

# 在来線車輪の形状因子による振動騒音特性評価

笹倉 実\* 佐藤 潔\*

## Analytical Study on Vibration and Acoustic Characteristics of Railway Wheels with Different Shapes

Minoru SASAKURA Kiyoshi SATO

Rolling noises have become an important problem of narrow-gauge railway vehicles. The noises are composed of rail noise and wheel one. By the study about the wheel noise that we performed till now, we found that the wheel noise was radiated not only from the wheel web but also from the other parts. Therefore, we carried out a more detailed 3D-modal analysis for a purpose of inspecting the mode shapes obtained from FEM analysis and calculated the sound power from each part of the narrow-gauge wheels respectively by using 3D-BEM analysis. Furthermore, we calculated the change of an acoustic effect by the geometrical modification of the wheel shapes. As a result, we found that the wheel which added to the thickness of the rim had the lowest sound level among all the wheels.

キーワード：構造音場解析，3次元実験モード解析，車輪形状，車輪騒音，音響パワー，防音車輪

### 1. はじめに

鉄道車両から発生する騒音の主な要因の一つとして、レール・車輪系から発生する転動騒音があり、その低減対策が求められている。車輪の転動騒音は、1kHz～2kHzの周波数帯域、レールでは1kHz付近の帯域が大きくなる傾向を示し、特に在来線では車輪の騒音対策が重要となっている。転動騒音は図1の発生メカニズムが考えられている。レール頭頂面と車輪踏面には、ともに微小な凹凸が存在するため、車輪の回転により相互に加振力が発生する。これによりレールと車輪、さらに構造物を含めた振動が生じ、放射音を発生して転動騒音となる。このうち、車輪から発生する放射音は、板部から発生し、枕木方向への放射が中心となるとみられ、他の成分については無視できる程度と考えられてきた。しかしながら、従来の研究<sup>1)</sup>での車輪3次元構造音場解析(FEM+BEM解析)の結果から、それ以外の方向成分についても無視できない程度であることが推測できた。一方で、この解析のみならず、音響パワーの実験的解析でも枕木方向のほか、車輪上方及びレール方向にも値が大きくなる結果を得ており<sup>2)</sup>、車輪から発生する放射音の部位及び指向性をさらに詳しく求めることは、その低騒音化を進める上で重要であることが分かってきた。そこで、本報告は、各種在来線車輪について、3方向同時の振動モード解析を実施し、FEM振動解析の結果を実験的に検証すると

もに、構造音場解析により、車輪部位別音響パワー及び車輪形状因子の変更による放射音特性の試算を行い、車輪低騒音化のための基礎データを求めた。また、スラブ表面を模擬した剛体反射条件と音響パワー計算の影響に対する考察、防音車輪による振動特性の評価例についても、合わせて報告する。

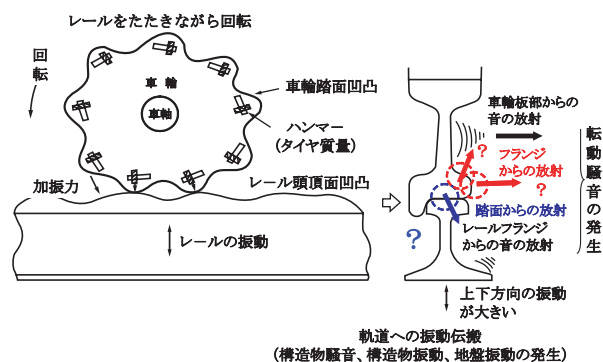


図1 レール・車輪振動の発生と転動騒音の発生メカニズム

#### 1.1 在来線車輪の形状

図2は代表的な在来線車輪の断面図である。C形と呼ばれる平板(ストレート)形状の車輪もあるが、踏面ブレーキによる連続した熱負荷を受けるため、熱応力低減と軽量化の目的で板部にオフセットを持つものが多い。また、車輪形状により板部の厚さとオフセットが異なっている。さらに板部形状によっては、波打車輪と波無し車輪とに分けられる。波打車輪は円周方向に60°周期の

\* 車両制御技術研究部(動力システム)

特集：環境技術

凹凸を持ち、板部が薄板で軽量化を達成している。近年はA形波打車輪を更に7%程度軽量化したNA形波打車輪が多く使用されている。波打車輪は新形式車両に多く用いられているが、NA形波打車輪の近傍騒音測定結果<sup>3)</sup>が示すように、1250Hz付近を中心に他の車輪と比較し、騒音レベルが高くなる場合がある。

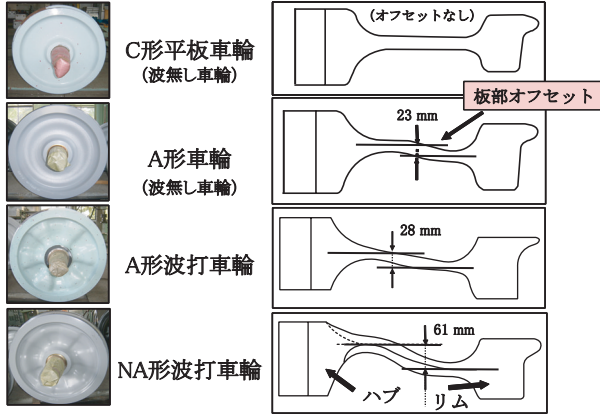


図2 在来線車輪の断面比較

2. 加振試験（3次元実験モード解析）の概要

軸付単体状態でレール上に定置した車輪に対し、動電型加振器（MB-Dynamics製MODAL-50）を用いてレールからの加振を想定した単位加振力を踏面部垂直方向（反フランジ側より約60mmの位置）に与えた（図3）。250Hz～5kHzのバンドランダム波で、加振力は20N（p-p）程度である。車輪の応答は、その表面速度をスキニング型非接触レーザー振動計（Polytec社製PSV-400-3D）を用いて測定した。測定点数は、車輪形状及び測定角度により異なるが450～570点である。この測定システムは、三角形となるように配置した3台のレーザードップラ振動計を用いて同一点を計測し、あらかじめ指定した3次元座標系の軸方向振動速度を測定する。図4に、その測定原理を示した。また、各振動計前面に設置されたガルバノミラーと測長レーザーユニットを用いることで振動計の位置を変更することなく複数の測定点をスキャンさせることが可能なため、非接触で広い範囲を効率よく測定することができる。このシステムを使用して非接触な状態で、板部（外軌側）、リム及び踏面部などの表面速度を実測するが、車軸の存在により視覚的に3台のセンサヘッドの焦点交差を行えない場合があるので、測定可能な範囲は、車輪の円周角で約200°と限られる。また、リム顎部及びボス近傍部などの曲率の大きな部位も、車輪表面へのレーザー入射角が浅くなり、電氣的ノイズ成分が大きくなることから、これらは、あらかじめ測定範囲より除いた。

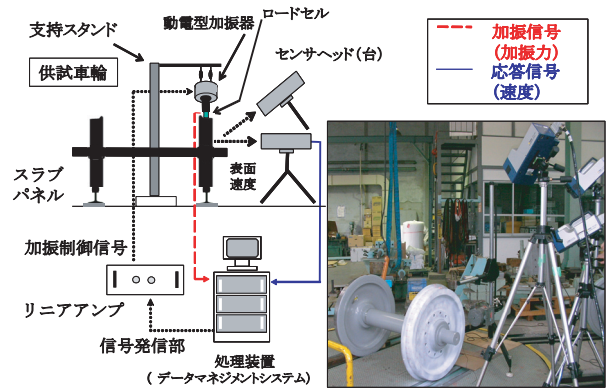


図3 車輪3次元実験モード解析

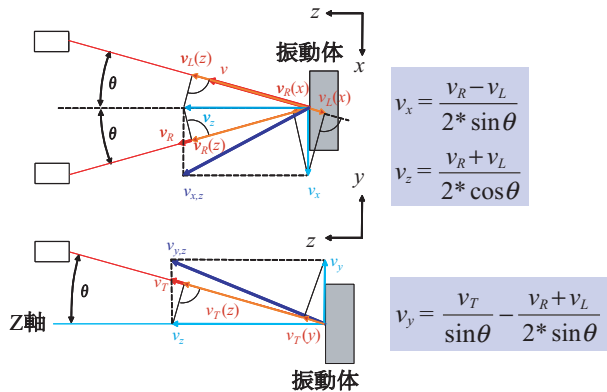


図4 3次元座標での軸方向速度成分への変換原理

3. 車輪からの音響放射解析

3.1 在来線車輪の部位別音響放射パワー

FEM振動解析で得られた車輪表面の構造振動を境界条件（音響放射条件）とし、音響解析プログラム（RAYON2006）を用いて構造音場解析を実施した。ここでは、計算によって求めた車輪表面の音圧と速度の積を、図5に示す車輪部位毎（リム、板部、踏面及びフランジ）に面積分することにより、個別の音響パワーを求め、音響放射特性を算出した。すべての車輪は、レール接触点（外軌側より約60mm）に対する半径方向への一定加振（1N）とし、加振周波数は転動騒音で主となる帯域（800Hz～4kHz程度）を考慮して、250Hz～5kHzとし、音響パワーを25Hz毎に求めた。車輪周囲は、基礎的な指向性をみるために自由空間条件とした。なお、後述の

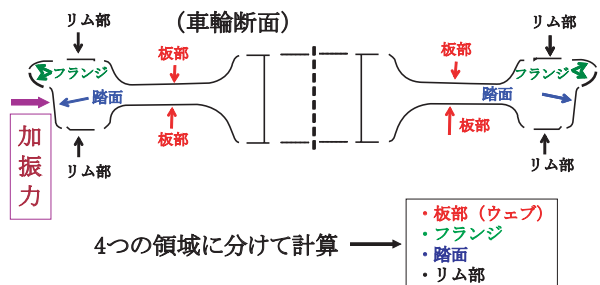


図5 車輪の音響パワー部位別の放射計算

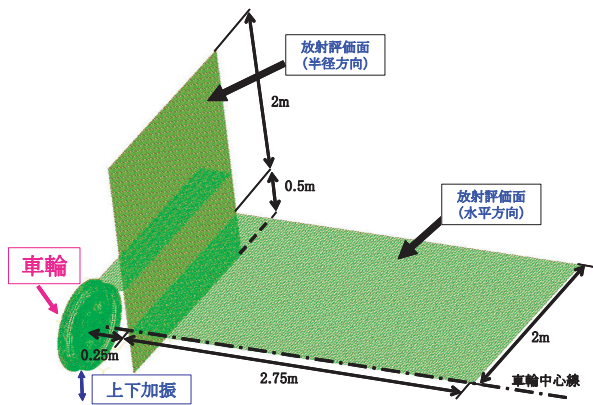


図6 車輪近傍での音圧評価モデル (BEM 解析)

図11及び図12で、車輪表面全体で放射した場合の車輪近傍における3次元音圧分布結果 (BEM 解析) を合わせて示すが、この空間条件 (メッシュ条件) を図6に示す。

3.2 車輪形状による音響特性の変化予測

車輪からの音響放射特性は、車輪の曲げ剛性に大きく影響され、形状因子として①板厚、②リム厚及び③板部のオフセットなどが考えられる。ここでは以下5タイプの形状モデルの解析 (図7) を行い、各々の全音響パワー及び図8に示す車輪音響放射の評価点音圧 (6点) の比

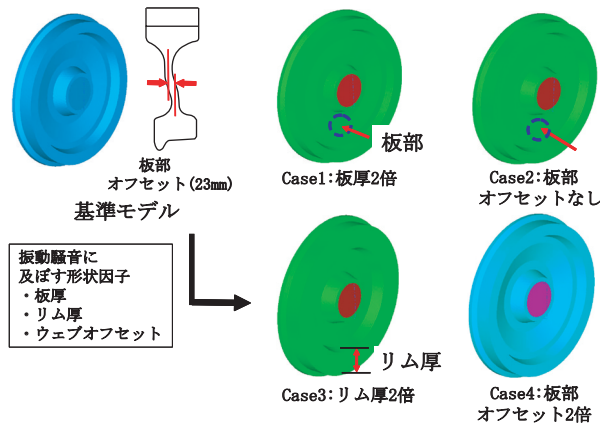


図7 車輪形状変更試算モデル

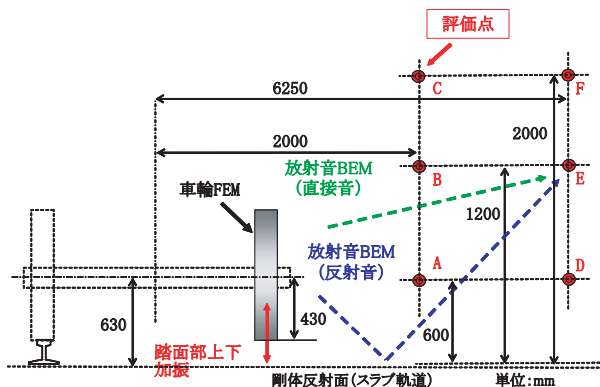


図8 剛体反射と車輪放射の評価点 (レールからの放射は除く)

較を行った。解析手法は3.1と同一とし、剛体反射の有無による影響も調べた。

- (1) A形車輪と同じ板部オフセット、板厚、リム厚のモデル (基準モデル)
- (2) 板厚が2倍のモデル (Case 1)
- (3) 板部オフセットが0のモデル (Case 2)
- (4) リム厚が2倍のモデル (Case 3)
- (5) 板部オフセットが2倍のモデル (Case 4)

4. 解析結果

4.1 在来線現状車輪の3次元振動と音響放射特性の関係

図9上図は、A形車輪の3次元実験モード解析の周波数応答関数 (FRF) であり、車輪表面上の測定全点での総平均の値である。下図はボス部を除く、車輪全周囲での音響パワー解析結果である。図10は同様にNA形波打車輪の結果である。2種の車輪の周波数応答関数は、Z方向 (枕木方向) の振動のほかに、X方向 (レール方向) とY方向 (上下方向) の値も大きなことが分かった。

4kHzまでの範囲ではA形車輪で7カ所、NA形波打車輪で5カ所程度の主要なピークが、実験モード解析と音響パワー解析で見られた。両者のピーク周波数のずれは、実車輪と解析モデルとの形状精度の影響によるものと思われる。NA形波打車輪の音響パワーは、A形車輪の値より大きい傾向にあり、周波数応答関数は1780Hzで特に大きくなる傾向がみられた。また、実験モード解析、FEM解析及びBEM解析の主要なピーク周波数での振動モードの比較を図11及び図12に示す。いずれも放射形状の節を持つ振動モードである。板部が面外 (枕木方向) 方向に振動するのみならず、リムが同時に面内 (半径方向) に大きく変形し、リムの挙動が放射上重要であることが分かった。この、放射形状の節をもつ振動モードは、筆者のこれまでの研究で、他の車輪でも音響パワーが大きくなる傾向を持つモードであることが分かっている<sup>2)</sup>。

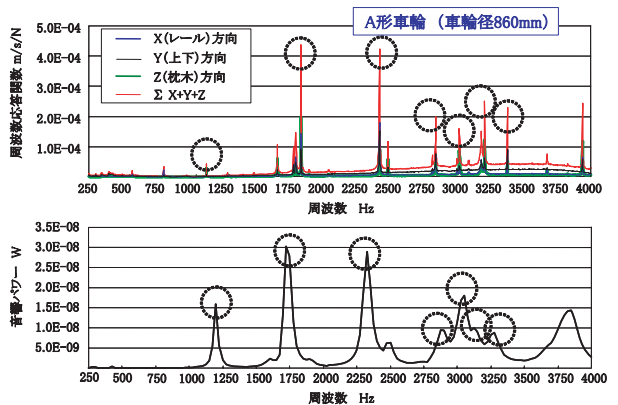


図9 3次元振動試験結果 (上) と BEM による音響解析 (下) (A 形車輪)

特集：環境技術

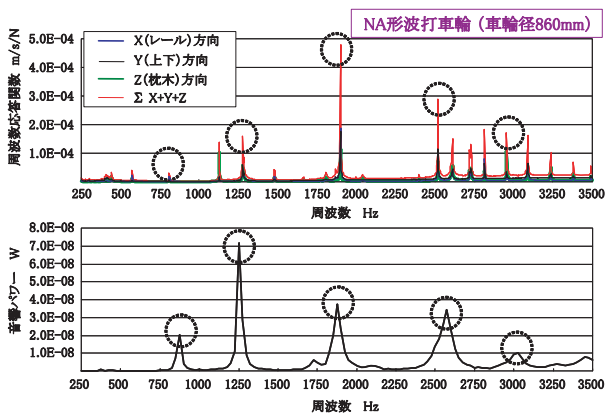


図10 3次元振動試験結果(上)とBEMによる音響解析(下)(NA形波打車輪)

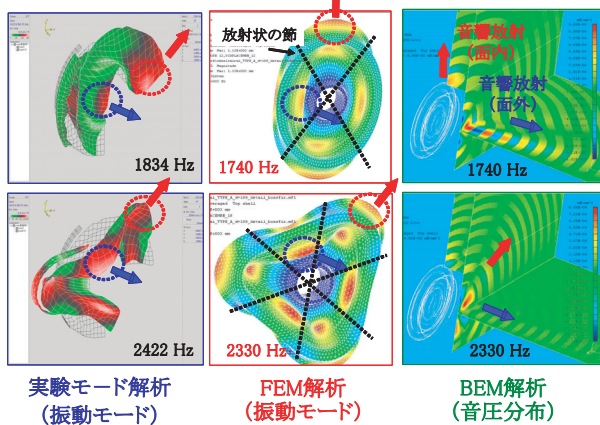


図11 主なピークでの振動モードと音響放射(A形車輪)

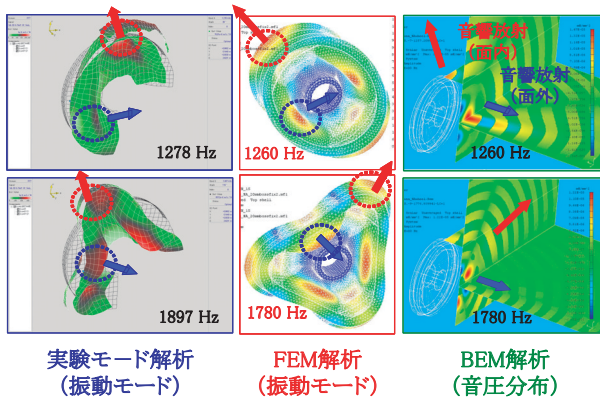


図12 主なピークでの振動モードと音響放射(NA形波打車輪)

4.2 在来線現状車輪の各部からの音響放射特性

図13～15にNA形波打車輪, A形車輪及びC形平板車輪の部位別音響パワーの解析結果を示す。各上図は車輪部位別の音響パワーの値であり, 各下図は, 百分率で整理したものである。各車輪ともに板部からの放射が最も大きくなるが, 形状によって割合が大きく異なる。板部オフセットが大きいNA形波打車輪やA形車輪では全放射パワーに占める板部放射の割合が約80%となるが,

C形平板車輪では約50%程度と相対的に小さくなり, 3kHz以上の高周波域では, 踏面部からの放射割合がもっとも大きくなる傾向も見られた。また, 各車輪の音響パワーのピーク値近傍では踏面からの放射割合が大きくなる場合もあり, 板部のみならず踏面からの放射も無視できないことが分かった。

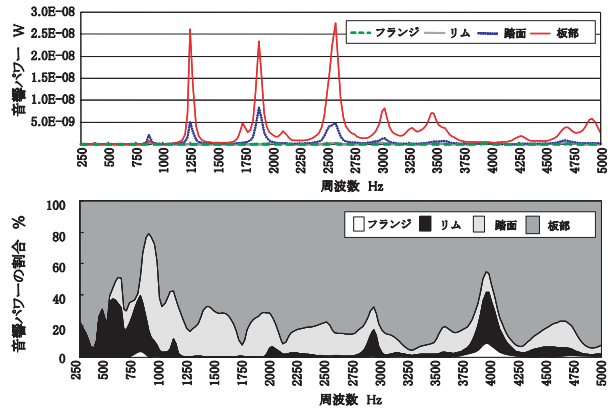


図13 NA形波打車輪の音響パワー放射分布

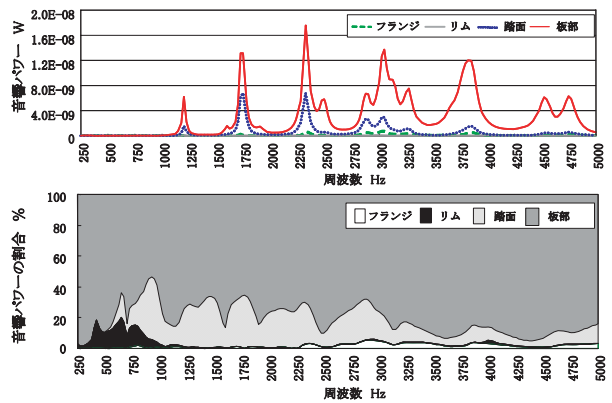


図14 A形車輪の音響パワー放射分布

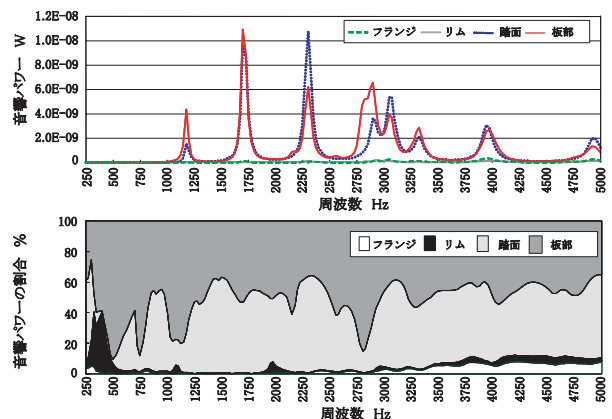


図15 C形平板車輪の音響パワー放射分布

4.3 形状因子変更による音響パワーと評価点音圧変化

図16は基準モデル及びCase1～4の音響パワーを比較したものである。オフセットが大きい例(Case4)では, 2.5kHz以下のピーク周波数は, 基準モデルと比較すると, 低い方へ移動し, 音響パワーの値も大きくなる場合

が多い。オフセットが0のCase2と基準モデルの比較では逆の傾向を示した。板厚が大きくなるCase1及びリム厚が大きくなるCase3の音響パワーはともに小さくなるが、Case3の低下は特に大きく、5kHzまでのパワー平均値で比較すると5種の車輪の中で最も小さくなる結果を示した。図17は、図8に示す評価点での車輪放射音の音圧値であり、上図は剛体反射なし、下図は車軸中心より630mm（車輪半径+60kgレールの高さ+底部隙間に相当）下にスラブ面を想定した剛体反射条件を仮定した場合である。Lは軌道中心からの水平距離であり、Hは剛体からの高さである。位置別ではL=2m（近傍点）でのH=1.2m及びH=0.6mでの音圧が最も大きい。L=2mでは、剛体反射の有無による音圧差は少なく1~2dB程度であるが、L=6.25mでは、剛体反射がある場合は音圧は5dB以上高くなる場合も見られた。これはL=2mでは反射音の影響は少なく、直接音が支配的であるが、離れた位置（L=6.25m）では、反射音の影響を受けていることが考えられる。車輪形状別に音圧を比較すると、概ね図16の音響パワー平均値の順位と同様な傾向にあり、Case3が最も低く、Case2、Case1の順に大きくなるが、評価点により順位が逆転する場合も見られた。

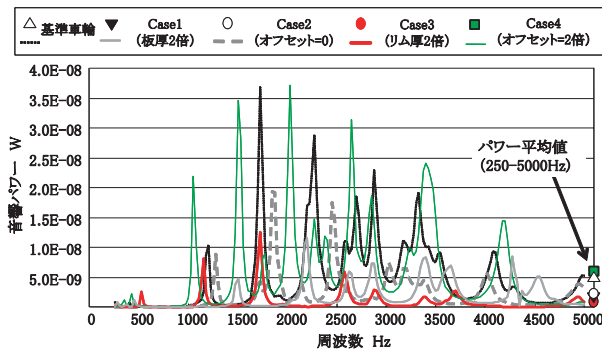


図 16 車輪形状変更による音響パワーの予測

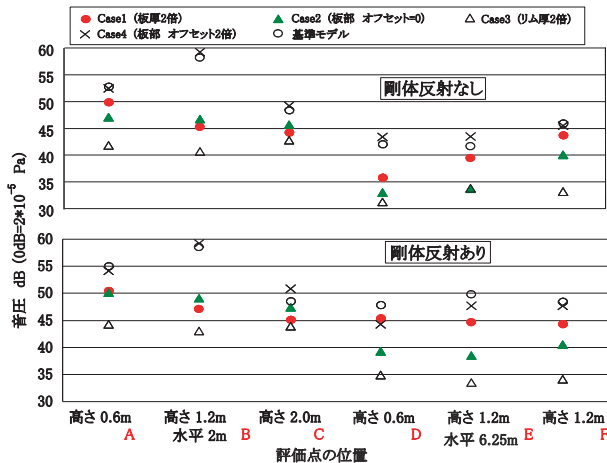


図 17 各車輪の評価点での音響放射特性（音圧平均値）

#### 4.4 剛体反射条件と音響パワー計算値への影響

転動騒音は車輪のほか、レールからの音響放射も含まれる。スラブ軌道及びPC枕木軌道は、レール底部に軌道パッドが挿入されており、この厚みによりレール底部と剛体面とに約30mm程度の隙間が存在する。レールは底部及びフランジ部からの放射が特に大きいとみられ<sup>4)~6)</sup>、その近傍に存在する剛体反射の影響も大きくなるのが考えられる。ここではレール底部隙間を変化させた場合の、A形車輪及び60kgレール（レール長10m）各々の音響パワーの変化について、基礎的な検討を行った結果を述べる。加振条件は各々一定加振（1N）とし、隙間条件は、現状より少なくした場合（隙間10mm）から10mm刻みで増加させ、車輪単体の場合は60mmまで、レール単体の場合は50mmまで求めた。図18は車輪の場合、図19はレールの場合（レール先端より5m付近の締結部中間加振）の音響パワーの変化である。車輪の場合は1750Hzでわずかに変化が見られる程度で音響パワーへの隙間影響は少ない。しかしながら、レールの場合には、上下曲げ振動モードを持つ525Hzや、1025Hzなどで音響パワーの値が変化し、特に1025Hzでは、隙間10mmの場合に急激に大きくなる傾向を示した。これは、レール底部が剛体面に近いために反射波の影響が大きく、レール表面の音圧、速度の計算値が大きく変化するため、音響パワーの値も変化すると考えられる。

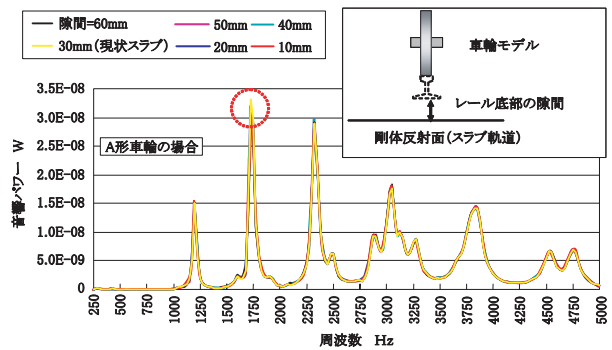


図 18 車輪と剛体反射面の距離と音響パワーの変化

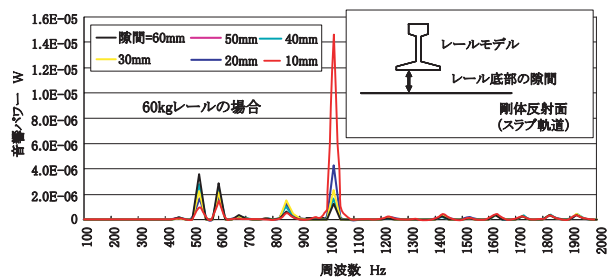


図 19 レール底部と剛体反射面の距離と音響パワーの変化

特集：環境技術

5. 防音車輪による振動解析事例

図20は防音車輪と呼ばれ、転動騒音より周波数の高い領域で発生する、きしみ音(2kHz～)の低減対策を目的に本来開発されたものであるが、転動騒音の周波数領域を含めて低減効果の有無を加振試験により調べた。この車輪は、リム頸部に設けた凹形の溝に金属製のリングを挿入して、リムとリングとの摩擦運動による減衰により、振動を抑制する効果を持っている。リングはゴムにより周囲を覆われて位置保持されているため、視覚的には見えない。本章では、2章と同様な定置試験により、従来車輪(A形車輪)と周波数応答関数(枕木方向のみ)の比較を行った事例を紹介する。なお、供試車輪は、営業車両の使用発生品であるため、新品に比較しリム厚が薄くなっており、車輪径は815mmと減少している。リム厚は車輪の振動及び騒音特性に大きく影響するため、従来車輪は新品車輪(車輪径860mm)及び摩耗限度車輪(車輪径780mm)の2種で比較した。防音車輪のピークの数及び高さは従来車輪に比較して減少しており、摩耗限度車輪との差は顕著であることも分かった(図21)。

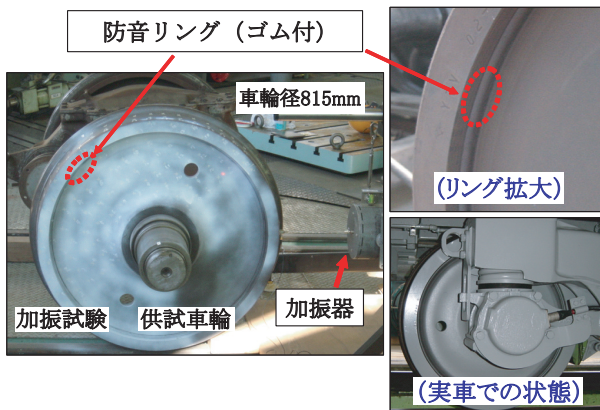


図20 防音車輪と定置加振試験

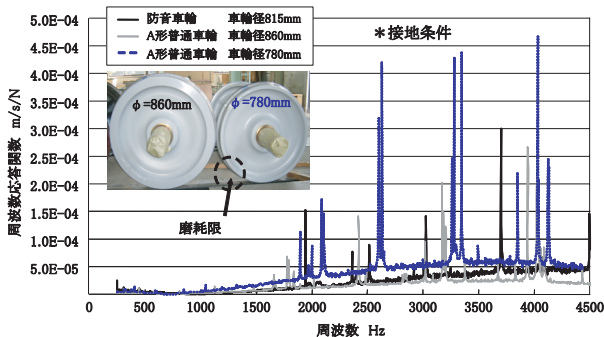


図21 防音車輪と普通車輪の周波数応答関数の違い(リム厚の比較を含む)

6. まとめ

車輪の構造音場解析により、以下の特性と、解析上の

傾向を明らかにした。

- (1) 車輪の音響パワーは、板部からの放射が最も大きく、オフセットの大きなNA形波打車輪などでは80%程度であるが、C形車輪では50%程度と小さくなり、踏面からの放射割合が大きくなる場合がある。
- (2) 車輪形状因子別の音響パワー比較では、リム厚を厚くした場合に最も小さくなる結果を示した。
- (3) 車輪放射音の評価点音圧は、剛体反射条件がある場合は、軌道中心からL=6.25mでは音圧が大きくなる。
- (4) レール底部隙間の大きさにより、レール音響パワーの値が大きく変化する場合があるが、車輪音響パワーはほとんど変化しなく、隙間影響は少ない。

7. 今後の課題

本報告では、車輪形状別の音響放射特性の定性的な比較を行うために、一定力加振レベルでの基礎解析結果について述べた。今後は、より実用的な解析のため、以下の課題を検討する。

- (1) 車輪質量と音響パワー低減量の最適化
- (2) 軌道と車輪間の加振力に対するモデル検討
- (3) 軌道凹凸成分の統計的分布と車輪音響パワーとの定量的評価
- (4) スラブ軌道とバラスト軌道の違いなど軌道種別毎の反射特性の解析

文献

- 1) 笹倉他：在来線車輪の形状変化による音響放射特性，Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM論文集，日本機械学会(2005)
- 2) 笹倉他：鉄道車輪形状と騒音放射特性の解明，Dynamics and Design Conference 2004 CD-ROM論文集，日本機械学会(2004)
- 3) 善田他：転動音に及ぼすレール・車輪凹凸と車輪形状の影響，鉄道総研報告，Vol.18, No.11, 2004.11
- 4) 笹倉他：構造音場解析による転動騒音の定性的評価，Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM論文集，日本機械学会(2006)
- 5) 遠藤他：境界要素法によるレールの放射音特性の解析，機械学会論文集(C編)，Vol.65, No.638, pp.104-109(1999)
- 6) 遠藤他：高速鉄道の転動音低減のためのレール断面形状の検討，機械学会論文集(C編)，Vol.67, No.661, pp.189-196(2001)