

車輪／レール接触位置の3次元探索手法

中橋 順一* 下村 隆行*

Search Method of Wheel/Rail Contact by Three Dimensions

Jun-ichi NAKAHASHI Takayuki SHIMOMURA

In order to consider the attack angle between wheel/rail and the change in the cross-section shapes of rail in the train traveling direction, the search method of contact point by three dimensions was developed. Moreover, we investigated the contact point search by three dimensional methods for tongue rail. In addition, we evaluated the curving performance and the running safety by vehicle dynamics using the result of contact point analysis. As the result, it has been understood that the change in the contact point by the attack angle exerts little influence on the curving performance.

キーワード：車輪踏面，レール断面，接触幾何学，接触点解析，3次元接触，2点接触

1. はじめに

鉄道車両は、直線では高速で安定して走行し、曲線ではスムーズに曲がることが求められており、車輪踏面やレール断面の形状は、この相反する要求を満たすように設計されている。しかし、車両が走行するにつれて車輪とレールの双方が摩耗して形状が変化する場合には、走行安定性や乗り心地が悪化するだけでなく、設計時には回避していた車輪／レール間の2点接触の発生も懸念される。

また、鉄道車両の運動は車輪／レール間の接触点におけるクリープ力特性の影響を大きく受けることから、曲線通過性能や走行安定性などの車両運動特性を評価するためには、実際に用いられている車輪踏面やレール断面の摩耗傾向や接触状態を把握することが重要である。

近年、実物の車輪踏面やレール断面の摩耗形状を離散データとして容易に取得できるようになり、鉄道総研においても、摩耗形状の離散データを用いた車輪／レール間の接触特性を2次元で解析する手法が開発されている¹⁾。しかし、急曲線や分岐器を走行する場合には、車輪／レール間の接触位置が前後方向に移動し、車両の運動特性に影響することが考えられる。

そこで、車輪／レール間のアタック角やレール断面の前後方向での形状変化を考慮するために、従来報告されている2次元解析手法を拡張して、接触点を3次元で探索する手法を開発し、さらに、車両の走行性能に影響すると考えられる車輪／レール間における2点接触の探索

手法についても検討した。本報告では、新たに開発した3次元接触点解析手法と、これを用いた車両運動シミュレーションによる曲線通過性能や走行安定性の評価結果について報告する。

2. 車輪／レール接触点の3次元探索手法

2.1 3次元探索手法

本報告で述べる3次元探索手法は、従来報告されている2次元探索手法を拡張したものである。車輪／レール接触点の3次元探索手法のアルゴリズムを図1に示す。

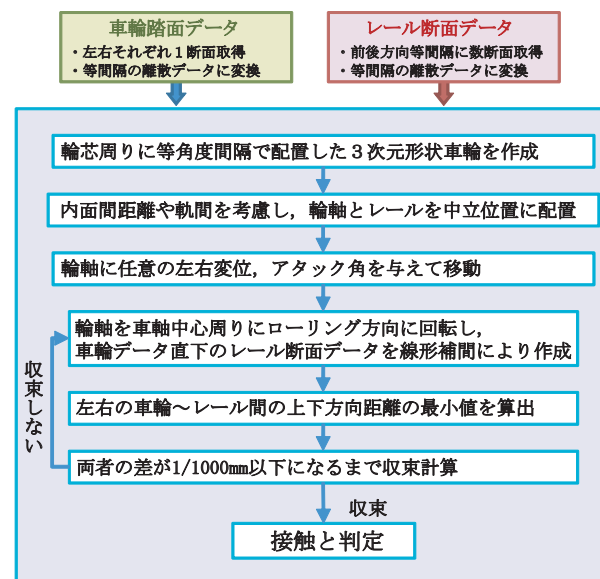


図1 接触点の3次元探索アルゴリズム

* 車両構造技術研究部（車両運動）

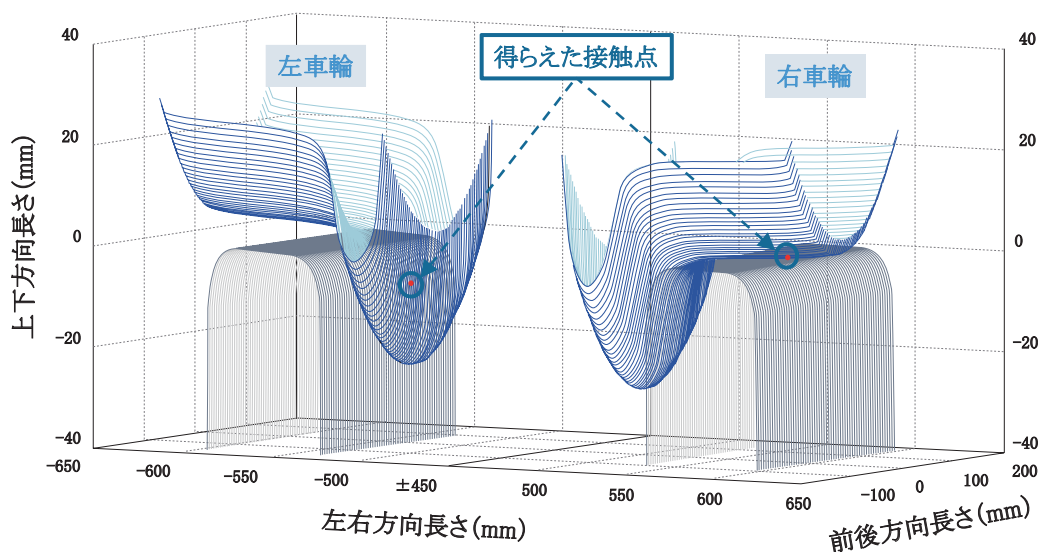


図2 3次元探索手法による接触点解析例

- (1) 形状測定装置により得られた車輪踏面およびレール断面のデジタルデータを左右方向（まくらぎ方向）に等間隔（0.1mm）の離散データに変換する。設計形状の場合もあらかじめ同様の離散データに変換する。
- (2) 車輪踏面は、離散データとして得られた1断面を、輪芯周りに等角度間隔で配置した3次元の形状データとして作成する。レール断面は、前後方向に等間隔で測定した離散データをそのまま配置した3次元の形状データとし、車輪内面間距離や軌間を考慮して輪軸とレール形状データを中立位置に配置する。
- (3) 任意の左右変位およびアタック角を与えた輪軸の3次元形状を、車軸中心周りにローリング方向に回転させる。このとき、車輪直下のレール断面形状データを線形補間により作成する。
- (4) 左右それぞれの車輪／レール間の上下方向距離の最小値を算出する。両者の差の絶対値が、接触判定値とした1/10000 mm以下の場合、左右車輪が同時にレールに接触したものと判定する。
- (5) 判定値を満たさない場合は、(3)に戻り、両者の差が判定値を満たすまで3次元形状輪軸をローリング回転して収束計算を続ける。

この探索手法で得られた接触点における車輪半径、アタック角、接触楕円の大きさなどの情報から、車両運動シミュレーションに必要なクリープ力などが求められる。

図2に3次元探索手法による接触点解析例を示す。車輪踏面を修正円弧踏面、レール断面を60kgレールの設計形状として、アタック角を3degとした場合に左車輪がフランジ直線部（アタック角≒65deg）でレール断面と接触した場合であり、図中の赤印は、本解析で得られた接触点を表している。この接触点解析を、アタック角を0～4degの範囲で変化させて行い、輪軸左右変位と左右車輪の接

触半径差を求めた結果を図3に示す。アタック角による違いが認められるのは、車輪フランジ部がレールと接触し、左右車輪の半径差が急激に増加する部分であり、踏面部やフランジ先端で接触する場合にはアタック角による差異は認められない。また、フランジ接触に至る輪軸左右変位はおよそ10mm付近であり、アタック角が大きくなると、より小さい左右変位でフランジ接触することがわかる。さらに、0degと4degの場合を比較してもフランジ接触する輪軸左右変位の差は0.6mm程度であり、アタック角が0degと1degでは、ほとんど差異は認められないことから、前後方向にレール断面の形状変化がない場合やアタック角が1deg程度の条件であれば、車輪／レールの接触位置に及ぼすアタック角の影響は小さいと考えられる。

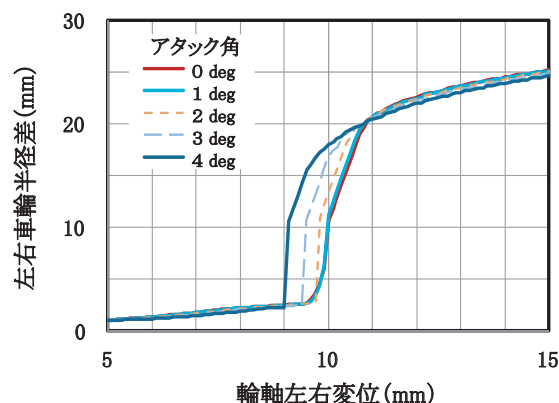


図3 輪軸左右変位と左右車輪の接触半径差の関係

2.2 2点接触の探索手法

車輪／レール間で2点接触が発生すると、接触点が急激に移動するため、衝撃的な横圧の発生や車両走行性能の低下が懸念される。そのため、車輪踏面形状を設計する際には、車輪の曲率がレールの曲率より小さくなるよ

うに形状を決定し、かつヘルツ圧の増大と2点接触を回避するのが一般的である²⁾。しかしながら、累積走行距離や通過トン数の増加により車輪やレールが摩耗した場合、2点接触が発生する可能性があることから、その探索手法について検討した。

2点接触が発生するケースとして、レールがフランジ部に馴染むように摩耗した場合が考えられる。この条件を満たすレール断面と車輪（新幹線円錐踏面設計形状）を配置した状態を図4に示す。フランジ部とレール内側面は非常に接近しているが、車輪/レール間の上下方向距離としては離れているため、従来から行っている2.1節の手法では接触と判定されない。そこで、従来の手法で1点目の接触点を求め、その接触状態における車輪踏面と、車輪/レール間の接触面の法線方向弾性変位（中立位置において輪重が作用した場合を仮定したヘルツ圧による弾性変位。以下、弾性接触厚さとする）を考慮してレール断面をわずかに拡大したレール（以下、外挿レールとする）と車輪との上下方向距離が0 mm以下になった場合（1点目は除く）に2点目が接触したと判定することとした。図5に2点接触の判定方法を示す。実レールとの上下方向距離（赤線）により1点目を算出し、外挿レールとの距離（青線）により2点目を判定することで、2点接触の探索が可能となった。ただし、本件で

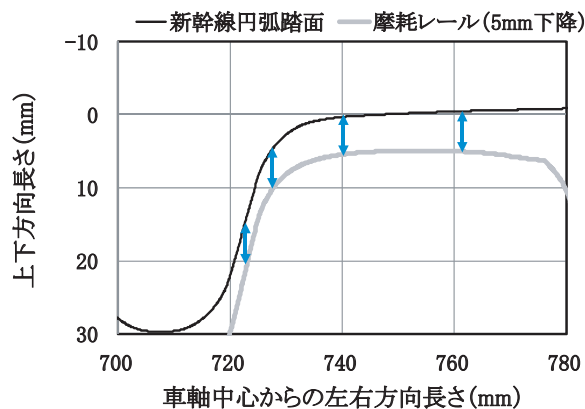


図4 車輪に馴染んで摩耗したレールと車輪

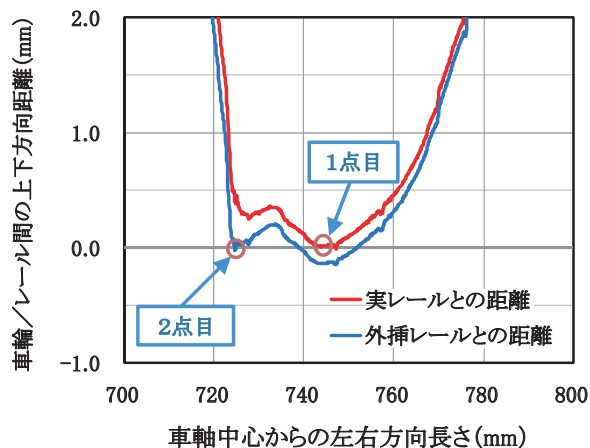


図5 2点接触の判定方法

は一定値として取り扱ったが、より適切な法線力に対する弾性接触厚さについては、今後検討する必要がある。

3. 接触点探索結果の検証

3.1 模型輪軸による接触実験結果

2.1節に示した3次元接触点探索手法の妥当性を検証するために、実物大の模型輪軸と既存の敷設レールを用いた接触実験を行った（図6）。リフターに乗せた模型輪軸に任意のヨーイング角、輪軸左右変位を与え、光明丹を塗布したレールに接触するまで模型輪軸を徐々に降下させて、光明丹による痕跡から接触点を求めた。アタック角は1～4degの範囲で変化させた。図7にアタック角4degの接触実験における光明丹の痕跡を示す。赤印で囲んだ部分が実験で得られた接触点である。このケースでは光明丹の痕跡が踏面部とフランジ部の両方にあり、2点接触が再現されている。

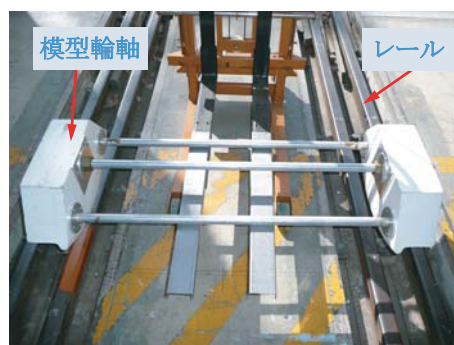


図6 模型輪軸による接触実験の様子



図7 模型輪軸における光明丹の痕跡（アタック角4deg）

フランジ接触が生じる条件において、実験と解析結果の比較を図8に示す。解析では、形状測定装置により得られた模型輪軸および敷設レールの離散データを用いた。また、車輪座標における前後接触位置および接触点高さは、いずれも車輪座標における基準点（車軸中心線を含む鉛直面と車輪踏面が交わる曲線上で車輪背面から65 mmの点）からの距離として求めた。

フランジ部の前後接触位置は、アタック角の増加に

特集：車両技術

伴って進行方向前側に移動しており、実験、解析ともにアタック角が4degの場合には約70mm前方である。一方、接触点高さは、実験、解析とも10～15mmの範囲であり、いずれもフランジ直線部で、アタック角による差異はほとんど認められなかった。

実験と接触点解析の結果を比較すると、おおむね一致しており、3次元探索手法は妥当であると考えられる。しかしながら、アタック角が3degの場合に実験値のばらつきが認められるなど実験の再現性が悪いことから、条件設定精度の高い実験方法について検討を進めている。

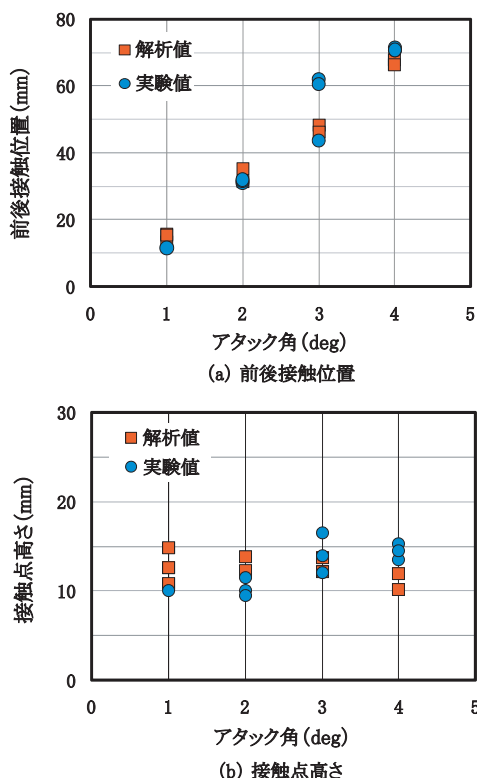


図8 実験と解析結果の比較

4. 分岐器トングレール部における検討

進行方向にレール断面形状が変化するケースとして分岐器のトングレール部が挙げられる。特に8番分岐器はリード曲線の半径も小さいことから、車輪/レール間の接触位置が前後方向に移動することが考えられる。また、過去に発生した分岐器における脱線で、実際に乗り上がりやすい位置は、トングレール先端部から100～350mm程度の範囲に限定されることが報告されている³⁾。ここでは、本線用8番分岐器の設計形状を用いた3次元接触解析を行った結果について述べる。

解析に用いた本線用8番分岐器の断面形状は、トングレール先端から45mm間隔で13断面を作成した。基本レール部はタイププレートなしの50Nレールとし、トングレール部は先端からの距離が進むにつれて断面形状が変化する。この断面データを用いて3次元探索手法による接触点解析を行った。

図9は分岐器断面形状を用いた接触点解析例であり、トングレール先端から360mm近傍においてトングレール部と車輪フランジが接触した条件を示している。アタック角は2deg、スラックは15mmとした。左側レールにはトングレールを含む形状を用いており、前後方向に形状が変化している。この分岐器レール上において3次元車輪データを進行方向に移動して接触点解析を行った。図10にトングレール先端から0mmから360mmまで距離ごとに求めた輪軸左右変位と左右車輪半径差の関係を示す。トングレール先端から180, 270mm近傍では、輪軸左右変位22, 24mm付近で左右半径差が小さくなっており、ここで接触点がトングレールから基本レールに移動している。

図11にトングレールとフランジが接触したときの車輪座標における前後接触位置と接触点高さを示す。前後接

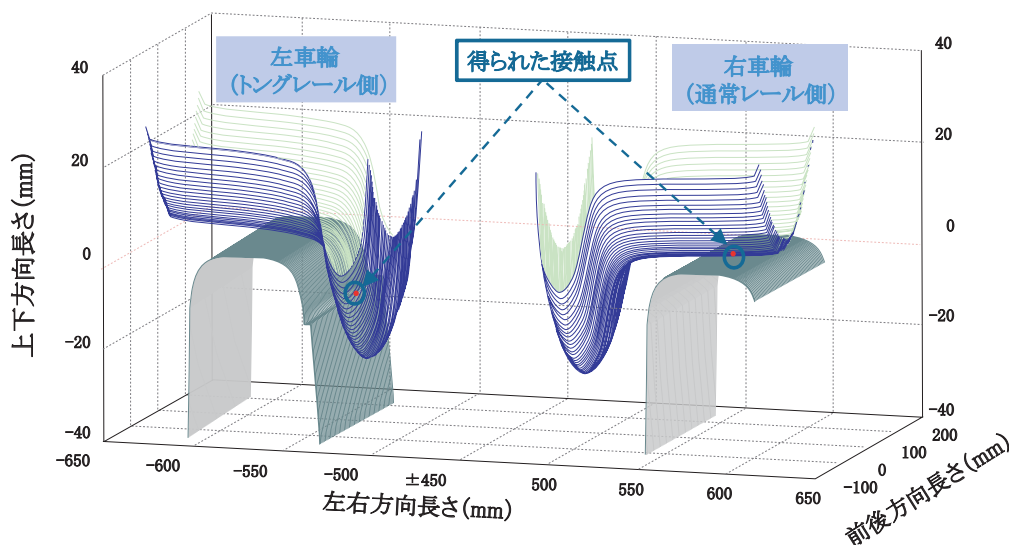


図9 分岐器断面形状を用いた接触点解析例

触位置はトングレール先端からの距離によらず40mm弱でほぼ一定である。一方、接触点高さはトングレール先端から100mm程度までは約10mmであるが、これを超えると15～20mmとなり、接触点がフランジ先端側へ移行している。これは前述の乗り上がりやすい位置（トングレール先端部から100～350mm程度）と符合している。

本報告では、本線用8分岐器の設計形状断面を用いたが、今後は、実測した断面形状やトングレール部に入射角のある側線用8番分岐器などによる接触点解析を行い、さらに、その結果を用いた分岐器通過シミュレーションを実施する予定である。

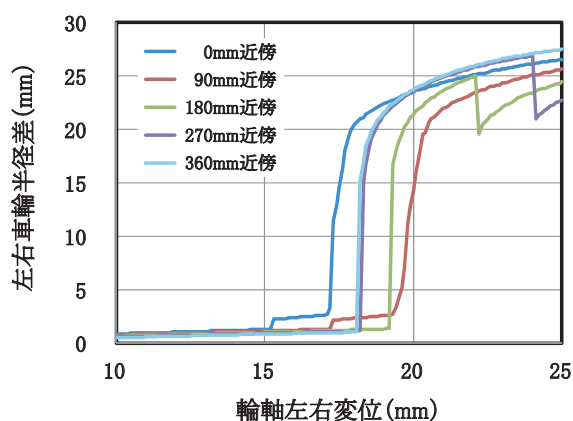


図10 輪軸左右変位と左右車輪半径差の関係

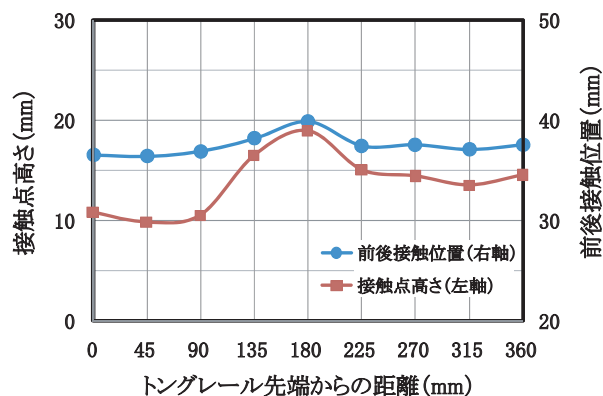


図11 トングレール先端からの距離と前後接触位置および接触点高さの関係

5. 車両運動解析に対する接触点解析の影響

5.1 アタック角が曲線通過性能に及ぼす影響

車両運動の時刻歴シミュレーションにおいて、前述の接触点解析を微小時間刻みの逐次計算を行うと膨大な計算時間を要する。このため、あらかじめアタック角や輪軸左右変位をパラメータとして、接触点解析を行った結果をファイル化（以下、接触点ファイルとする）して参照することにした。

急曲線を走行する場合に発生するアタック角による車輪とレール接触位置の変化が、横圧などの曲線通過性能に及ぼす影響を、前述の接触点解析の結果を用いた曲線通過シミュレーションで検討した。車両モデルを在来線振子特急電車とし、曲線半径100～400m、カント105mm、軌道不整がない軌道を均衡速度で走行する条件で行った。

図12にアタック角の影響を考慮した曲線通過シミュレーションの結果を示す。図は半径100mの曲線における第1軸の外軌側横圧の波形である。赤線がアタック角の影響を考慮しない2次元接触解析を用いた場合、青線がアタック角の影響を考慮した3次元接触解析を用いた場合である。アタック角の影響を考慮したにも関わらず、横圧波形の差異はほとんど認められなかった。また、アタック角の影響を接触点解析に考慮しない条件で、曲線半径別に解析した結果によると、円曲線におけるアタック角の平均値が最大となるのは、半径100mの曲線における第1軸の約1.4degであった（図13）。したがって、アタック角が1deg程度以下であれば、2.1節でも述べたように接触点解析における左右車輪半径差などの接触特性の差異も小さいと考えられる。つまり、路面電車のように半径が数十m程度の曲線を走行する条件でなければ、アタック角による接触位置の変化が曲線通過性能に及ぼす影響は非常に小さいことになる。

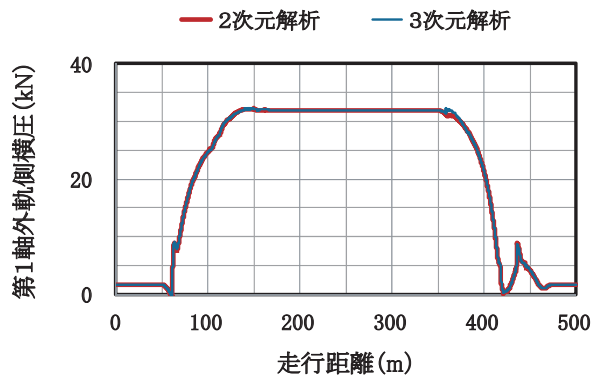


図12 アタック角の影響を考慮した曲線通過シミュレーション結果

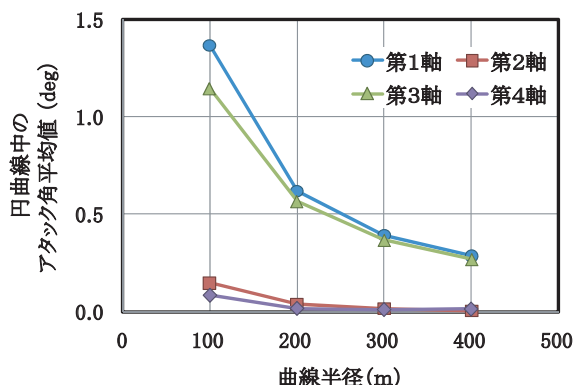


図13 各軸位のアタック角平均値と曲線半径の関係

特集：車両技術

5.2 凹摩耗による2点接触が走行安定性に及ぼす影響

車輪踏面に極端な凹摩耗がある場合、2点接触が発生する可能性がある。そこで、極端な凹摩耗を想定した車輪踏面形状で接触点解析を行った。レール断面形状は60kgレール、アタック角は0degとした。極端な凹摩耗がある場合、図14に示すように輪軸左右変位が0.5mmおよび2.0mm近傍において、2点接触が連続して発生していることがわかる。

この2点接触を考慮した接触点ファイルを用いて車両運動シミュレーションを行い、走行安定性を評価した結

果を図15に示す。直線区間を等速走行中の車両の1, 3軸位に同位相で1Hz, ±3mm, 3波の連続した通り不整を与えて、これによる応答を台車枠左右加速度(前位台車)で比較した。2点接触の場合(青線)は、周波数約9Hz, 全振幅で約2m/s²の左右振動加速度が通り不整通過後に持続して発生した。一方、1点接触の場合(赤線)は、通り不整通過直後に収束した。したがって、極端な凹摩耗に起因すると考えられる自励振動のような現象の詳細な解明には2点接触を考慮した手法が有効であると考えられる。

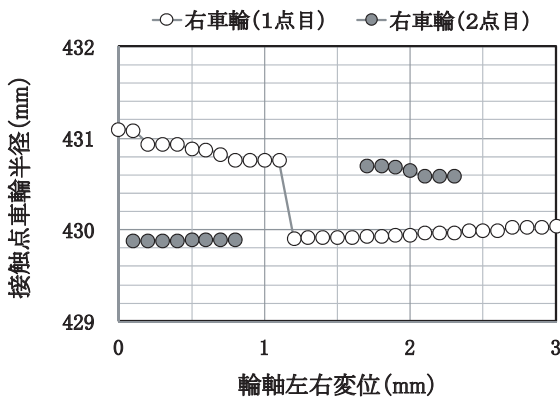


図14 接触点解析結果

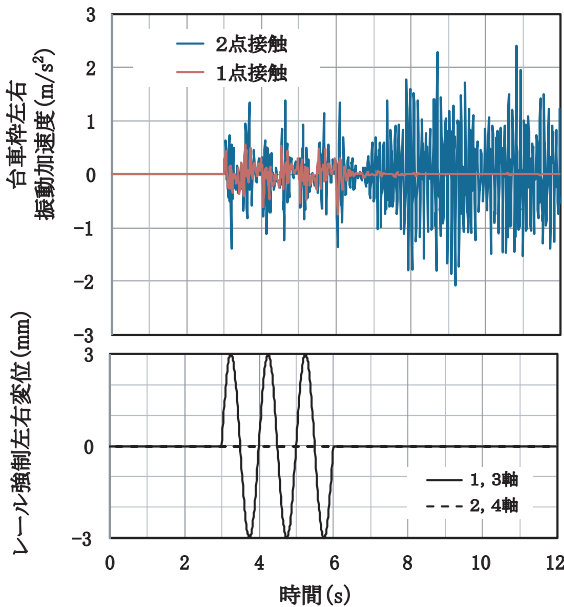


図15 走行安定性解析結果(速度130km/h)

6. まとめ

形状測定装置により実測した車輪踏面、レール断面形状を用いた車輪/レールの幾何学的な接触位置の3次元探索手法と2点接触の探索手法を開発した。これによりアタック角やトングレー先端部などの前後方向のレール断面形状変化に対応した接触点解析が可能となった。解析結果は、模型輪軸による接触実験結果ともおおむね一致しており、本探索手法は妥当であると考えられる。さらに、解析結果を接触点ファイルとして参照することで車両運動シミュレーションに入力し、アタック角の影響や2点接触を考慮した曲線通過性能や走行安定性の評価を行った。その結果、アタック角による接触位置の変化が曲線通過性能に及ぼす影響は非常に小さいことや極端な凹摩耗が走行安定性に影響を及ぼす可能性があることがわかった。

今後は、実測した分岐器レール断面形状やトングレー部に入射角のある側線用8番分岐器断面形状による接触点解析を行い、その結果を用いた分岐器通過シミュレーションを実施する予定である。

文献

- 1) 足立雅和ほか：車輪とレールの摩耗を考慮した接触状態解析手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.6, pp.17-22, 2006
- 2) 高速車両用輪軸研究委員会編：鉄道輪軸, 丸善プラネット株式会社, pp.75-76, 2008
- 3) 上村康夫ほか：各社報告 ポイント先端部の管理, 日本鉄道施設協会誌, Vol.32, No.3, pp.50-51, 1994