鉃道総研報告





公益財団法人 鉃道総合技術研究所

FEM 解析を用いた 車輪フラットによる衝撃力発生メカニズムの解明

齋藤 理沙* 坂井 宏隆*

A Study on the Wheel-rail Impact Behavior due to a Wheel-flat by Finite Element Analysis

Risa SAITO Hirotaka SAKAI

We simulated the continuous impact force due to a wheel-flat using the finite element method to investigate the influence of running velocity and positions of the impact force generation on the rail on the mechanism of impact force generation. For each position of the impact force generation on the rail pad, the peak values of the wheel load are almost identical, confirming the reproducibility. It was also found that high frequency vibrations are generated on the rail when the running velocity is 100 km/h or 130 km/h and the vibrations caused the peak value of the wheel load to increase. Finally, the relationship between the running velocity and the peak value of vertical acceleration of the axlebox by the proposed method was compared with that obtained from the experiment. Since they were close, we can say that the proposed analysis method is reasonable to use. $\neq - \nabla - \vec{k} : \bar{\mu} \neq \bar{\nu}, \quad \bar{\nu} = \psi, \quad \bar{\nu} = \psi, \quad \bar{\nu} = \psi$

1. はじめに

車輪フラット(以降,フラットと呼ぶ)は、制動力が 粘着限界を上回り、車輪がレール上を滑走した際に生じ る。フラットが車輪踏面上に存在すると、走行時に連続 的な衝撃力が発生し、騒音の発生や、車両および軌道の 各部材の損傷・脱落などに繋がる恐れがあるため、保守 管理の上でフラットによる影響について把握することが 必要とされる。ここで、フラットにより発生する衝撃力 は、走行速度により変化することが多くの調査により明 らかにされており、真木ら¹¹ はそのメカニズムについて 実車両試験結果と数値解析モデルを用いて明らかにし た。しかし、真木らが行った試験は台上試験装置により 実施されたものであり、軌道構造がフラットによる衝撃 力発生メカニズムに及ぼす影響については検討の余地が あるといえる。

数値解析によりフラットの影響を評価した既往研究と しては、剛体モデルやはり・ばねモデルを主体としたも のが大多数を占める。その一方で、近年ではソリッド要 素を中心とした有限要素法(Finite Element Method: FEM)モデルを用いて車輪・レール間の接触解析を行 う研究が行われている。FEMを用いた手法は大きな計 算コストを要する一方で、メリットとして車輪・レール 間の複雑な接触状態が再現できること、各部材に生じる 応力集中が解析可能であること、塑性変形や損傷モデル などの非線形材料構成則を適用できること、疲労や損傷 問題などに対応できることなどが挙げられる。ただし、 これまでフラットによる衝撃力を詳細な FEM モデルに より解析した例²⁾³⁾は、連続する衝撃力発生のうち1回 分のみ再現したものであり、周期的に発生する衝撃力の 分析を行った例は見受けられない。その理由として、走 行距離を長く確保するためにモデル規模が増大し、計算 負荷が大きくなるため解析の実施が困難であったことが 推察される。しかし、衝撃回数が1回のみの場合、走行 位置により変化する軌道の支持状態等の条件が衝撃力の 大きさに及ぼす影響を確認することができない。

走行距離に関する上記の課題を解決するために, 坂井 ら4)が開発した「車輪・レール転がり接触シミュレータ」 は、並列 FEM 構造解析プログラム FrontISTR⁵⁾を車輪・ レール接触問題に向けて拡張したものであり、計算負荷 を抑えながら走行解析を行うための「キャタピラメッ シュ機能」を有する。これは、軌道モデルを長手方向に ブロック状に区分けし、車両モデル通過後の軌道ブロッ クを走行方向前方に移動・連結する機能であり、モデル 規模を一定に保ちつつ任意の走行距離を確保することが できる。したがって、本研究では、車輪・レール転がり 接触シミュレータを利用してフラットによる連続的な衝 撃力の発生を再現し、その評価を行う。具体的には、複 数回得られた衝撃力の大きさの再現性の確認と, 軌道構 造が衝撃力発生メカニズムに及ぼす影響について分析す る。なお、本報告では、FEM 解析の利点として解析可 能となる各部材に生じる応力や材料の非線形性の影響に は着目せず、今後においてそれらを調査する際のツール としての妥当性検証段階として, 簡易的なモデルかつ弾 性解析を適用した衝撃荷重の再現性の確認や実験結果と の比較を行う。

1

文

論

^{*} 鉄道力学研究部 計算力学研究室







図2 軌道モデル

表1 材料パラメータ

カンガ索	209.82	レール	
	0.018	軌道パッド	
(GPa)	206.00	輪軸・台車枠・車体	
	0.29	レール	
ポアソン比	0.49	軌道パッド	
	0.3	輪軸・台車枠・車体	
	7.81×10^{3}	レール・輪軸	
密度(kg/m ³)	1×10^{3}	軌道パッド	
	10.45×10^{3}	台車枠	
· ** ·	$x:10.78 \times 10^6 y:9.8 \times 10^6$	41. 191	
ばね定数 (N/m)	z:1.03×10 ⁶	単田 (よれ)	
	x,y:0.055×10 ⁶ z:0.2×10 ⁶	空気ばね	
	x:10.78×10 ³ y:9.8×10 ³	41. 33	
減衰定数 (N・s/m)	z:5.6×10 ³	軸はね	
	x,y,z:0.8×10 ³	空気ばね	

表2 解析制御パラメータ・接触解析パラメータ

Newmark- β 法係数 (γ , β)	0.51, 0.255025
時間刻み幅(s)	1×10 ⁻⁴
重力加速度(mm/s²)	9.8×10 ³
摩擦係数,接線方向ペナルティ係数	0.3, 10000

2. 解析手法

2.1 解析モデル

図1に計算対象とする1台車モデルを示す。車輪の 踏面形状は修正円弧踏面とし、車輪径は860mmとした。 本研究では最終的に真木ら¹⁾の実験結果との比較を行う ために、フラットは図1のような長さ75mmの人工フ ラットを模した形状とし,進行方向に向かって右後方車 輪に設けた。前章で述べたとおり、車両の各部材に生じ る応力については本研究では着目しないため、車軸・台 車枠などの FEM モデルは簡易的な形状とした。図1に 示すように、台車枠の上部には車体に相当する板形状の 要素を設け、その密度は重量が車体の1/2相当となるよ うに調節した値とした。輪軸・台車枠間および台車枠・ 車体相当要素間はばね・ダンパーで連結した。一方で, レールは JIS50kgN レールの形状とした。軌道構造は、 図2のとおり軌道パッドにより間欠支持されたものと し, 支持間隔は 648mm とした。図2 はキャタピラメッ シュ機能において区分けされたブロックのうち1つ分 を示し、ブロック数は合計で11とした。軌道パッドの 下面は完全拘束とした。材料パラメータは表1のとおり である。

2.2 計算条件

本研究では時間積分法に Newmark-β 法による陰解法 を用いた。接触解析手法については、法線方向を Lagrange 未定乗数法、接線方向を Penalty 法とした。表 2 に解析制御パラメータおよび接触解析パラメータを示す。

本研究では走行速度により変化する衝撃力発生メカニ ズムについて調査するために、1台車モデルが40km/h、 70km/h、100km/h、130km/hで走行する場合の解析をそ れぞれ行った。荷重条件として、重力と車軸に対するト ルク荷重を与えた。トルク荷重は、時速ゼロから評価対 象とする走行速度まで加速する間は1軸あたり125kN ×91mm(車軸中心から荷重を与える節点までの距離) ×8節点=91kN・mと実際の列車加速時よりも大きな値 とし、目標走行速度に到達したあとは定常走行状態とな る値とした。定常走行時のトルク荷重値は、40km/hの 場合27.3N・m、70km/hの場合45.5N・m、100km/hの場 合 63.7N・m、130km/hの場合91N・mである。

3. 解析結果と考察

3.1 走行速度ごとの衝撃力の違い

フラットによる衝撃力が発生したときの輪重と軸箱相 当位置(図1)の上下変位を図3に、車輪踏面の上下方 向応力分布を図4に示す。いずれの走行速度の場合にお いても、以下のような流れとなる。A~B:レールとの 接触箇所がフラット端部に差し掛かった後、コンタクト パッチが現れなくなり(図4)、輪重が一時的に抜ける (図3)、B~C:軸箱相当位置が降下し(図3)、反対側 のフラット端部に再びコンタクトパッチが現れ輪重が載



図3 衝撃力発生時の輪重と軸箱相当位置上下変位



図4 衝撃力発生時の上下方向応力

荷され(図3,4),D:輪重が最大値となる(図3)。以 上を踏まえると、フラットによる衝撃力は、車輪・レー ル間の接触箇所がフラット端部を超えたタイミングで車 輪が浮き上がり、その後降下してレールと衝突すること によって発生しているものと考えられる。さらに、図3 より、走行速度が速くなるにつれて衝撃力の大きさ(輪 重のピーク値)が小さくなることがわかる。これは、走 行速度が速くなるにつれて、車輪が浮遊してからフラッ ト端部で再びレールと接触するまでの時間が短くなり (B~C間が小さくなり)、車輪の降下量が小さくなる ためであると考えられ、真木ら¹¹の考察と概ね一致する。

3.2 連続する衝撃力の分析

図3では接触箇所がフラットを通過し,衝撃力が発生 する瞬間の輪重を示したが,数秒程度の間に連続して衝 撃力が発生する様子をグラフ化すると,図5のとおりと なる。走行速度ごとに十数回発生している衝撃力の大き



図6 衝撃力発生位置ごとの輪重波形

さは同じではなく、ばらつき(平均値を基準として、 13~22%程度)がある。以降ではその理由について考 察し、輪重のピーク値の計算結果の再現性について検討 するとともに、軌道構造が衝撃力の大きさに及ぼす影響 について調査した結果を示す。

3.2.1 衝撃力発生タイミングの影響

衝撃力の大きさにばらつきが生じる原因として、本解 析ではレールを軌道パッドにより間欠支持しており、支 持剛性が進行方向で均一ではないことが考えられる。し たがって、レール長手方向における衝撃力発生位置ごと に衝撃力の大きさを比較するために、図6に示すとお り、図5の衝撃力発生時の輪重波形を、軌道パッドの中 心からの距離で並ぶように改めてプロットした。なお、 衝撃力発生位置は輪重がピーク値の時点で接触力が最大



図7 衝撃力発生時前の輪重と軸箱相当位置上下速度



値となる箇所としており,図6の横軸は正側を進行方向 としている。また,以降では軌道パッド中心から衝撃力 発生位置までの距離を「衝撃力発生位置」と呼ぶ。図6 より,おおむね110mmごとに2,3個の輪重ピーク波 形が計算結果として得られたことがわかる。それらの2, 3個の輪重ピーク波形同士を衝撃力発生位置が同等の計 算結果として比較すると,波形形状は酷似しているもの の,ピーク値はわずかにばらつきがある(4~10%程度)。

このような輪重ピーク値のばらつきの原因として,輪 重が抜ける前の車輪の挙動が関係している。例として, 図7に走行速度70km/hで衝撃力発生位置が252mmお よび264mmのときの,衝撃力が発生する直前の輪重と 軸箱相当位置上下速度の波形をそれぞれ示す。図5から もわかるとおり,衝撃力により発生したと思われる振動 が残留しており,それによって輪重が抜けてゼロになる 直前(図7のA)の車輪の挙動が2つのケースで異な る。具体的には,衝撃力発生位置が252mmの場合は,

車輪が下降(速度が負)しつつ輪重が増加するタイミン グで輪重が抜けている一方で、264mmの場合は、車輪 が上昇(速度が正)しつつ輪重が減少するタイミングで 輪重が抜けている。それにより、衝撃力発生時における 軸箱相当位置上下速度(下向き)の最大値(図7)は 264mmの場合と比較して252mmの場合の方が大きく、 それに伴い輪重のピーク値も252mmの場合の方が大きく、 それに伴い輪重のピーク値も252mmの場合の方が大き い。図7で示した例に限らず、図6を参照すると、輪 重が抜けてゼロになる直前に減少過程にある場合には ピーク値が小さく、反対に増加過程にある場合には大き い傾向がある。

輪重が抜ける前の車輪の挙動が衝撃力のピーク値に影



響を及ぼしているとすると、衝撃力発生位置が近いにも 関わらず輪重のピーク値がやや異なるのは、衝撃力によ り発生した軸箱相当位置の振動が残留していることが原 因であると考えられる。本解析では輪軸・台車枠間およ び台車枠・車体相当要素間のダンパー要素を除き、構造 減衰等の減衰効果を与えておらず、計算上の問題として 振動が過剰に残留していることが考えられる。そこで, 上記で述べた影響を除去するために、図8に示すように 輪重ピーク値の補正を行った。具体的には,図7に示し た軸箱相当位置上下速度(下向き)の最大値とそれに対 応する輪重ピーク値との関係を最小2乗法で1次近似 し、近似式の傾きと平行に各プロットをグラフ上で移動 させることによって、同速度最大値の中央値に対応する 輪重ピーク値を求めた。そして、その際の輪重ピーク値 の移動前後の差を補正量として、それぞれ対応する輪重 波形を上下にオフセットさせた。図6に示した輪重波形 に対して、それぞれ上記の手順により補正した結果を図 9に示す。図6と比較して、図9では衝撃力発生位置が 近い輪重波形同士のピーク値が同程度であり、平均値を 基準とするとその差は 2~4% 程度である。

3.2.2 レール上下変位の影響

図9より、衝撃力の発生位置とその大きさには関係が あることがわかる。走行速度40km/h,70km/hのとき、 衝撃力発生位置が軌道パッド中心付近の方がピーク値が 大きく、軌道パッド中心から離れるほど小さい。これは、 軌道パッド中心付近ほど支持剛性が高いためであると考 えられる。しかし、走行速度100km/h,130km/hのとき、 衝撃力が軌道パッド中心で発生した場合よりも、 300mmほど離れた場所、つまり軌道パッド間の中央で 発生した場合の方がピーク値が大きい。

その理由として、レールの振動が影響していると考え られる。衝撃力が発生したときの軌道の振動を可視化す



図 10 衝撃力発生時のレールの上下変位(走行速度 100km/h,軌道パッド中心から衝撃力発生位 置までが 300mm の場合)



図 11 レール上下変位の FFT 解析結果

るため,進行方向右側のレールの上下変位(具体的には, レール底面の外側の肩部の変位)を図10に示す。右後 方車輪がフラット部に差し掛かり浮き上がった後や,衝 撃荷重が発生した後に,軌道パッドを節とする振動や前 後のレールに伝搬する波動が見られる。さらに,伝搬し た波動は右前方車輪で透過または反射し,前方車輪と後 方車輪の間で軸距間での重複反射が起こる様子が見られ る。ここで,レールの端部で生じる反射波は,車輪・レー ル転がり接触シミュレータの機能の1つとして,レール 端部にレイリー減衰を与えて抑制されている。

このようなレールの振動について図 11 のとおり FFT 解析を行うと、衝撃力発生位置により高周波振動の大き さが異なり、衝撃力が軌道パッド直上(衝撃力発生位置



図 13 レール上下変位と輪重

3mmのとき)よりも軌道パッド間中央(衝撃力発生位 置 300mmのとき)で発生した場合の方が1000~ 1500Hz程度の振動が大きく現れることがわかる。これ は、図 12に示すとおり、衝撃力発生位置直下の軌道パッ ドの有無により支持剛性が異なることによって、衝撃力 が発生したときのレールの変形形状が異なるからである と考えられる。衝撃力が軌道パッド直上で発生した場合 よりも軌道パッド間中央で発生した場合の方が、変形形 状が急峻であり、大きな高周波振動が発生したと考えら れる。

レール上下変位と輪重を時間方向に見た場合の波形を 図 13 のとおり比較すると、その波形形状が似ているこ とがわかる。具体的には、図 13 の点線で示すとおり、 ピーク値となった後に生じる輪重波形の振動の腹のタイ ミングがレール上下変位の腹のタイミングと一致してい る。さらに、レール上下変位が極大値をとったタイミン グで輪重も極大値となっているため、レールの振動に押 し上げられるようにして輪重波形の細かい振動が発生し たと考えられる。つまり、レールに生じる振動が、輪重 に影響を及ぼしたと考察される。

以上を踏まえると、図9のとおり、走行速度100km/h、



図 15 走行速度と軸箱相当位置上下加速度ピーク値の 関係

130km/hのとき,軌道パッド中心よりも軌道パッド間中 央付近で衝撃力が発生した場合の方が輪重のピーク値が 大きい理由として,軌道パッド間中央でフラット部が接 触した場合の方がレールに大きな振動が生じ(具体的に は,1000~1500Hz 程度の振動),輪重がその影響を受 けた結果であると考えられる。また,図9の波形形状を みても,明らかに衝撃力発生位置が軌道パッドから離れ るほど高周波成分が大きくなることがわかる。

一方で、走行速度 40km/h, 70km/h のときは軌道パッ ド間中央でさほどピーク値が大きくならなかった理由と しては、走行速度による輪重減少の速さの違いが影響し ていると考えられる。図 14 に示すとおり、走行速度が 速くなると前述したように輪重が急速に抜けるため、抜 けた直後にレールの振動が発生するが(図 14 右: B~C 間)、走行速度が遅い場合は輪重が抜ける速度が遅いた め、直後に発生するレールの振動が小さく(図 14 左: B~C 間)、軸距間で発生する重複反射が起こりにくかっ たためであると考えられる。

ここで、石田ら⁶⁾ が行った数値解析では、走行速度に よらず、フラットによる衝撃力がまくらぎ間よりもまく らぎ直上に作用した場合の方が、動的輪重が大きいとい う結果が得られている。本研究における解析結果は、速 度が遅い場合(40km/h, 70km/h)は石田らの結果と一 致するものの、速度が速い場合(100km/h, 130km/h) は異なる。これは、石田らの解析では1 車輪のみをモデ ル化している一方で、本解析では前後の車輪を有し、軸 距間の重複振動が起こったためである。

3.3 妥当性検証

本解析手法の妥当性検証として, 真木ら1)の実験結果 から得られた走行速度と軸箱上下加速度ピーク値(最大 値で正規化した値)の関係と、本解析結果を図15に示 す。ここで、軸箱相当位置上下加速度の解析結果は、真 木らの試験条件に合わせてカットオフ周波数 1250Hz の ローパスフィルタを適用し, さらに 3.2.1 項で述べた輪 重に対する補正と同様の手順により加速度に対して補正 を行った結果である。3.2.2 項で述べたとおり、走行速 度が速くなると衝撃力発生位置に対するピーク値の大き さの傾向が変わるため、走行速度100km/h, 130km/hの とき、衝撃力発生位置の異なる2つの解析結果の差が生 じるものの、その大きさは小さく、図15で示す解析結 果は概ね実験結果と一致していることがわかる。した がって, 軌道構造を軌道パッドのみとした場合, レール の支持剛性が軸箱相当位置加速度ピーク値に及ぼす影響 は小さく、真木らの台上試験結果と同様の計算結果が得 られたといえる。

4. まとめ

本報告では、車輪・レール転がり接触シミュレータを 利用してフラットによる連続的な衝撃力の発生を再現 し、走行速度や軌道上の衝撃力発生位置が衝撃力の大き さに及ぼす影響について整理した。衝撃力発生から残留 した軸箱相当位置の振動の影響によってやや差異がある ものの、軌道パッドから衝撃力発生位置までの距離ごと の衝撃力の大きさは概ね一致し、現象の再現性が確認で きた。また、走行速度が速い(100km/h, 130km/h)場合、 衝撃力発生位置が軌道パッド間中央のときに1000Hz~ 1500Hzの振動が顕著にレールに発生し、その影響を受 けて輪重のピーク値が大きくなることがわかった。最後 に、本解析手法の妥当性検証として、真木ら¹¹の実験結 果から得られた走行速度による軸箱上下加速度の変化と 本解析結果を比較した結果、概ね一致した。

文 献

- 真木康隆, 曄道佳明:車輪踏面上に損傷を有する回転車輪 と軌条輪との衝突メカニズムの一考察, 日本機械学会論文 集, Vol.84, No.865, DOI: 10.1299/transjsme.18-00198, 2018
- 2) J. Bian, Y. Gu, M. H. Murray, "A dynamic wheel-rail impact analysis of railway track under wheel flat by finite element analysis," Vehicle System Dynamics, Vol.51, No.6, pp.784-

797, 2013.

- 3) L. Han, L. Jing, L. Zhao, "Finite element analysis of the wheel-rail impact behavior induced by a wheel flat for highspeed trains: The influence of strain rate," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.232, No.4, pp.990-1004, 2018.
- 4) 坂井宏隆, 唐津卓哉: 大規模並列有限要素法による一台車

モデルの曲線走行シミュレーション,鉄道総研報告, Vol.34, No.8, 2020

- 5) FrontISTR Commons: https://www.frontistr.com/(参照日: 2024年2月29日)
- 石田誠,三浦重,河野昭子:車輪フラットによる軌道の動 的応答特性,鉄道総研報告, Vol.11, No.2, 1997

雨天時を模擬した車両運動解析における 車輪/レール接線力モデル

山本 大輔*

Wheel/Rail Tangential Contact Force Model for Analyzing Vehicle Dynamics under Running in Rainy Conditions

Daisuke YAMAMOTO

This paper describes a wheel/rail tangential contact force model for analyzing vehicle dynamics under running in rainy conditions. So far, vehicle dynamics analyses have been conducted under only dry conditions. In this study, the authors investigated and proposed a wheel/rail tangential contact force model for analyzing vehicle dynamics under running in rainy conditions. The proposed model combines Kalker's linear rolling contact theory with the relationship between adhesive coefficient and velocity measured in running experiments. The validity and generality of the proposed model was confirmed by the measurement experiment of tangential contact force using a twin-disc rolling machine.

キーワード:車輪/レール、粘着係数-速度の関係式、接線力特性、雨天走行時の評価、車両運動解析

1. はじめに

近年,営業線で走行実験を繰り返し行うことによる車 両性能評価に代わる DX (Digital transformation)の一 例として,マルチボディダイナミクス理論に基づく車両 運動解析を効果的に車両開発に導入する動きが加速して いる。その一方で,従来の車両運動解析では,車輪/レー ル間を乾燥状態として検討することが一般的となってい る。その一因を,車両運動解析の流れ(図1)から説明 する。

まず、車輪踏面形状とレール断面形状の組合せを項目 ①で決め、車輪とレールを剛体と仮定して、両者の接触 位置を幾何学的に求める接触幾何解析により、輪軸の左 右変位量ごとの車輪回転半径と接触角を項目②で算出す る。項目③では Hertz 理論に基づき車輪/レール間の接 触楕円を算出し、その縦横比から Kalker の転がり接触 理論によりクリープ係数を選定する。そして、車輪/レー ル間の接線力係数とすべり率の関係(以下,接線力特性 と記す。)を項目④で定義し、最後に、項目⑤で車両モ デルを用いた逐次計算により車両の動的挙動を計算する。

このとき,項目①~項目③の諸値は対象車両を選定す る段階で一義的に決めることができる。しかし,項目④ の車輪/レール間の接線力特性は,摩擦現象と深い関係 にありその解明が待たれる状況のため,実態に即した特 性を決めることが難しい。具体的には,乾燥条件の場合 には,車輪/レール間の摩擦係数を0.3とすれば,経験 的に妥当と考えられる一定の解は得られる。しかし,雨 天走行時のように車輪/レール間が水潤滑状態となる場 合には、車輪/レール間に介在する水により摩擦係数が 小さくなることは直感的に理解できるが、これを信頼の ある数値として示すことは難しい。これが理由の一つと 推察する。

そこで、雨天走行時の車輪/レール接線力特性を明確 にすることができれば、従来の乾燥条件での評価に加え、 雨天走行時の車両の走行安定性や走行安全性を実態に即 した条件で評価することが可能となるだけでなく、車 輪/レール間の接線力特性に速度依存性が生じる加速・ 減速時の車両の走行性能も定量的に評価可能となる。さ らに、一般の技術者や研究者が開発してきた車両運動解 析コードを大規模に改修する必要のないモデルとするこ とで、車両運動解析の多様化が実現できる。

これを実現するため、水潤滑条件での車輪/レール間 の接線力特性に関する研究を俯瞰すると、二つの方向性 が認められる。1つは、車輪/レール接線力特性のメカ ニズムを解明しモデル化を図るもので、実現象を模擬し た実験と理論検討により有益な知見¹⁾²⁾が得られている。 しかし、これらの知見は、営業線で計測された雨天走行 時の車輪/レール間の接線力特性の評価で有効に活用さ



図1 車両運動解析の一般的な流れ

文

論

^{*} 鉄道力学研究部 計算力学研究室

れているが, 任意の時間・場所の車輪/レール間の接線 力特性を推定するまでには至っていない。

もう一つは、実用性を重視して実験的に同定した接線 力特性を車両運動解析に効果的に反映するための手法の 開発で、本稿とも関連する。先行研究^{3) 4)}では、車輪/レー ル間の接線力特性に対して、走行実験で車上から計測し た車輪/レール間の接線力係数とすべり率の関係を曲線 適合により定式化する方法が提案され、走行実験に基づ く車輪/レール接線力モデルの一例が示されている。し かし、車両上から計測した車輪/レール間の接線力特性 を同定しているため、車輪/レール間の摩擦係数が計測 区間で一定でない場合など、クーロン摩擦の原理と整合 しないことが指摘されている。このため、走行距離の比 較的長い条件で評価する車両運動解析にこれをそのまま 適用することは検討の余地があると考える⁵⁾。このように、 雨天走行時を模擬した車両運動解析に適用できる実態に 即した車輪/レール間の接線力特性は明確ではなかった。

本稿では、雨天走行時の実態に即した車両運動解析が 実行できる数値解析環境を構築するため、営業線での走 行実験の結果に基づく「粘着係数と速度の関係式」に着 目し、マルチボディダイナミクス理論に基づく一般的な 車両運動解析に実装可能な車輪/レール接線力モデルを 提案する。

2. 車輪/レール接線力モデルの提案

2.1 車輪/レール接線力モデルの構築

2円筒試験装置を用いた接線力測定実験の結果による と,接触面に対して繰り返しすべり状態を発生させると その表面性状が活性化し接線力が増加傾向を示すこと, そして,試験輪間の接触面の大きさに関係なく,その接 線力は Kalker の理論式と整合した値となることを確認 している⁶⁾。このような傾向は,接触面が水潤滑状態の 場合でも,接線力の大きさは異なるが同様に認められた。

本研究では、汚れや固形物が介在しない車輪/レール 間の接触面に対して定常的に水が流入する場合を対象と し、上述の知見を踏まえ、Kalkerの線形転がり接触理 論を基本とした車輪/レール接線力モデルを構築する。

2.2 車輪/レール接線力モデルの提案

Kalkerの線形転がり接触理論の詳細については、紙面の都合により文献7と文献8に譲ることとし、本節では本接線力モデルの構成に重きを置いて説明する。

車輪とレールの接触状態を模式図で図2に示す。車輪 とレールの断面形状はそれぞれ複数の円弧の組合せで構 成されているため、車輪に輪重相当の垂直荷重*P*が加 わると、接触面近傍で両者が弾性変形するため面接触の 状態となる。このとき、両者の断面形状が設計形状のよ



図2 車輪とレールの接触状態

うに平滑な場合, Hertz 理論により車輪/レール間の接 |触面は楕円形状となる(これを接触楕円と呼ぶ)。そし て,接触楕円の縦横比 (a/b, b/a) を介して,Kalkerの 線形転がり接触理論により、その接線方向の力の換算値 を意味する Kalker の無次元クリープ係数をパラメータ テーブルから選定する。前後,左右,スピンの無次元ク リープ係数をそれぞれ c_{11} , c_{22} , c_{23} とし, 剛性率をGと すると,前後と左右方向の接線力(T_xとT_y)は,式(1) と式(2)から求まる。このとき、車輪とレール間の接触 面で作用する接線力がその間の摩擦力より大きくならな い物理的な制約により,数値解析ではあらかじめ摩擦係 数の飽和値を定めておく。そして、接線力が摩擦力の飽 和値に漸近するよう,式(3)に示す補正係数εを求め, それぞれ式(1)と式(2)に乗じて補正を行う。なお,式(3) は Levi-Chartet の式と呼ばれ、国内では車両運動解析で 飽和指数βを1.5とすることが一般的となっている。こ の値は実車の1/5 模型を用いて行われた接線力測定実 験¹¹⁾において統計的に求められた値である。

$$T_x = -ab(c_{11})Gs_x \tag{1}$$

$$T_y = -ab(c_{22})Gs_y - (ab)^{3/2}(c_{23})G\omega_3$$
(2)

$$\varepsilon = 1 / \left\{ 1 + \left(\sqrt{T_x^2 + T_y^2} / \mu P \right)^{\beta} \right\}^{1/\beta}$$
(3)

ここで、 s_x 、 s_y 、 ω_3 は車輪/レール間の前後・左右・ スピンのすべりを表し、 $ab(c_{11})G \ge ab(c_{22})G$ がそれぞれ 前後方向と左右方向のクリープ係数を意味する。また、 μ は車輪とレール間の摩擦係数、Pは輪重である。

そして, Kalker の理論式を実態に即した接線力モデ ルとするため,本研究では,図3のように,走行実験の 計測値に基づき定式化した「粘着係数と速度の関係式」 に着目する。図3中に示した式は,新幹線電車の粘着係 数計画式であるが,在来線の電車,気動車,機関車を対 象とした関係式も同様に提案¹⁰⁾されており,雨天走行 時の実態に即した接線力特性の一例として揃っている。 本研究では,この「粘着係数と速度の関係式」を式(3)



図3 走行実験の結果と粘着係数と速度の関係式⁹⁾

のμに代入することで、車輪/レール接線力モデルを構 築する。これにより、すべり率の情報を持たない「粘着 係数と速度の関係式」でも、車両運動解析を実行する上 で必須となる「車輪/レール間の接線力係数とすべり率 の関係式」として求めることができる。

3. 二円筒試験装置を用いた車輪/レール接線 カモデルの妥当性の検証

3.1 実施概要

車輪/レール接線力モデルの妥当性を検証するため、 車輪とレールの接触を一対の大型円筒試験輪の接触で模 擬した接線力測定実験を行った。同一試験装置を用いた 実験結果から、散水流量が18mL/分以上の条件では車 輪/レール間の接線力特性は大きく変化しないことが分 かっているため¹⁾,接線力係数のばらつきを十分低減す ることを考え、散水流量は600mL/分の一条件とした。 そして、同一試験輪をさまざまな実験条件で繰り返し使 用することに対して、接触面の摩耗に起因する実験誤差 の偏在を低減することを考え、実験順序は荷重やすべり 率をランダムに設定する方法を採った。

本接線力モデルの妥当性の検証は以下の手順で行っ た。まず、すべり率0.8%以上の条件で計測した接線力 係数を摩擦係数と定義する。そして、これらの計測値か ら「摩擦係数と周速度の関係式」として同定し、式(3) に代入したものと式(1)から「接線力係数とすべり率の 関係」を推定する。最後に、車輪/レール接線力モデル の構築には使用していない、すべり率0.8%未満の条件 を含む全ての接線力係数と推定式の比較により妥当性を 検証する。

なお,前後方向の接線力の増減に応じて左右方向の接 線力が変化することは,摩擦円の原理から理解できるた め,本稿では前後方向の接線力に限定して評価を行う。

3.2 実験装置と実験条件

鉄道総研が所有する大型2円筒試験装置の一つである「車輪・レール高速接触疲労試験装置」(図4)を用いて実験を行った。本試験装置は,直径500mmの車輪



図4 接線力モデルの妥当性検証に用いた実験装置

表1 主要な実験条件

	1	5	15	
	367.9	629	907.2	
径の半値	1.75	3	4.22	
径の半値	0.74	1.26	1.82	
周速度(km/h)		10, 20, 30, 40, 60, 90, 130		
すべり率(%)		約1.0(最大)		
散水流量(mL/分)		約600		
水温(°C)		23~26		
	径の半値 径の半値	1 367.9 径の半値 1.75 径の半値 0.74 10, 20, 第	1 5 367.9 629 径の半値 1.75 3 径の半値 0.74 1.26 10, 20, 30, 40, 60, 約1.0(最大) 約600 23~26	

試験輪(修正円弧踏面形状)とレール試験輪(JIS50kgN レール形状)の組合せで構成しており,実車輪/レール 間に作用する輪重を模擬するため,油圧アクチュエータ により車輪試験輪をレール試験輪に最大 50kN で押付け る。実際のレールの下部には1/40の勾配を有するタイ プレートが敷設されているのでレールは軌道中心方向に 内傾した状態で車輪と接触している。本試験装置では実 際の配置とは逆となるが,車輪試験輪を約1.4deg 外傾 させて両者の接触状態を相対的に一致させている。車輪 とレールの接触位置は,在来線のスラックのない軌間寸 法を考え,輪軸はその中立位置に載る条件から求めた。

雨天時を想定した実験では,試験輪間の接触面を水潤 滑状態とするため,試験輪の接触位置上部0.4~0.5m位 置に取り付けた簡易な水タンクから試験輪間の接触面に 向け自由放水した。試験輪の周速度は,在来線を想定し て最高130km/hとし,試験輪の接触面の損傷防止の観 点から,すべり率の設定値は最大1.0%程度に制限した。 散水流量は約600mL/分とし,実験中に計測された水温 は23~26℃であった。主要な実験条件を表1に示す。

3.3 「摩擦係数と速度の関係式」の同定

実験条件ごとに連続する 30 秒間以上の接線力係数の 平均値を1つの点として纏め,この中からすべり率0.8% 以上の条件の接線力係数のみを対象に同定した「摩擦係 数と周速度の関係」を図5に×印で示す。さらに,後述 する式(4)と式(5)を用いて最小二乗法により計測値を同 定した結果を,実験結果と同じ色の実線で重ねて示す。

「摩擦係数と速度の関係式」の同定に用いる基準式は,

鉄道での使用実績^{9) 10)}を考慮し,以下の2式を選定した。 それぞれ *P*₀ から *P*₄ は同定により求まるパラメータ, *V* は速度で単位は km/h とする。

 $\mu = P_0\{(1+P_1V)/(1+P_2V)\}$ (4)

$$\mu = P_3 / (V + P_4) \tag{5}$$

図5の実験結果から、実物車輪とレール間と同等の接 触面圧の条件となる、荷重 5kN(接触面圧 629MPa)以 上の条件では, 試験輪の周速度の向上とともに, 自動車 のゴムタイヤと路面間のハイドロプレーニング現象と同 様のメカニズムにより、接触面に浸入する水量が次第に 増加するので摩擦係数が減少傾向を示している。この傾 向は、従来の知見とも整合する。しかし、荷重が1kN(接 触面圧 367.9MPa) と小さい条件では、周速度 40km/h 以上となると摩擦係数は0.17程度で一定となり、接線 力係数の速度依存性は認められない。これは荷重が 1kN と小さいものの、車輪とレールがその接触面に浸入した 水により分離するには至らない程度の大きさの接触面圧 のため、接触面の表面粗さに起因する微小な隙間(容積) に浸入した水がその上限値に達して完全に水潤滑状態と なり接線力係数が一定値に飽和したと考えられる。この ように接触面が水潤滑状態となるときの接触形態を考え ると、他の荷重条件においても、周速度が130km/hを 超える高速条件となると摩擦係数は一定値に飽和する傾 向を示すと推察される。

次に,式(4),式(5)により「摩擦係数と速度の関係式」 として同定したパラメータを表2に示す。表2から, 同定に用いた式の特性の違いにより,荷重1kNの条件



図5 すべり率0.8%以上の条件で計測した摩擦係数 と周速度の関係

垂直荷重 (kN)	最大面圧【計 算値】(MPa)	同定したパラメータ		適用した 基準式
1	367.9	$P_0=0.29$ $P_1=0.2$	P 2=0.3	式(4)
5	629	P ₃ =13.3 I	P ₄ =40.5	式(5)
15	907.2	P ₃ =13.1 I	P ₄ =44.2	式(5)

表2 計測値に対する近似式のパラメータ

では式(4),荷重 5kN 以上の条件では式(5)が,それぞ れ計測値の特徴を良好に表現している。なお,同一条件 での計測値のばらつきは,繰り返しの実験により,接触 面に生じた摩耗や塑性変形による僅かな凹凸により接触 形態が変化したためと考える。

その一方で、荷重 5kN と 15kN の近似式を比較する と、両式で計算される摩擦係数の差は平均 5.7% と小さ いことが分かる。ここで、実験結果を接触面圧を指標に 実車換算評価すると、車輪とレールをそれぞれ修正円弧 踏面形状と JIS50kgN レールの組合せとした場合、荷重 5kN の条件が輪重 20kN、荷重 15kN の条件が輪重 100kN に相当し、これらは一般的な鉄道車両の荷重条 件をほぼ全て網羅することが分かる。

このように,接触面が水潤滑状態のときの接線力特性 は,接触面圧が実車と同等の場合,試験輪の周速度が速 くなると接線力係数が小さくなる速度依存性が生じるこ と,そして,一般的な鉄道車両を想定した荷重条件の範 囲では,近似式で計算される摩擦係数の差は平均5.7% と小さいことが分かった。特に,後者の知見は,輪重が 極端に小さい状態が定常的に継続する場合を除く一般的 な雨天走行時の車両運動解析では,輪重変動に応じて「粘 着係数と速度の関係式」を読み替えなくても計算結果に 大きな誤差が生じないため,車両運動解析をコード化す る際の簡略化に役立つと考えられる。

3.4 車輪/レール接線力モデルの妥当性の評価

本接線力モデルの妥当性を検証するため、3.3節で述 べた車輪/レール間の接線力特性の同定には使用してい ないすべり率0.8%未満の小さい条件のときに計測した 接線力係数を含む全ての計測値と本接線力モデルの推定 式を比較する。荷重1kN、5kN、そして15kNの場合に ついて、周速度10km/hから130km/hの5条件で比較し た結果を図6に示す。各プロット(×印)は実験条件 ごとに連続する30秒間の接線力係数の平均値を表し、 実線は推定式を表す。両者とも色は共通であり、青色、 緑色、赤色はそれぞれ荷重1kN、5kN、15kNを表す。

図6(a)の周速度10km/hの場合,車輪/レール間が 水潤滑状態となる条件では、すべり率が0%から0.3% に増加する過程で接線力係数(×印)は次第に大きく なり、すべり率が0.3%以上となると接線力係数は0.2 ~0.25と一定値に飽和する傾向を示す。この傾向は全 ての荷重条件で共通して認められる。その一方で、周速 度が増加すると、荷重5kNと15kNの条件では接線力 係数の飽和値は次第に減少するが、荷重1kNの条件で は、周速度が60km/h以上(図6(c)~図6(e))とな ると、すべり率0.8%未満の条件においても、ばらつき はあるが接線力係数(×印)の平均値は0.17程度で飽 和する傾向が認められる。このように、すべり率の増加 とともに接線力係数が一定値に飽和する傾向は,これま での実験²⁾でも同様に認められているため,これらの傾 向は妥当と考えられる。

次に,計測値と推定式の関係を評価する。図6から, 本接線力モデルにより求めた推定式は,周速度および荷 重の条件に関係なく同様の形態を示しており,計測値に 対する推定値の平均誤差は最大22%程度(図7)と良





好な精度で推定できていることが分かる。これらの平均 誤差は、図5に示す「摩擦係数と周速度の関係」で近似 式と計測値の差異に起因するものなので必然的に生じた ものと考えることができる。すなわち、これらの結果は、 ばらつきを有する計測値に対してその近似式の精度を高 めることがより実態に即した条件で車両運動解析を実行 する上で重要となることを意味している。

このように本研究で提案する車輪/レール接線力モデ ルは、すべり率の小さい範囲から大きい範囲まで、実験 で計測した接線力係数と周速度の関係を最大 22% 程度 の平均誤差で推定できることが分かった。なお、本稿で は紙面の都合により記載はしないが、その他の周速度の 条件でも推定値と計測値は同様の精度で一致することが 確認でき、散水流量の異なる実験を対象とした場合でも、 接触面が定常的に水潤滑状態となる条件の場合には同様 の精度で一致することを確認した。

これらの実験結果から、車輪/レール間の摩擦係数と 周速度の関係式の把握により、車両運動解析の実行に必 須となる「車輪/レール間の接線力係数とすべり率の関 係」を良好な精度で推定できることが分かり、本接線力 モデルが妥当であることが実証できた。そして、車輪/ レール間の摩擦係数は、営業線での走行実験で計測され る粘着係数と同意のため、走行実験の計測値に基づく「粘 着係数と速度の関係式」を本接線力モデルに適用するこ とで、雨天走行時の実態に即した条件の下で車両運動解 析が実行できることが分かった。

これに加えて、Levi-Chartet の式を用いる場合、摩擦 力に漸近する度合いを決定する飽和指数βを1.5とする ことが一般的となっていることを前述したが、車輪/ レール間が水潤滑状態となる場合においても飽和指数β を1.5とすることが適切であることが確認できた。

4. 本接線力モデルの一般性に関する検証

最後に、本接線力モデルの一般性を検証するため、他 の研究者が行った水潤滑条件における接線力測定実験の 結果との比較により検討する。ここでは過去の知見¹⁾に



図7 計測値に対する推定値の平均誤差



図8 文献 12 の計測値と本接線力モデルの比較

基づき,主要な学術誌に掲載された論文のうち,試験輪の接触面の形状変化に留意した実験が行われていること が伺われる実験結果を対象とした。

図8の実験結果¹²⁾は、直径660mmと550mmの試験 輪の組合せで行った接線力測定実験で、接触面に毎分 3.0×10⁻⁴m³の水を供給しながら接線力係数とすべり率 の関係を評価したものである。試験輪の接触面は平坦で 一方の接触面は"とつ型"となっている。最大接触面圧 は785MPaで、周速度の条件は100, 150, 200km/hの 3通りを検討している。これに対して、試験輪の断面形 状など、実験と同じ条件を想定して本接線力モデルで求 めた推定値は、計測値に対して最大 30.1% の平均誤差 となり、図7と同様に周速度の条件によらず計測値と概 ね一致することが分かった。特に、図6では、すべり率 0.2%以下の条件での比較が十分ではなかったが、図8 ではすべり率 0.15% 程度以下の範囲でも推定値と計測 値が良好に一致することが分かった。このような結果は, 他の文献に掲載された別の実験結果に対しても同様に確 認することができた⁸⁾。

このように、本接線力モデルによる推定値は、他の研 究者が実施した実験結果に対しても同様に一致するこ と、そして、すべり率の範囲が図6とは異なる場合でも 同様に一致することがそれぞれ確認できた。このことか ら、本接線力モデルは車輪/レール間が定常的に水潤滑 状態となるときの接線力特性を推定するための数値解析 モデルとして一般性を有すると考えられる。

5. まとめ

雨天走行時を模擬した実態に即した車両運動解析を実 行できる数値解析環境を構築するため、車輪/レール接 線力モデル(摩擦特性モデル)を提案した。そして、様々 な条件下での実験結果と比較した結果、以下の知見を得 ることができた。

(1) 営業線での走行実験で同定された雨天時の「粘着 係数と速度の関係式」と Kalker の線形転がり接 触理論を組み合わせることにより,雨天走行時を 模擬した車輪/レール間の接線力係数とすべり 率の関係を推定する手法を提案した。

- (2) 雨天時の「粘着係数と速度の関係式」は、実車の 輪重条件の範囲では大きな差異が生じないこと を実験的に示すとともに、車両運動解析をコード 化する際の簡略化に役立つ知見として示した。
- (3) 本接線力モデルの妥当性を検証するため、2円筒 試験装置を用いた接線力測定実験を実施した。その結果、水潤滑条件でも飽和指数βを1.5とした Levi-Chartetの式は妥当であることを確認すると ともに、本接線力モデルによる推定値は、今回対 象とした実験の計測値に対しては最大30%程度の平均誤差で推定できることを示した。

最後に、本車輪/レール接線力モデルは、雨の降り始 めや雨あがりのように車輪/レール間に水滴が点在する 場合を除いて、定常的に水潤滑状態となる時の車両運動 解析に活用することができる。具体的には、雨天走行時 の車両の走行安定性や走行安全性を実態に即した条件で 評価できるだけでなく、車輪/レール間の接線力特性に 速度依存性が生じる車両が加速・減速するときの走行性 能も定量的に評価することができる。特に、一般の技術 者や研究者がこれまで開発してきた車両運動解析コード を大規模に改修することなく、車両運動解析の多様化に 活用できることに有用性があると考える。

文 献

- 山本大輔:車輪滑走を誘発する雨天時の車輪/レール接線 力の実験的評価, JREA, Vol.66, No.10, pp.47338-47341, 2023
- 山本大輔:2円筒試験装置を用いた実験による散水流量と 車輪/レール接線力の関係評価,鉄道総研報告, Vol.37, No.4, pp.1-7, 2023
- Polach, O., Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit, Wear 258, pp.992-1000, 2005.
- 4) Vollebregt, E.A.H., Numerical modeling of measured railway creep versus creep-force curves with CONTACT, Wear 314, pp.87-95, 2014.
- 5)山本大輔:三次元マルチボディダイナミクスモデルを用い た走行実験と室内実験における車輪/レール接線力特性の 差異に関する一考察,日本機械学会 機械力学・計測制御 部門, Dynamics and Design Conference 2023, No.23-18, 605, 2023
- 山本大輔:2円筒試験機を用いた実験による実車輪/レール間の接線力の推定,鉄道総研報告, Vol.35, No.9, pp.29-34, 2021
- Kalker, J.J., Three-dimensional elastic bodies in rolling contact, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1990.
- 8) 山本大輔:Levi-Chartet の式と粘着係数 速度の関係式を

組み合わせた車両運動解析のための実用的な車輪/レール 接線力モデル,日本機械学会論文集,Vol.89,No.922, 2023

- 9)渡邉朝紀:空転・滑走検知,再粘着制御研究の内外の歴史 と最近の動向,電気学会誌, Vol.122, No.9, pp.613-617, 2002
- 10) 電気鉄道ハンドブック編集委員会:電気鉄道ハンドブック,

コロナ社, p.389, 2007

- Matsudaira, T., On the method of preventing the hunting of railway vehicles, particularly of two-axle cars, ORE Question C9, C9/RP.2E(1960), Utrecht, pp.99-171.
- 大山忠夫,丸山弘志:高速ころがり接触下のすべりと摩擦 (水潤滑状態における表面あらさの影響),日本機械学会 論文集 C 編, Vol.48, No.431, pp.1005-1013, 1982

鉄道沿線地震動推定に向けた観測値と推定値の 組み合せ手法の提案 ^{岩田 直泰*}森脇 美沙* 野田 俊太* 松林 弘智** 山本 俊六**

Improving the accuracy of Seismic Ground Motion Estimation along Railways by Integrating Observed and Estimated Data

Naoyasu IWATA Misa MORIWAKI Shunta NODA Hirotoshi MATSUBAYASHI Shunroku YAMAMOTO

In the event of an occurrence of earthquake, railway companies suspend trains as soon as possible, considering the seismic intensity. Subsequently, if necessary, they inspect railway facilities based on seismic ground motion (SGM), which is spatially discrete, observed along the railways. In some cases, time required for safety inspections may be considerable depending on the circumstances. Estimating spatially continuous SGMs is one of the key technologies for reducing inspection time, since the early resumption of train operations after earthquakes has become a significant issue recently. In this study, we first describe differences in SGM between measured data and true data in conventional systems and then propose a method to estimate spatially continuous SGMs by integrating observed data and estimated data. Furthermore, a case study is presented in which the proposed method is employed to estimate SGMs along a virtual railway, assuming additional data observed by seismometers along a railway.

キーワード:地震時列車運転規制,早期運転再開,面的地震動,鉄道沿線地震動

1. はじめに

鉄道における地震防災対策は,構造物の耐震設計およ び耐震補強などのハード対策¹¹が基本となる。また近年, 軌道や車両に関わるハード対策も積極的に導入されてい る。これらの対策に加え,地震情報をリアルタイムに活 用したソフト対策も防災や減災に役立てられている。例 えば,鉄道事業者が設置した地震計や気象庁の緊急地震 速報などの情報を用いた早期地震警報による自動列車停 止システム^{例えば2)},および地震計の記録した値を基準に した点検や運転再開の判断^{例えば3)}などは,地震時の列車 運転規制という形でソフト対策として適用されている。

地震後における運転再開に関して,一般に沿線に設置 された地震計が予め定めた基準値を超過する地震動を観 測した場合,予め設定した区間を対象に安全確保に向け た鉄道施設の目視による点検(以下,点検)を実施する。 2018年6月18日の大阪府北部の地震(*M*j6.1, *M*j は気 象庁マグニチュード)では,点検が比較的広範囲に発令 されたことから,運転停止から再開までに多大な時間を 要した事例が報告されている⁴。このように,地震が発 生した位置や規模によっては運転再開までの列車の停止 時間が長くなることが課題となっており,地震時におけ る鉄道運行の安定性向上という観点において,点検区間 の適正化に向けた判断を支援する情報の提供が望まれて いる。加えて,駅間に停止した列車の次駅までの移動に ついても,乗客の列車内閉じ込めからの早期救済に向け て,その判断を支援する情報の提供も求められている。

上述の通り、鉄道の地震時における運転規制の実務で は沿線に設置された地震計の観測値が使われるが、近年 は面的な推定地震動情報が利用できるようになった。面 的な推定地震動情報は、点検区間の適正化に資するのみ ならず、地震計間の大きな揺れの見逃し防止にも役立つ ものである。このようなリアルタイムに活用可能な面的 地震動情報は,近年,鉄道の実務において導入が進みつ つある^{5) 6)}ものの.鉄道の地震後の運転再開判断におい て、推定データの実務使用は十分には進んでいない。こ れは、 地震動の推定誤差と現行の地震時列車運転規制に おける地震動の取り扱い上の誤差の関係が整理されてお らず、推定誤差の扱いが定まっていないことが一因であ ると考えられる。本研究では、現行の地震時列車運転規 制における地震動の取り扱い上の誤差と、面的地震動の 演算による推定誤差の関係を整理した上で、推定データ の運転規制への適用に向けて、実務的な観点から推定誤 差の扱いの考え方を示す。さらに、地震動推定に対し観 測データを効果的に適用できる範囲を統計的に明らかに 文

論

^{*} 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

^{**} 株式会社 ANET

することにより, 観測値と推定値を組み合せた, 実務的 な面的地震動の推定手法を提案する。その面的地震動か ら路線に沿って線状に地震動を抽出することにより沿線 の地震動が把握できる。最後に, 沿線に設置された鉄道 事業者の地震計データの導入を想定した, 提案手法によ る地震動推定の事例を仮想の鉄道路線に対して示す。

2. 沿線の地震計情報の取り扱い上の誤差

2.1 地震時における列車運転規制の概要

先に述べた地震時における列車運転規制に対して,鉄 道事業者は沿線に概ね一定間隔で地震計(以下,沿線検 知点)を設置しており,一般に列車停止後の点検の判断 は沿線検知点の観測値に基づき行われる。図1の通り, ある沿線検知点に対して隣の沿線検知点とのおおよそ中 間地点を境界とする受け持ち区間が定められている。あ る沿線検知点の観測地震動が運転規制基準値を超過した 場合,点検や徐行などの運転規制はその沿線検知点の受 け持ち区間に対して発令される。沿線検知点の設置間隔 は,在来線は一般的に40km^{例えば7)}であり,新幹線でも 10から20km^{例えば8)}である。一旦,運転規制が発令され ると,その受け持ち区間を目視により点検する必要が生 じるため運転再開までに多大な時間を要する場合がある。

現行の地震時列車運転規制の特徴は、図1の水色実線 の通り、沿線検知点の観測値をその沿線検知点の受け持 ち区間において一律として取り扱うことにある。一方、 実際の地震動は図1に赤色実線で示す通り、震源までの 距離や表層地盤などの影響を受けて変動しており、現行 の取り扱い上の地震動(水色実線)と実際の地震動(赤 色実線)には差異がある。また、沿線地震動を推定した 場合、図1の青色破線で示す推定地震動は、実際の地震 動(赤色実線)とは差異が生じる場合がある。

本研究では、受け持ち区間において一律とする現行の 地震時列車運転規制における地震動の取り扱い上の誤差 を「取扱誤差」,面的地震動推定の誤差を「推定誤差」 と定義して、それらの関係について分析する。

2.2 検討に用いた地震

取扱誤差と推定誤差の関係の整理やそれに続く推定誤 差の扱いの考え方の提案に向けて、本研究では鉄道への 影響が懸念される地震として、比較的規模が大きく、震 源深さが 60km 程度以下の地震を検討に用いた。本研究 で対象とする 81 地震の震央位置の分布を図2に、マグ ニチュード(2011年東北地方太平洋沖地震はモーメン トマグニチュード、それ以外は気象庁マグニチュード) と震源深さの関係を図3に示す。図に示す凡例の通り、 円の大きさはマグニチュードに対応し、色は震源深さに 対応している。図3によると、検討に用いた地震におい



図1 地震時における列車運転規制の概要



図3 対象地震のマグニチュードと震源深さの関係

て震源深さが際立って深い地震が1つあるものの,それ 以外は60km程度以下の地震が多く,マグニチュードは 6.5以上の地震が半数程度(全体の53%)である。なお, マグニチュードが8.0以上の地震として,十勝沖の地震 (2003年),三陸沖の地震(2011年),小笠原諸島西方 沖の地震(2015年)が本研究の検討に含まれている。

2.3 地震時列車運転規制における地震動の取扱誤差

2.1節で述べた通り,現行の地震時列車運転規制は取 扱誤差を有している。本節では,観測された地震動デー タに基づき取扱誤差を定量的に評価する。取扱誤差の評価には、国立研究開発法人防災科学技術研究所(以下、防災科研)の強震観測網(以下、K-NET)および基盤強震観測網(以下、KiK-net)⁹⁾を用い、図4に示す対としたK-NETとKiK-netの離隔距離と同一地震で観測された計測震度差を整理した。

対とした K-NET と KiK-net の組み合せの内, 2.2 節 で述べた対象地震に対して,離隔距離が 40km 以内の組 み合せを整理した結果,その数は 123,475 組となった。 対とした組において震源から遠い観測点までの 10km 区 切りの震源距離のヒストグラムを図5に灰色で示す。こ こで,遠い地震は鉄道への影響は小さいと考えられるこ とから,地震波形データについて本研究では震源距離が 200km 以内を評価対象とする。併せて,地震動が小さ い場合は地震時列車運転規制では考慮されず点検の実施 には影響しないため,本研究では計測震度 1.5 (震度 2) 以上を評価対象とする。対とした組において共に震源距 離 200km 以内かつ計測震度 1.5 以上を選定した結果,



図 4 取扱誤差の評価方法



図5 取扱誤差評価データの震源距離ヒストグラム



図6 離隔距離と計測震度差の関係

37,859 組となり図5 にそのヒストグラムを橙色で示す。

なお,鉄道の地震時列車運転規制に用いる地震動指標 は,警報用最大加速度¹⁰⁾,SI値¹¹⁾,計測震度¹²⁾が挙げ られるが,本研究では気象庁が算出方法を定義した計測 震度を対象として検討する。

地震計からの離隔に伴う地震動の差異について,上述 した評価対象の37,859 組に対する離隔距離と計測震度 差の統計的な関係を図6に示す。図6の青色実線は, 離隔距離を1kmごとに区切り,各区間の計測震度差の RMS (Root Mean Square,二乗平均平方根)を算出し たものである。従ってこの青色実線は,離隔距離に応じ た取扱誤差を定量的に示したものと考えることができ る。図より,離隔距離が大きくなるほど1km区切りの 取扱誤差のRMS は大きく,すなわち2点間の離れが大 きい程,地震動の差異は大きくなることが確認される。

3. 面的地震動の推定誤差

3.1 面的地震動の推定情報を配信するシステムの概要

地震後に地震動の分布を迅速かつ正確に把握すること は防災対応において重要であり,現在,複数の公的機関 から地震発生後にウェブサイト上に面的地震動の情報が 提供されいる^{例えば13)}。また,鉄道事業者へリアルタイムに 提供される推定沿線地震動情報には,公益財団法人鉄道 総合技術研究所(以下,鉄道総研)が防災科研と連携し て開発し運用している鉄道地震被害推定情報配信システ ム (Damage Information System for Earthquake on Railway 以下, DISER)^{14) 15)} によるものがある。

本研究における面的地震動推定は、DISERで用いて いる K-NET の観測データに基づく空間補間による演算 手法¹⁴⁾を適用する。この演算には、観測点から推定対 象点までの距離の逆数を重みとする逆距離加重法(以 下, IDW 法¹⁶⁾)を採用している。なお、図7(a)(b) の通り, IDW 法による空間補間はS波速度400m/sの 基盤上で行っており、地表の観測値から基盤の地震動を 求める際には、鉄道総研が整備した全国の面的な地盤 データベース¹⁷⁾を用いる。地盤情報の指標は鉄道の耐 震設計に用いられる地盤の固有周期のTg¹⁾を用いてい る。また、各地震動指標に対する表層地盤の地震動増幅 特性は、基盤入力地震動および入力地震動と表層地盤の 卓越周期比を用いた強震時の非線形性を考慮する手 法¹⁸⁾を適用している。

3.2 任意地点における面的地震動の推定誤差

本節では現在の面的地震動の推定精度を統計的に評価 するために,同一地点の観測値と推定値の比較により, 任意地点の面的地震動推定に対する誤差(以下,推定誤 差)を統計的に評価する。面的地震動の演算結果の例(島



(a) 基盤における空間補間の概要



(b) 各メッシュの地表地震動算出の概要

図7 面的地震動推定の概要



根県西部の地震)として計測震度のカラーマップを図8 に示す。地震動は震央から概ね同心円状に減衰している が,例えば濃尾平野周辺の色合いから確認される通り, 表層地盤の影響により平野部の地震動は周囲よりも大き くなっている状況が確認できる。

図7(a)に示した通り, 複数の K-NET 観測データ(図 8中の○印)から評価点とする KiK-net 位置の地震動 (図8中の△印)を推定し, KiK-net 観測データと比較 することにより推定精度の評価を行った。KiK-net は地 中と地表に地震計が設置されているが,本研究における 面的地震動推定は地表を対象としているため,地表の観 測データを適用して推定誤差を評価した。

2.2 節で述べた対象地震に対して観測値と推定値を抽 出した結果,データ数は14,110となった。評価点とし た KiK-net 観測点までの震源距離 10km 区切りのヒスト グラムを図9に灰色で示す。地震波形データの選定に関 して,ここでも2.3 節と同様の考えにより,評価点とし た KiK-net 観測点までの震源距離 200km 以内,KiK-net



図9 推定誤差評価データの震源距離ヒストグラム



図10 観測値と推定値の比較(計測震度)

観測点データが計測震度 1.5 以上を選定した結果, 3,774 データとなった。選定したデータのヒストグラムを図9 に,対象データの観測値と推定値の統計的な比較を図 10 にそれぞれ橙色で示す。図 10 より計測震度に対する 観測値と推定値の関係には正の相関が確認されるが,完 全には一致せず,推定誤差を有している。推定誤差の統 計値として算出した観測値と推定値の差分の RMS(以 下,推定誤差 RMS)は 0.55 となった。すなわち,上述 の条件による面的地震動推定において,任意地点におけ る計測震度の推定は,観測値と比較し統計的に±0.55 の差異を有すると言える。

なお、気象庁によると緊急地震速報による震度予測の 目標値は計測震度の違いで±1.0とされている¹⁹⁾。震源 情報から距離減衰式により算出する緊急地震速報の震度 予測と、多数のK-NET 観測データに基づく空間補間に よる本手法の比較は、情報量の違いがある点に留意する 必要があるものの、本研究で適用する面的地震動推定手 法の推定誤差 RMS は、気象庁の緊急地震速報における 震度予測の精度目標値に収まっている。

3.3 最寄りの観測点からの離隔に伴う推定誤差

観測データに基づき地震動を推定する場合,一般に適 用する観測データの位置が推定対象点に近いことが推定 精度の確保につながると考えられる。特に本研究で扱う 面的地震動推定は,3.1節に記した通り観測点からの距 離の逆数により複数の観測点データのそれぞれの重みを 決定する IDW 法を適用している。よって,推定対象点



図 11 推定誤差評価データの最短観測点距離ヒストグ ラム



図12 最短観測点距離と推定誤差の関係

と観測点の近接の程度は推定精度に対して重要な要素と なる。そこで、本節では推定に用いる複数の観測点の内, 図7(a)に示す推定対象点から最寄りの観測点までの 距離(以下,最短観測点距離)と推定誤差の関係を整理 した。

図 11 に本研究で分析した 13,925 データに対する最短 観測点距離 1km 区切りのヒストグラムを灰色で示す。 また、2.3 節と同様の考えにより、評価点とした KiKnet 観測点までの震源距離 200km 以内、KiK-net 観測 データ計測震度 1.5 以上を選定したところ 3,764 データ となった。対象データのヒストグラムを図 11 に橙色で 示す。

対象データに対する最短観測点距離と計測震度の推定 誤差の統計的な関係を図 12 に示す。この図には、最短 観測点距離 1km 区切りの RMS(水色実線)を併せて示 している。なお、K-NET 観測点は設置間隔が約 20km であることから、最短観測点距離が 10km を超える場合、 対象データ数が減少する。ここでは、1km 区切り区間 におけるデータ数が 100 以上となる最短観測点距離 16km までの推定誤差 RMSを評価対象とする。図に示 す 1km 区切りの推定誤差 RMS(水色実線)を見ると推 定誤差は最短観測点距離により変化し、最短観測点距離 が小さい方が推定誤差は小さくなることが確認される。 この結果は、ある地点の地震動推定にあたり、より近接 の観測データを用いることが推定誤差の低減につながる ことを表している。逆に最短観測点距離の大きな遠方の 観測点データを新たに加えても精度向上に対する有効性 は低いことが示唆される。

4. 推定誤差の扱いの考え方および観測値と推 定値の組み合せ手法の提案

4.1 推定誤差の扱いの考え方の提案

一般に推定情報には推定誤差が含まれることから,実 務において推定情報を扱う場合には不安全な対応となる ことを避けるために,安全確保に向けて推定誤差の扱い の考え方を定めておくことが望ましい。例えば,推定誤 差の RMS を算出して推定値にその値を加えて,過小推 定となった場合の安全性を確保する考え方や,点検など を発令する基準値から推定誤差の RMS の値を減じて, 過小推定となった場合の安全性を確保する考え方などが 挙げられる。この際,例えば基準値に対してどの程度を 減じることが適切かと言った課題や,基準値から誤差 RMS を減じることにより点検などの発令が頻発しない かと言った懸案が生じる。

推定情報には推定誤差が含まれることに加え,現行の 地震時列車運転規制においても2.1節や2.3節で述べた 通り実務上の対応において取扱誤差が生じている。ここ で,推定誤差が取扱誤差よりも小さくなる場合には,推 定情報は現行の取り扱い上の地震動情報よりも信頼性は 高いと考えることができる。つまり,推定誤差の統計値 が取扱誤差の統計値を下回る場合,推定による誤差を含 む情報であっても,その推定誤差に対して特別の処理を 行わずとも,統計的に現行以上の信頼性をもって推定に 基づく地震動を適用できると考えられる。

4.2 観測値と推定値の組み合せ手法の提案

図10で確認した任意地点における面的地震動の推定 誤差 RMS の 0.55 を,図6の離隔距離 1km 区切りの取 扱誤差 RMS に重ねてプロットした結果を図13 に示す。 なお,推定誤差 RMS は任意地点に対するものであるた め,距離によらず一定の値としてプロットしている。こ の図によると,取扱誤差 RMS(青色実線)と推定誤差 RMS(緑色実線)はある距離で交差することが確認で きる。この取扱誤差 RMSと推定誤差 RMSの交差する 距離(以下,観測値適用距離)は,統計的結果において, 観測値適用距離以下は観測値をそのまま用いた方が誤差 は少なく,観測値適用距離よりも大きい範囲は推定値を 用いた方が誤差は少なくなることを表している。

図 13 より計測震度を適用した本研究の整理では、取 扱誤差 RMS と推定誤差 RMS がほぼ等しくなる距離と して、観測値適用距離は 2km となる結果が得られた。 これを受け、観測値と推定値の組み合せ手法として図



図 13 距離に対する各誤差 RMS の関係



図14 観測値と推定値の組み合せ手法の概要

14 の通り, 観測点より 2km 以下の範囲には観測値の値 をそのまま用い, 2kmより大きな範囲には面的地震動 の推定値を用いる地震動推定手法を提案する。この際, 4.1 節に述べた通り推定誤差について特別の処理をする ことなく, 推定データをそのまま適用する。なお図 13 には,図12 に示した最短観測点距離1km 区切りの推定 誤差 RMS(水色実線)も重ねてプロットしている。こ の図でも,最短観測点距離が2km以下の範囲において, 取扱誤差 RMS(青色実線)の方が推定誤差 RMS(水色 実線)よりも誤差 RMSの値は小さくなっていることが 確認できる。

4.3 提案手法を適用した沿線の地震動推定の事例

地震動の推定精度を高めるには,3.3節で分析した通 り,観測点と推定対象点までの最短観測点距離が短い方 が良く,より近傍の観測データを取り込むことが有効で ある。鉄道事業者が管理・運営している沿線検知点は線 路直近に設置されており,沿線地震動の推定精度を高め るには,上述の観点から鉄道事業者の沿線検知点の観測 データを導入することが望ましい。この鉄道事業者の沿 線検知点の観測データは,地震後の点検区間の判断に用 いられるだけではなく,列車の停止判断にも用いられる ため,その情報はオンラインでリアルタイムに指令所な どで集約される。このためデータ取得の即時性の観点に おいても沿線検知点の観測データは導入が容易である。 本節では,4.2節で提案した観測値と推定値を組み合せ る手法において,鉄道事業者の沿線検知点の観測データ







を導入した事例について述べる。

本研究用に独自に定めた仮想の路線と沿線検知点を図 15 に示す。ここで、仮想の沿線検知点は、KiK-net 観測 点を概ね一定の間隔となるように選定しており、その KiK-net 観測点を接続して仮想の路線を設定した。評価 対象は2016年熊本地震である。図15には震央位置と 推定面的地震動のカラーマップを示している。図の通り, 震央の周辺では強い地震動の分布となっている。図16 に、図15の面的地震動から仮想路線に沿って抽出した 沿線の計測震度をキロ程に対して示す。この図において K-NET のみから推定された沿線地震動(赤色実線)と 仮想の沿線検知点(緑色破線)の観測値(黄色〇印)を 見ると、推定値と観測値がほぼ一致している地点(例え ば SAGH04 や KMMH14 など) も見られるが, 3.2 節で 統計的に分析した通り、計測震度による観測値と推定値 は差異がある場合も確認される。次に、4.2節で提案し た観測値と推定値を組み合せる手法を用いて、仮想の沿 線検知点とした KiK-net 観測データを加えて求めた沿線 地震動(青色実線)を図16に併せて示す。ここで扱っ た面的地震動の推定において、地震計位置はその観測値 が当該のメッシュに適用されることから、推定値は観測 値と一致する。また、4.2節で提案した通り観測点から

観測値適用距離以下の範囲では観測値を適用した方が信 頼性は高まると考えられるため, 観測点から2km以下 の範囲は観測値をそのまま用いて沿線地震動を評価して いる。

ここで対象とした 2016 年熊本地震の場合, 震央のや や北側の仮想路線上における KMMH03 や KMMH16 で は, 推定値は観測値よりも小さく過小推定となっていた が, 沿線検知点を模擬した KiK-net の観測データを導入 することにより, 推定地震動は引き上げられ修正されて いる。一方, 震央より南側の仮想の路線上における KMMH11 では, 推定値は観測値よりも大きく過大推定 となっていたが, 仮想沿線検知点である KiK-net の観測 データの導入により, KMMH11 の前後の区間も含め, 推定地震動は引き下げられ修正されている。

沿線検知点の観測データの追加による沿線地震動推定 の精度向上効果は、その路線近傍の観測データを用いて 検証することが理想的であるが、実際には沿線近傍で取 得できる観測データは限られているため、観測値と推定 値を直接比較することは難しい。しかし、図 12 で示し た最短観測点距離と推定誤差の統計的な分析の結果か ら、より近接の観測データを取り込むことによって推定 精度が高まることは統計的に確認されている。これより、 沿線検知点の観測データの導入は沿線地震動の推定精度 の改善に資すると考える。

5. おわりに

地震時に停止させた列車の迅速な運転再開には,沿線 の地震動を精度良く推定し,その情報に基づき点検区間 の適正化を図ることが望ましい。本研究では,鉄道の地 震時列車運転規制の実務における推定地震動の利用に向 けて,推定誤差の扱いの考え方を示すと共に,観測値と 推定値を組み合せた沿線地震動の推定手法を提案した。

線路近傍に一定間隔に設置されている沿線検知点の観 測データのみを用いる現行手法と比べ,観測値と推定値 を用いる本研究の提案手法は,推定精度を向上させる実 務的なデータ組み合せ手法であると考える。提案手法に よる推定沿線地震動情報は,現行手法よりも高い信頼性 を持って点検区間の適正化や駅間停止列車の次駅までの 迅速な移動などの判断を支援でき,地震時に停止した列 車の早期運転再開に資すると考える。加えて,信頼性の 高い沿線地震動情報は地震計間の大きな揺れの見逃しを 防ぐことも実現できるため,地震時の安全性を高めるこ とにもつながると考える。

謝 辞

本研究において, 防災科研の K-NET および KiK-net

の地震波形データ⁹⁾を使用しました。関係各位に謝意を 表します。

文 献

- 国土交通省監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設 計標準・同解説 耐震設計,丸善出版,2012
- 2) 芦谷公稔,佐藤新二,岩田直泰,是永将宏,中村洋光:鉄 道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用,物理 探査, Vol.60, No.5, pp.387-397, 2007
- 3) 鈴木博人,島村誠:地震時運転規制方法の研究,JR EAST Technical Review, No.3, pp.53-60, 2003
- 4) 国土交通省:大阪府北部地震における運転再開等に係る対応に関する連絡会議資料,資料 5-4-7,2018, http://www.mlit.go.jp/common/001247910.pdf(参照日:2023年12月7日)
- 5) JR西日本ニュースリリース:地震発生時に乗車されているお客様への迅速なご案内に向けた取り組みを行っています,2021, https://www.westjr.co.jp/press/article/2021/10/page_18683.html(参照日:2023年12月7日)
- 6)山本俊六,佐藤亮:早期運転再開のための情報活用,日本 鉄道施設協会誌, Vol.59, No.3, pp.220-221, 2021
- 7) 堀込順一: JR 東日本における地震対策と運転規制概要, 新線路, Vol.60, No.1, pp.59-61, 2006
- JR 東日本ニュースリリース:新幹線早期地震検知システムの改良等について、2005. https://www.jreast.co.jp/press/2005 2/20051020/no 3.html (参照日:2023年12月7日)
- 9) 防災科学技術研究所:防災科研 K-NET, KiK-net, 2019, DOI: https://doi.org/10.17598/NIED.0004
- 10) 中村洋光,岩田直泰,芦谷公稔:地震時運転規制に用いる 指標と鉄道被害の統計的な関係,鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.11-16, 2005
- JR 東日本ニュースリリース:構造物への被害と相関性の高い地震動指標の採用について、2003, https://www.jreast.co. jp/press/2002 2/20030302.pdf(参照日:2023年12月7日)
- 12) JR 西日本ニュースリリース:在来線における地震発生時の取り扱い変更について、2013, https://www.westjr.co.jp/press/article/2013/08/page_4266.html (参照日:2023年12月7日)
- 13) 防災科学技術研究所: J-RISQ 地震速報, 2020, DOI: https://doi.org/10.17598/nied.0017
- 14) 岩田直泰,坂井公俊,山本俊六,室野剛隆,青井真:鉄道
 地震被害推定情報配信システム (DISER) を利用して素早く運転を再開する,RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020
- 15)鉄道総合技術研究所ニュースリリース:鉄道地震被害推定 情報配信システム (DISER)の運用開始について、2019, https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i000000bt7d-att/20190729_ 002.pdf(参照日:2023年12月7日)

- 村石尚,岡田勝也:アメダス補完法による斜面災害地雨量の推定方法,鉄道総研報告,Vol.2,No.8, pp.31-38, 1988
- 17)坂井公俊,田中浩平,室野剛隆,加藤尚:微地形区分を用いた全国の表層地盤固有周期の簡易評価,土木学会第70回年次学術講演会,I-069, pp.137-138, 2015
- 18)野上雄太,坂井公俊,室野剛隆,盛川仁:表層地盤と入力 波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価,

土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.191-202, 2012

19) 気象庁:緊急地震速報の精度検証について,緊急地震速報 評価・改善検討会(第6回)資料,2015,http://www.data. jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/eew-hyoka/06/shiryou8. pdf(参照日:2023年12月7日)



FEM Analysis for Construction of Rail Head Transverse Defect Detection System Using Guided Wave

Yuki KONAYA Mitsuru HOSODA Ryuichi YAMAMOTO

Simulations of ultrasonic wave propagation in cracked rails have been carried out to investigate a method of detecting transverse rail head cracks using guided waves. The results show that 100~150 kHz input frequencies are suitable for detecting rail head cracks, and that the intensity of the first few waves in the received signal waves decreases with the degree of cracking. Further investigation shows that transverse cracks greater than 20 mm that have grown below horizontal cracks can be detected by checking the intensity of the first 3 waves in the received signal waves at the 100 kHz.

キーワード:ガイド波,超音波伝播シミュレーション、レール損傷検知,頭部横裂,頭部水平裂

1. はじめに

多くの鉄道事業者ではレール探傷車による定期的な検 査によってレールに発生するき裂を検査している¹¹。し かし、図1に示すように、レール折損要因の約4割を 占めるレール頭部横裂(以下、横裂とする)¹¹は、レー ル頭頂面下に発生する水平裂から下に向かって進展する ため、レール頭頂面から超音波を入射し、き裂からの反 射波を検知するレール探傷車による検査は困難である。 そのため、横裂の検知手法として、レール頭側部から超 音波を透過させ検査を行う手法が一般的である^{21 31}が、 人手による作業であると共に、頭側部の摩耗したレール や踏切部などでは検査が難しく、新たな検査手法の確立 が課題となっている。一方、過去に国内外でガイド波を 用いたレール損傷検知手法の検討が行われている



図1 レール頭部の水平裂・横裂と超音波伝播イメージ

他^{4) 5) 6)}, ガイド波を用いて非接触でレールの破断を検 知する手法をこれまでに提案している⁷⁾。そこで,本研 究では,レール内部の欠陥に感度良く反応する超音波の 条件を検証するため,レールに対し非接触で超音波の送 受信を行う FEM 解析モデルを作成し,横断面方向にス リットを入れたレールを用いた基礎的な超音波伝播シ ミュレーションを行った。また,実際に営業線で発生す る水平裂や横裂を模擬したき裂をレールモデルに挿入し てシミュレーションを行うことで,受信応答よりガイド 波による水平裂下の横裂の検知可能性を検証した。

2. レール横断面方向にスリットを入れたレール モデルを対象とした超音波伝播特性の評価

2.1 解析モデルと解析条件

レールへ伝播させるガイド波の周波数により,レール 内での伝播深さが異なることが過去の研究にて報告され ていることから⁸⁾,横裂のような頭部の欠陥に感度良く 反応する入力周波数を把握する必要がある。そこで、レー ル頭頂面から横断面方向に深さの異なるスリットを挿入 したモデルを作成した。解析には超音波解析ソフトウェ ア ComWAVE⁹⁾を用いた。図2に FEM 解析モデルの概



図2 解析モデル概要

論

^{*} 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

^{**} 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室(現 鉄道国 際規格センター)

要を示す。レールは有限の全長 1500mm の JIS 50kg N 普通レールとし、レール頭頂面から離した位置に超音波 の送受信子を配置した。送受信子モデルの周囲には境界 媒質となる空間を設けた。

表1に解析条件を示す。本解析ではレール外部での超 音波の送受信メカニズムに大きな影響は無いと考え、計 算負荷低減のため境界媒質を水として計算した。これは 水の場合、空気と比較して超音波の伝播波長が数倍異な り、要素サイズおよび解析時間を大きく減少させること ができるためである。FEM 解析モデルの要素サイズに ついては,解析精度を担保するために,境界媒質を超音 波が透過する際の波長の約 1/20 のサイズ (0.35~0.75mm.) 入力周波数に応じて変化)とした。超音波の入力周波数 については、レール破断検知での検討⁷⁾を参考の上 100. 150, 200kHzの3種類とし、レール長手方向に瞬間的に 高出力な波数12の連続波(バースト波)を伝播させた。 水平面に対する送受信子の角度は、得られる受信強度を なるべく大きくするため、水中からレールへの横波臨海角 度である 20 度に設定した。これは過去の検討¹⁰⁾ により, 横波に近いモード(約3mm/µs)であると、高速かつ高 強度のモードとしてガイド波がレール頭部を伝播するこ とが示されていることや、一般的に横波は臨界角近くに 設定すると高強度で送信できるためである。送受信子と レールとの離隔については、鉄道車両に送受信子を搭載 し、レールとの離隔を70mm以上確保した状態で超音 波の送受信が可能であることを確認しているが⁷⁾¹¹⁾.本 解析ではレール内での超音波伝播特性の把握が目的であ ることから、解析モデルの全要素数と計算負荷を考慮し 10mm とした。き裂として挿入したスリットは幅 1mm とし, 頭頂面から 10~60mm の深さで挿入した。なお, 本解析モデルと同様のレールへのガイド波透過試験を実 施したが、試験とほぼ同等の応答が得られることを確認 している。

表 1	解析条件	(スリット入りモデルでの解析)
		(a)固定条件

送受信子 サイズ	$25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$	送受信子 角度	20 °	
送信子から き裂までの 水平距離	200 mm	送受信子と レールとの 離隔	10 mm	
き裂形状	頭部 スリット	送受信子間 水平距離	950 mm	
入力波の 種類	バースト波	入力波数	12	
(b)設定した入力周波数とモデル要素数の関係				
入力周波数	100 kHz	150 kHz	200 kHz	
全要素数	約 0.5 億	約 1.7 億	約5億	

2.2 解析結果

図3に超音波伝播によるレール表面変位を示す。頭頂 面から挿入したスリットにより超音波の伝播に変化が生 じていることが分かる。本研究では以降特記した場合を 除き,超音波の受信信号として,3次元各方向の変位よ り算出される体積変化量から得られる体積ひずみを強度 として,き裂(スリット) 無しのレールでの解析結果か ら得られるピーク値の強度を1として正規化すること により評価した。

図4に入力周波数100,200kHzにおけるスリット無 し、スリット深さ10,40mmの場合の受信波形を示す。 スリット深さに応じて強度が小さくなることが分かる。 図5に各入力周波数におけるスリット深さの違いによ るピーク強度の変化を示す。入力周波数が150, 200kHzの場合は頭頂面から10mmの深さのスリットを 入れた時点で0.6程度まで急激にピーク強度が低下する 一方で、入力周波数100kHzの場合は頭頂面からのス リット深さが20~40mmで大きく低下していることが分 かる。また入力周波数150kHzの場合は、スリット深さ 10~30mmでのピーク強度の低下も大きいことが分かる。



図 3 超音波伝播の様子 (入力周波数 100kHz・スリッ ト深さ 40mm)¹²⁾



以上の結果より、レール破断に至る前に管理上検知す べき横裂深さが 20~30mm であることを考慮すると、 100~150kHzの周波数のガイド波がレール頭部に発生す る横裂の検知に適している可能性が高い。

周波数の違いによるレール内伝播深さの変化について さらに考察するため、図6に示すように、レール頭頂面 および頭頂面から深さ40mmのレール長手方向におけ る体積ひずみの分散曲線(カラーマップ)を作成した。 このグラフは横軸が周波数,縦軸が波長を示しており、 強度(体積ひずみ振幅)が強い白色~赤色の線がそれぞ れのレール内深さにて卓越して伝播する波の振動モード を表している。この図6の分散曲線より、頭頂面に比べ て深さ40mmでは、200kHz以下の低周波寄りの振動 モードが高強度を示していることが分かる。つまり、レー ル頭頂面から深さ40mmでは、100~150kHzの周波数帯 の超音波が卓越して伝播し、この深さの部分を遮断する スリットによりこれらの周波数帯の超音波が多く遮られ たと推測される。

3. 水平裂・横裂が混在したレールモデルを対象とした超音波伝播特性の評価

3.1 解析モデルと解析条件

実際に営業線に発生する水平裂や横裂を模擬したき裂 を挿入したレールモデルを作成し,FEM 解析を実施す ることで,水平裂より下に進展した横裂の検知可能性を 検証した。図7に本解析での解析モデルの概要を示す。







図6 体積ひずみの分散曲線¹²⁾

送信から受信までの一連の超音波伝播の過程のうち、①: 空気中からの超音波送信からレール内までの伝播、②: レール内長手方向への伝播、③:レールから空気中での 超音波受信までの伝播、と解析の計算過程を3分割し、 それぞれの過程で独立したモデルを作成し(それぞれモ デル①~③とする)、順に引き継いで計算を行った。こ れにより、各モデルにてメッシュサイズを調整すること で、計算精度を維持しつつも計算負荷を大幅に抑えるこ とが可能となり、境界媒質を空気とした計算を可能した。

表2に本解析での解析条件を示す。送受信子角度については、境界媒質を空気としたため、空気中からレールへの横波臨海角度である6度に設定した。入力周波数については、2章での図5の結果を考慮してより高い感度を期待できる100,120kHzの2種類を設定し、波数は3波とした。これは一般的に波数が減少するほど伝播する波の周波数分布は広帯域となることから¹³⁾,き裂による周波数分布の特徴量の変化を捉えられる可能性を考慮したためである。実際に入力波数を3および12波としてき裂を含まないレールモデルを用いて解析を行い、受信波周波数分布を比較したところ(図8),3波の方が広帯域であることを確認した。またレールモデルに挿入





(b) 分割モデル解析領域(側面図)

図7 分割解析モデル概要¹²⁾

76

体積ひずみ振幅

0

送受信子 サイズ	25 mm×25 mm	送受信子 角度	6 °
送信子から き裂までの 水平距離	200 mm	送受信子 とレール との離隔	10 mm
き裂形状	水平裂, 水平裂+ 横裂深さ 20 mm, 同 30 mm	送受信子 間水平 距離	950 mm
入力波の 種類	バースト波	入力波数	3
(b) 設定し	ンた入力周波数と各=	Eデル要素数	の関係
入力周波数	100kHz	120k	Hz
モデル① 要素数	約 1.4 億	約 2.5	5億
モデル② 要素数	約 0.3 億	約 0.3	3億
モデル③ 亜 = 数	約 2.0 億	約 3.5	意億

表 2 解析条件(水平裂・横裂混在モデルでの解析) (a) 固定条件



図8 入力波数差による受信周波数分布比較(入力周波 数100kHz,き裂無しレール)¹²⁾ ※最大値により正規化



図9 挿入したき裂の形状

したき裂の形状を図9に示す。水平裂を模擬したき裂と して,頭頂面から深さ7mmの位置に幅30mm,長さ 50mmの内在スリットを設定した。横裂を模擬したき裂 は,水平裂中心下に垂直に広がる内在した半円状のス リットとして,深さ20,30mmで設定した。さらに横 裂の模擬き裂に関しては頭頂面に開口した場合も同じ深 さで設定した。いずれのき裂を模擬したスリットも厚さ は1mmである。なお以降特記した場合を除き,単に「水 平裂」や「横裂」と表記した場合は、このそれぞれのき 裂を模擬したスリットを指すものとし、水平裂より下に 内在した半円状スリットを「内在横裂」,頭頂部が開口 した半円状スリットを「開口横裂」とする。

3.2 解析結果

超音波伝播の様子の可視化例として、図10.11に、 き裂無しのモデルおよび水平裂と深さ 30mmの内在横 裂が混在したモデルでのレール表面変位の変化状況(い ずれも入力周波数100kHz)を示す。図10はき裂に超 音波が到達した直後の様子,図11は伝播するほぼすべ ての波が透過した後の様子であり、き裂無しのモデルは それぞれの比較対象のき裂有りのモデルと送信から同じ タイミングの様子である。図 10(a) のき裂無しのモデ ルでは安定して伝播している数波の超音波が、図10(b) のき裂有りモデルではき裂により遮られている様子が確 認できる。また、図 10 と図 11 を比較すると、図 11 で は伝播している波の波数が増加していることが分かる。 これはレール内伝播中のモード変換や反射等により増加 したためと考えられる。図11(a)と図11(b)を比較 すると、き裂有りの場合は、この波数が増加した一連の 波のうち先頭の 5~6 波程度のみが変位が小さくなって いることが分かる。これは、やがて受信子に到達する一 連の波のうち、先行する波がき裂の影響を大きく受けた ためと想定される。

図 12 に入力周波数 100kHz, 120kHz の受信波形例を 示す。き裂の種類によらず、いずれの受信波形も入力し た3波よりも波数が増加しており,波の後半部分に比 べ. 先頭の3波程度(図中の赤矢印で示した範囲)の振 幅がき裂を含むモデルでは減少していることが確認でき る。これは超音波伝播の様子を可視化した図 10, 11 の 状況と概ね一致していると言える。そこでき裂無しの受 信波形にて、初めて絶対値 0.01 以上の極値を取った点 から3周期分の時間幅をゲートとして設定し、このゲー ト内での波形の振幅の最大値をピーク強度として整理す ることとした。き裂の条件とピーク強度の関係として, 受信波形全体でピーク強度を抽出したグラフおよびゲー ト内でのピーク強度を抽出したグラフを図13に示す。 受信波形全体でピーク強度を抽出した図 13(a)のグラ フでは、いずれの入力周波数でも、き裂の条件が水平裂 のみの条件と水平裂と横裂が混在した条件で大きな強度 変化は見られない。一方、ゲート内でのピーク強度を抽 出した図 13 (b) のグラフでは、入力周波数が 100kHz であれば、き裂が水平裂のみの条件に比べて水平裂と内 在横裂深さ 20mm, 30mm の条件で, それぞれピーク強 度が0.15, 0.2 程度減少することが分かる。また開口横 裂の場合はそれぞれさらに 0.1 程度減少していることが 確認できる。これより、横裂の大きさに応じてピーク強 度は減少し, 閾値を 0.6~0.7 程度に設定することで, 閾 値を下回る箇所が深さ20mm以上の横裂の発生箇所と 判定できる可能性が高いと考えられる。入力周波数 120kHzの場合は、き裂が水平裂のみの条件に比べて、 水平裂と開口横裂の条件でも横裂深さ 20mm で 0.045



(a) き裂無し

(b) 水平裂+内在横裂深さ30 mm

図 10 超音波のレール内き裂到達直後の伝播の様子



(a) き裂無し

(b) 水平裂+内在横裂深さ30 mm











図 14 受信波周波数分布

程度,同じく30mmで0.14程度の減少量であり,横裂 の有無によるピーク強度の変化が小さい。そのため,入 力周波数100kHzの場合に比べて横裂の有無を区別する 正確な閾値設定が難しく,受信強度の変化に着目して深 さ20mm以上の横裂の検知を行うことは難しいと考え られる。

さらに、受信波の周波数分布を比較することにより、 周波数特性の変化による横裂検知可能性を検討した。図 14 に各き裂の条件での受信波の周波数分布を示す。入 力周波数 100, 120kHz のどちらの場合においても、 100kHz 周辺および 130~150kHz 周辺に 2 つのピークが 存在しており、水平裂や横裂の大きさに応じて 130~150kHz のピークが減少していることが確認でき る。このピークの減少に着目することにより、き裂の形 状の判定ができる可能性がある。

水平裂の幅や長さ,横裂の位置や進展角度など,き裂の形状をはじめとしてまだ多くのパラメータが存在し, FEM 解析によるさらなる検討を進めていく予定である。

4. まとめ

水平裂および横裂を模擬したき裂を挿入した FEM レールモデルを作成し、非接触でガイド波をレールへ伝 播させる超音波伝播シミュレーションを実施すること で、ガイド波によるレール頭部横裂の検知可能性を検討 した。本研究で得られた結果を以下の通りまとめる。

- (1) レール頭頂面よりスリットを挿入したモデルにて 超音波伝播シミュレーションを行い、入力周波数 と主に伝播するレール内深さの関係を整理した結 果、入力周波数100~150kHzの超音波が深さ 20~30mmの横裂の検知に適していることが分 かった。
- (2)(1)の結果より、入力周波数100、120kHzとして 水平裂や横裂を模擬したレールモデルにて超音波 伝播シミュレーションを実施したところ、伝播す

る波のうち、最初の数波部分がき裂の影響を大き く受けることが分かった。これより受信波形のう ち最初の3周期部分のみでの強度の比較により、 水平裂下の横裂の深さに応じて強度が低下するこ とを確認した。入力周波数を100kHzとした場合、 120kHzとした場合に比べ、き裂が水平裂のみの 条件に対する横裂を含む条件での受信強度は大き く減少することが分かった。き裂無しの条件での 受信強度に対し、60~70%程度の閾値を設定する ことにより、深さ20mm以上の横裂の検知が可能 であると考えられる。また受信波の周波数分布を 比較することで、水平裂や横裂を判別できる可能 性が示唆された。

(3)本研究での解析結果を踏まえ、さらに解析での検 討を行い、ガイド波によるレール頭部横裂検知シ ステムの構築を進めていく予定である。

文 献

- 新版軌道材料編集委員会編:新版軌道材料,鉄道現業社, pp.76-83,2011
- 東京計器レールテクノ,鉄道保線機器総合カタログ,頭部 横裂測定器:https://www.tokyokeiki.jp/Portals/0/images/products/ pdf/rail/202111_trt.pdf(参照日:2024年1月10日)
- 3) 寺下善弘, 設楽英樹:レール等に潜む損傷の検査法, RRR, Vol.65, No.5, pp.22-25, 2008
- 4) 例えば Bayissa, W.L. and Dhanasekar, M., "High speed detection of broken rails, rail cracks and surface faults," CRC for Rail Innovation (An Australian Government Initiative), 2011.
- 5) 林高弘, 宮崎雄介, 片岡慶太, 瀧川光伸: 超音波ガイド波 の鉄道レール検査への適用, M & M 材料力学カンファレ ンス, 2007 巻, pp.72-73, 2007
- 6) 元好茂,本間健一:レール損傷検知システム(超音波方式, 帰線電流方式)の開発,新線路,Vol.66, No.11, pp.33-35, 2012
- 7)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

- 8) Chong, M. L., Joseph, L. R. and Younho, C., "A Guided Wave Approach to Defect Detection under Shelling in Rail," NDT&E International, Vol.42, pp.174-180, 2009.
- 9) 伊藤忠テクノソリューションズ, ComWAVE 超音波解析 ソフトウェア, engineering-eye: https://www.engineeringeye.com/ComWAVE/index.html (参照日: 2023 年 6 月 23 日)
- Hayashi, T., Won-Joon, S. and Joseph, L. R., "Guided Wave Dispersion Curves for a Bar with an Arbitrary Cross-section, a Rod and Rail Example," Ultrasonics, Vol.41, Issue 3,

pp.175-183, 2003.

- 11)小納谷優希,細田充,山本隆一:ガイド波によるレール損 傷検知システムを搭載した車両による走行試験,令和5年 度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演概要集, No.VI-1204, 2023
- 12) 小納谷優希,細田充,山本隆一:FEM によるき裂を有す るレールへのガイド波伝播シミュレーション,鉄道工学シ ンポジウム論文集, Vol.27, pp.71-78, 2023
- 13) 川崎絋一郎:超音波を用いた非破壊材料特性評価,日本機 械学会論文集 (A 編), Vol.67, No.655, pp.16-23, 2001

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者			
芦谷公稔			
■編集責任者			
谷村幸裕			
■企画・監修			
川﨑邦弘	長倉 清	日比野有	小方正文
仁平達也	瀧上唯夫	田所敏弥	重枝秀紀
桃谷尚嗣	布川 修	新井英樹	福田光芳
松井元英	上半文昭	斉藤実俊	水上直樹
富田 優	小島謙一		

鉄道総研報告 第38巻 第8号 2024年8月1日 発 行 監修・発行所:公益財団法人 鉄道総合技術研究所 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2024 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先 総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 38 No. 8

Aug. 2024

PAPERS

A Study on the Wheel-rail Impact Behavior due to a Wheel-flat by Finite Element Analysis	(1)
	(1)
Wheel/Rail Tangential Contact Force Model for Analyzing Vehicle Dynamics under Running in Rainy Conditions	
·······D.YAMAMOTO	(9)
Improving the accuracy of Seismic Ground Motion Estimation along Railways by Integrating	
Observed and Estimated Data	
······N.IWATA, M.MORIWAKI, S.NODA, H.MATSUBAYASHI, S.YAMAMOTO	(17)
FEM Analysis for Construction of Rail Head Transverse Defect Detection System Using Guided Wave	(25)

