

3303 車輪踏面の損傷の評価方法に関する一考察

A consideration about the way of evaluating the wound of wheel-tread

○武藤 行伸 真野 辰哉 角井 真哉 (西日本旅客鉄道株式会社)

Yukinobu MUTO, Tatsuya MANO, Shinya KAKUI
West Japan Railway Company, Shibata2chome4-24, Kita-ku, Osaka

Recently, most of the railroad companies proceed with the study to evaluate badness of the damage of the wheel-flat as the typical wound of wheel-tread, by the size of "vertical acceleration of rail". But, because damage of the wheel-tread brings "impact-noise" and "shock on the rolling stock equipment", originally, we have to evaluate rail acceleration by the size of the noise and the shock. So to verify relevance with "Noise level of side between bogie" and "Acceleration of axle-box and gear case" about the rail acceleration, "artificial" wheel-flat were made on the test vehicles, and we enforced a running test by the test vehicles.

As this result, though rail acceleration takes an influence from "dependence on train speed", "attenuation characteristic", size of the wheel-flat (depth and length), and so on, it confirmed that there was some relevance between rail acceleration and noise level, axle-box acceleration. Then, we examined a method to evaluate damage in the rail acceleration of some steps.

Keyword : Wheel-Flat, Rail Acceleration, Noise Level of Side Between Bogie, Axle-Box Acceleration

1 はじめに

最近、鉄道事業者の多くはレール上下加速度の大小を指標として転削や軸替などの措置を講ずる取組を進めている。

当社は、このレール加速度を指標とする場合、踏面損傷の本来の悪さ加減である発生音や衝撃力の観点からレール加速度を評価すればどうなるかとの考えから、まずレール加速度とフラットの大きさ、また沿線環境の観点として台車間近傍騒音レベルと聴音評価被験者反応率、さらに車両部品保安の観点として軸箱・歯車箱上下加速度、などのごく基本的な関連性を検証する走行試験を実施し、レール加速度を指標とする踏面損傷の評価の考え方を検討した。

2 基本理論

過去の文献資料によると、車輪やレールに伝わる衝撃力は、車輪とレールが衝突するときの相対速度に依存し、それは列車速度において二つの領域があるとされる。図1のように、列車速度によってフラット部分がレールに接触したり、輪軸などの慣性質量が遠心力によってフラット部分をとばしてレールに接触したりする。いわゆるジャイロ効果の一つで、その現象が表れる境界の列車速度を限界速度 v_{cr} という。

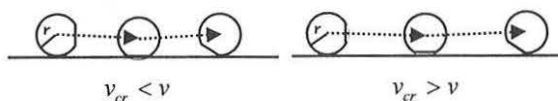


fig.1 The effect on gyro, and critical speed of wheel-flat
(v_{cr} =Critical speed of wheel-flat, v =Train speed, r =Wheel radius)

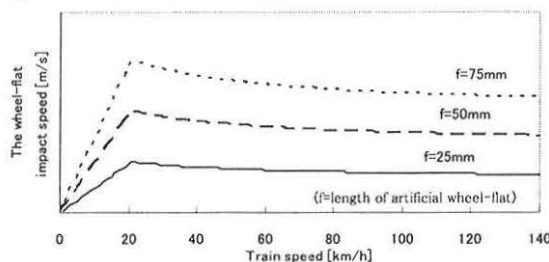


fig.2 The calculation result of the wheel-flat impact speed

図2は、車輪とレールが衝撃するフラット衝撃速度のうち上下方向成分をある条件で計算した結果で、衝撃速度は20km/h付近でピークを生ずる。

この理論は車輪とレールの衝撃による車両や軌道の応答に関して用いられる一つであるが、文献資料によると、今回の走行試験で検証するレール加速度は、過去の試験結果を図2のような低速域で著大値を示す理論で説明することが難しいことも多く、そのためにはフラット衝撃時におけるレール反発モデルが必要であるとしている。図3にその計算結果を示す。

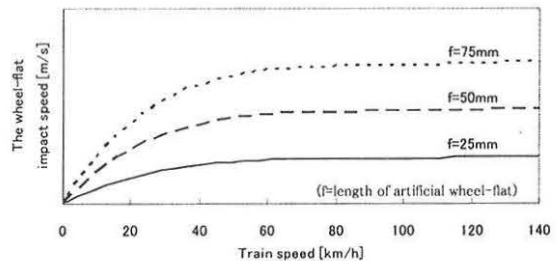


fig.3 The calculation result of the wheel-flat impact speed in consideration of the rebound of the rail

図3では、衝撃速度は速度依存性を示し、列車速度がおおむね100km/h以降で漸増傾向を示すとともにフラットの大きさに比例することも示している。そこで、今回の走行試験ではこの理論と計算結果が再現できる仮説を立てて計画、実施した。

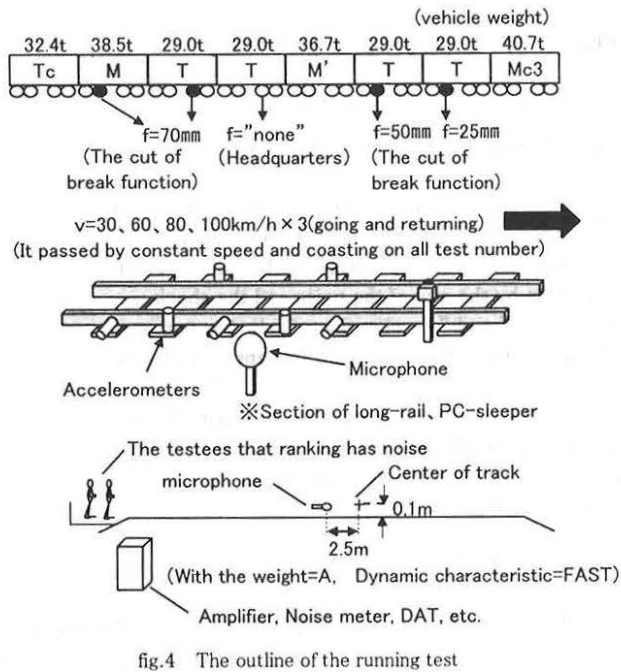
3 走行試験の概要

試験列車の概要を図4に示す。

車両は3M5Tの8両編成を用意し、T車3両各1軸ずつ、車輪の浜山同位相に25、50、70mmの、M車1軸にも70mmの人工フラットを施工した。これら軸箱8箇所、M車の歯車箱2箇所(車軸側と小歯車側)、フラットなし車輪の軸箱の浜山2箇所、計12箇所に加速度センサーを取り付けた。

地上測定点は、同図の位置にレールに加速度センサー、近傍にマイクロホンを取り付け、アンプや騒音計からDATへ波形を収録し、被験者が聴音を3段階で評価した。

試験列車は人工フラット施工の部位をブレーキカットし、地上測定点を30、60、80、100km/hの4速度段で3往復ずつ定速惰行で通過させた。また、保安上、軸箱温度も監視した。

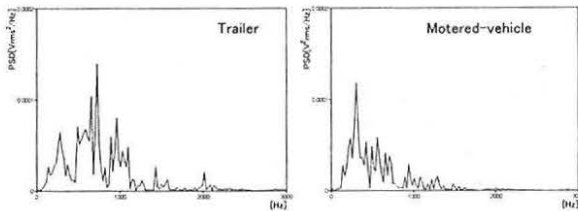


4 結果と考察

4.1 レール上下加速度

4.1.1 フラット衝撃の周波数特性

フラット衝撃時の加速度波形の周波数解析例として、人工フラット長さ70mm、列車速度100km/hにおけるT車とM車の例をそれぞれ図5に示す。

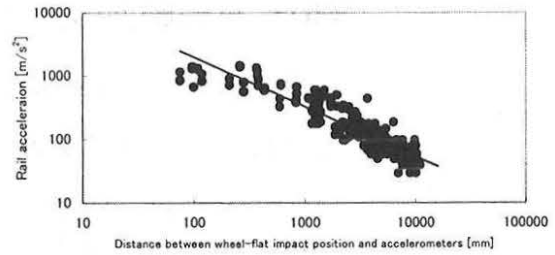


衝撃波形は著しいピークスペクトルを示し、卓越周波数、ピークレベルともに速度依存性が見受けられたが、特にT車(f=25,50,70mm)において1kHz以上の帯域で車輪の固有振動と思われる数次のピークが見受けられた。

一方、同じ70mmを施工したM車ではT車で見られた1kHz以上の固有ピークと思われるスペクトルのレベルが小さいまたは見受けられないほか、卓越周波数が低く、ピークレベルも小さい傾向にあった。これら卓越周波数は速度依存性が見受けられる一方、フラット長さによる違いは明確でなかった。

4.1.2 距離減衰と速度依存性

レール加速度を指標とするには速度依存性を求める必要があるが、加速度センサーの真上にフラット衝撃が生ずるとは限らず、加速度センサーと衝撃位置の距離間でレール振動が減衰していることが考えられる。図6に、加速度センサーと衝撃位置の距離と、その時のレール加速度との関係の例を示す。なお、これらのレール加速度は0-to-Peak値である。

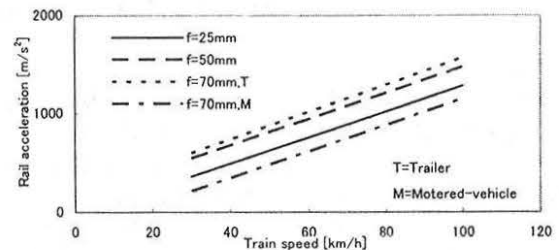


この結果から、レール加速度 α は距離 L に対し、次の基本式で近似できると仮定する。

$$Y = nX + B$$

(ただし、 $Y = \log_{10} \alpha$, $X = \log_{10} L$, $B = \log_{10} A$)

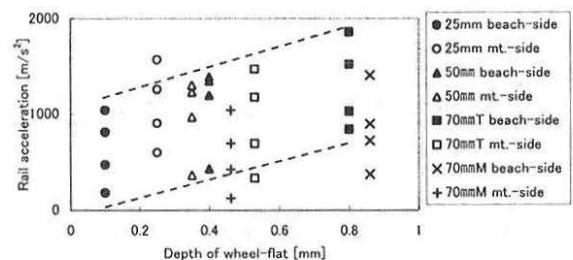
上式から回帰線を $a = AL^n$ とすると、レール加速度はこの距離に対して $n=-0.7 \sim -0.8$ 乗で比例しながら急激に減衰しており、レール加速度を指標とするには、減衰補正が必要である。そこで、得られた関数に基づき、今回の走行試験で確認した列車速度範囲で線形近似により求めた関係を図7に示す。



以上から、レール加速度は図3の計算結果のように速度依存性があり、フラット衝撃を列車速度に関係なくレール加速度に置き換える補正が必要であることがわかる。

4.1.3 レール加速度とフラットの大きさ

レール加速度を指標とするには、フラットの大きさとの関係を整理する必要がある。図8に、車輪とレールの接触位置が中立位置付近であったという前提で、今回の走行試験におけるフラット深さとレール加速度の関係を示す。



この結果から、レール加速度はフラット深さに比例すると思われる。一部、絶対値が小さいものはM車のデータであった。

フラット長さと同深さは幾何学的には比例するが、現実の踏面損傷はフラットや熱き裂による「はくり」などを生じると、フラット長さと同深さが比例しない場合も多く、こういう場合において、レール加速度に対してより大きな影響を持つ因子はフラット深さであると思われる。

4.2 台車間近傍騒音レベルと被験者反応率

図9に、試験列車が地上測定点を通過したときの騒音レベルの周波数解析例として、 $f=70\text{mm}$ のT車とM車について、 100km/h の例を示す(flat特性)。

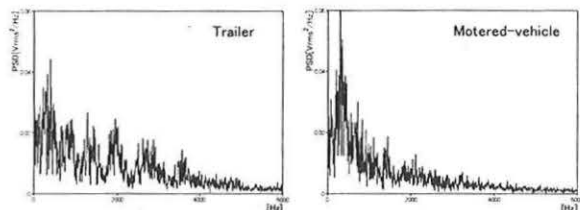


fig.9 Frequency characteristic of noise level by wheel-flat ($f=70\text{mm}$, $v=100\text{km/h}$, FLAT-characteristic)

低速域ではT、M車ともに大きなピークが低周波域に依存しているが、 $v=60\text{km/h}$ 以上ではT車は 1kHz 以上の高周波成分の固有ピークが顕著で、M車は卓越周波数が大きく変わらないため、A特性で補正するとT車が大きな騒音レベルになる。M車はレール加速度の波形と比較すると類似しており、車輪の影響が反映されていると思われる。

被験者がうるさに反応した割合と、騒音レベルの関係を図10に示す。

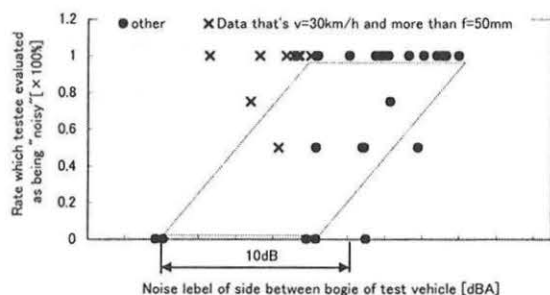


fig.10 Noise level and response rate by the testees

在来線新設・大規模改良指針で用いられる反応率で整理すると、 $f=25\text{mm}$ では速度依存性を示すが、 $f=50\text{mm}$ 以上では列車速度と関係なくうるささを感じていることがわかった。ただし、この結果を踏面損傷の評価に使用するには、今回の走行試験を実施した条件(深夜帯、惰行、定速、被験者の評価意識など)を考慮した内容に補正を行なう必要がある。

そこで、図11に、騒音レベルと列車速度の関係を示す。

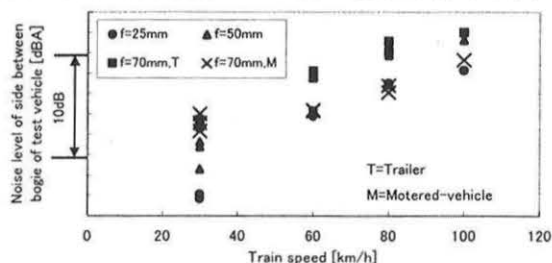


fig.11 Noise level (peak value) and train speed

騒音レベルは列車速度ともに増加するが、T車とM車を比べると、図9に掲げた周波数特性の傾向をよく表現している。 1kHz 以下をレール、それ以上を車輪によるものとする、被験者が感じた騒音は主に車輪からとなる。また、フラット長さとも比例していることがわかる。

騒音レベルとレール加速度との関係を図12に示す。

この結果は、両者が指数的に比例しており、レール加速度を指標として踏面損傷の悪さ加減を評価することができることを示す。この図における特異点はM車の主電動機や駆動継手などの騒音で、同じ条件で測定しているT車のそれと比較して数dB大きかった。

そこで、この結果から、レール加速度をレール振動速度に変換し、これと同じ時間系における騒音レベルとのクロス相関関数を計算した例を図13に示す。さらに、このクロス相関関数をフーリエ変換し、これらレール振動速度と騒音レベルのクロススペクトルを解析した例を図14に示す。

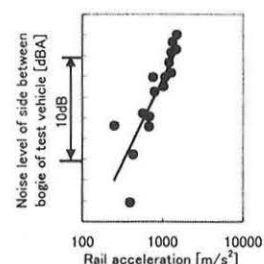


fig.12 Noise level and rail acceleration

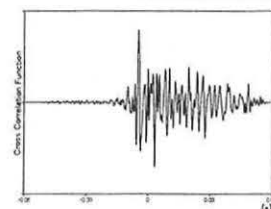


fig.13 CCF of noise level and rail vibration speed

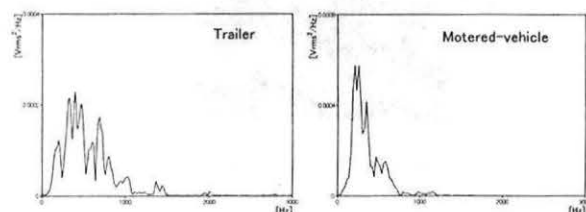


fig.14 Cross spectrum of noise level and rail vibration speed

以上から、騒音レベルとレール振動速度は 1kHz までのいくつかの周波数で卓越した因果を持ち、それはT車とM車で異なる様相を呈していることが分かる。

4.3 軸箱・歯車箱上下加速度

4.3.1 衝撃波形と周波数特性例

例として、 $f=70\text{mm}$ のM車の小歯車側、T車軸箱それぞれの周波数解析例を図13に示す。

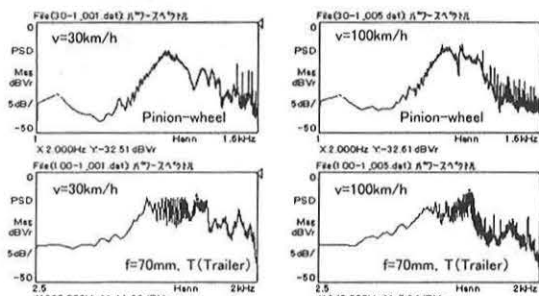


fig.13 Frequency characteristic of pinion-wheel and axle-box (It's pinion wheel in motored-vehicle's gear case)

小歯車側は大歯車側を支点として歯車箱が筐体となって振動し、両者は $5\sim 10\text{dB}$ 程度で小歯車側が大きい。また、 $80\sim 320\text{Hz}$ 前後で速度依存性を示し、車輪回転周期の小ピークが $v=30\text{km/h}$ のみ表れ、ジャイロ効果を示していると思われる。

4.3.2 軸箱・歯車箱上下加速度と列車速度

地上測定点を含む 500m 程度の走行区間における軸箱・歯車箱上下加速度の平均値と列車速度の関係を図14に示す。なお、軸箱・歯車箱上下加速度はPeak-to-Peak値である。

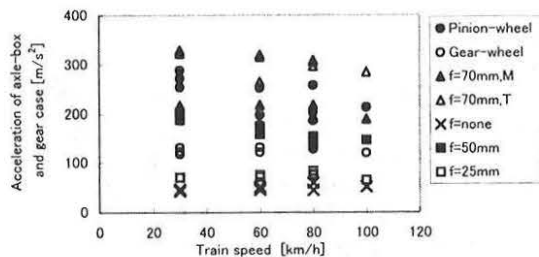


fig.14 Acceleration of axle-box, gear case and train speed

加速度はフラット長さと比例するが、列車速度に対して漸減の傾向を示す。図2に示した計算結果の傾向と合致する。また、走行試験区間全体の軸箱・歯車箱上下加速度の500m単位の平均値と列車速度の関係を図15に示す。

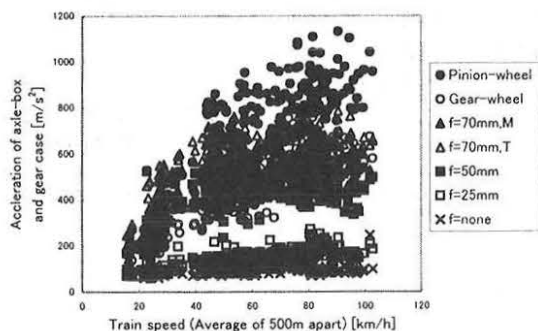


fig.15 Acceleration in the whole of the running test section

小歯車側は $v=40\text{km/h}$ 以上で 100g を超える衝撃が加振され、同じ70mmの人工フラットを施工したT車の軸箱より大きい。また、 $f=50\text{mm}$ 以上では急激に加速度が大きくなった。そこで、フラットなし車輪($f=0\text{mm}$)の軸箱加速度を同じく走行試験区間全体のキロ程単位の最大値で整理したものを図16に示す。

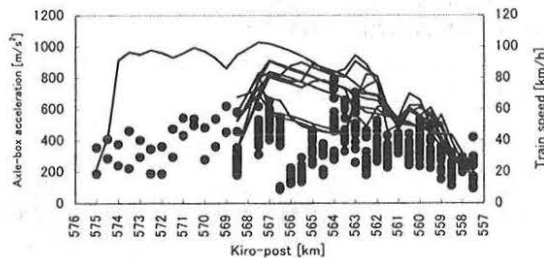


fig.16 Axle-box acceleration which doesn't have wheel-flat

これは、主にレール継目や分岐器によるものであるが、最大 80g 程度である。軌道条件や運転条件が同等であれば、他線区でもこの程度の衝撃があると思われ、衝撃力に関する踏面損傷の悪さ加減を評価する目安の一つとして考えられる。

4. 3. 3 軸箱加速度とレール加速度

これらから、軸箱加速度とレール加速度との関係を図17に示す。ただし、両者は異なる振動系で、フラット衝撃時の卓越周波数が異なるので、軸箱加速度の周波数解析結果に重み付け補正を加えた軸箱加速度レベルを計算し、レール加速度と比較した。

台車間近傍騒音レベルの場合と同じく指数的に比例しており、軸箱加速度についても、レール加速度を指標とした悪さ加減を評価することができることを示すことが分かる。

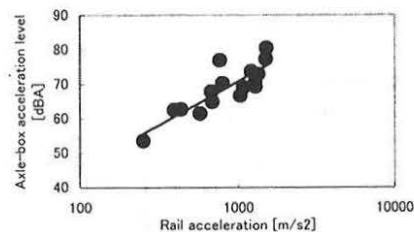


fig.17 Axle-box acceleration level and rail acceleration

5 レール加速度による踏面損傷の評価について

以上のことから、レール加速度によって車輪踏面損傷を評価する場合、騒音レベルと被験者反応率、軸箱・歯車箱加速度をそれぞれ代表的な測定項目として基本的な関係を考察した結果、レール加速度の大きさを車輪踏面の損傷に対する悪さ加減の指標として管理できるという見込を得た。

具体的には図18のように、レール加速度を図6に掲げた距離減衰補正、図7に掲げた列車速度補正、その他の重み付けをし、悪さ加減を格付ける。その格付けにおいては、被験者反応率相当の騒音レベルと軸箱・歯車箱加速度をレール加速度との関係からレール加速度相当に換算し、基準となる列車速度のレール加速度と比較し、悪さ加減の要素や物差しになる。

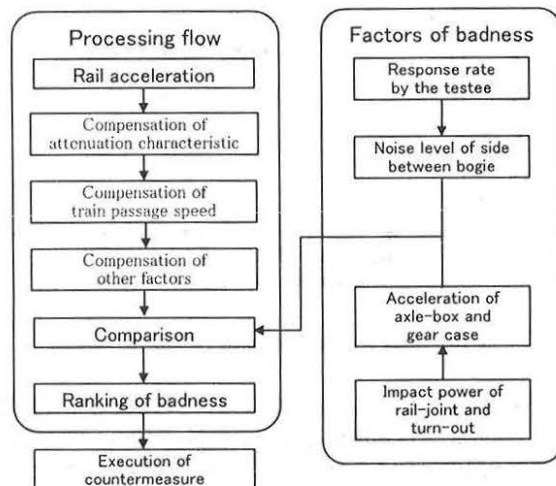


Fig.18 Consideration about evaluating wound of wheel-tread

6 おわりに

当社は、基準の列車速度を 80km/h とし、データの精度などを検証して、業務に反映してゆく。そして、踏面損傷による悪さ加減を低減し、沿線環境や車両部品の保安防災に役立てるとともに、車両検修に反映させ、車輪踏面の損傷を防止できる取り組みの一助になるよう、今後も努めてゆく所存である。

なお、この走行試験の計画、実施、データの分析について、さまざまな助言を賜った財団法人鉄道総合技術研究所の関係各位に厚く御礼を申し上げる次第である。

※ 参考文献

車輪フラット確認試験結果報告書(技第287号 H14.10.16)ほか