

軌条輪模型を用いた鉄道車両の蛇行動特性の解析

伊藤 弘晃[†], 浅田 晴香^{††}, 大津山澄明^{††}

Analysis of Hunting Behavior of Railway Vehicles Using the Roller Rig Model

ITO Hiroaki[†], ASADA Haruka^{††}, OHTSUYAMA Sumiaki^{††}

Abstract

An analysis of railway vehicle behavior was carried out using the roller rig model. In particular, this included checking for hunting. Changing the wheel tread gradient, some experiments were conducted, and a comparison was made with the hunting theoretical value. This was examined in order to optimize the wheel tread gradient. We then examined the effectiveness at low speed on wheel tread inclination of 1/15 and medium speed on that of 1/30.

Key Words: model railway, model vehicle, bench test, roller rig, hunting, wheel tread, vibration analysis

キーワード：鉄道模型，模型車両，台上試験，軌条輪，蛇行動，車輪踏面，振動解析

1. はじめに

鉄道車両は技術の進歩により、安全性および乗り心地の向上が進められている。しかしながら、未だに鉄道事故がゼロになることはない。鉄道には地上側や車両側など様々な原因により事故が発生する。鉄道事故の中でも列車脱線事故は鉄道車両に起因する場合がある。よって鉄

[†] 大阪産業大学大学院 工学研究科 交通機械工学専攻

^{††} 大阪産業大学 工学部 交通機械工学科

草稿提出日 10月27日

最終原稿提出日 1月12日

道車両の運動特性、台車特性を把握することは非常に重要である。

鉄道車両の台車特性の中で特徴的な挙動として蛇行動現象がある。蛇行動現象は図1に示す、鉄道輪軸が蛇のようなくねる動きをする挙動のことである。高速走行時に蛇行動は生じやすく、乗り心地悪化を招く。また蛇行動は自励振動の一種であり、フランジによって左右動が制限されない場合、振動は発散する傾向を示す¹⁾。よって蛇行動の振動が大きくなると最悪の場合脱線を引き起こす原因となる²⁾。

しかし実際の鉄道を用いて鉄道事故を再現することは困難である。実車において実験をおこなうには大規模な設備が必要であり危険を伴う。そのため、鉄道車両の挙動や現象を再現し、検証をおこなう方法として台上試験や模型実験が存在する³⁾。

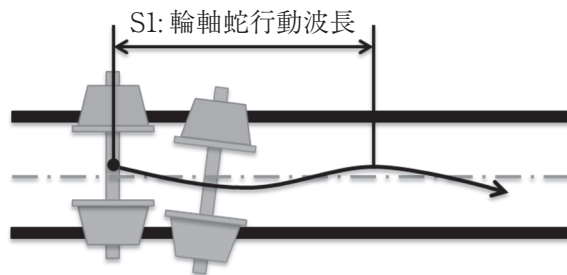


図1 輪軸蛇行動

2. 研究目的

本研究では踏面勾配を変化させた場合の蛇行動挙動を検証することが目的である。しかしながら実車による実験は安全面や費用などで困難である。そこで1/10スケールの軌条輪模型を用いて走行実験をおこなう。鉄道車両の直線走行時を想定し、走行安定性を確認する。また軌条輪模型台車の車輪踏面勾配を変化させることにより挙動の違いを確認する。踏面勾配は曲線の通過性能を向上させるが、直線走行時には蛇行動を引き起こす原因となる⁴⁾。

踏面勾配の違いによる蛇行動の挙動を解析し、特に輪軸蛇行動と台車蛇行動の関係性を検証する。

3. 実験装置

3.1 模型実験における相似則

模型車両を用いて実験をおこなう場合、実験条件などは相似則に基づいて検討する必要がある⁵⁾。模型と実車を比較する際は軌間（左右レールの間隔）を基準とした。実車の軌間は新幹線や大手私鉄等で採用されている標準軌（1435mm）を基準とした。したがって相似則 λ は式(1)に示すように実車軌間を模型軌間で除することにより算出する。

$$\lambda = l/l' \quad \dots \text{式(1)}$$

λ : 相似比, l : 実車軌間寸法, l' : 模型軌間寸法

幾何学的相似に基づいた相似則の式を導出する. 相似比 λ は基準長さによって定義されている. よって相似比を決定する式(1)は長さの相似則と考えられる. 長さの相似則より面積の相似則および体積の相似則を導き出すことができる.

$$\lambda^2 = l^2/l'^2 = A/A'$$

$$\lambda^3 = l^3/l'^3 = V/V'$$

A : 実車面積, A' : 模型面積, V : 実車体積, V' : 模型体積

以上から質量の相似則を導出する. 質量は密度と体積の積となる. 今回実験に用いる材料は実物と等しい金属であることから密度は同一となる. よって質量の相似則は体積に依存することから, 以下の式(2)となる.

$$\lambda^3 = \rho l^3 / \rho l'^3 = M/M'$$

$$M = \lambda^3 M' \quad \dots \text{式(2)}$$

ρ : 材料密度, M : 実車質量, M' : 模型質量

次に力学的相似則に基づいた相似則の式を導出する. ここで模型と実車は同じ重力場に存在することから加速度の比は1と定義する.

$$\alpha = \frac{l'/t'^2}{l/t^2} = l'/l (t'/t)^{-2} = 1$$

$$l'/l = 1/\lambda \quad \text{より} \quad 1/\lambda (t'/t)^{-2} = 1$$

$$t = \sqrt{\lambda} t'$$

α : 加速度, t : 実車時間, t' : 模型時間

以上から時間の関係を導き出すことができたので, 速度相似則を導き出す. まず速度の比を考慮し, 相似比の定義と時間の関係を用いる. 式(3)が速度相似則となる.

$$v'/v = \frac{l'/t'}{l/t} = l'/l (t'/t)^{-1}$$

$$v'/v = 1/\lambda (1/\sqrt{\lambda})^{-1} = 1/\sqrt{\lambda}$$

$$v = \sqrt{\lambda} v' \quad \dots \text{式(3)}$$

v : 実車速度, v' : 模型速度

3.2 軌条輪模型

鉄道車両を1/10スケールで模擬した軌条輪模型を用いた。すなわち模型軌間143.5mmの台車となる。軌条輪模型の諸元については表1に示す。図2に示すように1台車のみを有する半車体を模擬した模型である。軌条輪模型台車には輪軸、軸箱、軸ばね、台車枠で構成されている。車体に関しては床板のみ再現し、床板と台車の間は枕ばねに相当するゴム素材を設置している。また床板は中心ピンで固定されている。ただし中心ピンによって前後方向は固定されるが、中心ピン周りのヨーイング方向は自由度を持っている。モータは台車枠に取り付けており、歯車を介して模型車輪を回転させる。その時の車輪回転数を読み取ることによって模型の速度を算出している。質量については実車質量を参考にすると動力車で40tとなる。そのため実車の半車体で想定される質量は20tとなる。ここで質量相似則の式(2)を用いると、軌条輪模型で設定すべき質量は20kgとなる。相似則による検討結果を踏まえ、今回は使用する重りと計測器を搭載する関係上、設定可能な値として目標値に一番近い19.6kgを軌条輪模型の質量で設定した。

なお、車体の重心高さは、車体が横風を受ける場合や、曲線を均衡速度以上で走行する際の脱線に影響する。ただし、本論では蛇行動を検討するため車体は床板と重りなどで代表させ、重心高さは考慮していない。

表1 軌条輪模型諸元

項目	軌条輪模型	実車換算
軌間	143.5mm	1435mm
質量	19.6kg	19.6t
車輪直径	86mm	860mm
轴距	250mm	2500mm



図2 軌条輪模型

3.3 計測器

曙ブレーキ工業製のスマート動揺計を用いた。スマート動揺計は前後、左右、上下の加速度およびロール角速度を計測することが可能である。表2にスマート動揺計の諸元を示す。小型軽量かつBluetoothを用いた無線計測であるため、台車など計測しにくい場所を計測することができる。またサンプリング周波数は256Hzであり、50Hz程度までの低周波の計測精度に優れている。そして蛇行動で想定される振動は低周波であるため、スマート動揺計を選定した。今回は軌条輪台車の中心部に設置して計測をおこなった。

表2 スマート動揺計諸元

項目	仕様
計測軸	前後G, 左右G, 上下G, ロール角速度
検出加速度範囲	計測レンジ ± 2G 周波数帯域 50Hz
検出角速度範囲	計測レンジ ± 60deg/s 周波数帯域 50Hz
サンプリング周波数	256Hz
無線通信方式	Bluetooth
電源	単三電池 2本
分解能	12bit

4. 実験方法

4.1 実験条件

軌条輪模型における蛇行動挙動を確かめるべく実験をおこなった。速度の条件は車輪回転数を1000rpm (4.5m/s) から3000rpm (13.5m/s) の間で設定した。相似則に基づいた実車換算速度は51.2km/hから153.7km/hの間となる。

また蛇行動現象を詳細に解析するため、踏面勾配の異なる5パターンの車輪を用いた。

- (a) 踏面勾配1/10
- (b) 踏面勾配1/15
- (c) 踏面勾配1/20
- (d) 踏面勾配1/30
- (e) 踏面勾配1/40

上記範囲の速度および踏面勾配条件において実験をおこなった。軌条輪側の状態は直線相当とし、軌条輪模型の台車中心に計測器を設置した。計測した振動加速度データを元に解析をおこない、パワースペクトル密度（以下、PSD）を用いて評価した⁶⁾。

4.2 解析方法

データ解析をおこなうにあたり、代表的な例として2000rpm (9.0m/s) において踏面勾配1/10の条件を用いる。図3は軌条輪模型の台車中心で計測した左右加速度の波形である。計測によって得られた左右加速度のデータを取り込み、周波数解析をおこなった。図4に左右加速度のPSDを示す。横軸は周波数で、縦軸はPSDである。

図4においては4.7Hz付近にPSDの大きなピークが見受けられた。このピークは蛇行動によるものと考えられる。1.5Hzは車体の並進振動が低周波付近で起きることが知られていること、4.7Hzが他に比べて卓越しており、蛇行動と判断した。このようにPSD上で見受けられた特徴的なピークを他条件でも読み取った。PSD上のピークを実験値として速度と周波数の関係を結果としてまとめた。

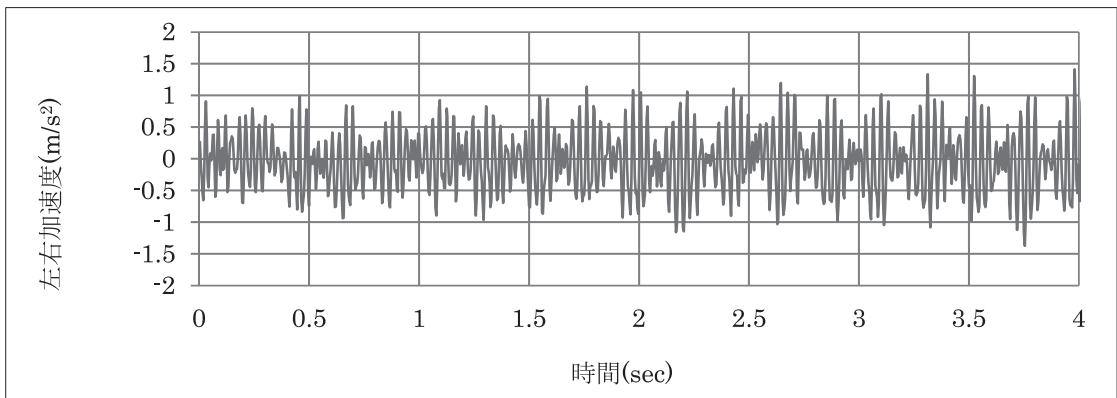


図3 2000rpm (9.0m/s) 左右加速度 (踏面勾配1/10)

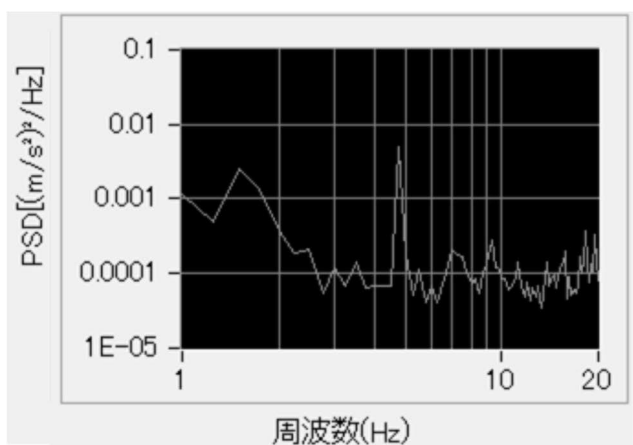


図4 2000rpm (9.0m/s) 左右PSD (踏面勾配1/10)

4.3 蛇行動理論

蛇行動実験をおこなう前提として理論値の算出をした。蛇行動の理論値は幾何学的に決定される⁷⁾。また蛇行動には輪軸単体で振動する輪軸蛇行動、2つの輪軸を有する台車が振動する台車蛇行動が存在する。輪軸蛇行動の理論波長は車輪半径を r 、踏面勾配を γ 、軌間を $2b$ とすると式(4)となる。台車蛇行動の理論波長は軸距を $2a$ とすると式(5)となる。いずれも理論値は波長である。そこで走行速度を理論波長で除することによって、理論周波数を定義した。

$$S1 = 2\pi \sqrt{br/\gamma} \quad \dots (4)$$

$$S2 = S1 \sqrt{1 + a^2/b^2} \quad \dots (5)$$

$S1$: 輪軸蛇行動理論波長, $S2$: 台車蛇行動理論波長

r : 車輪半径, γ : 踏面勾配, $2a$: 軸距, $2b$: 軌間

5. 実験結果

軌条輪模型の各条件においての左右加速度PSDピーク値の周波数を読み取り、そのピーク値における周波数を図5～図9にプロットした。横軸は速度で縦軸は周波数である。また蛇行動の理論値を示した。輪軸蛇行動理論値は実線、台車蛇行動理論値は点線で示す。

軌条輪模型の走行における振動を計測した結果、輪軸蛇行動および台車蛇行動を把握することができた。図5の踏面勾配1/10の条件では実験値が台車蛇行動に近い値を取った。この結果、台車蛇行動が発生したと考えられる。図6の踏面勾配1/15と図7の踏面勾配1/20では台車蛇行動と輪軸蛇行動の間を取るような実験値が得られた。また速度が上がれば台車蛇行動の理論値に近づくような傾向も見受けられた。特に図6の速度8.11(m/s)、速度9.01(m/s)、速度9.91(m/s)と図7の10.81(m/s)において見受けられた。踏面勾配1/30と踏面勾配1/40の図8、図9では輪軸蛇行動の理論値に近いような実験値が得られた。このことから輪軸蛇行動が発生したと考えられる。

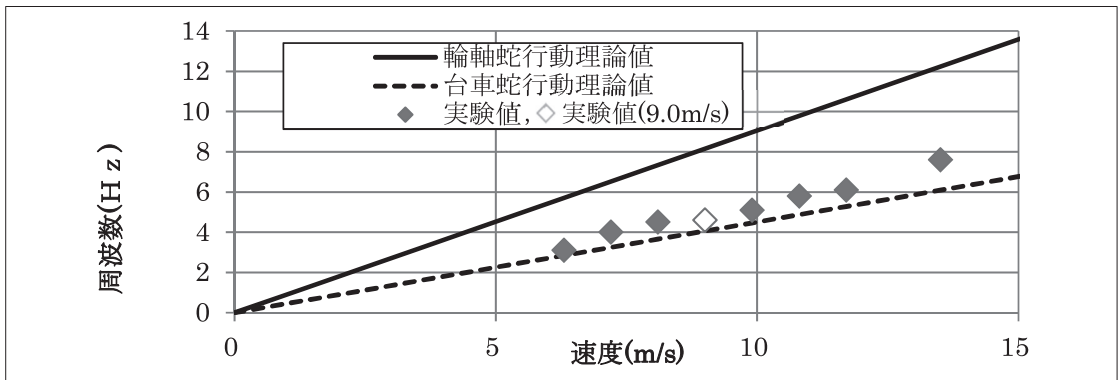


図5 踏面勾配1/10における蛇行動周波数と速度

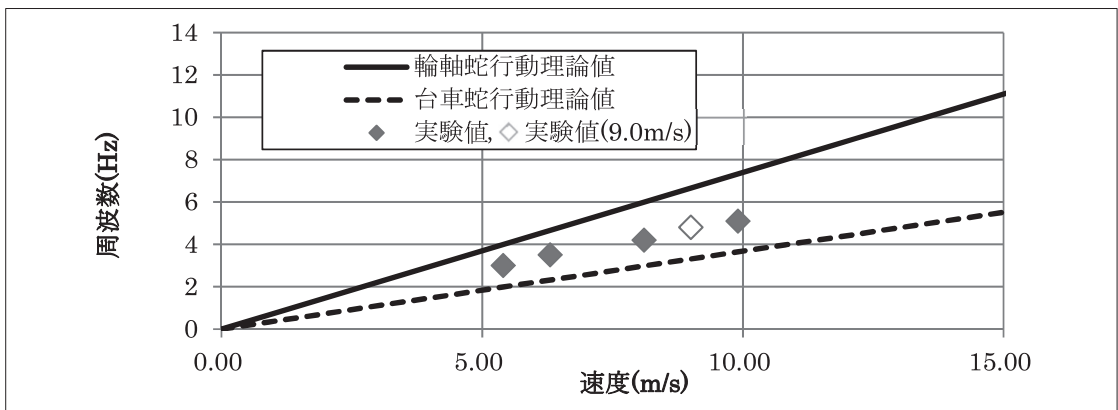


図6 踏面勾配1/15における蛇行動周波数と速度

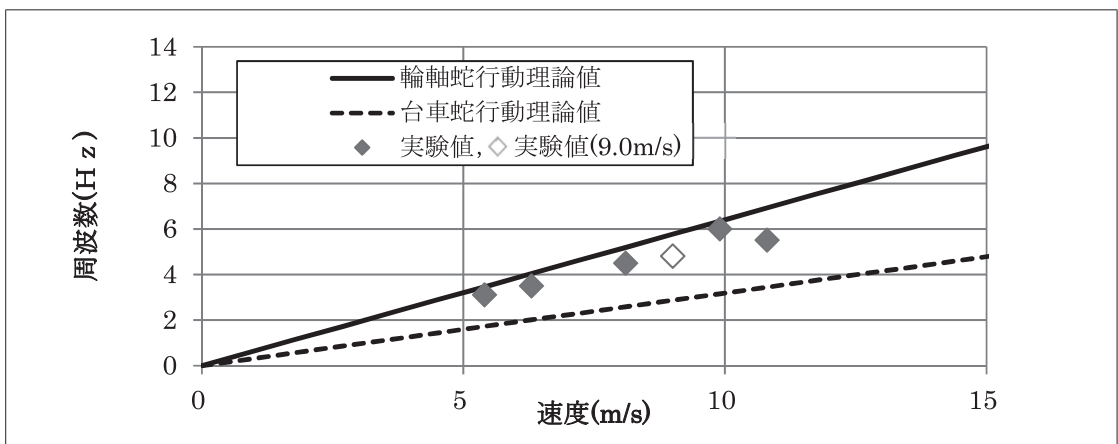


図7 踏面勾配1/20における蛇行動周波数と速度

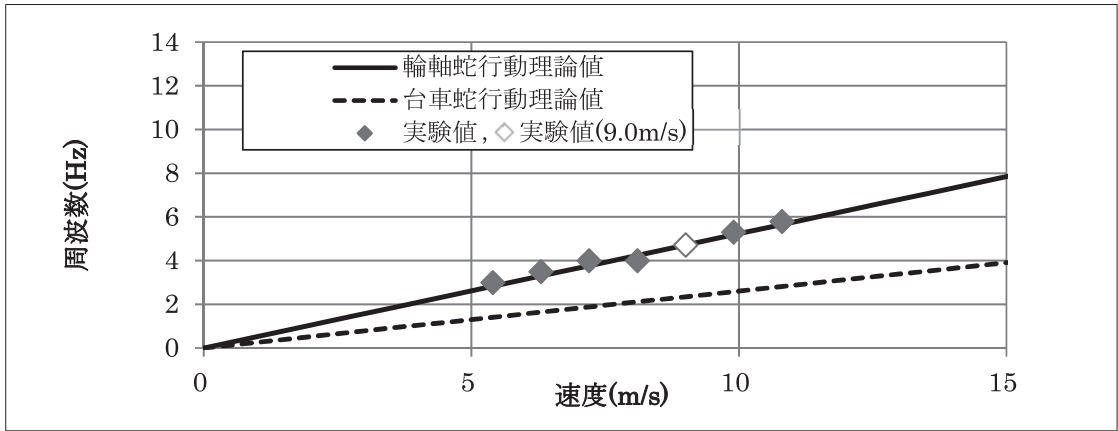


図8 踏面勾配1/30における蛇行動周波数と速度

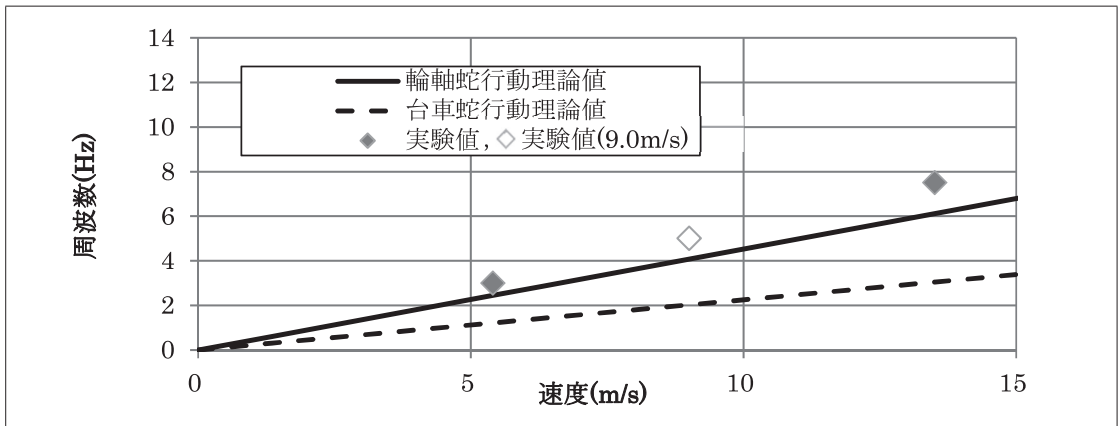


図9 踏面勾配1/40における蛇行動周波数と速度

6. 考察

踏面勾配1/10では台車蛇行動の発生が顕著に見受けられた。これは輪軸からの振動が大きく、輪軸から軸箱、軸ばねを介して台車に振動が伝わり、台車蛇行動を引き起こしたと考えられる。なお、本模型台車は車軸を台車枠に対して完全剛ではなく、やや弾性的に拘束しているという意味において実台車構造を模擬しており、必ずしも軸ばねのばね定数や台車枠を忠実に再現してはいない。

踏面勾配が1/30、1/40においては輪軸蛇行動の発生にとどまった。踏面勾配の小さい条件では蛇行動による輪軸の振動がそもそも小さいと考えられる。よって輪軸からの振動が台車まで伝わる際に軸ばねなどで減衰したと考えられる。その結果、台車まで振動が伝わらず輪軸蛇行動のみが発生したと考えられる。以上のことから踏面の勾配が大きい1/10、1/15の踏面勾配で

は台車蛇行動を引き起こしやすいといえる。そして踏面の勾配が小さい1/20, 1/30, 1/40の踏面勾配では台車蛇行動を抑制できると推定される。

また図6と図7の踏面勾配1/15, 踏面勾配1/20の条件では速度を増していくと、実験値が台車蛇行動の理論値に近づくような傾向が見受けられた。速度が増すにつれて輪軸からの振動が大きくなると考えられる。速度の上昇と共に振動も増大し、輪軸から台車へ振動が伝わり台車蛇行動を引き起こすと考えられる。

図10に車輪回転速度2000rpm (9.0m/s) で実験をおこない、それぞれの踏面勾配の条件において左右PSDピーク値をまとめた。踏面勾配が大きい条件ではPSDのピーク値が高く、踏面勾配が小さくなるにつれてPSDのピーク値が下がる傾向が見受けられた。勾配1/10と勾配1/20においてはPSDが高く、勾配1/30と勾配1/40においてはPSDが低い。勾配1/15は新品であり、これを特異点と考えると、勾配1/20から勾配1/30の間に振動が減少するポイントがあると考えられる。ただし勾配1/15においてはPSDのピーク値が他の傾向と比べ低くなった。理論蛇行動周波数の振動は確認したため、振動そのものが小さい結果となった。勾配1/15の振動が小さくなった原因としては勾配1/15車輪のみ新品を使用した。勾配1/15以外の車輪は実験回数を重ねた車輪であり、踏面が摩耗した状態であった。そのため表面の凹凸が少なく蛇行動による振動が発生しやすく、振動が大きかったと考えられる。一方、勾配1/15の車輪は新品であり切削加工後の使用期間が比較的短いため、車輪踏面が適度に荒れておりレールとの接触面での摩擦係数は長期間使用した車輪に比べて小さい⁸⁾ ことから蛇行動を誘発する影響度はやや小さくなるため、振動そのものが小さくなったと考えられる。

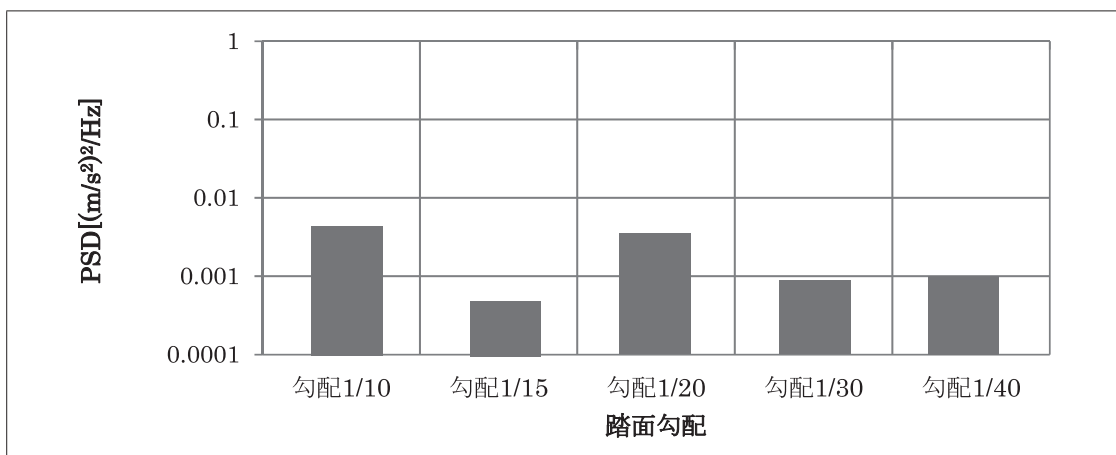


図10 2000rpm (9.0m/s) 左右PSDピーク値

7. まとめ

軌条輪軸模型を用いて蛇行動現象を解析した結果、踏面勾配と速度によって挙動が変化することがわかった。輪軸蛇行動が台車蛇行動に移行するポイントが存在すると推定できる。踏面勾配の条件が変化すると挙動変化ポイントの速度も変化すると考えられる。

踏面勾配1/15においては模型速度6.3m/s、実車換算速度71.7km/hまで輪軸蛇行動に挙動が近い結果となった。それ以上、速度を増すと台車蛇行動を引き起こす傾向となる。よって速度75km/h付近が挙動変化ポイントと考え、70km/h以下では比較的安定した挙動を示すと推測される。踏面勾配は曲線通過性能に影響するため、曲線区間が多い路線では勾配を大きくしたい。よって従来の勾配1/20より大きい踏面で台車蛇行動を抑えられる勾配1/15は曲線が多数存在する低速度の路線で有効であると考えられる。

また踏面勾配1/20においては模型速度9.9m/s、実車換算速度112.7km/hで挙動変化ポイントが表れた。120km/h以上の速度を想定する場合、台車蛇行動が発生しやすく不安定な状態であるといえる。この踏面勾配1/20は実際にJR在来線や大手私鉄で多く採用されている。今後の鉄道在来線高速化で想定される160km/hから200km/hにおける速度域の場合、台車蛇行動を抑制するため踏面勾配を小さくする必要があると考えられる。

また高速鉄道で想定される振動はさらに増大するものと考えられる。蛇行動の影響は輪軸、台車にとどまらず車体にも振動が発生する可能性がある⁹⁾。車体で生じる蛇行動を車体蛇行動と定義し、式(5)の台車蛇行動理論式を元に挙動を推測する。車体蛇行動は車体の中心を軸とする挙動を示すと考えられる。台車間距離を $2c$ とすると車体蛇行動の理論式は式(6)の形で表すことができる。これは式(5)で、台車を輪軸とみなし車体を台車とみなした上で、軸距を台車間距離と置き換えれば、式(6)となる。ただし、式(5)は剛体台車モデルであり、式(6)の車体は台車とヨー方向に自由度を持つため、このS3の結果は、車体蛇行動波長の最小値、振動数の最大値を与える。現在はヨーダンパーである程度抑制されているが、今後は車体蛇行動についても解明する必要があると考えられる。

$$S3 = S2 \sqrt{1 + c^2/b^2} \quad \dots (6)$$

S2：台車蛇行動理論波長， S3：車体蛇行動理論波長

2b：軌間， 2c：台車間距離

参考文献

- 1) 丸山弘志, 他1名:「機械技術者のための鉄道工学」, 丸善, pp.128-138, (1981)
- 2) 岡本浩典, 他4名:「ジャイロを用いた鉄道車両に生じる蛇行動の安定化」, 日本機械学会論文集(C

- 編), 74巻, 738号, (2008)
- 3) 西村和彦, 他3名:「振動軌条輪における模型鉄道車両の走行安全性に関する実験的研究」, 日本機械学会論文集(C編), 75巻, 749号, (2009)
 - 4) 永井小百合, 他2名:「車輪踏面形状が車両挙動に与える影響の基礎的検討」, 日本機械学会論文集, No.15-16, (2016)
 - 5) 江守一郎, 他2名:「模型実験の理論と応用」, 技報堂出版, pp.139-162, (1985)
 - 6) 國枝正春:「実用機械振動学」, 理工学社, pp.15-16, (1984)
 - 7) 須田義大, 他8名:「車両システムのダイナミックスと制御」, 養賢堂, pp.119-137, (1999)
 - 8) 山本雄二, 他1名:「トライボロジー 第2版」, オーム社, pp.40-41, (2013)
 - 9) 宮本昌幸, 他31名:「鉄道車両のダイナミックス」, 電気車研究会, pp.20-29, (1996)