

走る基本 -粘着とは何か-

陳 樺

鉄道力学研究部(軌道力学 主任研究員)



ちん か

粘着とは

車輪／レールの鉄道システムにおいて、車両が走る基本は「粘着」と言っても過言ではありません。何故ならば、車輪がレールのうえをスムーズに転動し、加速や減速できるのは、車輪とレールの接触面で走行方向の接線力が伝えられるからです。この接線力を、鉄道では「粘着力」と言います。また、力行時の駆動力あるいはブレーキ時の制動力が粘着力を上回って空転あるいは滑走状態になるぎりぎりのところで車輪とレール間で伝えられる最大の接線力を最大粘着力、いわゆる「粘着限界」と称し、それを静止輪重で除したものを「粘着係数」と定義しています。鉄道車両の最高走行速度は粘着限界に左右され、走行性能、いわゆる起動、加速、減速、停止の性能は粘着特性に支配されているのです。

一般に、晴天時に車輪とレールの接触面が乾燥している場合は、粘着係数にはそれほど大きな変化はないのですが、降雨・降雪などにより車輪とレールの表面が濡れている状態では粘着係数が大きく変化し、特に高速になるほど粘着係数が低下します。粘着係数の低下は、車両の高速化の障害となるだけではなく、空転・滑走を起す恐れがあります。このような現象は鉄道に限らず、自転車や自動車でも、雨の日、雪道、泥道などでしばしば経験することです。空転の結果、レール頭頂面には車輪の形状に掘れた空転傷(図1(a))が形成されたり、また、滑走の結果、車輪踏面の一部には

偏平状の擦傷、ひどい場合は熱き裂が形成されたり、車輪の転動によってそれらが転がり疲れき裂へと進展してはく離(図1(b))が生じます。これらの材料損傷は、乗心地の低下、騒音・振動の発生に繋がり、さらに、衝撃荷重が加わることにより車軸・軸受またはレール等の寿命が短縮され、メンテナンスコストを向上させる要因になります。

粘着現象に関与する車両や軌道の条件、さらに外部からの影響因子は非常に複雑であり、粘着係数の値は広範囲にばらつきます。それゆえ、粘着係数の実態把握のためには、基礎データの積み重ねが重要となります。これまで、多くの現車試験や室内・室外の模擬実験などによる研究が行われてきましたが、近年、コンピュータ技術の進歩に伴って混合潤滑理論を適用した数値解析による粘着係数の推定法の研究も行われています。

本稿では、粘着メカニズムについて述べるとともに、トライボロジーの観点から、粘着係数が車両走行条件や環境条件、表面の状態、接触面の付着物などの状況によってどのように変化するかなどについて紹介します。

粘着メカニズム

車輪とレール間の接触領域は、車輪とレールの材質、断面幾何学形状、輪重などによって変化します。一例として、新幹線用の新品車輪(φ910mm、円錐踏面、勾配1/40)と新品レール(JIS 60kg) 同士の接触領域を試算した結果、輪重8トンの条件において最大接触圧力は約900MPa、接触領域は長径約14mm、短径約12mmの楕円形になっています。車輪とレールは摩耗すると車輪径が小さく、レール頭頂面の曲率半径が大きくなり、結果的に接触部の楕円の面積が大きくなって最大接触圧力は小さくなります。

レールのうえを転動している車輪に加速あるいは減速のための負荷トルク(駆動力あるいは制動力)を加えると、図2に示すように楕円形の接触面内に車輪とレールの弾性変形に応じて変化するすべり領域と固着領域が発生します。

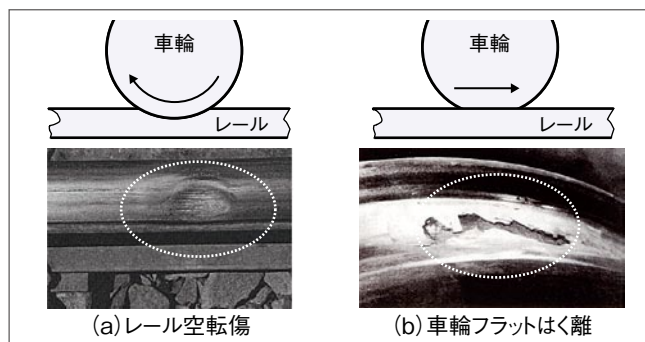


図1 空転・滑走現象による損傷例

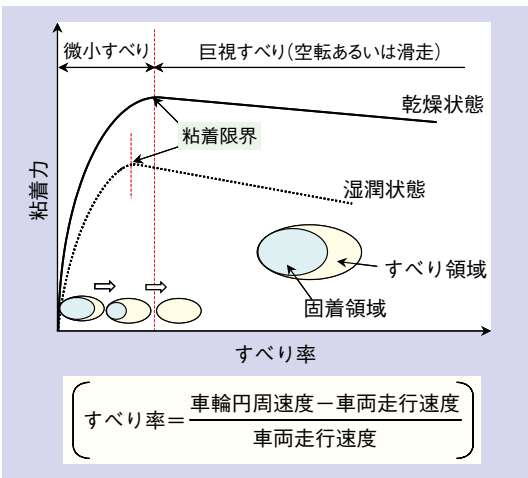


図2 車輪とレール接触面内の力の伝達状況

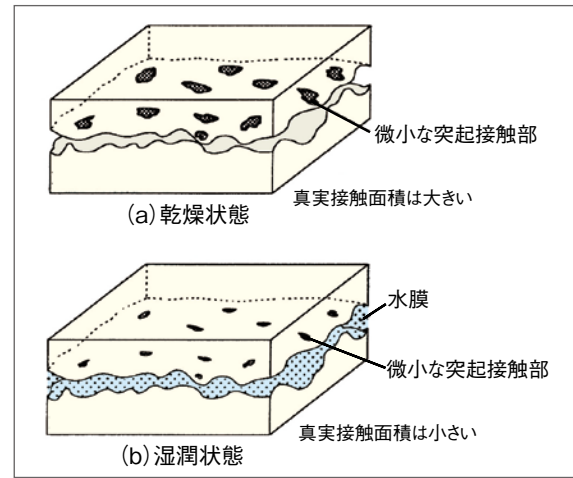


図3 水膜の形成による微小な突起同士の接触変化

すべり領域は負荷トルクの増加に伴って占める面積の割合が大きくなりますが、ある負荷トルクの条件下で、接触面内の固着領域が消えて完全なすべり領域になります。すべり領域と固着領域が共存している状態から完全なすべり領域の状態に転換する瞬間に粘着限界に達し、その後、負荷トルクの僅かな増加によって車輪とレールの接触面で大きなすべりが発生してしまいます。粘着力とすべり率の関係が線形である領域を、通常“微小すべり領域”あるいは“クリープ領域”と言い、空転や滑走を伴わずに車輪がレールのうえをスムーズに転動します。粘着限界を超えて粘着力とすべり率の線形関係がくずれている領域を、通常“巨視すべり領域”と言い、駆動時には空転現象、ブレーキ時には滑走現象が生じます。湿潤状態における車輪とレールの接触では、水の潤滑作用により粘着係数が乾燥状態の粘着係数に比べて低いため、同じ負荷トルクを加えてもより早く巨視すべり領域に至ります。

車輪・レールの接触状況

実際の車輪とレールの表面には微小な突起が多数存在します。乾燥状態の場合は、微小な突起同士の接触により輪重を支えながら、接触面内で接線力を伝達します(図3(a))。一方、湿潤状態の場合は、車輪とレール間に水膜が介在し、微小な突起同士が水膜を突き破って接触することになります(図3(b))。水膜が存在する場合の輪重は微小な突起同士の接触と水膜により分担されますが、水膜のせん断抵抗係数は、金属同士接触のせん断抵抗係数(境界摩擦係数)に比べて非常に小さいため、粘着係数は主に微小な突起同士の接触で分担する輪重の割合に支配されます。水膜の厚さが大きいほど、水膜を突き破って接触する微小な突起の数が少なく、真実接触面積(微小な突起が接触している面積の総和)が小さくなった結果、微小な突起同士の接触によって分担する輪重の割合が小さくなる

ので、粘着力が低下します。

粘着係数への影響因子

粘着係数には、基礎的粘着係数と実用上有効な粘着係数の二つの定義があります。基礎的粘着係数は、車輪とレール間の接触面に起きる摩擦現象に関係し、材質、表面の状態、接触面の付着物、車両走行条件、環境条件などに影響されます。一方、実用上有効な粘着係数は、主として車両や軌道の構造、駆動力や制動力の制御方式に関連した有効に使える粘着係数です。

実際には、車輪とレールの表面が種々の環境条件におかれて車両走行時の各種条件がお互いに絡み合って作用するため、利用できる実用上有効な粘着係数はばらつきが大きく、極めて複雑なものです。ここでは、トライボロジー的な観点から、基礎的粘着係数(以下、粘着係数に略称)に着目し、それに対する影響因子について述べます。

一般に、考えられる基礎的粘着係数への影響因子を分類すると、以下のようになります。

- ・車輪とレール
 - －材質
 - －幾何学断面形状の状態
 - －表面(例えば:表面粗さ)
- ・車輪とレール間の介在物とその力学特性(例えば:水,潤滑剤,落葉,さび,摩耗粉,塵埃)
- ・環境条件(例えば:気温,湿度)
- ・車両走行条件(例えば:速度,輪重)
- ・その他(例えば:線路曲率半径,横すべり率)

この中で最も大きな影響要因は、車輪とレールの表面の状態および車輪とレール間の介在物であり、走行速度や環境条件も比較的大きな影響を与えます。以下、これまでに得られた湿潤時の室内模擬試験、現車試験結果の一例を紹介いたします。

表面状態などに関しては、湿潤状態の場合、微小な突起の高さ（表面粗さ）が大きいほど粘着係数は大きく（図4）、また、微小な突起の先端形状が車輪の軸方向に対して細長く分布する場合は、ほかの分布状況より粘着係数は大きくなります（図5）。

介在物に関しては、水や潤滑剤のほか、さびの種類によって粘着係数が異なります。乾燥雰囲気条件下で生成されたさび、例えば酸化鉄 Fe_2O_3 （黒錆）が、酸化鉄 Fe_3O_4 （赤錆）より粘着係数が高く、また、湿潤雰囲気条件下で生成されたさび、例えば水酸化鉄 $\gamma-FeOOH$ は、湿気のある塩素雰囲気条件下で生成され

たさび、例えば塩化鉄 $FeCl$ より粘着係数が高くなります（図6）。一般に、塩素イオンを含有する場合は粘着係数を下げる効果があると言われています。

介在物の粘性に関しては、粘度の低いものが粘度の高いものより粘着係数が高く、例えば、同じ水膜が存在する場合でも水温の高いほうが粘性は高いため、粘着係数は高くなります（図7）。

車両の走行速度に関しては、湿潤状態の場合、速度の増加とともに粘着係数が低下しますが、この現象は現車試験でも確認されています（図8）。

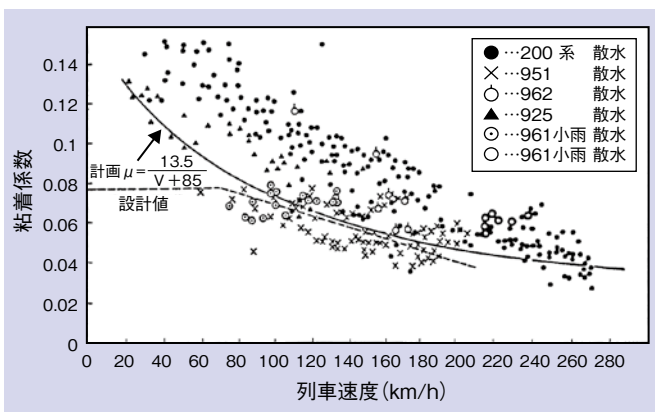


図8 粘着係数に及ぼす走行速度の影響¹⁾ (現車試験結果)

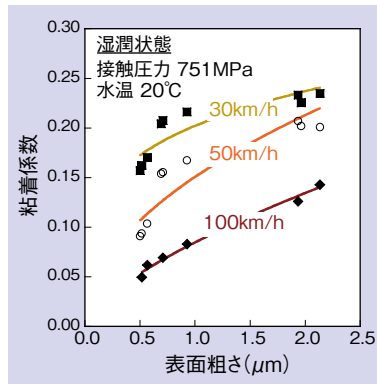


図4 粘着係数に及ぼす表面粗さの影響 (室内模擬試験結果)

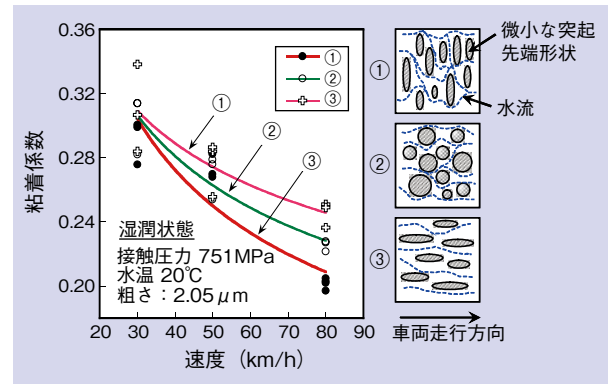


図5 粘着係数に及ぼす表面微小な突起先端形状の影響 (室内模擬試験結果)

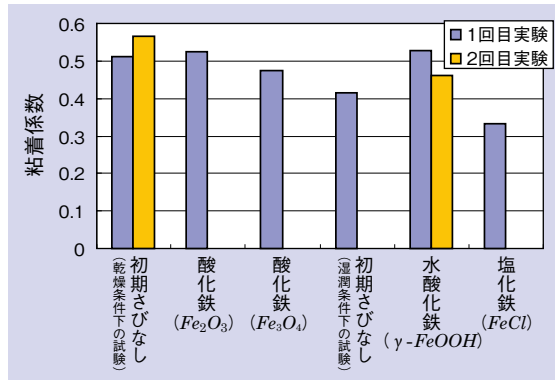


図6 粘着係数に及ぼす表面さびの影響 (室内模擬試験結果)

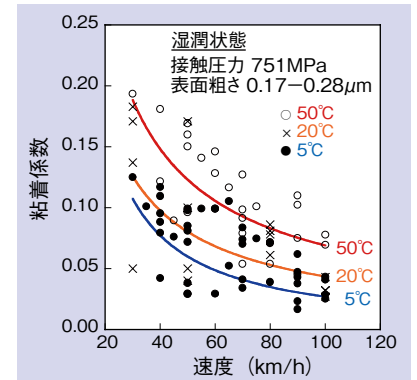


図7 粘着係数に及ぼす水温の影響 (室内模擬試験結果)

粘着係数の推定

近年、混合潤滑理論を適用し、湿潤時の粘着係数に関して数値解析手法で検討する試みがなされています。ここでは、粘着係数に対する種々の因子の影響度合いを明らかにするとともに、粘着係数を推定することを目的としています。

数値解析に用いる湿潤時の車輪とレールの接触モデルを図9に示します。粘着係数が微小な突起同士の接触により分担する輪重の割合 w_c/w 、水膜により分担する輪重の割合 w_h/w 、微小な突起の接触部の摩擦係数（境界摩擦係数） μ_c と水膜のせん断抵抗係数 μ_h から求められます。水膜の

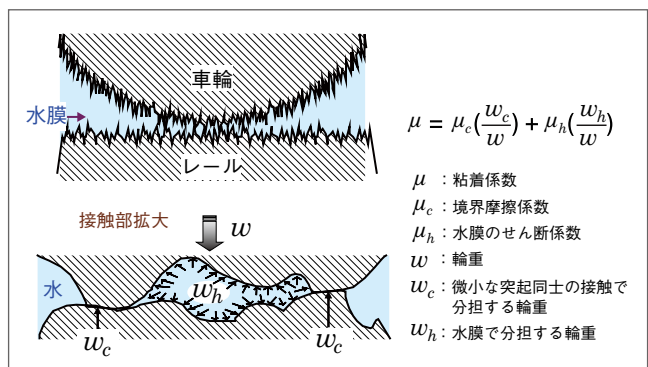


図9 車輪とレールの混合潤滑接触モデル

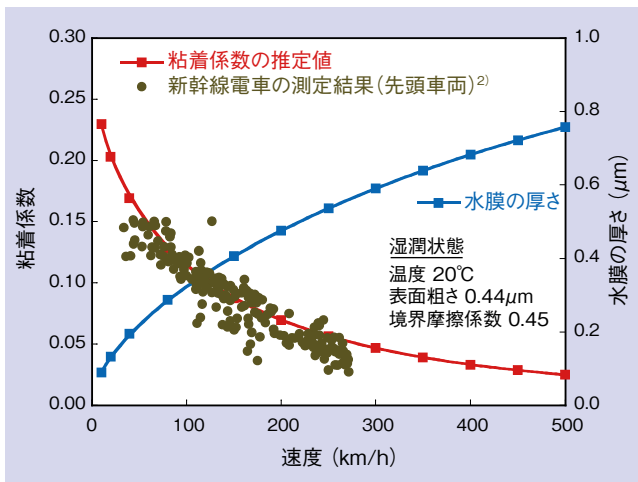


図10 理論解析による粘着係数の推定結果と新幹線電車測定結果²⁾の比較

せん断抵抗係数 μ_h は、境界摩擦係数 μ_c に比べて非常に小さいので、結局、粘着係数はほぼ $\mu_c(w_c/w)$ によって決まります。 w_c/w は表面粗さと水膜の厚さに依存し(図3(b))、水膜が薄いほど、または表面粗さが大きいほど、水膜を突き破って接触する微小な突起の数が多くなり、 w_c/w が大きくなります。

計算条件として、車輪とレールの寸法、車両走行速度、静止輪重、水温、水の粘度、表面粗さ、境界摩擦係数などを与えれば、数値計算プログラムから基礎的粘着係数の推定値が得られます。ただし、入力条件の一つ、境界摩擦係数が粘着係数の大きさを決める重要なパラメータであり、精度の高い値を用いることが必要になります。通常、境界摩擦係数は実験から求めます。

数値解析で得られた新幹線電車の粘着係数の推定値を、現車試験の測定結果と比較した結果、定性的に傾向がほぼ一致していることが確認されています(図10)。

粘着改善法

先に述べたとおり、駆動力あるいは制動力が粘着限界より大きくなると空転あるいは滑走現象が生じます。列車の最高速度を向上したり、ブレーキ距離を短縮したりするためには、粘着限界を向上させる必要があります。実用化されている粘着限界を向上させる手段には、以下の二つの代表例があります。

・増粘着研磨子

新幹線をはじめ在来線にも広く適用されています。ブレーキ時に増粘着研磨子は、車輪踏面に一定圧で押し付けることにより、踏面に微小な突起を多数形成し、また、摩耗によって脱落した研磨子の硬質粒子が、湿潤時に車輪とレールの接触部に存在する水膜を破って固体同士の接触面積を増大させ、粘着限界を向上します(図11(a))。

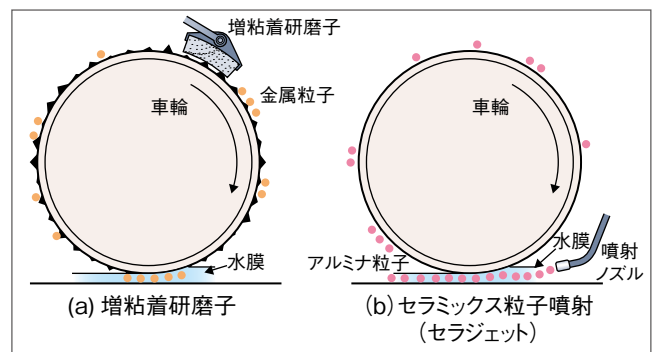


図11 粘着限界の向上方策

・セラミックス粒子噴射(セラジェット)

機関車では古くから砂まきが行われてきました。砂(粒径約2mm)は硬質材料のため、車輪とレールの接触面に食い込み、湿潤時に車輪とレールの接触部に存在する水膜を破ると同時に、固体同士のせん断抵抗を利用して粘着限界を向上します。ただし、従来の砂まき方式は、高速車両に適用するには実際問題として難しい面があるので、近年、硬質のアルミナ粒子(粒径約0.3mm)を先頭車両の車輪とレールの接触部に噴射する方法が開発され、高速新幹線電車、機関車等に導入されています(図11(b))。300km/h以上の高速域では降雨時の粘着係数を従来の2倍に増大する効果があることが実車で確認されています。

あとがき

粘着メカニズム、粘着係数に及ぼす影響因子などについて紹介してきましたが、粘着性能、すなわち力行やブレーキ時に車輪とレールの間でいかに大きく滑らずに接線力を伝えられるかの問題は、車両、軌道、運転と言った鉄道サイドの要因だけではなく、沿線の環境、気候条件などによっても決まると言う点で、粘着問題が極めて複雑なものとなっています。粘着性能は様々な要因の影響を受けるため、一つの対策だけで粘着性能の確保に万全を期すことはかなり難しいです。その意味から、トライボロジー的な取り組みのみならず、力行とブレーキ時の空転・滑走に対する早期検知システムや粘着力を最大限利用する粘着制御技術など、多方面からのアプローチも必要と考えられます。これらの組み合わせによって粘着性能をより一層高めることが期待できます。[RRR]

文献

- 丸岡昭, 大山忠夫: 高速ブレーキシステムでは粘着の問題が鍵, RRR, 47-5, 1990, p15
- 内田清五, 小原孝則: 粘着力有効利用による新幹線高速化のためのブレーキ制御, 鉄道総研報告, Vol.7, No.3(1993), p41