

1705 幾何学的手法で得た車輪・レール間の接触点位置から見た のり上がり脱線の可能性

正〔機〕 ○土井 賢一 片折 暁伸 村木 克行 石田 陽士

正〔機〕 大内田 章 堀岡 健司 (東日本旅客鉄道株式会社)

Possibility of the Wheel Climb Derailment on the Viewpoint of the Contact Point Position between Wheels and Rails Investigated by a Geometrical Method

○Kenichi DOI, Akinobu KATAORI, Katsuyuki MURAKI, Takashi ISHIDA, Akira OUCHIDA, Kenji HORIOKA
(East Japan Railway Company)

Under the critical condition of the wheel climb derailment, the contact points position between wheels and rails are said to seriously affect the possibility of the derailment. However, only the position in the rail longitudinal direction from the center of wheel has been made clear, and that on the wheel flange in the wheel-radial direction has not been made clear yet, though it practically governs the allowance of the derailment. The authors proposed a method to precisely investigate the position by a geometrical method using a computer. The results of the investigation were described in the paper.

Keywords: derailment, contact point position, wheel lift-up value, attack angle, flange

1. はじめに

車両が急曲線部を走行する際、車輪・レール間の接触点位置が車輪半径方向で見てフランジ先端部からどの程度の位置にあるかを明らかにすることは、脱線の危険性を定量的に評価するために不可欠である。しかし、これについての研究はこれまでほとんど行われていない。接触点の位置は、軌道の曲線半径、レール頭頂部や車輪踏面の形状、アタック角、及び車輪のレールからのせり上がり量に依り多様に変化し、その値を正確に知ることが極めて難しいためである¹⁾。これについては、レール長手方向で見た接触点位置に限って体系的に解明されたにすぎない²⁾³⁾。脱線の可能性をより定量的に評価するためには、当該位置を3次元的に捉える必要があるが、これに関する研究はほとんど行われていない。

このような状況に鑑み、本研究では車輪・レールそれぞれの形状を基に、幾何学的手法により接触点位置を求める手法を示し、併せて、得られた接触点位置に応じた、のり上がり脱線に対する余裕度の評価についての新たな考え方を提案する。

2. 接触点位置を数値計算により簡易的に求める方法

2.1 プロフィールデータの取得

はじめに数値計算により接触点位置を近似的に求める方法を考えた。この方法は、新品形状の車輪・レールはもとより、後述のように、脱線事故が発生した際の調査等において、実測した磨耗形状のプロフィールを用いて接触点を求める際にも有効である。現在は、車輪・レールの断面プロフィールをデジタルデータとして取得する測定器が普及しているが、今回使用した測定器(ミニブルーフ)では、測定点が約0.25mm間隔(隣接する測定点の距離)で数値計算を行う上では粗すぎるため、

0.01mm間隔となるよう線形補間したデータを作成した。

2.2 接触点の探索アルゴリズム

図1に車輪・レールの相対位置関係を示す。なお、本手法ではアタック角は考慮しないものとした。

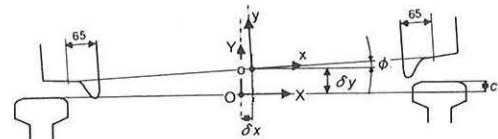


Fig.1 Profile of wheel tread and rail head

車輪、レールのプロフィールは、それぞれ座標系(o-xy), (O-XY)で記述された数値データとして与えられる。ここで、輪軸の軌道に対する相対変位を($\delta x, \delta y, \phi$)で表す。接触点位置は、輪軸の軌道中心からの左右方向の移動量 δx に伴い変化することから、与えられた δx に対して接触状態での $\delta y, \phi$ を数値計算により探索することとする。

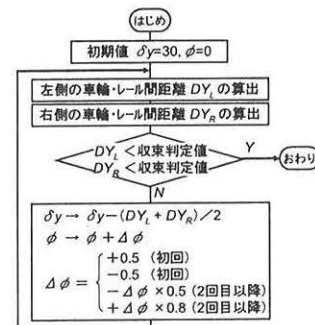


Fig.2 Algorithm for searching of contact points

- ・左右の車輪－レール間の垂直方向の距離の大小関係が変化しない場合、増減幅 $\Delta\phi$ の絶対値を減らして同じ方向に ϕ を変化させ、大小関係が逆転した場合には、 $\Delta\phi$ の正負を反転し、絶対値を半減させる（図5）

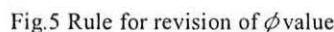
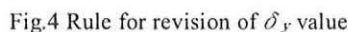
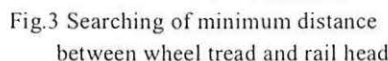
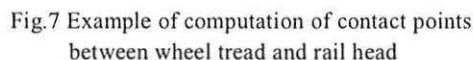
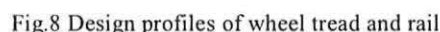


図6は2008年2月に東北本線・尾久駅構内で発生したE531系電車の側線8番分岐器での脱線事故の再現試験の際に、脱線地点のレール断面形状と脱線車両の車輪形状を用いて、接触点位置の計算を行ったものであり、図は接触点がフランジ角度65°の位置に達した場合の計算例を示す。また、図7は輪軸を左右方向に移動させた際の接触点の位置の変化をプロットしたもので、再現

Fig.6 Example of computation of contact points between wheel tread and rail head



まず図8に示すJR在来線車両の標準的な踏面形状である修正円弧踏面を持つ新品輪軸(車輪直径860mm, フランジ角度65°)と、在来線50kgNレールの軌道をモデル化し、次いで外軌の車輪せり上がり量、アタック角を設定した状態で輪軸を配置、移動させ、CADソフトの接触判定機能を用いて接触点位置の座標値を求めることとした。図9にモデルの概念を示す。なおここでは、軌道は直線とし、またレールの小返りは設定していない。



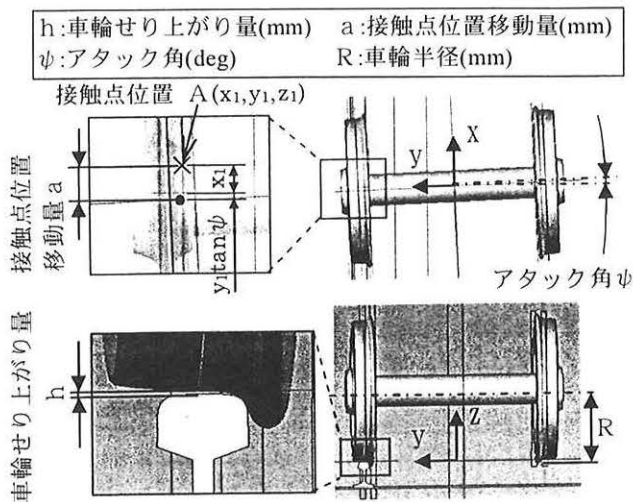


Fig.9 Models of wheel set and rail

ここでは座標原点をレール面上の軌間中心線上に設定し、レール長手方向をx軸、枕木方向をy軸、鉛直上方をz軸とする。この空間上において、以下の手順により接触点位置を求める

- 輪軸一対を、まず輪軸中心が原点直上となるように置き、輪軸中心を回転中心としてアタック角 ψ 分だけ水平に回転(図9で反時計回り方向)させる
- 図9で見て左側車輪の路面(輪軸一対の中心線からの距離560mm)の車軸直下の点をレール面より車輪せり上がり量 h だけ上昇させ、右側の車輪は路面をレール面上に拘束させる
- この状態で、輪軸全体を図9の水平左方向に車軸中心の延長線方向に移動させ、CADソフトの接触判定機能を用い、左側レールと左側車輪が最初に接触する点を接触点位置として求める
- ψ , h を変化させ、i)～iii)を繰り返す

このようにして求められる接触点位置の座標値を $A(x_1, y_1, z_1)$ と置く。この接触点位置は、アタック角 $\psi=0^\circ$ のときには車軸直下にあるが、 $\psi>0^\circ$ では一般的にレール長手方向の前方に移動する(図9左上)。この移動量を a とすると、

$$a = x_1 + y_1 \cdot \tan \psi \quad \text{①} \quad \text{により求めることができる。}$$

3.2 解析結果

アタック角 ψ 、車輪せり上がり量 h を変化させて接触点位置座標を求め、この座標値から式①により接触点位置移動量 a を求めた。 a , h および ψ の関係を図10にグラフで示す。

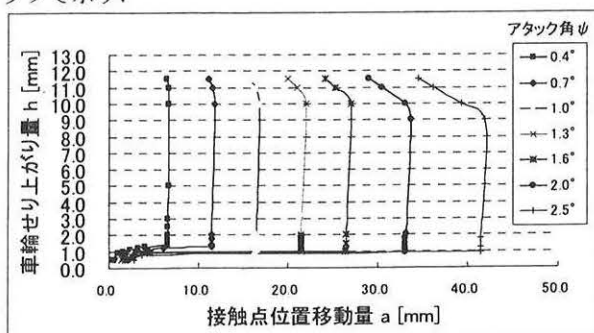


Fig.10 The relationship between the contact point position and wheel lift-up value (various attack angle)

図10より、接触点位置移動量 a は車輪せり上がり量 h に応じて変化する、アタック角 ψ が大きいほど大きくなる傾向があることが分かる。この傾向は、若林ら²⁾が模型実験により示したものと同様である。またアタック角により若干の差はあるものの、車輪せり上がり量が0.5mm～1.5mm程度の間で急激に接触点位置が移動し、それ以上の範囲では微増となっている。このことは、アタック角を生じている場合には、わずかな車輪せり上がり量で、接触点位置がフランジ角度 65° の部分に移動することを示している。

4. 考察

4.1 接触点位置と脱線に対する余裕度の考え方

3.2項で述べたような、輪軸がアタック角を生じた状態で接触点位置がレール長手方向に移動している場合、のり上がり脱線の挙動はこの接触点を中心としてのり上がりやすがり下がりを起こしていることが知られている⁴⁾。

一方、車輪半径方向に見ての車軸中心から接触点までの距離は、車軸直下にある場合と比較してより車輪フランジ先端に近い場所であり、その分だけ脱線に対する余裕度は少なくなっていると考えられる。この点について以下に考察する。

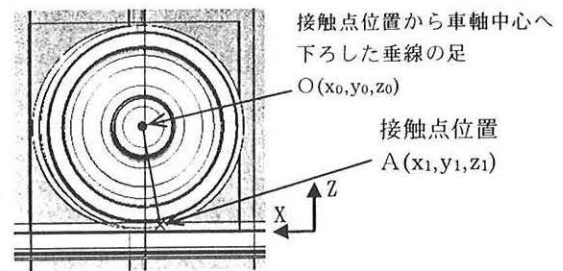


Fig.11 Distance from axle center to contact point

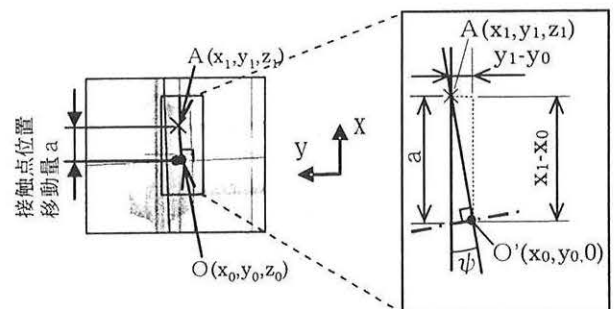


Fig.12 Close up near the contact point

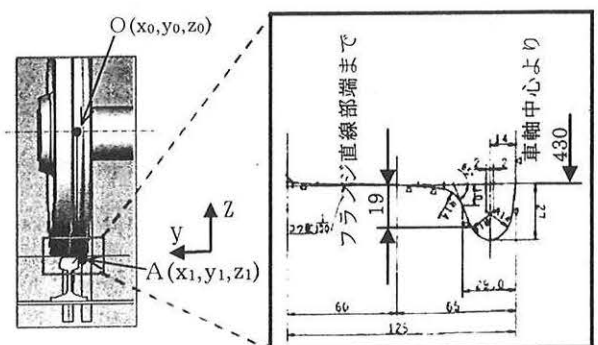


Fig.13 Close up of wheel tread

図11より、車輪半径方向に見ての車軸中心から接触点までの距離は、

$$\overline{OA} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad \cdots \quad (2)$$

で与えられる。

また、図 11, 12 より

$$x_1 - x_0 = a \cdot \cos \psi \cos \psi \quad \cdots \quad (3)$$

$$y_1 - y_0 = a \cdot \cos \psi \sin \psi \quad \cdots \quad (4)$$

$$z_0 = R + h \quad \cdots \quad (5)$$

で与えられるが、 ψ は微小であるので、

$$\cos \psi \approx 1, \sin \psi \approx 0 \text{ となり、}$$

$$(x_1 - x_0)^2 \approx a^2 \quad \cdots \quad (3')$$

$$(y_1 - y_0)^2 \approx 0 \quad \cdots \quad (4')$$

とおくことができる。

式(3'), (4'), (5)を式(2)に代入すれば車軸中心から接触点までの距離 $\overline{OA}$ を求めることができる。

ここで、図 13 より、フランジ角度 65° (直線) 部の車輪縁寄りの末端は、車軸中心から車輪半径方向に見ての距離 $430+19=449\text{mm}$ の位置であることが分かるが、接触点位置がこの位置のよりもフランジ外周寄りになると、もはやフランジ角度は円弧状に緩くなるのみで、脱線に対する歯止めが無くなった状態と考えられる。そこで、接触点 A からこのフランジ角度 65° 部末端までの車輪半径方向の距離を「フランジ裕長 m 」と定義する。このフランジ裕長 m の値は、車輪とフランジが実際に接触している位置に着目して、その状態の車輪が脱線に対してどの程度余裕度があるのかを示す指標と考えることができる。図 13 のような修正円弧踏面の場合には、式で表せば、

$$m = 449 - \overline{OA} \quad \cdots \quad (6)$$

と表すことができる。

式(2), (6)により求めたフランジ裕長 m と、アタック角 ψ 、車輪せり上がり量 h の関係を図 14 にグラフで示す。

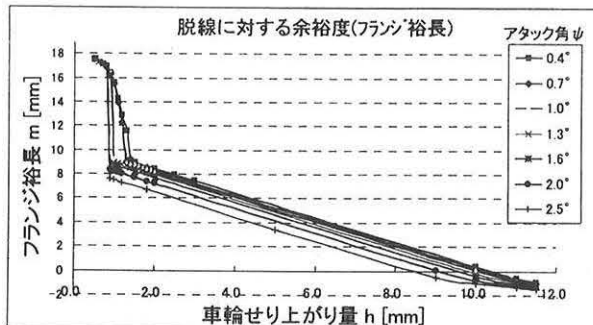


Fig.14 The relationship between the flange-margin(m) and wheel lift-up value (various attack angle)

図 13 から、アタック角のない状態では車輪せり上がり量 19mm までフランジ部の余裕があるように考えられるが、図 14 から、アタック角のある状態ではこの余裕度は差し引いて考える必要があり、例えばアタック角 $\psi = 1.0^\circ$ の状態では車輪せり上がり量 $h=10\text{mm}$ でフランジ裕長 m はほぼ 0 となり、実車ではそのまま脱線に至る状態であると考えられる。

従前に行われた研究で佐藤ら⁴⁾はレール長手方向で見た接触点位置は、車輪ののり上がり速度に支配的な影響を及ぼすことに鑑み、のり上がり脱線防止のために著大脱線係数については持続時間や持続距離も考慮して管理すべきことを提案している。一方、脱線防止のためには車輪半径方向から見た接触点も併せて論ずることが必要であることは、「日本国有鉄道構造規程及び解説」(日本国有鉄道建設規程調査委員会編、1959-10) などによって昔から周知であるにも関わらず、これについては測定が

困難であることから、これまでほとんど言及されていない。

本稿の提案は、測定可能な物理量であるアタック角と車輪せり上がり量から、この車輪半径方向の接触点位置を導出可能な方法であり、実際の車輪・レール間の挙動に立脚した実質的なのり上がり脱線に対する安全性について新たな指標を与えることが期待できる。

5. 結論

のり上がり脱線防止のために解明することが不可欠とされながら不明とされてきた、急曲線走行時の車輪半径方向から見た車輪・レール間の接触点位置などについて、これを幾何学的手法で求める概念を提案するとともに、この概念に基づいた手法で計算や解析を行って実際に接触点位置を求めた結果、以下のようなことが分かった

- 1) アタック角が未知の場合でも、車輪踏面の鉛直方向変位量と車輪、レールのプロフィールから数値計算により接触点位置を求められることが確認できた
- 2) 車輪せり上がり量とレール長手方向の接触点位置移動量の関係については、若林らの模型実験によるものと同様の傾向があることが確認できた
- 3) 接触点位置について、3次元的に見た位置と、車輪半径方向でのフランジ直線部末端までの距離(フランジ裕長)を明らかにすることができた
- 4) フランジ裕長については、アタック角の存在により車輪断面方向のみで見た場合よりも少なくなることが分かった
- 5) フランジ裕長が脱線に対する余裕度に支配的な影響を及ぼすことを鑑みれば、今後の脱線に対する安全性評価について、この点も考慮する必要があると考えられる

6. 今後の課題

今回は幾何学的手法により車輪・レールの接触点位置を求めたが、実際の車輪やレールは弾性体であるため、弾性変形により接触部は「点」ではなく「面」となる。

この影響について、今後模型実験による手法も用いて車輪・レールの接触点位置についての解析を深度化する予定である。そして脱線に対する安全性評価について、得られた接触点位置を基に「理論ののり上がり量」を求め、のり上がり脱線に対する安全性評価の手法について研究を進めてゆく。

参考文献

- 1) 金原弘道, 藤岡健彦: 鉄道車両のレール/車輪間接触位置測定方法に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), 67 巻 654 号, pp.483-490, 2001.
- 2) 若林雄介, 坂原洋行, 平間淳司, 永瀬和彦: 低速域におけるのり上がり脱線現象解明の一研究(第2報, レール・車輪間の接触点位置測定), 日本機械学会論文集 (C編), 67 巻 659 号, pp.168-173, 2001.
- 3) 須田義大, 仁科穰, 小峰久直, 林世彬, 辻隆史, 宮本岳史, 土井久代, 陳樺, 杉山博之, 谷井良充: 急曲線における非線形接触状態を考慮した車輪/レールの接触幾何実験, 第 15 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-Rail2008)講演論文集, pp.547-550, 2008.
- 4) 佐藤祐, 橋弘矩, 若林雄介, 永瀬和彦: 低速域におけるのり上がり脱線現象解明の一研究(第3報, 車輪乗り上がり量の算出方法), 日本機械学会論文集 (C編), 73 巻 725 号, pp.59-65, 2007.