

特集：鉄道固有の力学的問題に関わる最近の研究

雨天走行時の 車輪／レール接線力特性における車輪削正痕の影響

山本 大輔*

Influence of Wheel Turning Trace on Wheel/Rail Tangential Contact Force Characteristics
under Running in Rainy Conditions

Daisuke YAMAMOTO

A wheel tread has wheel turning traces like grooves on a rubber tire tread. In the case of such a tread, the friction force of wheel/rail in wet conditions was expected to increase as was that of tire/road. Therefore, to clarify the relationship between wheel turning traces and friction force, tangential contact force measurements using a twin-disk rolling machine were carried out in several wet conditions. As a result, it was clarified that the friction force is almost unchanged regardless of the existence of wheel turning traces due to high iron's stiffness and that, especially under low velocity conditions, the friction force with wheel turning traces is smaller compared with that without wheel turning traces due to a small contact-patch. This means that the combination of wheel/rail is different from that of tire/road in terms of tangential force characteristics.

キーワード：車輪／レール，低粘着現象，車輪削正痕，水潤滑状態，接線力測定実験，タイヤ／路面間

1. はじめに

鉄道車両の基本的な走行性能である「止まる」「走る」「曲がる」と密接な関係にある接線力（制動力・駆動力・旋回力）は、車輪／レール間の長径 10mm 程度の小さな楕円形状（接触楕円とも呼ばれる）をした接触面形状で作用する摩擦力の特性により決まるものである。車輪とレールの組合せの場合、これらの間の摩擦係数は乾燥時で 0.3 程度とされ、雨天時などではさらに小さくなるのが経験的に知られている。

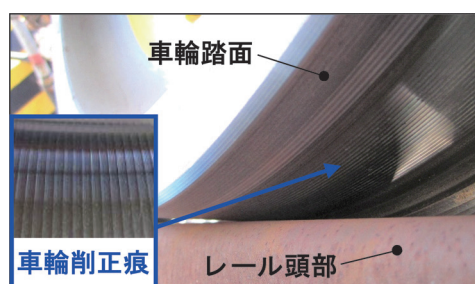
ところで、鉄道車両の車輪踏面は走行距離の増加とともに摩耗や塑性変形によりその形状が変化するため、専用の車輪旋盤を用いて元の設計形状に削り直す作業（車輪削正作業）が定期的に行われる。このとき、車輪旋盤の加工精度によっては、車輪踏面の円周方向にらせん状の車輪削正痕（バイト痕：図 1(a)）が生じることがあり、この表面形状はゴムタイヤ（以下、タイヤと記す。）のトレッドに設けられた溝（以下、グループ：図 1(b)）と良く似ている。

タイヤトレッドのグループは、雨天時に自動車が高速走行するときタイヤが路面との間で生じる水膜上に浮き上がるドロプレーニング現象を低減する目的¹⁾として、接触面の排水性能を向上させるために設けられていることは一般に知られた事実である。

他方、車輪／レール間では、その接触面圧は計測することが困難なほど高く、接触面で生じる摩擦現象には不

明な点も多いため、そこで作用する接線力を一般に馴染みのあるタイヤ／路面間の現象に置き換えて推察することが少なくなかった。例えば、乾燥時では、車輪踏面に削正痕があると接触面の摩擦係数が大きくなり、車輪／レール間の接線力がより大きくなるとする考え²⁾や、雨天時では、接触形態の似ているタイヤ／路面間の接触理論を参考に、車輪／レール間の接触面の排水性能が向上するので接線力が大きくなるとする考え³⁾が挙げられる。

しかしながら、著者の理論的および実験的研究⁴⁾か



(a) 車輪踏面



(b) タイヤトレッド

図 1 車輪踏面とタイヤトレッド

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

らは、乾燥時には、接触面が平滑の方が車輪／レール間の接線力は大きく、車輪削正で生じる程度の大きさの凹凸は、むしろ接線力を小さくする効果があることが分かっている。また、雨天時の場合についても、車輪／レールの組合せとタイヤ／路面の組合せでは、それらを構成する材料や接触面圧の圧力レンジが全く異なるため、現在主流とされる考えとは異なる結論になると考えられる。

本研究では、水潤滑状態における車輪削正痕と車輪／レール間の接線力特性の関係を明確にするため、まず、タイヤ／路面間の接触理論を整理する。そして、車輪とレールの接触を直径30mmの一对の小型円筒試験輪の接触で模擬した接線力測定実験を実施し、その結果に対して、これらの理論を参照しながら考察する。

2. タイヤと路面間の接触理論

接触面圧が高く計測困難な車輪／レール間で生じる現象を推察するとき、タイヤ／路面間の現象が参考とされてきたことを踏まえ、まず、タイヤ／路面間の接触理論について整理する。

なお、研究分野の違いにより異なる固有名称の混同を避けるため、「摩擦力」について、タイヤ／路面間の場合は「摩擦力」、車輪／レール間の場合は「接線力」と使い分けて記す。

2.1 接触面が乾燥状態のときの摩擦力特性

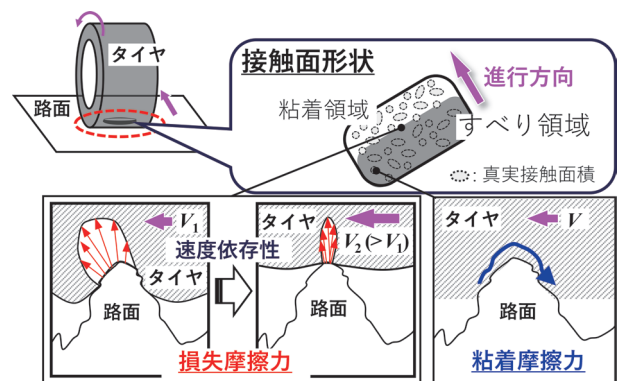
タイヤ／路面間に作用する摩擦力は、荷重、すべり速度、真実接触面積（実際に路面と接触している面積）、ゴムの内部温度などの諸因子により複雑に変化するとされる⁵⁾。接触面で作用する前後方向の全摩擦力 F_x は、真実接触面積の増加に比例して大きくなる粘着摩擦力 F_{xa} と、路面の凹凸に対して周期的に接触部が変形する過程で生じるエネルギー損失である損失摩擦力 F_{xd} 、そして、路面の掘り起しによる掘り起し摩擦力 F_{xc} の3つで構成され、式(1)で表される。

$$F_x = F_{xa} + F_{xd} + F_{xc} \quad (1)$$

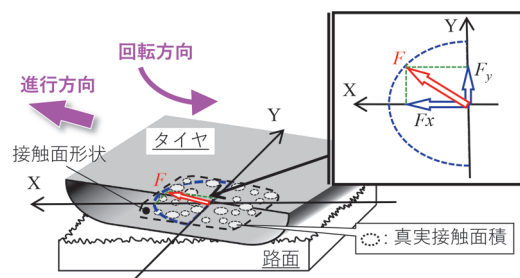
一般的な舗装道路上を走行する場合、路面の掘り起しは特異な現象と考えられ、この場合、式(1)は右辺第3項が省略できるので、前後方向の全摩擦力は2つの摩擦力の和と簡略化することができる。

図2(a)から、加減速時のタイヤ／路面間の接触面では、「粘着領域（鉄道では固着領域）」と「すべり領域（鉄道でも同じ）」の2つの領域が生じ、これらには損失摩擦力 F_{xd} と後者には粘着摩擦力 F_{xa} も作用する。

乾燥時にはタイヤ／路面間のすべり率の増加とともに粘着摩擦力 F_{xa} が大きくなり、速度向上とともにトレッ



(a) 2つの摩擦力



(b) 摩擦円と前後・左右の摩擦力の関係

図2 タイヤ／路面間の摩擦力の発生メカニズム

ドゴムの形状変化が路面の凹凸に対して追従できなくなるので損失摩擦力 F_{xd} が次第に減少する。また、ゴムの温度が上昇するとゴム分子が熱運動により動きやすくなるので損失摩擦力 F_{xd} が減少すると考えられている⁶⁾。一般的には、乾燥時の損失摩擦力 F_{xd} は粘着摩擦力 F_{xa} より小さいので、前後方向の全摩擦力は粘着摩擦力 F_{xa} が支配的となる。

次に、自動車のコーナリング時を考える。図2(b)から、タイヤは進行方向に対して舵角をもって転走するので、タイヤ／路面間では前後・左右方向の2つの摩擦力が作用する。これらの合力は、式(2)の摩擦円の原理に基づき、接触面の摩擦係数と垂直抗力の積で求まる値を超過しないことが分かっており、一方の摩擦力が大きくなると、半径 μF_z の摩擦円の範囲内で、もう一方の摩擦力は小さくなる特性となる。

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu F_z \quad (2)$$

2.2 接触面が水潤滑状態のときの摩擦力特性¹⁾

乾燥状態のときには、タイヤ／路面間の接触面は平滑なほど真実接触面積が増えるので、粘着摩擦力 F_{xa} は大きくなる。しかし、水潤滑条件の場合には、タイヤ／路面間が平滑なほど接触面に水膜が均一に存在しやすくなり、その潤滑効果により粘着摩擦力 F_{xa} は小さくなる。現実的には、タイヤと路面には表面粗さが存在するので、

接触面では突起部と突起部が局所的に接触する状態となる。この場合、局所的な接触面では空間が生じ、接触面に介在する水がこの空間に入り込むので、突起部では水が減少し局所的に乾燥状態に近づく。これにより摩擦係数も局所的に大きくなる。これに加えて、マイクロな視点で考えると、突起部の頂部にマイクロな粗さが存在するときには、突起部は断面積が小さく剛性が小さいので損失摩擦力 F_{xd} が作用し、同時に、マイクロ領域での排水性が向上して粘着摩擦も増加すると考えられている。

2.3 タイヤ/路面間のハイドロプレーニング現象¹⁾⁵⁾

雨天時のハイドロプレーニング現象は、タイヤが水に高速で衝突したときに作用する水の慣性力により生じる動圧がタイヤの接地面圧より大きいときに発生すると考えられている。タイヤが水膜上に浮く直前の状態を図3(a)に示す。水は接触面前方からクサビ状に侵入するので、タイヤ/路面間の接地面は後端部のみとなる。この部分を図3(b)の簡易モデルで考えると、平板が極小さい迎え角で路面と接しているときの接触面後端で作用する水の慣性力により生じる動圧 P_f は、水の密度を ρ とするとベルヌーイの定理から式(3)と表すことができる。

$$P_f = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3)$$

接触面圧の分布を断面放物線形状と仮定すると、接触面圧はその中央が最も高くなる。そして、タイヤの接触面圧が内圧 P_a の1.55倍程度に相当するとの知見⁵⁾を用いると、最大接触面圧 P_c は式(4)となる。

$$P_c = 1.55P_a \quad (4)$$

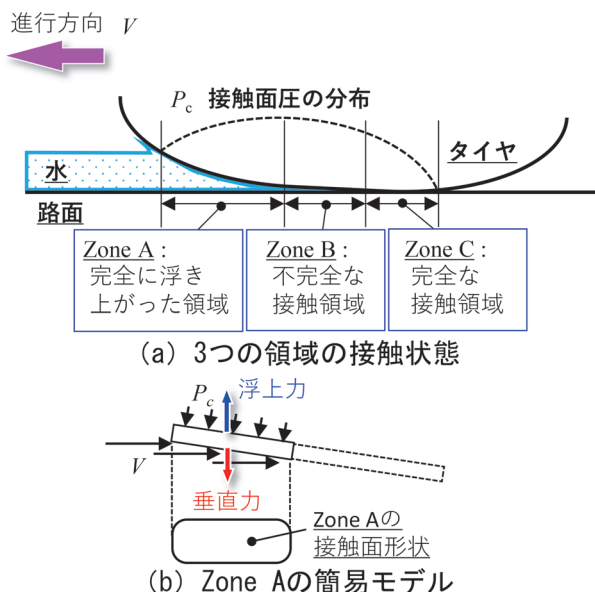


図3 ハイドロプレーニング現象の発生メカニズム

ここで、タイヤが水膜上に浮き上がる速度条件は、水の慣性力により生じる動圧がタイヤ接地面中央の接触面圧より大きいときなので、式(3)と式(4)から、

$$V \geq 50.47 \sqrt{P_c} = 63 \sqrt{P_a} \quad (5)$$

となる。単位は V が km/h、 P_c と P_a が kgf/cm^2 とする。

接触面が平滑な場合、水の慣性力により生じる動圧が高いほど、接触面の前端部から中央部に向けて水が侵入しやすくなると想像できる。現実的には、接触面には表面粗さがあるため、非接触部と水の慣性力により生じる動圧より低い接触面圧となる接触部を通過しながら、接触面の中央部に向けて水は侵入すると推察される。

なお、接触面に侵入する水の挙動や量を定量的に評価する際、詳細な数値解析モデル¹⁾が提案され実用に供用されている。これについては別報に譲ることとする。

以上、タイヤ/路面間の接触理論を整理した。次章では、車輪踏面に生じた車輪削正痕と車輪/レール間の接線力特性の関係を接線力測定実験で調査し、その結果についてタイヤ/路面間の接触理論を参照し考察する。

3. 水潤滑条件での接線力測定実験による検証

3.1 接線力測定実験の概要

車輪/レール間の接触を直径30mmの一对の小型円筒試験輪の接触で模擬した接線力測定実験により、車輪削正痕と水潤滑条件での車輪/レール間の接線力特性の関係を調査する。今回の接線力測定実験では、鉄道総研の転がり一すべり摩擦力試験機(図4)を使用した。

荷重条件は450Nとした。これは実際の車輪/レール間の接触面圧と同等の約1.0GPa程度となるよう、接触面の平滑な車輪側試験輪(Type-W)を対象に計算で求めた値である。

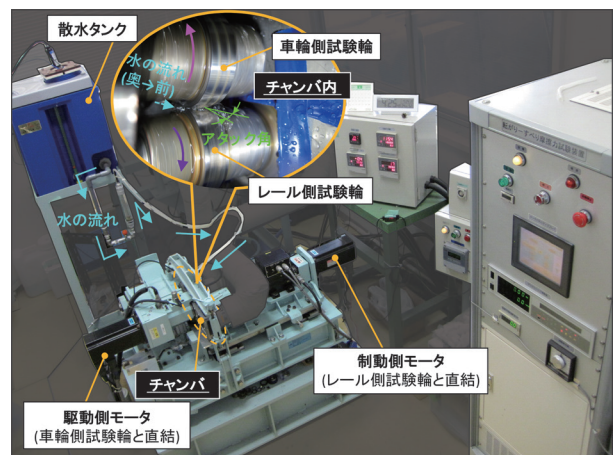


図4 水潤滑条件での接線力測定実験

水潤滑条件の実験では、水タンクから試験輪の巻き込み側の接触面近傍までチューブを設け、チューブ先端から接触面に向けて水温 20℃ 程度の井戸水を散水した。そして、両試験輪を僅かに異なる周速度で転動接触させながら、接触面に作用する前後・左右方向の接線力をそれぞれの方向に設けたロードセルで測定した。

3.2 試験輪の仕様

車輪側試験輪とレール側試験輪を図 5 に示す。車輪削正痕の有無と水潤滑条件での接線力特性の関係を調査するため、車輪側試験輪は接触面が平滑な Type-W と、車輪削正痕を模擬してピッチ 1mm、高さ 90 μm の微小凹凸をらせん状に設けた Type-J の 2 種類を製作した。

また、レール側試験輪は、車輪側試験輪との接触面形状（コンタクトパッチ）が楕円形状となるよう接触面を半径 300mm の円弧形状にした 1 種類を製作した。

全ての試験輪は、表面の脂分や不純物を除去するため、実験前に石油エーテルに完全に浸した状態で 15 分間の超音波洗浄を行い、完全に乾燥させた後に実験に用いた。

3.3 実験条件

主要な実験条件は表 1 の通りである。

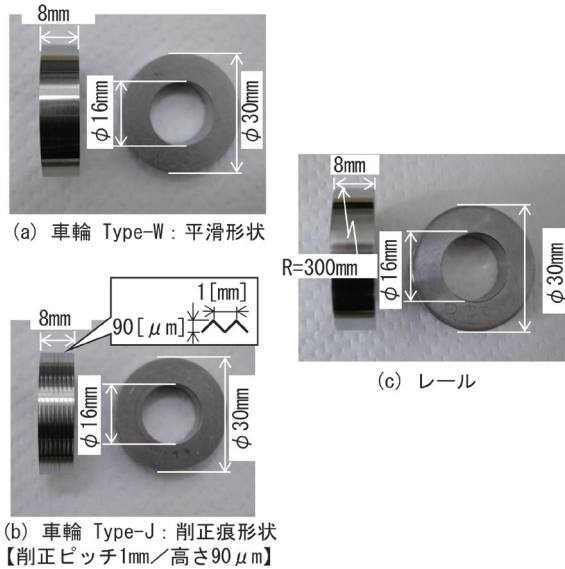


図 5 車輪側試験輪とレール側試験輪

表 1 主要な実験条件

設定項目	実験条件
周速度(km/h)	0.6, 2.8, 5.7, 8.5, 11.3, 17.0, 20.0
前後方向のすべり率(%)	0.3, 0.5, 0.8
荷重(N)	450 ※実車輪/レール間の接触面圧と同等
アタック角(deg)	0, 約0.2
散水流量(L/min)	約0.01, 約0.1, 約0.5

4. 水潤滑条件での接線力測定実験の結果

4.1 接触面の表面性状と接線力特性の関係

接線力測定実験では、乾燥条件で接線力係数が飽和傾向を示すまで測定を行い、その状態から連続して接触面に向けて散水することで、水潤滑条件での測定を行った。本節の水潤滑条件の実験では、散水流量は 0.01L/min と極少量とし、試験輪の周速度を 0.6km/h から最大 20.0km/h まで約 2 分間隔でステップ状に増加させながら周速度ごとに接線力係数を評価した。すべり率は乾燥条件と水潤滑条件ともに 0.5% 一定とした。Type-W の場合の実験結果の一例を図 6 に示す。実験 1（青線）と実験 2（緑線）は、同一条件の実験結果である。

まず、実験結果の再現性を確認する。青線と緑線の比較から、接線力係数の立ち上がりの挙動が若干異なるが、接触面が安定した状態のときは、両者の挙動は同様となっており、接線力係数は定量的にも同等と評価できる。このことから、実験結果の再現性が確認できた。Type-J についても同様であった。なお、Type-W の実験開始初期の接線力係数の立ち上がり挙動の違いは、接触面の表面性状が変化する過程における若干の差異によるものと考えられる。

次に、車輪/レール間でも、タイヤ/路面間と同様に速度依存性があることを確認するため、Type-W の場合について、周速度と接線力特性の関係を時系列波形で評価した。接触面に繰り返しの転がりすべり摩擦力が作用すると接触面の表面性状が変化するため、接線力係数はゆっくりと増加する。そして、実験開始から 10 分程度

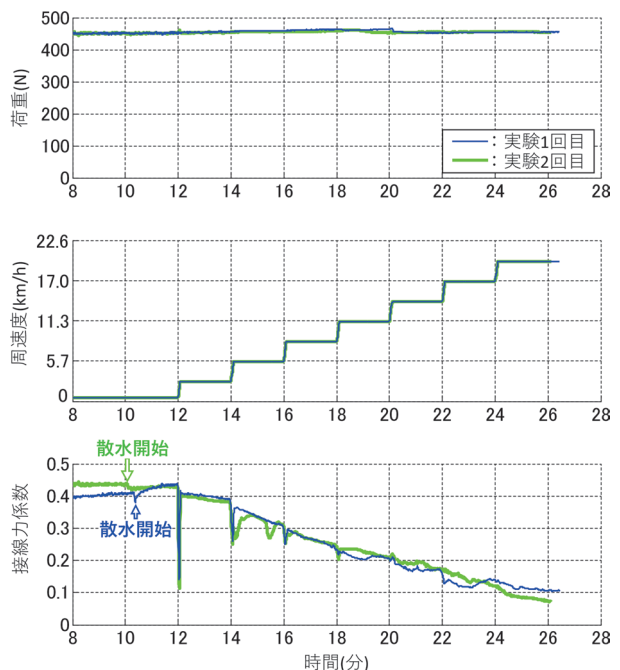


図 6 接線力測定実験の結果 (Type-W)

で接線力係数は飽和傾向を示すことが図6から分かる。この時の接線力係数は約0.42で、これを乾燥条件の代表値とする。

この状態から連続して、接触面に向けて散水流量0.01L/minで水を滴下する水潤滑条件の実験を行った。周速度0.6km/hのときの接線力係数は、乾燥条件と同等の約0.42である。しかし、試験輪の周速度をステップ状に増加すると、周速度の増加とともに接線力係数は小さくなっていく。これは試験輪の周速度の増加により、接触面に侵入する水量が増加し、接触面の潤滑効果が増したためと考えられる。この実験結果は、車輪/レール間でも速度依存性があることを示唆する結果と考える。

その一方で、試験輪の周速度ごとに接線力係数の変化に着目すると、例えば、周速度8.5km/hでは、この間の実験条件は不変だが、接線力係数は実験時間の経過とともに少しずつ低下していることが分かる。この傾向はType-Jでも同様に認められた。この理由として、接触面の表面性状の変化が考えられるので、Type-Wを対象に実験前後で車輪側試験輪の接触面の比較を行った(図7)。

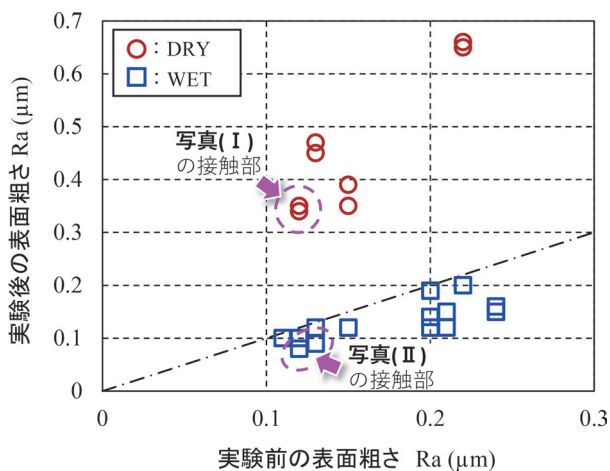
図7(a)から、表面粗さ測定器で計測した車輪側試験輪の接触面の表面粗さは、乾燥条件では実験後の方が大

きいのに対し、水潤滑条件では実験後の方が小さいことが分かる。過去の知見⁷⁾によると、乾燥条件では、実験初期に表面粗さが若干小さくなり、同時に接触面の表面性状が活性化するので、接線力係数は増加して飽和状態に達する。そして、その後は、接触面の摩耗に起因する真実接触面積の減少により、接線力係数は若干減少傾向を示すことが分かっている。図7(a)のDRYの結果も、過去の知見と符合する結果となっている。

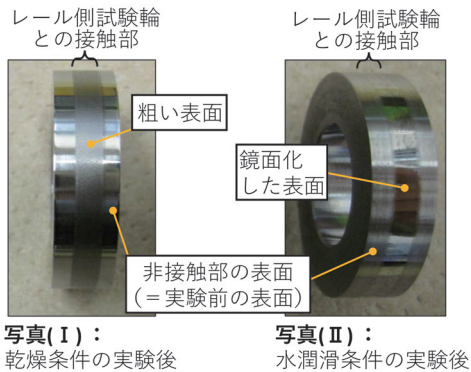
他方、水潤滑条件での接触面の表面性状と接線力特性の関係では、接触面に水が介在する状態で転がりすべり摩擦力を作用させると研磨作用が生じる場合があり、この場合、実験時間の経過とともに接触面に生成した茶褐色の酸化膜が削り取られて凝着しにくくなるので、接線力係数が少しずつ低下すると、図7(a)の表面粗さの変化から推察できる。また、実験後の車輪側試験輪の接触面を観察した図7(b)の写真(II)からも、水潤滑条件では接触部が鏡面化していることが目視で判別でき、表面粗さが小さくなっていることが理解できる。

以上から、水潤滑条件における接線力特性には、タイヤ/路面間と同様に速度依存性があることが分かった。そして、水潤滑条件における接線力測定実験で計測される接線力特性は、乾燥条件と同様に接触面形状と接触面の表面性状の変化に基づく現象に加えて、速度依存性を有する水による潤滑効果と接触面の水潤滑状態の僅かな差異により生じる研磨作用が関与することが分かった。特に、研磨作用はタイヤ/路面間では認められない現象と考えられる。

なお、接触面の水による研磨作用は、接触面に介在する水膜が比較的厚い状態となる実験条件で生じる現象と考えられ、全ての接線力測定実験で認められる現象ではないことを付記する。



(a) 接触部の表面粗さ



(b) 車輪側試験輪の接触面の変化状態

図7 実験前後の車輪側試験輪の表面粗さの比較

4.2 車輪削正痕と水潤滑状態の接線力特性の関係

接触面に設けた削正痕が接線力特性に及ぼす影響を調査するため、図5の2種類の車輪側試験輪を用いて、4.1節と同様の実験を行った。周速度ごとに求めた約2分間の接線力係数の平均値を代表値とした、試験輪の周速度と接線力係数の関係を図8に示す。

図8から、乾燥条件(白抜き印)では、周速度が変化しても接線力係数はおおむね一定となっており、速度依存性は認められない。それぞれの接線力係数は、Type-Wが約0.41、Type-Jが約0.27で、接触面に削正痕を設けたときの方が小さい。これは接触面に削正痕を設けたことにより真実接触面積が小さくなったためである⁴⁾。

次に、水潤滑条件(濃色印)では、接触面の削正痕の有無に関係なく、試験輪の周速度の増加とともに接線力係数が減少している。周速度20km/hのときの接線力係数で比較すると、Type-Wは約0.10、Type-Jは0.12で、

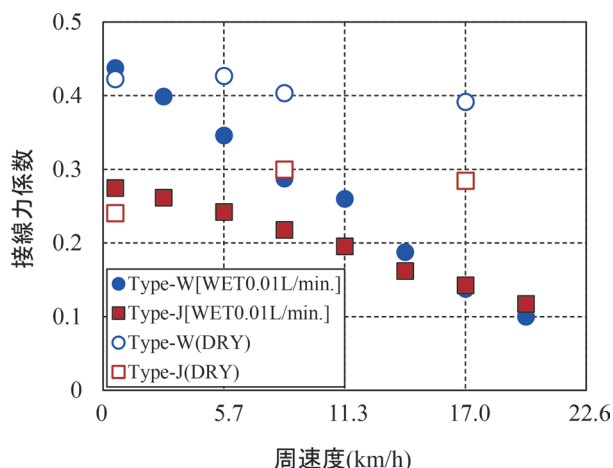


図8 接触面の削正痕と接線力係数の関係

それぞれ乾燥時の約 25%、約 44%に小さくなっている。そして、接触面に設けた削正痕の有無による接線力特性は、周速度 20km/h 程度でその差異がなくなり、これ以上の周速度になると、接触面に設けた削正痕の影響が無視できる程度に小さくなる。

ここで、タイヤトレッドに適切な形状のグループを設けたときのタイヤ/路面間のように、車輪/レール間では接触面に削正痕を設けたことによる接線力向上効果は、図8からは認められない。これは以下の理由と考える。

最初に、タイヤ/路面間の場合について述べる。一般にタイヤの内圧は 300kPa 程度と高くない。タイヤが水膜上に浮き上がる臨界速度を式(5)から求めると、自動車の実用速度域の約 110km/h となる。しかし、タイヤトレッドに適切な形状のグループを設けると、以下の2つの理由により粘着摩擦力 F_{xa} が大きくなり、ドロプレーニング現象の臨界速度が向上する効果が得られる。

一つ目は、接触面の排水性能が向上するので、タイヤ/路面間の真実接触面積が増加し粘着摩擦力 F_{xa} が大きくなる。二つ目は、図3のように接触面が完全に水で浸された状態では、高速時ほど水の慣性力により生じる動圧によりタイヤトレッドが軸中心方向に押し潰され窪むので、タイヤ/路面間には水を溜め込みやすい状態となる。このとき、タイヤトレッドにグループを設けると排水性能が向上し真実接触面積が増加するので粘着摩擦力 F_{xa} が大きくなる。

これらに加えて、タイヤは粘弾性材料でできているため、水潤滑条件では損失摩擦力 F_{xd} が粘着摩擦力 F_{xa} より相対的に大きくなる。損失摩擦力 F_{xd} のピーク値となるすべり速度は、粘着摩擦力 F_{xa} のピーク位置より一般に高いとされ⁶⁾、粘着摩擦力の弱点を補うことができる。

このように、さまざまな特性の組合せにより得られる複合的な効果により、トレッドにグループを設けたタイヤは水潤滑条件のときに幅広い速度域で全摩擦力を向上することができる。

次に、車輪/レールの場合について述べる。車輪/レール間の接触面圧は理論的に 800MPa 以上とされ、式(9)からドロプレーニング現象の臨界速度を求めると 1000km/h 以上の値となり、鉄道車両の実用速度域においては車輪とレールの接触部が水で完全に遮断されることはないと考えられる。また、実用速度域で想定される水の慣性力により生じる動圧に対して金属は十分な堅さを持っているため、車輪踏面が部分的に窪み、タイヤのように接触面に水を溜め込む可能性も低いと考えられる。これらは真実接触面積を減少させない観点からメリットとなる。

しかし、車輪とレールを構成する金属は完全弾性体に近い材料物性のため、金属同士の接触面で作用する摩擦力は粘着接線力 F_{xa} のみとなる。また、金属同士の接触面で作用する摩擦係数は、乾燥時でも一般に 0.3 程度とタイヤ/路面間と比べて小さいため、粘着摩擦力 F_{xa} はタイヤ/路面間と比べて小さい。さらに、粘着摩擦力 F_{xa} の弱点を補う損失摩擦力 F_{xd} が期待できないので全接線力は小さく、これが作用するすべり速度の幅も狭い。これらはタイヤ/路面間の場合に対する大きな違いとなる。

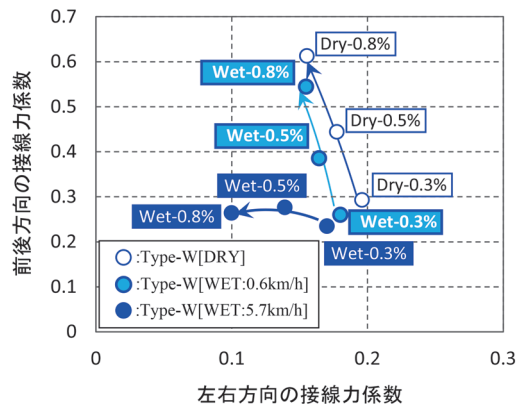
このため、車輪/レール間の接線力係数はタイヤ/路面間の摩擦係数と比べて小さく、車輪の材料物性は損失摩擦力 F_{xd} を得ることができないため、車輪踏面に削正痕を設けても車輪/レール間の粘着摩擦力 F_{xa} が低下するだけで、タイヤ/路面間のような摩擦力向上効果は得られないと考えられる。図8の結果はこの考えの妥当性を示している。

以上より、タイヤ/路面間の接触理論を参照し、接線力測定実験の結果を考察した結果、車輪踏面に生じた車輪削正痕は、水潤滑条件での車輪/レール間の接線力を向上する効果は期待できないことが明らかとなった。

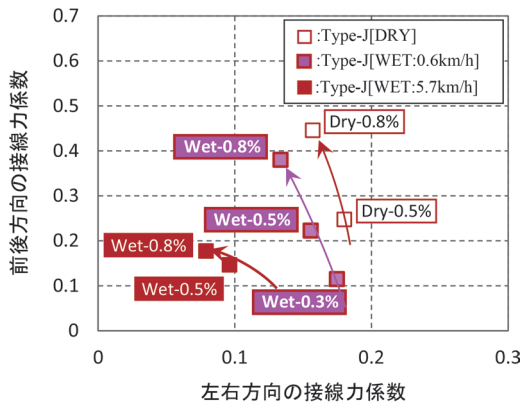
4.3 アタック角の有無と接線力特性の関係

試験輪間にアタック角を設けたときの接触面で作用する前後・左右方向の接線力特性を調査するため、アタック角 0.2deg を設けた条件で接線力測定実験を行った。前後方向のすべり率は 0.3%、0.5%、0.8% の3通りを基本とし、Type-Jの一部では 0.3%の実験を省略した。図9(a)と図9(b)にType-WとType-Jの実験結果をそれぞれ示す。縦軸は前後方向の接線力係数、横軸は左右方向の接線力係数で、計測値の横のアルファベットと数値は、実験条件と試験装置に設定する前後方向のすべり率(以下、設定すべり率と記す)を意味する。

試験輪間にアタック角を設けると、いずれの条件でも、前後と左右の2方向の接線力が作用している。これは2.1節で述べた摩擦円の原理によるもので、車輪/レール間の場合でも、タイヤ/路面間と同様の傾向となることが分かる。



(a) Type-Wの場合



(b) Type-Jの場合

図9 アタック角を設けたときの接線力特性

図9(a)と図9(b)から、乾燥条件の場合（白抜き印）では、前後方向の設定すべり率が大きくなると、前後方向の接線力係数が増加し、左右方向の接線力係数が減少するので、それぞれの印は図の左上側に移動する。水潤滑条件で周速度0.6km/hの場合（淡色印）、接触面に水が介在したことで、乾燥条件より接線力係数は若干小さいが、前後方向の設定すべり率が大きくなるとそれぞれの印は図の左上側に同様に移動することが分かる。これらの条件では、前後方向の設定すべり率をさらに大きくすると、前後方向の接線力係数はより大きくなると考えられ、接触面に作用することができる接線力にポテンシャルがあることが推察される。

その一方で、水潤滑条件で周速度を5.7km/hまで増加した場合（濃色印）、前後方向の設定すべり率を大きくしても前後方向の接線力係数は増加せず、それぞれの印は図の左側に移動している。これは接触面に作用することができる接線力のポテンシャルに対して、入力した接線力が超過していることを意味しており、試験輪の周速度の増加により接触面の潤滑効果が向上し、摩擦円の直径が小さくなったことが理由と考えられる。この場合、前後方向の設定すべり率をさらに大きくしても、前後方向の接線力係数を大きくすることはできない。

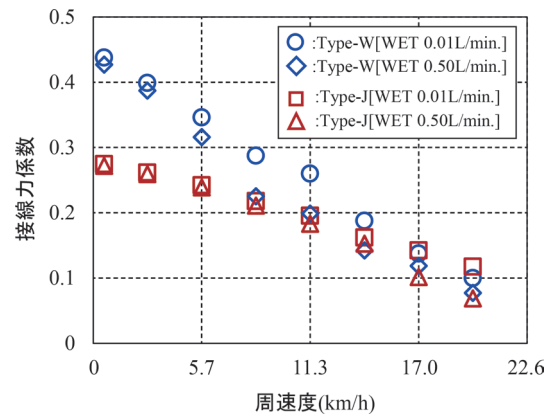


図10 散水流量の多寡と接線力係数の関係

以上より、試験輪間にアタック角を設けた場合、水潤滑条件においても、前後と左右の接線力が接触面に作用することが分かった。また、試験輪の周速度を増加すると接触面へ侵入する水量が増すので、前後と左右の接線力係数はさらに小さくなることが分かった。そして、試験輪に削正痕を設けると、接触面の真実接触面積が小さくなることと、接触面に水の潤滑効果が生じることの相乗効果により、接触面が平滑なときと比べて接触面の摩擦円がさらに小さくなるので、前後・左右方向ともに接線力係数は小さくなることが分かった。

4.4 散水流量の多寡が接線力特性に及ぼす影響

散水流量の多寡と接線力特性の関係を調査するため、散水流量0.01L/minと0.5L/minの2つの条件で、周速度と接線力係数の関係を比較した。前後方向のすべり率0.5%一定、アタック角ゼロの場合のType-WとType-Jの実験結果を図10に重ねて示す。

図10から、試験輪の周速度が増加すると、接触面に侵入する水量が増えるので、接線力係数が小さくなっている。これはType-WとType-Jに共通している。そして、散水流量の多寡と接線力係数の関係に着目すると、接線力係数に差異が生じ始める周速度がType-WとType-Jで異なることが分かる。具体的には、Type-Wでは試験輪の周速度が0.6km/h程度から接線力係数の差異が生じているのに対し、Type-Jでは試験輪の周速度が8.5km/h程度以降で接線力係数の差異が生じている。この差異は、接触面圧と水の慣性力により生じる動圧の大小関係に起因するものと考えられる。これを説明するため、Type-Wを例にとり、図11の水潤滑条件における車輪回転時の接触面の状態から説明する。

図11では、車輪側試験輪とレール側試験輪の接触面には微小な表面粗さがあるため、微小な突起同志による接触部とその周囲の非接触空間が存在する。また、接触面での接触形態には赤丸印と青丸印の2つが考えられる。赤丸印は接触部と周囲の非接触空間が水で満たされ

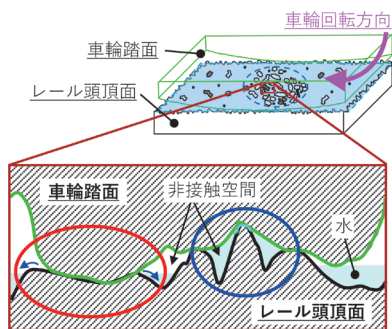


図 11 水潤滑状態の接触面 (Type-W の場合)

ていない場合、青丸印は接触部と周辺の非接触空間が水で満たされている場合である。赤丸印では、水は接触部周辺の非接触空間に流出するため、接触面では潤滑効果が低下して接線力係数は局所的に大きい傾向を示すと考えられる。他方、青丸印では、接触部とその周辺の非接触空間は水で完全に満たされているため、接触部の水はその周囲に流出することができない。このため、接触部は完全な水潤滑状態となるので接線力係数は小さい傾向を示すと考えられる。

試験輪の周速度が増加すると、2.3 節で述べたように、接触面に侵入する水の慣性力により生じる動圧が増加するので、図 11 の水位が上昇して水のない非接触空間も水で満たされる。これにより、接線力係数は下限値まで小さくなると考えられる。このような接触面の状態から推察すると、Type-W の接線力係数の差異が周速度 0.6km/h 程度と小さい条件から生じた理由は、Type-W の接触面圧が Type-J のときより小さいためと考えられる。

以上から、水潤滑条件における接線力特性は、接触面に存在する極僅かな水による潤滑効果を受け、特に、周速度が大きい時ほど顕著に受けることが分かった。そして、散水流量の多寡と接線力特性の関係では、試験輪の周速度との兼ね合いにより求まる接触面に侵入可能な水量に対して、接触面周辺に実際に存在する水量の方が多いときに、接線力係数はより小さい傾向を示すことが分かった。

その一方で、散水流量の多寡と接線力係数の関係を定量的に評価するとその差異は小さくなく、4.2 節で述べたように、接触面に侵入する水により車輪とレールが実用速度域で完全に遮断されないことを考慮すると、接線力係数がゼロになるのではなく一定の下限値が存在すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、車輪削正痕と車輪／レール間の水潤滑状態における接線力特性の関係を明確にするため、接触形態が似ているタイヤ／路面間の接触理論を参考に、車輪とレールの接触を直径 30mm の一組の小型円筒試験輪

の接触で模擬した接線力測定実験により調査を行った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 車輪／レール間の水潤滑条件における接線力係数は、接触面に介在する極少量の水の影響を顕著に受け、周速度 20km/h 程度までの間に乾燥時の半分以下まで急峻に減少することが分かった。
- (2) 接触面に水が介在した状態で転がりすべり摩擦力を加え続けると研磨作用により接線力係数が少しずつ減少する特徴的な現象が生じる場合があることが分かった。
- (3) 水潤滑条件で試験輪間にアタック角を設けると、乾燥条件のときより前後・左右方向の接線力係数がともに小さくなること、接触面に介在する水量が増すと摩擦円が小さくなり、これらの接線力係数はさらに小さくなること、それぞれ分かった。
- (4) 散水流量の多寡が接線力特性に及ぼす影響は小さいことが分かった。
- (5) これらの傾向は、接触面に削正痕を設けた場合も同様で、特に、削正痕を設けると接触面の真実接触面積が小さくなるので、接線力係数は、低速時には平滑な接触面のときより小さく、高速時には接触面の潤滑効果が支配的となるため、削正痕の有無による影響が無視できる程度に小さくなることが分かった。

以上から、車輪／レール間の接触面の排水性能を期待して車輪踏面に削正痕を設けたとしても、タイヤ／路面間のように接線力向上効果は期待できないことが明らかとなった。

なお、本実験では試験装置の仕様により、試験輪の周速度は最高 20km/h 程度の検討となったが、図 10 の Type-W と Type-J の実験値を結ぶ近似曲線から推察すると、周速度 20km/h 以上の場合も、接触面に設けた削正痕の有無に係わらず、両者は同等になると考えられる。

文献

- 1) 中島幸雄：タイヤのハイドロプレーニングについて、混相流、Vol.27, No.2, pp.102-109, 2013
- 2) Transportation research board of the national academies, "TCRP Report 71 Track-Related research", Vol.5, pp.24-25, 2005.
- 3) 内田清五：新幹線のプレーキシステム (3)、鉄道車両と技術、Vol.6, No.4, pp.18-19, 2000
- 4) 山本大輔：鉄道車両の車輪削正痕に着目した車輪／レール間の接線力特性に関する研究、東京大学博士論文、2021
- 5) 酒井秀男：タイヤ工学、グランプリ出版、pp.271-276, 2004
- 6) 大原利一郎：摩擦の理論、日本ゴム協会誌、Vol.68, No9, pp.587-594, 1995
- 7) Yamamoto, D., Influence of Machined Surface on Transient Characteristics of Tangential Force at Wheel/Rail Interface, Quarterly Report of RTRI, Vol.61, No.2, pp.139-145.