

転動音・構造物音を予測する

飯田 雅宣
環境工学研究部(部長)



いいた まさのぶ

はじめに

鉄道総研では、2000年度から5年間に亘り、将来指向課題の一つとして「在来線における発生音の音源解析と対策法」に取り組み、在来線で主要な音源となる転動音、車両駆動系音、構造物音に関する研究開発を実施しました。その結果、在来線騒音の予測評価手法、騒音発生メカニズムに関する種々の知見、新型防音壁やレール防音材などの低減対策といった多くの成果を得ることができました(RRR2005.7号参照)。これらの成果の中で、在来線騒音予測評価手法は、沿線騒音に関する広範な実測データをベースに開発された有用性の高い成果であり、現在、鉄道沿線環境に関わるいろいろな実務の用途に活用されています。しかし、この予測手法の開発を始めた段階では騒音発生メカニズムについて未解明の部分が多かったため、予測計算の多くの段階で実測データから導いた経験則に頼らざるを得ませんでした。そのため、予測計算の適用範囲や予測精度が、実測データの有無に左右されるという問題点がありました。

このような状況の中、研究テーマの担当者から、「転動音、構造物音の発生原理を基礎的な部分から解明し、騒音発生メカニズムをできるだけ忠実に再現した物理モデルをベースにして、新たな予測ツールを作り上げるべきである」という声が上がることになりました。これは単に、研究者としての学術的興味を満足させるため、ということにとどまらず、より汎用的で、より柔軟性に富み、より精度の高い騒音予測手法を開発するという、騒音研究の本来の目的に沿った提案でした。そこで、2005年度から2009年度までの5年間で実施する新たな将来指向課題の一つとして、「転動音・構造物音の予測ツールと低減対策法の開発」を進めることにしました。本稿では、2009年度に終了したばかりのこの課題で得られた代表的成果から、特に予測手法の開発に重点をおいて解説します。

転動音・構造物音とは

鉄道騒音の音源は、騒音の発生個所とメカニズムの観

点から、①車輪・レール間音、②車両機器音(ギア、ファン、エンジンなど)、③車両空力音、④構造物音、⑤集電系音(パンタグラフ、碍子など)の5つに大別されます。一般に、列車速度が130km/h程度までの在来線の電車では、これらのうち、①車輪・レール間音、②車両機器音、④構造物音の3つが主な音源となっています。しかし最新の内扇型ファンなどを採用した車両に限れば、車両機器音が大幅に低減される傾向にあります。また、車輪・レール間音は、さらに転動音、衝撃音、きしみ音の3種類に分けられますが、衝撃音はレール遊間継目やタイヤフラットなどのようにレール、車輪に不連続部があるときに発生し、きしみ音は急曲線区間等で車輪が横方向にすべる際に発生する、というようにいずれも特殊な条件下で発生する音です。したがって、通常区間で常時発生する車輪・レール間音としては、転動音を考えればよいということになります。以上の理由により、今回の将来指向課題では転動音と構造物音の二つの音を研究の対象として取り上げ、それらの現象解明と予測手法の構築、さらに低減対策の研究を行いました。

転動音・構造物音の発生メカニズム

転動音と構造物音の発生メカニズムを図1に模式的に示します。転動音は、レール、車輪、まくらぎが振動して放射される音、構造物音は軌道の下にある高架橋などの構造物が振動して放射される音ですが、それらの振動が発生するそもそもの原因は、転がる車輪とレールの接触面で相互に作用する力が時間的に変動することに

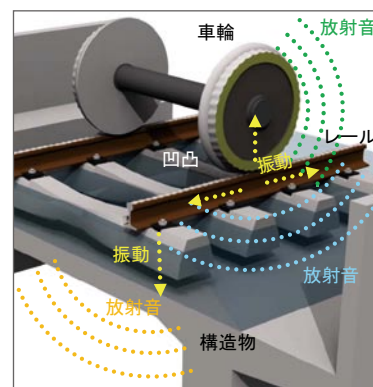


図1 転動音・構造物音の発生メカニズム

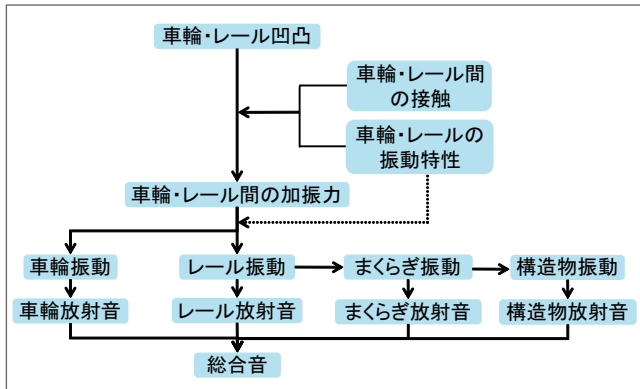


図2 転動音・構造物音の予測の流れ

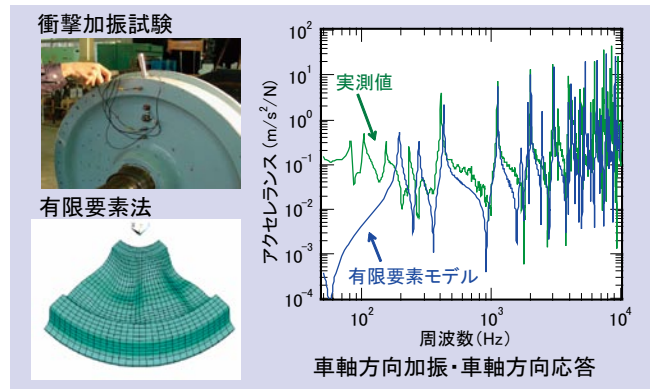


図3 車輪の衝撃加振試験と振動モデル

あります。車輪、レールの表面には、少なくともマイクロオーダーの凹凸は必ず存在し、またレールはまくらぎなどで離散的に支持される構造となっているため、それらが原因で変動作用力、すなわち加振力が生じます。車輪・レールの接触面で発生した加振力は、まず車輪とレールを振動させ、それぞれから音が放射されます。またレールの振動は、まくらぎから、さらにその下の高架橋などの構造物へ伝わり、それぞれの振動体から音が放射されます。図2は、以上の転動音・構造物音の発生の段階を、順を追って示したのですが、今回開発した予測手法はほぼこの図2の流れに沿って計算を行います。なお、今回の予測手法の開発に当たっては、欧州で先行して開発された転動音予測プログラムであるTWINSを参考にしており、図2は、構造物音の部分が付加されている点を除けば、TWINSの計算モデルと同様です。以下では、図2の予測の流れの各段階について詳しくその内容を見ていくことにします。

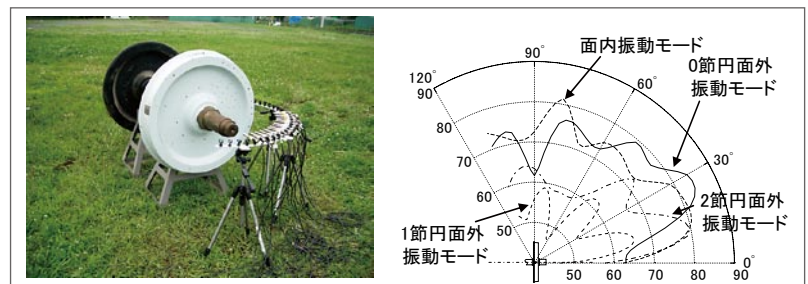


図4 車輪の衝撃加振試験と放射音特性

車輪、レール、構造物の振動・音響特性

車輪とレールの振動特性は、接触面における加振力を決定する要因であると同時に、力が作用した結果として生ずる振動の大きさを支配します。また、構造物の振動特性は、まくらぎなどの軌道構造から下方へ伝達された力が作用した結果として生ずる振動の大きさを決定します。車輪、レール、構造物の音響特性は、それぞれが振動したときに周囲へ放射する音の大きさを決定します。対象とする車輪、レール、構造物の振動・音響特性をあらかじめ調べておくことで、走行条件に応じた騒音予測が可能になります。

物体の振動・音響特性は、衝撃加振試験や数値解析により求めることができます。衝撃加振試験は、物体のある箇所をハンマーで打撃して、物体各部の振動や、周りに放射される音を測定する試験です。試験の様子を打楽器に喩えると、車輪がシンバル、レールがトライアングルといったところでしょうか。一方、数値解析は、各部材を梁などの単純な要素で置き換えた理論モデルに基づき解析する方法、あるいは複雑な形状を細かくメッシュに分割して解析する有限要素法・境界要素法などがあります。

図3は、車輪の振動特性を衝撃加振試験と有限要素法で調べた結果で、両者はよく一致しています。図4は、車輪の音響放射特性を衝撃加振試験で測定している状況です。衝撃加振試験では、一度に複数の振動モードが励起されるので、音の測定結果から各振動モードに対応する周波数の成分を抽出することにより、各モードに対応する放射音の

車輪踏面・レール頭頂面の凹凸

車輪・レール接触面における加振力は、車輪・レール凹凸と車輪・レールの振動特性から、その基本的な特性が決まり、列車速度や軸重などの具体的な走行条件に応じて、加振力の大きさが決まります。そこで、加振力の重要な要因である凹凸の実態を調べるため、在来線と新幹線において、営業車両の車輪および営業路線のレールの表面凹凸を実測しました。その際、車輪転削およびレール削正の時期との関連にも留意しました。その結果、ばらつきはあるものの、今回調査を行った範囲では、レールに比べて車輪の凹凸が小さい傾向にあり、したがって転動音の大きさはレール凹凸に影響される度合いが大きいことがわかりました。

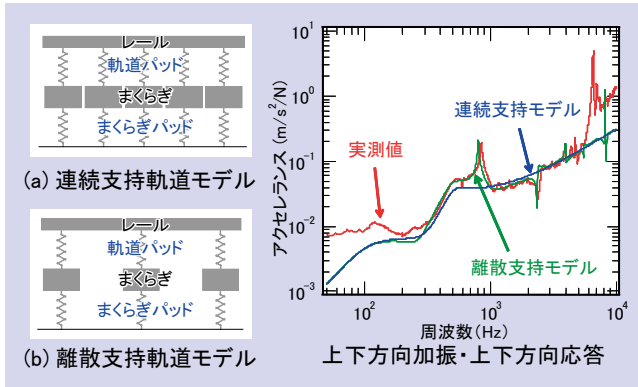


図5 軌道の衝撃加振試験と振動モデル

特性を調べることができます。

図5は、レール、まくらぎで構成される軌道の振動特性を衝撃加振試験と理論解析により調べた結果です。理論解析は、実際と同様にレールをまくらぎで離散的に支持するモデルに基づく方法と、全体を平均化してより単純化した連続支持モデルに基づく方法の2通りで行いました。離散支持モデルの方が実測との一致は良好ですが、連続支持モデルでも全体的な傾向は捉えられており、騒音予測の面からは実用上十分と言えます。図6は、レールの断面方向の放射音特性を衝撃加振試験で調べた結果で、振動モードの違いにより、放射音の指向特性が周波数によって異なることがわかります。

図7は、コンクリート高架橋の振動特性を衝撃加振試験で調べた結果です。横梁に囲まれた長方形の床版の中央を腹とする最も基本的な振動モードが63Hzバンドに存在することを示しています。別途実施した車両走行時の騒音測定の結果と比較することにより、このモードに対応する周波数の音が大きいことがわかりました。

予測手法の検証

以上のようにして調べた車輪・レール凹凸特性と車輪・レール・構造物の振動・音響特性の結果を用いて、まず転動音について、新幹線1区間、在来線3区間を対象に予測を行い、実測と比較しました。図8にその結果を示します。なお、転動音の評価は、空力音などの他の音源の影響が小さいレール近傍点で行いました(騒音レベルの数値が大きな値になっているのはそのため、沿線ではこれよりも数10dB小さくなります)。予測値と実測値の平均的なずれは1dB以内に収まっています。ばらつき

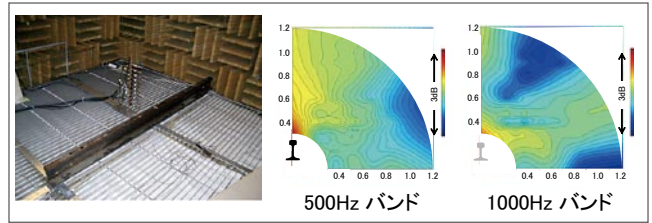


図6 軌道の衝撃加振試験と放射音特性

の標準偏差は在来線の方が新幹線に比べて大きいですが、その場合でも3dB程度です。図9は、レール近傍における在来線の転動音のスペクトルを予測し、実測と比較した結果です。予測値(全体音)と実測値のスペクトルは概ね一致しています。さらに、図9の予測結果では、車輪、レール、まくらぎの各音源別に内訳を示しています。この図から、250Hz以下の周波数域ではまくらぎ、500~1600Hzの周波数域ではレール、2500Hz以上の周波数域では車輪が、それぞれの主要な音源になっていることがわかります。このような情報を引き出せるようにすることが、予測手法開発の大きな目標の一つであり、得られた知見は騒音低減の方針を立てる上で大いに役立ちます。

次に、構造物音の予測を行い、実測と比較しました。構造物の振動・騒音は、構造物の各構成要素を梁、板などの単純な部材で表現したモデルに基づき予測します。図10に、スラブ軌道のコンクリート高架橋の場合の解析モデルを示します。図11は、図10のモデルを用いて床版近傍

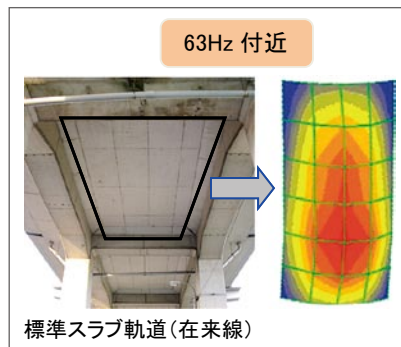


図7 コンクリート高架橋の衝撃加振試験と振動特性

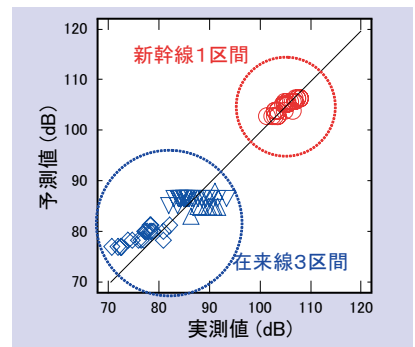


図8 転動音予測手法の検証

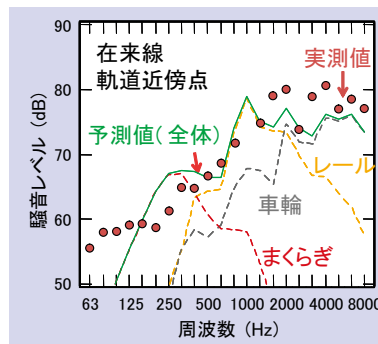


図9 転動音の音源別寄与度の推定

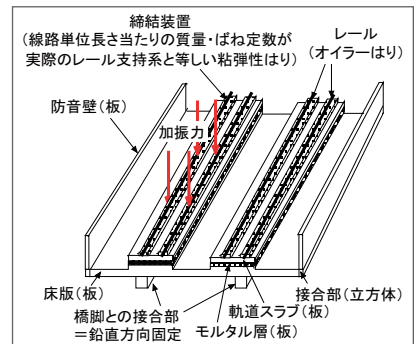


図10 構造物音予測モデル

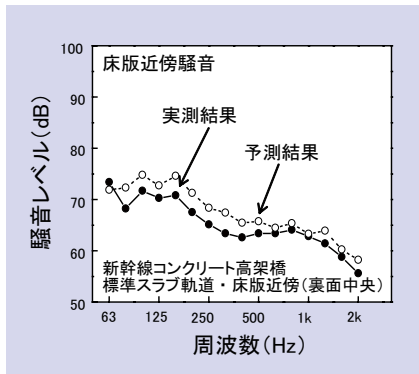


図 11 構造物音予測手法の検証

での構造物音を予測した結果と実測結果を比較したものです。2kHzの高周波域まで、両者がよく一致していることがわかります。

転動音・構造物音対策の低減効果の推定

転動音・構造物音を低減するには、大きく分けて①車輪・レール間および軌道・構造物間に作用する加振力の低減、②構成部材の振動の抑制、③放射音の遮蔽・吸収の3通りの方法があります。それぞれの方法を具体化するために、多くの対策が提案、実用化されていますが、ある対策は転動音、構造物音の両方に対して低減効果があり、別のある対策は一方に対してのみ効果があり、また別のある対策は一方は低減するが、もう一方の音はかえって増大するなど、効果の現われ方は様々です。そこで、今回開発した転動音・構造物音予測手法を用いて、種々の対策を実施した場合の転動音、構造物音の低減効果の推定を行いました。

図12に、代表的な5種類の対策について低減効果を推定した結果を示します。各対策の数値は、転動音、構造物音のそれぞれの音源パワーが、各対策を実施することによりどのように変化するかを相対dB値で表したものです。マイナスの場合、騒音が低減することを示し、プラスの場合は、逆に増大することを示します。ある指定された評価地点において、転動音と構造物音を合わせた全体の騒音が実際にどれだけ変化するかという点については、対策を行う前の状況、すなわち基準条件において、全体騒音に占める転動音と構造物音の割合がどうであったかという情報をあらかじめ与えておく必要があります(ここでは、空力音や車両機器音などの転動音・構造物音以外の寄与が無視できる場合を想定しています)。例えば、検討対象区間が盛土の場合、構造物音の寄与は非常に小さいので、転動音の欄に示した低減効果は、ほぼそのまま全体騒音の低減効果として現れます。また、対策前の基準条件において転動音と構造物音の割合が50%：50%となっている場合には、図12の転動音と構造物音の効果のdB平均(パワー平均)が全体騒音の低減効果となります。図12から、各対策の

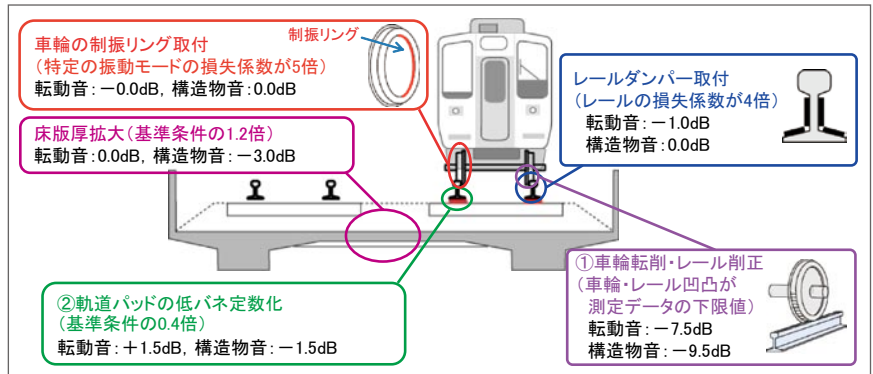


図 12 転動音・構造物音対策の低減効果の推定

効果について次のようなことがわかります。(1) レールダンパーの敷設等を行ってレールの損失係数を増大させると、加振点から離れた位置でのレール振動が抑制されて転動音は下がるが、構造物音は変化しない。(2) レール締結装置とまくらぎの間の軌道パッドのバネ剛性を下げると(低バネ定数化)、レールから構造物への振動の伝達が抑制されて構造物音が低減するが、逆に転動音は増加する。(3) 車輪転削、レール削正により凹凸を小さくすると、接触面における加振力が低減し、転動音、構造物音はともに下がる。(4) 制振リングを車輪に取り付けると、車輪の振動が抑制されて、転動音は下がる(構造物音には影響はない)。(5) コンクリート高架橋の床版を厚くすると、構造物の剛性が上がり、構造物音が下がる(転動音には影響はない)。

おわりに

今回の将来指向課題では、転動音と構造物音の二つの音を研究の対象として取り上げ、現象解明、予測手法の構築、低減対策の開発を行いました。従来、転動音と構造物音は、各部位別に、すなわち車輪、レール、構造物と、それぞれ別の研究室が個別に担当することが多く、仮にある対策が転動音低減効果があるということで提案された時に、その対策が構造物音にも同様の低減効果があるのか、あるいは逆に構造物音が大きくなってしまわないのか、というような懸念に対して、即座に定量的な数値を示して回答できないというようなことが起こりがちでした。今回は、それらの反省を踏まえ、転動音と構造物音の両方を同時に評価できるような統合的な予測手法の構築を目指しました。加振力の取り扱いなどで、一部、完全な統合化に至っていない部分も残っていますが、図12に示したように、各種対策が、転動音と構造物音のそれぞれにどれだけの低減効果をもたらすかということを定量的に評価できるようになりました。今後は、予測手法の精度向上を図るとともに、今回の将来指向課題では取り扱わなかった衝撃音やきしみ音についても予測できるように研究開発を進めていきたいと考えています。RRR