

S3-2-4.

板部形状の異なる車輪の音響特性

[機] ○佐 藤 潔 [機] 笹 倉 実 [機] 阿 久 津 勝 則

((財) 鉄道総合技術研究所)

佐 藤 利 和 石 井 豊 (スペクトリス (株) ブリュエル・ケアー事業部)

Acoustic characteristics of wheels with different web shape
 Kiyoshi Sato, Member Minoru Sasakura, Member Katsunori Akutsu, Member
 (Railway Technical Research Institute)
 Toshikazu Sato Yutaka Ishii
 (Briel & Kjaer Division of Spectris Co. Ltd., Japan)

In recent years, measures are required to prevent the ever-increasing rolling noise of railway vehicles, in addition to those against the noise emitted from electric apparatus and driving system. This paper reports the characteristics of wheel vibration sound obtained from running and bench experiments of wheels with different web shapes, or webs of corrugated and solid standard types which are used for narrow-gauge railway vehicles.

キーワード：鉄道、在来線、波打車輪、転動音、車輪、騒音

Keywords: Railway, Conventional railway, Corrugated wheel, Rolling noise, Wheel, Noise

1. はじめに

最近の在来線車両は、低騒音化が進み、更に速度向上、軌道保守やコスト等の面から軽量化も進み、車輪の軽量化も行われている。

そのような中で、転動音が騒音全体に占める割合が増加する傾向が近年見られるようになった。在来線車両から発生する転動音(レールと車輪)の中で、車輪から発生する転動音の低減策として低騒音車輪の検討を進めている。在来線で使用されている車輪には、車輪の板部(以下、ウェブ)形状によって、波打車輪と波無し車輪があるが、最近ではA形波打車輪を更に軽量化したNA形波打車輪が多く使用されている。

筆者らは、在来線用車輪の板部形状の違いによる音響的な特性を把握するため、走行試験と加振試験を実施した。本論文は、走試試験や車輪加振試験及びモード解析結果の一例について報告する。

2. 走行試験

図1は地上側でアレイマイクによって測定した6.25m点騒音の分析結果であり、NA形波打車輪がA形波打車輪と比べ、特徴的な周波数帯の増加が見られた一例である。この結果では、NA形波打車輪は1.25kHzバンドの増加が大きく、2kHzバンドでも増加が見られ、4kHzバンドでは、ほぼ両方の波打車輪で大きい傾向が見られる。

図2は、車上床下で測定したNA形波打車輪とA形普通車輪による車輪近傍音の狭帯域スペクトル解析結果を示す。NA形

波打車輪は、地上測定結果と同様な周波数帯で増加していることが分かる。このようにNA形波打車輪は、特定の周波数帯が増加し、転動音を増加させる場合があることが走行試験より判明した。

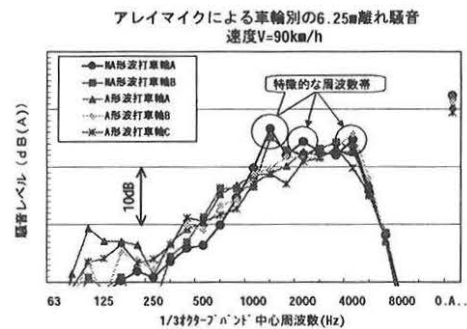


図1 波打車輪の6.25m点騒音 1/3オクターブバンド分析結果例

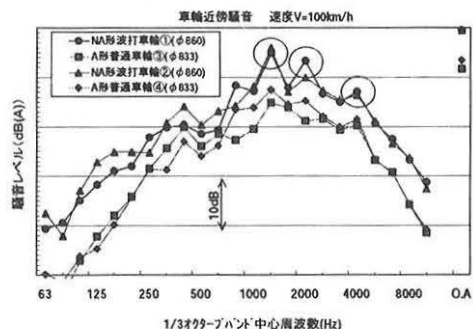
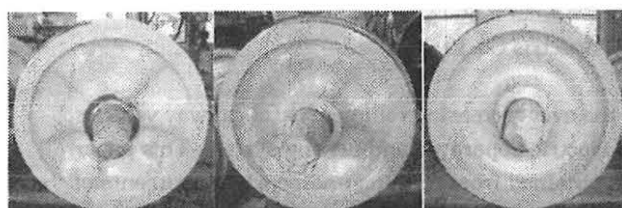


図2 車輪近傍音における1/3オクターブバンド分析結果例

3. 定置加振試験

在来線に使用されている車輪は、波打車輪(3種類)、波無し車輪(2種類)があるが、図3に加振試験に使用した代表的な車輪を示す。車輪径は、基本的に新品φ860で2種類の摩耗限φ780を用意した。加振は、レール上に単体で定置した車輪踏面を動電型加振器(MB-Dynamics製MODAL-50)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。輪軸単体であることから構造的な減衰要素が少なく、加振エネルギーロスが小さいことから、加振力は20N(p-p)程度で十分である。



(a)A形波打車輪 (b)NA形波打車輪 (c)A形普通車輪
図3 加振試験に使用した代表的な車輪(φ860)

車輪定置加振による測定を幾つか実施した中で⁽¹⁾、ここでは近距離場音響ホログラフィ(STSF)⁽²⁾、非接触振動計による実験モード解析及びFEM解析による評価結果を以下に述べる。

3. 1 近距離場音響ホログラフィ(STSF)⁽²⁾

ブリュエル・ケアー社 PULSE 及び 7780 型定常 STSF(Spatial Transformation of Sound Fields: 音場の空間変換) ソフトウェアシステム(42チャンネル仕様)により、近距離場音響ホログラフィ計算を利用して、各車輪の車輪側面から放射される音圧信号を42チャンネルマイクロホンアレイによるスキャン測定を行い、近距離場音響ホログラフィの計算を適用して、6種類の車輪側面から放射する音響インテンシティ分布を推定した。図4に上限周波数、図5に測定状況を示す。レールは、コンクリート面に敷設してある。

計測機器の主な仕様は、以下の通りである。

- ・マイクロフォン・アレイ: 6×7(縦×横)=42本
- ・マイクロフォン間隔: 5cm
- ・計測エリア: 1m×1m(21ポイント×21ポイント、縦横各5cmピッチ)
- ・周波数範囲: 22.4Hz~3.2kHz
- ・使用システム: PULSEマシ分析システム
- ・フロントエンド: PULSEフロントエンド[®](入力: 46ch, 出力: 2ch)

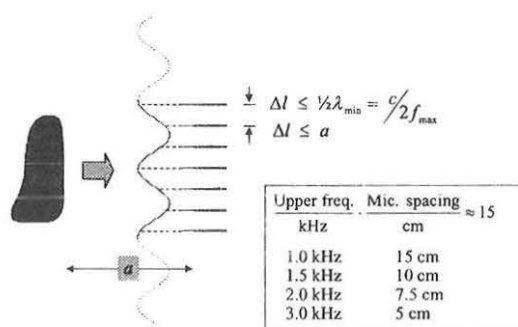


図4 STSFの上限周波数

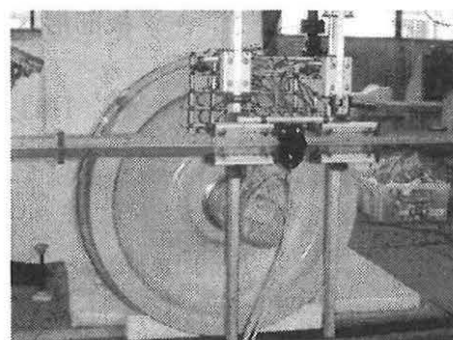


図5 STSFによる車輪測定例

図6~図11に3種類の車輪による周波数1kHz~3kHzまでの音響インテンシティの分布とそのピーク周波数を示した。

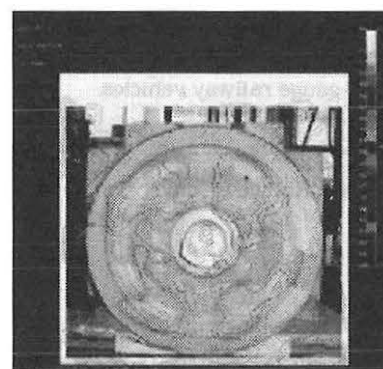


図6 NA形波打車輪(φ860)(1k~3kHz)
ピーク周波数 1.272kHz

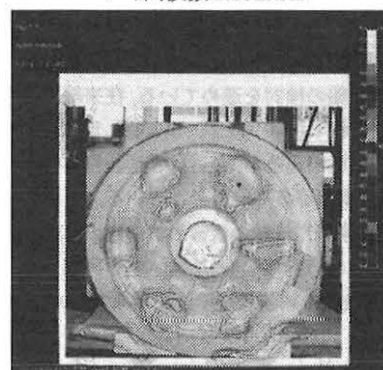


図7 NA形波打車輪(φ860)(1.82k~1.89kHz)
ピーク周波数 1.842kHz

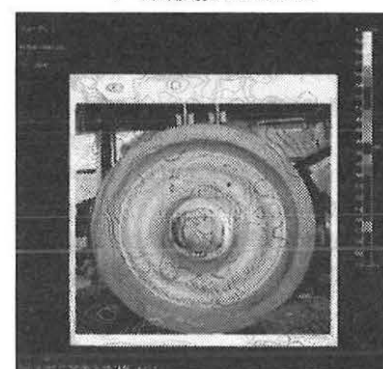


図8 A形普通車輪(φ860)(1k~3kHz)
ピーク周波数 2.48kHz

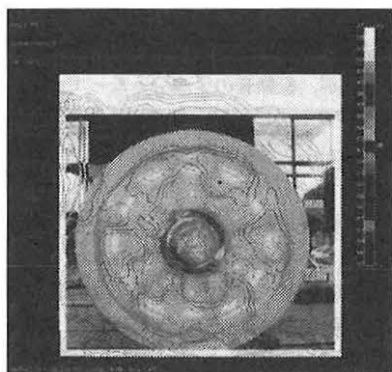


図9 A形波打車輪(φ860)(1k~3kHz)
ピーク周波数 1.512kHz, 2.824kHz

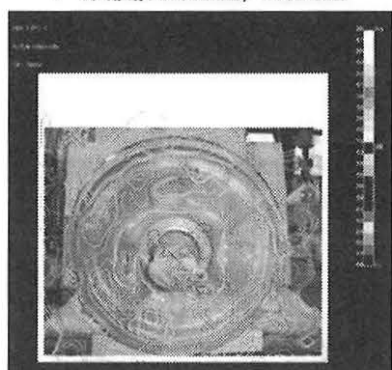


図10 NA形波打車輪(φ780)(1k~3kHz)
ピーク周波数 2.648Hz

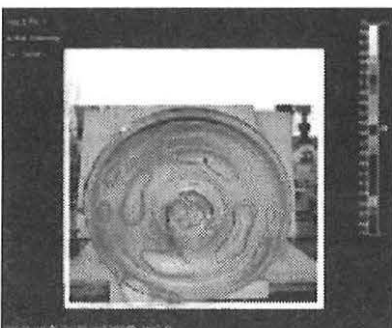


図11 A形普通車輪(φ780)(1k~3kHz)
ピーク周波数 2.6kHz

STSFによるNA形波打とA形波打及びA形普通車輪の結果は、図1, 2の走行試験分析結果に見られる周波数バンドとほぼ一致することが分かる。しかし、A形波打車輪は、STSFで見られる周波数バンドがそれほど卓越していない。これは、推定であるが車輪のリム厚が薄くなり、音響パワーに影響する振動モードが高い周波数にずれたためと考えられる。

3. 2 実験モード解析

実験モード解析は、スラブ軌道レール上でA形波打車輪を用いた解析例を述べる。加振装置及び加振力はSTSFと共通である。車輪から水平距離で約3m離れた位置から非接触振動計(Polytec社:PSV200システム)で車輪表面の振動速度を測定した。測定範囲は車輪ウェブ側面及びリムで測定点数は640点である。なお、リム頸部及びボス近傍部などの曲面部はレーザー

入射角が浅くなり、測定不能であることから、これらは測定範囲より除いた。

図12に測定状況、図13に測定結果を基にした実験モード解析によるA形波打車輪の振動モード: 1.506kHz, 2.825kHzを示す。

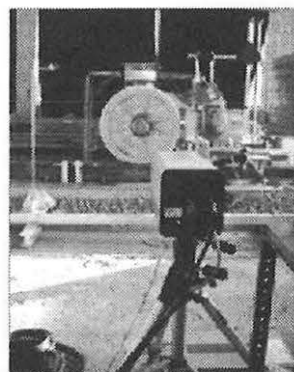
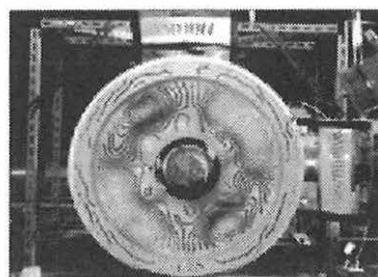
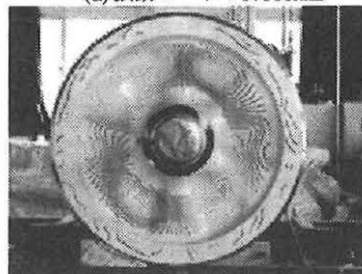


図12 レーザー振動計による車輪振動測定



(a) 振動モード: 1.506kHz



(b) 振動モード: 2.825kHz

図13 実験モード解析によるA形波打車輪の振動モード

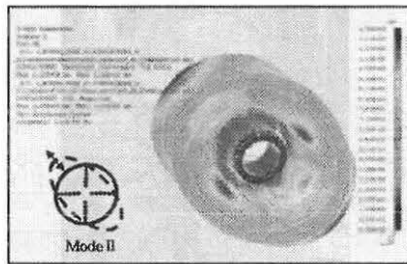
A形波打車輪の実験モード解析より、その振動モードはSTSFの測定結果と一致していることが図9とそのピーク周波数より分かる。振動モードは、Mode I: ウェブ半径方向に節を持ち、ウェブとリムが車軸方向(面外方向)に変形する振動モード(面外放射節モード)とMode II: Mode Iに加えてリム部が半径方向(面内方向)に変形する振動モード(面内/面外放射節モード)でこのMode IIが車輪ウェブからの振動放射音に最も影響を及ぼすモードと考えられる。

3. 3 FEM解析

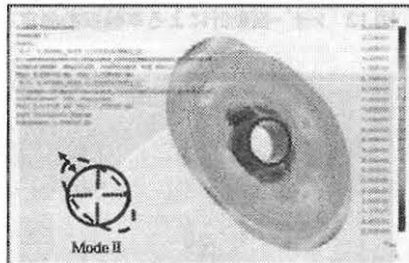
波打車輪のシミュレーションを目的として実形状解析モデルを作成した。NA形及びA形波打車輪を形状計測機器(マキノcommand-III D)により周方向3°ピッチで実測を行った後、I-DEAS-FEモデルに変換し、汎用構造解析ソフトI-DEASを用いて固有値計算を行った。モデルは車輪単体であり、車軸圧入

部は剛拘束と仮定した。要素数は 16800 点、2 次 4 面体ソリッド形状でメッシュ間隔は 20mm である。固有値計算条件は大規模モデルの取扱いが可能なランチョス法とし、不要な並進モードを除去するため計算範囲を 1Hz~5kHz とした。

NA 形と A 形波打車輪の振動モードと固有振動数の比較を行った。両車輪の代表的な振動モードを図 17 に示す。



(a) NA 形波打車輪(面内/面外放射 4 節: 1260Hz)



(b) A 形波打車輪(面内/面外放射 4 節: 1550Hz)
図 17 FEM 解析による波打車輪の振動モード比較

1.5kHz 付近のモードが振動と音響パワーを最も大きくする特有のモードと仮定すれば、NA 形波打車輪の FEM モデル解析によると、同様なモードは 1.26kHz となる。これは前述の図 1 や図 6 の 1.25kHz バンドのピークに近くなることから NA 形波打車輪でもこのモードが音響放射上、特に重要となるモードであることがこの結果より分かる。FEM 解析では 5kHz までの比較で両者とも類似のモードが得られるが、NA 形波打車輪の固有振動数は A 形と比較して低くなる傾向にある。その理由として NA 形はウェブのオフセットが大きく、半径方向の剛性が低いことが考えられる。

このように車輪単体(φ860)の FEM モデルは、解析結果より音響パワーに重要な Mode II に関して精度の良い結果が得られることが分かった。

4. まとめ

走行試験と車輪定置加振試験による振動や騒音測定等を実施し、車輪の板部形状による音響特性と転動音低減策の検討などに関して以下の知見を得た。

(1) 新品車輪の騒音を狭帯域周波数スペクトルで比較すると、

と 1.9kHz 付近で NA 形波打車輪が A 形波打車輪より大きく、1.25kHz 付近では車輪への径方向加振により生じる振動: Mode II の放射音が、転動音の主成分となっている。

(2) 振動と音響パワーのピークは、ほぼ同じ周波数で現れることから、車輪の振動から近傍への音響放射を生じていることが分かった。

(3) 車輪は面内・面外放射型振動モードでの音響パワーが最も大きい。

(4) 車輪単体の FEM モデルは放射型モードには定置試験結果とよく一致する。波打車輪の振動と音響パワーは、普通車輪と比較して 1.25k~1.5kHz 付近で大きなピークを持つ。

(5) 車輪板部(ウェブ)形状とリム厚によって音響パワーに影響する振動モードが変化することが分かってきた。

これらの結果を踏まえ、転動音低減のための低騒音車輪には、

- ・リムとボス部のオフセットを小さくすること。
 - ・リムの質量を軽くすること。
 - ・ウェブの板厚を厚くすること。
 - ・半径方向の波打板部形状の高さを低くすること。
 - ・周方向の波打板部形状の高さを高くすること。
- などが有効であると考えられる。

5. おわりに

今後は更に解析及び試験を実施し、車輪振動放射音の解明と低騒音車輪の検討を進める。

(1) 構造・音場連成解析 (FEM+BEM 解析)

FEM モデルをベースとし、車輪に関する境界要素法解析 (3 次元空間での音響放射の解明) を進める。

(2) 各種車輪形状の定置試験 (実験モード、音響パワー) を進め、形状と音響放射特性の関係をさらに調査し、低騒音車輪の板部形状を検討する。

本研究を進めるにあたり、ご協力を頂いた JR 各社と住友金属工業(株)及び南秀樹氏(旧車両振動室長、現住友金属工業(株))に感謝する次第である。

参考文献

- (1) 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)
- (2) 佐藤他: 近距離場音響ホログラフィによる音源の可視化—一定常 STSF, 非定常 STSF—, 騒音制御, Vol. 24, No. 5, pp. 303-308 (2000)