

台上試験と実車走行試験によるきしり音の特性評価

末木 健之* 川口 二俊* 清水 康博*
北川 敏樹* 金元 啓幸** 葛田 理仁**

Evaluation of Railway Curve Squeal Noise Using Roller Rig and Running Tests

Takeshi SUEKI Tsugutoshi KAWAGUCHI Yasuhiro SHIMIZU
Toshiki KITAGAWA Hiroyuki KANEMOTO Masahito KUZUTA

Roller rig tests were performed to investigate the characteristics of curve squeal. Running tests with an actual train were also carried out to validate the results of the rig tests. Curve squeal noises and related wheel vibrations were observed in both the roller rig and the running tests. The tonal peak frequencies due to curve squeals coincided with each other in both tests. However, the magnitude of the noises and vibrations in the rig tests was much larger than those in the running tests. The vibration characteristic of the rollers of the rig may be the reason for the disagreement of the magnitude.

キーワード：きしり音，台上試験，実車走行試験，車輪振動，レール振動

1. はじめに

鉄道車両が急曲線を通過する際に発生するきしり音は、沿線騒音に対する苦情の原因のひとつであり、その低減が求められる。きしり音の特性を調べる場合には、実車を用いた走行試験が確実なデータを得られる方法であるが、実施に伴う費用や時間の観点から、他の方法による評価も求められる。その一つとして実物車輪を用いた台上試験が考えられるが、実車試験との整合性は確認されていない。

そこで、本研究では軌条輪上に設置された実物輪軸を用いた台上試験を行い、転動速度やヨー角（アタック角）によるきしり音や関連する車輪振動の特性を評価する。さらに台上試験結果と実車走行試験で得られた結果の比較を行い、その整合性について検証を行う。

2. 台上試験および実車試験の概要

2.1 台上試験概要および試験条件

本研究で行った台上試験の状況を図1に示す。この台上試験機では、2つの軌条輪上に実物の輪軸を設置し、軌条輪を回転させることで走行状態を模擬することが可能である¹⁾。軌条輪の車輪と接触する部分の形状は、60kg レールの頭頂部と同形状である。なお、この試験機は車輪・レール間に作用するクリープ力の測定を目的に製作されたものであるが、きしり音も発生することか

ら、台上試験の試験機として使用することとした。

台上試験では、図1に示すように輪軸にヨー角を設定することが可能であり、輪軸のアタック角を再現することが出来る。ヨー角が正の場合は、図1の左側車輪が外軌側相当となり、右側車輪が内軌側相当となる（ヨー角が負の場合は、それが入れ替わる）。本研究では、常に図1の左側車輪を測定対象とし、ヨー角の正負を切り替えることで外軌側相当と内軌側相当を模擬した。

車輪はC形平板車輪を使用し、軸重として60kNを載荷した。軌条輪の頭頂面は乾燥状態とした。試験条件として、ヨー角を5条件（-1, -0.5, 0, +0.5, +1°）、転動速度を3条件（5, 15, 30km/h）設定した。これらのヨー角と転動速度は、次節で述べる実車走行試験に概ね対応する値である。

2.2 実車走行試験概要および試験条件

実車走行試験は、鉄道総研の構内試験線において行った²⁾。図2に示すように、通勤型の試験車両1両（付随車）を機関車でけん引した。本試験における最高速度は33km/hである。機関車から発生する騒音の影響を避けるため、進行方向後ろ側の第2台車（前軸がC形平板車輪、後軸がNA形波打車輪）を対象とした。

試験条件として、列車の速度を6条件（約5, 10, 15, 20, 25, 30km/h）とし、きしり音が発生する曲線（曲線半径160m, バラスト軌道, 50Nレール, 木まくらぎ）を通過した際の車輪振動と放射音を収録した。試験時の軸重は約54kN, レール頭頂面は乾燥状態であった。また、比較として直線区間（バラスト軌道, 50Nレール, PCまくらぎ）を通過した際の車輪振動と放射音も収録

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

** 鉄道力学研究部 車両力学研究室

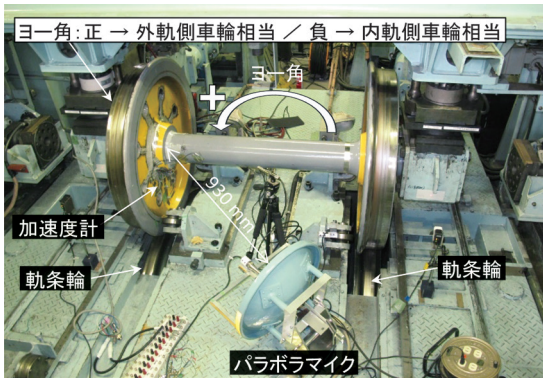


図1 台上試験



図2 実車走行試験

した。

なお、当該曲線の通過の際には、対象台車の前軸からきしり音が強く発生し、後軸ではほとんど発生しなかった²⁾。そのため、本研究では前軸の車輪を対象とする。

2.3 センサ設置位置

本研究では、車輪の加速度と車輪から発生する放射音を測定した。

2.3.1 車輪振動

車輪振動は、車輪板部に加速度センサを設置することで得た。各試験における加速度センサの設置位置を図1～図3に示す。

台上試験においては、図1の左側車輪を対象としたため、加速度センサは片側車輪のみに設置した。実車試験においては、図2に示すように第2台車の前軸の左右車輪に設置した。図3に示すように、両者の試験において車軸中心から加速度センサまでの距離がやや異なるが、きしり音の主な周波数域である8kHz付近までは両者の振動特性が概ね一致することを衝撃加振試験により確認している（1k～5kHzの結果については後述の図9(a)を参照されたい）。

2.3.2 車輪の放射音

車輪放射音については、実車試験と台上試験とで設置

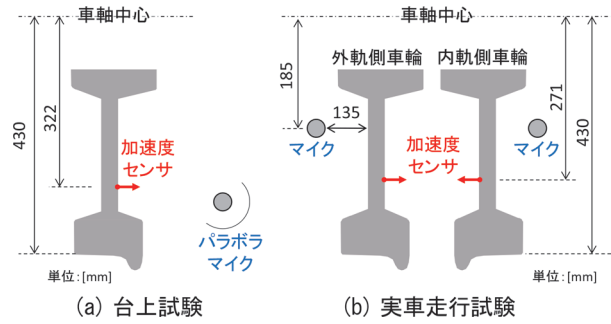


図3 センサ類の取り付け位置

方法や使用するマイクロホンの特性が異なる。

台上試験においては、図1および図3(a)に示す様に反射板を有するマイクロホン（以下、パラボラマイク³⁾を設置した。台上試験機が設置されている場所は反響が大きい空間であり、また軌条輪から発生する音も存在する。そのため、指向性の高いパラボラマイクを用いて車輪の放射音を可能な限り抽出した。実車試験においては図2および図3(b)に示す様に、車輪近傍に設置した無指向性マイクロホンにより測定を行った。

このように台上試験と実車走行試験ではマイクロホンの設置位置も異なり、さらに指向特性の違いもある。そのため、音圧レベルの大きさについては両試験間で直接的な比較ができない。また、パラボラマイクはその特性上、異なる周波数間での音圧レベルの比較も不可能である。このことを踏まえ、第3章で述べる車輪放射音の結果については、周波数や条件変化による変化量にて検討を行う。

3. 試験結果

3.1 車輪振動の周波数分析結果

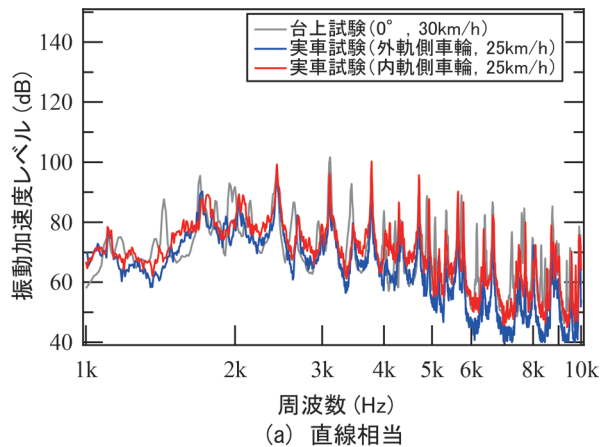
図4に外軌側車輪と内軌側車輪それぞれの車輪振動の周波数分析結果を示す。また、図4では直線区間に対応する結果についても示した。直線区間での結果は、きしり音ではなく転動音に関連する振動に相当する。転動速度・列車速度は約30km/hである。

両試験ともサンプリング周波数51.2kHzでデータの収録を行い、台上試験については4096点ずつのFFT分析結果を約30秒間分算術平均した結果、実車走行試験については1列車がきしり音の発生する箇所を通過した時のデータ（5m程度相当）を8192点ずつFFT分析した後にパワー平均し、さらに5列車分で算術平均した結果である。両試験で周波数の分解幅が異なるためパワースペクトル密度で算出した。

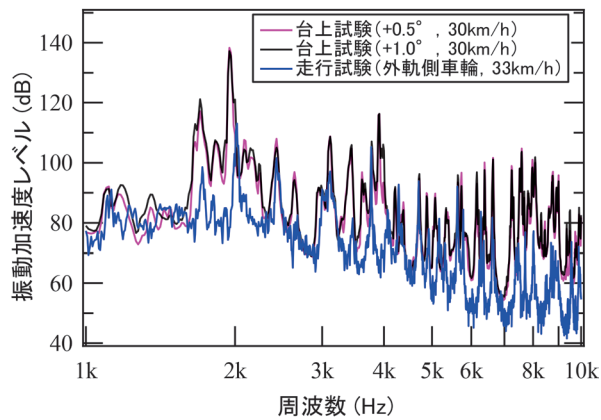
図4(a)の直線区間に相当する結果では、実車試験と台上試験の車輪振動は、ピークが観測される周波数や振動加速度レベルが良く一致することがわかる。したがっ

て、車輪に起因する転動音成分について、台上試験により実際の状態を再現できるものと考えられる。なお、転動音は車輪踏面とレール頭頂面の凹凸の状態に起因することから、今回の結果では台上試験と実車試験とで凹凸の状態が同程度であったと考えられる。

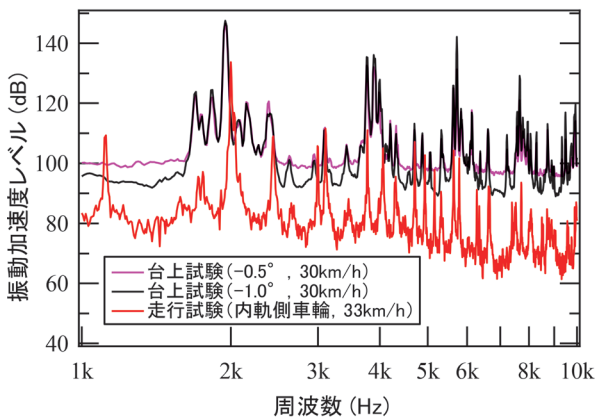
次に、図4(b)および図4(c)の曲線区間に相当する結果では、台上試験の振動加速度レベルが実車試験よりも著しく大きいことがわかる。また、内軌側・外軌側に関係なく多くのピークが観測される。このピークは、台上試験では特に2kHz付近や4kHz付近が大きく、実車



(a) 直線相当



(b) 曲線・外軌相当



(c) 曲線・内軌相当

図4 車輪振動の周波数分析結果(約30km/h)

試験では2kHz付近が大きい。また、例えば1.8kHz付近や2.1kHz付近のように、実車試験では観測されない(もしくは極めて小さい)ピークが、台上試験では観測されるのが特徴である。

台上試験結果については、ヨー角を0.5°から1°(または-0.5°から-1°)へ変更しても、ピークの周波数やその大きさの変化が少ない。3.4節においても述べるが、0.5°の時点で著大な振動となっており、振動の大きさは飽和するような結果となっている。

内軌側車輪と外軌側車輪について、主要な周波数である2kHzのピークの大きさを比較すると、台上試験の内軌側車輪は外軌側車輪よりも10dB程度大きい。実車試験についても同様の結果が得られており、内軌側車輪は外軌側車輪より10~15dB程度大きい結果が得られた。

3.2 車輪放射音の周波数分析結果

図5に外軌側車輪と内軌側車輪それぞれの車輪放射音の周波数分析結果を示す。3.1節の車輪振動の結果と同様に、図5では直線区間に対応する結果についても示し、これは転動音に相当する。転動速度・列車速度も図5の車輪振動と同様に約30km/hである。

解析方法については、3.1節にて述べた車輪振動と同じ方法とした。

図5(a)の直線区間に相当する結果では、台上試験と実車試験で観測されるピークの周波数はほぼ一致している。音圧レベルについては、2.3.2項で述べたように単純比較できないが、図4(a)の車輪振動の結果を考慮すると台上試験と実車試験で同程度であると推定される。

図5(b)および図5(c)の曲線区間に相当する結果では、台上試験の音圧レベルが直線相当よりも著しく大きくなる。ピークが観測される周波数も図4(b)および(c)の車輪振動と同一であり、車輪振動に起因してきしり音が発生することがわかる。

放射音についても車輪振動の結果と共通する傾向が得られており、多くのピークが観測される点や、実車試験では観測されない(もしくは極めて小さい)ピークが台上試験では観測される点が挙げられる。また、台上試験においてヨー角によるピークの周波数やその大きさの変化は少ない点や、主要な周波数である2kHzのピークの大きさは内軌側車輪が外軌側車輪よりも10dB程度大きいという点も車輪振動と共通する点として挙げられる。

3.3 主要な周波数における速度依存性

3.1節および3.2節では転動速度・走行速度約30km/hの周波数分析結果について述べた。本節では図4と図5において主要と考えられるピークの周波数成分について、転動速度・走行速度に対する依存性を調べる。

図6および図7は、2kHz付近と4kHz付近の振動加

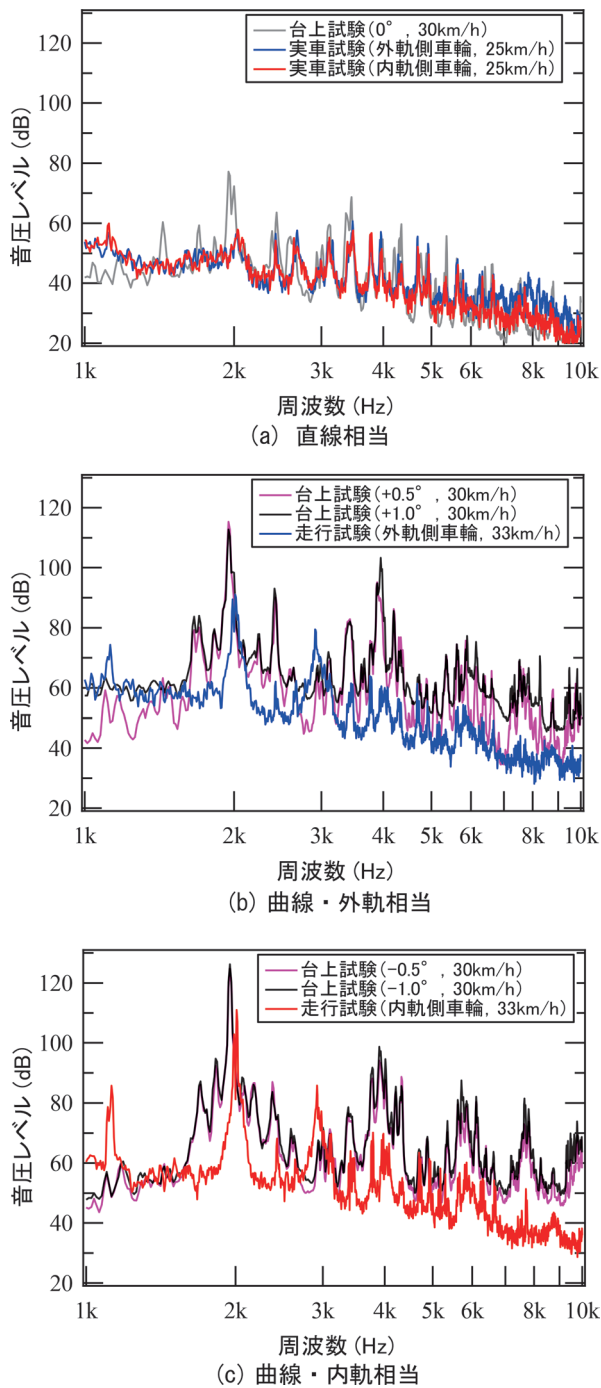


図5 車輪放射音の周波数分析結果（約30km/h）

速度レベルと音圧レベルについて、速度による変化を示した結果である。これらの結果は、2kHz付近は1950～2050Hz、4kHz付近は3950～4050Hzのパワー和を周波数の分解幅も考慮して算出した結果である。なお、図6(c)の台上試験における5km/hと15km/hの測定結果は欠測である。

図6(a)および図7(a)より、直線相当の場合は台上試験も実車走行試験も速度の増加に従って振動加速レベルや音圧レベルが増加する。図7(a)の音圧レベルで考えると速度乗則は約3乗（速度2倍で9dB増加）とな

り、転動音の速度乗則と合致する。

一方、図6(b)および(c)と図7(b)および(c)より、曲線相当の場合は直線相当とは様相が大きく異なる。台上試験では、低速の5km/hの時点で大きな車輪振動や車輪放射音が発生しており、実車試験よりも著しく大きいことがわかる。また、台上試験では、速度の増加に対して車輪振動や車輪放射音が飽和する場合や減少する場合も見られる。実車走行試験では、速度の増加に対して車輪振動や車輪放射音が増加する傾向にあり、車輪振動の2kHzの結果であれば15km/h以上で台上試験と実車走行試験の結果が同程度の大きさとなる場合がある。

3.4 主要な周波数におけるヨー角依存性

図8は図6の結果を基に台上試験の車輪振動についてヨー角で整理した結果である。

この結果より、角度がわずかに付くだけでも車輪振動が著しく増大することがわかる。内軌相当か外軌相当かに関係なく、 $0^\circ \rightarrow 0.5^\circ$ の変化よりも $0.5^\circ \rightarrow 1^\circ$ の変化の方が増加量が小さく、特に2kHzでは振動加速度レベルが飽和する結果となっている。

4. 台上試験と実車走行試験の差異について

第3章で得られた結果を踏まえると、台上試験ではきしり音が発現する周波数を再現することは可能と考えられるが、車輪振動や振動に起因する放射音の大きさは速度帯や周波数により過大評価となる可能性がある。

ここで、図9(a)に台上試験と実車試験で使用した車輪の振動特性を示す。この結果は衝撃加振試験により得られた結果である。図9(a)より、両者の振動特性はほぼ一致しており、車輪が異なることによる差異ではないことがわかる。

したがって、この差異は車輪・レール間に作用する力が異なることに起因すると考えられる。その要因として、①台上試験と実車試験でヨー角（アタック角）が異なる可能性があること、②摩擦係数が異なる可能性があること、③台上試験は軌条輪を使用していること、が挙げられる。

①のヨー角（アタック角）については、実車試験の当該曲線では30km/h以下であれば $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 程度であることがわかっており、図8に示すヨー角による差を考えると、その影響は小さいと考えられる。

②の摩擦係数については、乾燥と湿潤のような違いであれば摩擦係数も大きく異なり、きしり音は劇的に変化する²⁾。台上試験は5月に室内で実施し、実車走行試験は7月に屋外で実施したという差はあるが、両試験とも気温 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 、湿度 $70 \sim 100\%$ で共に乾燥状態である。そのため、摩擦係数に大きな違いは無いものと考えられる。

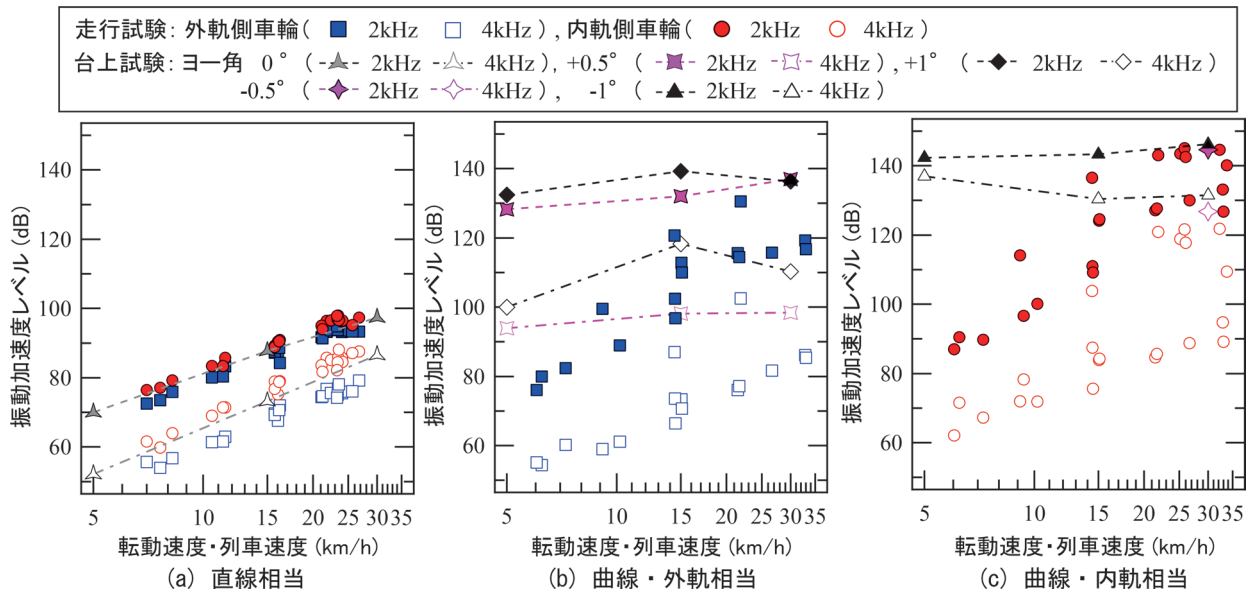


図6 主要な周波数の車輪振動の速度依存性

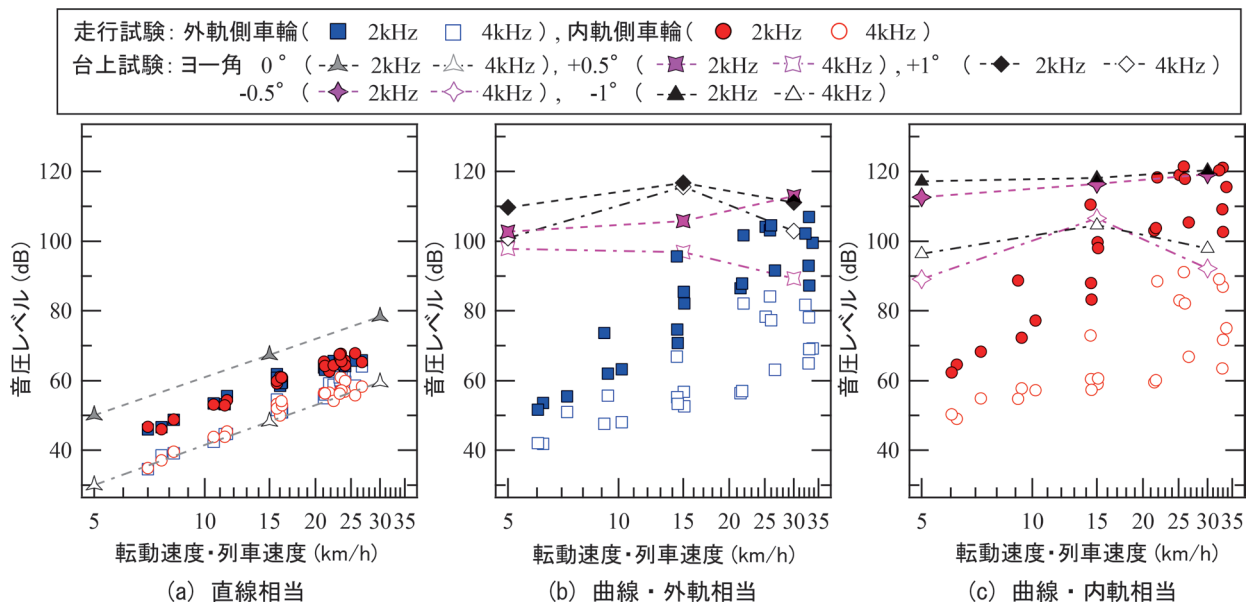


図7 主要な周波数の車輪放射音の速度依存性

③については、図10に示すように、軌条輪とレールとで構造自体が大きく異なる。図9(b)および(c)に示す振動特性をみると、レールには明確なピークが存在しない一方で、軌条輪には明確で大きなピークが存在する。

図9(a)および(c)に示す車輪と軌条輪の振動特性をみると、例えば2kHz周辺では、車輪と軌条輪は極めて近い周波数においてピークを持つ(すなわち、近い固有振動数を持つ)ことがわかる。3.1節で述べた台上試験の車輪振動の測定結果(図4)を見ると、2kHz周辺で軌条輪の固有振動数に起因すると考えられる周波数においてピークが観測される。一方で、実車走行試験の2kHz周辺では、2kHzを除きピークはほとんど観測さ

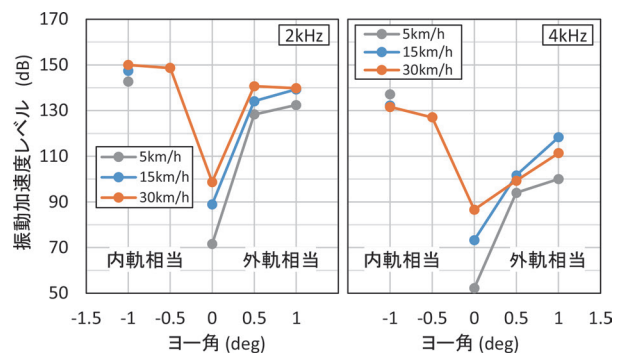
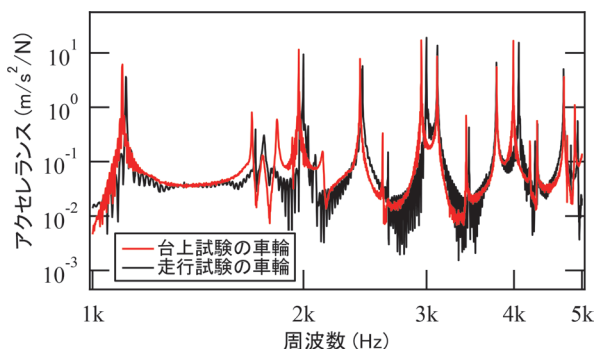
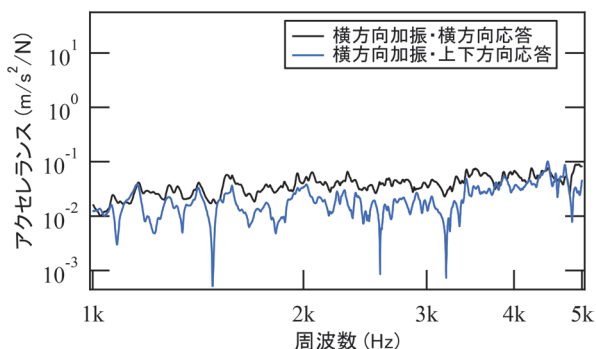


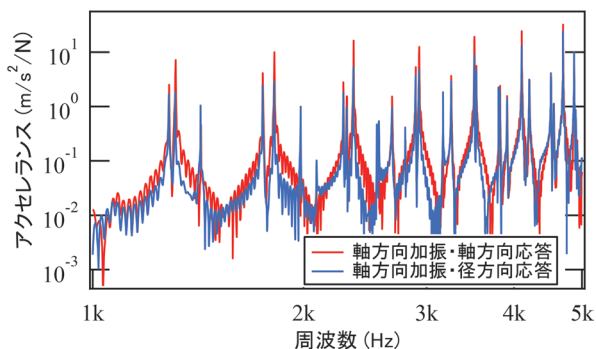
図8 車輪振動のヨ一 角の依存性



(a) 車輪のタイヤ部を軸方向に加振した場合の各車輪の加速度センサの応答



(b) レール頭頂面付近を加振した場合の応答



(c) 軌条輪のレール頭頂面相当付近を加振した場合の応答

図9 車輪・レール・軌条輪の振動特性

れない。

ここで、鉄道総研が研究を進めているきしり音に係る解析モデルの概略図⁴⁾を図11に示す。このモデルでは、車輪とレールの振動が相互に影響する。そのため、車輪振動に対してレール（あるいは軌条輪）の振動特性が影響する可能性を示している。なお、本解析モデルの妥当性については、縮尺模型での検証により解析モデルと実験結果が概ね一致する結果が得られている⁴⁾。また、縮尺模型実験の結果であるが、レールに相当する側の振動特性を変更することで、車輪に相当する側の振動が変化することを確認している⁵⁾。

以上のことから、台上試験と実車走行試験の差異は、レール側の振動特性に起因する可能性がある。現在、台上試験におけるパラメータをこの解析モデルに導入し、

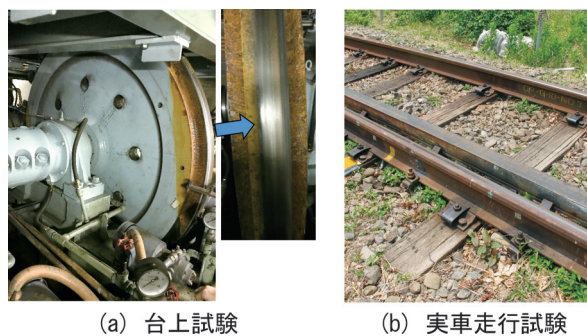


図10 レール側の構造の違い

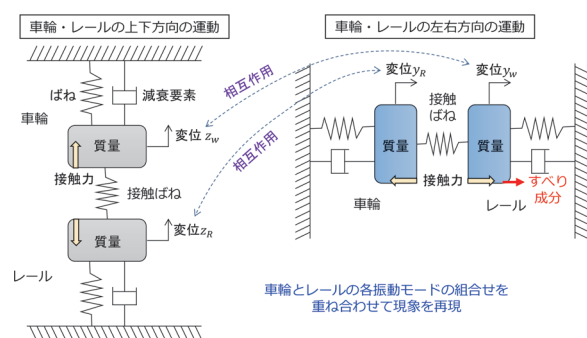


図11 きしり音の解析モデルの概略図

きしり音に係わる車輪振動の大きさや周波数の整合性について検討を進めている。

5. まとめ

実物輪軸を用いて軌条輪上での台上試験を行い、きしり音と関連する車輪振動の評価を行った。また、実車走行試験との整合性について検証を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・台上試験ではきしり音が発生し、2kHz付近や4kHz付近等で大きいことや、内軌側車輪が大きい傾向を確認した。これらの特徴は、実車試験でも観測された。
- ・台上試験では、速度やヨー角（アタック角）の増加に対してきしり音や車輪振動は一樣に増加せず、飽和する傾向や減少する傾向も見られた。
- ・車輪振動や車輪放射音に関して、実車走行試験では観測されない周波数のピークが台上試験で確認された。これは、軌条輪の振動特性が影響した可能性がある。
- ・実車走行時のきしり音に関する評価は、台上試験により可能であると考えられる。ただし、発生する周波数は一致するが、車輪振動や車輪放射音の大きさは過大評価となる可能性がある。

文 献

- 1) 土井久代：車輪とレール間のクリープ力, RRR, Vol.65, No.8, pp.6-9, 2008
- 2) 清水康博, 末木健之, 川口二俊, 北川敏樹, 金元啓幸, 葛田理仁：実車を用いたきしり音の特性に関する実験的検討, 鉄道総研報告, Vol.35, No.6, pp.6-17, 2021
- 3) 川口二俊, 末木健之, 北川敏樹：高速鉄道の曲線区間で発生する高周波音の音源別寄与度評価, 鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.41-46, 2020
- 4) 末木健之, 清水康博, 北川敏樹：回転二円板装置を用いた鉄道のきしり音に関する検討（物理モデル編）, Dynamics and Design Conference 2021（D&D2021）講演論文集, No.316, 2021
- 5) 清水康博, 末木健之, 北川敏樹：回転二円板装置を用いた鉄道のきしり音に関する検討（実験編）, Dynamics and Design Conference 2021（D&D2021）講演論文集, No.317, 2021