

レール継目衝撃音に係る車輪・軌道の振動特性評価 —軌道編—

○ [機] 川口 二俊 田中 慎一郎 ((公財) 鉄道総合技術研究所)
 [機] 村田 香 [機] 長倉 清 ((公財) 鉄道総合技術研究所)

Investigation of vibration properties of train wheel and track
 associated with impact noise on rail joint - Track part -

○Tsugutoshi Kawaguchi, Shin-ichiro Tanaka
 Kaoru Murata, Kiyoshi Nagakura, (RTRI)

Impact noise occurs when a train passes through the section of discontinuous rails. It is one of the sources of the environmental impact of railway traffic. Therefore, in order to understand the characteristics of impact noise, impact test and field test were conducted on rail joints of the test track. This paper, it is identified the frequency response function (FRF) of the vibration of the rail joints. And, it is evaluated the vibratory properties of the rail joints from a view point of train speed and joint profiles.

キーワード：鉄道騒音，レール継目，衝撃音，レール振動

Key Words：Railway noise, Rail joint, Impact noise, Rail vibration

1. はじめに

鉄道車輪がレールの不連続部を通過する際、通常区間と比べて大きな音（衝撃音）が発生する。その有効な対策の一つとしてロングレール化によるレール不連続部の解消が挙げられる。しかし、ロングレール終端部において絶縁継ぎ目が存在する場合があること、分岐器や橋梁区間等では継ぎ目が生じてしまうことなどから、レールの不連続部を完全に解消することは困難であるのが現状である。このような背景から、衝撃音に対する車輪および軌道に係る因子を明らかにした上で、有効な衝撃音対策を講ずることが必要である。そこで本論文では、衝撃音の特性を理解する第一段階として、継目部における軌道の振動特性を衝撃加振試験および現車走行試験により整理した。また、遊間継目の諸元や列車速度が軌道の振動へ与える影響を評価した。

2. 軌道の概要

試験を実施した軌道は、鉄道総研が所有する試験軌道である。在来線規格で軌道の基本諸元は、50kgN レール、木マクラギ、バラストである。図 1 に試験軌道の遊間継目を示す。

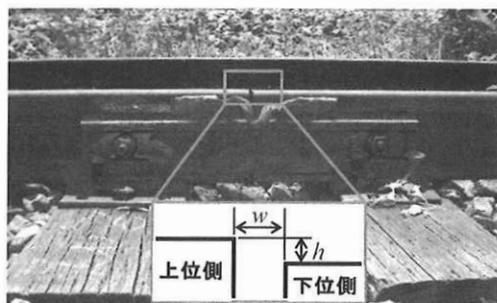


図 1 試験軌道の遊間掛け継目(継目 A)

対象とする遊間継目（以下、継目）は、継目から所定の間隔を隔てた 2 本のマクラギによってレールが支持されている（遊間掛け継目）。継目の諸元を表す指標として、レール高さ方向の段差 h および継目幅 w を用いる。なお、レール頭頂面が高い側のレールを上位側レール、低い側を下位レールと表す。試験対象の継目は 3 箇所、各々の諸元は表 1 に示す通りである。

表 1 継目の諸元

	段差 h [mm]	継目幅 w [mm]
継目 A	1.3	5.6
継目 B	0.5	9.9
継目 C	0.8	1.1

3. 衝撃加振試験

3.1 試験概要

無荷重状態のレール継目部をインパルスハンマによって衝撃加振し、周波数応答等を求めた。使用したインパルスハンマの特性および振動加速度計は以下の通りである。

インパルスハンマ：DYTRAN 製，2 - 10000Hz

振動加速度計：RION 製，PV-94

図 2 に打撃箇所と振動加速度計の配置を示す。継目部における上位側・下位側レールの頭部を上下方向にそれぞれ 6 回打撃し、加振に対するレール底部中心の上下方向振動加速度を測定した。なお、測定に際して加振力と応答とのコヒーレンスは 0.8 以上になるよう留意した。また、比較として、試験軌道の継目ではない箇所（以下、中間部）においても上記と同様の条件で試験を行った。図 3 に中間部における打撃箇所と振動加速度計の配置を示す。

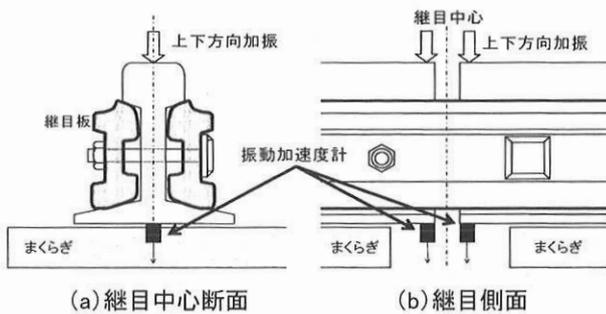


図 2 継目部の加振位置と振動加速度計の設置位置

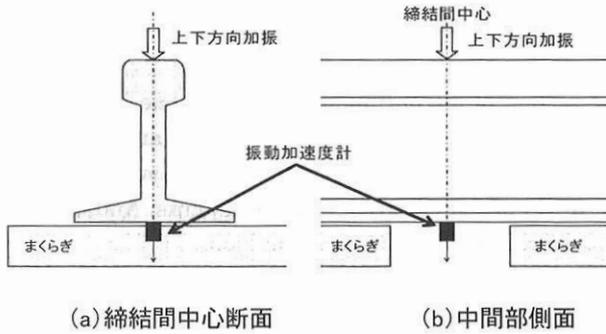


図 3 中間部の加振位置と振動加速度計の設置位置

測定データの解析は、以下の手順で行った。

1. 振動加速度計からの出力を周波数分析器により FFT を実行する。周波数分析条件は次の通りである。

サンプリング周波数：25,600Hz

サンプリング点数：16,384 点

窓関数：矩形

2. インパルスハンマによる力を入力，レールの振動加速度を出力とした場合の周波数応答関数を求める。この場合の周波数応答関数はアクセラランス (a/F ， a ：振動加速度， F ：加振力) となる。

3.2 加振点における周波数応答

図 4 に継目 A の上位側・下位側レールの加振に対する加振したレールの周波数応答 (加振点アクセラランス) を示す。

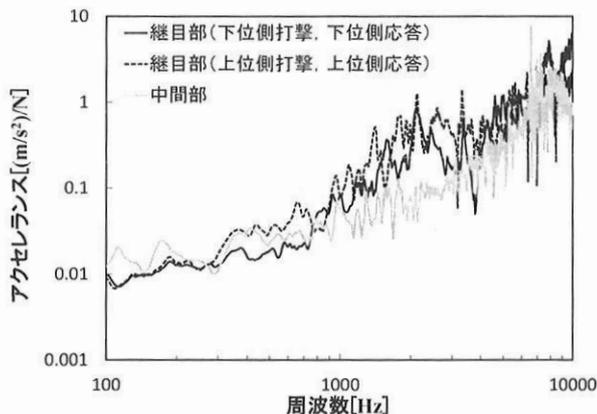


図 4 継目 A および中間部の加振点アクセラランス

図 4 より，継目部の打撃箇所による応答について，300Hz～4kHz で上位側レールの方が大きい。試験軌道であるため軌道の管理が悪く，下位側レールに比べて上位側の締結(犬釘)位置での支持剛性が小さいことが原因と考えられる。継目部と中間部の応答を比較すると，1.5kHz～3.0kHz 付近

の周波数域で継目部の応答が約 10 倍 (20dB) 大きい傾向にある。これは，継目部のレールが片持ち梁構造 (継目中心の剛性は，継目板の断面二次モーメントで決まる) で振動し易いことが影響していると考えられる。4kHz 以上の周波数帯では，継目部と中間部の応答はほぼ同等である。約 5kHz 以上の応答の主要因は，レール面内の断面変形であり¹⁾²⁾，レール以外の軌道構造物との連成振動の寄与は小さいことが知見として得られている。さらに，中間部も同規格のレールであることから，ほぼ同等の結果を示したと推察される。

3.3 上位側・下位側レールの周波数応答の比較

図 5 に継目 A の加振点アクセラランス $\alpha_{加振点}$ と上位側・下位側レールの加振に対する加振したレールとは異なるレールの周波数応答 (伝達アクセラランス) $\alpha_{伝達}$ のレベル差 $20 \log_{10}(\alpha_{加振点} / \alpha_{伝達})$ の周波数スペクトルを示す。

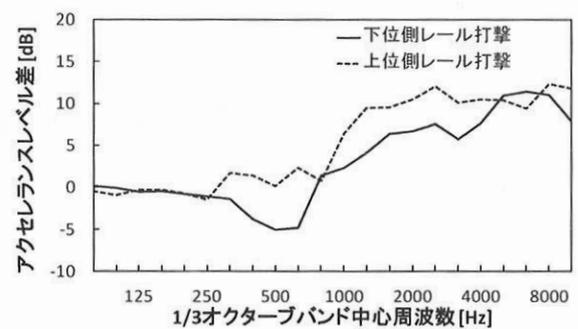


図 5 継目 A の加振点アクセラランスと伝達アクセラランスのレベル差

図 5 より，250Hz バンド以下の周波数帯域におけるアクセラランスレベル差はほぼ 0dB であり，継目部のレールが一体で振動していることが分かる。250Hz バンド以上の周波数帯域では，上位側レールを打撃した場合と下位側レールを打撃した場合のアクセラランスレベル差に最大 5dB 程度の差が生じており，打撃箇所により上位側・下位側レールでの応答が異なることが分かる。これは，前節で述べたように，継目 A 付近のレールの締結位置での支持剛性にばらつきがあるためと考えられ，営業線における軌道においては，これほどの差異は生じないと推察される。また，下位側レールを打撃した場合は，800Hz バンドを境にアクセラランスレベル差の正負が反転している。つまり，上位側と下位側レールの応答の大小関係が入れ替わることを意味する。800Hz バンド以上の周波数帯域では，打撃箇所に関わらず正のレベル差となっており，打撃したレールの応答が，継目板で接合された他方のレールの応答に比べて大きくなる (振動し易い) ことを表している。

4. 現車走行試験

4.1 試験概要

現車走行試験で使用した試験車両は，鉄道総研が所有する燃料電池試験車 R291 (2 両 1 編成) であり，車輪形式は NA 形波打車輪である。試験列車が 3 種類の異なる諸元の継目 (表 1 参照) を通過する際に生じるレール上下方向の

振動加速度を測定した。なお、車両側で同時に車輪振動も計測している³⁾。振動加速度計を仮設した車輪が継目を通過した際の出力を解析対象とした。振動加速度計の設置位置は、衝撃加振試験と同一である(図2参照)。さらに、中間部においても同様の測定を実施した(図3参照)。試験列車の継目通過の速度は、20km/h、35km/hの2段階、進行方向は双方向で計4パターンの試験条件を設定した。

4.2 継目通過時のレール振動加速度の時系列波形

図6に継目A通過時のレール振動加速度の時系列波形の一例を示す。継目部において上位側レールの方向に列車が進行する場合はステップアップ、下位側レールの方向の場合はステップダウンとして区別する。

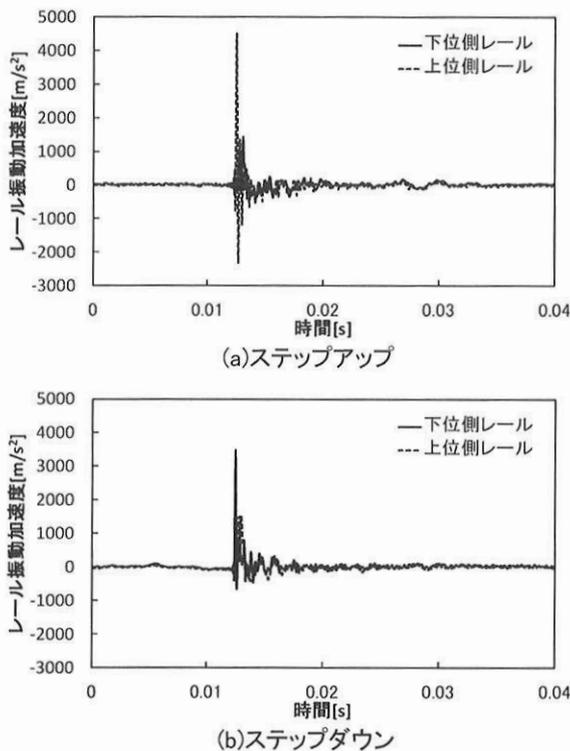


図6 継目A通過時の振動加速度の例(35km/h)

図6より、車輪が継目を通過する瞬間にパルス状の応答が生じ、そのピーク値は数千[m/s²]に至る。また、ステップアップでは上位側レール、ステップダウンでは下側レールの振動加速度のピーク値が、継目板で接合された他方のレールよりも大きい。すなわち、列車進行側のレールの応答が大きく、この傾向はほぼすべての試番で確認された。継目通過後のレール振動については、車輪の場合³⁾よりも速やかに減衰する特徴がある。これは、長大な梁形状のレールの方が、円盤形状の車輪よりも振動モードの影響を受けにくいからである。

4.3 継目Aおよび中間部通過時のレール振動の比較

(1)レール振動加速度 O.A.値

本試験において最大の段差を有する継目A(表1参照)と中間部を通過する際のレール振動を比較する。

データの解析は、車輪通過時の振動加速度計からの出力に対し周波数分析器によるFFTを次の条件で実行した。

サンプリング周波数：24,000Hz

サンプリング点数：4,096点

窓関数：矩形

図7に列車進行側のレールの振動加速度 O.A. (オーバーオール) 値と列車速度の関係を示す。図7より、列車速度向上に伴い O.A. 値も大きくなり、継目部は中間部よりも 20dB 程度大きい。ただし、FFT における標準化時間は 0.17s で、実効値加速度であるため、瞬時的なピークの範囲ではさらに差が広がる。ステップアップとステップダウンの O.A. 値については、共に列車速度の 2~3 乗に従う傾向にあるが、両者に有意な差は認められない。I.L.Vér によれば、一定速度以上ではステップダウンに比してステップアップのレベルが大きくなること示されている⁴⁾。差が認められない要因としては、試験列車が低速であること、上位側・下位側レールで支持剛性が異なる可能性があることが挙げられる。

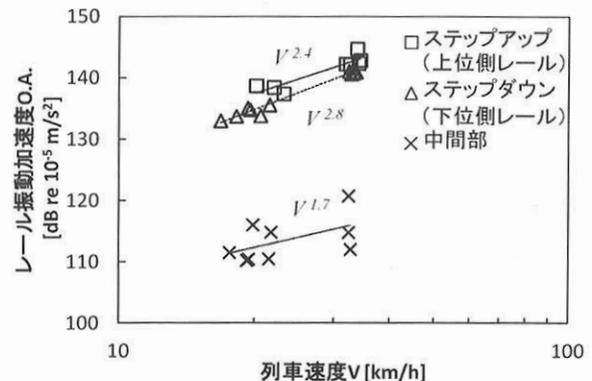


図7 継目Aにおける列車進行側のレールおよび中間部のレール振動加速度 O.A. 値と列車速度の関係

(2)現車走行時のレール振動の周波数特性

図8に、現車走行時における継目Aの上位側・下位側レールおよび中間部のレール振動加速度レベルの周波数スペクトルを示す。なお、この結果は、試験列車の設定速度付近(速度のばらつきは、数 km/h 程度)で走行した際の複数試番の振動加速度をパワー平均して得られたものである。図8(a)より、ステップアップの場合の上位側レールと下位側レールの振動加速度レベルを比較する。試験列車の各速度段の結果において、約 500Hz バンド以下の周波数帯では同程度のレベルであるのに対し、約 500Hz バンド以上では、上位側レールの応答が大きくなるのが分かる。この傾向は、衝撃加振試験で得られた図5の上位側レール打撃の結果から 315Hz バンド以上の周波数帯で加振側のレールの応答が大きくなる挙動に概ね対応しており、アクセラランスレベル差は上位側・下位側レールの振動加速度レベル差と解析周波数帯においてほぼ整合する。ゆえに、ステップアップの場合に加振力が主として作用する箇所は上位側レールの頭頂面と考えてよいといえる。一方、図8(b)より、ステップダウンの場合の上位側レールと下位側レールの振動加速度レベルを比較すると、315Hz バンド以下の周波数帯では、ステップアップと同様に同程度のレベルを示す。315Hz~1250Hz バンドでは、上位側レールの応答が

大きい、1250Hz バンド以上では下位側レールの応答との大小関係が入れ替わる。この傾向についても、図 5 の下位側レール打撃の結果と概ね対応しており、ステップダウンの場合に加振力が主として作用する箇所は下位側レールの頭頂面と考えてよいといえる。

以上より、継目通過時のレール振動は、レールの振動特性を反映した挙動を示し、加振力が作用するレールの支持剛性の大きさにより上位側・下位側レールの応答は異なると考えられる。

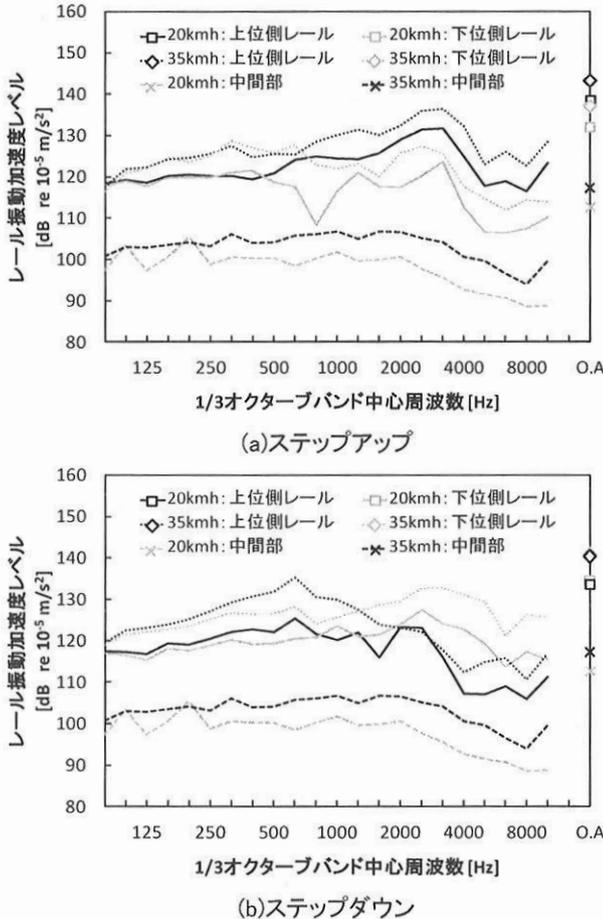


図 8 現車走行時における継目 A の上位側・下位側レールおよび中間部のレール振動加速度の周波数特性

(3) 継目の諸元が現車走行時のレール振動に及ぼす影響

図 9 に現車走行試験における継目の諸元 (表 1 参照) が列車進行側のレール振動加速度 O.A 値に及ぼす影響とその列車速度特性を示す。図 9 より、継目の諸元に関わらず列車速度向上に伴って振動加速度は大きくなる傾向にあり、継目部におけるその速度依存性は 2~3 乗である。また、列車進行方向に関わらず継目の段差の大きさの順 (継目 A> 継目 C> 継目 B) に応じたレール振動加速度が現れている。しかし、O.A 値の数 dB の差が継目の諸元の違いに起因するものかは、列車の速度域が狭く、レールの支持剛性のばらつきの影響も含まれると考えられるため、今回の試験結果からは断定はできない。また、継目幅のレール振動に対する相関は確認できなかった。そのため、継目の諸元とレール振動の相関を決定づけるためには、軌道の管理状態が良好な営業線で支持剛性のばらつきが小さい状況

で、広域な列車速度設定による試験を行う必要がある。

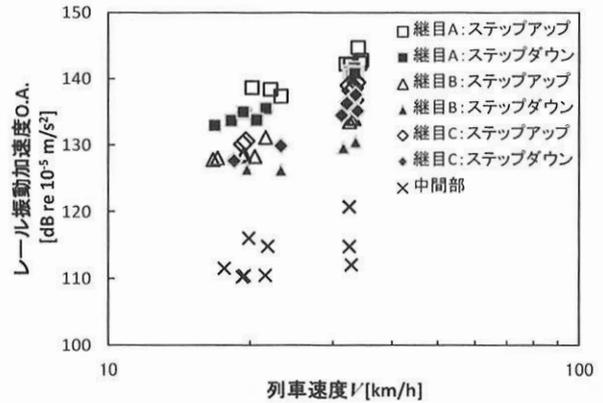


図 9 現車走行試験における継目の諸元が列車進行側のレール振動に及ぼす影響とその列車速度特性

5. まとめ

列車がレール継目を通過する際に発生する衝撃音に関する軌道の振動特性を調べるため、鉄道総研内の試験軌道の遊間継目において衝撃加振試験および現車走行試験を実施した。これにより得られた知見は以下の通りである。

軌道衝撃加振試験の結果より、

- 1) 継目部のレール上下方向の加振点アクセラランスは、1.5kHz~3.0kHz の周波数域において継目ではない箇所のレールの周波数応答よりも約 20dB 大きい。
- 2) 800Hz バンド以上の周波数帯域では、打撃したレールの加振点アクセラランスが、継目板で接合された他方のレールの伝達アクセラランスに比べて大きい傾向にある。
- 3) ステップアップとステップダウンで有意な差は認められない。
- 4) O.A.値は、列車速度の 2~3 乗に従う傾向にある。
- 5) レールの振動特性を反映した挙動を示し、加振力が作用するレールの支持剛性の大きさにより上位側・下位側レールの応答は異なる。

参考文献

- 1) 北川敏樹, 長倉清, 上妻雄一, 村田香, 田中慎一郎: レール振動におけるレール支持機構の影響, 鉄道総研報告, Vol.20, NO.1, pp.5-10, 2006
- 2) D. J. Thompson: Railway noise and vibration: Mechanisms, modeling and means of control, Elsevier Ltd., pp.76-81, 2009.
- 3) 田中慎一郎, 川口二俊, 村田香, 長倉清: レール継目衝撃音に係る車輪・軌道の振動特性評価-車輪編-, J-RAIL2011, 2011
- 4) I. L. Ver, C. S. Ventres, M. M. Myles: Wheel/Rail Noise-PartIII: Impact Noise Generation by Wheel and Rail Discontinuities, Journal of Sound and Vibration, 46(3), pp.395-417, 1976.