

## のり上がり脱線に関わるレール・車輪間の摩擦係数測定法に関する研究

- 第4報 内軌レール枕木方向の  $\mu$  測定法と測定結果 -

○[機]橋 弘矩 (前金沢工業大学 院, 現中村留精密工業(株)), [機] 永瀬 和彦 (金沢工業大学)

The Evaluation of the  $\mu$  Value Between Rails and Wheels Under Wheel Climb Derailment- The 4<sup>th</sup> Report. the  $\mu$  in the Lateral Direction of the Inside Rail -

OHironori Hashi (Exe.Kanazawa Institute of Technology)

Kazuhiko Nagase (Kanazawa Institute of Technology)

The friction coefficient  $\mu$  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  $\mu$  has not been suggested until to the present. The authors proposed a method to easily and exactly evaluate the value of the out-side rail on the curvature, and made it clear by an experiment, employing a 1/5 scale model track and model truck. Using a newly proposed method and the  $\mu$  value of the out-side rail obtained by the above-mentioned studies, the experimentation was done to evaluate the  $\mu$  value on the inside rail to the lateral direction, which was said to presumably have some influence on the occurrence of the derailment. As the result of the studies, they found that the value on the inside rail was far higher than that of the outside.

キーワード：鉄道. 車輪. レール. 脱線. 摩擦係数

Keywords : Railway. Wheel. Rail. Derailment. Coefficient of friction

## 1. 緒言

急曲線を低速で走行中に起きる「のり上がり脱線」については従前から多くの研究や防止策がなされているが、現在に至るも根絶策は確立されていない。原因は脱線のメカニズムが十分に解明されていないこと及び脱線に支配的な影響を及ぼすとされるレール・車輪間の摩擦係数の実態が不明なことにある。

筆者等のはのり上がり脱線現象解明のために、1/5 縮尺模型を用い、長年にわたり多様な脱線実験を行ってきた。その過程で、従前、求めることが至難とされたレールと車輪との接触点位置を高い精度で特定した<sup>(1)</sup>。

次いで得た値を用い、のり上がり脱線発生時の車輪の「理論のり上がり量」を求めると共に、この値と「車輪が実際にせり上がった値」との差から車輪がのり上がり又はすべり下がりを開始した瞬間（以下、この時点「臨界脱線状態」という）を高い精度で特定する方法を提案した<sup>(2)</sup>。さらに、該時点における脱線係数  $Q/P$ 、すなわち、レールと車輪との間の力関係から摩擦係数を求める方法を提案し、この方法を用いて外軌側レールと車輪との摩擦係数（以下、「 $\mu_{out}$ 」という）を求めた。その結果、外軌側のレール・車輪間の  $\mu_{out}$  は粘着係数とほぼ等しいことを明らかにした<sup>(3)</sup>。

のり上がり脱線防止の具体策についても、従前は等

閑視される傾向にあった短小時間の著大な脱線係数について、フランジ角に応じた持続時間を定めるべきこと及び脱線の危険性評価のために従前から賞用されている  $\mu$  の値 (0.3) に代えて 0.4 を使うのが望ましいとの提案を行った<sup>(4)</sup>。

ところで、内軌側レールと車輪間との接触点における枕木方向の摩擦係数（以下「 $\mu_{in}$ 」という）は、のり上がり脱線に少なからぬ影響を及ぼすとされながら、測定が極めて難しいがために現在でも明らかにされていない。本報ではこの値の測定方法を提案するとともに、1/5 スケールの模型を用いて値の測定を試みた。

## 2. 内軌側レールと車輪との接触点における摩擦係数

## 2.1 従前の推定法

内軌側レールと車輪間との接触点における枕木方向の摩擦力は、外軌側車輪がすべり下がる時も、のり上がる時も共に、これを阻止する力として働く。臨界状態の下で外軌側の摩擦力が作用する位置（接触点位置）はフランジとレール側面にあるのに対し、内軌側は通常走行とほぼ同じ、つまり、レール長手方向の摩擦力（粘着力）が得られるのとほぼ同じ箇所にある。しかし、場所は同じでも、内軌側の  $\mu_{in}$  は粘着係数のそれより相当高い値であろうというのが一般的な認識である。

この値は曲線通過時の内軌側車輪の輪重と横圧との比から類推する手法が広く採られており、この方法で得た値は 0.5 又はそれ以上となっている場合が多いからである<sup>(5)</sup>。

しかし、この値を内軌側の  $\mu_m$  と見做すためには、本来は外軌側車輪が臨界脱線状態に陥り、微小な上下移動を伴って内軌側車輪が枕木方向に移動を開始した瞬間を高い精度で捉え、この時点における輪重と横圧から値を求めなければならない。このため、当該値について現在に至るも正確な値が得られてとは言えない状況にある。

2.2 提案する方法

継続してのり上がり状態にある輪軸外軌側輪軸がすべり下がった場合に失う輪軸などの位置エネルギーと、これが吸収される内外軌レールと車輪との摩擦エネルギーの関係を考える。

車輪がすべり下がった時、以下の式が成立する。

$$E = n \times W_f \times l \times g \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $W_f$  はのり上がった輪軸が輪重として負担する台車と輪軸とを含めた質量、 $E$  は臨界状態に陥った車輪が鉛直方向に距離  $l$  だけすべり下がった場合に前記質量  $W_f$  が失った位置エネルギー、 $n$  は前記の質量  $W_f$  の重心位置が車輪のすべり下がりにより鉛直方向に低下した距離と  $l$  との比である。

前記のすべり下がり現象により生じたエネルギーのうち、外軌側車輪とレールとの接触点で摩擦として吸収されるエネルギー  $E_{out}$  は

$$E_{out} = A \times \mu_{out} \times \frac{l}{\sin \alpha} \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで、 $A$  は車輪とレールとのフランジ接触面に直角に働く力、 $\mu_{out}$  は外軌側レールと車輪とのフランジ接触点における摩擦係数、 $\alpha$  はフランジ角度を示す。

内軌側車輪のレールとの接触点で車輪の横方向へのすべり摩擦により吸収されるエネルギー  $E_{in}$  は

$$E_{in} = P_{in} \times \mu_{in} \times \frac{l}{\tan \alpha} \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここで、 $P_{in}$  は内軌側輪重、 $\mu_{in}$  は内軌側レールと車輪踏面との接触点における枕木方向の摩擦係数である。

上記 (1) 式は、(2) 及び (3) 式との和に等しいことから、内軌側の摩擦係数  $\mu_{in}$  は (4) 式から求めることができる。ここで注目すべきは、外軌側車輪のすべり下がり量が両辺から消去されるので、臨界状態に陥った時点の  $n$ 、内軌輪重及び外軌側摩擦係数  $\mu_{out}$  が分かれば、内軌側の摩擦係数を求めることができる。

なお、 $\mu_{in}$  を求めるに際しては、本来は微小なすべり (クリープ) などについても考慮しなければならない

$$\mu_{in} = \frac{(n \times l \times W_f \times g) - \left( A \times \mu_{out} \times \frac{l}{\sin \alpha} \right)}{P_{in} \times \frac{l}{\tan \alpha}}$$

$$= \frac{(n \times W_f \times g) - \left( \frac{A \times \mu_{out}}{\sin \alpha} \right)}{\frac{P_{in}}{\tan \alpha}} \dots \dots \dots (4)$$

い。そこで、この影響を排除するために、外軌側車輪のすべり下がり現象が巨視滑りの領域に留まるようアタック角は 1.0 度以上の状況下で実験を行う。さらに、このような方法をとることにより、内軌側車輪が横方向に移動する際の接触点における微小なすべりの影響も排除できる可能性があると考えたからである。

輪軸は横圧に対し極めて高い曲げ剛性を持つので、輪軸は剛体と見做し、横圧の変動による左右車輪の相対位置の変化は無視し得るものとした。当該実験は極めて低い速度域で行われるため、輪軸の回転及び車輪のすべり下がり起因する慣性モーメント並びに台車のバネ変位の影響による重心の移動も無視し得ると見做した。

さらに、本実験で外軌側輪軸のすべり下がり現象によって台車全体には並進運動や回転運動が生じ、さらに、レール踏面の「丸み」の影響によって、内軌車輪の位置が僅かに上下に変動する。しかし、これらの動きによる影響は些少であるところから、これらの動きも同様に無視出来るものとした。

3. 実験装置及び摩擦係数測定法

3.1 実験装置

図 1 は本研究に用いた 1/5 縮尺の軌道及び台車の構造概念図である。実験に用いた 2 軸台車の輪軸は片支持ミンデン式により軸箱支持され、車輪は JR 標準を 1/5 縮尺 (但し、フランジ角度は 57.5 度、車輪踏面勾配は 1/20 である) したものをを用いた。静的な輪重差はほぼ 0、この時の左右輪重は 245N、レールと車輪との接触面圧は標準的な通勤用付随電車のそれとほぼ等しい。輪重測定に際し、本来は内軌及び外軌双方

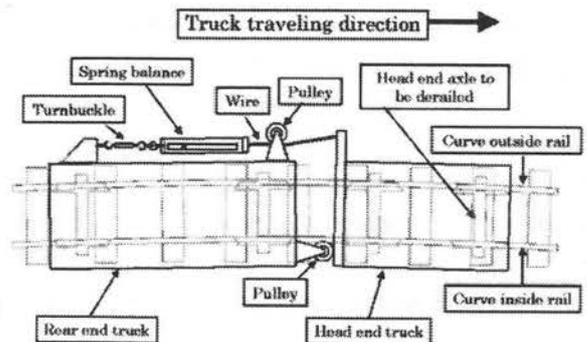


Fig. 1 Method to provide lateral force for the Wheelset<sup>3)</sup>

の輪重を同時測定すべきだが、測定装置の関係でやむを得ず内軌側輪重は連続測定に変え、静止輪重値を用いた。実験用軌道はJIS E1101の50kgNレールの1/5縮尺レールを使用し、これを本線で使用されている最小の曲率半径100mの1/5縮尺となる曲率半径20mに設定し、この曲線区間を測定区間とした。なお、カント、スラック及び緩急曲線は設定していない。また、車輪の挙動を詳細に測定するために用いた機器は、せり上がり量の測定にレーザー変位計(分解能0.5 $\mu$ m)を、実験台車の移動距離の測定にレーザー変位計(分解能50 $\mu$ m)を、車輪の回転角度測定に20000pprのロータリーエンコーダを、輪重・横圧測定は車輪4箇所貼付する、いわゆる「連続法」によった。

### 3.2 臨界状態検知法

本実験で用いた実験台車は図1に示す横圧付与装置により横圧が前輪軸へ付与される。臨界脱線状態に陥った時点を正確に検出には、理論のり上がり量<sup>(2)</sup>を高精度で求める必要がある。このため、車輪が微小距離(以下、この距離を「1サンプリング距離」という)進行する毎にその値を求めている。本研究での1サンプリング距離は前記研究<sup>(2)</sup>で述べたように、車軸中心とレール接触点位置との間の距離を24分割した値をとっている。このような方法で短距離輪軸が進行する毎に、予め得た車輪・レール間の接触点位置から理論のり上がり量を求め、車輪が実際にせり上がった量との差から臨界脱線状態に陥った瞬間を求めた。

### 3.3 摩擦係数測定法

前記方法で、先ず、臨界状態に陥った時点を検知し、その時点の外軌側輪重と横圧とから外軌側の $\mu_{out}$ を求める<sup>(3)</sup>。ついで、内軌側の摩擦係数 $\mu_{in}$ を算出する。前軌外軌側車輪が、のり上がった台車前輪軸が輪重として負担する台車を含めた輪軸全体の質量 $W_f$ の重心位置は複雑な挙動を示す。ここでは、計算を簡略化するため、質量 $W_f$ は台車全質量の半分とみなし、その重心は前輪軸の中心部に位置するものとした。

臨界状態時の車輪のレールとの接触点は、外軌側車輪はフランジ勾配の端部(のど元部)、内軌側車輪は踏面1/20勾配中央で接触するものと見做した。すべり下がりが発生した場合は前記外軌側接触点が内軌側接触点を支点としてすべり下がったと見做し、重心位置のすべり下がり量に関わる $n$ を求めた。この方法で求めた $n$ は0.54である

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 基礎実験とその結果

図2に内外軌側レールに油を塗布した状態でのり上がり脱線実験を行い、臨界状態を具現させた時の車輪の挙動の一例を示す。脱線係数は臨界脱線状態を生じさせるため、概ね1.0から1.1程度となるよう設定してある。図の縦第1軸に理論のり上がり量と実測せり

上がり量、縦第2軸にはすべり下がり率と脱線係数、横軸には台車移動距離を示す。「すべり下がり率」とは、車輪が1サンプリング距離(車輪の動きを捉えて計測するための微小距離)を走行する間のすべり下がり量をレール長手方向移動距離で除した値である。

臨界脱線状態にあると推定される部分を丸印で図示した。実験結果から台車移動距離4及び17mm付近で車輪が継続的のり上りを解消し、すべり下がりを開始したと推定される。この地点付近ですべり下がり率が図示のように0となっているからである。この時点で外軌側車輪のQ/Pと $\mu_{out}$ とはナダール限界上にある。そこでナダールの式から $\mu_{out}$ を先ず求め、次いで、得た値と式(4)とから算出した内軌側 $\mu_{in}$ と台車移動速度との関係を求めた結果、0.5km/h時の値は0.35程度となった。この値は同条件における外軌側の $\mu_{out}$ が0.10程度であることを踏まえれば相当高い。

このような結果を得た理由は、内軌側のレールと車輪との摩擦接触は枕木方向へ移動する状態で行われる。そして、レール踏面はレール長手方向に研磨を行うため、同方向への顕著な線状痕があることが影響しているのではないかと考えた。なお、レール踏面粗さは $Ra=1.2\sim 2.1\mu m$ と比較的滑らかな状態ではあった。外軌側の接触は回転接触が伴うのに対し、内軌側の枕木方向へは摩擦は滑り接触が主体をあることも影響しているのではないかと考えられる。

### 4.2 実験の方法

前記のような方法で、多様な条件の下で内軌側 $\mu_{in}$ の測定を試みた。測定に際しては外軌側のレール面の条件を以下に示す如く変化させ、台車走行速度も変化させて行った。

- 1) レール・車輪間が清浄で乾燥した状態
- 2) レール・車輪間に油が介在した状態

ここで、実験前には上記の両条件とも、レールと車輪をアセトンで脱脂・洗浄し、錆や摩耗粉の影響を排除した。これは、過去に当研究室でスベリ粘着台車を用いての粘着係数を求める実験で大気相対湿度が比較的低い場合、走行回数が増大につれてレール踏面をす

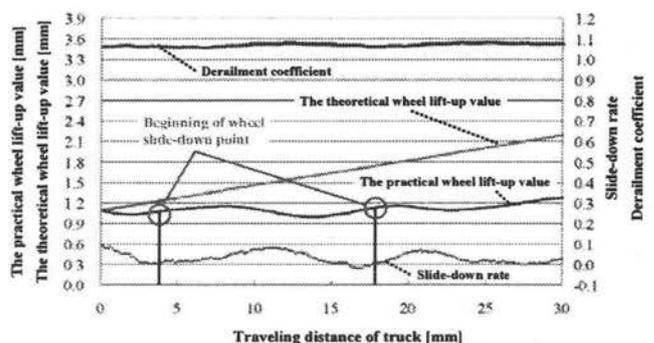


Fig. 2 Datum of Derailment experimentation  
[ Running speed : 0.5km/h ]  
( Temp : 21°C, RH : 41%, Lubricated )

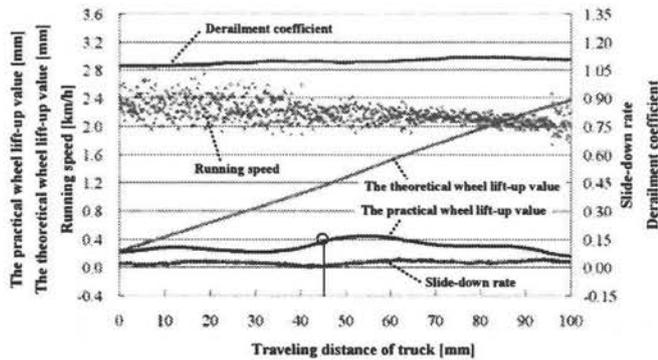


Fig. 3 Datum of Derailment experimentation  
[ Running speed : 2.2 km/h ]  
( Temp:15°C, RH:34%, Clean )

べり走行する車輪が発生させる金属摩耗粉のレール踏面への蓄積の影響によって、粘着係数が次第に高くなる傾向が見られることが確認されているからである<sup>(7)</sup>。

実験では外軌側車輪に顕著なすべり下がり現象を起こしやすくするため、外軌側レールには前記実験と同様に油を塗布した。

#### 4.3 実験結果及び考察

前記の条件で臨界脱線状態を具現させた時の車輪の挙動の一例を図3に示す。実験で内軌側のレールと車輪とは清浄・乾燥状態で走行速度は比較的高い条件である。図中の○印時点で臨界状態に達したと見られる。このような方法で、内軌側レールに油を塗布した状態を含め多様な速度域で臨界脱線状態を具現させ、実験を行い、前述と同じ方法で内軌側の摩擦係数を求めた結果を図4に示す。図中の□プロットは内軌レール乾燥状態の下の結果であり、菱型プロットは油塗布状態のそれである。

結果を見ると、レール状態が異なっても $\mu_m$ の値に大きな差が見られなかった。その原因は内軌側車輪の枕木方向への滑り速度は外軌側車輪の滑り下がり速度のほぼ半分であることなどが原因となったと考えた。

ここで注目すべきは、(4)式からも類推されるように $\mu_m$ には粘着係数や外軌側レールの摩擦係数とは逆の速度依存性、つまり、速度の増加につれ、値が増加する傾向が見られることである。

低速域で顕著な依存性があることについての原因究明は今後の課題である。さらに、多様な条件の下における値を求めること及び内軌側の摩擦係数が脱線に及ぼす影響の究明なども今後の研究課題である。

#### 5. 結論

のり上がり脱線の発生に深く影響を及ぼすとされながら測定困難なために従前不明とされた臨界脱線状態の下における内軌側のレールと車輪との接触点位置における枕木方向の摩擦係数 $\mu_m$ について、筆者らが従前に提案した $\mu_{out}$ を求める法と1/5スケールの模型の

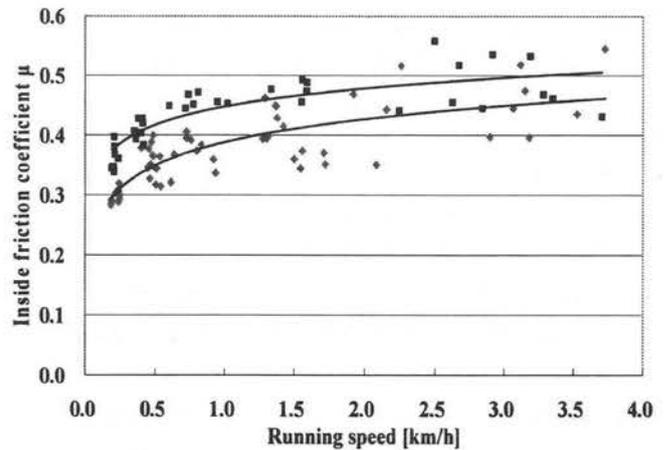


Fig. 4 Relationship between Running speed and  $\mu_m$

実験装置とを用い、車両の走行速度及びレール表面状態を多様に変化させた状態の下で、測定を行った結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 提案した方法によって臨界脱線状態の下における $\mu_m$ が容易に測定可能であることを確認した。
- (2) 前記方法で得た値は、従前に同じ実験装置を使用し同じ条件の下で外軌レールと車輪との間で得た値に比べ、高い値をとることがわかった。
- (3) 得た摩擦係数は低速域で顕著な速度依存性があり、その傾向は外軌側の摩擦係数や粘着係数とは異なり、速度の増加に応じ値も増加する傾向にあると認められる。

本研究の実施に際しては、永瀬研究室平成19年度学部研究生三田村隆広、樋口真秀両君の多大な協力を得た。ここに、その尽力に深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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), Vol. 67, No. 659, (2001-7), 2261-2271.
- 2) 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, 車輪のり上がり量の算出方法), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 73, No. 724, (2007-1), 59-65.
- 3) 橋弘矩, 佐藤祐, 牛若聡, 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), Vol. 73, No. 732, (2007-8), 1-7.
- 4) 永瀬和彦, 橋弘矩: 低速域におけるのり上がり脱線現象防止のための一提案, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 74, No. 745, (2008-9), 1-10.
- 5) 営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線事故に関する調査報告書, 事故調査検討会(運輸省鉄道局技術企画課編), (2000-10), 35.
- 6) 林功, 野村敏明, 永瀬和彦; 大気の状態がレール・車輪間の粘着に及ぼす影響, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 63, No. 606, (1997-2), 246-251.