

3次元構造・音場解析による在来線車輪の形状と音響放射特性の解明

車両制御技術研究部 動力システム

主任研究員 笹倉 実

1. はじめに

近年の在来線では、車輪振動とレール振動が原因となって発生する転動騒音の低減が課題の一つとなっているが、このうち車輪から発生する転動騒音は、1kHz～2kHzの周波数帯で大きい傾向にある。この詳細な現象解明には現車走行試験とは別に、定置での加振実験及び数値解析が必要であり、過去の実験では放射形状の振動モードで振動、音響パワーともに大きくなることなどが分かっている¹⁾。図1は在来線の代表的な車輪とその断面形状である。これらは板部形状（ウェブ形状）の違いにより、波無し車輪と波打車輪に大別できる。波打車輪は板部の円周方向に60°

周期の凹凸を持ち、薄板ながらも軽量化を達成している。NA形波打車輪は、A形波打車輪と比較して板部のオフセットが大きいことが特徴である。車輪の転動騒音は、車輪の固体振動が音の放射となる振動放射音であり、放射特性は車輪の曲げ剛性に大きく影響される。そのため、リム厚、板厚（ウェブ厚）及びオフセットなどの形状因子の違いが音響放射特性に大きく影響を及ぼしていることが考えられる。本講演では、構造・音場解析により車輪形状別の音響放射部位や、その割合などを定性的に明らかにするとともに、転動騒音低減のための車輪形状変更や地上面での音響反射の影響などの解析事例を報告する。

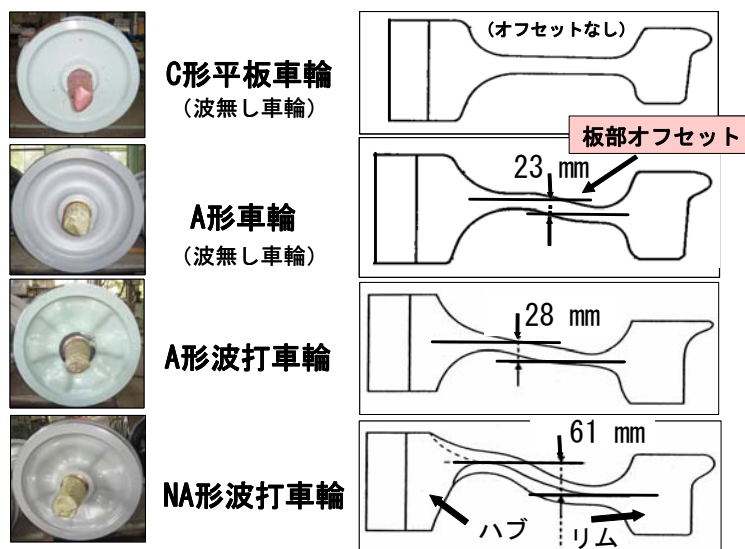


図1 在来線の各車輪断面形状

2. 車輪の構造・音場解析概要

車輪の構造・音場解析とは、構造振動解析（FEM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、周囲の放射音を音場解析（BEM解析）を用いて行う手法であり、車輪のような固体からの振動放射音の解析に有効な手法である（図2）。転動騒音を模擬する場合は、軌道及び車輪凹凸からの相互加振力を想定し、車輪構造モデルに、レール接触点（例えば、リム端より約60mm）から車輪径方向への加振条件を与える。車輪表面からの音響パワーの計算は、図3に示すリム部、板部、フランジ部及び踏面部の4つの領域に個別に分けて算出することにより、各部位の放射寄与を求めることが出来る。なお、本解析では車軸を含まない車輪単体とし、車軸圧入部は完全拘束条件として、ここからの放射は、無い条件とした。

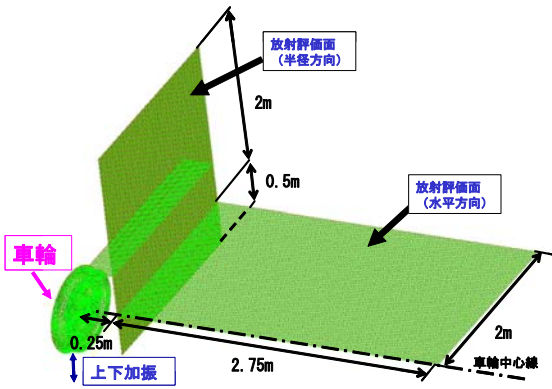


図2 車輪モデルと音響評価面

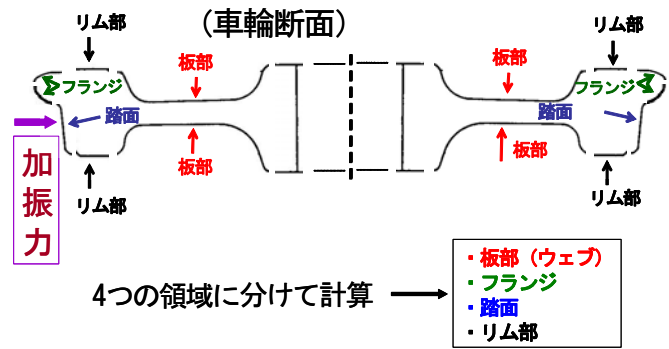


図3 車輪の音響パワー部位別の放射計算

3. 在来線車輪の音響放射特性 (BEM 解析 計算例)

図4下図は、転動騒音の帯域が800Hz~4kHz程度であることを考慮し、計算上の加振周波数帯域を250~5kHzとして音響パワーを概ね25Hz毎に求めた例である。加振力は、全帯域一定加振(1N p-p)とした。いずれの車輪も音響パワーは1kHz~2.5kHz帯域で大きくなるが、形状別に比較すると、NA形波打車輪のピークが最も大きな値を示した。NA形波打車輪の主な音響パワーのピークは5箇所となり、1260Hz付近が特に大きい。図5は、本解析の比較目的で実施した3次元実験モード解析であり、その振動実測値(周波数応答関数)と比較すると同様な周波数でピークをもち、車輪振動が音として放射されている関係が分かる(図4上図)。

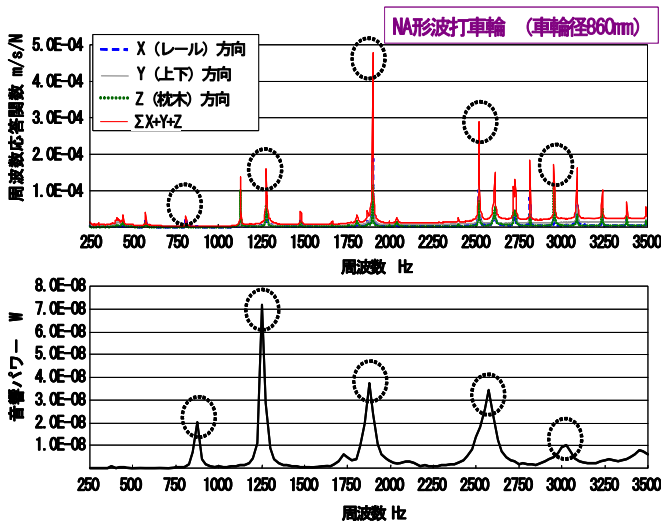


図4 3次元実験モード解析の振動周波数
応答(上)とBEMによる音響パワー(下)

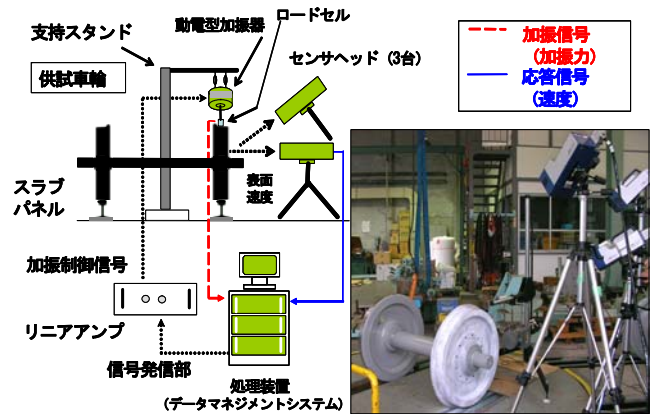


図5 3次元実験モード解析の概要

図6は、NA形波打車輪の実験モード解析、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であり、いずれも放射形状の節を持つ振動モードとなる。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、車輪周囲の各方向に音が放射される結果が分かる。NA形波打車輪以外の車輪でも同様な傾向が見られる。

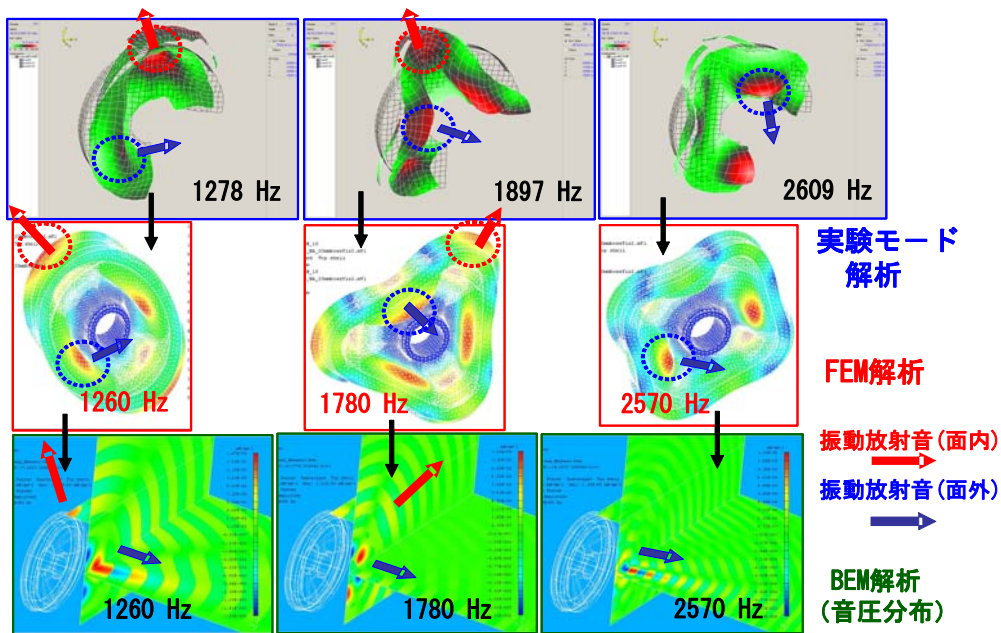


図 6 主な振動モードと音響放射 (NA 形波打車輪)

図 7 は、NA 形波打車輪と C 形平板車輪の音響パワーの解析結果を部位別に百分率で整理したものである。板部のオフセット量が多い NA 形波打車輪は板部の変形が大きくなる傾向にあり、このため、全放射パワーに占める板部からの放射割合は約 80%と大きくなるが、板部のオフセットがない 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。

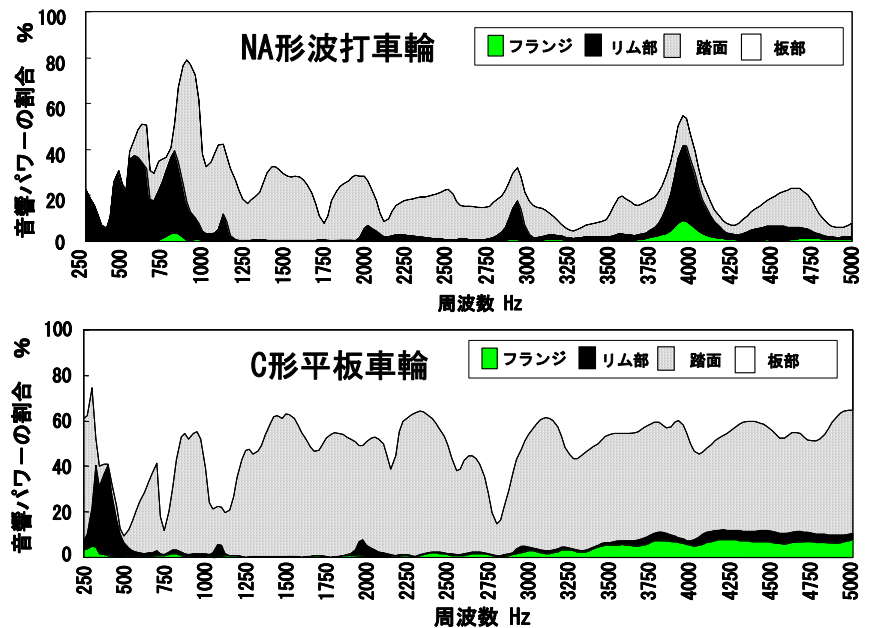


図 7 車輪別の音響パワー放射寄与

4. 車輪形状因子と音響特性の変化 (予測計算)

転動騒音に及ぼす車輪形状因子として①板厚、②リム厚及び③板部のオフセット量などが考えられる。ここでは図 8 に示す形状 (A 形普通車輪相当の基準モデル及び形状変更モデル CASE1~4) での解析を行い、特性比較を行った例を紹介する。図 10 は、各 CASE での車輪近傍 (軌道中心から水平 2m) と離れ点 (軌道中心から水平 6.25m) において、それぞれ地上高 (レール底面相当の高さを 0m 基準) 0.6m、1.2m 及び 2.0m の図 9 に示す計 6 点の観測点 (評価点) での比較した結果を示す。図 10 上図は地上反射条件なし、図 10 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) 下にスラブ軌道に相当する地上反射条件 (剛体反射) を仮定した場合である。基準モデルと比較し、オフセット量が 0 (CASE2)、板厚 2 倍 (CASE1)、リム厚 2 倍 (CASE3) の場合はいずれも音圧が低下するが、CASE3 の低下は特に大きい。これは、剛性の高いリムが径方向の車輪変形を大きく拘束し、板部の変形も抑制した結果として車輪全体の音を低下させていることが推測される。また、地上反射の有無による影響は水平 2m 点では小さいが水平 6.25m 点では大きくなることから離れた点では地上反射の影響が大きい。

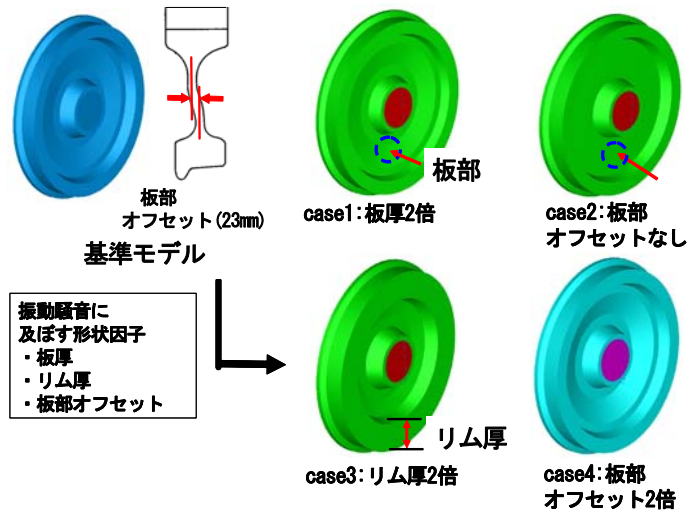


図 8 車輪形状変更モデル

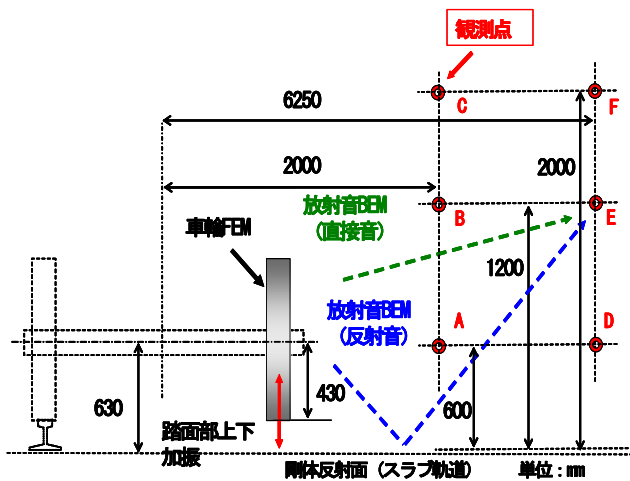


図 9 地上反射と音圧評価点

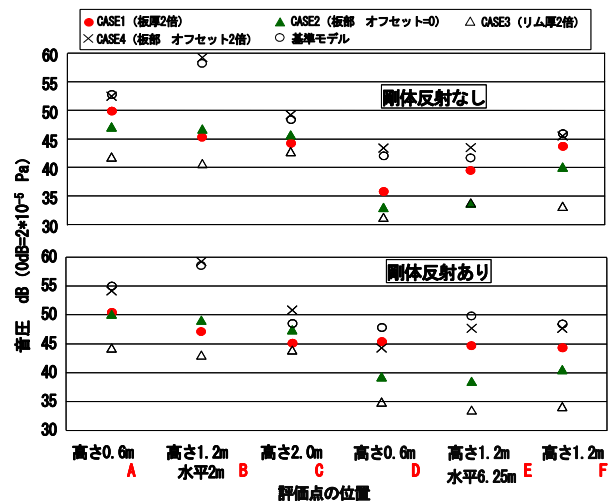


図 10 各車輪の評価点での音圧 (平均値)

5. 最後に

本解析により、シミュレーションレベルでの車輪形状因子と音響放射特性の関係を定性的に明らかにすることが出来た。今後は、より実用的な課題解決のため、以下の事項を検討する予定である。

- (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

参考文献

1) 笹倉 実, 佐藤 潔, 阿久津 勝則: 定置加振試験による車輪の振動放射音の解析, 鉄道総研報告, Vol.18, No.11, 2004