

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

湿潤条件下の車輪・レール 粘着メカニズムを解明する

降雨や降雪時に車輪とレールの間に水が介在することにより粘着力が低下し、力行時の空転現象やブレーキ時の滑走現象が発生する事例がよく見受けられます。その際、空転による列車の遅延やタイヤの乱れ、滑走によるブレーキ距離の延伸などだけではなく、レール頭頂面の空転傷や車輪踏面の滑走傷が形成されることによって、車両走行時の騒音や振動が大きくなったり、乗り心地が悪化する恐れもあります。空転・滑走を避けるため、湿潤条件下の粘着メカニズムを解明し、有効な粘着対策を講じることが重要となります。



陳 樺

Hua Chen

鉄道力学研究部

軌道力学研究室

主任研究員

【専門分野】トライボロジ

はじめに

鉄道では、車輪とレールの間に働く車両進行方向（レール長手方向）の力を、駆動や制御の分野においては、「粘着力」と呼びます。粘着力は列車の加減速度や最高速度を決める重要な要素であるため、粘着問題は、鉄道システムが構築されて以来鉄道特有な問題として研究されてきました。特に近年、世界的に高速化に対するニーズが高まる中、粘着問題が従来に増して重視され、メカニズムの解明に関する基礎的な研究や、空転や滑走防止のための制御法に関する実用的な研究が進められています。例えば、車輪踏面に微細な粗さ突起を多数形成する増粘着研磨子や鋳鉄を埋め込んだ増粘着制輪子の採用、車輪とレール間へのセラミックス微粒子の噴射などの粘着力を向上させるための手法が開発されています。また、多段制御や連続制御、空転滑走再粘着制御および軸重移動補償などによる粘着力の有効利用に関する制御技術も格段の進歩を遂げました。

本稿では、降雨や降雪時の車輪とレール間の粘着力の低下原因を調べるために行われてきた基礎研究と、これ

により明らかになった湿潤条件下の車輪・レール粘着メカニズムについて紹介します。

湿潤条件下の粘着特性

降雨や降雪時にレール面がぬれている場合は、車輪とレールの間に介在する水の潤滑作用により粘着力が低下します。実車による測定結果の一例¹⁾を図1に示します。図中の式は、粘着係数の計画式で、運転性能を算出する際に使われます。走行速度の増加にとともに粘着係数(粘着力の最大値/輪重)が低くなることがわかります。この現象によって、特に雨や雪などの悪天候下でも安定した高速走行を行える「高粘着性能」が、列車高速化に関する技術課題の重点項目のひとつとなっています。

粘着係数が低下する原因

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。湿潤条件下では、微小な突起が水膜を突き破って接触することになります。輪重は、微小な突起同士の接触と水膜で分担されますが、水膜のせん断抵抗係数は、微小

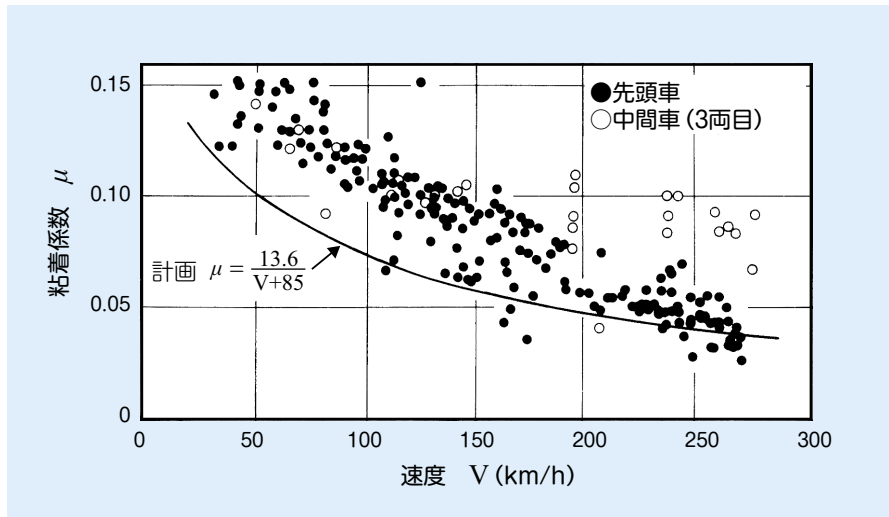


図1 粘着係数と走行速度の関係¹⁾

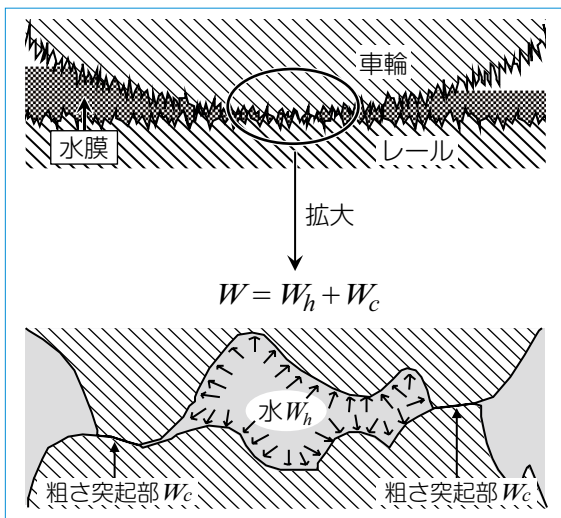


図2 車輪とレールの接触モデル

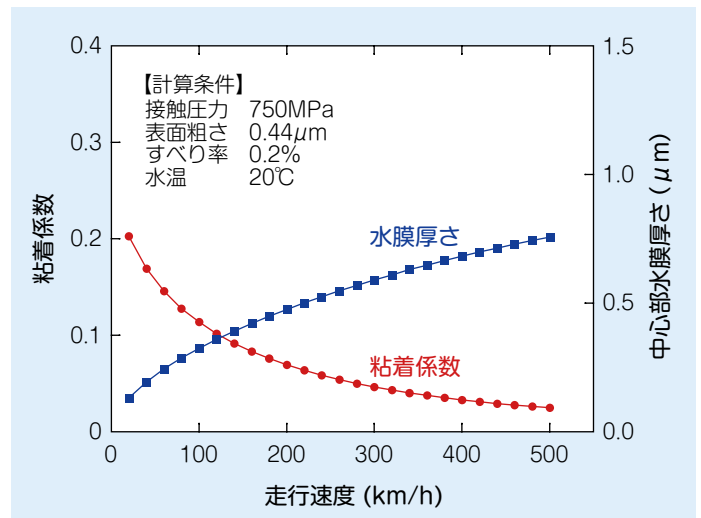


図3 粘着係数と走行速度の関係

な突起同士の接触部のせん断抵抗係数に比べて非常に小さいため、車輪とレール間の粘着係数は、主に微小な突起同士の接触で支える荷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、突起同士の接触で分担する輪重の割合も小さくなるので、粘着係数が低下すると考えられます。

粘着係数への影響因子

列車が走行する際に、粘着現象そのものの性質は複雑で多様な因子に影響されます。これらの因子およびそれぞれの粘着力への影響度合いを明らかに

するためには、各因子の影響が複雑に絡んでいる実車走行試験よりも、一つひとつの影響因子に着目でき、定量的な因果関係が求められる数値シミュレーションや室内模型試験が有効な手段となります。

車輪とレールの間に水膜が介在している場合の数値解析モデルを図2に示します。表面に微小な突起同士が接触している部分と水が介在している部分が混在しているため、「混合潤滑状態」と呼ばれています。図中、 W_c は微小な突起同士の接触によって支持される荷重、 W_h は水膜で支持される荷重、 W は輪重です。粘着係数 μ は、次の式

から求められます。

$$\mu = \frac{\mu_c W_c + \mu_h W_h}{W} \dots\dots\dots (1)$$

μ_c は微小な突起同士接触時の境界摩擦係数(☞参照)、 μ_h は水膜のせん断係数です。 W_c 、 W_h と μ_h は数値解析により求められますが、 μ_c は実験から求めます²⁾。粘着係数の大きさは、上で述べたように微小な突起同士の接触で支える荷重の割合 W_c/W に大きく依存します。

☞ 境界摩擦係数

二つ物体の接触面が、薄膜などに覆われていたり、気体や液体の吸着分子層があつたりする場合の摩擦係数。

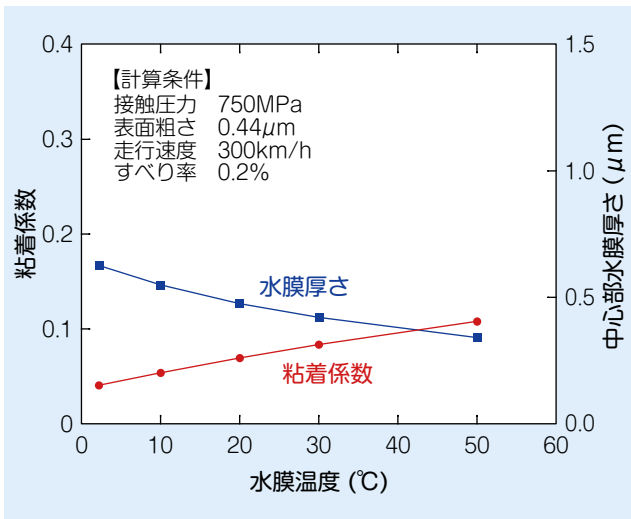


図4 粘着係数と水温の関係

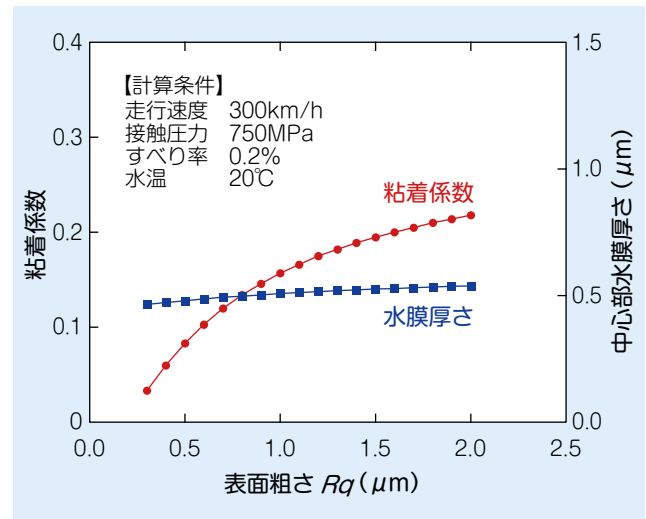


図5 粘着係数と表面粗さの関係

数値解析では、弾性流体潤滑理論と粗さ接触理論を適用します³⁾。計算条件として、車輪とレールの寸法、および想定される影響因子、例えば車両走行速度、輪重、水温と表面粗さなどを与えます。

図3は、列車の走行速度と粘着係数および車輪・レール接触中心部の水膜厚さの関係を数値解析により求めたものです。走行速度の増加に伴って水膜厚さが大きくなり、粘着係数が低くなる傾向にあります。これは、図1の実車による測定結果と一致しています。

図4に、水温と粘着係数および車輪・レール接触中心部の水膜厚さの関係を示します。水膜温度が上昇すると水膜厚さは小さくなり、粘着係数が高くなる傾向が見られます。

図5に、表面粗さと粘着係数および車輪・レール接触中心部の水膜厚さの関係を示します。表面粗さの増大とともに粘着係数が高くなりますが、水膜厚さの変化はわずかです。

数値シミュレーション結果を検証する意味も含め、室内模型試験について紹介します。図6は、2円筒転がり



図6 2円筒転がり接触試験機

り接触試験機の外観です。車輪（直径300mm）は実車輪と同種の材質および製造法で作製され、レール輪（直径170mm）は普通レールから切り出したものです。湿潤条件を、噴射制御装置から車輪とレール輪の間に水を供給して実現しています。

試験条件に関しては、試験機の仕様

範囲内の条件を設定しました。試験中、車輪とレール輪間のトラクション（^④参照）を測定しますが、その最大値を荷重で割って得られる最大トラクション係数を、「粘着係数」と見なします。

図7に、水の温度別に回転速度と粘着係数の関係を示します。回転速度の

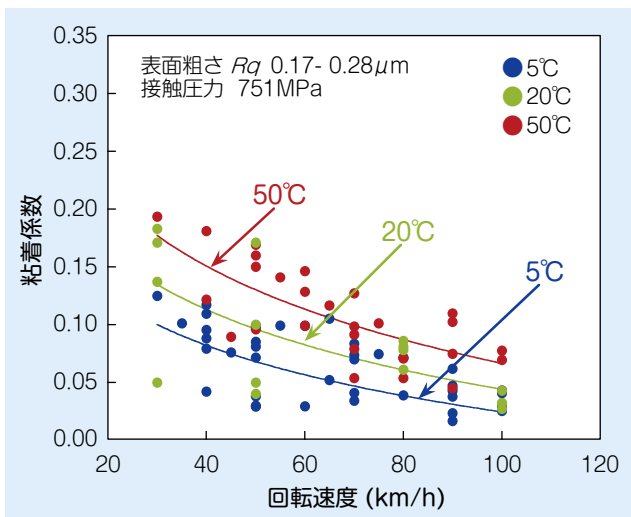


図7 水温別の回転速度と粘着係数の関係

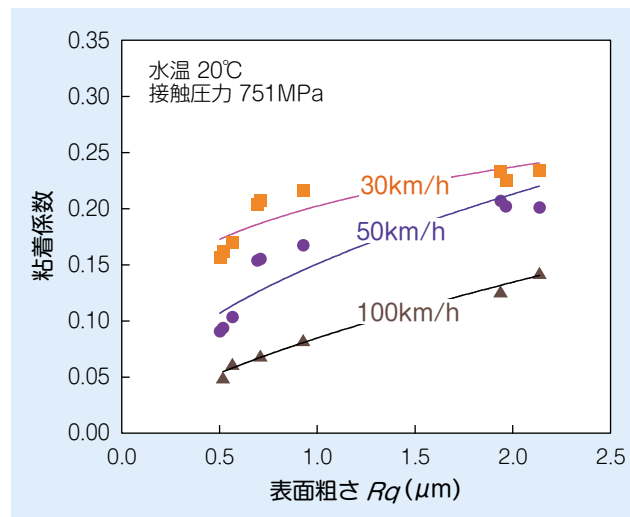


図8 回転速度別の表面粗さと粘着係数の関係

増加に伴って粘着係数が低くなること
がわかります。この結果は、図3の解
析結果と傾向が一致しています。水温
の影響について、図示したとおりばら
つきがありますが、同じ回転速度の場
合は、水温が高いほど粘着係数が高
くなるのがわかります。これも、図4
の解析結果と傾向が一致しています。

図8に、回転速度別に表面粗さと粘
着係数の関係を示します。表面粗さが
大きくなるにつれて粘着係数は高くな
ることが確認できます。この結果は、
図6の解析結果と傾向が一致していま
す。

数値シミュレーションや室内模型試
験で得られた結果から、粘着係数が走
行速度の増加によって低くなること、
表面粗さの増大または水温の上昇に

よって高くなることが明らかになりま
した。

粘着メカニズム

湿潤時の粘着係数は、車輪とレール
間に介在する水膜の厚さと表面粗さの
大小関係に左右されると言えます。列
車走行速度が増加すると、水膜の厚さ
が大きくなり、表面に微小な突起が水
膜を突き破って接触する数、つまり微
小な突起同士の接触で支える輪重の割
合が小さくなる結果、粘着係数が低下
します。粘着係数の低下量は、水温や
表面粗さによって異なります。水温が
低い、または表面粗さが小さい場合は
粘着係数の低下量が大きいですが、水
温が高く、または表面粗さが大きい場
合は高速域においても比較的高い粘着
係数が確保できます。粘着係数に対す
る水温の影響は、水の粘性を通して与
えます。水温が高いと、水の粘性が低
く、水膜の厚さは小さくなります。そ
の結果、表面に微小な突起が水膜を突
き破り易く、支える輪重の割合が大き
くなります。

おわりに

湿潤時の粘着係数への支配要因は、
列車走行速度や車輪とレールの表面粗
さ、車輪とレール間に介在する水の温
度と明らかになりました。通常車輪と
レールの表面粗さは、数値シミュ
レーションで得られた車輪とレールに
介在する水膜の厚さとほぼ同じオー
ダーになるため、わずかな粗さの変化
によっても粘着係数が変わることが予
想されます。高い粘着係数を確保する
ためには、車輪とレール接触部の表面
粗さを適切に管理することが肝要と言
えるかもしれません。[RRR]

文 献

- 1) 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,
pp.41-48, 1993
- 2) 陳樺, 山本大輔, 名村明: 境界潤滑状
態下における車輪・レール間摩擦係数
の実験的同定, 鉄道総研報告, Vo.28,
No.6, pp.47-52, 2014
- 3) 陳樺ら: 湿潤条件下の車輪とレール間
の粘着係数に影響を及ぼす因子, 鉄
道総研報告, Vo.26, No.2, pp.45-
50, 2012

ト ラ ク シ ョ ン

周速の異なる2円筒が転がり/滑り
接触をする場合には、接触面において
接線力が作用します。この接線力をト
ラクシオンと言い、法線荷重で割った
ものをトラクション係数と言い、最大
トラクション係数は、鉄道における粘
着係数に相当します。