論文　レール破断部通過時の軸箱振動加速度に含まれる低周波成分の特徴

相澤　宏行[1]・細田　充[2]・山本　隆一[3]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部レールメンテナンス（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: aizawa.hiroyuki.45@rtri.or.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部レールメンテナンス（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: hosoda.mitsuru.75@rtri.or.jp

[3]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部レールメンテナンス（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: yamamoto.ryuichi.22@rtri.or.jp

継目部を有する区間にも適用可能な軸箱加速度を用いたレール破断検知手法構築を目的とし，レール破断部および継目部の列車走行試験を行い，軸箱加速度の特徴を調査した．軸箱加速度にローパスフィルタを適用し，波形の最大値と波形の形状から定まる無次元特徴パラメータをそれぞれ比較した．最大値については頭頂面凹凸が顕著な継目部において破断部に匹敵する値となった．一方，波形の無次元特徴パラメータは頭頂面凹凸の形状によっては継目部と破断部の間に差異があることが分かった．頭頂面凹凸の顕著な継目部を対象とした時，波形の最大値のみを用いた場合 43%の走行試番で継目部が破断部であると誤判定されたが，無次元特徴パラメータを併用した場合は誤判定が 7%まで低下し，両者の併用により破断部と継目部を効果的に区別できる可能性が示唆された．

Key Words: *broken rail, joint, axle-box acceleration, rail-head irregularity, nondimensional parameters*

1. はじめに

軌道回路は路線の延長にわたって設置されており，列車位置検知とレール破断検知の役割を担っている．昨今開発が進んでいる無線式列車制御システム（CBTC）を導入すれば軌道回路によらず列車位置検知が可能になることから，軌道回路に依存せずレール破断を検知するシステムが求められている．

レール破断検知手法については，超音波領域の弾性波を用いる方法が検討されており [1]，国内でも軌道回路に依存しないレール破断検知手法の一つとして，空中超音波プローブを用いた手法が検討されている [2]．また，低コストな手法として上下方向の軸箱振動加速度（以下，軸箱加速度とする）を用いる方法も考えられている [2]．レール破断部通過時の軸箱加速度は，車輪が破断部を乗り移ることに伴う衝撃波形を呈する．この波形は，鉛直方向の軌道とばね下質量の連成振動数が低下することを原因として，特有の低周波成分を含む．着目する振動数はレール中間部においては 50Hz 程度であるが，レール破断部においてはレールの梁としての境界条件が局所的に片端自由となることに伴い 30Hz 弱に低下する．そのため，30Hz のローパスフィルタ（以下，LPF とする）で軸箱加速度を濾波することにより，レール開口部を検知できる可能性がある [3]．

また，軸箱加速度を用いてレール破断検知を行うにあたり，レール継目部は誤ってレール破断部であると判定される可能性があると予想される．これは，継目部においては両レールが継目板で結合されているもののレールは不連続であり，レール継目部通過時の軸箱加速度はレール破断部同様に衝撃波形となるためである．誤検知を防止するためにレール継目部を含む区間をレール破断検知システムの適用範囲外とすることも考えられるが，適用可能線区が限定されるという問題がある．継目部の有無に関わらず適用可能なシステムを検討するためには，継目部通過時の軸箱加速度の特徴を把握する必要がある．継目部通過時の軸箱加速度については，台車前後軸間の

軸箱加速度の差に着目した軌道状態評価法に関する研究[4]があるものの，30Hz より低周波の領域について，継目部通過時の波形をレール開口部通過時の波形と比較検討した例はない．

そこで本研究では，バラスト軌道上で列車走行試験を行い，軸箱加速度の低周波成分波形の絶対値を，レール破断部を模擬した開口部および継目部について調査した．その結果，一部の継目部においてレール開口部に匹敵する値が観測されたことから，これらの継目部の形態と軸箱加速度の波形の特徴についても合わせて整理した．異常信号の検出には，波形の絶対値ではなく波形の特徴を反映した無次元特徴パラメータを用いる手法[5]が存在する．そこで，レール開口部および開口部に匹敵する値が観測された継目部を通過した際の波形について無次元特徴パラメータを算出し，レール開口部とこれらの継目部で算出される値の差異と活用方法について考察した．

2. 列車走行試験による軸箱加速度の取得と整理方法

(1) 列車走行試験の概要

レール破断部および継目部を通過した際の軸箱加速度を取得するために，試験軌道においてレール破断部を模擬したレール開口部およびレール継目部を対象に，列車走行試験を行った．**図-1** に軸箱加速度の分析対象とした走行区間および試験車両の模式図を示す．

試験軌道はバラスト軌道上の継目区間であり，レール継目部については 5 継目を検討対象とした．2J，3J は PC まくらぎ区間（木まくらぎの支え継ぎ），1J，4J，5J は木まくらぎ区間上（かけ継ぎ）にある．レール破断部は，新品レールの中間部を切断することにより設けたレール開口部（R）で模擬した．レール開口部の位置は 2J と 3J の間（PC まくらぎ区間）の曲線外軌側のまくらぎ間に設定し，設定開口量は遊間が無い 0mm および大きい開口量の位置付けとしてロングレールの破断時開口量の限度値[6]相当の 70mm とした．開口部は支持剛性の大きい PC まくらぎ区間上であり，開口量 0mm の場合は検知が最も難しい条件を想定している．この区間を，通勤型車両を模擬した試験車両（けん引走行）で 1J から 5J の方向に向かって繰り返し走行した．設定走行速度は 10，20，30km/h である．

軸箱加速度は車両の第 4 軸の軸箱支持装置に設置した加速度計で測定した．曲線部において，台車の前軸は外軌側レールに押し付けられて横圧を発生する一方で後軸は概ねレールの中央を走行する[7]．前軸車輪のレール接触位置が一定であることから，レール波状摩耗の測定には前軸の軸箱加速度を使用することが推奨されている[8]が，レール破断部の検知に当たっては軌道と車両が成す鉛直方向の振動系の連成振動数の変化に着目する[3]必要があることから，軌道と車両の横方向の運動の影響が小さい軸位である第 4 軸を選定した．

加速度計はひずみ式で定格容量±490.3m/s^2，応答周波数 0～1.5kHz で，鉛直上向きが正である．その他の軌道の諸元は**表-1** に，車両の諸元は**表-2** に示す通りである．

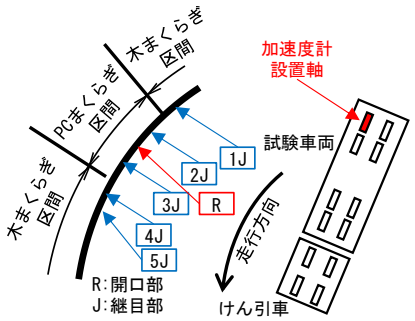


図-1 走行区間および試験車両の模式図

表-1 走行試験の軌道の条件

試験区間	100 m
支持条件	バラスト軌道
線形	曲線（最小半径 R=160 m ）
継目の遊間	5 mm
継目間の距離	20 m

表-2 走行試験の車両の条件

車両長	19.5 m
台車間距離	13.8 m
輪軸間距離	2.1 m
輪重	33.2 kN
ばね下質量	635 kg
軸箱支持方式	軸はり式

(2) データの整理方法

得られた軸箱加速度波形を，隣接する継目部またはレール開口部の影響を受けないよう，注目する箇所を中心として前後 3.2m の範囲で切り出し，30Hz の LPF で濾波する．カットオフ周波数を 30Hz に定めた理由は，レールが片端自由となる条件では軌道の支持剛性とばね下質量の連成振動数が 30Hz 弱となるため[3]，両レールが継目板により曲げモーメントを伝達する継目部と比較し，レール開口部の応答が大きくなると予想されるからである．なお，この区間内で車両は概ね定速で走行している．また，濾波後の波形の最大値の絶対値を各開口部および継目部について抽出する．以下，この処理を抽出処理，抽出処理を施した軸箱加速度のピーク値を Maximum of Filtered Axle Box Acceleration（MFABA）と呼ぶことにする．

また，レール開口部および継目部を通過する際の MFABA は速度に依存すると予想される．そこで，それぞれの速度依存性を調査するため，各開口量の開口部お

よび各継目部で得られたMFABAを走行速度v(km/h)に対して最小二乗法により回帰した．回帰式は傾きaと切片bについて

$$y = av + b \quad (1)$$

の一次式である．回帰式の傾きaがMFABAの速度に対する依存性を表す．

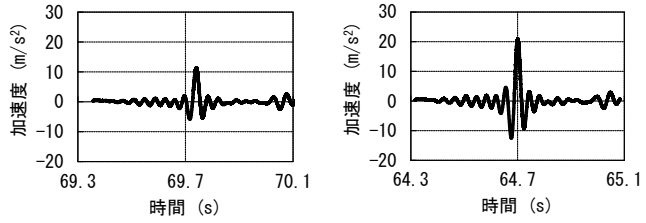
3. 列車走行試験の結果

(1) レール開口部通過時の軸箱加速度に含まれる 30Hz 以下の成分の波形の特徴

a) 波形の特徴

まず，レール開口部通過時の抽出処理後の波形に注目する．**図-2** に，走行速度 30km/h で走行した際の抽出処理を施した軸箱加速度波形を示す．

開口量 0（R0），70mm（R70）の場合ともに，レール開口部通過時に大きな正のピークがあり，この正のピークの前後に正のピークよりも絶対値が小さい負のピークが見られる．なお，レール開口部通過後のピークは試験軌道のレール頭頂面に存在した凹凸によるものである．



(a) 開口量 0 mm，速度 30km/h　　(b) 開口量 70 mm，速度 30km/h

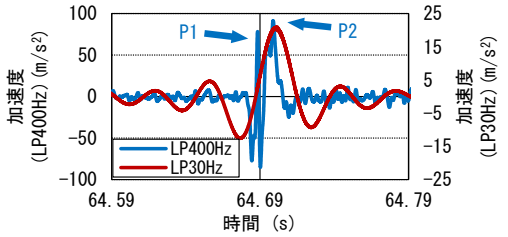
図-2 抽出処理を施した軸箱加速度波形

b) 車輪の開口部乗り移り挙動と波形の対応

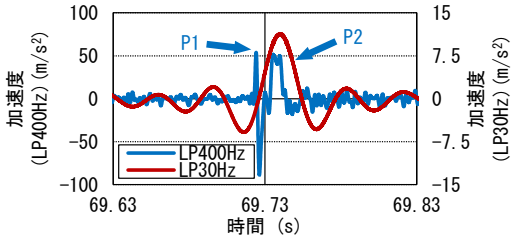
図-3 に，30 Hz および高周波振動成分まで含むよう 400Hz の LPF で濾波した軸箱加速度波形のレール開口部通過時近傍の拡大図を示す．

一般に，レール継目部通過時の輪重（レール・車輪間に発生する力）波形は 2 つのピークを有し，最初に生じる作用時間が短いピークは P1，その後の作用時間が長いピークは P2 と呼ばれ，特に P2 はばね下質量とレールの支持剛性によって決定される [9]．P1，P2 に対応するピークは，レール開口部通過時の 400Hz 以下の軸箱加速度波形にも表れる [10]．**図-3** の軸箱加速度の 400 Hz 以下の成分も 2 つのピークを持ち，これらがそれぞれ P1，P2 に対応すると考えられる．一方，30Hz 以下の成分については P2 の位置に 1 つの正のピークのみが存在する．これは，レール開口部通過時の 30Hz 以下の軸箱加速度波形に含まれる応答はばね下質量と軌道の連成振動によるものが主であり，接触現象に伴う高周波の P1 は低周波成分の波形に表れないことが原因であると考えられる．

以上を考慮すると，レール開口部における抽出波形の正のピークは，車輪が列車進来方向と反対側（以降，受け側とする）のレールに乗り移った後のタイミングに生じ，その前の負のピークは開口部通過直前の輪重抜け挙動に概ね対応していると考えられる．



(a) 開口量 0 mm，速度 30km/h

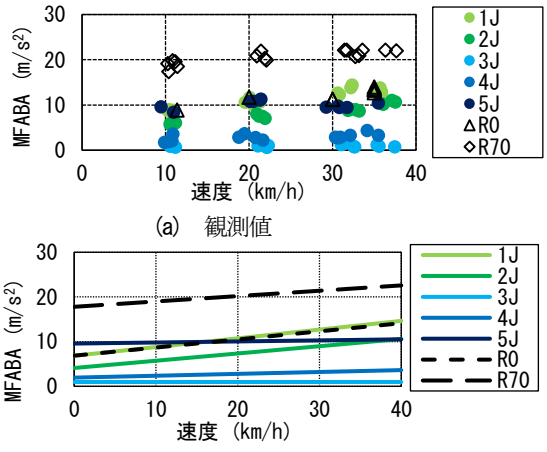


(b) 開口量 70 mm，速度 30km/h

図-3 30Hz および 400Hz の LPF 処理後の軸箱加速度波形（開口部近傍拡大）

(2) 30 Hz 以下の軸箱加速度波形の最大値の比較

図-4 に，試験で得られた各開口量の開口部および各継目部における MFABA の観測値と，それらの速度に対する回帰直線を示す．凡例の開口部は R に続いて開口量を示している．**表-3** に走行試験で得られた MFABA の回帰直線の係数，説明変数の影響の大きさを表す t 値（一般に 2 以上でその説明変数は有意），および決定係数 R^2 値



(a) 観測値

(b) 回帰直線

図-4 開口部および継目部における MFABA

表-3　回帰直線の係数

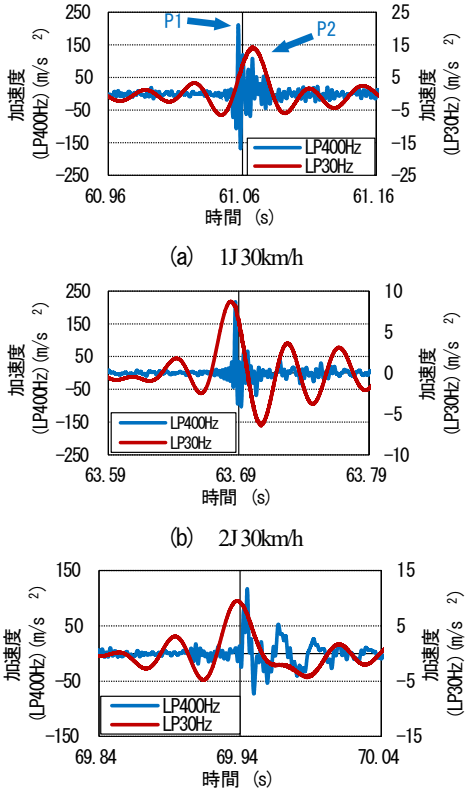
	1J	2J	3J	4J	5J	R70	R0
a	0.195	0.163	0.000	0.042	0.024	0.120	0.182
t	10.426	14.973	0.047	2.574	0.768	5.818	7.028
b	6.836	4.102	0.960	1.947	9.566	17.795	6.859
t	13.828	14.595	6.287	4.690	11.727	33.766	9.076
R^2	0.901	0.941	0.000	0.338	0.056	0.707	0.861

を示す．

継目部については 3J，5J の係数 *a* に関する *t* 値が小さいことから，速度の影響が不明確で，R^2値も小さかった．よって，これらの条件での係数の大きさや符号について考察するのは難しい．以下，このことを考慮しながら考察する．

図-4 を見ると，レール開口部については，開口量 0mm（R0）より 70mm（R70）の方が MFABA の値が大きくなっている．継目部については，対象とした 5 つの継目の内，1J，2J，5J を通過した際の MFABA が大きい．特に，1J および 5J はレール開口部における値よりも大きくなっている場合がある．

回帰式の係数に着目すると，レール継目部については，1J，2J を除いて速度に対する係数 *a* が 0.1 よりも小さいもしくは速度の影響が不明確である．一方で，1J，2J は係数 *a* が 0.1 を超えており，他の継目部と比較して速度の依存性が大きい．レール開口部については，係数 *a* は 0.1 より大きく速度への依存性が確認され，かつ係数 *b* も MFABA が小さかった継目部（3J，4J）より大きくなっている．



(a)　1J 30km/h

(b)　2J 30km/h

(c)　5J 30km/h

図-5　30Hz および 400Hz の LPF 処理後の軸箱加速度波形（継目部近傍拡大）

(3)　MFABA が大きい継目部の特徴

レール開口部に匹敵する MFABA が観測された継目部は，MFABA を用いてレール破断検知を行う場合には誤検知されることになる．そこで，これらの継目部とその波形について詳細に調査する．

a)　波形の特徴

図-5 に，30Hz および 400Hz の LPF で濾波した軸箱加速度波形の MFABA が大きかった継目部である 1J，2J，5J 通過時近傍の拡大図を示す．いずれの継目部についても，継目部通過に伴って波形の振幅が大きくなっており，特に 1J および 5J については正のピークが大きくなっている．これは，30Hz 以下の低周波成分について，これらの継目部の通過時に，輪軸がレールから突き上げられる方向の大きな加速度を持つことを示している．

30Hz 以下の低周波成分については，1J に関しては特に正のピークが負のピーク値の 2～3 倍程度と大きくなっており，正のピークの前後には負のピークが見られる．2J の波形は，大きな正のピークの後に正と負のピークが交互に表れ，正のピークと負のピークの絶対値の差は小さい．5J の波形についても正のピークの後に負のピークが確認でき，この負のピークの後は波形が歪んでいる．

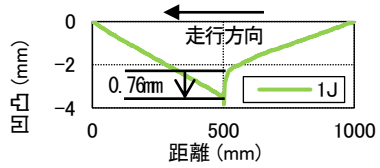
400Hz 以下の成分と 30Hz 以下の成分を比較する．1J については，400Hz 以下成分の波形には P1，P2 が見られ，30Hz 以下成分のピークは P2 の位置に対応しており，この特徴はレール開口部における波形と類似している．一方，2J および 5J の 400Hz 以下成分の波形には P2 のような継続時間が長いピークは明瞭には見られず，30Hz 以下成分の波形のピーク位置は 400Hz 以下成分の波形の最大ピーク位置近傍である．

b)　継目部の外観の特徴と頭頂面凹凸

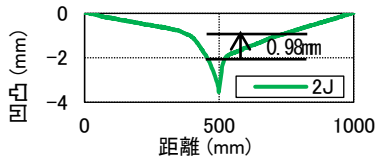
これらの継目部を外観観察したところ，1J，5J は軌道パッドがない構造であった．また，これらの継目部では目視で確認できるほどのレール頭頂面の落ち込みが観察されたことから，レール頭頂面凹凸を測定した．

1J，2J，5J において，レール凹凸測定器で測定された 1m スパンのレール頭頂面凹凸を**図-6** に示す．レール長手方向距離が 500mm の位置にレール遊間が存在し，車両の走行方向は図の横軸の 1000mm から 0mm への向きである．いずれの継目部においても頭頂面が 3mm 以上落ち込んでおり，1J は 0.76mm の段下り，2J と 5J はそれぞれ 0.98mm と 1.32mm の段上りである．ここでは省略するが，3J，4J における頭頂面の落ち込みは最大でも約 2mm で同程度であった．レール開口部は新品レールのレール中間部を切断して設置したため，著大な頭頂面凹凸は認

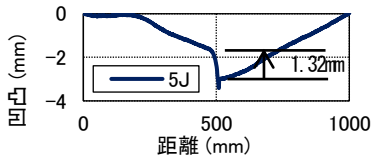
められなかった．なお，頭頂面凹凸が同程度であった 3J, 4J において軌道ばね係数を軌道支持剛性測定装置 [11]によって測定したところ，それぞれ 47.5MN/m，27.8MN/m であった．4J の軌道ばね係数は 3J の約 6 割である一方，両者の MFABA は 5m/s²未満である．以上より，MFABA に対しては頭頂面凹凸の寄与が大きいと考えられる．**表-4** に継目部の構造と特徴，凹凸量を示す．



(a) 1J



(b) 2J



(c) 5J

図-6 MFABA が大きい継目部のレール頭頂面凹凸

表-4 MFABA が顕著な継目部の特徴

	凹凸	構造
1J	3.32mm（0.76mm 段下り）	パッド無し
2J	3.55mm（0.98mm 段上り）	パッド有り
5J	3.02mm（1.32mm 段上り）	パッド無し

c) MFABA が大きくなった原因の推定と考察

1J，2J，5J の波形に見られた正のピークは車輪が受け側のレールに乗り移る際の輪重変動に起因している．この輪重変動は凹凸量の増加に伴って増大すると考えられるため，頭頂面凹凸が大きい 1J，2J，5J では軸箱加速度の振幅が著大になったと推測される．

開口量 70mm のように遊間が大きいレール開口部の MFABA はこれらの継目部より大きい傾向にあることから，MFABA にしきい値を設定して遊間が大きい開口部と継目部を区別可能であると考えられる．しかし，開口量 0mm の開口部とこれらの継目部で得られる MFABA は同程度であるため，破断時に遊間がほとんど生じない場合，MFABA による区別は困難である．

一方で，**図-5** に見られる通り，段下りである 1J の波形はレール開口部通過時と似た形状となっているものの，段上りである 2J および 5J 通過時の低周波成分の波形はその正のピークが輪重の P2 とは対応せず，正負のピークの発生の様子はレール開口部通過時とは異なった特徴を持つ．すなわち，頭頂面凹凸形状によっては，MFABA が同程度であっても波形の形状が異なる場合がある．次章以降で，このような波形の形状の差を利用した波形の判別方法について検討する．

4. 無次元特徴パラメータの導入

顕著な凹凸が存在する継目部をレール開口部と区別できる指標について考える．異常信号の検出方法には，波形の最大値ではなくその無次元特徴パラメータを用いる方法がある．例えば，波形の無次元特徴パラメータを用いたベアリングの異常検出 [5]や歯車のずれ診断 [12]について研究が行われている．そこで，波形の無次元特徴パラメータの軸箱加速度に対する適用を検討する．

(1) 検討対象とする無次元特徴パラメータ

以下に，検討対象とする無次元特徴パラメータを説明する．

・歪度

あるデータ X の平均値が μ，標準偏差が σ の時，X の歪度 α は

$$\alpha = \frac{E[(X-\mu)^3]}{\sigma^3} \tag{2}$$

である．ここに，$E(X)$は X の期待値である．歪度は，正規分布と比較して，データ Xの分布が左にずれている時に正，右にずれている時は負の値となる．

・尖度

あるデータ X の平均値が μ，標準偏差が σ の時，X の尖度 β は

$$\beta = \frac{E[(X-\mu)^4]}{\sigma^4} - 3 \tag{3}$$

である．尖度は，正規分布と比較して，データが平均値近傍に鋭いピークを持って集中し，データの裾が短く太い場合に大きい値を取る．

歪度と尖度は異常信号に対して大きくなることが指摘されている [5,12]．**図-7** に，**図-2(a)** の波形とそのヒストグラム（相対度数密度）の関係と，レール開口部（R0）とレール継目部（5J）の濾波後の波形の加速度のヒストグラムを示す．**図-7** には，各ヒストグラムの平均値を赤点線で，各ヒストグラムと同じ平均値および標準偏差を持つ正規分布の確率密度関数を緑破線で示してある．

レール開口部のヒストグラムは正規分布よりも平均値付近に分布が集中し，また，やや左に寄っている．これは，波形に開口部通過に伴う局所的な正の振動が含まれることで分布の標準偏差および平均値が大きくなるためであると考えられる．

一方，5J のヒストグラムは波形の歪みに起因してレール開口部と異なり平均値近傍に集中しておらず，平均値からややばらつきを持つことから，レール開口部とは歪度および尖度の値に差が生じると予想される．よって，歪度と尖度を検討対象とする．

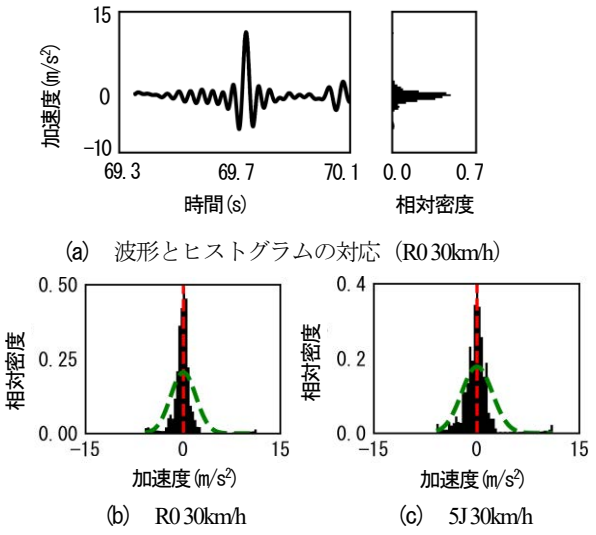


図-7 開口部および継目部通過時の波形のヒストグラム

(2) 走行試験データの比較

2 章の列車走行試験データに対して，歪度と尖度を計算する．**図-8** に軸箱加速度を 30Hz の LPF で濾波した波形の歪度，尖度を示す．

a) 歪度

レール開口部の歪度は開口量に依存せず，走行速度による変化は見られない．レール開口部の値は2Jおよび5Jの値と比較して大きくなっている一方で，1J の値よりも小さい傾向にある．継目部の中で比較すると，2J および 5J と比較して 1J は顕著に大きい値となる．

b) 尖度

レール開口部の尖度は開口量に依存せず，走行速度とともに値は減少する．継目部と比較すると，2J および 5J よりもレール開口部の方がより大きい値となっている．1J については，全速度域でレール開口部と同程度の値となっている．

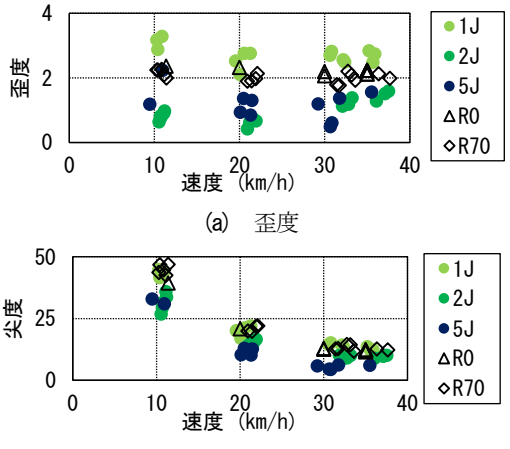


図-8 無次元パラメータの比較

(3) 考察

MFABA を比較した場合，5J における値は速度 20km/h 以下の範囲では開口量 0mm のレール開口部 R0 よりも大きかったが，尖度を比較した場合は全ての速度域で，歪度を比較した場合には速度 10km/h の 1 点を除いて，5J における値がレール開口部の値を下回っている．2J については，その MFABA がレール開口部における値をすべて下回っていたが，歪度および尖度についてもほぼレール開口部の値を下回っている．これは 2J および 5J の頭頂面凹凸が段上り形状であるため，車輪が受け側レールに接触した後の波形の形状がレール開口部と異なり，正負に振動または歪んでいることによると考えられる．

一方で 1J に関しては，歪度については開口部における値より 1J における値が大きくなっており，尖度についても開口部と同等の値となっている．これは，1J の頭頂面凹凸が段下り形状であることから，波形の過渡的な特徴がレール開口部と似た形態となっていること，さらに軌道パッドが無い構造であることによって継目近傍の軌道の剛性が低く，レール開口部と似た輪軸の通過挙動になることによると考えられる．

(4) 無次元パラメータの活用方法

3 章の結果から，波形の絶対値を用いた場合，遊間がほとんど生じないレール破断部と顕著な頭頂面凹凸を持つ継目部を区別できない可能性があることが分かった．一方，前節の通り，無次元特徴パラメータを併用することで，このような継目部の一部を適切にレール破断部と区別できる可能性がある．

例として**図-9** に示す 2 段階の判定を考える．MFABA および無次元特徴パラメータのしきい値をあらかじめ設定しておき，まず MFABA に関してスクリーニングすることで，レール破断および（凹凸の形状によらず）頭頂面凹凸の顕著な継目部を抽出する．次に，MFABA のし

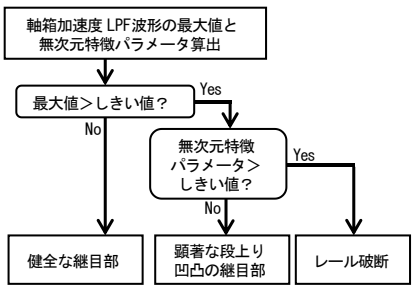


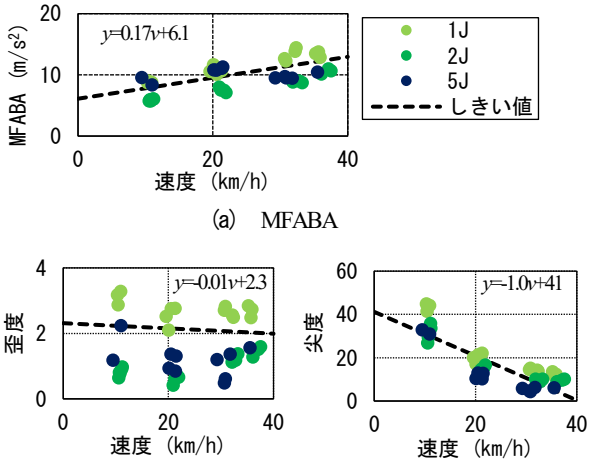
図-9 レール破断判定フローの一例

きい値超過箇所について無次元特徴パラメータを計算する．その値がしきい値を上回った場合のみレール破断部（顕著な段下りの継目部の可能性もある）と判定し，下回った場合には顕著な段上りの継目部と判断できる．

図-10 に開口量 0mm の開口部（R0）の MFABA および無次元特徴パラメータを参考に設定したしきい値と，各継目部で得られた値の比較を示す．しきい値は直線とし，開口量 0mm の開口部を全て検知できるよう，直線の傾きを R0 の観測値から導出される回帰直線と同一とし，切片を R0 の全プロットが直線を上回るよう設定した（**図-10** 中の式）．また，**表-5** に**図-9** のフローに従いレール破断と判定された走行試番数とその全試番に占める割合を示す．列「MFABA のみ」には MFABA がしきい値を超過した場合に全てレール破断と判定している．

継目部であるにも関わらず破断部と誤判定された試番は，段上りの 5J について MFABA のみを用いた時は 43%あったが，歪度を併用した時は 7%，尖度の場合は 14%まで減少している．2J は MFABA がしきい値を超過しておらず，全試番がレール破断でないと判定されている．段下りの 1J は MFABA のみ，歪度および尖度との併用に関わらず多くの試番で誤判定されている．以上より，段上りの継目部については，MFABA が著大であっても無次元特徴パラメータを併用することで，破断部と区別できる可能性がある．

なお，段上りの頭頂面凹凸は継目部の疲労寿命を減じる原因になり得る[13]ことから，頭頂面凹凸を解消するための保守を行うことが望ましい．



(a) MFABA

(b) 歪度　　(c) 尖度

図-10 継目部の MFABA および無次元特徴パラメータのしきい値との比較

表-5 レール破断と判定された試番数と割合

	MFABA のみ	MFABA と歪度	MFABA と尖度
1J	14(100%)	13(93%)	12(86%)
2J	0(0%)	0(0%)	0(0%)
5J	6(43%)	1(7%)	2(14%)

段下りの継目部については，単線区間であれば逆向きの走行の際には段上りとなるため，MFABA と無次元特徴パラメータの併用による破断部と継目部の区別が可能である．複線区間のように走行方向が一方向に限定される場合については今後検討が必要である．

5. 結論

軸箱加速度を用いたレール破断検知手法の構築を目的として，レール破断部および継目部を通過した際に得られる軸箱加速度について調査した．列車走行試験を行い，レール破断部を模擬したレール開口部および継目部通過時の軸箱加速度を取得し，得られた軸箱加速度に 30Hz の LPF を適用して，その低周波成分について分析した．以下に得られた知見を示す．

(1) レール開口部走行時の軸箱加速度の 30Hz 以下の成分の波形は，特にレール開口部の遊間通過時に大きな上向きの成分を含んでおり，これらが車輪のレール開口部乗り移り挙動と対応していることが確認された．また，レール開口部走行試験の結果得られた軸箱加速度の MFABA は，開口部については速度および開口量に応じて大きくなり，開口部で得られた値の方が継目部のものよりも大きい傾向にあることが分かった．一方，3 箇所の継目部において著大な MFABA が観測され，内 2 箇所については開口量 0mm のレール開口部に匹敵する値であった．

(2) 著大な MFABA が観測された 3 箇所の継目部を調査した．その結果，当該継目部には段違いを含む大きなレール頭頂面凹凸が生じており，一部は軌道パッドの支持が無い構造であるという特徴を有することが分かった．これらの継目部を通過した際に得られる軸箱加速度の 30Hz 以下の成分の波形はレール開口部と同様に大きな上向きの成分を含んでいるが，頭頂面凹凸が段上り形状の継目部の波形についてはレール開口部と異なる特徴が見られる場合があった．

(3) レール開口部および頭頂面凹凸が顕著であった継目部走行時に得られる波形について，波形の無次元特徴パラメータである歪度と尖度を算出した．その結果，MFABA が大きい継目部の無次元特徴パラメータの値は，段上りの継目部についてはレール開口部より小さくなることが分かった．そのため，遊間がほとんど生じないレール破断部を対象とした場合でも，波形の絶対値である MFABA と無次元特徴パラメータを併用することで，レール破断部と頭頂面凹凸が顕著な継目部を効果的に区別できる可能性がある．

REFERENCES

1) Rose, J. L., Avioli, M. J. and Cho, Y.: Elastic wave analysis for broken rail detection, AIP Conference Proceedings, Vol. 615, No. 1806, 2002.
2) 細田充，相澤宏行，山本隆一：軌道回路に代わる車上式レール破断検知システム, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3，pp.17-22，2022. [Hosoda, M., Aizawa, H., and Ryuichi, Y.: Rail broken detection system from vehicle as an alternative to track circuits, RTRI Report, Vol.36, No.3, pp.17–22, 2022.]
3) 相澤宏行，細田充，山本隆一：レール開口部通過時の軸箱振動加速度を表現する簡易的な力学モデル, 日本機械学会論文集，Vol. 87, No. 92, DOI: 10.1299/transjsme.20-00393, 2021. [Aizawa, H., Hosoda, M., and Ryuichi, Y.: Simple dynamic model of predicting the axle-box acceleration when trains pass through the rupture part of rails, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.87, No.92, DOI: 10.1299/transjsme.20-00393, 2021.]
4) 坪川洋友，水野真敏，芳賀昭弘，石田誠：台車前後軸での軸箱上下振動加速度を用いた軌道状態モニタリング手法, 鉄道総研報告, Vol. 27, No. 4, pp.35-40, 2013. [Tsubokawa, Y., Mizuno, M., Haga, A. and Ishida, M.: Track monitoring based on both the axle box vertical acceleration of the leading axle and that of the trailing axle, RTRI Report, Vol.27, No.4, pp.35-40, 2013.]
5) Caesarendra, W., Tjahjowidodo, T.: A review of feature extraction methods in vibration-based condition monitoring and its application for degradation trend estimation of low-speed slew bearing, Machines, Vol.5(4), No.21, DOI: https://doi.org/10.3390/machines5040021, 2017.
6) （公財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説-軌道構造，p.181，丸善，2012. [Railway Technical Research Institute: Design standards for railway strunctures and commentary (track structure), p.181，Maruzen, 2012.]
7) 下川嘉之：曲線を円滑に通過するための操舵技術, 計測と制御, Vol. 56, No. 2, pp.87-92, 2017. [Shimokawa, Y.: Steering technique for smooth passage through curves, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.56, No.2, pp.87-92, 2017.]
8) 田中博文，松本麻美，原田祐樹，桶谷栄一：軌道検測車で測定される軸箱加速度を活用したレール波状摩耗の状態評価と管理手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.541-549, 2017. [Tanaka, H., Matsumoto, M., Harada, Y. and Oketani, E.: Study on application of axle-box acceleration measured on track inspection car for rail corrugation management on railway track, Journal of Structural Engineering, Vol.63A, pp.541-549, 2017.]
9) Jenkins, H. H., Stephenson, J. E., Clayton, G. A., Morland, G. W. and Lyon, D.: The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces, Railway Engineering Journal, Vol.3, No.1, pp.2-16, 1974.
10) 西宮裕騎：動的陽解法有限要素法を用いた鉄道車両の走行解析手法の構築，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.74，No.2(応用力学論文集 Vol.21), pp.I_649-I_660, 2018. [Nishinomiya, Y.: Development of the vehicle running simulation method with an explicit dynamic finite element method, Journal of JSCE A2 (Applied mechanics), Vol.74, No.2 (Journal of applied mechanics: JSCE, Vol.21), pp.I_649-I_660, 2018.]
11) 中村貴久，桃谷尚嗣，谷川光，吉川秀平，木次谷一平：バラスト軌道における軌道支持剛性評価方法の開発，鉄道総研報告，Vol.31，No.12，pp.29-34，2017. [Nakamura, T., Momoya, Y., Tanigawa, H., Kikkawa, S. and Kijiya, I.: Development on the evaluation method of track support stiffness of the ballasted track, RTRI Report, Vol.31, No.12, pp.29-34, 2017.]
12) Khan, M. A., Shahid, M. A., Ahmed, S. A., Khan, S. Z., Khan, K. A., Ali, S. A., and Tariq, M.: Gear misalignment diagnosis using statistical features of vibration and airborne sound spectrums, Measurement, Vol.145, pp.419–435, 2019.
13) 片岡宏夫，阿部則次，若月修：レール継目部の発生応力と疲労寿命推定，鉄道総研報告，Vol.15，No.4，pp.9-14，2001. [Kataoka, H., Abe, N. and Wakatsuki, O.: Evaluation of Stresses and Fatigue Life of Jointed Rails, RTRI Report, Vol.15, No.4, pp.9-14, 2001.]

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

CHARACTERISTICS OF AXLE-BOX ACCELERATIONS IN LOW FREQUENCY DOMAIN ON BROKEN RAILS

Hiroyuki AIZAWA, Mitsuru HOSODA and Ryuichi YAMAMOTO

To develop on-board broken rail detection systems, the authors have researched those systems with axle-box accelerations. It is desirable for those systems to be applicable to joints parts. Therefore, this paper aims to investigate characteristics of axle-box accelerations in low frequency domain when vehicle passes through broken rails and jonts. We obtained axle-box accelerations on broken rails and joints by conducting running tests. The waveforms of accelerations were filtered and its maxima and nondimensional parameters were compared. It is found that the maxima on joints with significant rail-head irregularities are comparable of those on broken rails. However, there are differences between nondimensional parameters on broken rails and joints, which implies that the combination of the maxima and nondimensional parameters allows us to correctly classify broken rails or joints.