

S3-2-2

鉄道車輪の振動・騒音放射特性の解明

(その2 形状の異なる在来線用車輪の振動放射音特性の比較)

[機] ○笹倉 実 [機] 佐藤 潔 ((財) 鉄道総合技術研究所)

BEM,FEM and Experimental analysis on the vibration and the noise radiation of railway wheel
Minoru SASAKURA, Kiyoshi SATOH (Railway Technical Research Institute)

The noise of narrow-gauge vehicles is composed of rolling noise, electric apparatus noise and driving system noise. In recent years, the total noise tends to increase with speed up. The noises radiated from electric apparatus and the driving system tend to decrease, however, the rolling noise tends to increase relatively. This paper reports the characteristics of sound radiation obtained from BEM,FEM analysis and bench experiments of wheels with different web shapes, or webs of corrugated and straight standard types, which are used for narrow-gauge railway vehicles. We found that the noise of NA-type corrugated wheel is the highest value in four kinds of wheels which we experimented on, and the typical frequency of the main modes is 1257Hz.

キーワード：波打車輪、BEM 解析、音響インテンシティ、音響パワー

Key Words：Corrugated wheel, BEM analysis, Sound intensity method, Sound power

1. はじめに

在来線車輪は板部（以下、ウェブ）が波打形状である波打車輪と波打形状でない普通車輪に大別できる。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。普通車輪はボス部とリム部がオフセットをもつ A 形普通車輪と、オフセットがない C 形普通車輪がある（図 1）。NA 形波打車輪はオフセット量が多いことが特徴である。これらの車輪形状の違いは車輪から発生する騒音に影響を及ぼし、車両全体としては低騒音化が進んでいるなかで転動音が車外騒音に占める割合が増加する場合もみられる。走行試験の 1/3 オクターブバンド解析結果によると、NA 形波打車輪は A 形波打車輪に比較して 1.25kHz、2kHz バンドに特徴的な騒音レベルの増加がみられ、普通車輪と比較しても騒音レベルが高い⁽¹⁾。本報では前報⁽²⁾で示した FEM 解析手法をもとに 4 種類の車輪（A 形及び NA 形波打車輪、A 形及び C 形普通車輪）の音響放射解析及び実験を実施し、ウェブ形状の違いによる音響特性の違いを明らかにするとともにリム厚の違いが音響特性に及ぼす影響の検討も行った。

2. 車輪音響解析の概要

2.1 音響放射解析モデル

車輪の基礎的な音響放射特性を調べるため、境界要素法 (BEM) プログラム (RAYON2003) を用いた音響放射解析を実施した。車輪 FEM モデルによる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、車輪の音響パワー、音響放射効率、図 2 に示す車輪近傍の音響放射評価面における音圧分布、車輪表面及び評価面の音響インテンシティを算出した。音響放射効率は車輪の振動と音響

放射の関連性を示す指標であり、式(1)のように示される。加振入力 5kHz までの半径方向の一定加振とした。車輪表面から発生する音の基礎的な指向性をみるために車輪周囲は自由空間とした。減衰パラメータはモード減衰とし、周波数に依存しない一定減衰の値 0.015 とした。車輪モデルのメッシュは 2 次ソリッド要素、車輪表面の境界モデルは線形シェル要素とした。車輪単体での解析としたため車軸は含まないが、車軸圧入部内面は境界条件を固定として、ここからの振動及び音響放射は生じないものとした。

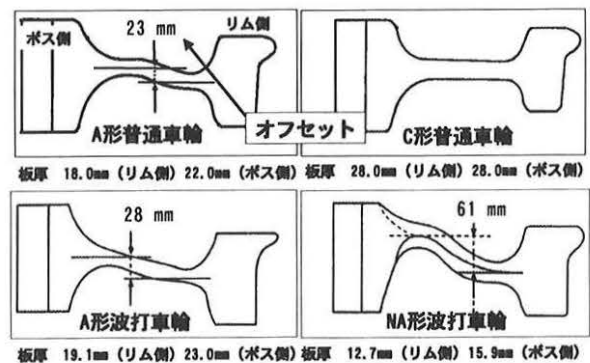


図 1 車輪断面の比較

$$\sigma(f) = \frac{P_{rad}(f)}{\sigma_a c_a S \bar{v}^2(f)} \quad (1)$$

ここに、 $P_{rad}(f)$: 音響放射パワー、 $\bar{v}^2(f)$: 車輪表面での平均二乗速度、 S : 放射面積（閉空間）、 c_a : 空気中で音速、 σ_a : 空気密度

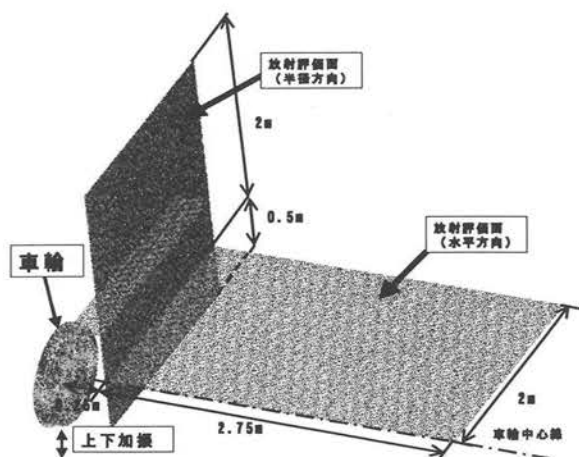


図2 車輪モデルと音響放射評価面 (BEM 解析)

2.2 定置試験による車輪音響パワーの測定

3次元音響解析システム (小野測器 DS-925) により車輪から発生する音の音響インテンシティの実測を行い、解析結果との比較を行った。図3に示す直方体の下面を除く5面で音響インテンシティの値を積分し、各周波数毎の音響パワーを求めた (周波数分解能 6.25Hz)。マイクロホンの測点数は合計68点であり、スラブ軌道レール上に単体で定置した車輪の踏面を、動電型加振器により 0.25kHz~5kHz のバンドランダム波で半径方向に加振した。供試車輪はA形波打車輪、NA形波打車輪、A形普通車輪である。

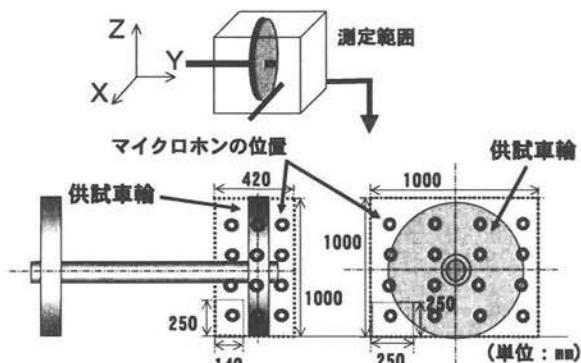


図3 音響パワーの測定点

3. 音響解析結果

3.1 BEM 解析による各車輪の音響パワー

FEM 解析により、各車輪の振動モード周波数を求め、これを横軸として整理した音響パワー計算結果を示す。図4、図5は車輪径 860mm の新製車輪での計算値である。いずれも 1kHz~2.5kHz 帯域で値が大きいことがわかる。4種類の車輪を比較すると、NA形波打車輪は 1257Hz の値が大きく、次いで 1777Hz の値が大きい。1257Hz は走行試験における車輪近傍音実測値のピークに近い。A形波打車輪は 1077Hz、1542Hz が大きい。普通車輪ではA形普通車輪の方が大きく、特に 2.3kHz 以上のパワーが他の車輪に比較して大きくなる傾向にある。C形普通車輪は 1700Hz 付近でピークがみ

れるが 4 種類の車輪形状の中では最も小さな値である。C形普通車輪はウェブが平らな形状であるため、面内 (半径方向) 加振に対する面外 (車軸方向) の曲げ剛性が相対的に高く、車輪の変形が小さいことから、音の放射は小さいと考えられる。図6上はA形普通車輪が削正限界である車輪径 780mm までリム部が薄くなった場合の試算結果である。リム厚さの違いにより振動モード周波数は異なるが、図5上の車輪径 860mm に比較して高周波域での値が大きくなるのがわかる。図6下は計算上ウェブ厚さを2倍として剛性を高めた試算であり、音響パワーは大きく低下する結果となった。

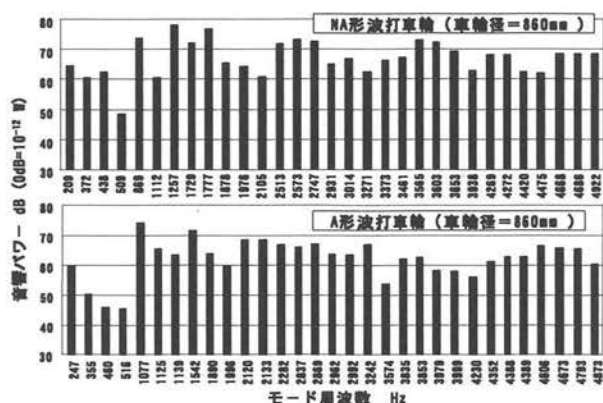


図4 波打車輪の音響パワー計算結果

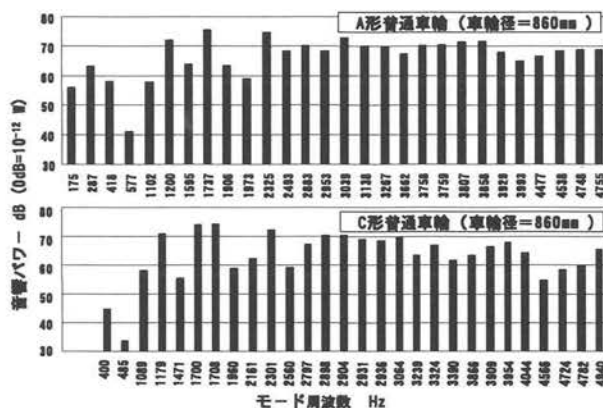


図5 普通車輪の音響パワー計算結果

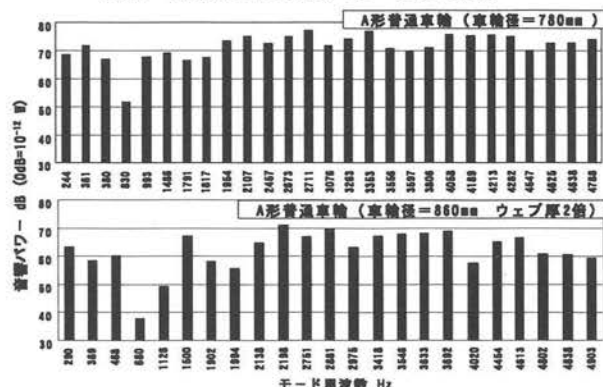


図6 車輪形状を変化させた場合の音響パワー計算結果

3.2 各車輪の音響放射効率

図7、図8に各車輪の音響放射効率解析結果を示す。各車輪とも1kHz以下では値が小さくなり、低周波数域では車輪振動による放射音は小さいことがわかる。音響パワー同様に1kHz～2.5kHz帯域で大きな値を示し、1を越えることが多いが、最大ピークは音響パワーと比較して高周波数域で現れる傾向がある。NA形波打車輪は2573Hz、A形波打車輪は2133Hz、A形普通車輪は2325Hz、C形普通車輪は1700Hzである。さらに高周波数域ではC形普通車輪を除き、1前後である。

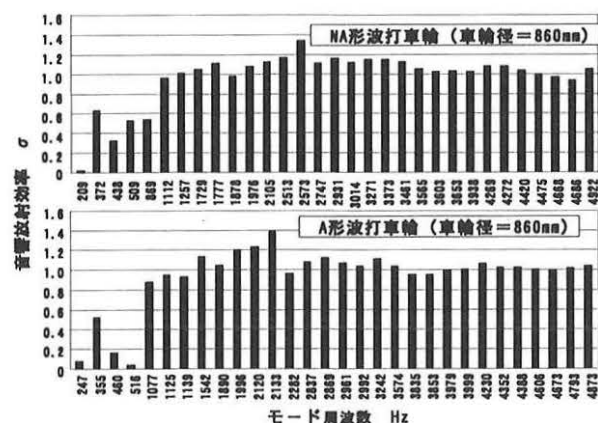


図7 波打車輪の音響放射効率

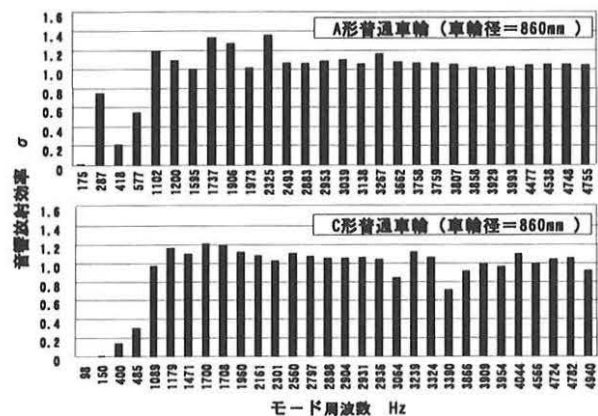


図8 普通車輪の音響放射効率

3.3 FEM 振動モードとの比較

図9は各車輪が最も大きな音響パワーを示すモード周波数でのFEMによる振動モード解析結果である。この解析の場合、いずれの車輪もリムは半径方向（面内方向）に大きく変形し、ウェブは放射状に半径4節の振動モードを持つことがわかる。リム厚を薄くしたA形普通車輪のモデルではリム、ウェブともに大きく変形する結果を示しており、リム厚の減少により、リムの剛性が低下し曲げ変形しやすくなることから、音響パワーが大きくなる一因と推定される。

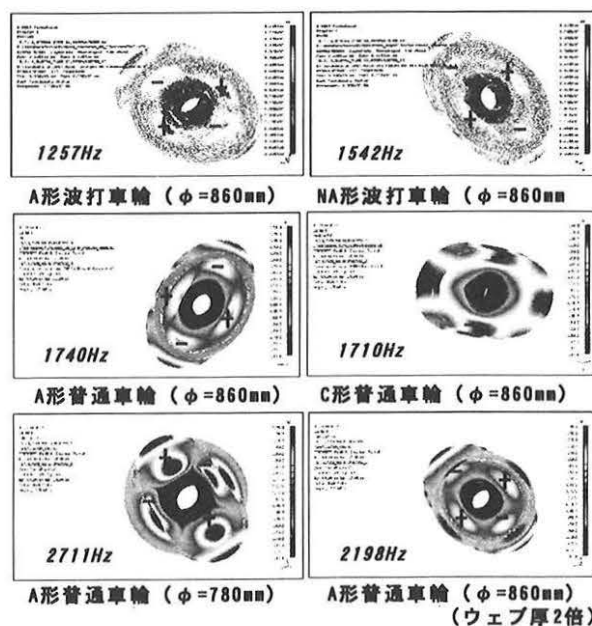


図9 各車輪の音響パワーの大きな周波数での振動モード (FEM 解析)

3.4 BEM 解析による車輪の音響放射特性

NA形波打車輪の1257Hzでの車輪近傍音圧分布を図10に、車輪表面の音響インテンシティ分布を図11に、音響放射評価面上での音響インテンシティ分布を図12に示す。音響インテンシティの微小な値は省略した。これら3つの図より音響放射は車輪の振動モードの節及び腹に対応し、面外放射はウェブからの4方向へ、面外放射は車軸に対し30°～45°及び75°方向に指向性があることがわかる。

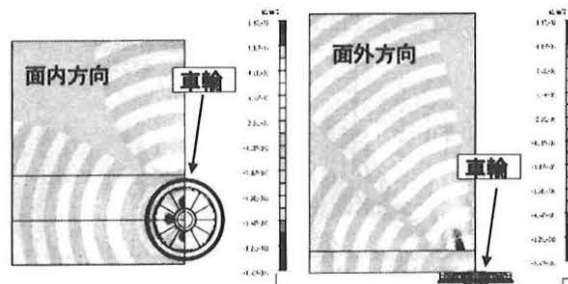


図10 車輪近傍の音圧分布 (1257Hz)

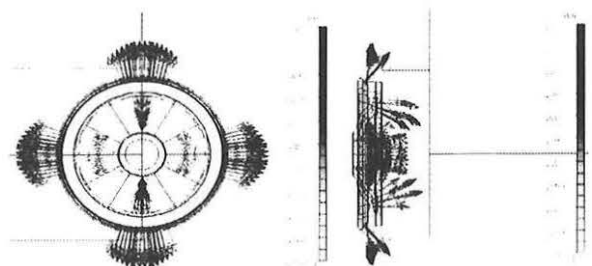


図11 車輪表面の音響インテンシティ分布 (1257Hz)

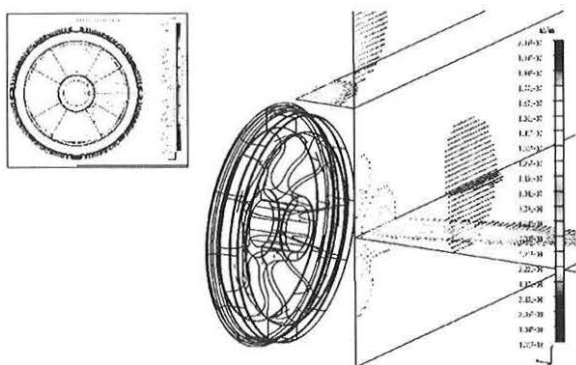


図12 音響放射評価面上の音響インテンシティ分布

4. 定置試験による車輪の音響パワー

図13にA形及びNA形波打車輪の音響パワー実測値を示す。A形波打車輪よりNA形波打車輪の値が全般に大きい傾向にあるが、最大ピークはNA形で1900Hz、A形で1500Hzとなり、計算結果である図4と比較すると、音響パワーのピークが異なる。これは、波打車輪ウェブ形状が円周方向に凹凸をもち、半径方向の剛性が均一でないことから、点加振である加振器の取付位置の影響を受け、振動特性に変化が生じたものと思われる。図14はNA形波打車輪、図15はA形普通車輪でそれぞれリム厚を変化（ $\phi 860 \rightarrow 780\text{mm}$ ）させた場合の実測値である。いずれの車輪もリム厚が薄くなると音響パワーのピークは高周波側にシフトし、ピークの値が大きくなる傾向にある。A形普通車輪の計算値である図5上と実験結果である図15を比較すると、 $\phi = 860\text{mm}$ の場合とはともに1200Hz、1800Hz、2400Hz、3900Hz付近で、 $\phi = 780\text{mm}$ の場合は2100Hz、2700Hz、3350Hz、4050Hz付近でピークを持ち、両者はよく一致している。

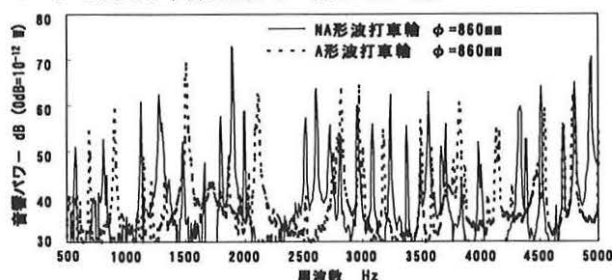


図13 音響パワー実測値（波打車輪）

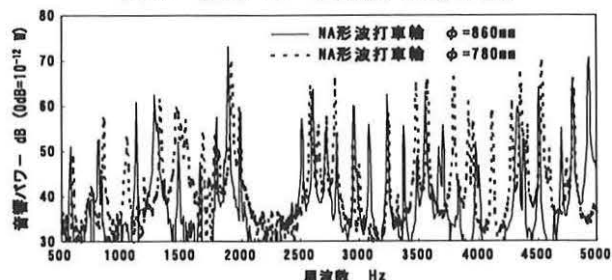


図14 直径（リム厚）を変化させた場合の音響パワー実測値（NA形波打車輪）

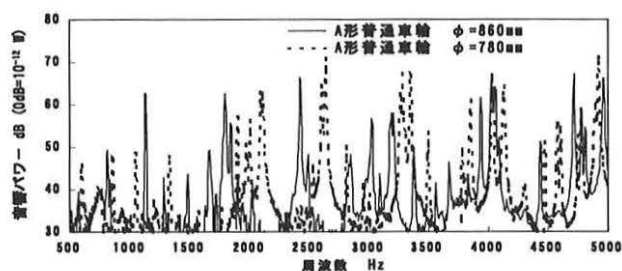


図15 直径（リム厚）を変化させた場合の音響パワー実測値（A形普通車輪）

5. まとめ

車輪の基礎的なBEM解析及び音響パワー測定により、以下の特性を明らかにした。

- (1) いずれの車輪も放射状に節をもつ半径4節の振動モードでは音響パワーが最も大きくなることがわかった。
- (2) いずれの車輪も音響放射効率 $1\text{kHz} \sim 2.5\text{kHz}$ 帯域で大きな値を示した。
- (3) NA形波打車輪の1257Hz付近での音響パワーは4種類の車輪形状の中で最も大きなピークをもち、放射特性はウェブ面外のほか、踏面部より面内方向へも大きいことがわかった。
- (4) ウェブ剛性の高いC形普通車輪の音響パワーは小さい。
- (5) リム厚の薄い車輪は新製車輪に比較して音響パワーのピークが高い周波数にシフトし、車輪から放射される音響パワーも大きくなることがわかった。

6. 今後

本報告では基礎的なBEM解析シミュレーション及び定置音響パワー測定での車輪単体の騒音特性を明らかにした。しかし車輪形状の違いによるレールへの加振力、さらにはレール騒音に及ぼす影響を含めて考えると、異なる結果も予想される。今後はこれらをふまえた総合的な解析及び評価を以下のように進める必要がある。

- (1) レールモデルを含め、軌道での音の反射条件を考慮した解析。
- (2) レール頭頂面及び車輪踏面の凹凸実測データを元にした応答解析。
- (3) 波打車輪の加振位置変化と振動特性への影響調査

参考文献

- 1) 佐藤，笹倉他：板部形状の異なる車輪の音響特性，鉄道総研報告，Vol.19，NO.5，2005.5
- 2) 笹倉他：鉄道車輪の振動・騒音放射特性の解明（第1報），J-Rail2002，pp.455-458（2002）