

# 在来線車両走行時の騒音発生に関わる車輪振動特性

村田 香\* 長倉 清\*

## Vibration Characteristics of a Wheel of a Running Railway Vehicle

Kaoru MURATA Kiyoshi NAGAKURA

It is necessary to understand the vibratory properties of a track and a wheel in order to evaluate the rolling noise. In this paper, focusing on the vibration of a wheel, we measured the acceleration of the corrugated wheel by an impact test. Then we measured the acceleration of the wheel of a test vehicle which was running on a narrow gauge track by using accelerometers temporarily placed on the tire and web of the wheel. In addition, we investigated the vibratory characteristics of a wheel when it had a flat or it passed a turnout.

キーワード：車輪振動，NA 形波打車輪，在来線現車試験，車輪踏面フラット，分岐器

### 1. はじめに

鉄道車両が走行するときのレール・車輪間から発生する転動音を予測するためには、レール頭頂面・車輪踏面の凹凸およびレール・車輪の振動特性を把握する必要がある<sup>1), 2)</sup>。これらのうち、レール・車輪の凹凸については現地での測定例が数多くあり、発生する転動音との関係が検証されている<sup>3)</sup>。また、レール振動については、衝撃加振試験の結果をもとに振動特性をあらわすモデルが提案されており、これらのモデルを用いた計算値と実車走行時のレール振動の実測値との比較検証が進められている<sup>4)</sup>。一方、車輪の振動特性については衝撃加振試験や有限要素法による数値計算に基づいた検討事例<sup>5)</sup>はあるものの、回転する車輪に加速度計を設置して直接車輪の加速度を測定した事例は少ない。以上の点から、本報告では車輪の振動に着目し、定置における衝撃加振試験による車輪の振動特性に加え、実際に走行する鉄道車両の車輪に加速度計を仮設して回転する車輪の振動特性を把握し、衝撃加振試験結果と比較した。さらに、車輪踏面にフラットが生じた場合や、車輪が分岐器を通過するときに受ける衝撃的な加振による振動の特性についてもあわせて報告する。

### 2. 車輪の衝撃加振試験

在来線車両のNA形波打車輪（車輪径860mm，踏面勾配1/20）に加速度計を設置し、インパルスハンマを用いて径方向，軸方向に加振して固有振動数，周波数応答関数（アクセラランス＝単位力あたりの加速度，[m/s<sup>2</sup>/N]）

を測定した。図1に加速度計の設置位置を示す。また、図2に示すとおり、衝撃加振試験は車輪をジャッキで持ち上げ、荷重がかからない状態で実施した。打撃方向は径方向，軸方向とし、径方向の場合は車輪踏面中心，軸方向の場合はタイヤ部中心を加振点として45°間隔で0°～180°の範囲を加振した。解析条件はサンプリング周波数を25600Hz，サンプリング点数を32768点とし、窓関数は矩形窓である（ $\Delta f=0.78\text{Hz}$ ）。解析上限周波数は10kHzであるが、本衝撃加振試験は第3.1節で後述する走行試験の車輪振動測定と同様にテレメータを介して測定しており、その上限周波数である5kHzが有効な解析上限周波数となる。NA形波打車輪のタイヤ部を径方向，軸方向に加振したときの加振点直近におけるアクセラランスを図3に示す。図3で示される個々のピークは車輪の固有振動モードに対応する<sup>5)</sup>。

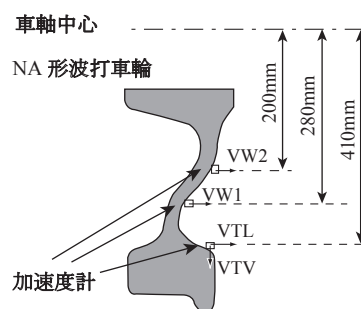


図1 加速度計設置位置

### 3. 走行中の車輪振動測定

#### 3.1 測定概要

衝撃加振試験と同様、在来線車両のNA形波打車輪のタイヤ部および板部の、図1に示した箇所に加速度

\* 環境工学研究部 騒音解析研究室

特集：環境技術

計 (PCB 社製 352C23 型 (一軸), 356A01 型 (三軸)) を仮設し, その出力先を車軸に堅固に固定したデータレコーダのテレメータまで配線した。加速度信号はテレメータから発信された無線を介して受信アンテナで受信し, 車内の受信器を通じてデータレコーダ (SONY 社製 PC216) に収録した (サンプリング周波数 = 24kHz)。なお, テレメータの仕様により, 本測定では 5kHz が測定の上限周波数である。本現車試験における測定車輪の位置を図 4 に, 測定系を図 5 に, 台車付近における測定機器の仮設状況を図 6 に示す。

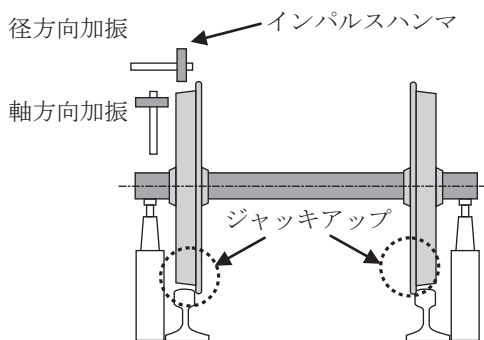


図2 車輪の衝撃加振試験

3.2 通常の走行状態における測定結果

車両がバラスト軌道の在来鉄道営業線 (60kg レール, ロングレールの直線区間) を走行しているときの車輪各部の振動加速度パワースペクトル密度を図 7 に示す (観測時間約 2.7 秒, 32 分割セグメントを 50% 重ね合わせ, 63 回平均,  $\Delta f=11.7$ [Hz])。走行速度は 30km/h ~ 110km/h のうち, 35km/h, 65km/h, 100km/h の 3 ケースを代表として示す。なお, 本測定結果は同一箇所を走行したときではないが, 営業線の軌道状態はほぼ一様に管理されていることを考慮し, 軌道の振動特性およびレール凹凸はほぼ同一とみなす。図 7 の結果から, 以下のことが推察できる。

- (1) すべての測定点において, ピークとなる周波数は速度によらずほぼ一定となる。
- (2) すべての測定点において, 速度が上昇するにしたがい, ピークとなる周波数における振動加速度パワースペクトル密度の値が大きくなる。
- (3) タイヤ部径方向の振動加速度 (VTV) およびタイヤ部, ウェブ部の軸方向振動加速度 (VTL, VW1, VW2) と図 3 (a) に示した径方向加振による径方向のアクセラランスを比較すると, ピークとなる周波数の傾向がおおむね一致する。したがって, 走行時の加振力は主に鉛直方向に働いているものと推定される。

なお図 7 (c) において速度 100km/h では 1kHz 以下の VW1 のピークが埋没しているが, 同時刻に測定され

た他の測定点や VW1 でも速度が低い場合にはピークが確認できることから, 当該事例では測定の際のノイズによるものと思われる。

次に, 列車速度 30km/h ~ 110km/h の範囲でバラスト軌道を安定して走行しているときのデータを抽出し, 列車速度と車輪振動の関係を調べた。車輪振動のデータに

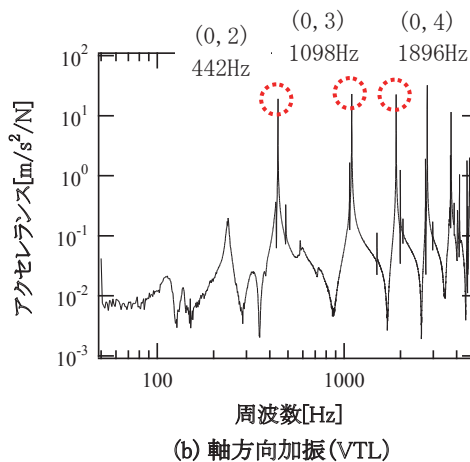
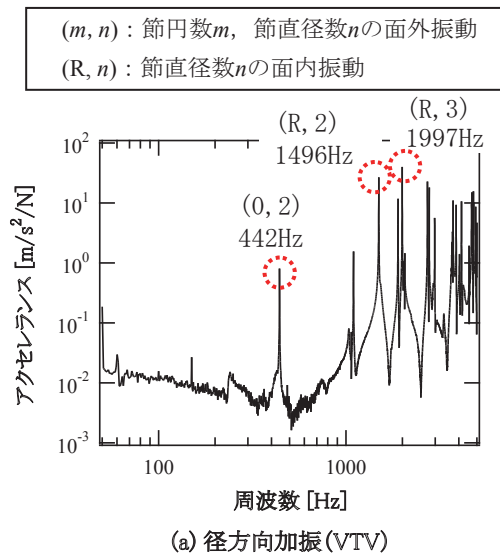


図3 NA形波打車輪のアクセラランス

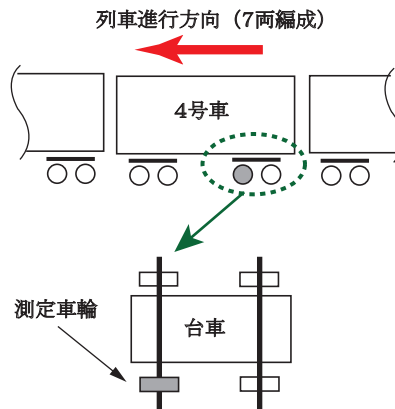


図4 編成における測定車輪の位置

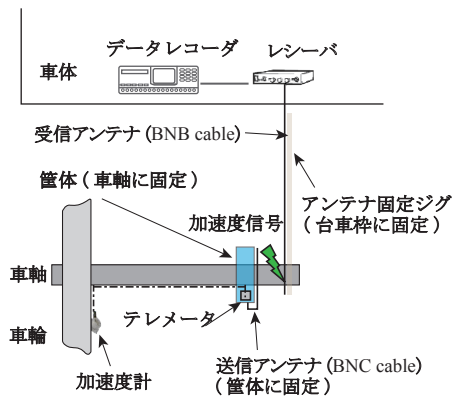


図5 車輪振動加速度の測定系

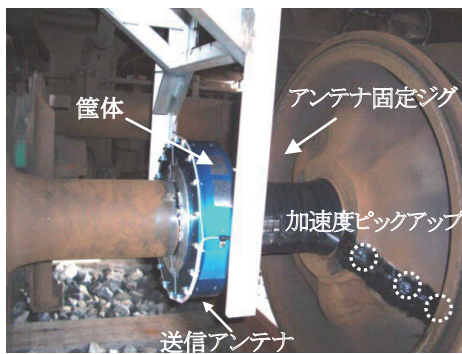


図6 測定機器の仮設状況

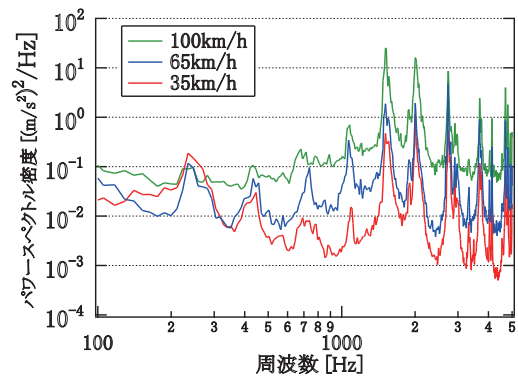
については、車輪放射音と関連をつけるために、振動加速度から A 特性振動速度レベルに変換した。縦軸に各 A 特性振動速度レベル、横軸に列車速度をとってプロットした結果を図8に示す。図8より、すべての測定点について、車輪振動速度レベルは速度の2.8乗～3.5乗則に従うことがわかる。この結果より、車輪各部から放射される音についても2.8乗～3.5乗程度の速度依存性があると考えられる。

### 3.3 車輪踏面にフラットが存在する場合の測定結果

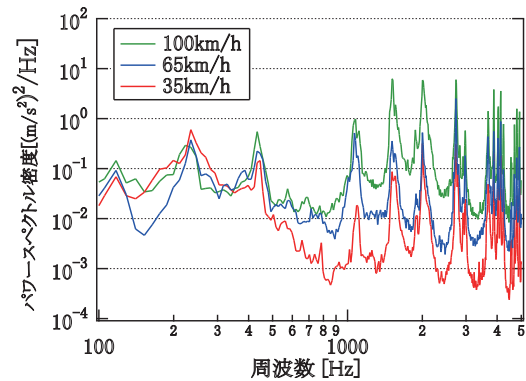
本試験の実施中、加速度計を仮設した車輪の滑走にともない、車輪踏面に図9に示すような楕円形状のフラットが発生した。フラットにより車輪、レールに衝撃的な力が働くが<sup>6)</sup>、以下に車輪踏面にフラットが生じた場合の車輪の振動特性について述べる。

図10に列車速度が100km/hの場合のタイヤ部水平方向(VTL)の振動加速度の時系列波形を示す。車輪踏面にフラットが生じると、フラット部と接触する時に著しい加振力を受けるため一定時間間隔(車輪直径0.86m、列車速度100km/hの場合、 $0.86 \cdot \pi / (100/3.6) \approx 0.1[s]$ )で加速度が大きくなることわかる。

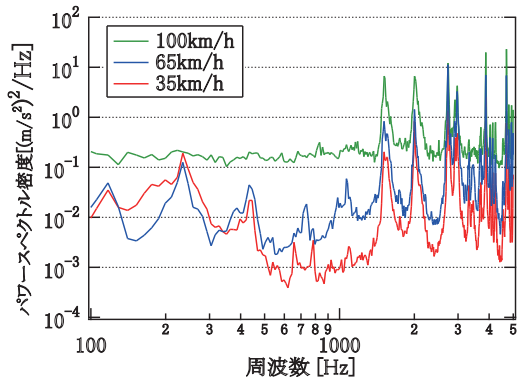
第3.2節と同様の方法でパワースペクトル密度を算出し、フラットのない場合と比較した結果を図11に示す(列車速度が65km/hの場合)。フラットのある場合と



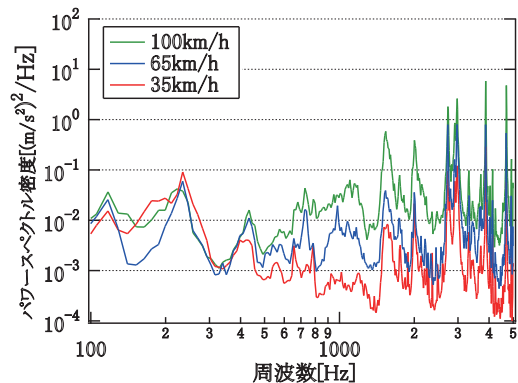
(a) タイヤ部径方向振動加速度 (VTV)



(b) タイヤ部軸方向振動加速度 (VTL)



(c) ウェブ部(車軸側)軸方向振動加速度 (VW1)



(d) ウェブ部(タイヤ側)軸方向振動加速度 (VW2)

図7 車輪の振動加速度パワースペクトル密度

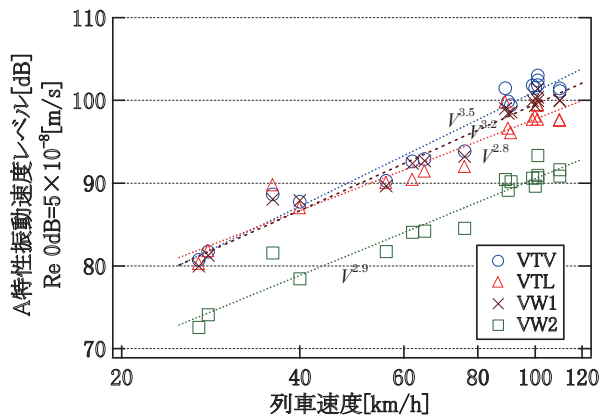


図8 車輪の振動速度の速度特性

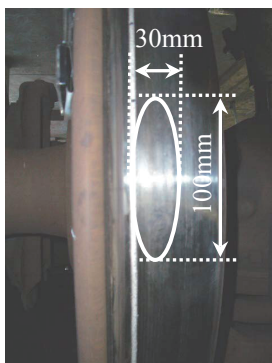


図9 車輪踏面に発生したフラットの概況

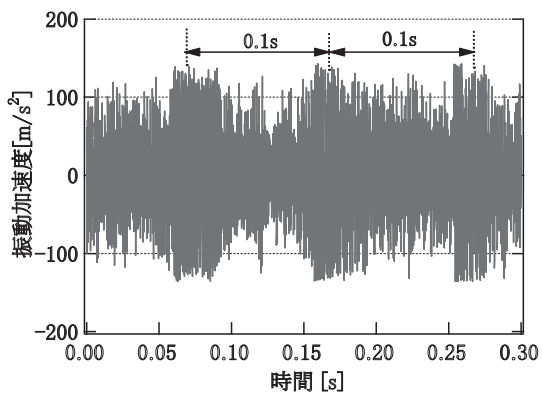
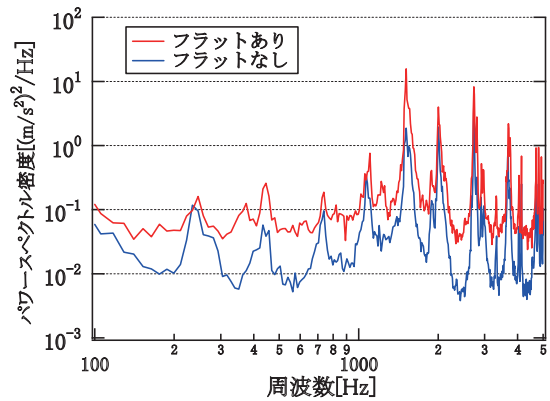


図10 フラットがある車輪の振動加速度の時系列波形 (タイヤ部軸方向 (VTL), 列車速度 100km/h)

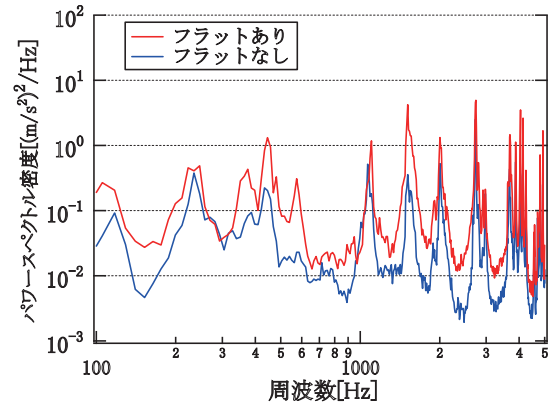
ない場合では走行している区間は異なるが、両方ともバラスト軌道である。ここで、図11に示されているフラットのある場合の値は、フラットによる衝撃的な加速度を含めた観測時間2.7秒の平均的な加速度のパワースペクトル密度を意味することに注意する必要がある。

以下、フラットが発生したときの車輪の振動特性について推察されることを述べる。

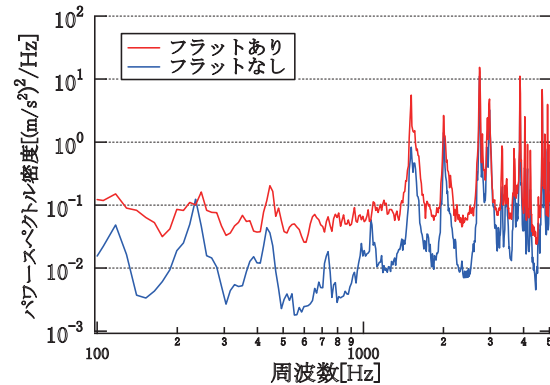
- (1) 径方向、軸方向ともに、すべての測定点においてフラットが生じることによって新たな周波数でピークが発生することはない。



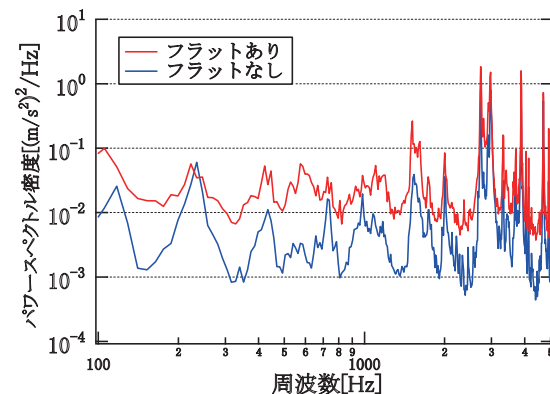
(a) タイヤ部径方向(VTV)



(b) タイヤ部軸方向(VTL)



(c) ウェブ部(車軸側)(VW1)



(d) ウェブ部(タイヤ側)(VW2)

図11 フラット有無による振動加速度の比較 (列車速度 65km/h, バラスト軌道)

(2) ピークが観測される周波数を含め、ほぼすべての周波数において、タイヤ部、ウェブ部、径方向、軸方向を問わず、フラットがある場合の方がない場合に比べて振動加速度が大きい。

ここで、フラットがある場合の車輪振動の速度依存性を調べるために、フラットがない場合と同様、A特性振動速度レベルを縦軸に、列車速度を横軸にとってプロットした結果を図12に示す。図12より、車輪踏面にフラットが存在する場合はすべての測定点について、車輪振動速度レベルは速度の2.5乗～2.7乗則に従い、フラットが存在しない場合とくらべて速度依存性がやや小さい。したがって、走行速度が高い場合の方が低速のときと比べてフラット有無の差が小さく、フラットの影響が小さくなっているものと考えられる。

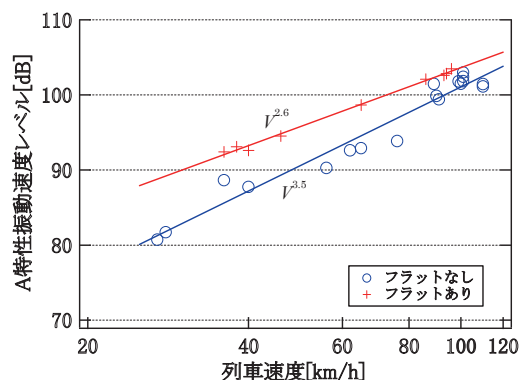
### 3.4 車両が分岐区間を通過する場合の測定結果

車両が分岐区間を通過するときは、車輪に衝撃的な力が作用する<sup>7)</sup>。本節では駅構内付近の分岐区間を走行するときの車輪の振動特性について述べる。なお、この分岐区間通過時には車輪踏面にフラットは発生していない。図13に55km/hで車両がスラブ軌道の分岐区間を通過する前後の1秒間(約15m)のVTV, VTLの時系列波形を示す。図13より、当該区間を通過するときには衝撃的な加振力が主に3回車輪に働いている。これらは継目とクロッシングの乗り移り部に起因するものと推定される。ここで、分岐区間の衝撃加振が発生する箇所のうち、もっとも影響が大きい箇所(図13における時刻0.7[s]付近)について、衝撃加振による車輪の振動加速度パワースペクトル密度を算出して、分岐区間の直前を走行しているときの結果と比較する(分岐区間: 観測時間約0.085[s], 4分割セグメントを50%重ね合わせ, 7回平均,  $\Delta f=46.8$ [Hz]; スラブ区間: 観測時間約0.7[s], 32分割セグメントを50%重ね合わせ, 63回平均,  $\Delta f=46.8$ [Hz])。

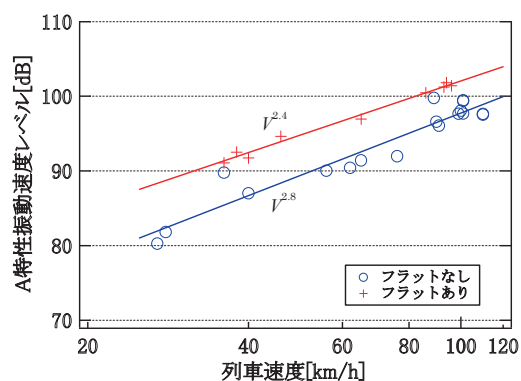
分岐区間の継目部を通過したときのタイヤ部の径方向、軸方向の振動加速度パワースペクトル密度を図14に示す。図14より、分岐区間通過に起因する衝撃的な力により、車輪は径方向、軸方向ともに大きく加振され、幅広い周波数域において両者の差が顕著に現れる。また、フラットが発生した場合と同様、分岐区間通過にともなって新たな周波数でピークが観測されることはない。

## 4. 結論

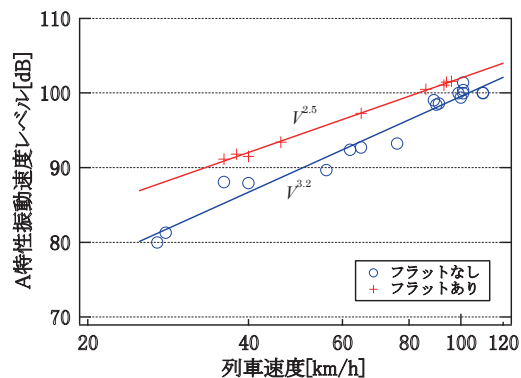
在来線車両の車輪タイヤ部、ウェブ部に加速度計を取り付け、走行中の車輪振動の特性を把握した。また、車輪踏面にフラットが発生したとき、および通常の車輪が



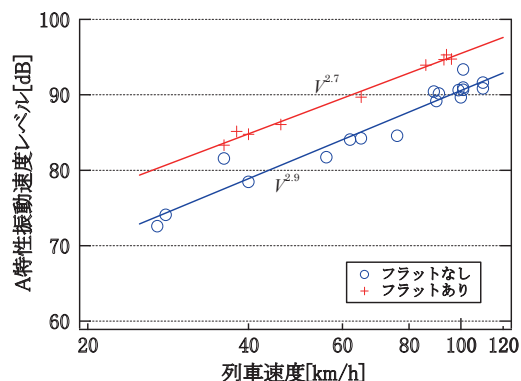
(a) タイヤ部径方向 (VTV)



(b) タイヤ部軸方向 (VTL)



(c) ウェブ部(車軸側) VW1



(d) ウェブ部(タイヤ側) VW2

図12 車輪の振動速度の速度特性 (フラット有無の比較)

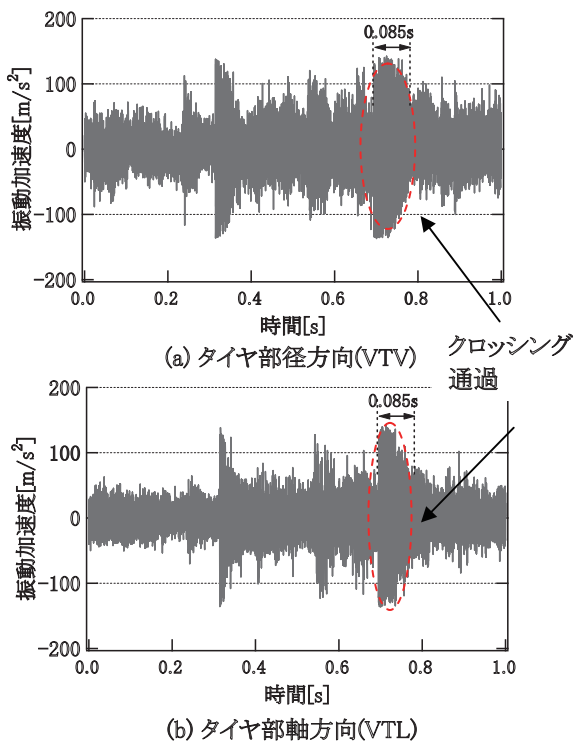


図 13 分岐区間を通過時の振動加速度の時系列波形

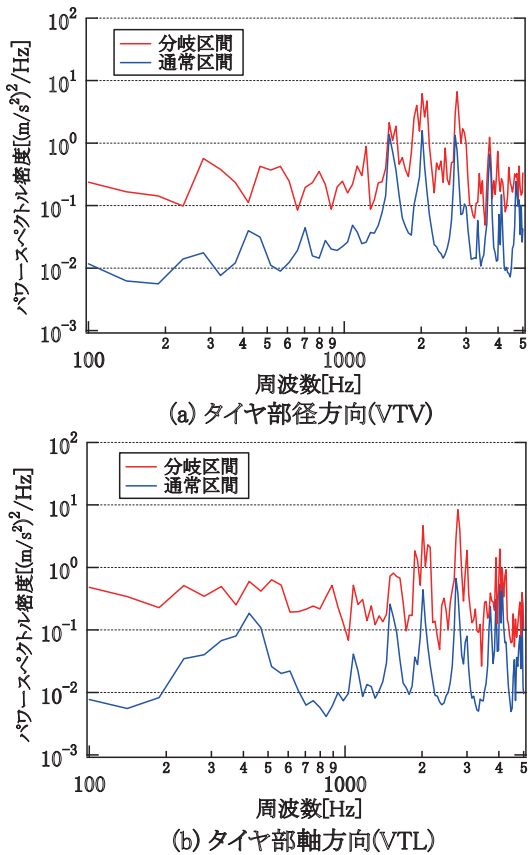


図 14 分岐区間と通常区間の振動加速度の比較 (列車速度 55km/h, スラブ軌道)

分岐区間を通過したときの振動特性もあわせて調査した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 走行試験による車輪の振動加速度のピーク周波数は、径方向、軸方向ともに加振試験における径方向のピーク周波数とほぼ一致し、ピークとなる周波数は走行速度によって変動することはない。
- (2) 30km/h ~ 110km/h の速度域において、バラスト軌道を走行する場合、車輪の振動速度レベルは、タイヤ部、ウェブ部ともに走行速度の 2.8 ~ 3.5 乗則に従う。
- (3) 車輪踏面にフラットが存在する場合とフラットが存在しない場合と比較すると、径方向、軸方向ともにピークとなる周波数に違いは見られない。
- (4) 車輪踏面にフラットが存在する場合、通常時に比べてほぼすべての周波数において車輪振動加速度が増加する。ただし、車輪の振動速度レベルの速度依存性は通常時と比べて小さい (2.5 ~ 2.7 乗則) ため、走行速度が高い方がフラットの影響を受けにくいと考えられる。
- (5) 分岐区間を通過する場合、車輪に衝撃的な力が加えられ、軸方向、径方向ともほぼすべての周波数帯で車輪振動加速度が増加する。また、ピークとなる周波数に違いは見られない。

文献

- 1) P.J. Remington, "Wheel/rail rolling noise: What do we know? What don't we know? Where do we go from here?", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.120, No.2, pp.203-226, 1988.
- 2) D.J. Thompson, "Wheel-rail noise generation, Part1: Introduction and interaction model", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.161, No.3, pp.387-400, 1993.
- 3) 北川敏樹: 「転動音の特性と軌道・車両に係わるパラメータの影響」, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.23-28, 2008
- 4) Toshiaki Kitagawa, D.J. Thompson, "Application and validation of the TWINS model for Japanese Railways", ISVR Technical Memorandum No.919, 2003.
- 5) 上妻雄一, 北川敏樹, 長倉清: 「在来線用鉄道車輪の振動特性に影響を及ぼす形状因子」, 鉄道総研報告, Vo.21, No.3, pp.17-22, 2007
- 6) D.J. Thompson, *Railway Noise and Vibration* ELSEVIER pp.343-358, 2008.
- 7) C.Anderson and T.Dahlberg, "Weel/rail impacts at a railway turnout crossing", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* Vol.212 Part F, pp.123-134, 1998.