

## 低騒音車輪形状の検討

上妻 雄一\* 長倉 清 北川 敏樹 (鉄道総研)

## Study on the design of a low-noise railway wheel shape

Yuichi Kozuma\*, Kiyoshi Nagakura, Toshiki Kitagawa (Railway Technical Research Institute)

The development and implementation of low noise wheel and rail design are necessary for the reduction of rolling noise and total wayside noise. In this study, focusing on the wheel web shape, both numerical analysis and scale model testing have been carried out to seek the low-noise wheel shape. The results showed that the modification of the wheel web shape will lead up to 3dB reduction in wheel radiation.

キーワード：転動音，車輪，固有振動数，有限要素法，境界要素法，模型実験，衝撃加振試験

(Rolling noise, Railway wheel, Natural frequency, Finite element method, Boundary element method, Scale model testing, Impact testing)

## 1. はじめに

著者らはこれまでの在来鉄道用車輪放射音に関する研究<sup>(1)</sup>において、車輪を構成する形状因子が車輪の振動特性（固有振動数）に対して及ぼす影響を明らかにした。今後は、さらに具体的な転動音対策の開発の一環として、低騒音車輪を設計・製作の検討を進めることが必要である。

ここでは、車輪の基本諸元（質量，材質，リム部・ボス部形状）を変更することなく、車輪板部の形状を変更し、車輪の振動特性または放射音特性を改善することで、転動音に占める車輪放射音の寄与を小さくすることを目的とした検討を行ったのでその結果を報告する。具体的には、有限要素法による振動解析と境界要素法による音響解析を行い、解析結果が良好なモデルについて縮尺模型を用いた衝撃加振試験を行い、騒音低減効果を確認した。

## 2. 数値計算による検討

〈2.1〉 数値計算の前提条件と車輪モデル これまでの研究<sup>(1)</sup>では、車輪の板部形状が車輪の固有振動数に対して与える影響を整理し、板部形状を工夫することによって車輪の固有振動数が高まることが明らかになり、車輪放射音を低減する可能性を検討した。また、Thompson ら<sup>(2)</sup>、Nielsen ら<sup>(3)</sup>によれば、(a)車輪板部の放射面積が大きいこと、(b)実車の車輪放射音に寄与する面内振動モードと1節円面外振動モードの車輪板部による振動寄与が大きいことから、車輪板部の形状が車輪放射音の重要因子であるとしている。さらに、車輪の形状を変更する場合に、実用的な面も考慮すると、リム部やボス部の形状および車輪径等の

車輪の基本性能を変更することは難しい。したがって、振動・音響的に最適な車輪形状の設計に関しては、車輪板部に着目して進めるのが有効であると考えられる。

車輪モデルの板部形状を変更するためには、実形状そのものを用いてモデル化を進めることはあまり効率的ではない。そこで、実車輪の形状を簡略化したモデルを作成し、実車輪との振動特性に関する整合性を検証した。



(a) 在来鉄道用 C 形平板車輪 (b) 簡略化車輪  
図1 車輪断面形状

その結果、①車輪の基本条件（断面積，外径，板部板厚）に関する変更はなく、②板部両端の曲線形状は、1段以上のステップ形状に置換し、③フランジ部は三角形を有する車輪モデル（図1(b)）を用いた場合に実車輪の振動特性（固有振動数）とほぼ同等になることが明らかになった。

車輪の板部形状の検討の目的は、車輪の基本諸元（質量，材質，リム部・ボス部形状）を変更することなく、車輪の振動特性または放射音特性を改善することである。ただし今回の研究では、車輪強度・熱応力などの問題は、パラメータからは除外し、実用段階において検討することとした。

検討にあたって基準対象とした車輪は、在来鉄道用 C 形平板車輪である。

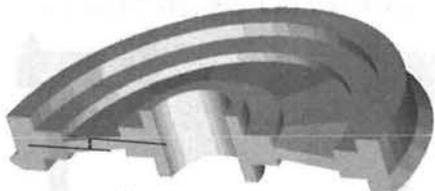
以上により、今回の振動・音響解析では、車輪板部における径方向および周方向の断面形状に関するパラメータから車輪放射音の整理を行った。解析を行った形状因子パラメータは以下の通りである。

- ① 板部の径方向断面内湾曲形状の振幅 (10mm~60mm) および凹凸数 (1~3)
- ② リム・ボス部間の車軸方向オフセット (10mm~40mm)
- ③ 板部の周方向断面内波打形状の振幅 (20mm~60mm) および凹凸数 (2~11)
- ④ 板部のスポーク形状のスポーク本数 (3~11)

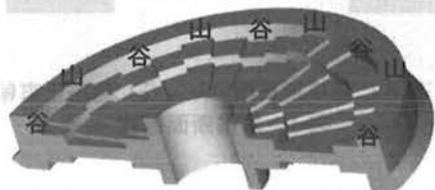
車輪モデルに含まれる板部断面形状の凹凸は正弦波で表した。スポーク車輪については、スポーク部と開口部の面積比を 1:1 とした上で、基準車輪に対して質量が同一となるよう、スポーク部の板厚を 2 倍とした。以上の解析対象モデルのうち、代表的な例を図 2 に示す。



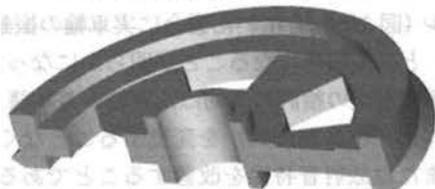
径方向凹凸数1, 凹凸振幅10mm  
(a) 径方向断面内湾曲形状



オフセット20mm  
(b) 車軸方向オフセット形状



周方向凹凸数9, 凹凸振幅20mm  
(c) 周方向断面内波打形状



周方向スポーク本数5本  
(d) スポーク車輪

図 2 数値計算による車輪形状検討モデルの例

にもステップ形状とした上で、周方向正弦波形状を表現するために、要素配置を適宜調整した。

(2.2) 解析方法 解析に用いたソルバーは、NASTRAN (振動解析 FEM) と SYSNOISE (音響解析 BEM) である。NASTRAN では車輪モデルの振動モード解析と周波数応答評価を行い、得られた結果を基に SYSNOISE で音響解析を行った。この手順で行った解析では、車輪がもつ固有振動数と変位を求め、計算された振動特性 (固有振動数における振動を含めた) から振動・音響解析を行っている。また、周波数振動応答解析を行うにあたり、振動モードに係わる損失係数は  $10^{-3}$  とした<sup>(2)</sup>。

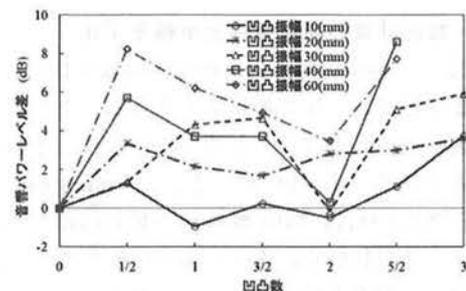
NASTRAN, SYSNOISE によって計算された結果は、車輪径方向に 1N の 1 点集中荷重が作用した場合の結果に対応する。したがって、解析対象の車輪がレール上を実際に走行した条件に近い状態にある放射音に対して評価を進めるためには、加振力を明らかにすることが必要である。そこで、欧州で開発された転動音予測法 (TWINS モデル)<sup>(4)</sup> を用いて車輪・レールの凹凸分布、振動特性から加振力を算出し、この加振力を音響解析結果に作用させることによって実条件に近い放射音評価を行うことを試みた<sup>(5)</sup>。加振力の算出条件を以下に整理する。

・【車両条件】車輪：在来鉄道用 C 形車輪、ブレーキ種：ディスクブレーキ

・【軌道条件】バラスト軌道、レール：60kg レール、レール締結装置：直結 8 型締結装置・60MN/m (公称値) 軌道パッド、レール削正による凹凸管理区間

また、車輪・レール凹凸条件に関しては、ブレーキ条件、レール管理条件に対応したのものを用いた。車輪・レール凹凸に作用する接触フィルターに関しても、数区間の平均値を用いた。全車輪モデルの重量が基準車輪と同じであることを考慮し、基準車輪 (C 形平板車輪) の振動特性を用いて加振力の算定を行うこととした。

(2.3) 解析結果 数値解析から得られた全車輪モデルの基準車輪に対する車輪放射音の音源パワーレベル差の推定値を図 3 に示す。



(a) 径方向断面内湾曲形状

周方向断面内波打形状については、図 2(c)のように周方向

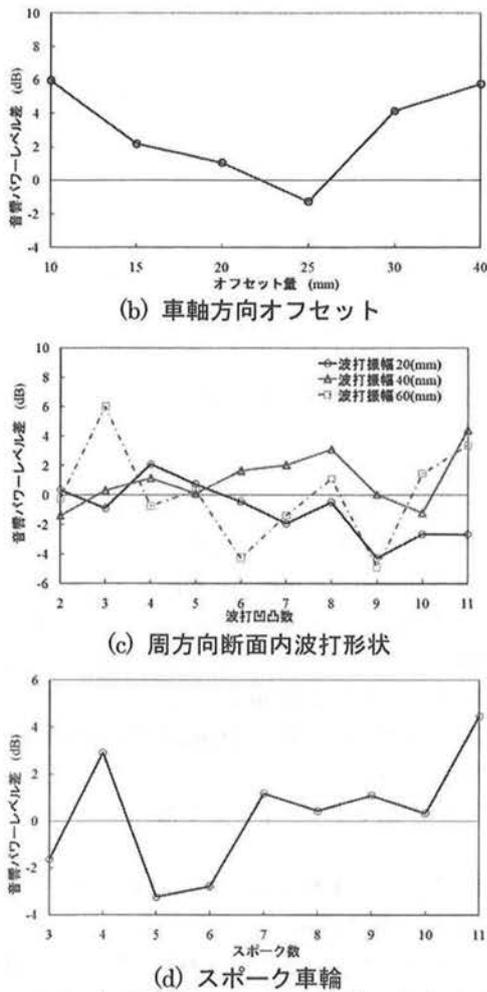


図 3 各種車輪の C 形平板車輪に対する音響パワーレベル差推定値

数値解析の結果を整理すると、車輪放射音を低減するためには、車輪板部の断面形状には以下のいずれかの条件を満たしたものが必要であると推定される。

- (a) 板部径方向断面内に振幅の比較的小さい波凹凸が 1~2 個程度含まれ、凹凸振幅が 10mm 程度のもの (以下径方向湾曲タイプ)
- (b) 板形状がストレート状にした形状であり、リム・ボス部間のオフセットが 25mm 程度あるもの
- (c) 板部周方向断面内に振幅 20mm 程度の波打凹凸が 9 個程度含まれるもの (以下波打タイプ)
- (d) スポーク本数 5 本の車輪 (以下スポークタイプ)

### 3. 縮尺模型を用いた衝撃加振試験

〈3・1〉 衝撃加振試験概要 数値解析で得られた結果をもとに、3 種類 (前節(a)径方向湾曲タイプ (凹凸数 1, 凹凸振幅 10mm), (c)波打タイプ (波打凹凸数 9, 振幅 20mm), (d)スポークタイプ) および C 形平板車輪の縮尺 1/2 模型車輪を実物車輪と同じ材質で製作した。製作にあたり、板部両端部およびリム部の形状は実形状に戻し、質量誤差を C 形平板車輪縮尺 1/2 模型の 5% 以内に設定した。なお、縮尺 1/2

模型に対する衝撃加振試験により得られる固有振動数は実物車輪の 2 倍となる<sup>(6)</sup>。

加振試験では、車軸両端を単純支持した状態で、車輪をインパルスハンマーで衝撃加振した。振動分布測定 (図 4(a)) はリム部と板部に振動加速度計を 6 点取り付け、放射音分布測定 (図 4(b)) は、車輪端面から半径 2m 離れた箇所に普通マイクロホンを 0° ~ 90° の範囲に 10° ピッチで放射状に設置して測定した。車輪を 0° (ピックアップ貼付位置) ~ 90° (C 形, 径方向湾曲) または 0° ~ 180° (波打, スポーク) の範囲を 7.5° ピッチで加振位置を移動し、インパルスハンマーを用いて車輪の径方向に加振した。

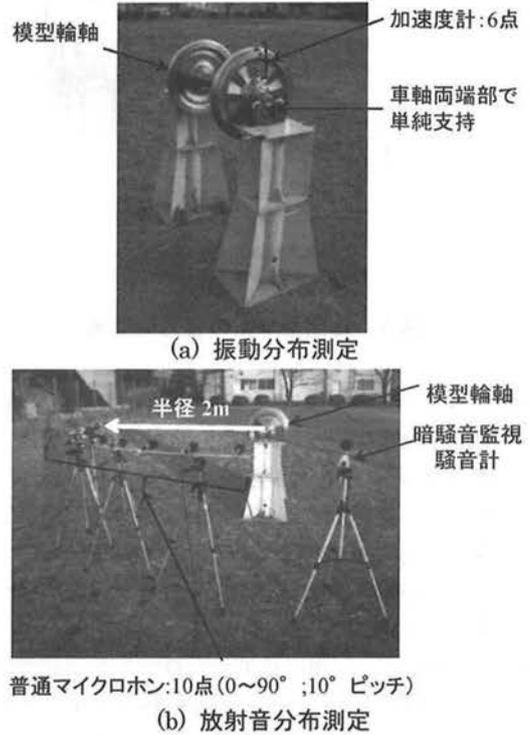
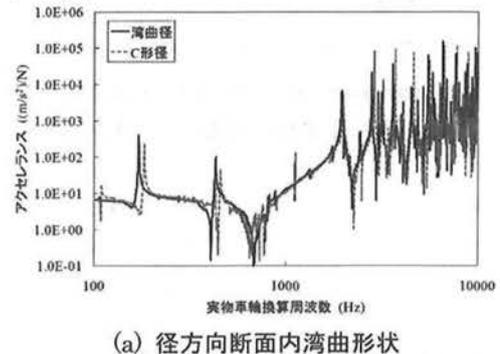


図 4 衝撃加振試験概要

なお放射音測定において、転動音に対する車輪放射音の寄与が大きくなる周波数域 (1000Hz 以上)<sup>(7)</sup> では車輪打撃時の騒音レベルと暗騒音レベルの差が 10dB 以上あることを事前に確認している。

〈3・2〉 試験結果 C 形平板車輪の径方向応答と、振動分布測定で得られた各模型車輪の径方向応答の比較結果を図 5 に示す。



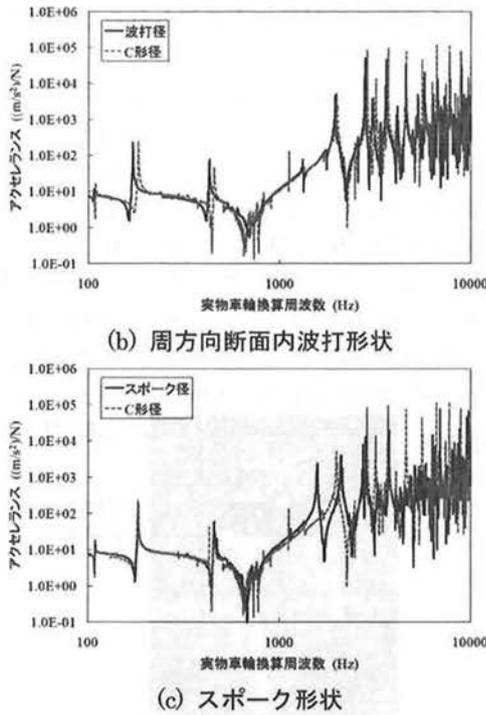


図 5 各模型車輪の径方向応答

各模型車輪の径方向の応答を参照すると、C 形平板車輪に対して固有振動数の差は小さく、車輪板部形状によって固有振動数を変更することが困難であることがわかる。また、各振動モードに対応するピークの大きさが、全体的に C 形平板車輪より小さい傾向にある。この傾向について、車輪板部形状の変更によって車輪の構造上の減衰が変化し可能性が考えられる。

図 6 に、放射音分布測定結果から算出した全模型車輪の反フランジ側音響パワーレベルの周波数分布を示す。算出にあたり、(2.2) 節と同様に転動音予測法<sup>(4)</sup>を用いた加振力作用させた。

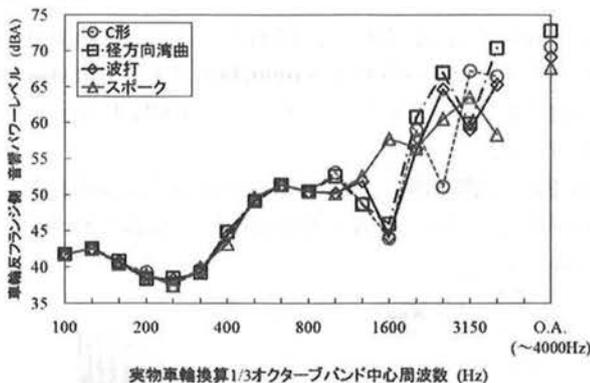


図 6 各模型車輪の音響パワーレベル

各模型車輪の C 形平板車輪に対する 4000Hz までの音響パワーレベルのオーバーオール値の増減量は、径方向断面湾曲形状で約 2dB の増加、周方向断面波打形状で約 1dB の低減、スポーク車輪で約 3dB の低減となり、スポーク車輪と波打車輪が騒音低減の可能性を有する結果となった。

ただし径方向断面内湾曲形状において、数値解析、振動分布測定および放射音分布測定の際の C 形平板車輪に対する大小関係が一致せず、この原因も不明であり、今後振動モードごとに詳細に振動・音響特性を精査する必要がある。

4. まとめ

車輪の基本諸元(質量, 材質, リム部・ボス部形状)を変更することなく、車輪板部の形状を変更し、車輪の振動特性または放射音特性を改善することで、転動音に占める車輪放射音の寄与を小さくすることを目的とし、数値解析と縮尺模型を用いた衝撃加振試験による低騒音車輪形状の検討を行った。

数値解析の結果、車輪放射音を低減するためには、質量一定条件の下で車輪板部の径方向断面形状には以下の条件を満たしたものが必要であると推察された。

- ①板部径方向断面内に振幅の比較的小さい波凹凸が 1~2 個程度含まれ、凹凸振幅が 10mm 程度のもの
- ②板形状がストレート状にした形状であり、リム・ボス部間のオフセットが 25mm 程度あるもの
- ③板部周方向断面内に振幅 20mm 程度の波打凹凸が 9 個程度含まれるもの
- ④スポーク本数 5 本のスポーク車輪

縮尺模型を用いた衝撃加振試験の結果、スポーク車輪および波打車輪が騒音低減の可能性を有することを確認した。なお、径方向断面湾曲形状車輪については、騒音低減効果を確認できなかった。

文 献

- (1) Y. Kozuma, T. Kitagawa and K. Nagakura: "Analysis on vibratory characters of railway wheels", Euronoise 2006 (2006)
- (2) D. J. Thompson: "Wheel-rail noise generation, Part II: Wheel vibration", Journal of Sound and Vibration, 161(3), pp. 401-419 (1993)
- (3) J. C. O. Nielsen, C. R. Fredø: "Multiple-disciplinary optimization of railway wheels", Proceedings of IWRN 8, 1, pp. 35-46 (2004)
- (4) D. J. Thompson, M. H. A. Janssens, F. G. de Beer: "TWINS Track-Wheel Interaction Noise Software Theoretical Manual (version 3.0)", TNO-report, HAG-RPT-990211 (1999)
- (5) T. X. Wu, D. J. Thompson: "Vibration analysis of railway track with multiple wheels on the rail", Journal of Sound and Vibration, 239(1), pp. 69-97 (2001)
- (6) 山口雄三, 平田東助, 藤澤二三夫, 堀康郎: 「振動に関する模型の実験と評価(9)」, 機械の研究, 第 47 巻, 第 7 号 pp. 83-89 (1995)
- (7) D. J. Thompson: "Predictions of acoustic radiation from vibrating wheels and rails", Journal of Sound and Vibration, 120(2), pp. 275-280 (1988)