

1112 低速のり上がり脱線の根絶を目指して

第5報 脱線に深く関与する摩擦係数を求める手法とその手法により求めた結果

○飯島 仁 正 [機] 上井 賢一 正 [機] 加藤 幸夫 正 [土] 田村 大輔

日沖 由理香 堀岡 健司 (JR東日本)

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

～The 5th Report. A Study on the Coefficient Friction Profoundly Influenced on the Wheel-Climb Derailment and the Result Gained by the Study.～

Hitoshi IJIMA, East Japan Railway Company. 2-479, Nishin-cho, Kitaku-Saitama City
Ken-ichi DOI, Yukio KATOH, Daisuke TAMURA, Yuriko HIOKI, Kenji HORIOKA.

The wheel-climb derailment, which occasionally occurs at a low-speed range, is considered to be profoundly influenced by the friction coefficient between the wheel flange and the rail. However, the coefficient is so variously changed by the surface condition of a wheel and a rail, the atmospheric condition around the rail tread and the wheel passing frequency on the rail, and it is also deemed to be so hard to directly measure the coefficient that the process of the derailment have not been made clear yet. To measure the coefficient, several experiments were done and the wheel-climb derailments were really actualized by the authors using a practical EMUs which equipped with newly lathed wheels. On the cause of the experiments, the EMUs were repeatedly operated on the sharp curve track and such value as the derailment-coefficient, the attack angle of the wheel to the rail and the wheel lift-up value from the rail was continuously measured under the critical wheel-climb condition. The results of the experiments were reported in the paper.

Keywords : adhesive friction, coefficient of friction, Nadal limit, wheel climb derailment

1. はじめに

のり上がり脱線には車輪フランジとレール間の摩擦係数(以下「 μ 」)が深く関与するとされているにも関わらず、この値の実測は至難とされ、近年、特殊な条件での模型実験により、その一部が明らかにされたに過ぎない¹⁾。

2008年2月にJR東日本尾久駅構内の側線用8番分岐器リード部で脱線事故が発生した²⁾。調査の結果、車輪を削正してから間もない車両が、急曲線部や分岐器のリード部を繰り返し走行することで、車輪・レール双方の表面が摩耗し、表面の不純物が剥落し金属面同士が接触し μ を増大させ限界脱線係数が低下することが主因と考えたが、この調査の過程で正確な μ を把握することはできなかった³⁾。脱線に対する安全性を評価するには、限界脱線係数の最小値を把握する必要がある、 μ が尾久駅構内での脱線事故と同じような条件でどの程度まで大きくなるか明らかにしなくてはならない。

前記の μ の値を明らかにするため、実車による実験を行った。その結果、車輪削正後の車両が繰り返し走行すると、接触面に多量の金属摩耗粉が発生して凝着摩耗⁴⁾とも想定される状態が発生した。そのような条件の下で車輪に連続的なり上がり現象が発生したので、その下における μ を測定したところ、値は走行を重ねるに連れて増大することを確認した。

2. 実験装置および実験方法

円曲線(半径110m)の区間を実験用車両(ボルスタレス台車の標準的な通勤電車の付随車)を使用し、モーターカーによる牽引で繰返し走行を行った。走行実験は、過去にのり上がり脱線が多く発生している乾燥している季節である1月から3月に行った。詳細は第4報(のり上がり脱線に至る途上における車輪の挙動)と同様であるので省略する。

2.1 測定項目

- (1)車上測定：輪重、横圧、車輪上昇量、アタック角の連続測定
- (2)地上測定：外気温度、湿度、レール温度測定
- (3)車輪とレールの断面形状の測定、車輪およびレールの観察

2-2 条件設定

1両分4軸の車輪を削正し、削正直後の状態から実験を開始した。また、曲線中にフランジ角度 65° の箇所では接触するように輪重アンバランスを設定し脱線係数を変化させた。輪重アンバランスは軸ばねライナーおよび空気ばね高さを調整することにより輪重減少率を最大60%まで設定した。

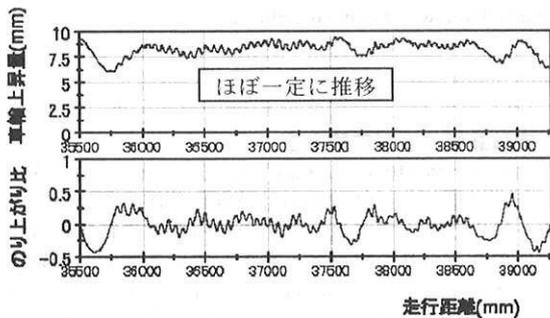
3. 実験結果と考察

3.1 のり上がり挙動について

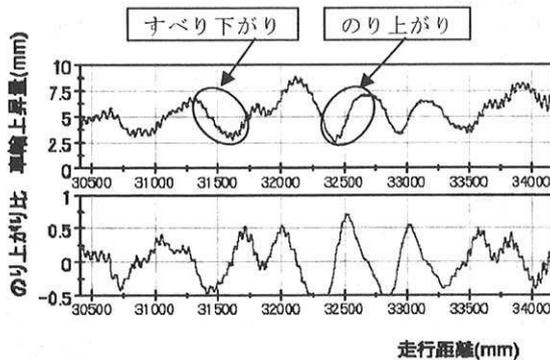
のり上がり脱線に至る過程では、車輪は一定の距離または時間、すべり下がりを起こすことなく継続的にのり上がるものと想定されてきた。しかし、実際には車輪の一方的なのり上がり現象だけが起きるのでなく、多くの場合すべり下がり現象も併発していると推定される⁶⁾、 μ はのり上がり脱線に対する安全性を評価する重要な指標であって、値は臨界脱線状態となった瞬間における輪重および横圧から求めることができる⁷⁾。

本実験でも前記の方法によって、 μ を求める実験を行った。具体的には、フランジ角度が一定の 65° の箇所を臨界脱線状態となるよう輪重アンバランスを設定した。しかし、第4報で報告したとおり、当初の予想を覆して車輪は臨界脱線状態に至ることなく、常にすべりながら脱線に至る挙動を示した。

円曲線を走行中の車輪上昇量の推移を図1に示す、外軌車輪は、図1.a)のように車輪上昇量は2mm程度の変動で、ほぼ一定で推移する場合と、図1.b)のように、5mm程度の比較的大きな変動があり、のり上がりとすべり下がりを繰り返す場合があった。それぞれの下側のグラフは第4報に示した、実測ののり上がり率と理論ののり上がり率の比（以下「のり上がり比」）を示すもので、1のときが理論ののり上がりと一致したのり上がりが発生しているときである、図1.a)ではのり上がり比はほぼ0で推移しておりすべり率は100%となる、図1.b)では最大で0.5程度となっているのですべり率は最小でも50%程度であった。



a) 車輪上昇量がほぼ一定に推移



b) のり上がりとすべり下がりを繰り返す

図1 車輪上昇量の推移

3.2 等価摩擦係数

前項図1.a)のように車輪上昇量がほぼ一定で推移する状態は、図2において接触点での横クリープ力（ μN ）と輪重・横圧により接触点に働く接線方向の力（ $P \sin \alpha - Q \cos \alpha$ ）がつり合った状態である。このとき、車輪は継続的なのり上がりに至らないが、接触面は巨視すべり状態を保持しながらあたかもつり合った状態となっている。

μ を考える場合、微小すべり領域でのクリープ力、巨視すべりになった時の最大静止摩擦力、すべり速度が大きくなってほぼ一定になる動摩擦力の領域に分けることができるが、 μ の最大値は最大静止摩擦力のときである、Nadalの式は、横クリープ力/法線力を等価摩擦係数と定義しクリープ特性により飽和する、これは微小すべり領域での定義であるが、巨視すべり状態であっても、車輪上昇量がほぼ一定で推移している状態は、Nadalの式のつり合い条件を充足したと仮定し、このときの輪重、横圧、フランジ角度より巨視すべり状態の下での摩擦係数（以下これを等価摩擦係数「 μ_e 」）を求めた。

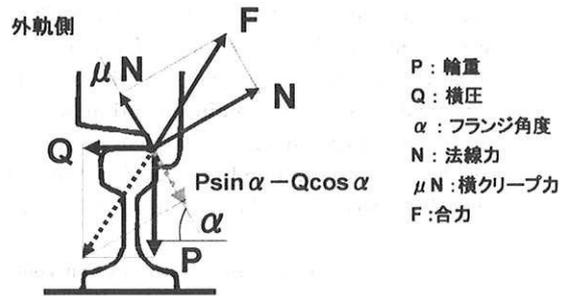


図2 フランジ接触での力のつり合い

3.3 繰返し走行

走行実験中の車輪上昇量と脱線係数を図3に示す、円曲線を走行中に車輪上昇量がほぼ一定であった箇所を測定箇所に選定し、繰返し走行では同一箇所での脱線係数の定常値を測定した。また、円曲線走行中のアタック角はほぼ一定の 1.0° で推移した。

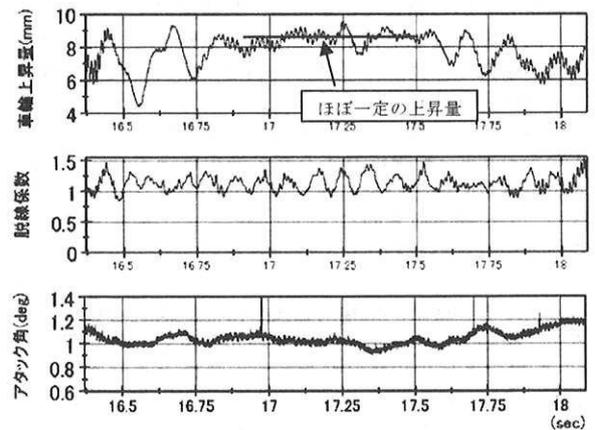


図3 走行実験中の例

繰返し走行による μ_e の推移を図4に示す、車輪フランジの状態を図5に示す。1日目は機器の調整のため輪重アンバランスが小さい条件で走行した後、輪重アンバランスを大きくして車輪上昇する条件で試験を行った、フランジ角度 65° の範囲で全体にバイト目がつぶれ、粗い面となった。その後、経過日数とともに表面の粗さが小さくなり写真右の様に光沢のある状態となった。 μ_e は3日程度までは走行回数に応じ上昇し0.35程度となった、しかし、走行実験初日および2日目は比較的湿度が高く、この変化が繰返しによるものか気温・湿度の変化によるものか明確にすることはできなかった。

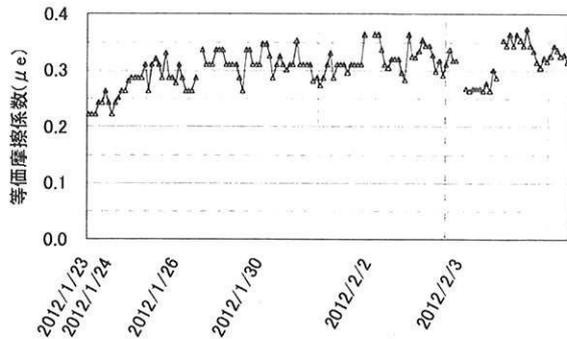
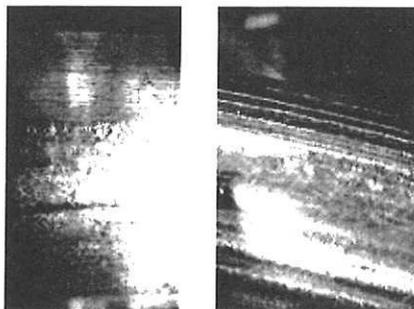


図4 繰返し走行による等価摩擦係数の推移

2008年に実施した尾久駅構内の走行試験では15回の繰返し走行を実施し、写真左と同じような状態となっていた、今回の実験では70回程度の繰返し走行を行った結果、写真右のようなぶい金属光沢のある状態に変化し、さらに合計約500回の走行実験を実施したが表面状態に大きな変化はなかった。車輪削正直後の車両が繰返し走行することにより、車輪およびレールの表面は多くの金属摩耗粉が発生し、凝着摩耗と言われる状態となって、 μ_e が増加したと考えられる。さらに繰返し走行することにより接触面の状態や真実接触面積が変化することによってさらに大きな摩擦係数となると考えられる。



a) 1日目終了時 b) 4日目終了時

図5 車輪フランジの状態

円曲線を走行中の脱線係数と車輪上昇量の関係を図6に示す。車輪上昇量が大きくなると脱線係数が大きくなる結果となった、このままフランジ角度 65° の条件で

μ_e を求めると図7のように車輪上昇量にともない μ_e が減少する結果となった、 μ_e は車輪上昇量に影響しないのではないかと考え、車輪上昇により輪軸がロール方向に変位し接触点の角度が変化することや、縦クリープ力の影響も考えられたが、これらの影響は小さいと考えられ、繰返し走行によりフランジ摩耗の影響があるのではないかと考えた、踏面形状の測定結果よりフランジ角度を求めた結果を図8に示す。

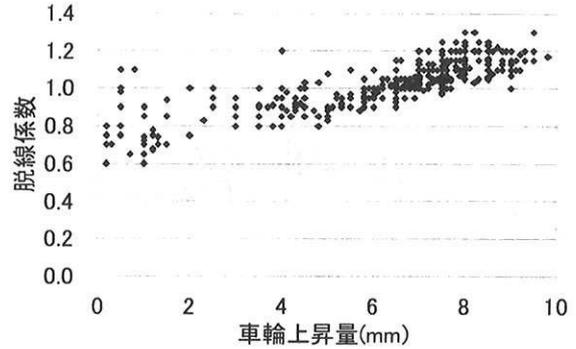


図6 車輪上昇量と脱線係数

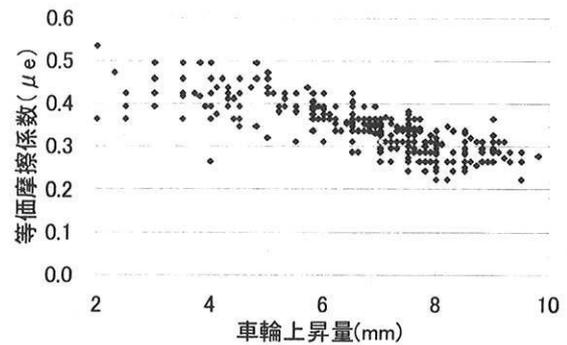


図7 フランジ角度 65° で計算した等価摩擦係数

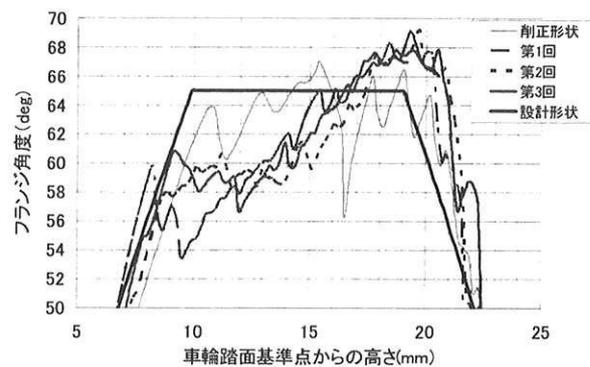


図8 フランジ角度の変化

車輪上昇量が比較的大きい条件で繰返し走行したことによりフランジ咽部はほとんど摩耗せず先端に近い箇所が摩耗したため、このようなフランジ形状に摩耗したと

考えた。そこで、次第に変形を遂げるフランジ形状を逐次測定し、アタック角および車輪上昇量に応じた接触点位置における実際のフランジ角度から Nadal の式を用いて μ_e を求めた、その結果を図 9 に示す。図のように、 μ_e は車輪上昇量にかかわらずほぼ一定の値となった。

μ_e は 0.2 から 0.4 の範囲でばらついており、繰り返し走行や環境の影響があると考えられる、またばらつきには測定誤差も含まれるので標準偏差の $+2\sigma$ を最大値としたところ、 μ_e の最大値はアタック角 1.0° の条件で 0.38 であった。

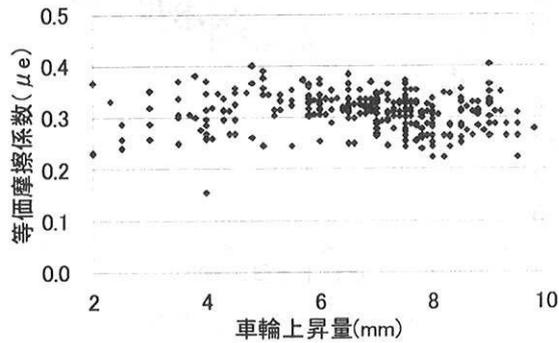


図 9 等価摩擦係数

4. 結論

のり上がり脱線に深く関与するとされる車輪とレールとの接触面の摩擦係数が十分に解明されていないことに鑑み、実車両により急曲線を走行させてのり上がり状態を再現させ、その状態の下において摩擦係数を求める実験を試みた結果、以下の知見を得た。

- (1) 脱線に至らない状態のまま車輪がのり上がりを持続する状態が観測され、この状態の下では第 4 報で述べた如くレールと車輪との接触の場で継続的なすべり現象が発生していることが明らかとなった。
- (2) 上記のような状態で走行を繰り返すと、レール及び車輪接触面は摩耗が進行して光沢を伴った状態となり、多量の金属摩耗分が発生した。この状況の下で接触面のすべり速度は小さくないことを踏まえると、接触面は巨視すべりとなり、凝着摩耗であったと考えられる。
- (3) 本実験の過程で車輪上昇量が一定値を保持しながら巨視すべりの領域で走行している場合、動摩擦係数によって、Nadal の式の等号条件が成り立つと見なして差し支えない状態にあったと想定される。
- (4) この実験の開始直後の μ_e は 0.2 程度であったが繰り返し走行することにより、最大で 0.38 となった。
- (5) μ_e は車輪上昇量に関係なくほぼ一定の範囲内となった。

5. 終わりに

車輪フランジとレール間の摩擦係数について、凝着摩耗による状態を考慮すべき最大の μ_e を把握することができた、今回は既存の急曲線を利用したためアタック角 1.0° のデータのみであったが、今後、実験用軌道の一部を変更して R100 の曲線を設定してアタック角の違いによる μ_e の把握をする予定である。

参考文献

- 1) 永瀬和彦, 橋弘矩: 低速域における乗り上がり脱線防止のための一提案, 日本機械学会論文集 (C編), 74 巻 744 号, pp.1938-1947, 2008
- 2) 運輸安全委員会: 鉄道事故調査報告書, 東北線尾久駅構内列車脱線事故, 2008
- 3) 片折暁伸, 土井賢一, 飯島仁, 桃崎秀二, 松本重夫: のり上がり脱線の根絶を目指して—第 1 報—車輪とレールとの接触面の状態変化が摩擦係数に及ぼす影響, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム, pp.729-732, 2009
- 4) 小原孝則, 大野薫, 大山忠夫: 粘着力を下げずに摩耗を減らす, RRR vol.47No9, pp.9-14, 1990
- 5) 中原綱光: 凝着摩擦の基本メカニズムと摩擦の制御, 第 7 回鉄道技術連合シンポジウム, pp.7-8, 2000
- 6) 永瀬和彦, 坂原洋行, 野村俊明: 低速域における乗り上がり脱線現象解明の一研究—第 1 報—模型実験装置による基礎実験結果, 日本機械学会論文集 (C編), 66 巻 652 号, pp.3880-3887, 2000
- 7) 橋弘矩, 佐藤祐, 牛若聡, 永瀬和彦: 低速域における乗り上がり脱線現象解明の一研究—第 4 報—のり上がり脱線時におけるレール・車輪間の摩擦係数の測定方法とその結果, 日本機械学会論文集 (C編), 73 巻 732 号, pp.2175-2181, 2007