低速域における乗り上がり脱線防止のための一提案*

永瀬和彦^{*1}, 橋弘矩^{*2}

A Proposal for the Preventive Method for the Wheel Climb Derailment

Kazuhiko NAGASE^{*3} and Hironori HASHI^{*3} Office of Industry-University Collaborations, Kanazawa Institute of Technology,
7-1 Ougiga-oka, No-no-ichimachi, Ishikawa-gun, Ishikawa, 921-8501 Japan

The friction coefficient μ on the contact point position between a wheel flange and a rail is said to seriously affect on the occurrence of the wheel-climb derailment. However, the method to quantitatively and exactly evaluate the μ has not suggested until to the present. The authors proposed a method to easily and exactly evaluate the value, and made it clear by an experiment, employing a 1/5 scale model track and model truck. The result obtained through the experiment indicates that the value on dry rails has a similarity with that of the adhesion coefficient, and that the dry rail on the main line keeps the value at high level. Using the μ value obtained by the studies, the risk of the wheel-climb derailment was evaluated. As the result of the evaluation, they found that higher μ value than the conventionally used one should be introduced for the risk evaluation of the derailment, and that very short term lateral force below 60 ms should be observed on the steep curvatures.

Key Words: Railway, Wheel, Rail, Derailment, Coefficient of Friction

1. はじめに

低速で急曲線や番数の小さい分岐器を通過する際に発生する「乗り上がり脱線」は、外軌側の車輪フランジ部がレール側面と接触し、この接触点を中心に車輪が乗り上がる現象である。著者らは1/5縮尺模型を使った実験で、従前不明とされた車輪がレールに乗り上がる際のレールと車輪との接触点位置を明らかにし⁽¹⁾、当該接触点を中心に車輪がレールに乗り上がる量を理論的に求める方法(以下、この方法で求めた値を「理論乗り上がり量」という)を提案した⁽²⁾。次いで、この方法で求めた「理論乗り上がり量」と「車輪が実際にせり上がった量」との差から車輪が「レールに乗り上がる瞬間」および「レールから滑り下がる瞬間」、すなわち、「臨界脱線状態」に陥った瞬間またはその状態が解消した瞬間を特定した。さらに、この時点における車輪とレールとの接触点における力の釣合いから、測定が至難とされたレール・車輪間の摩擦係

数(以下、「 μ 」という)の測定を試みた。その結果、臨界脱線状態のもとにおける μ は粘着係数とほぼ同じ傾向にあることを明らかにした⁽³⁾。

本研究では前記の一連の研究(以下「先の研究」という)で得た知見と最近発生した脱線事故の原因調査報告などを踏まえ、乗り上がり脱線について新たな視点から検討を試みた。具体的には脱線の発生に支配的な影響をもつとされながらもまだ十分に解明されているとはいえない本線上における μ について、著者らが従前の研究で得た知見も交えて値の推定を試みた。さらに、その方法で得た値を用いて、脱線が起りうる可能性などについて検討した。

その結果、従前は等閑視されているケースが多かった短小時間の著大な脱線係数も、脱線に結びつく可能性があることなどを明らかにする。次いで、このような現象によって脱線が起きる事態を防ぐための対策を提言する。

2. 瞬時の著大脱線係数が脱線に及ぼす影響

2・1 従前の脱線係数のしきい値 日本の鉄道で従前から広く使われてきたフランジ角60°程度の車輪では、 μ が0.3程度以上の値をとった場合には脱線係数が0.8を上回るとナダール限界を超える可能性があ

* 原稿受付 2008年1月23日。

^{*1} 正員, フェロー, 金沢工業大学産学連携室(☎921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)。^{*2} 正員, 中村留精密工業(株)(☎920-2195 白山市熱野町口15) [前: 金沢工業大学大学院工学研究科]。

E-mail: nagase@neptune.kanazawa-it.ac.jp

る。このため、乗り上がり脱線の危険性を定量評価する指標として、曲線通過時には外軌側の車輪を「脱線係数 0.8 以下」に保持すべきとの基準が貫用されている。しかし、ナゲル限界をどの程度の長さ(時間)上回ると脱線が起きるか、さらには、ナゲル限界に深く関わる μ については必ずしも十分な解明が行われているとはいえない。

2.2 瞬時の著大脱線係数に関わる問題 ところで、周知のように脱線係数は横圧を輪重で除した値であり、これらは互いに独立して輪軸に作用する。したがって、同じ横圧が持続した状態のもとで瞬時の輪重抜けが発生すれば、輪重抜けが起きた側の車輪の脱線係数はその場に限って急増する。一方、輪重抜けのない場合も、トングレールに入射角がある分岐器⁽⁴⁾および「角折れ」のある継目などを通過する際にも、瞬時に著大横圧が発生して高い脱線係数が短時間観測される場合がある。

このような瞬時の輪重抜けや高い横圧の発生によって短時間生じる高い脱線係数(以下、これを「短小著大脱線係数」という)の対策として、昭和 38 年に貨物列車の脱線により 160 名が死亡した「鶴見事故」を受けて国鉄が制定した「脱線係数の運用基準」⁽⁶⁾がある。その要旨は、ボギー車については 0.8 程度以上の高い脱線係数が 50 ms 以上持続する状況が発生する頻度は 1 分岐器通過ごとまたは 500 m 走行するごとに 1 回以下を当面の安全限度とし、将来は脱線係数の限度を 0.7 以下に引き下げるというものである。しかし、このような持続時間が短い横圧については従前は飛び上がり脱線の範ちゅうに属する問題として論じられる場合が多く、乗り上がり脱線に関わる問題として十分な議論がなされているとはいえない。

その後、平成 12 年に地下鉄日比谷線で起きた脱線事故にかんがみ、乗り上がり脱線防止のための対策と

し推定脱線係数比の守るべき目安を 1.2 以下とし、静止輪重比の限度は 0.9 に留めることが望ましい旨の国の通達がなされている⁽⁶⁾。

2.3 乗り上がり脱線に関する距離 ところで、車両が臨界脱線状態になってから脱線に至るまでの時間はどの程度になるのであろうか。それについて著者らが行った実験で得られた結果を図 1 に示す。

図 1 は、著者らが従前から本研究に継続使用中の曲線半径 100 m、50 N レール使用の軌道と軸距 2.0 m の二軸台車を 1/5 スケールに縮尺した模型の実験装置で行った脱線実験の結果を示す⁽⁷⁾。車輪形状はフランジ角 57.5° でこう配 1/20 の円すい踏面、レールは乾燥状態、脱線係数は約 1.2、車輪がレールに乗り上がってから脱線に至るまでの平均的なアタック角は約 1.3° 程度である。

図 1 の縦第 1 軸には理論乗り上がり量とレール路面からの実測せり上がり量を、縦第 2 軸には脱線係数を、横軸には台車進行距離を示す。

図示のとおり、車輪は図左端で臨界脱線状態に達し、その時点から乗り上がりを継続して脱線するまでの距離(以下、「脱線に要する距離」という)は 80 mm 程度、これを実スケールに換算した距離は約 0.4 m にすぎない。この曲線とほぼ同じ 8 番の片開き分岐器上を制限速度 25 km/h で走行に要する時間はわずか 58 ms 程度である。フランジ角度がより大きい場合には、後述するようにレールと車輪の接触点位置と車輪中心との距離が増大するので⁽⁸⁾、車輪の単位回転量当たりの乗り上がり量も増大し、脱線に要する距離や時間も短縮されることになる。

2.4 短小著大脱線係数発生の実態 前記の事実を踏まえれば、現在は滑り上がり脱線または飛び上がり脱線の範ちゅうに属する現象とみなされているために比較的等閑視されている 50 ms 程度またはそれ以下の短小著大脱線係数についても、より厳格な監視が必要ということになる。しかし、このような瞬時の横圧を車両側で計測するのは容易ではなく、その必要がある場合には地上で測定するケースが多い。

地上で実測した短小著大脱線係数について著者が個人的に得た情報の中には、通常状態に整備された軸距 2 m 程度の台車を装架した車両がトングレールに入射角のある 8 番片開き分岐器に制限速度を遵守して通過した際に、1.0 を大幅に超える脱線係数が実測された事例が少なからず存在する。しかし、これらは残念ながら鉄道内部の情報に留まるものである。最近、公にされたこれに関わる数少ないデータに、意図的に著大な輪重差を設けて急曲線を通過させたときに、脱線係

Fig. 1 Comparison of the theoretical wheel lift-up value and the practical wheel lift-up value (atmosphere temp.: 21°C, humidity: 36%)

数が著大な値をとることを確認した貴重な本線実験⁽⁹⁾が存在する。これとは別に荷重満載のコンテナ貨車が12番片開き分岐器の分岐側を対向して制限速度上限で通過中に、外軌側車輪に通常よりやや高い横圧が発生した状態のもとでローリングによる顕著な輪重抜けが重畳して脱線係数が2.0に近い値になったことなどが原因で乗り上がり脱線が起きたとされた事例がある⁽¹⁰⁾。

別の原因による事例に、レールに波状磨耗がある箇所を高速走行中の新幹線電車が約1m進行する間に輪重がほぼ0から静止輪重の2倍程度に激変したケースがある⁽¹¹⁾。一方、著者らの研究によれば、清浄なレールと車輪との接触面における接触抵抗は通常の接触面圧の範囲では、当該接触面圧に応じて変化する⁽¹²⁾。そこで、実際の車輪に生じているのと同程度のわずかな偏心を意図的に付与した1/5縮尺の模型輪軸を軌道回路上で低速走行させ、接触抵抗の変化から輪重変動の状況を測定した。その結果、車輪の偏心は、たとえ低速走行時でも顕著な輪重変動を引き起こすことを明らかにした⁽¹³⁾。

これらの状況から類推すれば、実際の急曲線上では瞬時の著大な輪重抜けに伴う短小著大脱線係数がかなりの頻度で発生している可能性は否定できない。

2.5 輪重抜けが短小著大脱線係数に及ぼす影響

前記の事実を踏まえれば、乗り上がり脱線防止策を押し進めるに際しては、まず短小著大脱線係数と瞬時の著大な輪重抜けの実態把握が必要となるが、これを行うのは容易でない。そこで、フランジ角 57.5° 、静止輪重比1の輪軸に一定の横圧が持続して作用した状態のもとで瞬時の輪重抜けが起きて短小著大脱線係数が発生する事態となっても、ナダール限界を超えないために事前に保つべき脱線係数の限界と μ との関係を図2に示す。

Fig.2 Relationship between μ and the limit of the derailment coefficient under various wheels off-loading ratio (wheel flange angle 57.5°)

図2の実細線は輪重減少率0のもとで保つべきナダール限界を示す。図示のように $\mu=0.3$ のときの脱線係数限界値は0.8を少し上回る。この値は日本で賞用されている。その下の実太線は輪重減少率が0.2、さらにその下の破線は減少率0.4の場合の限界を示す。図示のごとく、輪重減少率0.4の場合には $\mu=0.3$ のもとで脱線係数の限界は約0.5に低下する。次に、静止輪重比が規制限界⁽⁶⁾である0.9の輪軸に輪重減少率0.4なる輪重抜けが重畳して起きた場合の脱線係数の限界を図中に鎖線で示す。この場合には $\mu=0.3$ 程度で限界値は0.4に近い程度にまで低下する。

問題は静止輪重比0.9程度の車両は少なからず実在し⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、さらに減少率が0.4程度の輪重抜けは実際に起きていることにある⁽¹⁰⁾。この状態が60ms程度以上持続する状況のもとで μ が0.3を上回る値をとれば、フランジ角 57.5° の輪軸では乗り上がり脱線が起きる可能性が否定できないことになる。このような実情および曲線での輪重変動の発生状況などを踏まえ平成16年6月には、前述した推定脱線係数比が目安⁽⁶⁾である1.2を上回った場合、つまり、著大な脱線係数が存在する場合にはフランジ角度 60° 程度の輪軸では半径100mの曲線上での輪重変動率を約0.3程度以下に保つことを目安とすべき旨の国の通達が出されている⁽¹⁶⁾。しかし、この通達に沿って脱線係数を算出する際に採用すべき μ の値については、不明点が多いこともあって具体的な値は示されておらず、輪重減少率の持続時間の限度についても規定されていない。したがって、今後、乗り上がり脱線対策をより高度化するためには、著大脱線係数持続時間の把握および μ の実態把握が不可欠となる。

3. レール・車輪間の摩擦係数 μ 把握の方法

乗り上がり脱線に関わる問題で摩擦係数 μ を論じるに際しては、本来はレール・車輪間の静的な力関係や μ に関わる現象だけでなく、輪軸の回転に伴うモーメントや車輪とレールとの微小なすべり(いわゆる「クリープ」)についても考慮する必要がある。しかし、乗り上がり脱線の多くはモーメントやクリープを無視できる領域で起きている。そこで、本研究ではこれら無視しうるものとみなし、以下には μ に関わる問題に焦点を当てて論じてみよう。

3.1 臨界脱線状態のもとにおける摩擦係数 μ

乗り上がり脱線は μ が高い場合に起きやすいとされるが、どのような場所や状況のもとでそのような状態になるのかは明らかではない。限られた具体的事例として、車輪を削正した直後の踏面が粗い車両は、 μ

が高いと想定されるために脱線が起きやすいとされ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、最近では海外でも同じ認識にある⁽¹⁹⁾。

本線上での μ を求めるためには実車による実験を必要とするが、これには危険を伴うため実施は困難とされ、車輪削正直後の μ についてすらも実測した事例はない。著者らは先の研究第4報⁽³⁾で、新たに提案した手法により模型の実験装置を使い、臨界脱線状態のもとにおけるレールと車輪との接触点が清浄で乾燥した状態と、油塗布した状態のもとにある μ について速度との関係を調べた。その結果の一部を図3に示す。図中の白抜きマークは車輪が乗り上がりを開始した時点の μ を示し、塗りつぶしマークは車輪が臨界脱線状態を脱して滑り下がりを開始した時点のそれを示す。図示の通り、双方の値に差異は認められず、レールが清浄状態時の μ は0.32から0.25程度の値をとり、顕著な速度依存性も認められない。一方、油塗布状態における μ には顕著な速度依存性が認められ、しかも、速度の低い領域での値は高い領域に比べ値が大幅に高くなっていることに特徴がある。

3・2 脱線と粘着とのメカニズムの類似性 先の研究第1報⁽²⁰⁾で脱線実験を実施した際に、これに合わせてレール踏面を脱線実験と同じ状態とし、さらに速度も同じ状態で1/5スケールの粘着台車⁽²¹⁾を走らせ粘着係数(以下、「 μ' 」という)を実測した。そのときに得た台車走行速度 μ' との関係を図4に示す。

得た粘着係数 μ' と先の研究第4報で得た摩擦係数 μ とを比べると、レール清浄時の μ および μ' は値もほぼ同じであり、速度依存性が低いことにも類似性が認められる。一方、油塗布した状態での μ' は乾燥または清浄レールのそれより低い値をとり、先の研究第4報で得た油塗布時の μ と比べ値は高く、強い速度依存性および温度依存性が認められる。図4の実験において、レール踏面と車輪踏面間の接触点の面圧は通勤電車のそれと同じ程度の値であったのに対し、図3に

Fig. 3 Relationship between running speed and a friction coefficient

示す第4報で行った μ を求める実験での接触面圧は実車の3割程度と低かったことも差異の一因と考えられる⁽²²⁾。

ここで、臨界脱線状態のもとにおけるレールと車輪との接触点の状態について考えてみる。走行中の車両が臨界脱線状態に陥ると、車輪フランジ部のレールとの接触点における摩擦力の増大によって、車輪はレール側面に固着し、あたかもその点に引っ掛かったような状態となって、その点を起点として乗り上がりを開始する。しかし、乗り上がりを開始した時点では車輪はまだレール側面に完全に固着した状態になってはおらず、若干の滑り下がりが起きている状態にあると推定される。このため、この時点でレールと車輪の接触点の場合は動摩擦が支配していると考えられる。一方、臨界脱線状態を脱した時点とは、それまでは接触点における摩擦力によって車輪がレール側面に固着して滑り下がりが阻止されていた状態から、摩擦力の減少によって車輪が滑り下がりを開始する瞬間である。したがって、この時点とは、それまでの接触点における静摩擦の支配が解消される時点でもあると推定される。

ゆえに著者らは車輪が乗り上がりを開始する時点の接触の場合は動摩擦が支配し、滑り下がりを開始した時点の接触の場合は静摩擦が支配すると考え、両者は異なった値になると予想した。実験の結果は著者らの予想を覆し、図3に示すとおり両者の間に差異を認めることはできなかった。車輪が乗り上がりの状況を脱し、滑り下がりを開始する瞬間であっても車輪が回転している限りは接触点で車輪は絶えず旋回運動をしており、完全な静止摩擦が支配する場にはないためであると考えた。

脱線に関わる既報⁽³⁾⁽²⁰⁾で述べた実験を通じ、摩擦係数 μ と粘着係数 μ' とは極めて類似した傾向をもつこ

Fig. 4 Relationship between running speed and adhesion

とが明らかになった。「乗り上がり脱線」と「粘着」という二つの異なる現象が起きる接触点の場のメカニズムを見ると、前者はレール側面の接触点で車輪が旋回しながらその点が前方向に移動し、後者は車輪がレール踏面でレール長手方向に極めて微小な滑りを生じさせながらレール踏面を転動接触している。つまり、両者はいずれも同一の部材が旋回または微小な滑りを合わせ生じさせながら接触の場が移動する点に類似性がある。このように双方の接触の場に類似した現象が存在することが、値自体に類似性をもつ一因であると推定した。

3.3 模型軌道における粘着係数 乗り上がり脱線発生危険性を定量評価するためには μ の実態を知ることが不可欠であるが、本線上でこれを実測するのは容易でない。したがって、現時点では μ を得るためには別途の方法でこの値を推定する以外に適当な手法が見当たらない。

著者が先の研究第1報の実験で用いた1/5スケール模型の粘着台車は15 km/h程度までの速度域で、レール踏面が「清浄」および「湿潤」のもとでの μ' 取得のための実験を行っている。しかし、これらの実験では、レール踏面に介在する夾雑物などの因子が μ に及ぼす影響を評価していない。そこで、レール踏面に介在する μ' に関わる夾雑物の代表的な因子であるレールと車輪との摩擦により発生する摩耗粉が μ' に及ぼす影響の評価を行った。

この研究では実験を簡易にするために、実験用軌道のレール踏面粗さをJIS B 0601に定める中心線平均粗さで $3.3\text{ }\mu\text{m}$ 、粘着台車の車輪踏面粗さを $1.3\text{ }\mu\text{m}$ に

仕上げたうえで清拭し、粘着台車を長さ約20 mの実験軌道を連続走行させて μ' を測定した。このような方法をとれば、粘着台車の滑り軸がレール上を滑り走行することによって発生しレール踏面に堆積する金属磨耗粉について、 μ' に及ぼす影響を評価できるからである。さらに、レール踏面付近の大気はレール温度と同じとみなし、レール温度を制御することによってレール付近の大気の相対湿度も多様に変化させた⁽²³⁾。実験結果の一例を図5に示す。

図示のとおり μ' はレール付近の大気相対湿度および実験台車の走行距離の増大(すなわち、滑り軸の滑り走行によって発生する金属磨耗粉の増大)に応じ変化している。この実験を通じ、実験開始直後のレール清浄時の μ' の値は先の研究第1報で得た値とほぼ同じであること、そして、レールが極端に乾燥した状態では、レールと車輪との金属磨耗粉が蓄積された状態で μ' は極めて高い値をとり、その値は0.35程度に達することなどがわかった。

3.4 本線上における粘着係数 以上は模型における実験の結果である。著者は過去に本線上の粘着係数 μ' を連続取得することを意図して粘着台車を実車に装架して走行させた。当該台車は製作直後に試験専用客車に装架され、国鉄大宮工場の構内で粘着係数測定用輪軸の滑り率の適値を模索するための実験を行った。その結果、粘着の実態を把握するためには測定軸の滑り率を5%に設定することが最適であるとの結論を得た⁽²¹⁾。これ以降の実験は前述の1/5縮尺の模型実験用粘着台車を含め、すべてこの滑り率で行われている。当該台車は、その後、客車、通勤形電車および粘着台車による粘着実験を行うために特別に改造された粘着測定専用試験電車クヤ471形などに装架され、各地の国鉄およびJR本線上を走行して μ' を取得した。走行区間の一例を表1に示す。

本線上で行われた粘着係数取得の走行実験では、天候が同一条件のもとで走行区間の全域にわたり車輪1回転ごとに μ' を取得し、その値を速度域別に統計処理したデータがある。これらのデータのうち、最も高い μ' を得た好天時の測定結果の例を示す。図6は東北本線東鷺宮～小山間の上り線約30 kmを冬の昼間、快晴の日に走行して得たデータである⁽²⁴⁾。図6の横軸には μ' を、縦軸には速度を示し、破線は車輪1回転ごとに1回の頻度に測定した μ' を10 km/hごとの速度域別に分け、それぞれの速度域における μ' の分布を横軸の目盛0.01を1%とした百分率で示したものである。実線は速度域別の μ' の平均値を示す。

図6を見ると低速域での μ' は比較的低い。その

Fig. 5 Changing of adhesion according to the running distance of the test truck under various humidity around the running surface of rail (atmosphere temp.: 28°C)

Table 1 The JR main lines investigated adhesion coefficient by the slipping adhesion test truck

Experimental lines		Year	Type of cars	Axle weight(kN)	Slipping ratio(%)
Name of line	Test section				
JNR Ohmiya Workshop	Test line	1984	Maya-40	80	5-15
Tohoku line	Ohmiya-Higasi Wasinomiya	1986	Maya-41	80	5
Yamanote-line	the whole line	1986	Saha-101	70	5
Nikko line	the whole line	1989	Kuya-471	80	5
Chikui line	Meinohama-Karatsu	1990	Kuya-471	80	5

Fig. 6 Distribution and mean value of adhesion for various speed ranges (Tohoku line, daytime, fine)

理由は μ' を低下させるさびが付着した駅構内の側線レールを低速走行したためである。沿線には踏切、森林および大規模河川に掛かる橋りょうなどの μ' を局所的に低下させる諸因子⁽²⁵⁾が存在し、中速域以上の速度域での低い μ はこれらの箇所を得ている。他方、日当たりが良く、レールが乾燥した高架区間では μ' は 0.40 をやや上回る高い値を得ている。このため、図 6 に示すとおり μ' は広い範囲にわたっている。しかし、 μ' の平均値はほとんどすべての速度域で 0.32 前後の値をとり、高いところでも 0.35 程度に留まっている。

つまり、本線上の 90 km/h 程度までの速度域における高い粘着係数の値は、模型で得たそれとほぼ一致した。そして、このような値は本線ではレールが直射日光で乾燥した状態にある好天時の昼間に得ている。他方、模型実験では同じようにレールが乾燥状態にあり、レール踏面は清浄またはレールと車輪の摩耗による金属粉が付着した状態のもとで得ている。つまり、本線および模型の双方ともに、高い μ' を得た条件は極めて類似しているのである。数少ない相違点は、模型実験における走行最高速度は 15 km/h 程度に留まることおよびレールと車輪の踏面に車輪の滑り走行によって生じる多量の金属粉が介在するデータを含むこ

と、実車でのこの速度域での μ' は低い数値に留まっていることにある。このうち、金属粉の問題については、本線上のレールは模型実験のレールほどに多量ではないが、レールおよび車輪の摩耗による金属粉は付着しているので、両者の間に顕著な相違があるわけではない。本線上の μ' の値が低速域で低い結果となった理由は前述した。

3・5 塗油されたレールの摩擦係数 μ μ が高い値をとる乾燥したレール上で乗り上がり脱線が起きやすいことは当然であるとしても、多くの脱線は急曲線や番数の小さい分岐器上で起きている。急曲線部分は「キシリ音」防止またはレールと車輪の損耗防止のために、塗油を行っている鉄道が多く、分岐器については不転換事故防止のためにトングレールを支える床板に多量の油が塗布され、その油がレール踏面までしみ出している場合が多い。したがって、このような箇所のレール・車輪間の摩擦係数 μ は塗油の影響を受けて低いと見られ、脱線の危険性は本来的には低いと思うべきであろう。

これを裏付けるように、例えば前述の研究⁽²⁴⁾で得た山手線の品川～大崎間にある半径 300 m の曲線に置かれた通称「アラジン」と呼ぶ塗油器付近の外軌側レールの μ' は速度 60 km/h 程度で 0.05 程度であったと推定され、粘着台車が他の線区の同様の地点で得た値もこれと大きく異ならない値であった。一方、同じ粘着台車を用いた研究⁽²⁴⁾で東北線乃木駅構内分岐器上を 22 km/h で通過時に、トングレール上で得た μ' は 0.08 程度と推定され、他の分岐器上での値もこれに近い値であった。したがって、油が付着したレールの摩擦係数 μ も粘着係数 μ' と同じく低い値となっている可能性が高い。

ところで、塗油したレールの摩擦係数 μ について調べた結果は、図 3 に示すように顕著な速度依存性があり、低速域に限って見れば μ は決して低くはない。模型の粘着台車で得た塗油したレール上の粘着係数 μ' も、図 4 に示すように顕著な速度依存性が見られた。

本線の塗油されたレールの μ' について速度依存性を測定した事例はないが、レール・車輪間に油と同じように流体が介在することになる降雨時のレール踏面が濡れたもとにおける μ' について測定して得た事例は、いずれも低速域では高い速度依存性がある⁽²⁴⁾⁽²⁶⁾。その一例として、日光線の下野大澤～今市間 5.7 km で降雪時に得た速度域別の粘着係数 μ' の分布を示すデータ⁽²⁶⁾を図6と同じ方法で表したものを図7に示す。測定日の気象などは図中に示す。図示のように低速域の μ' は高い速度域における μ' よりはるかに高い値をとっている。

平成 12 年に速度 12 km/h で走行中に起きた東京地下鉄日比谷線脱線事故の曲線半径 160.1 m の現場も手前にはレール塗油器が設置されており⁽¹⁵⁾、平成 18 年 1 月に神戸電鉄有馬口構内の 8 番片開き分岐器上で正確な速度は不明ながら駅発車直後の低速走行時に起きた脱線事故ではトンGREール終端部に車輪乗り上がり跡があるとされ、その直後の 2 月に同鉄道で速度 15 km/h で同じように 8 番片開き上で起きた脱線では、油が付着していたと推定されるトンGREールを通過後わずか 3 m の位置で車輪が乗り上がったとの記録がある⁽¹⁸⁾。日比谷線脱線事故で使われた車輪のフランジ角度は 60°、神戸電鉄のそれは 57.2°であった。日比谷線で脱線した車両の輪重差は不明とされたが、神戸電鉄で平成 18 年初めに続けて起きた事故のうち、1 月の事故で最初に脱線した輪軸の静止輪重比は 1.02、2 月の事故で最初に脱線した輪軸の静止輪重比は 1.00 であったことが明らかにされている。すると、もし、脱線現場の μ' の値が過去の研究で本線上の油を塗布した状態のレール付近で得た前述の μ' とほぼ同じ程度の 0.1 またそれ以下であり、さらに、2 章で述べた仮定、すなわち、粘着係数 μ' と摩擦係数 μ との値が大ききくは異ならないのなら、神戸電鉄の脱線事故は起

きなかった可能性がある。なぜなら、これらの事故は分岐器の平面性狂いなどだけでなく、車輪とレールとの摩擦係数の増加も一因との指摘がなされているからである。したがって、塗油されたレール付近で乗り上がり脱線が起きている事実は、15 km/h 程度以下の低速域では塗油されたレールであっても μ は決して低くはないことを示す状況証拠ということもできる。

とはいっても、塗油されたレールの低速域での μ の値がどの程度かの調査は極めて難しい。 μ は前述のようにレール温度などに応じて変化する⁽²⁰⁾だけでなく、接触面圧や油の種類などに応じ変化するからである⁽²²⁾。神戸電鉄の 2 件の脱線事故車の車輪踏面は前述のように研削直後の粗い状態にあったとされ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、最近起きた外国での脱線事例も同様のことが指摘されている⁽¹⁹⁾。車輪削正直後の踏面が粗い輪軸および油が付着したレールについて、低速域における μ の挙動解明は乗り上がり脱線防止のための今後の重要な研究課題である。

3・6 本線上における粘着係数と摩擦係数との類似性 今まで述べたように 1/5 スケール模型の粘着台車が得た μ' と、同じスケールの軌道上で同じ条件で脱線実験を実施して得たレールと車輪との接触点における摩擦係数 μ とは、レールが乾燥し、かつ、清浄状態にある場合には、ほぼ同じ値を得ている。また、レール踏面に金属摩耗粉が堆積した模型のレールと、若干の金属摩耗粉が介在する本線上のレールとは、レールが乾燥した状態のもとではほぼ同じ値を得ている。よって、臨界脱線状態のもとにおける本線上の μ と μ' とは乾燥レール上では同じ値である可能性が高い。そこで、本研究では以下のような理由で、本線上の乾レールで粘着台車が得た μ' の値を臨界脱線状態のもとにおける μ の値とほぼ同じ値とみなして議論を進めることにした。

(1) 先の研究第 4 報で行った実験の過程で、4 km/h 程度までの極めて低い速度域で得たレール清浄時の摩擦係数 μ と、同じ条件のレール上で得た粘着係数 μ' とは、ほぼ同じ値を得たこと。

(2) 先の研究第 1 報の実験で使用した模型の粘着台車が 15 km/h 程度までの速度域について、レールが乾燥状態で踏面が清浄または金属の摩耗粉を堆積させた状態のもとで得た μ' の値と、実車に装架した粘着台車が本線で好天時にレール乾燥状態のもとで得た μ' とは、ほぼ同じ値と同じ傾向を示したこと。

(3) μ と μ' との接触の場合は、4・2 節で述べたように接触のメカニズムに類似性が見出されること。

(4) 本線上の μ を先の研究の第 4 報で述べた著

Fig. 7 Distribution and mean value of adhesion for various speed ranges (Nikko line, daytime, snow)

者ら提案の方法で取得するには実車を臨界脱線状態にすることが必要で、その実施は極めて困難であること。

(5) したがって、 μ についてはいま述べたような方法で値を推定する以外に現段階では適当な手段が見出せないこと。

4. 脱線防止対策案

以上の知見を基に半径 100 m 程度の急曲線を主体とした乗り上がり脱線防止策を述べてみよう。

4.1 摩擦係数 μ 前述のようにナゲール限界に支配的な影響を及ぼすレール・車輪間の摩擦係数 μ は、直射日光のもとで乾燥状態にあるレールでは現在広く使われている値である 0.3 より高く、0.4 程度に達する可能性がある。よって、ナゲール限界を調べるに際してはこの値を使用することが望ましい。なお、レールへの塗油はおおむね 20 km/h 程度以上の速度域で μ を低下させる効果は認められるが、それ以下の乗り上がり脱線が多発する速度域での効果については今後の研究に待つべきものが少なくない。

4.2 フランジ角の増加の影響 μ が 0.4 程度の値をとったとき、フランジ角 57.5° 、静止輪重差のない輪軸の限界脱線係数を図 2 から求めると約 0.7 程度の値となる。さらに、当該輪軸に静止輪重差が 0.1 あるとき、減少率 0.4 程度の輪重抜けがこれに重畳して起きた場合の限界脱線係数は 0.4 程度にまで低下する。この対策としてフランジ角を増加させ 70° とした輪軸について、静止輪重差および輪重減少率に応じたナゲール限界を図 2 と同様の方法で表したものを図 8 に示す。

μ が 0.4 をとったとき、静止輪重差や輪重抜けがない場合の限界脱線係数を図から求めると約 1.1 程度となって、フランジ角 57.5° のものと比べ限界は大幅に

上昇する。静止輪重差が 0.1 あるとき、減少率 0.4 程度の輪重抜けが重畳して起きた場合には、限界脱線係数は 0.6 程度となり、フランジ角 57.5° の輪軸のそれに比べても限界は上昇する。反面、その限界を超えた場合に脱線に至るまでの時間は前述のように大幅に短縮されると推定される。

周知のことではあるが、このようなフランジ角の増加は乗り上がり脱線防止の一つの策として極めて有効である。

4.3 短小著大脱線係数の管理 乗り上がり脱線現象が発生した場合、車輪のフランジ部はレール側面の接触した点に固着し、あたかもその点に引っ掛かったかのような形で、この点を中心に乗り上がる。輪軸の単位回転角度当たりの車輪乗り上がり量は車軸中心から前記接触点までの距離に比例するので、輪軸が同じ距離を進行する場合には前記の距離が大きいほうが車輪の乗り上がり量は多くなる⁽²⁾。

2 章で述べたようにフランジ角が比較的小さい 57.5° 程度の輪軸が半径 100 m の曲線を通過時に車輪が滑り下がることなくレールに連続的に乗り上がった場合、乗り上がり開始からわずか 0.4 m 程度の走行で脱線に至る。この間を曲線の標準的な制限速度 25 km/h 程度で走った場合の所要時間は約 60 ms 程度となる。

乗り上がり脱線防止のためにフランジ角を増加させたケースを考えてみよう。図 9 はフランジ角が 57.5° 、 70.0° および 87.0° の円弧踏面、車輪径 860 mm (ただし、フランジ角 87.0° の車輪の径は 500 mm) の輪軸がアタック角 1.3° で曲線半径 100 m の 50 N レールに接したとき、車輪踏面のレール踏面からのせり上がり量と、車輪中心から接触点位置までの距離の関係を 1/5 スケールの模型で調べた結果を示す曲線で、諸元は

Fig. 8 Relationship between μ and the limit of the derailment coefficient under various wheel off-loading ratio (wheel flange angle 70°)

Fig. 9 The relationship between the wheel's contact point position and the wheel lift-up value (R : 100 m, wheel diameter: 860 mm, flange angle: 57.5° , 70.0° , wheel diameter: 500 mm, flange angle: 87.0°)

図中に示す⁽⁶⁾。図示のとおり、フランジ角の増大につれて、接触点までの距離は増大する傾向にあり、最近、多くの鉄道で賞用されつつあるフランジ角 70° の輪軸の車輪中心から接触点までの距離は図示のように 57.5° のそれに比べおおむね 5 割程度大きい。このことは、フランジ角が 70° 程度の輪軸が乗り上がり脱線状態になった場合には、「脱線に至るまで距離」はフランジ角が 57.5° の輪軸に比べ大幅に短縮されることを意味する。

近年、乗り上がり脱線の発生を防止するために、フランジ角のより大きい輪軸の使用が好ましい旨の国の見解が出されている⁽⁶⁾。4・2 節で述べたようにナゲール限界はフランジ角度の増大に応じ上昇するので、限界脱線係数を高める観点から見ればこの対策は好ましい。しかし、いったん、臨界状態に陥った輪軸が滑り下がることなく継続的に乗り上がった場合、「脱線に至るまで距離」は短くなる。したがって、フランジ角の大きな輪軸については、このような状況を配慮して短小著大脱線係数の持続時間の限度をより厳しく管理する必要がある。

5. 結 論

乗り上がり脱線に支配的な影響を及ぼす車輪フランジ部とレール側面との摩擦係数 μ の実態を把握するために、著者らが提案した手法を用い、1/5 スケールの二軸台車を乾燥レール上を低速で走行させることによって得た μ は、同じ状態並びにレールおよび車輪の摩耗金属粉が乾燥レール上に介在した状態で得た同じ速度域の粘着係数 μ' とほぼ同じ値であり、さらに、当該 μ' の値はレールが乾燥状態にある本線上で粘着台車が 90 km/h 程度までの速度域で得た μ' とほぼ同じ値である事実を踏まれば、本線の乾燥レール上の μ は μ' とほぼ同じ程度の値にある可能性が高い。本研究で得た μ に関わるこのような新たな知見に基づいて、乗り上がり脱線のメカニズムとその防止策についての研究を行った結果、以下のようなことがわかった。

(1) 直射日光が照射して乾燥状態にあるレール上で μ' は 0.4 程度に達することを考慮すれば、ナゲール限界を調べるに際して使用する μ の値は、従前から賞用されている 0.3 程度の値に代えて 0.4 程度の値を使用することが望ましい。

(2) フランジ角が 57.5° 程度の輪軸が 8 番片開き分岐器または半径 100 m 程度の曲線上で臨界脱線状態となってから車輪が継続的に乗り上がった場合、乗り上がりを開始してから「脱線に至るまで距離」はわ

ずか 0.4 m 程度、この間の所要時間は車両が 25 km/h 程度で走行した場合にはわずか約 60 ms 程度にすぎない。

(3) 乗り上がり脱線防止のために懲憑(しょうよう)されている車輪のフランジ角を増加させる対策は限界脱線係数を高める観点から見た場合の有効性は認められるが、反面、この対策は「脱線に至るまで距離」を短縮させる。

(4) 前記の(2)および(3)項に記載した事実を踏まえば、現在は等閑視されている持続時間が短小なナゲール限界を超える脱線係数についても、曲線半径、車輪のアタック角およびフランジ角などに応じて多様に変化する(3)項で述べた「脱線に至るまでの距離」を勘案して、より厳格に管理する必要がある。

本研究の実施に際しては、当永瀬研究室の研究生牛若聡、卒研生木村純一および伊那利晃君など、多くの諸君の協力を得た。フランジ角度の大きい実験用輪軸の製作に際しては JR 北海道のご支援をいただいた。ここに関係者各位に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Wakabayashi, Y., Sakahara, H., Hiram, J. and Nagase, K., A Study on Wheel Climb Derailment (2nd Report, Measuring of the Contact Point Position between Rails and Wheels), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 67, No. 659 (2001), pp. 2266-2271.
- (2) Sato, Y., Hashi, H., Wakabayashi, Y. and Nagase, K., A Study on Wheel Climb Derailment (3rd Report, A Method to Theoretically Calculate the Wheel Lift-up Value), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 73, No. 725 (2007), pp. 59-65.
- (3) Hashi, H., Sato, Y. and Nagase, K., A Study on Wheel Climb Derailment (4th Report, Measuring Method on the μ Value between Rails and Wheels), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 73, No. 732 (2007), pp. 1-7.
- (4) Japanese Industrial Standard E 1305, *Railway Switches-Shapes and Diamonds* (in Japanese), (1998).
- (5) Hiroshige, I., *Wheel Set* (in Japanese), (1971), pp. 278-289, Kohyousha.
- (6) *The Director-General Order of Railway Bureau*, No. 148 (in Japanese), devised by the Safety Administrator, (2000-10), the Ministry of Land, Infrastructure and Transportation of Japan.
- (7) Hashi, H., Satoh, Y., Hiram, J. and Nagase, K., A Study on Measuring μ Value under Wheel Climb Derailment (3rd Report, the μ Value between Rails and Wheels and Possibility of Wheel Climb Derailment Occurrence), *The Joint Railway Technology Symposium '06*, (2006-12), pp. 471-474.
- (8) Hashi, H., Hiram, J. and Nagase, K., A Study on Wheel Climb Derailment (Influences of Curvature and Flange Angle on the Contact Position), *The Joint Railway Technology Symposium '07*, (2007-12), pp. 105-108.
- (9) Miyaji, S., Satoh, Y. and Inohana, T., The Derailment Coefficient of a Bolster-less Truck Measured on the

- Wayside and the Car, *The Joint Railway Technology Symposium '01*, (2001-12), pp. 469-472.
- (10) The Investigation Report on the Derailment of Tokyo Freight Terminal Station, *ARAIC Report* (in Japanese), No. RA 2004-3-1 (2006-6), pp. 9-12.
 - (11) Onodera, T. and Oogoshi, M., The Relation of Wheel Load Fluctuation to Rail Surface Irregularity, *The Joint Railway Technology Symposium '04*, (2005-1), pp. 273-274.
 - (12) Nomura, T., Hirama, J. and Nagase, K., The Influence of Contact Condition between Rails and Wheels upon Track Circuit Shunting (1st Report, Quantitative Evaluation of Factors that cause Inadequate Track Circuit Shunting), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 63, No. 616 (1997), pp. 109-116.
 - (13) Hashi, H., Sato, Y., Hirama, J. and Nagase, K., Electric Resonance Phenomena of a Truck Circuit Caused by Wheel Sets (The 7th Report, Influence of the Wheel Eccentricity on the Axle Load and the Resonance), *The Joint Railway Technology Symposium '07*, (2007-12), pp. 57-60.
 - (14) The Investigation Report on the Derailment of Takasago Station of Keisei Electric Railways, *ARAIC Report* (in Japanese), No. RA 2003-3-2 (2004-6), p. 8.
 - (15) *The Investigation Report on the Derailment of Tokyo Metro Hibiya Line* (in Japanese), (2000-10), p. 97, the Investigation Committee of the Accident, Ministry of Transportation.
 - (16) *The Director Order of the Engineering Planning Division*, No. 42, Railway Bureau (in Japanese), (2005-6), the Ministry of Land, Infrastructure and Transportation of Japan.
 - (17) The Investigation Report on the Derailment of Arimaguchi Station of Kobe Electric Railways, *ARAIC Report* (in Japanese), No. RA 2007-6-2 (2007-9), p. 6.
 - (18) The Investigation Report on the Derailment of Arimaguchi Station of Kobe Electric Railways, *ARAIC Report* (in Japanese), No. RA 2007-6-1 (2007-9), pp. 6-7.
 - (19) *Metro Weekly*, Vol. 10, Issue 2 (2007-1), p. 1.
 - (20) Nagase, K., Sakahara, H. and Nomura, T., A Study on Wheel Climb Derailment (1st Report, Results of Basic Experiments Using Model Truck), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 66, No. 652 (2000), pp. 68-75.
 - (21) Nagase, K., A Study of Adhesion between the Rails and Running Wheels on Main Lines (Results of Investigations by Slipping Adhesion Test Bogie), *Proc. IMechE*, Vol. 203, No. F 1 (1989), pp. 33-43.
 - (22) Bowden, F. P. and Taber, D., *The Friction and Lubrication of Solids* (Trans. into Japanese by N. Soda), (1975), pp. 183-186, Maruzen.
 - (23) Hayashi, I., Nomura, T. and Nagase, K., Influence of Atmospheric Conditions upon Adhesion between Rails and Wheels, *Trans. JSME, Series C*, Vol. 63, No. 606 (1997), pp. 246-251.
 - (24) Nagase, K., The State of Adhesion between Rails and Wheels on Main Lines (Results Investigated by the Slipping Adhesion Test Truck), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 54, No. 504 (1988), pp. 1852-1860.
 - (25) Nagase, K., Wakabayashi, Y., Ohhira, T., Hirama, J. and Tanabe, N., A Study on the Wheel Skidding of JR Ltd Express EMUs (1st Report, Factors Influence upon the Wheel Skidding), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 70, No. 689 (2004), pp. 149-157.
 - (26) Nagase, K., Nakamura, H. and Kobayashi, H., Influence of Weather Condition upon Adhesion between Rails and Running Wheels on Main Lines (Results Investigated on JR Nikko Line by the Slipping Test Truck), *Trans. JSME, Series C*, Vol. 56, No. 523 (1990), pp. 797-802.