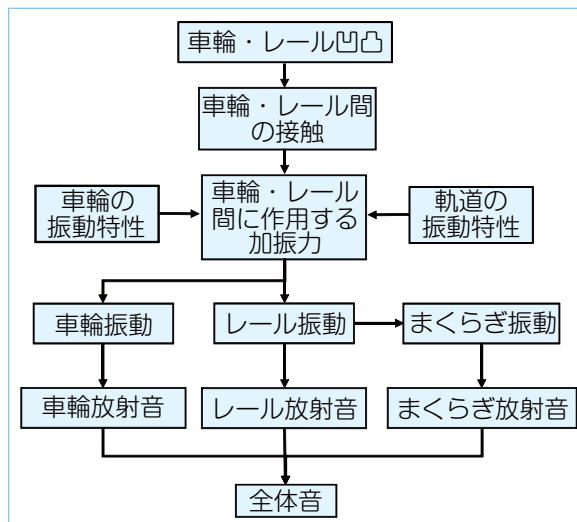


図3 TWINSでの転動音を計算する流れ

動車に搭載されたモータを冷却するためのファンから発生する空力音です。外扇形ファン（主電動機の冷却用ファンがモータ枠の外側にあるタイプ）を搭載した電車では、図1(a)のように主電動機ファン音が最も大きい音源でした。しかし、最新車両では、ファン構造を内扇形とすることにより、図1(b)のように主電動機ファン音は大幅に低減され、騒音全体に占める転動音の寄与度が相対的に大きくなってきています。また、転動音は、在来鉄道だけでなく、新幹線の騒音においても主要な音源の一つになっています。今後、鉄道騒音を低減するためには、転動音に重点をおいた対策を進めることが必要になっていきます。

転動音とは何か

一見すると滑らかに見える車輪・レール面上には振幅0.1～100 μ m程度の凹凸があります。転動音は、この凹凸が原因で生じる加振力によって車輪とレールが振動し発生します(図2)。また、この転動音の主成分となる周波数範囲は500～2000Hzです。次に、転動音の大きさを決める2つの要因を

説明します。

(1) 車輪・レール凹凸

転動音(参照)の大きさを決める主要因は、車輪、レール面上に存在する凹凸です。これまでに、この凹凸成分の波長と列車速度とで決定される周波数と、転動音の周波数がよく一致することが確かめられています。この凹凸の振幅が大きいほど、レール、車輪に働く力は大きくなり、転動音が大きくなります。転動音に関連する凹凸の波長範囲は、在来鉄道の場合(主な速度域が50～120km/h)では、7～70mm程度(周波数=列車速度/凹凸成分の波長)です。この車輪、レールの凹凸は、変位計などを直接車輪や

軸重と転動音の関係

軸重が大きくなると転動音は大きくなるのでしょうか？軸重の増大は車輪・レール間における接触バネの剛性と接触面を大きくします。前者は転動音を大きく、後者は小さくする効果を持ちます。この2つは互いを相殺するため、転動音が大きくなることはありません。この傾向は、実際の列車走行時の結果でも確かめられています。ただし、構造物音は、軸重の増大によって大きくなる傾向を示します。

レール表面に接触させて測定します。これまでに得られた測定結果から、定期的にレール頭頂面を削るレール削りによる管理を実施するかどうかでレール凹凸には平均5dB程度の差があること、車両を制動するブレーキや踏面制輪子の種類によって車輪凹凸が異なることなどがわかってきています。

(2) 車輪と軌道の振動特性

軌道や車輪の形式も転動音の大きさに影響を与えます。軌道の場合、構成する部材(レール、レール締結装置や道床など)に依存して各軌道形式の振動や放射音の特性が異なります。例えば、レール下に挿入される軌道パッドの種類によってレール長手方向に伝搬するレール振動の距離減衰率が異なる傾向があり、レール放射音に係わる音源範囲の大きさに影響を与えます。車輪の場合では、車輪板部の形状などに依存してその振動特性が変わり、車輪種によって放射される音のパワーが異なります。

転動音を予測する

転動音の予測を行うために、欧州で

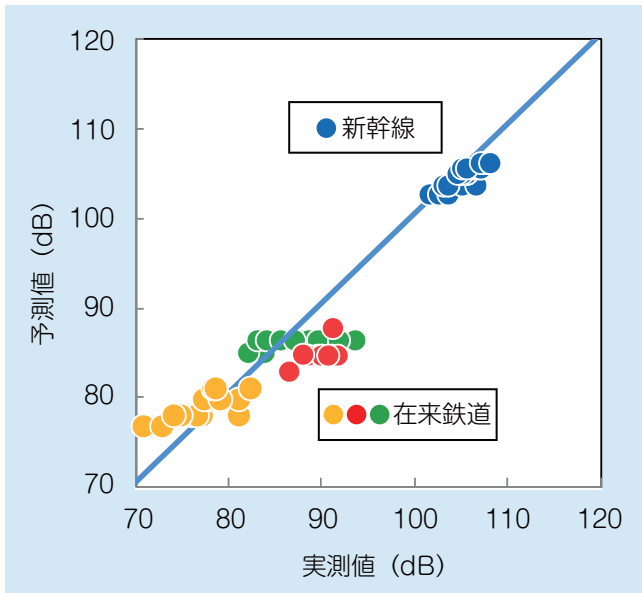


図4 騒音レベルに関する予測値と実測値の比較 (レール近傍点)

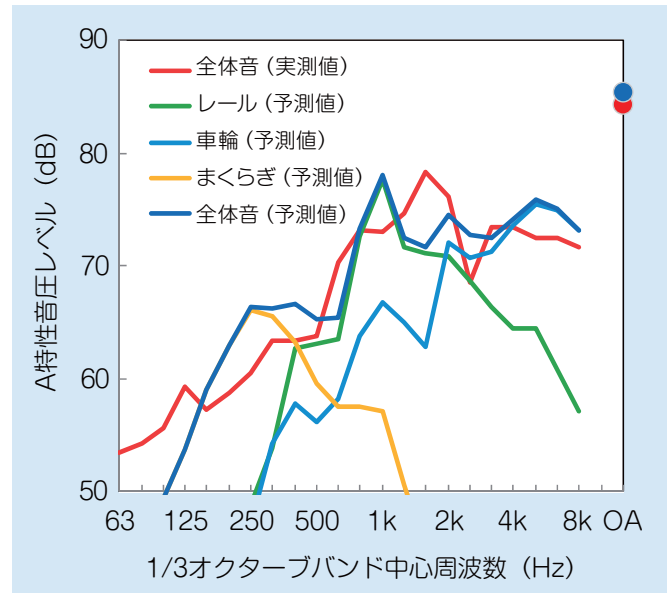


図5 転動音における音源別寄与度 (在来鉄道, レール近傍点, バラスト軌道, 80km/h)

はTWINS (註参照) などのソフトウェアが開発されています。鉄道総研では、転動音の評価を行うために、このTWINSと同じ考え方に基づいた転動音の予測手法の構築を進めています。図3にTWINSでの転動音を予測する計算の流れを示します。車輪、軌道の振動特性の組み合わせで構成された力学モデルに対して車輪、レール面上の凹凸を入力することによって加振力を評価し、この加振力から車輪、レールとまくらぎの振動および放射音を予測します。また、転動音を予測するためには、車輪、軌道のパラメータを整理する必要があります。

註 TWINS モデル

TWINSの正式名称は、Track-Wheel Interaction Noise Software (軌道・車輪間騒音予測ソフトウェア)です。これは、欧州での転動音予測プロジェクトにおいて各国の研究者が開発したモデルを基に構成されたものです。また、この名称は、主開発担当者である英国 Southampton 大学 David Thompson 教授に本当の双子 (real twins) が生まれたことに由来しています。

次に、予測手法における計算モデルを説明します。軌道の振動特性を評価するため、軌道を、レールに対応する無限長の梁と軌道パッド、まくらぎとバラストに対応するバネ-マス-バネ系から成る支持体でモデル化します。このモデルに必要なパラメータ(軌道パッドやバラストなどのバネ剛性など)については、軌道に対する加振試験の結果から同定します。車輪についても、車輪の加振試験から車輪に生じる固有モードなどの整理を行い、この試験結果と有限要素法を用いた計算結果からその振動特性を評価します。また、軌道、車輪からの放射音は、各要素の振動と音響放射効率などから評価します。

予測手法の精度検証を行うため、在来鉄道・新幹線の4区間において、レール近傍点の騒音に関して実測値と予測値の比較を行いました¹⁾。騒音の予測評価を行うために、車輪やレールの凹凸分布など車輪、軌道に係わるパラメータを整理しました。図4は、騒音レベルに関する実測値と予測値の比較を示したものです。予測値と実測値の

差は平均ずれ量-1.0dB (予測値過大)、標準偏差3dBであり、予測値と実測値は概ね一致することを確認しました。

予測手法を用いることによって、転動音の主音源が車輪、レールのどちらであるかについても答えることができます。図5は、在来鉄道の車両がバラスト軌道区間(平地、PCまくらぎ)を走行した場合で、実測値と予測法による各音源の寄与度を示した一例です。まず、全体音に関して実測値と予測値を比較すると、両者はほぼ一致しています。次に、転動音における音源別寄与度を見ると、500~1600Hzでは主要な音源がレールであり、転動音全体に占めるレール放射音の寄与が大きいたことがわかります。また、2000Hz以上では車輪が支配的な音源になっています。

車輪、軌道のパラメータが転動音に与える影響

予測手法による解析結果の一例として、車輪や軌道などに係わる各種パラメータが転動音に与える影響を評価しました(図6)。基準となる条件は、在

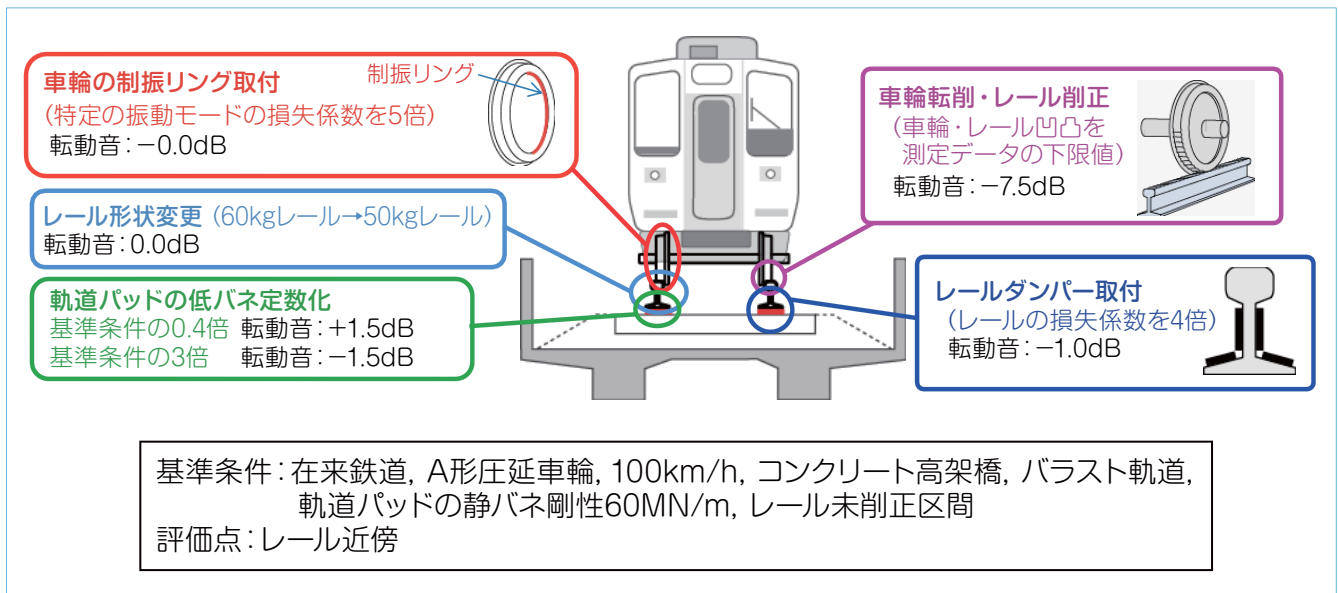


図6 転動音の予測手法による低減効果の評価結果

来鉄道のコンクリート高架橋バラスト軌道です。車輪・レール凹凸、軌道パッドのバネ定数などや各対策に対応するパラメータ（車輪、レールの損失係数など）は、これまでに現地測定等から得られた値を参照しました。

車輪・レール面上の凹凸の管理は、転動音に大きな影響を与えます。特に、レール削正が行われていない区間に対するレール削正による転動音の低減効果は最大7dBです。また、軌道パッドのバネ剛性に依存して転動音は3dB程度増減します。軌道パッドの高バネ剛性化はレール放射音を小さくしますが、まくらぎや構造物などからの放射音を大きくします。一方、軌道パッドの低バネ剛性化は構造物に伝わる振動を緩衝する効果があり、主に構造物音対策として行われていますが、転動音、特にレール放射音を大きくする傾向にあります。これは、より低い周波数でレール支持部の影響が小さくなり、レールが振動しやすくなるためです。レールダンパー（☞参照）などによるレールの制振は転動音に対して1dB程度の低減効果があります。この

原因は、レールダンパーによってレール長手方向に伝搬する振動が抑制されるためです。また、レール形状の変更や制振リング（☞参照）などによる車輪に対する制振が転動音に与える影響は大きくありません。制振リングなどによる制振は、車輪に生じる振動モードの一部だけを抑えるためです。これらの結果の一部は実測データからも検証されています。この予測手法を用いることにより、転動音の音源別寄与度に応じて低減策の効果を定量的に評価することができるようになりました。

☞ レールダンパー

レールのウェブ部や底部に取り付けてレール長手方向に伝搬する振動を抑える装置です。制振合金やゴムなどを層状に構成したものや、ウェブ部両側をゴムで圧着固定する構造のものなどがあります。

☞ 制振リング

急曲線で発生するきしり音を低減するために、車輪リム部内側に鋼リングを取り付けて、鋼リング・車輪間の固体摩擦を利用して振動を抑える装置です。この制振リングは、一部民鉄で採用されています。

おわりに

ここでご紹介した転動音の予測手法や低減策に関する取り組みは、鉄道総研で鉄道騒音の研究を行っているメンバーが転動音に係わる様々な知見を総合的に取りまとめたことによって得られたものです。今後、鉄道沿線における騒音低減をさらに進めるためには、より精度の高い転動音予測手法の構築や車輪フラットなどから発生する衝撃音に対する研究開発を行う必要があります。このために、今後、予測手法における中間の計算結果である車輪やレールの振動などに関する検証を進めるとともに、衝撃音に対する現象解明を進めていく予定です。RRR

文献

- 1) 北川敏樹：転動音の特性と車両・軌道に係わるパラメータの影響，鉄道総研報告，Vol.22, No5, pp23-28, 2008.5