

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 在来線の車輪形状と振動騒音特性を評価する

実験モード解析や構造／音場解析などを用いて、在来線の車輪の振動・騒音特性の可視化や転動騒音の低減を目的とした車輪の形状変更の解析を行った事例、防音リング車輪の振動特性を評価した事例を紹介します。



**笹倉 実**  
Minoru Sasakura  
車両制御技術研究部  
動力システム研究室  
主任研究員  
[専門分野] 台車系振動・騒音解析



**佐藤 潔**  
Kiyoshi Sato  
総務部  
計量管理課長  
[専門分野] 台車系振動・騒音解析

## 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、レールや車輪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ます。レールと車輪の接触面には、ともに微小な凹凸が存在するため、走行時の車輪回転により相互に加振力が発生します。これは図1のように車輪をハンマーでたたきながら回転するようなイメージになります。この加振力により、レールフランジや車輪板部などに振動が生じ、周囲の空気を振動させて音として放射する現象が転動騒音のメカニズムです。

転動騒音の低減には、レール頭頂面の削正が有効な対策方法としてこれまで進められてきましたが、車輪側での

対策も進める必要があります。ここでは、在来線を対象に転動騒音に関係する車輪の振動・騒音特性の可視化技術や低減方策の一例を紹介します。

なお新幹線の車輪は、後述するC形平板車輪のようにオフセットがないことや、車輪板部の両側にあるブレーキディスクにより車輪から発生する騒音をある程度遮蔽する効果があるため、車輪側から放射する転動騒音は相対的に低くなると考えられています。一方、様々な車輪形状をもつ在来線の場合は、車輪側の対策が重要になることがあります。

## 様々な在来線車輪形状

図2は代表的な在来線の車輪形状と

その断面です。C形平板車輪は板部が平板（ストレート）形状です。在来線では車輪外周のレールと接触する部分の踏面と呼ばれる部位にブレーキを直接

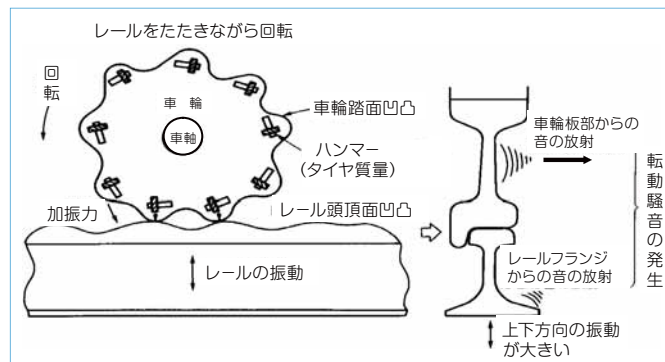


図1 転動騒音のメカニズム

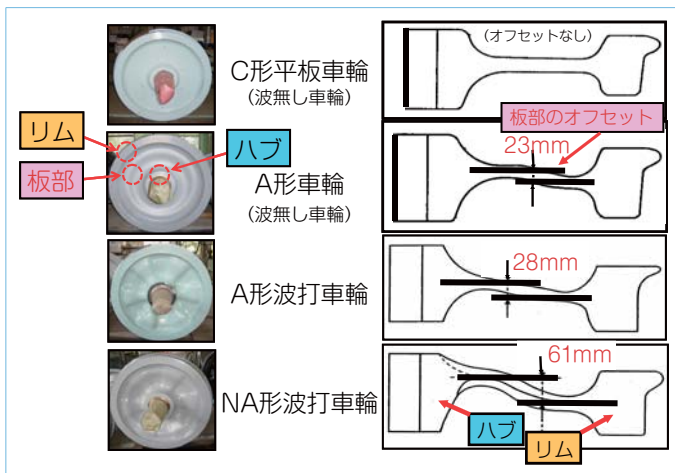


図2 在来線車輪形状と、その断面

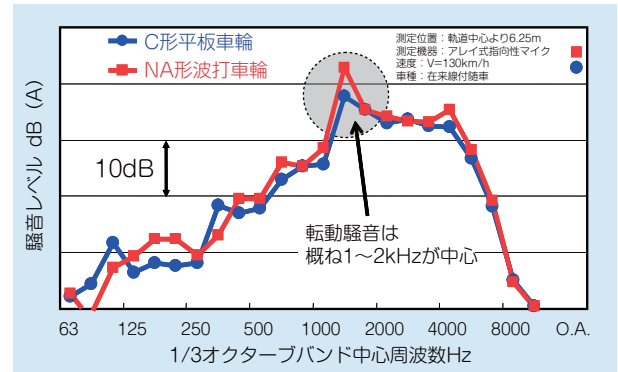


図3 走行時の床下騒音

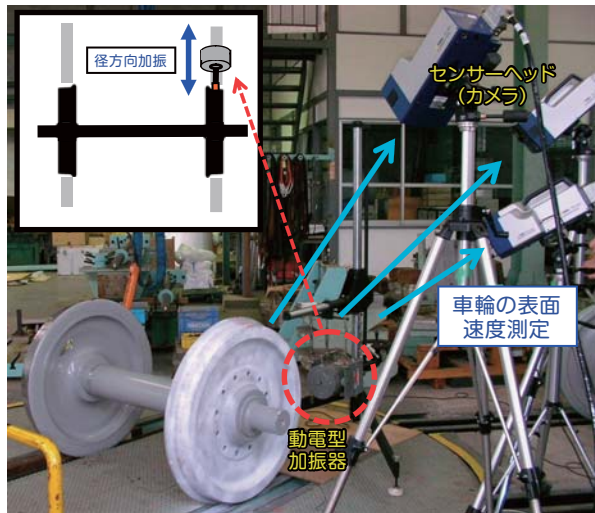


図4 車輪の実験モード解析

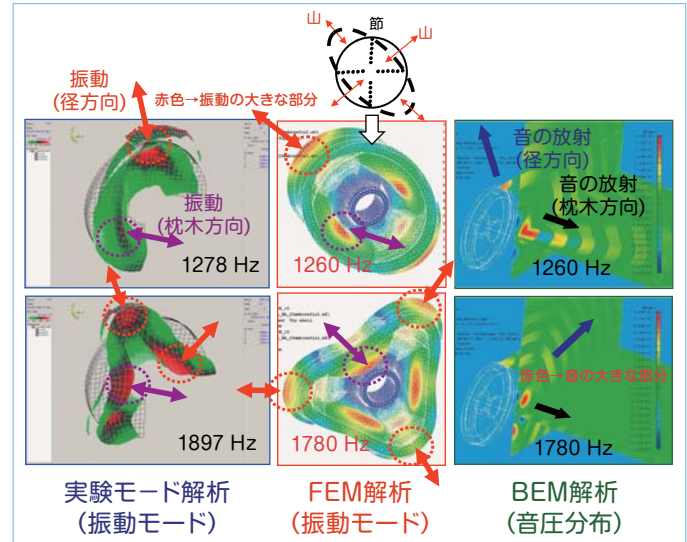


図5 車輪の振動モードと音の放射の可視化 (NA形波打車輪の例)

作用する車両があり、特に長い勾配を下るときには、この部分に連続した熱負荷を受けます。この熱応力の低減、さらに車輪軽量化のために板部にオフセットを持つ断面の車輪があります。A形車輪は、ハブとリムの間に23mmのオフセットを持ちます。また、板部円周方向に60°周期の凹凸形状を持つ波打車輪と呼ぶ車輪もあります。凹凸により板部の剛性を高くすることができ、その分板厚を薄くし、軽量化が可能となるので、近年の新形式車両で多く用いられています。NA形波打車輪は、A形波打車輪の改良型で更に7%程度軽量化され、板部のオフセットも大きくなっています。

図3は、アレイ式指向性マイクロホン(参照)による軌道中心から6.25m離れでの付随車床下騒音の測定データ

です。このうち、1~2kHz付近のピークが転動騒音の成分になります。

### 車輪の振動・騒音特性の可視化技術

車輪が振動した場合の変形(振動モード)の様子や音の放射はどのようになるのでしょうか。実験的に求める方法として、実験モード解析があります。数値シミュレーションで求める方法では、車輪の振動解析を有限要素法(FEM)で行い、これより得られた車

#### アレイ式指向性マイクロホン

複数の無指向性マイクロホンを直列に並べ、各マイクロホンの出力を同相で加えることにより鋭い指向性を得ることが出来る装置のことです。車両の音源分離に用いられます。超指向性マイクロホンと呼ばれることもあります。

輪表面の振動を境界条件として、周囲の音場(音圧分布や音響パワー)を境界要素法(BEM)により解く技術があります。このFEMとBEMを組み合わせた手法を、構造/音場解析と呼ぶ場合もあります。

図4は、車輪の実験モード解析の試験状況です。レール側からの加振を模擬するため、動電型加振器により車輪の踏面を径方向に加振します。3台のセンサーヘッド(カメラ)で車輪表面速度を非接触で同時計測し、モード処理を行うことで実験的に車輪の振動応答特性と振動モードを3次元で算出します。

実験モード解析により得られたNA形波打車輪の代表的な振動モードを図5の左に、FEMによる振動モードを中央に、BEMによる音圧分布を右

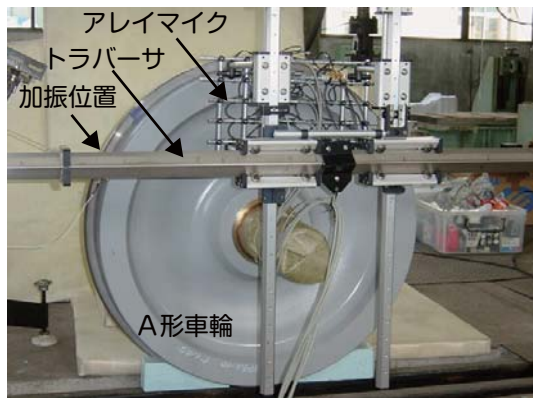


図6 STSF法による車輪放射音測定例

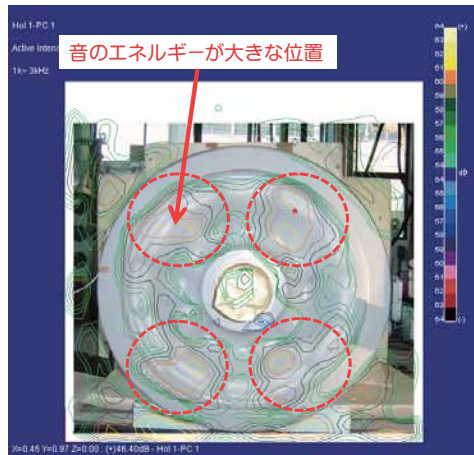


図7 STSF法による車輪近傍の音響測定 (NA形波打車輪1.272kHz)

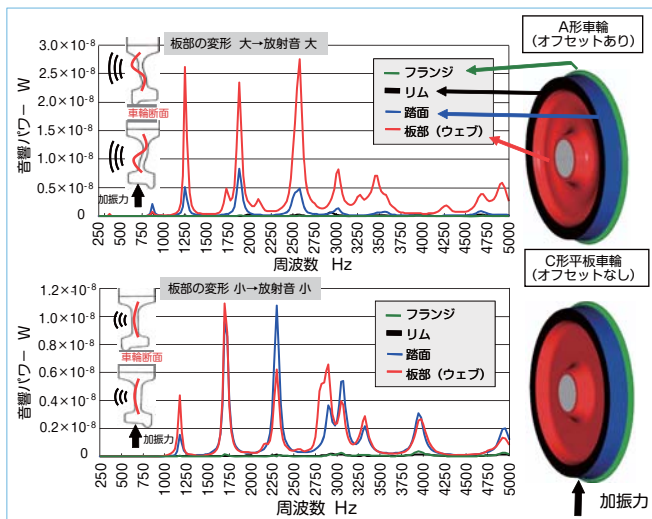


図8 車輪形状と各部の音響パワー

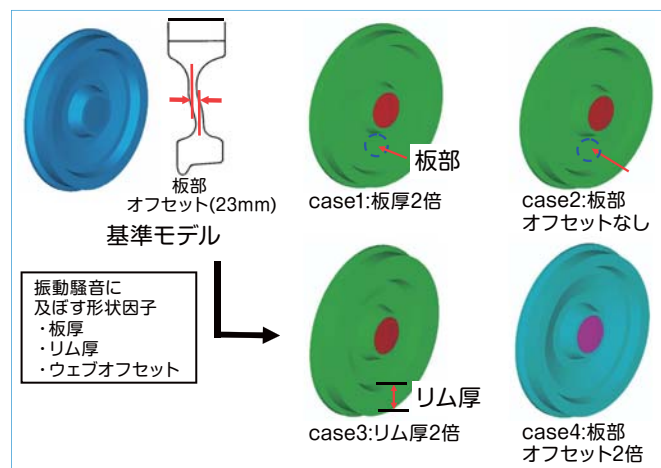


図9 車輪形状変更モデル

に示します。1.2kHz付近では、板部とリムに振動の4つの山(振幅が大きく生じる箇所)を生じ、まくらぎ方向のみならず、径方向にも大きく変形する様子がわかります。また、その振動モードにあわせるような強弱を持つ音響モードにあわせるような強弱を持つ音響モードに音圧分布が生じ、まくらぎ方向や径方向に音が放射されていることがわかります。1.8kHz付近では、板部の山谷の数は6つとなる振動モードになります。周波数が高くなるにつれて振動の山の数は増加します。

また、これらの解析とは別に、車輪周辺の近距離音場を実験的に可視化する技術として音響ホログラフィ法(STSF)もあります(図6)。STSF法では、車輪の周辺に格子点状に複数のアレイマイクを配置し、測定毎に位置

を移動するスキャンング測定を行います。車輪の側面から放射する音圧を実測し、近距離場音響ホログラフィの計算原理を適用して、音響インテンシティ分布(音の強さ)として計算します<sup>1)</sup>。図7にSTSF測定エリアと、そのエリアでの測定結果の一例を示しますが、図5の1.2kHz付近の分布と良く一致していることがわかります。

### 車輪形状と振動騒音特性

車輪の振動騒音特性は、車輪の剛性に大きく影響されると考えられます。車輪の剛性に関する形状因子として、

- ①板部の厚み
- ②リムの厚み
- ③板部のオフセット

などが考えられます。

図8は、車輪径方向へ基準力(1N)で加振した場合に、板部オフセットのあるA形車輪と、オフセットのないC形平板車輪の各部位から放射される音響パワーと呼ばれる音のエネルギー量を構造/音場解析のシミュレーションにより相対比較した例です。A形車輪はオフセットがあるため板部の剛性が低く、レール側からの加振を受けた場合に板部の変形は大きくなります。一方、C形平板車輪はオフセットがなく板部の剛性が高いので、板部の変形は小さくなります。車輪表面を4つの領域(フランジ、リム、踏面および板部)に分けて計算した場合、A形車輪で赤色部分の板部からの音の放射が最も大きくなり、車輪表面全体に占める放射割合は約80%となりました。C形平板

表1 車輪形状変更と音響パワーの比較

車輪形状	音響パワーの平均値 WdB (250-5kHz)	現状車輪との差 WdB
現状車輪 (A形)	59.6	
(1)板厚2倍	53.3	-6.3
(2)オフセットなし	56.0	-3.6
(3)リム厚2倍	51.7	-7.9
(4)オフセット2倍	60.2	0.6

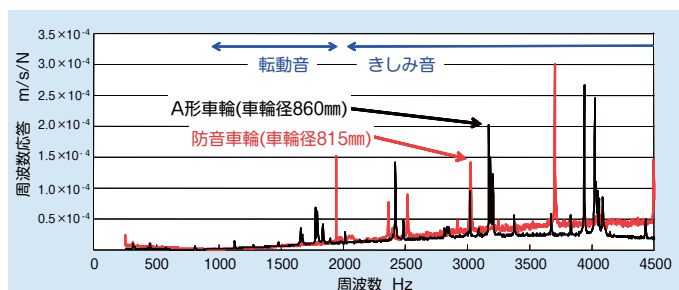


図11 防音車輪と普通車輪の周波数応答の違い

車輪では、板部からの音の放射割合は相対的に低く約50%となり、車輪全体での音響パワーも小さくなる傾向を示しました。領域別に音響放射を評価するには、実験的に分離することが難しいため、このようなシミュレーションで推定することになります。

### 車輪の形状変更により騒音を低下させる方策

構造/音場解析により車輪各部の形状を変化させた場合の音響パワーの変化を試算するモデルを図9に示します。ここではA形車輪と同じ板部オフセット、板厚、リム厚をもつ車輪を基準車輪として4つのケースを試算しました。  
 (CASE1) 板厚を2倍にする  
 (CASE2) 板部オフセットを0にする  
 (CASE3) リム厚を2倍にする  
 (CASE4) オフセットを2倍にする

表1は、各ケースの5kHzまでの音響パワーの平均値です。オフセットを2倍にすると板部の剛性が低下し、音響パワーは大きくなりますが、その他のケースでは小さくなる傾向になりました。最も低下したのは、リム厚を2倍にした場合で、次に低下したのは板厚を2倍にした場合です。これはリム

厚が増し剛性が大きくなることで、径方向の変形を拘束することになり、同時に板部の変形も押さえられて、そこから音の放射が減少できると考えられます。但し、リム厚が増加した分、車輪の質量が大きくなるので、車輪がレールを加振する力は大きくなり、レール側からの放射音が大きくなる可能性がありますので、リム厚の増加は限界があると考えられます。

### 防音リングにより車輪の振動を減少させる方策

車輪形状を変えることなく、振動対策を行う方法を紹介します。車輪のリムや板部にゴムをはさんだ弾性車輪と呼ばれるものもありますが、図10は防音リング車輪と呼ばれるもので、ゴムではなく、リムの顎の部分に設けた凹形の溝に金属製のリングが挿入されている車輪です。走行時に車輪が振動するときのリムとリングとの摩擦によるエネルギー散逸効果で、リムの振動を抑制するものです。図10右上の拡大写真の部分にリングが挿入されていますが、ゴムにより周囲を覆われて保持されているため、直接は見えません。防音リング車輪は、近年大手私鉄の車

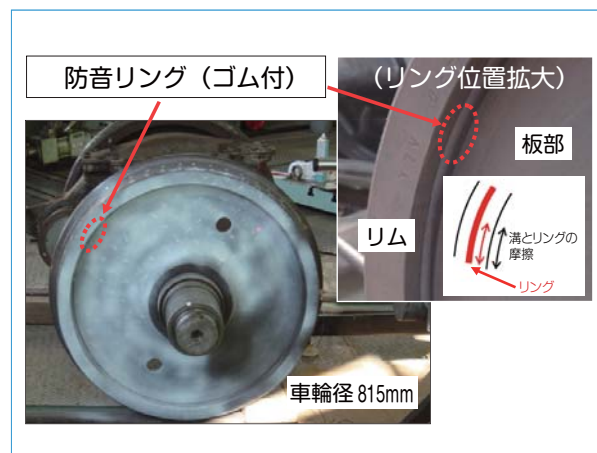


図10 防音リング車輪

両で普及しつつあります。

この車輪を用いて加振試験を行い、振動特性を詳しく調査した結果を図11に示します。周波数応答(単位加振力あたりの振動速度応答を周波数に対してプロットしたもので、周波数ごとの振動の出やすさを表す)を見ますと、A形車輪に比較して、振動ピーク数は減少しています。本来、転動騒音より周波数の高い領域で発生するきしみ音(2kHz～)の低減を目的に開発された車輪ですが、1～1.9kHzではピークが小さく、きしみ音の周波数領域だけでなく、転動音の周波数領域(1～2kHz)でも振動低減効果のあることがわかりました。

### おわりに

これらの解析手法は、走行試験では解明できない詳細な現象を明らかにしたり、低減予測を行う有効な方法です。今後は軌道と車輪間の加振力に対する総合的な評価とともに、車輪質量と音響パワー低減量の最適化が大切な課題と考えております。[RRR]

### 文献

- 1) 佐藤潔, ほか: 板部形状の異なる車輪の音響特性, 鉄道総研報告, vol.19, No.5, 2005