

S8-1-1 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1報 のり上がり・すべり下がり挙動による加速度を利用した摩擦係数の計測 -

○牛若 聡 (金沢工業大学 院)、橋 弘矩 (金沢工業大学)、

[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 1st Report, Results of Fundamental Experimentation -

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

To quantitatively evaluate the risk of wheel climb derailment, it is necessary to gain the practical μ value between the rail and the wheel under the critical wheel climb-up condition. However, it has been said to be impossible to gain such a value. The authors introduced a wheel climb-up detective sensor which could accurately measure the wheel climb-up value from the rail tread and the vertical wheel climb-up speed against the rail tread, and measured these values. They newly proposed the method to measure and calculate the μ value from the wheel acceleration value in a vertical direction, and did experimentation on the above mentioned method. The paper describes the result of the experiment.

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

急曲線や番数の小さい分機を低速で通過する際に発生する「のり上がり脱線」の詳細なメカニズムを解明するために、筆者らは1/5縮尺模型の実験装置を製作し、のり上がり脱線の再現実験を行ってきた。

筆者らが行った過去の研究において、従前求めることが困難とされてきた車輪のせり上がり量やアタック角に応じて多様に変化するレール・車輪間の接触点位置を高い精度で求める方法を提案した²⁾。この方法で求めた接触点と新たに提案した方法によって求めたのり上がり量である「理論のり上がり量」は、実験装置によって実測されたせり上がり量とよく一致することを確認した³⁾。また、理論のり上がり量を高い精度で得たことにより、理論のり上がり量と実測せり上がり量との差から「すべり下がり」現象が発生していることを明らかにし、曲線通過時にはすべり下がり現象の発生によってのり上がり脱線が阻止されていることを明らかにした。

このことを踏まえて筆者らは脱線実験データの解析を行い、曲線通過時にはのり上がりとすべり下がり両方の現象が断続的に発生していることを確認した。このとき脱線

係数が一定であるならば、車輪にのり上がり現象が発生し脱線に至るか、それともすべり下がり現象によって脱線せずに済むか、それはレール・車輪間の摩擦係数 μ によって定まる。しかし、のり上がり現象発生時のレール・車輪間の接触点は回転しながら移動するという特殊な状態にあるため、これまでこの摩擦係数 μ の測定は不可能とされてきた。

本研究では、のり上がり脱線現象において重要な要素である、のり上がり現象発生時のレール・車輪間の摩擦係数を、車輪の挙動と車輪に加わる力との関係から求める方法を提案し、実験装置を用いた脱線実験から得られたデータを用いて、提案した方法による解析を行い摩擦係数 μ の測定を試みた。以下にその結果について報告する。

2. 車輪の動的な挙動を利用した摩擦係数の測定方法

2.1 概要

車輪が正常な状態で曲線を通る状態、すなわち車輪が連続的にすべり下がる「すべり下がり状態」から「のり上がり状態」へ、または「のり上がり状態」から「すべり下がり状態」へと遷移する際、車輪にはせり上がり方向の

加速度（以下、「せり上がり加速度」とする）が生じる。せり上がり加速度は、レール・車輪間の摩擦によってのり上がろうとする上向きの力と台車に加わる重力加速度によってすべり下がろうとする下向きの力との差によって生じるものである。このことから、筆者らはせり上がり加速度と車輪に加わる力を測定することで、ニュートン力学の第2法則に基づき摩擦係数 μ を算出することができるのではと考えた。その考えに基づき、先に述べた実験装置を用いて脱線実験を行い、得られた実験結果を解析することにより摩擦係数 μ を求める方法を提案する。

2.2 摩擦係数と車輪に加わる力及びせり上がり加速度の関係

脱線実験で得られたデータからのり上がり脱線時のレール・車輪間の摩擦係数 μ を求める上で最も重要となることは、車輪のせり上がり加速度と車輪に加わる力との関係である。レール・車輪間の接触点に働く力を図1に示す。図中の α はフランジ角度、 P は輪重、 Q は横圧、 A は P と Q のフランジ面に垂直な成分の合力、 B は P と Q のフランジ面に沿う方向の成分の合力、 $A\mu$ は接触点において発生する摩擦力である。筆者らが実験に用いている実験装置では、水平方向の力である横圧 Q と鉛直方向の力である輪重 P をそれぞれ歪ゲージを用いて測定している。そのため、この2つの力からせり上がり方向の力とすべり下がり方向の力を求める。まず、横圧 Q と輪重 P をフランジ面に垂直な方向の力 A とフランジ面に沿う方向の力 B とに分解すると、以下のように表すことができる。

$$A = P \cos \alpha + Q \sin \alpha$$

$$B = P \sin \alpha - Q \cos \alpha$$

接触点において車輪に働く摩擦力はフランジ面に垂直な方向の力に摩擦係数を乗じたものとなるので、 $A\mu$ と表すことができる。また、摩擦力はすべり下がり方向の力である B を妨げるように働くため、せり上がり方向の力となる。よって、接触点において車輪に加わるせり上がり方向の力は、 $A\mu - B$ で表される。この力によって発生するのり上がり、すべり下がりの挙動に関与する質量を m 、生じ

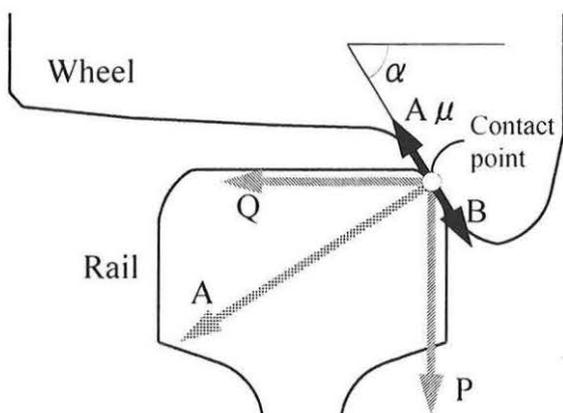


図1 接触点において車輪に加わる力

たせり上がり加速度を β とし、内規側レール・車輪間の摩擦、車輪の回転運動や微小滑り（クリープ）による影響を無視すると、ニュートン力学の第2法則より、車輪に加わる力とせり上がり加速度の関係は下式によって表すことができる。

$$A\mu - B = m\beta$$

$$\therefore \mu = \frac{B + m\beta}{A}$$

この方法によって得られる摩擦係数 μ は、レール側面と車輪フランジ部分との間の接触点において滑りが発生しているときのものであり、動摩擦である。そのため接触点において滑りが発生せず、静止摩擦であると考えられる状態、即ち順調にのり上がり現象が持続しているときの摩擦係数 μ とは異なると考えられる。しかし、のり上がり脱線が正に始まろうとする瞬間、即ち車輪がのり上がり現象を開始する瞬間の摩擦係数 μ は動摩擦であると考えられる。なぜなら、のり上がり現象を開始する瞬間までは車輪はすべり下がり続けていたためである。したがって、この方法によって得られる摩擦係数 μ はのり上がり脱線現象を論ずる上で、本来求めるべき摩擦係数 μ であると考えられる。

3. 実験装置及び実験方法

3.1 横圧付加装置

実験に用いる実験装置では図2に示すように、脱線実験で車輪を脱線させる台車（以下、「脱線台車」とする）とこれに連結して脱線台車に横圧を与える付随台車の連結部において、脱線台車後部に取り付けられたワイヤ引張用補強板の先端をワイヤを用いて後方に引くことで、脱線台車の前軸外軌側車輪に横圧を付加している。ワイヤはばねばかりとターンバックルを介して付随台車と接続されており、これによって目的とする横圧を自由に設定でき、脱線実験時の横圧を一定に保持することができる構造となっている。

3.2 実験台車及び実験軌道

実験に用いた脱線台車は軸距 2100mm の片持ミンデン式の台車、車輪は JR において標準的に用いられている基本踏面（勾配 1:20、フランジ角度 57.5° ）を持つ車輪をそ

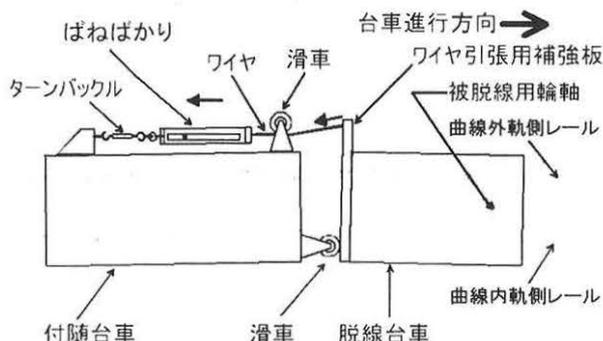


図2 横圧付加装置の上面図

それぞれ 1/5 に縮小した模型を用いた。

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、これを本線において通常使用されている最小の曲率半径である 100m の 1/5、すなわち曲率半径 20m の曲線とし、カント、スラック及び緩和曲線は付与していない。

3.3 せり上がり量測定装置

前軸外軌側車輪のせり上がり量を測定するため、測定に用いるレーザー変位系の取付位置は前軸外軌側車輪の直後、外軌側レールの上とし、輪軸の傾斜などの影響を排除した状態の下で車輪の挙動を測定するため、前軸の両端と後軸外軌側端の 3 点によって支持されるフレームに取り付けた。

車輪の挙動を測定するため、せり上がり量の測定にレーザー変位計（分解能 0.5 μ m）、移動距離の測定にレーザー変位計（分解能 50 μ m）、車輪の回転角度測定にロータリーエンコーダ（分解能 20000ppr）を用いた。

3.4 横圧及び輪重の測定装置

前軸外軌側車輪に加わる力を測定するため、前軸外軌側車輪スポーク部分側面に歪ゲージを貼り付け、加わった力による車輪の変形量を測定することによって横圧と輪重の測定を行っている。

3.5 実験方法

レール及び車輪踏面はアセトンで脱脂、洗浄し清浄乾燥状態とした。横圧付加装置によって前軸外軌側車輪に横圧

を与え、走行速度は一定となるよう走行させた。その際、測定区間内（100mm）におけるせり上がり量、台車移動距離、車輪回転角度、横圧及び輪重をアナライジングレコーダ（横河電機 AR4400）を用いて記録し、そのデータを用いてのり上がり脱線現象の解析を行った。

4. 実験装置で得られた実験データを用いた解析

解析に用いた比較的低速（約 0.8km/h）での実験結果を図 3 に示す。実験時の気温及び湿度は図示の通りである。図中の縦軸第 1 軸に理論のり上がり量と実測せり上がり量、第 2 軸に台車移動速度と脱線係数、横軸に台車移動距離を示す。また、この方法を用いて実験データからレール・車輪間の摩擦係数を求める場合、レール・車輪間の接触点において滑りが発生していないとき、即ち理論のり上がり量どおりにのり上がり現象が発生しすべり下がり現象が発生していないときには 2 章 2 節の式を適用することはできず、摩擦係数 μ を求めることは不可能である。そのため、図 3 のデータを元に理論のり上がり量と実測せり上がり量との差からすべり下がり量を求めたものを図 4 に示す。図中の縦軸第 1 軸に理論のり上がり量と実測せり上がり量、第 2 軸にすべり下がり量、横軸に台車移動距離を示す。

図 4 に黒く示した、台車移動距離が 45~57mm、67~71mm、86~90mm の範囲においては、すべり下がり量が

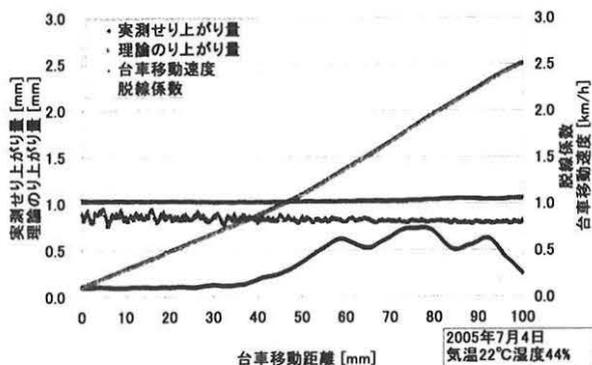


図 3 のり上がりとすべり下がりの挙動

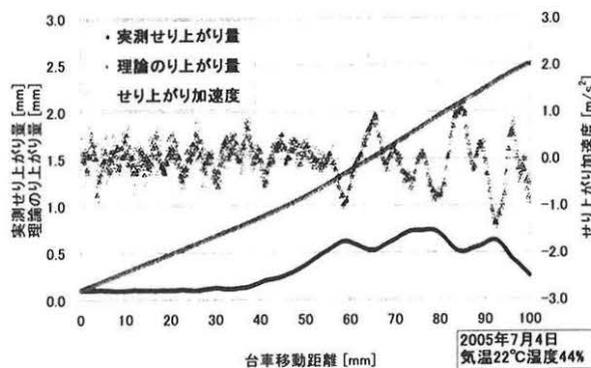


図 5 実験データから求めたせり上がり加速度

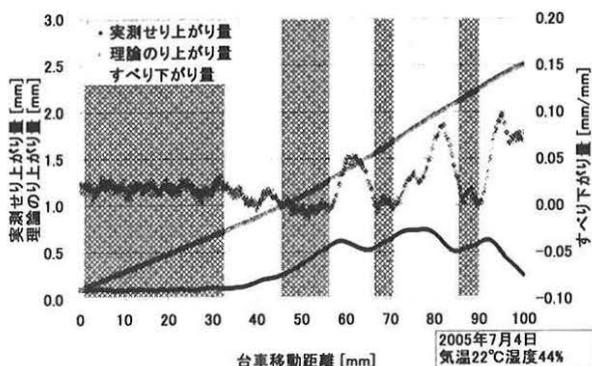


図 4 すべり下がり量と摩擦係数の測定可能範囲との関係

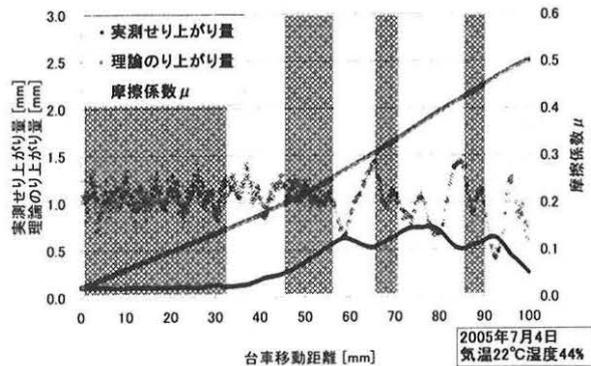


図 6 実験データから求めた摩擦係数 μ

ほぼ0となり実測せり上がり量の変化率が理論のり上がり量のそれと一致しており接触点にすべりが発生しないため、摩擦係数 μ を求めることはできない。また、台車移動距離が32mmまではせり上がりが発生せず、車輪踏面とレール踏面が接触している状態である。このような部分では、せり上がりの挙動から摩擦係数 μ を求める2章2節の式を適用することはできない。台車移動距離が35~45mmの範囲では、車輪はせり上がり方向に加速していることから、のり上がりの状態にあると考えられる。同様に台車移動距離が63~67mm, 82~86mmの範囲ものり上がりの状態にあると考えられる。台車移動距離が57~63mmの範囲では、のり上がりが発生していた状態からすべり下がり方向に加速し、すべり下がり現象が発生していることから、すべり下がり状態にあると考えられる。同様に台車移動距離が71~82mm, 90~95mmの範囲もすべり下がり状態にあると考えられる。図を見てわかるように、台車移動距離35mm以降ではのり上がり現象とすべり下がり現象を断続的に繰り返しており、脱線係数はほぼ一定であることからレール・車輪間の摩擦係数 μ が変動していると考えられる。

この実験データから摩擦係数を求めるにあたり、まずは実測せり上がり量を2回微分し、せり上がり速度を経てせり上がり加速度を求めた。実験時の気温、湿度は図示の通りである。図3に示した実験データの実測せり上がり量及び理論のり上がり量とせり上がり加速度の関係を図5に示す。図中の縦軸第1軸に理論のり上がり量と実測せり上がり量、第2軸にせり上がり加速度、横軸に台車移動距離を示す。ここで得た加速度から、2章2節で示したせり上がり加速度と接触点において車輪に加わる力との関係式を用いて算出した摩擦係数 μ と実測せり上がり量、理論のり上がり量の関係を図6に示す。図中の縦軸第1軸に理論のり上がり量と実測せり上がり量、第2軸に摩擦係数、横軸に台車移動距離を示す。

図5のせり上がり加速度、図6の摩擦係数ともに台車移動距離が0~50mmまでは50mm以降と比較して値のばらつきが大きい。この原因は、前半部分では測定範囲の前方に設置している台車移動距離測定用レーザー変位計までの距離が遠く、台車移動距離の測定精度が不足するためであると考えられ、摩擦係数 μ を正確に測定するためにはさらなる測定精度の向上が必要である。しかし、台車移動距離が50mm以降ではばらつきが小さく、摩擦係数 μ の変化を評価することが可能である。

図6では、50mm以降ののり上がりとすべり下がり断続的に繰り返している部分において、車輪ののり上がりが発生した瞬間には摩擦係数が最大で0.3程度まで大きくなり、逆にすべり下がりが発生した瞬間には摩擦係数 μ は0.08程度まで低くなっており、極短い距離において、接触状態が大きく変動したとは考え難い条件であるにもかかわらず摩擦係数が大きく変動していることがわかる。また、摩擦係数 μ の平均値は0.23程度であり、過去に粘着台車を

用いて測定したレール・車輪間の粘着係数と近い値となった⁴⁾。

5. 結論

のり上がり脱線現象に支配的な影響を及ぼすとされながら、これまでその値が全く不明であったのり上がり脱線時のレール・車輪間の摩擦係数を測定するため、筆者らは車輪にかかる力と車輪の動的な挙動との関係から、この摩擦係数を求める方法を提案し、のり上がり脱線実験において測定した車輪の挙動と車輪に加わる力とからレール・車輪間の摩擦係数 μ の測定を試みた結果、以下のようなことがわかった。

- 1) レール・車輪間の摩擦力と車輪の動的な挙動との関係を明らかにし、すべり下がり現象にレール・車輪間の摩擦力が深く関わっていることを明らかにした。
- 2) 車輪の動的挙動と車輪に加わる力との関係からレール・車輪間の摩擦係数を求める方法を新たに提案した。
- 3) 上記の方法でレール・車輪間の摩擦係数の測定を試みた結果、この方法で摩擦係数を連続的に求めることができることを確認した。
- 4) レール・車輪間の接触状態がほぼ一定と考えられる条件下で極短い移動距離内においても、摩擦係数は大きく変動することがわかった。
- 5) のり上がり脱線時のレール・車輪間の摩擦係数 μ はレール長手方向の摩擦係数である粘着係数と近い値をとると推定される。

今後の課題として、摩擦係数 μ の算出に用いる台車移動距離などの値をさらに正確に求める必要がある。

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) 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1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
- 2) 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—、機論、67-659、C(2001-7)、168-173
- 3) 若林雄介、佐藤祐、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—、機論、
- 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