

S8-1-2 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2報 臨界脱線状態での車輪にかかる力関係から摩擦係数を求める方法 -

○橋 弘矩 (金沢工業大学)、牛若 聡 (金沢工業大学 院)、
[機・電] 永瀬 和彦 (金沢工業大学)

A Study on Measuring μ Value Between Rails and Wheels Under Wheel Climb Derailment
- The 2nd Report, To measure the μ using the Q/P and the Nadal's Equation -

Hironori Hashi (Kanazawa Institute of Technology),
Satoshi Ushiwaka (Kanazawa Institute of Technology),
Kazuhiko Nagase (Kanazawa Institute of Technology)

In the wheel climb derailment critical condition, the relation ship between the derailment coefficient Q/P of the wheel and the friction coefficient μ of the wheel's touch point to the rail is shown by the Nadal's Equation. Therefore, under such a condition, the μ is given by the Q/P on the Nadal's Equation. The authors proposed a newly method to detect the moment when the wheel is put under the wheel climb critical state. Using a model track and a model truck, several experiments were done to gain the Q/P value at the moment when the wheel puts under the critical condition. This paper is described the results of the investigation.

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. はじめに

のり上がり脱線に支配的な影響を及ぼす摩擦係数は、測定法が確立していないこともあって、実態はほとんど解明されていない。のり上がり脱線が発生する時点の摩擦係数を求めることが出来れば未然に防止策をとることが出来る。しかし、レール・車輪間の摩擦係数は、レールとフランジとの接触点が回転しながら上下及び前後に移動する（回転性、移動性）という特殊な状態であるため直接計測することは困難とされてきた。

過去の研究で筆者らは、のり上がり脱線の臨界状態におけるレール・車輪間の接触点位置を高い精度で求める方法を提案し¹⁾、この方法を用いて求められた車輪の理論のり上がり量と実験装置によって得られたせり上がり量が一致することを確認した。理論のり上がり量を高い精度で求めることができたことにより、車輪の理論のり上がり量と実測せり上がり量の差からのり上がり脱線の途上におけるすべり下がり量を求められることを明らかにした。

これらを踏まえ、J-RAIL'04 では求められたすべり下がり量と車輪のせり上がり方向の加速度を求め、接触点において車輪にかかる力と求められたせり上がり方向の加速度から摩擦係数を求められるのではないかと提案したが、測定精度の不足により正確な値を求めることが困難であった²⁾。

そこで、筆者らは車輪がのり上がりを開始した時点及びすべり下がりを開始した時点である臨界脱線状態の下では、

レール・車輪間の摩擦力とすべり下がる力とがつり合っていることに着目し、この状態の下で摩擦係数を求めることが可能であると判断した。なぜならば、臨界脱線状態においては車輪にせり上がり方向の加速度が発生しないため測定精度の不足を回避することができ、車輪にかかる力の関係は、当研究室の実験装置を用いて容易に実測することができるためである。よって、この時点におけるレールと車輪との接触点における力関係から摩擦係数を求めることを試みた。

本報では、提案した方法に基づき、実験装置を使用して脱線実験を行い、臨界脱線状態でレール・車輪間の摩擦力とすべり下がる力とがつり合っている状態から摩擦係数を求めた基礎実験の結果について述べる。

2. のり上がり脱線を生じさせる摩擦係数

車輪にのり上がりが発生する場合でも、それが継続的に発生しなければのり上がり脱線には至らない。このことから、のり上がり脱線を生じさせる摩擦係数とは、レール側面と車輪フランジ部との接触点において滑りが発生せずにのり上がりを継続する状態となったときの摩擦係数、即ち静止摩擦係数である。しかし、この接触点は車輪の回転に応じて回転しながら前方向へ移動する現象も併せ持つ、特異な摩擦状態でもある。

3. 臨界脱線状態における摩擦係数

3.1 臨界脱線状態

臨界脱線状態とは、すべり下がり状態にあった車輪がのり上がりを開始する瞬間及びのり上がり状態にあった車輪がすべり下がりを開始する瞬間であり、このときの脱線係数が臨界脱線係数である。

図1はナダールの式における脱線係数と摩擦係数の関係を示したものである。図中の縦軸は脱線係数、横軸は摩擦係数を示す。のり上がりの臨界脱線係数は図1での①のすべり下がりの領域から②のすべり下がり摩擦によって妨げている領域へ遷移するとき、または②のすべり下がり摩擦によって妨げている領域から①のすべり下がりの領域へ遷移するとき、図示の境界線上に存在する。

3.2 臨界脱線状態における摩擦係数とその求め方

前節で述べた臨界の脱線係数は、図1に示す境界線上に位置するのであるから、この値を求めるためには図1に示す2つの領域間をまたがって移動した瞬間の脱線係数、すなわち、例えば①のすべり下がりの領域（継続的にすべり下がっている状態）から②のすべり下がり摩擦によって妨げている領域（継続的にのり上がっている状態）に遷移した瞬間における脱線係数に対応した摩擦係数の値を読み取れば、この摩擦係数の値が求めるのり上がり脱線の摩擦係数となる。

3.3 のり上がり開始時の摩擦係数

のり上がりを開始する瞬間とは、何らかの因子が関係してレール・フランジ間の摩擦係数が大きくなり、車輪フランジ部が回転しながらレール側面に引っかかりのり上がりを開始した時点のことである。この瞬間における接触点、即ち車輪が引っかった地点の摩擦状態はまだのり上りを継続して行っていない状態であり、車輪は若干すべり下がりながら接触点が前方向へと移動している状態にあるため、動摩擦が支配すると考えられる。

車輪をのり上がり脱線状態に至らしめる摩擦係数は、車輪がのり上がりを開始した時点の摩擦係数のように思われ

る。しかし、この状態では前述したように動摩擦が支配する領域であると推定される。したがって、この状態の下での摩擦係数は2章で述べた本来求めるべき静止摩擦係数とは異なるものであると考えられる。しかしながら、この瞬間に車輪がすべり下がり状態からのり上がり状態へと遷移していることを踏まえると、この値はのり上がり脱線における最初ののり上がり挙動を発生させる摩擦係数であり、臨界脱線状態の下における重要な摩擦係数であることもまた事実である。

3.4 のり上がり解消時の摩擦係数

車輪がのり上がり状態を脱した時点とは、継続的なのり上がりが発生しているとき、何らかの因子が関係してレール・フランジ間の摩擦係数が小さくなり摩擦力が重力によってすべり下がろうとする力よりも小さくなったことにより、車輪がすべり下がり始める瞬間である。この瞬間、レール・フランジ間の接触点の状態は滑りが発生する直前の状態であり、のり上がりが継続的に発生し脱線に至る際に重要となる静止摩擦が支配していると考えられる。

3.5 実験結果を用いた解析

このような考え方に基づいて、具体的な摩擦係数の求め方について以下に述べる。

(i) すべり下がりから継続的なのり上がりを開始した瞬間の摩擦係数

図2は当研究室の1/5スケールの模型実験装置³⁾を使用して得られた車輪の理論のり上がり量と実測せり上がり量を併せて示すものである。図中の縦第1軸に理論のり上がり量と実測せり上がり量、縦第2軸に脱線係数、横軸に台車移動距離を示す。

ここで、理論のり上がり量とは車輪が全くすべり下がることなく継続的にのり上がった場合ののり上がり量のことを示し、実測せり上がり量とは実際の車輪の上下方向の挙動を示している。脱線係数は車輪スポーク部分に取り付けた歪ゲージにより測定した横圧と台車の輪重から求めた値である。

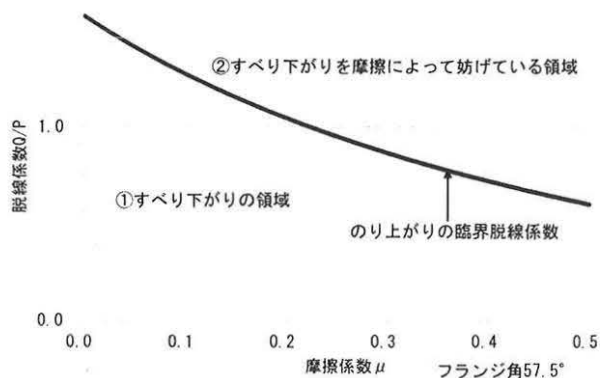


図1 脱線係数と摩擦係数の関係

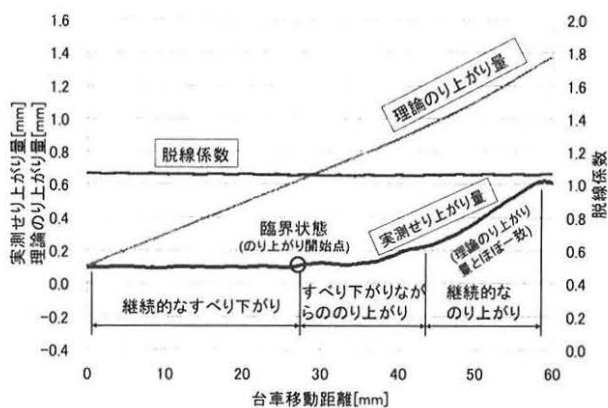


図2 すべり下がりからのり上がりへ遷移した瞬間

まず、図2の図中に図1における①のすべり下がり領域から②のすべり下がり摩擦によって妨げている領域（継続的にのり上がっている状態）に遷移した瞬間と推定される部分を丸印で示した。この時点で、実測せり上がり量の挙動がせり上がり方向へ向かっており、それまで継続的にすべり下がっていた車輪が摩擦によりレール側面に引っかかってのり上がりを開始したと考えられる。しかし、この時点では理論のり上がり量と実測せり上がり量の傾きが一致していないため、すべり下がりが全くない完全なり上がり状態にはなっていない。だが、車輪がすべり下がり状態からのり上がり状態へ遷移していることは明らかである。このことから、この部分で図1に示すのり上りの臨界脱線係数の境界線上を上方向へ横断していると言える。よって、この時点における脱線係数に対応するナダールの式上の摩擦係数を図1から読み取れば摩擦係数を求めることができる。

しかしながら3章3節で述べたように、この時点では若干すべり下がりながら接触点が前方向へと移動している状態であり、動摩擦が支配している世界であると推定されるため、のり上がり脱線の真値の摩擦係数とは異なる可能性が考えられる。しかし、図2に示す実験データからは、他の部分で臨界状態であると思われる部分を特定することはできない。

(ii) 継続的なり上がり状態からすべり下がりを開始した瞬間の摩擦係数

次に、図3に図2と同じく、理論のり上がり量と実測せり上がり量の比較の図を示す。図中の縦第1軸、縦第2軸は図2と同一である。

図3には図1における②のすべり下がり摩擦によって妨げている領域（継続的にのり上がっている状態）から①のすべり下がり領域（継続的にすべり下がっている状態）に遷移した時点を図2と同じ方法により理論のり上がり量と実測せり上がり量から求めてみる。

図3では、台車移動距離80mm付近まではすべり下がり

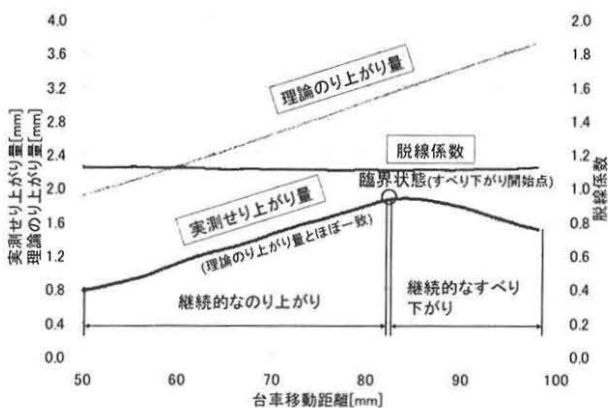


図3 のり上がりからすべり下がりへ遷移した瞬間

が全くなく継続的にのり上がっていた車輪が、図中の丸印で示した部分ですべり下がりを開始し、その状態が継続している。このことから丸印で示した部分で車輪がのり上がり状態からすべり下がり状態へ遷移していることは確かである。つまり、図1に示すのり上りの臨界脱線係数の境界線上を下方へ横断していると言える。よって、この部分での脱線係数に対応する摩擦係数を図1から読み取れば摩擦係数を求めることができる。

しかし、この部分は「のり上がり脱線を生じさせる」摩擦係数ではなく、3章4節で述べたように、「のり上りを解消させる」限界の摩擦係数である。しかも、すべり下がる瞬間は静止摩擦が支配しているので、のり上がり脱線の危機を脱するか否かを正確に評価できる値である。

4. 脱線実験を行って得られた実験データの解析結果

前章で述べた考えに基づいて行った実験によって得られた実験データを解析し、摩擦係数の算出を試みた。解析には図4に示す実験データを用いた。図中の縦第1軸にせり上がり量と台車移動速度を示し、縦第2軸に脱線係数とすべり下がり量、横軸に台車移動距離を示す。実験条件等は図の右下に示す。

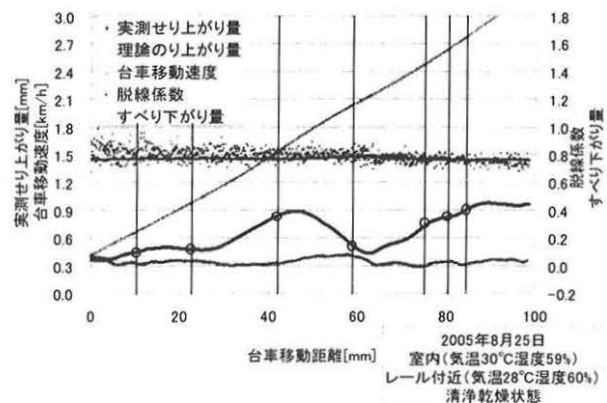


図4 理論のり上がり量と実測せり上がり量の比較

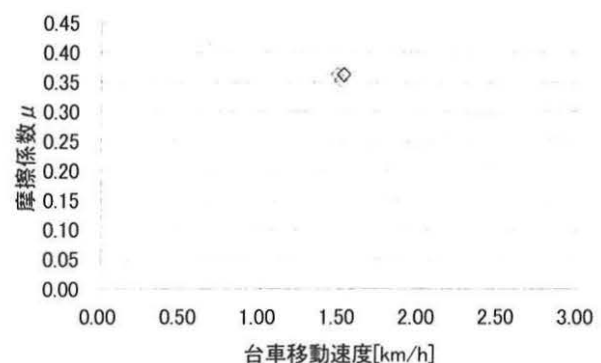


図5 台車移動速度と摩擦係数の関係

ここで、使用した実験装置は実際の車輪の 1/5 スケールの模型台車を使用し、実験軌道は実際の本線上の最小半径の曲率半径 100m の 1/5 である曲率半径 20m の曲線レールで実験を行った。また、実験条件は車輪を清浄状態のレール上を 1.5km/h 程度の低速で走行させた。

提案した方法を用いて摩擦係数を求めるにあたって、実験データの理論のり上がり量に対する実測せり上がり量の挙動から車輪に働く力の向きを判断し、臨界脱線状態である部分を特定しなければならない。図 4 に、前章で述べた考えに基づき臨界脱線状態であると推定される部分に丸印をつけて示した。また、車輪の動きが分かるようにのり上がり状態とすべり下がり状態の領域に分けて示した。

台車移動距離 5mm から 15mm の範囲、25mm から 45mm の範囲、60mm から 75mm の範囲、80mm から 85mm の範囲で、のり上がりからすべり下がりへと遷移していることが見てとれる。また、台車移動距離 15mm から 25 の範囲、45mm から 60mm の範囲、75mm から 80mm の範囲で、すべり下がりからのり上がりへ遷移していることが見てとれる。このことから丸印で示したすべり下がりからのり上がり又はのり上がりからすべり下がりへと遷移している瞬間の部分の摩擦係数を図 1 の臨界脱線係数と摩擦係数の関係から算出した。

算出して求められた摩擦係数と台車移動速度の関係を図 5 に示した。図中の縦軸に摩擦係数、横軸に台車移動速度を示す。図 5 を見ると、清浄乾燥状態における台車移動速度約 1.50km/h での摩擦係数の値は約 0.35 となった。これは過去に当研究室での実験装置によって求められた粘着係数の値と近い値となった。このことから提案した方法によってのり上がり脱線を生じさせるレール・車輪間の摩擦係数を正確に求めることができたと考えられる。今後はこの方法を用いて摩擦係数の算出を行い、台車移動速度を変化させてのり上がり脱線におけるレール・車輪間の摩擦係数に粘着係数と同様の傾向があるか調査していく必要がある。

5. 結論

実測することが至難とされた臨界脱線状態におけるレール・車輪間の摩擦係数について、模型の実験装置などを用いその値を求める方法を模索した結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 車輪ののり上がり開始時点及びすべり下がり開始時点におけるレール・車輪間の摩擦力とすべり下がる方向との力関係から、摩擦係数が求められる可能性があることがわかった。
- (2) 上記の車輪のり上がり開始時点は臨界脱線状態にあり、この時点は車輪の理論のり上がり量と実測せり上がり量の挙動を対比することによって正確に特定で

きることがわかった。

- (3) 上記した方法によって臨界脱線状態を捉え、この時点における脱線係数に対応した摩擦係数をナダールの式から求める方法によって摩擦係数の測定を試みた結果、のり上がり脱線における摩擦係数が求められることを明らかにした。
- (4) のり上がり脱線状態における車輪フランジ部とレール側面の摩擦係数の値は、車輪踏面とレール頭頂面の転動接触の摩擦係数である粘着係数の値は、極めて近い値をとる可能性があることがわかった。

本研究を行うにあたり、当研究室の研究生、佐藤祐君、木村純一君などの協力を得た。ここに関係者各位に感謝の意を表す。

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 - 第二報 レール・車輪間の接触点位置測定 -、機論、67 - 659、C(2001 - 7)、168 - 173
- 2) 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 - 第四報 臨界脱線状態下における車輪の挙動の詳細 -、平成 16 年鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'04)、pp355~358
- 3) 永瀬和彦、坂原洋行、野村俊明：低速域におけるのり上がり脱線現象解明の一研究 - 第一報 模型実験装置による基礎実験結果 -、機論、66-652、C(2000-12)、68 - 75
- 4) 林攻、野村俊明、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、機論、63-606、C(1997-2)、246 - 251