

3206 レール摩擦係数の実態調査

Research of rail friction coefficient

正[土] 石田 誠 (鉄道総研)

伴 巧 (鉄道総研)

正[土] 青木 宣頼 (鉄道総研)

Makoto Ishida, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Takumi Ban, Railway Technical Research Institute

Fusayoshi Aoki, Railway Technical Research Institute

The terrible derailment accident happened in a Japanese metro in spring, 2000. The accident investigation committee established by the government pointed out several causes of the flange climb derailment which means that a wheel flange climbs up the gauge corner of a high rail usually at sharp curves. One of most difficult causes to understand its characteristics was the coefficient of friction. Measurements of friction coefficient of rails were carried out at 20 track sites. In this paper, the influence of operational frequency of trains, humidity and some other parameters on friction coefficient are described.

Keyword: derailment, coefficient of friction, track site measurement,

1. はじめに

平成12年3月に発生した地下鉄日比谷線脱線衝突事故以降、急曲線低速走行時の脱線現象は走行安全性に関わる最重要な課題として、関連の研究がなされている。この事故に関する調査検討会がまとめた報告書¹⁾において、車輪/レール間の摩擦係数の上昇が事故発生原因の一つとして挙げられ、その摩擦係数の実態把握と原理の解明が検討課題とされた。本稿では、この検討課題に関する急曲線走行時の車輪/レール間の作用力と摩擦係数の関わり及び営業線を中心に行われたレール動摩擦係数の測定結果について報告する。

2. 急曲線走行時の車輪/レール間の作用力

車両が曲線を通る際に、車輪とレールとの間に作用する力を図1に示す。図に示すように、一般的には台車前軸の操舵不足により発生するアタック角に起因した内軌側の大きな横クリープ力(車両の進行方向に対して横方向の作用力)と、その前軸が可能な限りの輪軸左右変位を取るのに対して台車後軸は十分に変位しないため、輪径差不足から前軸よりも大きな縦クリープ力(車両の進行方向の作用力)が発生する。さらに、この後軸の左右車輪の縦クリープ力により生じる輪軸のモーメントに台車としてバランスを保持

するために前軸の外軌側に横圧が付加され、一般的には、レール頭頂面と車輪踏面の横クリープ力では不足するために、車輪フランジとレールゲージコーナ接触によるフランジ反力が発生する。このような作用力に関して、横クリープ力は接触点の動摩擦係数(あるいはすべり摩擦係数と呼ばれる場合もある)に大いに影響される。特に内軌側の横クリープ力は、車輪が外軌に乗り上がるための推進力になり、また車輪が乗り上がる外軌においては、外軌ゲージコーナの摩擦係数が重要な役割を担う。

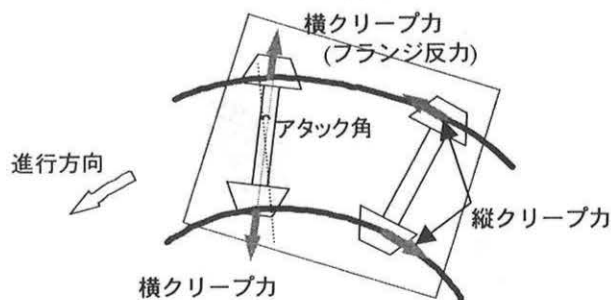


図1 台車の曲線通過時の車輪からレールへの作用力

3. 車輪/レール間のクリープ力(粘着力)特性

次に、図1に示す横あるいは縦クリープ力と動摩擦力の関係を図2のクリープ力特性を用いて説明する。

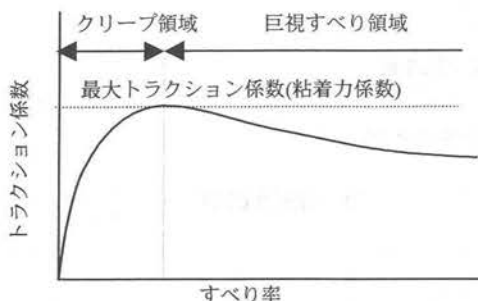


図2 トラクション係数とすべり率の関係

図2の縦軸は、押付力とクリープ力の比「トラクション係数」、横軸は車輪の移動速度と車輪の周速度の差をその平均速度で除した比「すべり率」である。この図において、一般的には、クリープ力特性は極大値(通常最大値になる場合が多い)を持ち、その値を最大トラクション係数、鉄道では粘着係数と呼ぶ。この粘着係数は、接触面が乾燥状態であると動摩擦係数とほぼ等しいと考えられることから、トラクション係数が極大値を示すような状況においては、逆に動摩擦係数で最大トラクション係数(車輪／レール間において、特に急曲線内軌では横圧を輪重で除した「横圧輪重比」にほぼ等しい)を評価することが可能になる。

ここで、鉄道総研の構内ループ線で 2001 年～2002 年の第Ⅰ～Ⅲ期にかけて行われた走行試験において、R160m の出口緩和曲線で測定された内軌側車上横圧輪重比(κ)と内軌動摩擦係数の関係を図3に示す。図より、レール動摩擦係数が車上横圧輪重比より少し大きい、相関が高いことがわかる。このことから、レール動摩擦係数で脱線を検討する際に重要となる内軌側車上横圧輪重比(κ)を大まかに評価することが出来ると考えられる。

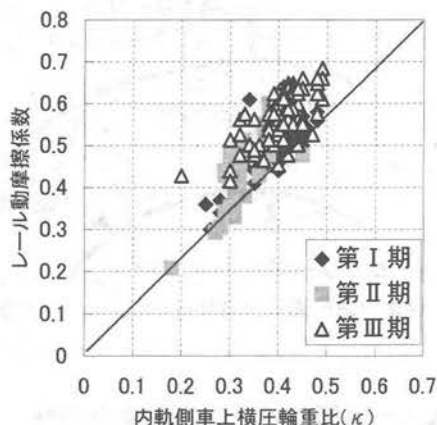


図3 内軌動摩擦係数と内軌側車上横圧輪重比

4. 営業線におけるレール動摩擦係数

営業線におけるレール動摩擦係数と列車密度等の車両走行条件や、気温、相対湿度等の気象条件との関係を求めるため、図4に示すレールトリボメータを用いて営業線においてレール動摩擦係数を測定した。測定の様子を図5に示す。このトリボメータは、固定した2個の鋼球($\phi 20\text{ mm}$)に、実車の接触圧と同程度になるように垂直荷重を負荷した状態ですべり摩擦を行い、接線力を測定し、その値を垂直荷重で除して、動摩擦係数を求めるものである。ここで測定される動摩擦係数は、レールと車輪が接触する部分の動摩擦係数とは、接触面積が異なることなど、必ずしも同一のものであるとは解釈されないものである。

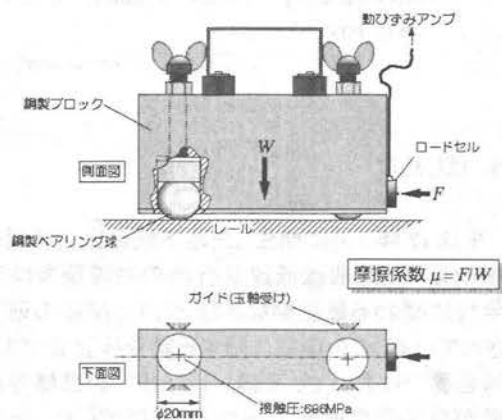


図4 トリボメータの概略図



図5 レール動摩擦係数測定風景

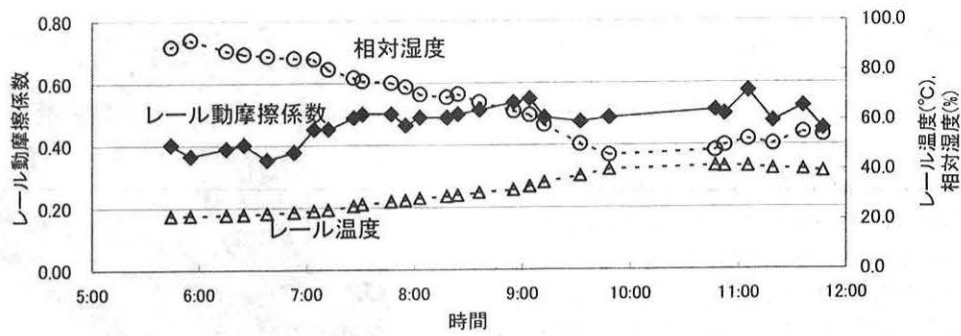


図6 時系列のレール動摩擦係数の変化

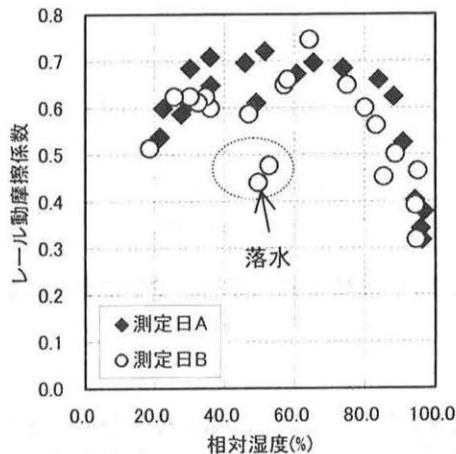


図7 レール動摩擦係数の再現性

レール動摩擦係数の測定は、始発前からレール温度が上昇する昼頃まで、列車通過の度に行った。内軌の測定結果の一例を時系列で図6に示す。図より朝から昼にかけ、レール温度が上昇し、相対湿度が低下するに従い、レール動摩擦係数が上昇している様子がわかる。また図7に測定の再現性を確認する為、気象条件がほぼ等しい連続する2日間で、同じ箇所において測定した結果を相対湿度で整理したものを示す。途中車両からの落水により、動摩擦係数が低下したものがあがるが、それ以外はほぼ一致しており、測定の再現性が確認された。次に、これまでに測定した合計14線区・20箇所のデータを電化・非電化線区をパラメータとして、レール動摩擦係数と相対湿度の関係を図8に、レール温度との関係を図9に示す。測定は、レール温度で0～50℃、相対湿度で20～100%の範囲で行われ、レール動摩擦係数は、0.25～0.80と広範な値が得られた。

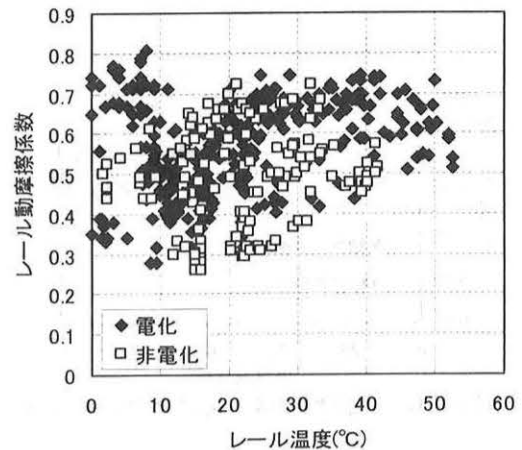


図8 動摩擦係数とレール温度の関係

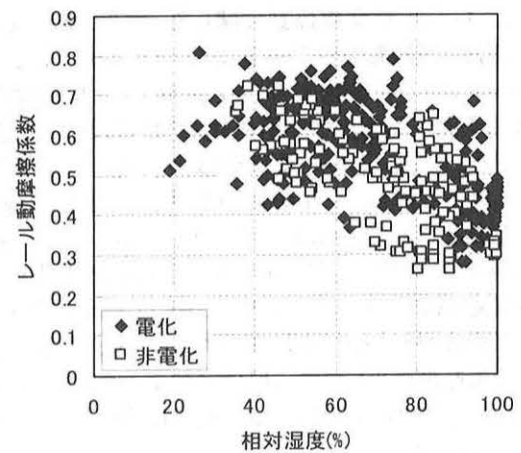


図9 動摩擦係数と相対湿度の関係

5. レール動摩擦係数の影響因子

図9より、全体としては、レール動摩擦係数は相対湿度が高くなると、小さくなる傾向にある。次に、電化・非電化で比較してみると、電化線区の方が非電化線区より若干高い値を示している。その違いとしては、

気動車の油煙等による油環境の影響や、全般的に電化線区の方が通過トン数が大きく、列車荷重を多く受けていること等が重畳して影響していると考えられる。また、列車荷重の影響が考えられるため、通過軸数の違いの影響を見るために、非電化区間の同一線区の軌道条件が同じで、列車通過本数が異なる箇所(4倍程度)を、気象条件がほぼ等しい連続する2日間で測定した。相対湿度で整理した結果を図10に示す。図において通過軸数が多い方が、動摩擦係数が大きい傾向にあることがわかる。

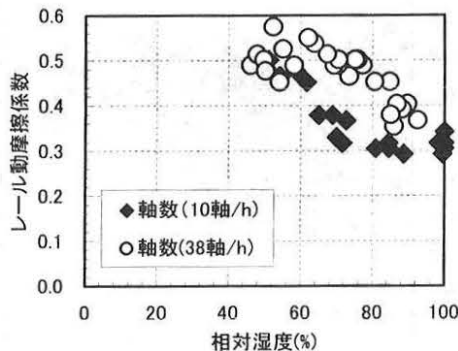


図10 レール摩擦係数への列車通過の影響

6. まとめと今後の課題

以上、レール動摩擦係数に関して、電化・非電化、相対湿度、通過軸数等が影響することがわかった。今後さらにデータを蓄積することにより、レール動摩擦係数を予測する何らかの関係式が得られることが期待できる。しかしながら、摩擦係数の変動に直接関係すると考えられるレールの表面状態を評価する指標がまだ抽出されていない。それに関しては、レール表面の酸化の状態、あるいは汚れの状態を把握することが期待されている。そのために、図11に示すような現地での赤外線分光分析に取り組んでいる。今後は、この分析を深度化しつつ、より多くのデータを蓄積し、レール動摩擦係数の実態をより明確にするよう、研究を継続していく。

なお、レールトリボメータでの動摩擦係数は、接触面積の相違など、レール/車輪間の摩擦とは異なる状況下で測定された値であり、レール/車輪間の力の大きさを議論する際の動摩擦係数にトリボメータによる値を直接用いることについては検討を要する。

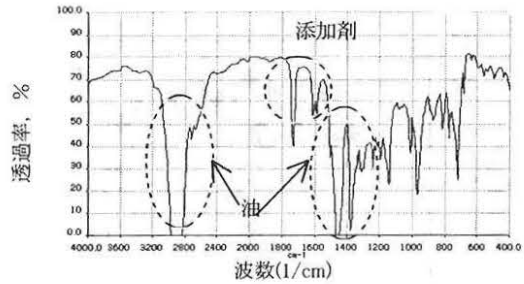
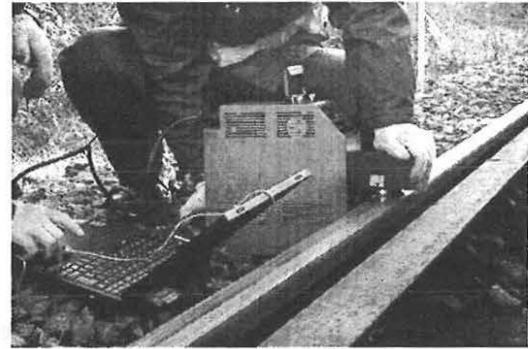


図11 赤外線分光分析の測定風景と結果

謝辞

営業線におけるレール動摩擦係数の測定に当たり、JRをはじめとする多くの鉄道事業者の関係者の皆様に御協力を頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。なお、本測定作業の一部は国土交通省の補助金を得て実施されたことを記す。

(参考文献)

- 1) 運輸省事故調査検討会:「帝都高速度交通公団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故調査に関する調査報告書」2000年10月