

1111 低速のり上がり脱線の根絶を目指して

第4報 のり上がり脱線に至る途上における車輪の挙動

○日沖 由理香, 正【機】 加藤 幸夫, 正【土】 田村 大輔, 飯島 仁, 堀岡 健司

(東日本旅客鉄道株式会社)

正【機】 永瀬 和彦 (金沢工業大学)

A Study to Prevent the Wheel-Climb Derailment on the Low Speed Ranges

～The 4th Report. Behavior of the Wheel in the Course of the Derailment.～

Yuriko HIOKI, Yukio KATOH, Daisuke TAMURA, Hitoshi IJIMA, Kenji HORIOKA,

East Japan Railway Company

Kazuhiko NAGASE, Kanazawa Institute of Technology

To establish the safety criterion for the prevent of “the wheel climb derailment”, which occasionally occurs when trains pass on sharp curve tracks with low speed, the authors made several studies and the results were reported on the J-Rail 2010 and 2011. To make clear the μ between the rail and the wheel, it is considered to be indispensable to precisely investigate the behavior of the wheel on the cause of the derailment. They conducted test runs using practical EMUs on an experimental sharp curve track. Such factors as the attack angle, the contact point position between the wheel and the wheel lift-up value were investigated on the site. As the results in the investigations, they found that the wheel climb-up and wheel slipping-dawn phenomena were simultaneously observed on the cause of the derailment.

Keywords : coefficient of friction, flange climb derailment, running safety, curve negotiation, running test

1. はじめに

低速域におけるのり上がり脱線防止のため、営団地下鉄日比谷線事故¹⁾の発生以降、多くの対策がとられてきたが、未だにこれを根絶するには至っていない。原因の一つは、脱線に支配的な影響を及ぼすとされる車輪フランジ・レール間の摩擦係数 μ および接触点位置並びに車輪の上昇およびアタック角などの挙動が十分に解明されていないことにある。

東日本旅客鉄道株式会社(以下「当社」という)では尾久駅構内 8 番片開分岐器上で起きた脱線事故²⁾を期に、これについての研究を継続的に進めてきた。事故の直後に、同一箇所でも再現実験を行なった結果、脱線係数 Q/P が大きな値をとらない場合でも車輪が上昇し得ること、削正直後の車輪を繰り返し走行させると車輪フランジ・レール間の接触面が荒損して多量の金属摩耗分が発生すると共に、摩擦係数が通常より大幅に高い値をとると推定されることなどを明らかにした³⁾。次いで、それまではレール長手方向だけの位置での解明に留まっていた車輪フランジ・レール間の詳細な接触点位置を、2 次平面及び 3 次元空間の位置で求める手法を提案した⁴⁾。さらに、従前は至難とされていた走行中のアタック角及び車輪上昇量を精度よく連続測定できる装置を試作するとともに、これを実車に装着し、本線でこれらの値を正確に測定できることを確認した⁵⁾。

これらの研究を踏まえ、2011 年度には当社内に急曲線の実験線を整備し、前記の研究で得た手法を用いて内軌

側の輪重 P と横圧 Q との比 κ の挙動を調べた。その結果、レール近傍の湿度が κ に深く関与することを確認した⁶⁾。しかし、急曲線通過時の車輪の上昇および μ の挙動などを充分解明するには至らなかった。

今回も同じ実験線を用いて走行実験を行い、その結果、車輪がフランジに連続接触しつつ走行する状況のもとで、様々なデータの収集を行うことができた。本報では特に、今まで不明とされてきた、車輪がどのようにのり上がっていくのか、その挙動を鉛直方向の車輪上昇量の測定値から求めることとした。以下には、これらの研究成果について述べる。

2. 車輪ののり上がりとすべり下がり現象

急曲線を車輪がアタック角を生じながらフランジ接触状態で走行しているとき、車輪フランジ・レール間の接触点位置は車軸中心からレール長手方向で見て前方に移動する。佐藤ら⁷⁾は車輪がこの接触点位置を支点として回転運動し、すべり下がることなく車輪全体が鉛直上方に上昇する場合の車輪上昇量を「理論のり上がり量」と論じた。しかし、その過程での接触点位置は 1 次元で捉えたに留まるものであった。その後、土井ら⁸⁾は幾何学的手法を用いた 3 次元空間および実物大模型を用いて接触点を求め、それを元に理論のり上がり量を求めた。本報では、その理論のり上がり量を用いる。

車輪が接触点位置を支点として連続してのり上がるのか、ある程度のすべりを併発しながらのり上がるのかの

評価は、脱線を論ずるに重要な指針である。接触点を支点に、車輪が何れの方向にもすべり下がることなく継続してのり上がった場合の理論のり上がり量を、走行距離で除したものを「理論のり上がり率」と定義した。

3. 実験装置

3.1 実験線と実験車両

走行実験は、本論第3報で述べた実験線及び実験車両を使用し行った。実験線の概要を図1に示す。

また、実験車両には軸はり式のボルスタレス台車を装備した車両を使用し、軌道モーターでけん引することで走行させた。輪重横圧測定用輪軸（以下、PQ軸という）は走行方向第一軸に装着した。

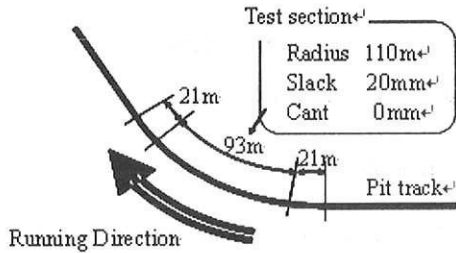


Fig.1 Outline of the test track

3.2 車輪上昇量測定装置

車輪上昇量測定装置は、本論第2報で報告したアタック角測定装置と一体型となっており、PQ軸外軌側に取り付けてデータの測定を行った。写真を図2に示す。

測定器は軸箱体に固定した治具にレーザ変位計を取り付け、レール頭頂面に照射したレーザ光の反射光を取得することで、車輪上昇量を測定する。レーザ変位計には、照射機能にCCDを使用したタイプを用いた⁹⁾。

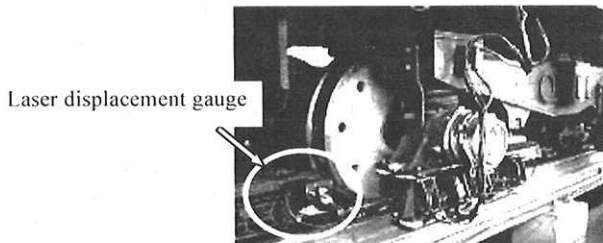


Fig.2 The measurement equipment for wheel lift-up value

4. 実験方法

走行実験は、過去にのり上がり脱線が発生している湿度が低い季節を選び、2012年1月から3月にかけて実施した。軌道モーターで実験車両をけん引し、1日平均30往復程度、延べ20日間行った。走行速度は15km/h以下とした。

のり上がり状態を再現するため、車両の空気ばね高さ調整および軸ばねライナーの挿入により、20~60%の輪重アンバランスを意図的に付加し、脱線係数の設定を行った。

5. 実験結果及び考察

5.1 車輪上昇状態の再現

これまでの研究成果より、のり上がりが起こりやすい条件を特定していたため、その条件を揃えて繰返し走行を行うことで、比較的小さな脱線係数で車輪踏面がレール

頭頂面から浮き上がる状態（以下、車輪上昇状態という）を再現することができた。

走行実験では、図3のように円曲線区間において外軌側車輪がレールとフランジ接触し、車輪上昇状態で走行する様子や、フランジ先端がレール頭頂面にのり上がる、車輪のり上がり状態をとらえることができた。

例として、第一軸外軌側車輪の車輪上昇量データを図4に示す。横軸は走行距離、縦軸は車輪上昇量およびアタック角を表しており、アタック角が大きくなるにつれて、車輪がのり上がりを開始する様子が分かる。また、アタック角は円曲線内ではほぼ 1.0° であり、これは全試番に共通であった。

以降、車輪上昇量が大きくなる挙動を「のり上がり」、車輪上昇量が小さくなることを「すべり下がり」という。

本報では、図4中、①の領域の、車輪が上昇し続ける部分に注目し、車輪のり上がり挙動について分析を行った。②の領域の分析は第5報で論じる。



Fig.3 Wheel climb-up phenomena (pictured by CCD)

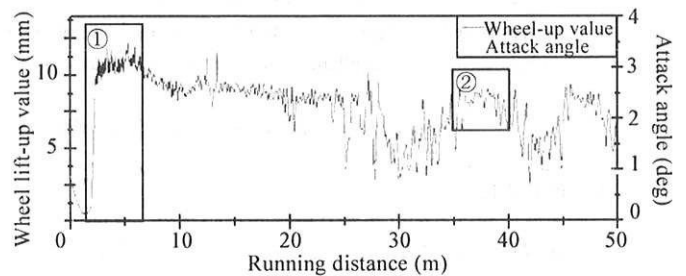


Fig.4 The wheel lift-up value and the attack angle

5.2 車輪上昇量の測定結果と理論のり上がり率

図4①の領域について、走行実験初日・二日目各試番の車輪上昇量を図5に示す。実験開始時のデータを選択したのは、フランジに摩耗が生じる前の挙動を見るためである。あわせて、理論のり上がり量を同じグラフに点線で示す。

のり上がり脱線に至る過程では、車輪とレールとの接触点の摩擦係数が増大した状態で、接触点を支点に車輪が継続してのり上がる現象が起こるとされてきた。しかし、図5から明らかなように、実際の車輪上昇量は、理論のり上がり量には達しないことが分かった。

そこで、この車輪とレールの接触点における挙動を評価するために、理論のり上がり率に対する、実測のり上がり率を求めた。

実測のり上がり率とは、今回の走行実験で求めた車輪上昇量を、実測の走行距離で除したものである。

図5の車輪上昇データから、実測のり上がり率を求め、理論のり上がり率との比をとったものを図6に示す。理論のり上がり率どおりののり上がりは一切起こっていないことがわかる。よって、車輪は、レールとの接触点においては常にすべり下がりしており、しかし車輪全体としてはのり上がる挙動を示すことが分かった。

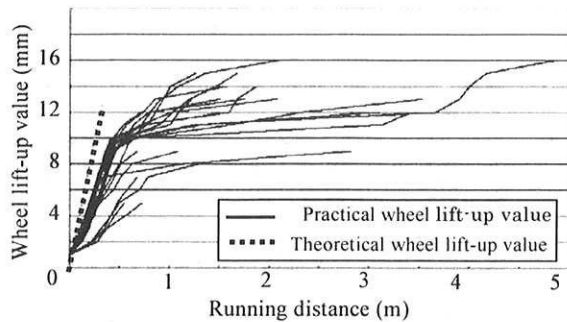


Fig.5 Practical and Theoretical wheel lift-up value

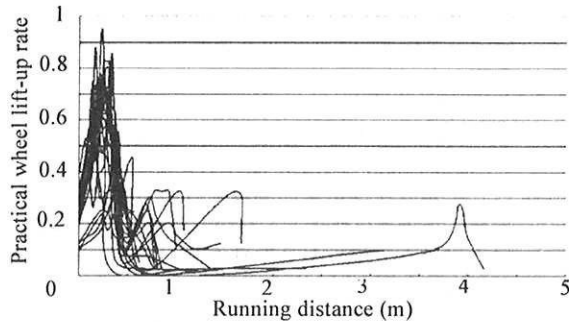


Fig.6 Practical wheel lift-up rate
(Proportion to theoretical wheel lift-up rate)

5.3 すべり率による現象の評価

前項より、のり上がり脱線にいたる過程でののり上がり量は、接触点を支点に車輪が継続してのり上がる、理論ののり上がり量には及ばないことがわかった。このことから、車輪上昇時の車輪・レール間の接触点におけるすべり運動に生じる摩擦力（摩擦係数 μ ）を、低速ののり上がり脱線を起こす最大の要因として解明すべきであると考えた。そこで、車輪・レール間の接触点におけるすべり運動と摩擦力の分析を行うこととした。

これまで、車輪・レール間のすべり率と粘着力には関連のあることが知られている。すべりには空転すべりと滑走すべりとがあるが、この場合は空転すべりの範疇にあると思われるので、すべり率は下記のように示される。

$$\text{すべり率} \eta = \frac{(Vn - V)}{Vn} \times 100 \quad [\%] \quad \dots\dots\dots (1)$$

Vn : 車輪の周速度, V : 車両の速度

(1)式は通常、高速走行時の車輪踏面とレール間のすべりを表す。車輪上昇しながら低速走行する列車における、車輪フランジ・レール間のすべりに適用できるのか、検討を行うこととした。

図7に、車輪フランジ・レール間の接触点におけるすべりをモデル化したものを示す。実際にはまくら木方向にもすべりがあるが、ここでは車輪上昇方向と車輪回転方向の二次元の力を考えることとする。また、接触領域の中心を接触点とする。図7のように、レール長手方向のすべりを $\vec{x}$ 、車輪鉛直方向のすべりを $\vec{z}$ とし、それらを合成したすべりを $\vec{x} + \vec{z}$ とする。

図8に本実験と同じような走行をした車輪の、フランジ部摩耗状態の写真を示す。 $\vec{x} + \vec{z}$ 方向に摩耗しており、 $\vec{x} + \vec{z}$ 方向にすべりが生じていることがわかる。しかし、 $\vec{x} + \vec{z}$ 方向のすべり率を求めるのは困難である。また、の

り上がりに関係するのは鉛直方向のすべり $\vec{z}$ であるので、 $\vec{z}$ について、すべり率を求め、評価を行うこととした。すべり率は以下の式で求める。

$$\text{鉛直方向すべり率} \eta_z = \frac{Vn_z - V_{sz}}{Vn_z} \times 100 \quad [\%] \quad \dots (2)$$

$\vec{z}$ 方向のすべり速度

$$V_{sz} = V \times (\text{理論のり上がり率} - \text{実測のり上がり率}) \quad [\text{km/h}] \quad \dots (3)$$

Vn_z : 車輪の周速度の $\vec{z}$ 方向成分

V_{sz} : $\vec{z}$ 方向すべり速度

以上より鉛直方向すべり率 η_z を横軸に、縦軸にはナダル式から求められる、横クリープ力/法線力(以下 f_y/N と表す)をプロットしたものを図9に示す。

図9より、すべり率と f_y/N には明確な関係は示されないことが分かった。

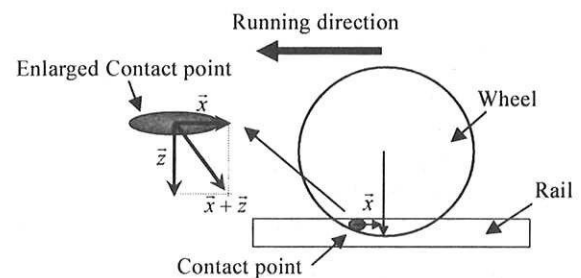


Fig.7 The definition of the slip at contact point

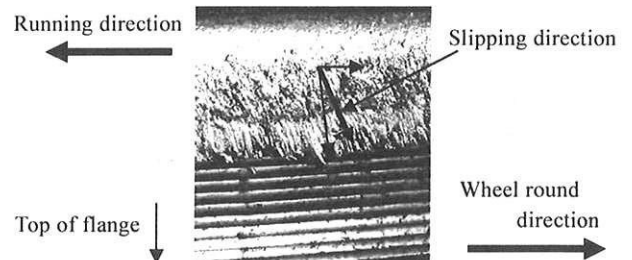


Fig.8 A picture of attrition of flange

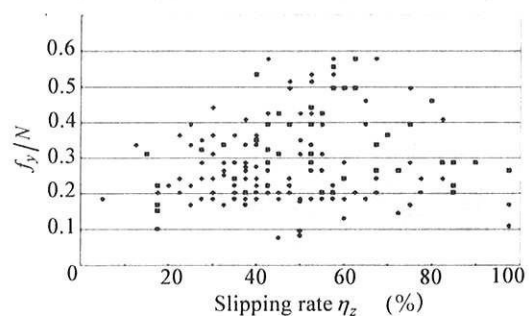


Fig.9 Slipping rate and f_y/N

5.4 すべり速度によるすべり評価方法の定義と考察

すべり率が大きい領域ですべりを評価するとき、相対速度で表す場合がある。そこで、すべり速度での評価方法について検討することとした。すべり速度は、図7における $\vec{x} + \vec{z}$ 方向についても求めることが可能なため、接

触点のすべり方向である $\bar{x}+\bar{z}$ 方向のすべり速度 $V_{S(X+Z)}$ と f_y/N の関係を求め、図 10 に示した。

すべり速度は以下の式を用いた。また、 $\bar{x}$ の値は土井ら¹⁰⁾が求めたものを使用した。

$$\bar{x}+\bar{z} \text{ 方向のすべり速度} \\ V_S(x+z) = \frac{\sqrt{|\bar{x}|^2 + |\bar{z}|^2}}{|\bar{z}|} \times V_{SZ} \quad [\text{km/h}] \quad \cdots(4)$$

図 10 より、すべり速度 $V_{S(X+Z)}$ と f_y/N が相関を持っている様子が表され、静摩擦である微小すべり領域があることと、動摩擦である巨視すべり領域で f_y/N が収束する様子が分かる。しかし、本実験では $\bar{x}$ 方向のすべりの測定は行っていないため、鉛直方向 $\bar{z}$ のすべり速度 V_{SZ} と f_y/N の関係で代用することを考えた。そのグラフを、図 11 に示す。すべり速度は少し低い領域となるが、 f_y/N の極大値、微小すべりと巨視すべりの境目、さらに f_y/N の収束値を知ることができる。

この図 11 より、鉛直方向のすべり速度 0.1km/h 以上は巨視すべりであることが言える。すなわち、車輪上昇状態のまま走行する場合、接触点における挙動の大部分が巨視すべり領域にある。

また、走行実験中は大量の大きな摩耗粉が出たことや、車輪フランジの表面が鏡面状になったこと等から、車輪・レール間では、凝着摩耗が起きていることも考えられる。凝着摩耗が起きているとすると、のり上がり、すべり下りの挙動にはせん断力の大きさが関係している可能性があり、今後はその現象解明に向け、車輪の挙動の分析を行いたいと考えている。

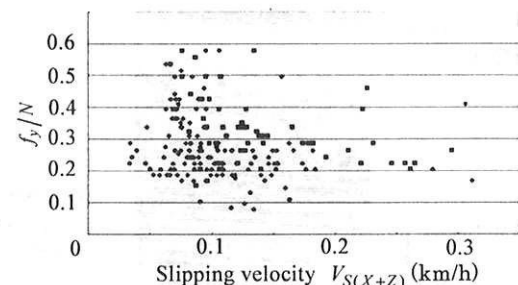


Fig.10 Slipping velocity $V_{S(X+Z)}$ and f_y/N

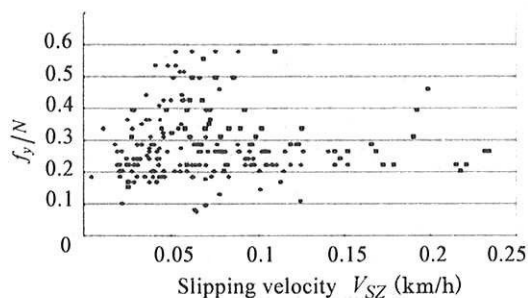


Fig.11 Slipping velocity V_{SZ} and f_y/N

6. 結論

のり上がり脱線現象解明のために、実車を急曲線の軌道を繰り返し低速で走行させ、脱線に至る過程を調べる実験を行なった結果、以下のようなことがわかった。

1. のり上がり脱線にいたる車輪の挙動（実測のり上がり率）は、接触点を支点に継続してのり上がる場合ののり上がり量（理論のり上がり率）に達しないことを確認した。
2. のり上がり脱線に至る過程でレールと車輪の接触点は常にすべり現象を併発しながらのり上がる挙動を示すことを確認した。
3. 前記の状況の下におけるすべり現象は、巨視すべり現象であり、すべり速度により評価する新たな手法を提案した。
4. のり上がり脱線に至る過程でのすべり現象は、粘着係数と同様に微小すべりと巨視すべり領域があることが分かった。
5. 最大静止摩擦係数と考えられる微小すべりと巨視すべりの境界付近のすべり速度では、 f_y/N が 0.6 程度と大きな値となった。
6. 本実験におけるレールと車輪との接触点におけるすべりはほとんどが巨視すべり領域であることから、接触点周辺の面圧が極めて著大であり、さらに、のり上がり脱線発生の過程では多量の金属摩耗粉の発生が認められたことを踏まえれば、本実験における接触点の場は凝着摩耗が起きている可能性が否定できない。

本研究の結果より、フランジ接触状態の車輪はのり上がっている時でもすべり下りを併発していることがわかったが、このすべりを生じさせる原因が不明であるため、今後は車輪すべり下りのメカニズム解明を行っていきたい。著者らは、車輪のすべり下りは車輪・レール間での凝着摩耗が発生し、凝着を切るためのせん断力が関係していると考えているが、この点に関し、今後の走行実験結果等を通じて検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 帝都高速度交通営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書，事故調査検討会，2000
- 2) 東北線尾久駅構内脱線事故，鉄道事故調査報告書，運輸安全委員会，2008
- 3) 片折，土井，飯島，桃崎，松本：のり上がり脱線の根絶を目指して－第1報－，第16回 J-rail 講演論文集，pp729-732，2009
- 4) 土井，片折，村木，石田，大内田，堀岡：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，第16回 J-rail 講演論文集，pp685-688，2009
- 5) 片折，土井，飯島，桃崎，堀岡：のり上がり脱線の根絶を目指して－第2報－，第17回 J-rail 講演論文集，pp621-624，2010
- 6) 加藤，片折，米沢，田村，飯島，堀岡：のり上がり脱線の根絶を目指して－第3報－，第18回 J-rail 講演論文集，pp.189-190，2011
- 7) 佐藤，橋，若林，永瀬：低速域における乗り上がり脱線現象解明の一研究（第3報），日本機械学会論文集（C編），73巻725号，pp59-pp65，2007
- 8) 土井，飯島，片折，桃崎，堀岡：実物大模型による車輪・レール間の接触点位置とのり上がり脱線に対する余裕度評価，第17回 J-rail 講演論文集，pp613-616，2010
- 9) 今田，村木，飯島，土井，桃崎，片折，松本：低速走行時の車輪上昇量の連続的測定に関する基礎的検証，第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム，pp.523-526，2008
- 10) 土井，永瀬：アタック角が付与された車輪フランジとレールとの接触面を3次元の場で捉えるための一研究，2012J-rail