

S8-4-5.

転削車輪フランジ部の摩擦に関する研究

○ 伴 巧 [機] 柿嶋秀史 [機] 飯田浩平 [機] 前橋栄一 [土] 石田 誠 (鉄道総研)

A Study on Friction at the Machined Surface of Wheel Flange

Takumi BAN, Hideshi KAKISHIMA, Kohei IIDA, Eiichi MAEBASHI and Makoto ISHIDA (RTRI)

It is a very crucial issue for railway engineering to prevent derailment accidents in spite of assuming many influential factors. These accidents are so complicated that any decisive solution has not been so far obtained. In particular, the coefficient of friction and the phenomenon of rolling contact between rail gauge corner and wheel flange has not been understood clearly. Furthermore, some of wheels that tread surfaces including flanges were machined very often posed problems with wheel climb derailments. In this study, the authors developed an actual scale rail / wheel contact testing machine and some interesting experimental results such as the effects of surface roughness on wheel flange climb mechanism were obtained. As a result, it was found that surface roughness increased by machining wheel flange did not cause the coefficient of friction to increase. However, surface hardness was suggested with an important factor for climbing when the lateral creep force acts on small contact area at the flange surface.

キーワード：車輪転削、フランジ、摩擦、乗り上がり脱線

Keywords: Wheel machining, Flange, Friction, Wheel climb derailment

1. はじめに

急曲線区間における車輪フランジ／レールゲージコーナ間の摩擦現象は、低速走行時に発生するフランジ乗り上がり脱線、フランジ直立摩耗およびレール側摩耗、および騒音（きしり音）といった種々の問題に関与する。とりわけ、走行安全の観点から、乗り上がり脱線の防止は早急に解決すべき重要な課題である。筆者らは車輪フランジ乗り上がりの要因となるフランジ／レール接触部における摩擦係数増大のメカニズムを解明する目的で、実物大の車輪／レール接触試験機を開発した¹⁾。本稿では、当該試験機と車輪動摩擦係数測定装置²⁾を用いて実施した、相対的に乗り上がり脱線の発生頻度が高い、転削後の車輪フランジに対する摩擦試験の結果について報告する。

2. 車輪／レール接触往復運動ユニット

車輪／レール接触往復運動ユニットは、実物の車輪とレールの接触状態を準静的に再現することを目的に、平成 15 年に既存の大型試験機（車輪割損試験装置）上部に設置したもので、これにより、試験用の車輪フランジ／レールゲージコーナ間に実車相当の輪重と横圧を負荷しながらレールを直線運動させることができる。本試験機は図 1 および図 2 に示すように、天地を逆にした車輪／レール間に最大で 50kN の輪重と 40kN の横圧および 20kN の接線力を油圧によりレールを固定するベースプレートへ加える構造と

なっている。また、レールは接線力方向（レール長手方向）に 0.8m の範囲内で最速 100mm/sec の移動が可能で、各力作用方向（3 軸方向）の可動量は変位計で測定される。なお、アタック角は±3° の範囲内で任意に設定することができる。

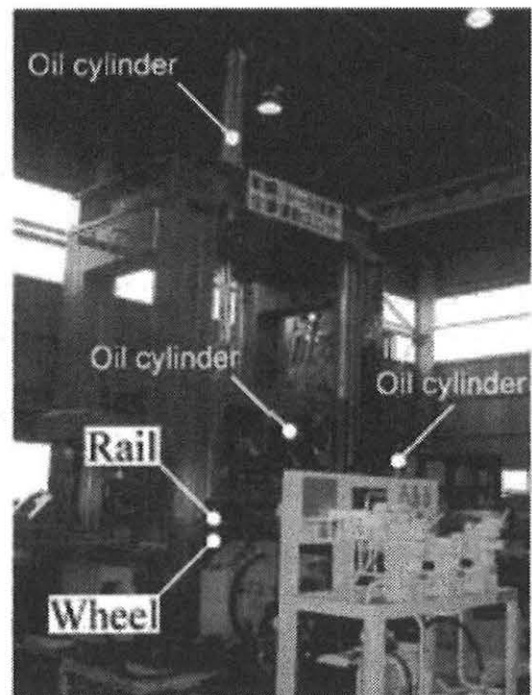


図 1 車輪／レール接触往復運動ユニットの外観

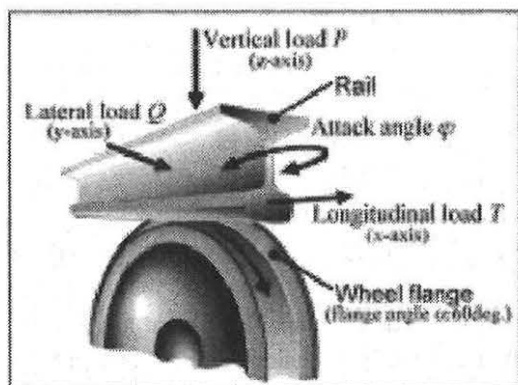


図2 車輪／レール接触状態の模式図

本試験機によるグリース潤滑下のフランジ／レール摩擦試験結果の一例を図3に示す。図の横軸は車輪の回転距離で、縦軸は輪重 P 、横圧 Q 、 Q/P および輪重方向の変位（上昇量） z である。当該試験では、一定横圧の载荷中に輪重を徐々に低下させてフランジ乗り上がりが発生させるもので、上昇開始時の Q/P からナダル式を用いて等価摩擦係数 μ_e を算出する。このようにして求めたグリース潤滑下における μ_e は 0.17 であった。ちなみに、同様の手法で求めた乾燥状態の μ_e は 0.51 であった。これらの結果は、一般的に知られている鋼材の摩擦係数として妥当な数値といえる。

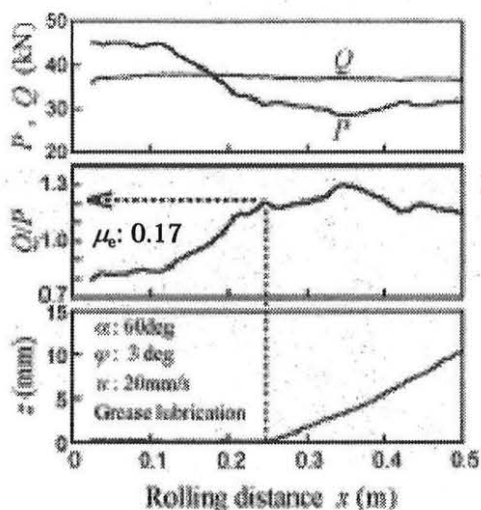


図3 測定結果の一例（グリース潤滑）

3. 転削車輪フランジ部の摩擦試験

<3.1> 試験用車輪の転削方法

車輪の転削で生じるフランジ部の表面粗さ（切削痕）の増大が摩擦係数に及ぼす影響を検証するために、NC 旋盤を用いて、切削条件の異なる 3 種の試験用車輪を製作した。図4は、試験前に測定したフランジ部の表面形状（粗さ）と感圧紙で測定した車輪／レールの接触面積を示したもの

である。なお、この際の車輪およびレール断面形状と接触状態を模式的に図5に示す。

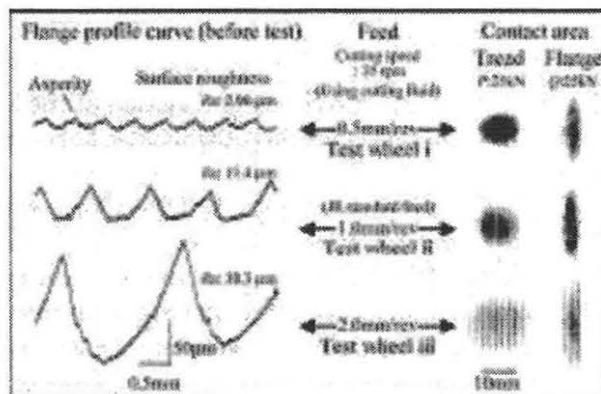


図4 切削条件の異なる試験用車輪フランジ部の表面形状（粗さ）と車輪／レールの接触面積

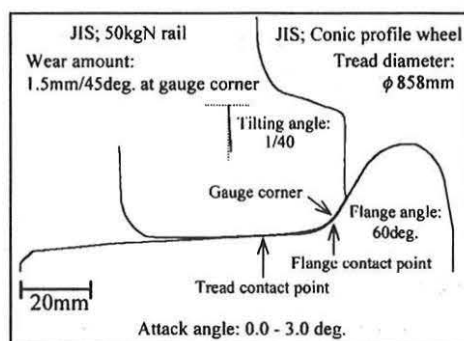


図5 車輪／レールの接触状態

通常、運転所などの在姿旋盤で行われる転削は送り速度が 1mm/rev 前後で、今回の試験用車輪 ii（図4中央）がその標準転削に相当する。なお、切削に際して、切削液を使用した点で実際の在姿旋盤とは異なるものの、突起形状および表面硬さが実際と一致することを確認している。

<3.2> 摩擦試験の方法および試験結果

車輪／レール接触往復運動ユニットによるフランジ／レールの摩擦試験は、 1.5° のアタック角で、初期輪重が 30kN、横圧が 25kN、走行速度が 20mm/sec の条件で繰り返し行った。図6は繰り返し数が 20 回時の車輪表面の写真で、レールゲージコーナとの接触でフランジ表面の幅約 6mm で粗さの突起先端が摩耗および塑性変形している様子が確認できる。この摩耗・塑性変形は初回の試験で、既に幅約 3mm が形成され、数回の試験後には 6mm に達する。しかしながら、突起形状が一番大きい試験車輪 iii では、20 回の試験後においても突起の完全な消滅は認められない。また、ここまでの繰り返し試験では輪重、横圧およびフランジ上昇量（注：実際にはレールの上下変位）に変化はないが、21 回

目以降の試験では、各試験車輪とも接触部から摩擦音（きしり音）が発生し、わずかなフランジ上昇が観測された。一般に摩擦音は、“スティック-スリップ”による振動が発生源であり、静摩擦係数と動摩擦係数の差が大きい場合に観測される。すなわち、フランジの上昇に際し、フランジ/レールゲージコーナ間の接触部に振動が生じることを意味している。なお、わずかに上昇したフランジは試験途中で下降した。このことは、上昇によりフランジの未接触面（転削処女面）の摩擦係数が繰り返し擦られていた面（Chafed surface）の摩擦係数より小さいことを示唆するものである。

次に、25 回目の試験結果（試験車輪 iii）を図 7 に示す。フランジ上昇量 z が約 1.8mm の地点で増加し始める Q/P は、フランジの下降途中で最大値を示している。この結果より、上昇開始時の Q/P と、下降開始時の Q/P および最大 Q/P の値を基に等価摩擦係数を算出し、フランジの初期表面粗さとの関係を図 8 に示す。ここで、上昇開始時の Q/P は繰り返し擦られていた面の静摩擦係数、下降開始時の Q/P は転削処女面の静摩擦係数、および下降中の Q/P は繰り返し擦られていた面の動摩擦係数に相当するものと考えられる。図 8 より、フランジ部の表面粗さが增大しても等価摩擦係数は大きく変化しないことが判明した。

さらに、25 回目の試験終了後、フランジ面の動摩擦係数を車輪動摩擦係数測定装置「 μ -テスター」で測定した。図 9 は μ -テスターの測定原理を示したもので、測定結果をフランジの初期表面粗さとの関係として図 10 に示す。この測定結果においても転削処女面の動摩擦係数は繰り返し擦られていた面の動摩擦係数より小さく、表面粗さが增大しても動摩擦係数が增大することはなかった。

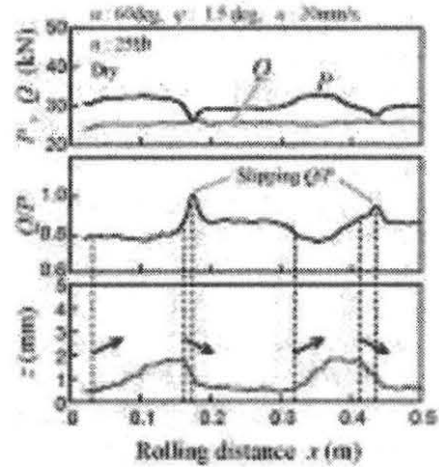


図 7 25 回目の試験結果（試験車輪 iii）

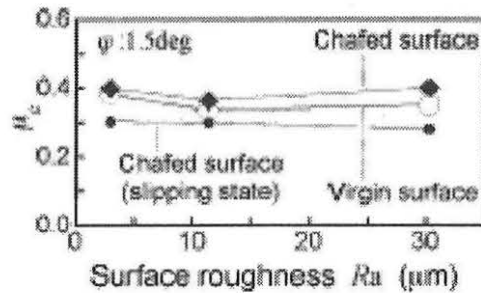


図 8 表面粗さと等価摩擦係数の関係

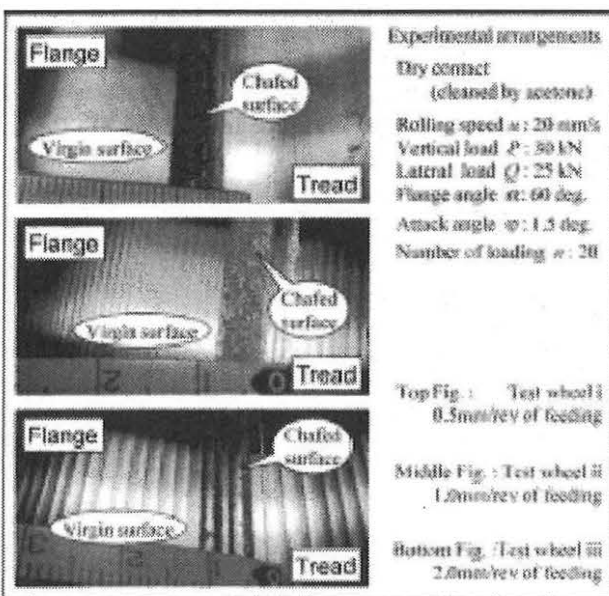


図 6 20 回の繰り返し摩擦試験後の車輪表面の状態

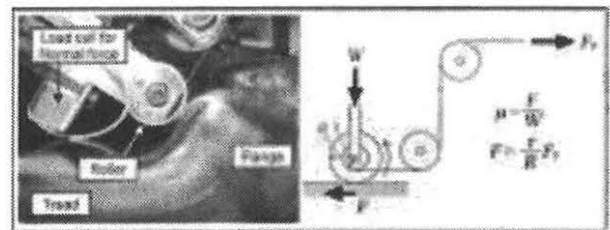


図 9 μ -テスターの測定原理

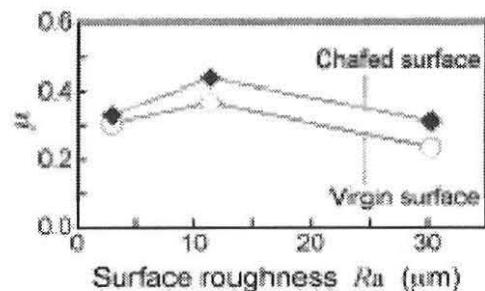


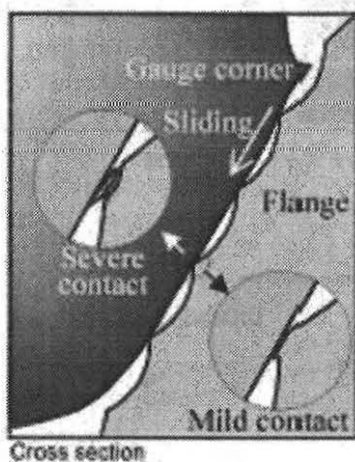
図 10 μ -テスターによる動摩擦係数の測定結果

<3.3>考察

一定の QP の下でも、フランジ／レールの接触を繰り返すことでフランジ上昇が発生するようになるのは、表面に付着するわずかな汚れが摩耗粉としてはく離し、活性な金属面が露出することで摩擦係数の増大をもたらすためと推定される。

また、フランジ上昇時に観測された摩擦音は、静摩擦係数と動摩擦係数との差が大きい場合にスティック-スリップに伴う摩擦振動により放出されるものであるが、Nagase らは模型台車による実験で、フランジの乗り上がり時には、同時にスリップ-ダウンが発生していることを観測³⁾していることから、今回の試験で観測された摩擦音は、上下方向の微小振動に起因して発生した可能性が高い。しかしながら、他の実験⁴⁾において、過大な QP を負荷した状態で、連続的にフランジが上昇する場合には摩擦音の発生が観測されないことが多い。したがって、この現象は低摩擦係数から高摩擦係数へ移行する過程で生じるものと推測される。

なお、今回の試験条件では、転削による車輪フランジ部の表面粗さの増大が、摩擦係数を増大させることはなかった。この結果については、図 4 に示した粗さの形状と接触状態から考察した。第 1 に、切削の送り速度を変えてできる表面形状は、相似形ではなく、突起が大きくなるにしたがい突起先端が鋭角になる。と同時に、レールと接触する突起の数が減少する。すなわち、粗さが大きい場合は突起に加わる垂直方向の応力が増加し、突起先端では水平方向の幅が狭い状況にあること。第 2 に突起先端とレールの間に強い摩擦力（あるいはラック・ピニオンの力）が発生しても、図 11 に示すように突起の強度が摩擦力に耐えられなければ塑性変形もしくは摩耗により力の伝達が阻害されてしまうこと。以上のことから、表面粗さの増大が、その事象単独で、摩擦係数を増大させる主因にはならないものと推測される。



*摩擦係数が高くても突起の強度が小さければ、結果的に大きな摩擦係数は観測されない。

*摩擦係数が低くても突起の強度が大きければ、力の伝達が阻害されない。

図 11 粗さ突起先端の想定される接触状態を示す模式図

4. まとめ

今回実施した転削車輪フランジ部の摩擦試験の結果および考察を以下にまとめる。

- ・ フランジ／レールの接触で繰り返し擦られると、その面の摩擦係数は増大する。これは表面に付着するわずかな汚れが摩耗粉としてはく離し、活性な金属面が露出するためと推定される。
- ・ 特定の条件下では、フランジの上昇時に摩擦音（きしり音）が発生する。これは、静摩擦係数と動摩擦係数の差が大きいため、低摩擦係数から高摩擦係数へ移行する過程で生じるものと考えられる。
- ・ 表面粗さの増大が、その事象単独で、摩擦係数を増大させる主因ではないことが判明した。すなわち、粗さ突起部の強さ等の影響も考慮する必要がある。

5. おわりに

摩擦現象の研究は、関与する因子の多さから、定量的な結果を得ることが困難な分野である。しかしながら、車輪フランジ乗り上がりの要因となる、フランジ／レール接触部の摩擦に関する基礎研究は鉄道輸送の安全確保に不可欠なため、今後も実験的検証を進めるとともに、乗り上がり防止に、より確実に効果的な対策の早期実現を目的とした技術開発も行う予定である。

文献

- 1) 石田誠、他：車輪／レールに関する大型実験設備、RRR, pp.8-12, 6月号, 2004
- 2) 飯田浩平、他：車輪動摩擦係数測定装置「 μ -テスター」の開発、J-Rail 2003, pp.513-514
- 3) K Nagase, et.al. : A study of the phenomenon of wheel climb derailment, Proc ImechE Vol 216 PartF, p237, 2002
- 4) 伴巧：未発表