

2円筒試験装置を用いた実験による 散水流量と車輪／レール接線力の関係評価

山本 大輔*

Evaluation of Relationship between Water Flow Rate and Tangential Contact Force of Wheel/Rail
Using Twin-disc Rolling Machine

Daisuke YAMAMOTO

In this study, to investigate the effects of various experimental conditions such as circumferential velocity of the test wheel, amount of water spray, and contact pressure on the tangential contact force characteristics, experiments to measure the tangential contact force were carried out at a maximum circumferential velocity of 130km/h. The results show that a small amount of water on the contact surface has a great influence on a decrease in the tangential contact force. Furthermore, it is clarified that the amount of water between actual wheels and rails when running in rainy conditions may be extremely small, when the amount of water intervenes on the contact surface is considered as an inverse problem from the experimental results under several water flow rate conditions. This tendency is similar for all contact pressure conditions and is qualitatively consistent with the actual phenomenon.

キーワード：車輪／レール，接線力特性，水潤滑状態，低粘着現象，車両運動

1. はじめに

雨天時を始めとする車輪／レール間の低粘着現象は、鉄道車両の輪軸の滑走を誘発して車輪踏面に滑走痕（いわゆる「フラット」）、レール頭頂面に損傷を生じさせることがある。このような損傷は、車両が走行する際に不快な騒音源となり快適性を損ねるだけでなく、車輪／レール間では過大な振動源になるため車両や軌道を構成する部品の損傷を助長する一因ともなる。このため、輪軸の過大な滑走を未然に防止することが望まれる。

この課題に対して、車輪踏面を研磨子により適度に粗して粘着力を向上させる手法¹⁾が考案されたこと、車輪の空転・滑走をいち早く検知しこれを収束することを基本とする再粘着制御技術の開発²⁾により、車輪やレールの損傷は大幅に低減したとされる。車輪の滑走を低減する手法に関する今後の展開として、車輪／レール間の接線力特性を考慮することが鍵となると推察される。このような考えから、これまで実験的研究が行われ数多くの報告もある。例えば、実物車両を用いた走行実験では、車輪／レール間が水潤滑状態となるとき粘着係数は乾燥時と比べて小さく、速度向上とともにこれが減少する速度依存性が認められること²⁾³⁾、さらに、車輪とレールの接触を一對の円筒試験輪の接触で模擬した2円筒試験装置を用いた乾燥条件での室内実験では、試験輪間の接触面形状とその表面性状、そして接触面の周辺湿度

が、乾燥条件のときに接触面に作用する接線力の増加・減少メカニズムに深く関与することが報告⁴⁾⁶⁾されている。その一方で、水潤滑条件では、車輪とレールの接触面は、理論的⁷⁾には水が混在した状態で、表面粗さの微小突起同士で接触していると考えられるが、現状では、ここに作用する接線力特性、すなわち「車輪／レール間の接線力係数とすべり率の関係」は海外で数件の報告⁵⁾がある程度で十分に理解されているとは言えない。

本稿では、車両の滑走制御や車両運動解析に活用することを念頭に、2円筒試験装置を用いた接線力測定実験（図1）により、実車輪／レール間と同等の接触面圧となる条件での散水流量と接線力特性の関係を定量的に評価する。また、室内実験での接線力特性がそのまま走行時の実車輪／レール間のものとはなり難いことを考慮し、計測した接線力係数と走行実験に基づく評価式との比較により、実現象と室内実験の関係についても触れる。

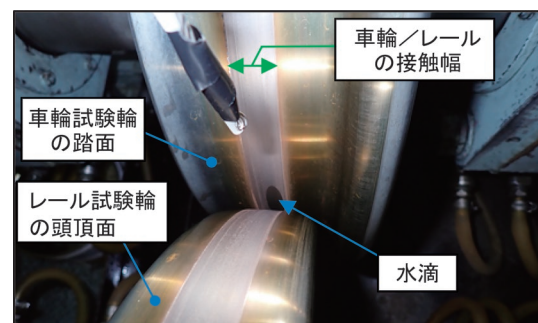


図1 車輪／レール間に滴下した水滴

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

2. 既往研究における接線力特性の概要

2.1 接線力の増加・減少メカニズム

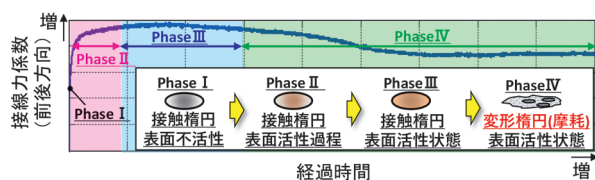
既報⁴⁾⁶⁾では、車輪とレールの接触を直径30mmの一对の小型円筒試験輪の接触で模擬した基礎的な接線力測定実験により、乾燥条件のときの接線力の増減メカニズムを調査している。ここでは、試験輪間のすべり率を一定条件として転動接触させた接線力測定実験により、試験輪の削正後から転動接触により接触面が摩耗するまでの間について、接触面形状とその表面性状、接触面の周辺湿度に着目して評価している。以下にこれらをまとめ、実験時に観察された現象を模式図で図2に示す。

- ① 時間の経過とともに接触面の表面性状が変化するため、接線力係数は増加して一定値に飽和する(Phase I～Phase III)。また、接触面が平滑な条件ほど接線力係数は大きい。
- ② 繰り返しの転動接触にともない接触面が摩耗するとその突起の先端で接触する形態に変化するため、接線力係数は最大値から若干低下する(Phase IV)。
- ③ 接触面の周辺湿度が定常的に30%以下と低い条件では接触面の潤滑効果が低下することで接線力係数がより大きい傾向を示す。

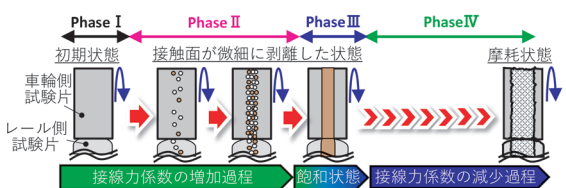
乾燥条件と水潤滑条件の接線力特性の差異は接触面に水が存在するか否かで、車輪鋼の降伏応力760MPaを超過するとされる車輪/レール間の高い接触面圧を考えると、鉄道車両の実用速度域では車輪とレールが水膜により完全に遮断されることは理論的⁷⁾には考えられない。すなわち、接触面で作用する力は流体のみにより伝達される訳ではないので、水潤滑条件でも接触面に作用する接線力の増減メカニズムに基づく考察が必要となる。

2.2 接触面が水潤滑状態のときの接線力特性

既報⁸⁾では、2.1節と同じ試験装置を用いて、水潤滑条件での接線力測定実験も行っており、試験輪の周速度が



(a) 接線力係数と試験輪間の接触槽円・表面性状の変化



(b) 2円筒実験による試験輪間の接触面の変化

図2 接線力の増加・減少メカニズムの模式図⁴⁾⁶⁾

20km/h程度まで増加する間に乾燥時の半分以下まで接線力係数が急峻に減少する実験結果を報告している。また、この理由として、自動車用ゴム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とゴムタイヤ接地面圧の大小関係から両者が水膜により分離する臨界速度を求める理論⁷⁾と比較して考察している。具体的には、自動車用ゴムタイヤでは実用速度域でタイヤが水膜上に浮くハイドロプレーニング現象が生じるが、車輪/レール間の接触面圧はゴムタイヤ/路面間の場合より十分に高いため、実用速度域では車輪とレールが水膜により分離されることは理論的に考えにくい。その一方で、速度向上とともに水の動圧は増加するため、車輪とレールの表面粗さの隙間を通過して接触面へ浸入する水量が増加すると考えられ、これにより接線力は低減すると結論付けている。このような速度依存性は、営業線での実物車両を用いた走行実験でも「粘着係数(=接線力係数の最大値)と速度の関係」として同様に確認²⁾³⁾されており、その傾向は定性的に一致している。

しかしながら、「接触面に介在する水量と接線力係数の定量的な関係」や接触面が水潤滑状態となるとき「粘着係数とすべり率の関係」については明確でなかった。このため、第3章以降で実験的に評価する。

3. 2円筒試験装置を用いた接線力測定実験

雨天時を想定した接線力測定実験は、鉄道総研の2円筒試験装置の試験輪間に水を直接供給して実施した。実験では、接触面圧が実車輪/レール間の場合と同等となるよう設定し、試験輪の周速度、接触面で生じるすべり率、散水流量、試験輪に負荷する荷重(接触面圧)の4つの実験条件を変えたときの試験輪間の接線力係数とすべり率の関係を評価した。車輪試験輪とレール試験輪の断面形状⁹⁾は、それぞれ修正円弧踏面形状とJIS 50kgNレールとした。なお、本実験を効率のかつ効果的に実施するため、同一試験輪をさまざまな実験条件で繰り返し使用することとした。そのため、接触面の摩耗に起因して生じる試験輪間の接触面積の変化による実験誤差の偏在を防止することを考え、荷重とすべり率の実験順序をランダムに設定しながら行った。

3.1 実験装置

鉄道総研が所有する大型2円筒試験装置の一つである「車輪・レール高速接触疲労試験装置」(図3)を用いた。本試験装置は、直径500mmの車輪試験輪とレール試験輪の組合せで構成しており、実車輪/レール間に作用する接触面圧と同等とするため、油圧アクチュエータにより車輪試験輪をレール試験輪に押付けた。実際のレールの下部には1/40の勾配を有するタイププレートが

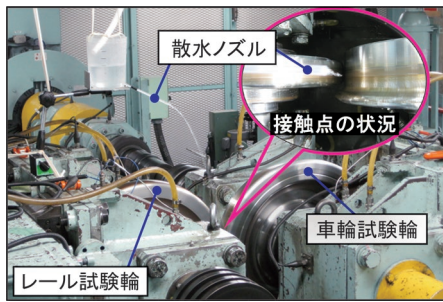


図3 水潤滑条件での接線力測定実験

敷設されていることが多く、この場合、レールは軌道中心方向に傾いて車輪と接触しているが、これと同様の接触状態とするため、本試験装置では車輪試験輪を約1.4deg. 傾けて両者の接触状態を相対的に同等とした。実験では、車輪試験輪とレール試験輪を、実物輪軸がスラックのない軌道上の中立位置に載った状態と同等となる位置関係として接触させた。

雨天時を模擬した水潤滑条件での実験では、試験輪間の接触面を水潤滑状態とするため、散水装置を試験装置の台座にマグネットクランプで固定するとともに、試験輪の接触位置の上部40~50cm位置に設けたノズル先端から試験輪の接触面に向けて水を自由放水した。

3.2 実験条件

実験条件を表1に示す。接線力測定実験は、在来線を想定して最高速度130km/hで行った。荷重条件は、実車輪/レール間の接触面圧を想定した15kNを基本とし、一部の試験では比較のため5kNとした。また、試験輪の接触面の損傷防止の観点から、すべり率を1.0%以下に制限して実験を行った。散水流量は表1に示すCase IとCase IIの2条件とし、水の温度は11.2~18.3℃であった。特に、Case Iの散水量が少ない。

次に、散水流量の条件と実現象の関係について考える。レール頭頂面に載った水が全て車輪/レール間に供給されると仮定し、走行中の車輪/レール間に供給される水量を計算する。実物レールの頭頂面に載る最大水量を計測すると、JIS60kgレールの場合には65×52mm²あたり1.0mLであった(図4)。車輪/レールの接触幅を10mmとすると、走行速度と接触面に供給される水量の

表1 実験条件

荷重(kN)		5	15
最大接触面圧(MPa)		629	907.2
Hertz理論に基づく接触楕円の大きさ(mm)	長径の半値	3	4.22
	短径の半値	1.26	1.82
周速度(km/h)		10, 20, 30, 60, 90, 130	
すべり率(%)		0.2, 0.25, 0.3, 0.5, 0.65, 0.8	
散水流量(mL/分)	Case I	約26mL/分	
	Case II	約500mL/分	
水温(℃)		11.2~18.3	

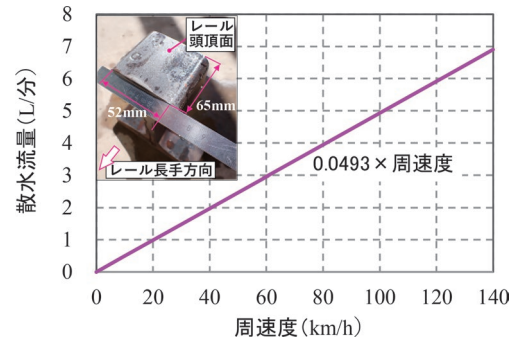


図4 実車輪/レールに換算したときの散水流量と周速度の関係

関係は図4となり、Case IとCase IIの散水流量が車両走行時の車輪/レール間に供給される最大想定水量に比べて十分少ないことが分かる

3.3 計測方法

計測項目は、車輪試験輪に作用するトルク T_w 、レール試験輪への押付力(荷重) N 、そして車輪試験輪とレール試験輪のそれぞれの周速度 v_w, v_r とし、試験装置に付属する計測装置によりサンプリング周波数1.0Hzでそれぞれ計測を行った。車輪試験輪の車輪回転半径(レール試験輪と接触する位置での車輪試験輪の半径)を r_w とすると、接線力特性の評価で必要となる試験輪間の接線力 F_{x_exp} とすべり率 s_x は、計測値を式(1)と式(2)に代入し演算で求めることができ、接線力係数は式(1)を押付力 N で除した値となる。

$$F_{x_exp} = \frac{T_w}{r_w} \quad (1)$$

$$s_x = \frac{100(v_w - v_r)}{v_w} \quad (2)$$

4. 接線力測定実験の結果とその評価

4.1 周速度と接線力係数の評価

水潤滑条件における試験輪の周速度と接線力係数の関係を評価する。すべり率0.3%、荷重15kNのときの実験結果を図5に示す。散水流量の条件は凡例のとおりで、接線力係数とすべり率の時系列波形に記した青色と緑色の網掛区間はそれぞれの評価区間を表し、その上下に記した下線付きの数値がそれぞれの平均値を意味する。

図5から、試験輪の周速度を増減すると接線力係数がこれに追従するように変動する様子がCase I(青線)とCase II(緑線)に共通して認められる。散水流量の少ないCase I(青線)で周速度130km/hの条件(250

～300秒付近)を除くと、周速度の速い条件ほど接線力係数は小さい傾向がそれぞれに認められる。特に、接線力係数は、周速度が30km/h程度まで増加する間に大きく低減する傾向が認められ、既報⁸⁾と同様の傾向となっている。散水流量の多いCase II(緑線)の接線力係数は、Case I(青線)のときより若干小さい傾向も認められるが、周速度60km/hから周速度90km/hで評価すると散水流量による差異は0.02程度で大きくない。

水潤滑条件での接線力係数は、同一試験装置を用いて計測した乾燥条件のときの接線力係数が0.35程度であったこと¹⁰⁾を考慮すると、乾燥条件のときの接線力係数に対して半分以下まで急峻に低減しており、接触面に介在する僅かな水の潤滑効果を顕著に受ける特性であることが分かる。ところで、Case I(青線)で周速度130km/hのときの接線力係数には不規則な大きな変動が認められる。これは周速度の増加により、接触面に介在する水膜が薄くなり局所的にセミウェットな状態となったためと考えられる。このような傾向は、荷重5kNの場合、さらに、既報¹¹⁾で実施した荷重25kNの場合でも同様の傾向が認められた。また、本稿では紙面の都合上記載を省略したが、散水流量を約9.4L/分とした多量の条件でも接線力係数は上記とほぼ同様であった。

以上から、水潤滑条件における周速度と接線力係数の関係では、接線力係数は乾燥時と比べて小さく、周速度30km/h程度までの間に接線力係数は急峻に低減し、そこから速度向上すると接線力係数は微減傾向を示す非線形的な速度依存性を有する特性となることが分かった。さらに、水潤滑条件での接線力特性は、接触面に浸入する極僅かな水でも十分な潤滑効果があり、散水流量が最少条件として設定した約26mL/分程度以上であれば、散水流量は接線力係数の低減に大きな影響は及ぼさないことが分かった。速度依存性については文献2と定性的に一致しており、散水流量と接線力係数の関係について

は、新たに分かった知見といえる。

4.2 接線力とすべり率の関係の評価

荷重15kNの場合の接線力係数とすべり率の関係を評価する。ここでは、周速度ごとに接線力係数が30秒間以上比較的安定している箇所を評価区間と定め、評価区間ごとに求めた接線力係数とすべり率の各平均値の関係を評価した。例えば、図5の接線力係数とすべり率の時系列波形の上部と下部に設けた青色と緑色の網掛区間で評価を行い、その結果、それぞれの平均値はその上下の下線付きの数値となる。周速度ごとにまとめた実験結果を図6に示す。散水流量ごとにCase I(約26mL/分)を青色▲印で、Case II(約500mL/分)を緑色▲印で示す。

図6(a)の周速度10km/hの場合、すべり率0.3%付近までは接線力係数が若干大きくなる傾向が認められ、すべり率が0.3%以上となると、接線力係数はそれぞれ0.15前後の値でおおむね一定となり飽和状態となっている。同様に、周速度20km/hから90km/hの場合(図6(b)～図6(e))でも、散水流量によらず周速度が向上すると接触面に浸入する水量が増加するため、接線力係数はそれぞれ小さくなっているが、すべり率の大小に対しては図6(a)と同様に一定傾向となっている。すべり率が0%から約0.2%となるときに接線力係数が大きくなる理由は、乾燥条件のときと同様で接触面内のすべり領域が増えるため、水潤滑条件の実験では、接触面が水潤滑状態となっているので、すべり率のより小さい条件から接触面が完全にすべり領域で占められた状態となり、接線力係数は小さい値で飽和すると考えられる。そして、これにより、すべり率が約0.2%から約0.8%までの範囲で接線力係数が一定となっていると考えられる。散水流量で評価すると、図6(a)と図6(b)の周速度10km/hと20km/hの低速条件では、散水流量が多い

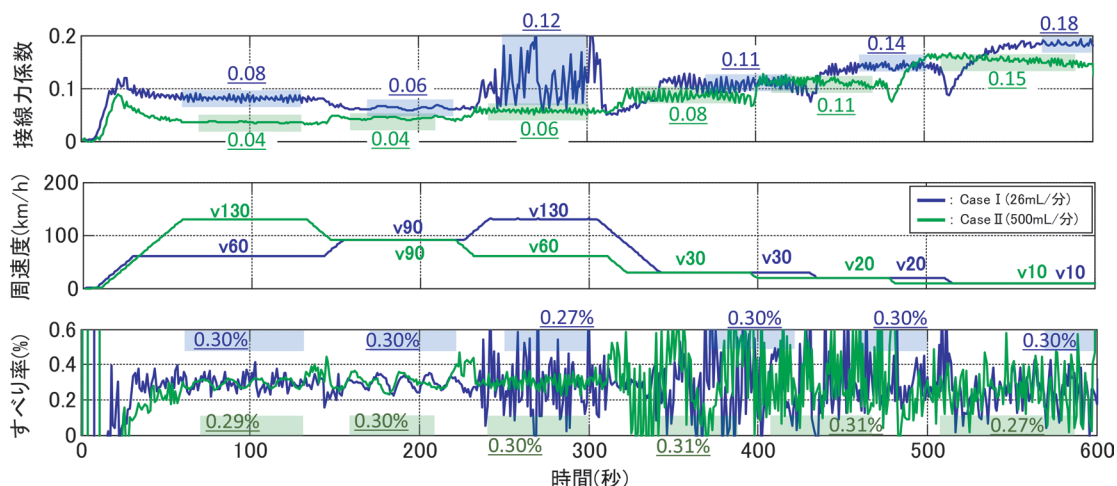


図5 散水流量の異なる条件における接線力係数、すべり率の計測結果の一例(荷重15kNの場合)

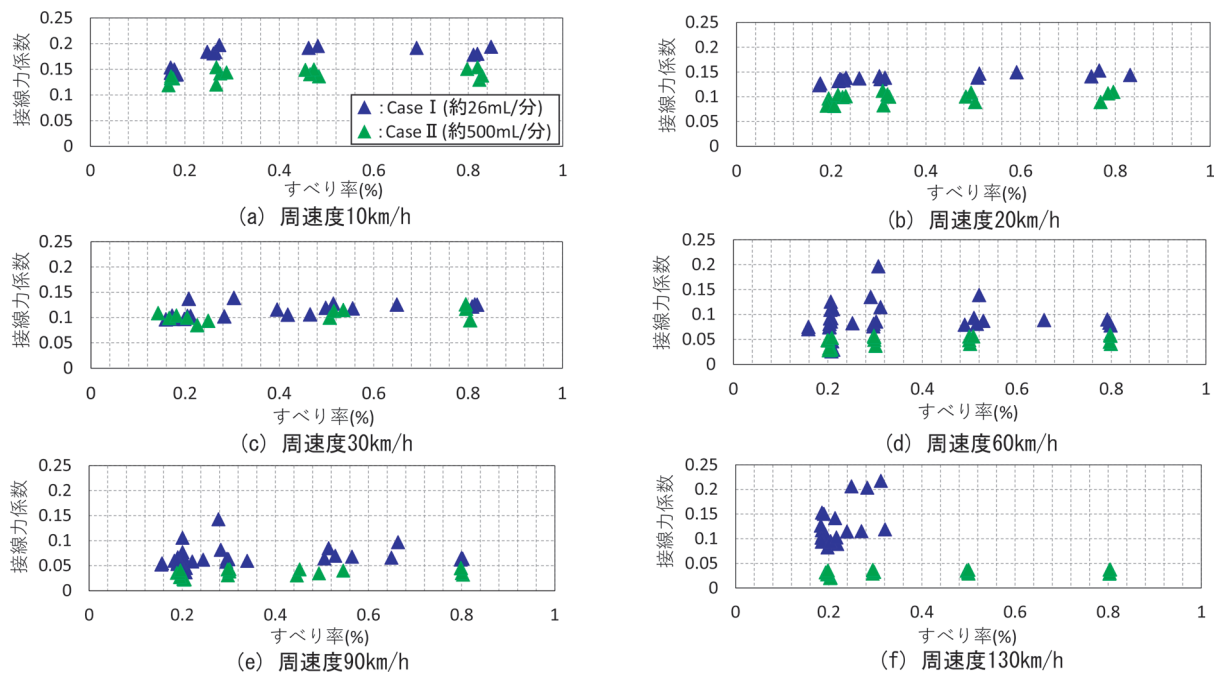


図6 周速度の異なる条件における接線力係数とすべり率の関係（荷重 15kN の場合）

Case II（緑色▲印）の接線力係数の方が若干小さい傾向が認められるが、周速度が向上して水の動圧が大きくなると接触面の潤滑状態が増すので、散水流量によらず接線力係数は低減する。その一方で、接触面に介在することができる水量には限界があるため、散水流量が接線力係数の低減に及ぼす影響は顕著でなくなる。周速度 30km/h から 90km/h（図 6 (c)～図 6 (e)）では、それぞれの接線力係数は 0.1 程度と小さくなっており、さらに両者の差異も小さいことから理解できる。なお、図 6 (f) の Case I（青色▲印）の接線力係数が大きい理由は、4.1 節で述べたとおりで、ここでは評価しない。

ところで、実物車両を用いた走行実験で計測された接線力特性では、接線力係数がすべり率の増加とともに一度大きくなり、その後、すべり率の増加とともに低減傾向を示すことが一般的⁵⁾とされるが、図 6 はこの傾向とは異なる。この理由として、走行実験で計測された接線力特性は、短い区間で強制的に車輪を滑走させたときに計測された車輪／レール間の摩擦係数が大きい場所から小さい場所までの特性を一つの図に纏めた特性のため、室内実験のように定常的な摩擦係数の条件で計測された特性とはその形態が異なっていると考えられる。すなわち両者の差異は実験条件の相違によるもので、両者を補正することにより同一評価軸で評価できると考えられる。

以上から、水潤滑条件における接線力係数とすべり率の関係では、2 円筒試験装置を用いた場合は試験輪の接触面の摩擦係数が定常状態となるため、すべり率が小さい範囲から大きい範囲まで、接線力係数はおおむね一定

となることが分かった。また、このような傾向は散水流量によらず同様となることが分かった。そして、4.1 節と同様に、散水流量は接線力係数の低減に大きな影響は及ぼさないことが分かった。

4.3 実現象に対する散水流量の定量的評価

実現象と室内実験の関係を検討するため、計測した接線力係数を実現象の下限値を意味する粘着係数計画式などと比較することで、実現象に対する実験時の散水流量を定量的に評価する。ここでは、実物車両を用いた走行実験結果などから提案²⁾¹²⁾された粘着係数の計算式（新幹線用（式 (3)）および在来線用（式 (4)））を用いる。なお、 μ は粘着係数、 V は速度 (km/h) とする。

$$\mu = \frac{13.6}{V + 85} \tag{3}$$

$$\mu = 0.245 + \frac{1 + 0.05V}{1 + 0.1V} \tag{4}$$

最初に、両者の物理量を一致させる。4.2 節の実験結果から、接線力係数がすべり率 0.3% 以上のときに飽和する傾向が認められたことを踏まえ、余裕を加味してすべり率 0.5% 以上のときの接線力係数の平均値を粘着係数と定義する。そして、荷重 15kN のときに計測された粘着係数と、式 (3) と式 (4) を重ねて図 7 に示す。

図 7 (a) から、散水流量を Case I（青色□印）とした場合、荷重 15kN のときの粘着係数は新幹線用の計算

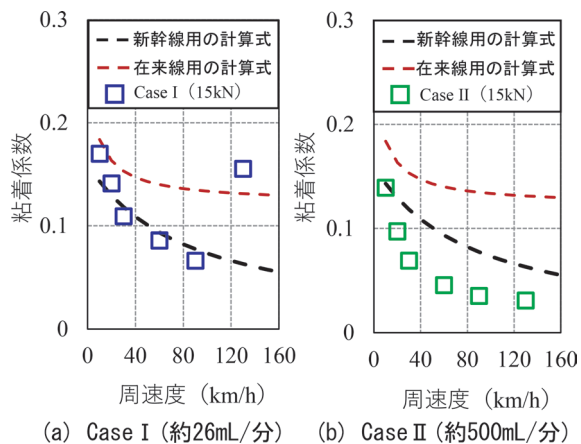


図7 接線力測定実験結果の定量的評価

式(式(3))におおむね沿っており、実車走行時に想定される下限値とされる接線力特性と同等と評価できる。その一方で、図7(a)の在来線用の計算式(式(4))と比較すると、速度向上とともに粘着係数の乖離が大きいの。同様に、図7(b)の散水流量をCase II(緑色□印)とした場合の粘着係数は、式(3)および式(4)より大きく下回っており、2円筒試験装置で計測した車輪/レール間の粘着係数は実現現象の下限値より小さいことが分かる。これらの実験では計測することができない接触面に介在する水量を散水流量から逆問題として評価すると、実際の車輪/レール間に介在する水量は、3.2節で仮定した室内実験の最少条件である散水流量26mL/分より少ない条件となることがあると推察される。その一方で、車輪/レール間の接触面に今回の実験条件と同等の散水流量で水が供給された場合には、実現現象の下限値より小さい粘着係数が計測される場合もあり得ることが分かった。

このように、実現現象の下限値を意味する粘着係数の計算式との比較により、散水流量を定量的に評価した結果、試験輪間に散水流量を約26mL/分より少なく連続的に供給したときの粘着係数が現象の下限値に近い条件となることが分かった。すなわち、雨天走行時に車輪/レール間に浸入する水量は非常に少ない可能性もあり、レール面上に大量の水があったとしても、その大半は接触面の周囲に流出していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、車両の滑走制御や車両運動解析に活用することを念頭に、2円筒試験装置を用いた接線力測定実験により、水潤滑条件における散水流量と車輪/レール間の接線力特性の関係を評価した。その結果、水潤滑条件における接線力特性は、荷重条件に関わらず、周速度が30km/h程度まで増加する間に接線力係数が乾燥時の半分以下まで急峻に低減し、その後は周速度が増加して

も接線力係数は微減傾向となる非線形的な速度依存性を示すこと、接触面に介在する僅かな水による潤滑効果の影響を顕著に受け、散水流量が僅か26mL/分程度と少量でも接線力係数は0.1程度まで小さくなること、そして、接触面に浸入することができる水量に限度があるため、散水流量を極端に多くしても接線力係数は大きく変動しないことをそれぞれ確認した。また、接線力係数とすべり率の関係については、すべり率の変動に関わらずおおむね一定となることが分かった。

なお、これに関連して、実現現象と室内実験の関係について検討した結果、室内実験に換算するとその最少条件である散水流量26mL/分が実現現象の下限値と同程度となることが分かった。

以上から、これらの知見を車両の滑走制御や車両運動解析に活用することによって、より効果の高い制御や精度の高い評価ができると考える。

今後は、本稿の知見を踏まえ、一般的な車両運動解析に実装することができる、雨天走行時の実態に即した実用的な車輪/レール接線力モデルを開発する計画である。

文献

- 丸山弘志, 大山忠夫: 高速鉄道車両のスキッド防止(特殊合成ブロックの新幹線電車における実用化), 日本機械学会論文集(第3部), Vol.44, No.388, pp.4342-4350, 1978
- 渡邊朝紀: 空転・滑走検知, 再粘着制御研究の内外の歴史と最近の動向, 電気学会誌, Vol.122, No.9, pp.613-617, 2022
- 永瀬和彦: 本線上におけるレール-車輪間の粘着の実態(すべり粘着台車による調査結果), 日本機械学会論文集C編 Vol.54, No.504, pp.1852-1860, 1988
- 山本大輔: 車輪/レールの過渡的な接線力特性における車輪削正痕の影響, 鉄道総研報告, Vol.33, No.8, pp.23-28, 2019
- Polach, O.: Creep forces in simulation of traction vehicle running on adhesion limit, Wear, Vol. 258, Issues 7-8, pp.992-1000, 2005.
- 山本大輔: 鉄道車両における車輪削正痕の車輪とレール間の過渡的な接線力特性, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.876, DOI: 10.1299/transjsme.18-00394, 2019
- 酒井秀男: タイヤ工学, グランプリ出版, pp.271-276, 2004
- 山本大輔: 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, 鉄道総研報告, Vol.36, No.7, pp.27-34, 2022
- 高速車両用輪軸研究委員会: 鉄道輪軸, 丸善プラネット株式会社, p.58, 2008
- 山本大輔: 乾燥条件におけるコンタクトパッチの大きさに

着目した鉄道車両の車輪とレール間の接線力特性の評価,
日本機械学会論文集, Vol.86, No.888, DOI: 10.1299/
transjsme.19-00451, 2020
11) 山本大輔：散水流量の多寡に着目した車輪／レール間の接

線力特性に関する実験的評価, 日本機械学会論文集,
Vol.88, No.915, DOI: 10.1299/transjsme.22-00119, 2022
12) 電気鉄道ハンドブック編集委員会, 電気鉄道ハンドブック,
コロナ社, p.389, 2007