車輪踏面に生じた削正痕が 水潤滑条件における車輪／レール接線力特性に及ぼす影響

山本 大輔^{*1}

Influence of wheel turning trace on wheel/rail tangential contact force characteristics under wet condition

Daisuke YAMAMOTO^{*1}^{*1} Railway Technical Research Institute

2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

Received: 27 December 2020; Revised: 21 March 2021; Accepted: 7 May 2021

Abstract

It is generally known that the groove on tire tread can increase the friction force between the tire and the road surface under wet condition because of the improvement of drainage performance. Although wheel tread of actual railway rolling stocks have a wheel turning trace like the groove on tire tread, the characteristics of tangential contact force of the wheel/rail under wet condition is not clarified in detail. In this study, the tangential contact force measurement using a pair of small cylindrical specimens was carried out to investigate the relationship between the wheel turning trace and the friction force under wet condition. The experimental result shows the friction force under wet condition does not increase due to high iron's stiffness if the wheel turning trace provided on the tread. On the other hand, it is also confirmed that the wheel turning trace has a reduction effect of the variation of the friction coefficient under wet condition. From the numerical analysis based on these experimental results, it is clarified that the longitudinal vibration of the vehicle can be decreased if the wheel has the wheel turning trace in case of the braking running under semi-wet condition.

Keywords : Railway, Wheel/rail, Low adhesion, Wheel turning trace, Vibration reduction

1. 緒 言

鉄道車両は、動力源からの駆動力やブレーキ動作による制動力を輪軸（2枚の車輪を1本の車軸に圧入して一体構成としたもの）にトルクとして与え、車輪とレール間に微小なすべりを生じさせ転がりすべり摩擦力を作用させることで加減速走行を行っている。転がりすべり摩擦力は、微小すべり領域ではすべり率の増加に比例して大きくなり、すべり率が一定値より大きくなると飽和する性質がある。本稿で扱う転がりすべり摩擦力は、すべり率が微小領域から大きい領域までの全体を対象とするため、これらを総称して「接線力（接線力を荷重で割って求めた接線力係数も同様の関係となる.）」と呼ぶ。車輪とレールの接触部は、鉄道車両の自重により弾性変形するため面接触の状態となっており、その接触面形状（コンタクトパッチ）は一般に一辺10mm程度の小さな楕円形状となっている（接触楕円とも呼ばれる.）。車輪とレール間のコンタクトパッチが小さいことは、鉄道車両の走行抵抗を小さくする効果があるため、省エネルギーの観点からは好ましいことと言える。その反面、雨天時のように車輪とレールの接触面に水が介在する水潤滑条件では、車輪とレール間の摩擦係数はさらに小さくなるため、輪軸がレール上で空転・滑走を誘発しやすい状態となる。ひとたび輪軸が空転・滑走すると、車輪やレールの接触部には局所的な損傷（車輪フラットやレール滑走痕）が生じる場合があり、保守量の増大や鉄道の定時運行の妨げの要因にもなる。このため、鉄道車両の安定した走行を実現するためには、水潤滑条件における車輪とレール間の接線力特性を定量的に把握するとともに、これを有効に活用する手段を検討することが大切となる。

No.21-00011 [DOI:10.1299/transjsme.21-00011], J-STAGE Advance Publication date : 17 May, 2021

本論文は、Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集(2020), No.505の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 正員、公益財団法人鉄道総合技術研究所 計算力学研究室（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

E-mail of corresponding author: yamamoto.daisuke.55@rtri.or.jp

先行研究を俯瞰すると、国内では、水潤滑条件における一対の試験輪を用いた接線力測定実験から、接触面の微小な凹凸の突起部が“くさび”のように作用したことで接線力が向上したとする報告（大山他, 1986）がある。さらに、雨天時の車輪とレール間の接線力を向上させることにこの知見を応用することを考え、踏面研磨子（車輪踏面を適度に荒らすための金属製ブロック）を回転する車輪踏面に押し当てる装置が開発され、鉄道車両の台車に装着されている。海外においても、一対の試験輪を用いた接線力測定実験や数値解析結果に基づき同様の報告（Fletcher and Lewis, 2013）（Wu et al., 2014）がされており、その有効性を理解することができる。

これらの先行研究で実施された実験の共通点は、接触面が十分な水潤滑条件となると考えられる散水量で実験が行われていること、そして、接触面が平滑な試験輪を使用した接線力測定実験が行われていることである。

前者については、散水量を減らした条件で接線力測定実験を行うと、接触面で作用する接線力は乾燥条件のときの値に近づくことが容易に想像できるため、散水量を十分な水量とした実験が行われていると推察される。しかしながら、鉄道車両の安定した走行の実現を考慮した場合、その変化の過程を把握することも重要な要素となると考えられ、特に、散水量の違いと接触面で作用する接線力特性の関係について検討の余地があった。

後者については、実際の車輪踏面を観察すると、車輪旋盤を用いて定期的に行われる車輪削正作業で生じた断面山型の削正痕が残っている場合がある（図1（a））。このときの車輪とレール間のコンタクトパッチは、接触面が平滑ではなく前後方向に筋が入った形状となることが知られているが（Yamamoto, 2010）、このような接触面のとき、水潤滑条件における接線力特性を実験的に調査した研究報告は国内外ともに見られない。

さらに、後者に関連して、車輪削正作業で車輪踏面に生じた削正痕の表面形態は、ハイドロブレーニング現象の低減を目的（中島, 2013）に設けられたタイヤトレッドの溝（図1（b））と似ているため、鉄道の車輪踏面にも削正痕を積極的に設けることで、車輪／レール間が水潤滑条件となると接触面に作用する接線力が向上すると考えられる場合があった。

その一方で、タイヤと路面の組合せの場合、その接触面圧は測定可能な圧力レンジである 360kPa 程度とされることから、実物の自動車を走行させたタイヤ路面間の可視化実験とその実験結果を反映させた数値解析の結果に裏付けられた豊富な知見（酒井, 2004）（中島, 2013）があり、それらは妥当な見解と考えられる。しかしながら、車輪とレールの組合せの場合、接触面に削正痕を設けることは、タイヤと路面の組合せの場合と同様に車輪とレール間の接線力を向上させる効果が期待できるのかは明確ではなかった。

そこで本研究では、車輪とレールの接触を模擬した直径 30mm の一対の小型円筒試験輪を用いた接線力測定実験により、まず、散水量の違いが車輪とレール間の接線力特性に及ぼす影響を調査するとともに、タイヤと路面間の接触理論との比較により両者の違いを明らかにする。このとき、特に、接触面に設けた削正痕の有無にも着目する。そして、接線力測定実験で明らかにする水潤滑条件における車輪とレール間の接線力特性を実物車両の走行性能向上に活用することを考える。本稿では、雨の降り始めなどレール面に局所的に水滴が残存する環境条件のときに鉄道車両が制動運転する条件を想定し、車輪踏面に意図的に削正痕を設けることは車体の前後振動を低減させ乗り心地を向上させる効果が期待できることから、車両運動解析によりその考えの妥当性を示す。

なお以降では、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」に関して、車輪とレールの場合は「接線力」、タイヤと路面の場合は「摩擦力」と使い分けて記す。

(a) Wheel turning trace on wheel tread

(b) Groove on tire tread

Fig. 1 Comparison between wheel tread and tire tread. An actual wheel tread has the wheel turning trace because of wheel re-profiling work. In this case, the wheel turning trace on the wheel tread is similar with the groove on the rubber tire.

2. タイヤと路面間の接触理論

2・1 乾燥条件のときの摩擦力特性

タイヤの摩擦力は、垂直荷重、実際の接触面積（真実接触面積）、すべり速度、タイヤの内部温度などの条件によって変化することが知られている（酒井，2004）．接触面に作用する前後方向の全摩擦力 F_x は、真実接触面積に比例して生じる粘着摩擦力 F_{xa} 、路面の凹凸により接触部が周期的に変形する過程でエネルギー損失として消費される損失摩擦力 F_{xd} 、接触面の掘り起こしによる摩擦力 F_{xc} から構成され、式（1）で表すことができる．

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

接触面の掘り起こしは特異現象のため F_{xc} を無視すると、前後方向の全摩擦力は上記2つの摩擦力の和となる．自動車が加減速運転をするとき、タイヤと路面の接触面には、「粘着領域（＝鉄道では固着領域）」と「すべり領域」の2つの領域が生じ、前者では損失摩擦力が、後者では粘着摩擦力が作用する（図2（a））．乾燥条件では、すべり率が増加すると粘着摩擦力が増加する一方で、速度向上によりゴムの形状変化が踏面の凹凸に追従できなくなるため、損失摩擦力が減少すること、さらに、乾燥条件では損失摩擦力は粘着摩擦力に対して大きくないことから、前後方向の全摩擦力は粘着摩擦力が支配的となる．次に、タイヤが進行方向に対して舵角を持って進むときには、接触面には前後と左右方向の摩擦力が作用する（図2（b））．これらの摩擦力の合力は、式（2）に示す関係に基づき、接触面の摩擦係数と垂直荷重の積から求まる値を超過しないことが一般に知られている．

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

式（2）を x-y 平面で表すと、図2（b）右上図のようになり、摩擦力の合力は摩擦円と呼ばれる半径 μF_z の円上の値となり、摩擦円の原理から前後方向と左右方向の摩擦力の一方が大きくなると、もう一方は逆に小さくなる特性となる．

Fig. 2 Contact mechanism between rubber tire and road. Under dry conditions, the adhesive friction force increases as the slip ratio increases, but the loss friction force decreases because the shape change of the rubber cannot follow the unevenness of the road surface due to the speed increase. Adhesive friction is dominant in the total friction in the longitudinal direction. On the other hand, the contact patch has friction forces in both longitudinal and lateral directions in case where tire running with attack angle.

2・2 水潤滑条件のときの摩擦力特性

ハイドロプレーニングは、タイヤが水に高速で衝突したときに、路面との接触面に水が浸入することで生じると一般に考えられている．水の慣性力に起因する水圧がタイヤの接地圧より大きいとき、タイヤは路面から浮き始める．このときタイヤトレッドの変形が大きくなるとタイヤは浮き易くなる．ハイドロプレーニングとなる直前のタイヤと水に覆われた路面間の簡易なモデルを図3に示す（酒井，2004）．接触面の前方から水がくさび状に侵入するため、タイヤは路面と接地面後端で接する状態となる．タイヤのトレッド面が平板状で極小さい迎え角

で路面と接していると考え、接触面の後端では水の慣性力に対する動圧 P_f は、水の密度を ρ とするとベルヌーイの定理から、

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

と表される。接触面圧の分布を放物線形状とすると、接触面圧はその中心が最も高くなる。最大接触面圧 P_c [kgf/cm²] は、タイヤの内圧 P_a [kgf/cm²] の約 1.55 倍に相当するとされ、この場合、式 (4) と表すことができる。

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

接触圧の最も高いタイヤ中心部の接地圧より水の動圧が大きいとき、タイヤは完全に路面から浮き上がる。このため、式 (3) と式 (4) から、ハイドロプレーニングの臨界速度[km/h]は、

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

となり、ハイドロプレーニングは、タイヤの内圧が低いほど発生しやすいことになる。

車輪とレール間の接触形態は、タイヤと路面間のそれと似ている。このため、水潤滑条件における車輪とレール間の接線力特性は、タイヤと路面間の知見から推察できる部分も多いと考えられるが、前述のとおり、構成する材料や接触面圧などに異なる要素があるため、以下で述べるように、車輪とレールの接触を模擬した実験によりその詳細を調査する。

Fig. 3 Mechanism of hydroplaning (2013, Nakajima). Hydroplaning is generally considered to occur when a tire collides with water at high speed, causing water to seep into the contact surface with the road surface. In this case, the tire is easily to float due to large water pressure, if the deformation of tire becomes large.

3. 接触面の削正痕の有無に着目した水潤滑条件での車輪とレール間の接線力測定実験

3・1 接線力測定実験の概要

鉄道総研の散水装置と転がり一すべり摩擦力試験機を組み合わせた試験装置 (図 4) を用いて、乾燥条件と散水量の異なる水潤滑条件での接線力測定実験を実施した。接線力測定実験では、車輪とレールの接触を直径 30mm の一対の小型円筒試験輪の接触で模擬するため、実物車輪とレール間の接触面圧と同等の約 1GPa となるよう、接触面が平滑な車輪側試験輪を基準として試験輪同士の押付け荷重を 450N に設定した。さらに、両試験輪を僅かに異なる回転数で転動接触させるとともに、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。

水潤滑条件では、水タンクから試験輪の接触面の巻き込み側近傍まで水チューブを設置し、図 4 に示す黄色矢印の流れで、接触面に向けて水温 20℃程度の水を散水した。

水潤滑条件のときの接線力係数は経験的にばらつく傾向があるため、本稿では、同条件で 2~3 回実験を行い、接線力を垂直荷重で割って求めたこれらの接線力係数を平均することで評価を行った。

車輪側試験輪の接触面は平滑のタイプ 1 種類と、ねじ山状に異なるピッチで削正痕を設けたタイプ 2 種類、合計 3 種類とした。また、レール側試験輪の接触面は、車輪側試験輪とのコンタクトパッチが楕円形状となるよう、半径 300mm の円弧形状とした 1 種類とした。これらの試験輪を用いて、車輪側試験輪の接触面に設けた削正痕の有無が水潤滑条件における接線力特性に及ぼす影響を調査する。

なお、車輪側試験輪の接触面に設けた削正痕は、車輪削正作業で生じる車輪削正痕を想定したもので、実際のものと同等の形状である。

Fig. 4 Experimental apparatus. In the tangential force measurement experiment, the contact surface pressure between the actual wheel and the rail was simulated and the contact surface pressure between the test wheels was set to about 1 GPa. In the experiment under wet conditions, water was sprinkled from the entrainment side of the contact surface.

3・2 試験輪の仕様

車輪とレールの接触を一对の試験輪の接触で模擬し、両者の接触面圧を同等とした条件で接線力測定実験を行う。車輪側試験輪とレール側試験輪の仕様を図 5 に示す。

Fig. 5 Wheel specimens and rail specimen. Figure 5(a) to (c) are wheel specimens, type-W with a smooth contact surface, and Type-J and Type-K with different pitches on the contact surface, simulating the wheel turning traces. The rail specimen has an arc-shaped contact surface with a radius of 300mm so that the contact patch with the wheel specimen has an elliptical shape.

図 5 (a) ~ (c) は車輪側試験輪で、接触面を平滑としたものを Type-W, 車輪削正痕を模擬して接触面に断面三角形のねじ山状の削正痕を設けたもので、ピッチを 1mm としたものを Type-J, 同じく 3mm としたものを Type-K とした。

図 5 (d) はレール側試験輪で、車輪側試験輪との接触面が楕円形状となるよう接触面を半径 300mm の円弧形状とした。

それぞれ実物車輪と実物レールから切り出して製作したもので、表面粗さは算術平均粗さ R_a で約 0.12~約 0.85 μm である。全ての試験輪は、実験前に石油エーテルに完全に浸して 15 分間の超音波洗浄を行い、その表面に付着した汚れや脂分を除去したのち十分に乾燥させて使用した。

3・3 実験条件

接線力測定実験で実施した主な実験条件を表 1 に示す。

Table 1 Experimental conditions.

	Unit	Experimental conditions		
		Experiment of section 3.4	Experiment of section 3.5	Experiment of section 3.6
Rotational velocity (Peripheral speed)	rpm (km/h)	100, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 3500 (0.6), (2.8), (5.7), (8.5), (11.3), (17.0), (20.0)		100, 1000 (0.6),(5.7)
Longitudinal slip ratio	%	0.5		0.3, 0.5, 0.8
Vertical load	N	450		
Attack angle	deg.	0		0, Appr. 0.2
Amount of water	ℓ /min.	Appr. 0.01	Appr. 0.01, Appr. 0.5	Appr. 0.1

3・4 極少量の散水条件における試験輪の回転数と接線力特性の関係

3・4・1 接触面の表面性状の変化による影響

散水量を極少量としたときの前後方向の接線力特性を調査するため、アタック角を設けず、前後方向のすべり率を 0.5%一定の状態とし、試験輪の回転数を 100rpm (周速度 0.6km/h) から最大 3500rpm (周速度 20km/h) まで 2 分間隔でステップ状に増加させた条件で接線力測定実験を行った。Type-W (平滑形状) の前後方向の接線力係数 (=前後方向の接線力を垂直荷重で割った値) などの時系列波形の一例を図 6 に示す。なお、垂直荷重が一定のため、前後方向の接線力係数が大きいことは、同方向の接線力が大きいことと同意となる。

Fig. 6 Time history of longitudinal tangential force coefficient of Type-W. The tangential force in the longitudinal direction slowly increase from the start of the experiment because of that the oxide film adheres to the contact surface of the specimens over time. Approximately 10 minutes after the start of the experiment, 0.01 ℓ /min. of water was sprinkled on the contact surface. In this time, if the number of revolutions increased in steps, the tangential force coefficient became small with increasing the revolution of specimen. The tangential force coefficient decreased approximately 0.10 under the condition that the revolution was 3500rpm.

図 6 から、時間の経過とともに試験輪の接触面には茶褐色の酸化膜が生成するため、実験開始から前後方向の接線力係数がゆっくり増加する。このような関係は、既報（山本，2019）でも確認されている。実験開始から約 10 分後の前後方向の接線力係数は、その変化が小さくなり飽和状態を示している。このときの前後方向の接線力係数は約 0.44 となっており、これを乾燥条件における値とする。

この状態から連続して水潤滑条件の実験を行うため、約 0.01 l/min. の極少量の水を一定間隔で接触面に向けて滴下する。水潤滑条件では、試験輪の回転数 100rpm のときの前後方向の接線力係数は約 0.41 で、乾燥条件のときとの差異は明確でない。しかしながら、試験輪の回転数をステップ状に増加すると、前後方向の接線力係数は回転数の増加とともに小さくなり、3500rpm のとき約 0.10 まで減少している。これは 2・2 節で述べたタイヤと路面間の理論と同様の傾向となっており、試験輪の回転数の増加とともに、接触面に侵入する水が増加し接触面の潤滑効果が高まったことによるものと考えられる。

その一方で、試験輪の回転数が 1500rpm のときを見ると、実験条件が同じにも関わらず前後方向の接線力係数は一定でなく、時間の経過とともに少しずつ低下する傾向が認められる。このような傾向は他の回転数のときでも同様に認められ、特に、試験輪の回転数が速い条件のときに顕著に認められる。ここで、乾燥条件では、接触面の表面形状および表面性状の変化により、接線力係数が増減することが分かっている（山本，2019）ため、車輪側試験輪の接触面の表面形状を表面粗さ測定器で測定し、実験前後の表面粗さについて算術平均粗さ R_a を指標に比較する。その結果を図 7 に示す。

図 7 から、乾燥条件では実験後の表面粗さの方が実験前より大きくなっている。しかし、水潤滑条件で実験を行うと、実験後の接触部の算術平均粗さ R_a が実験前より小さくなり目視でも鏡面化していることを確認することができた。このことから、接触面に水が介在する状態で転がりすべり摩擦力を加えると研磨作用を生じる場合があり、接触面に生成された酸化膜が除去されるため、接線力係数が少しずつ低下する傾向を示すと推察される。

このような特性は、金属でできた車輪とレールの組合せで生じるもので、ゴムタイヤと路面間の組合せでは見られない現象と考えられる。

Fig. 7 Comparison of surface roughness on the contact width before/after experiment. Under the wet condition, the surface roughness on contact width after experiment is smaller than that before experiment due to polishing effect. This is why the tangential force coefficient continued to reduce.

3・4・2 接触面の削正痕の有無が接線力特性に及ぼす影響

3・4・1 項と同様に、接触面の削正痕の有無が接線力特性に及ぼす影響を調査する。ここでは、水潤滑条件では時間の経過とともに接線力係数が僅かな減少傾向を示す傾向があることを踏まえ、試験輪の回転数ごとに前後方向の接線力係数の 2 分間の平均値として評価する。

試験輪の回転数と前後方向の接線力係数（約 2 分間の平均値）の関係を図 8 に示す。縦軸と横軸は、それぞれ前後方向の接線力係数（約 2 分間の平均値）と試験輪の回転数で、凡例は車輪側試験輪の種別を表す。なお、乾燥条件の接線力測定実験では、接触面が時間の経過とともに激しく摩耗し、接線力係数の変化が小さくないため、水潤滑条件での実験方法とは異なり全ての条件で新品試験輪を用いた値をプロットしている。

図 8 では、乾燥条件のとき、試験輪の回転数に関係なく Type-W の前後方向の接線力係数（青色○印）は約 0.41 と一定で速度依存性は認められない。接触面に削正痕を設けた Type-J（緑色△印）と Type-K（赤色□印）についても同様に、それぞれの前後方向の接線力係数は約 0.27 と約 0.25 となっており、その絶対値は Type-W の値より

Fig. 8 Experimental result of the relationship between tangential force coefficient and rotational velocity. No velocity dependence is confirmed in the relationship between the revolution of specimen and the tangential force coefficient in the longitudinal direction under dry condition. On the other hand, although the faster the revolution of specimen is, the smaller the tangential force coefficient is under wet condition, in the case of the contact surface with wheel turning trace, the decreasing width of the tangential force coefficient becomes small compared with that under dry condition due to the difference of contact pressure.

小さいが速度依存性は同様に認められない。Type-W の接線力係数が Type-J と Type-K のそれより大きい理由は、前者の接触面に削正痕がなく試験輪間の接触面積が相対的に大きいためである (山本, 2014)。

次に、乾燥条件から連続して水潤滑条件の実験を行うため、接触面に向け 0.01 l/min. 程度の極少量の水を一定の間隔で滴下する。水潤滑条件における Type-W の前後方向の接線力係数 (青色●印) は、試験輪の回転数の増加とともに小さくなり、回転数 3500 rpm のとき、乾燥条件のときの約 25% である約 0.10 まで小さくなっている。Type-J (緑色▲印) と Type-K (赤色■印) も同様で、前後方向の接線力係数は、試験輪の回転数の増加とともに小さくなり、回転数 3500 rpm のときの Type-W より絶対値は小さいが、それぞれ約 0.12 と約 0.09 で乾燥条件のときの約 44%、約 36% にそれぞれ減少している。その一方で、接触面に削正痕を設けると、前後方向の接線力係数の減少幅が接触面の平滑のときより縮小することが分かる。この理由は以下のように考える。

接触面に削正痕を設けると試験輪間のコンタクトパッチが小さくなるため、前後方向の接線力係数が相対的に Type-W より小さくなる。しかし、接触面圧は逆に高くなり接触面には水が侵入しにくい状態となる。このため、接触面圧が高い条件となる Type-J と Type-K の前後方向の接線力係数は小さく、かつ減少幅が小さいと考えられる。

ここで、図 8 からは、タイヤと路面間でタイヤのトレッドに適切な形状で溝を設けたときに得られる摩擦力の向上効果は、車輪とレールの接触形態では認められない。この理由について考察する。

タイヤと路面の場合、タイヤの内圧は一般に高くない。このため、平滑トレッドを有するタイヤが水潤滑条件の路面上を転走するとき、例えば、タイヤの内圧 P_a を 3.1 kgf/cm^2 (300 kPa) とすると、タイヤが路面から完全に浮き上がる速度は、式 (5) から自動車の実用速度域である約 110 km/h となる。接触面で作用する全摩擦力は、2・2 節で記したように損失摩擦力と粘着摩擦力の和で表されるため、速度 110 km/h 以上では粘着摩擦力が大幅に減少することで、全摩擦力が大きく減少する。しかしながら、トレッドに適切な形状の溝を設けておくと接触面の排水性能が向上するため、水の慣性力によりタイヤのトレッドが軸中心方向に押し潰される変形が緩和される。これにより、タイヤと路面間の真実接触面積の減少を抑制することができるため、接触面の全摩擦力が向上する。さらに、タイヤは粘弾性材料のため、水潤滑条件では損失摩擦力が粘着摩擦力より相対的に大きくなる。損失摩擦力のピーク値となるすべり速度は、粘着摩擦力のピーク位置より一般に高いため (大原, 1995)、タイヤはこれらの相乗効果により幅広いすべり速度域で全摩擦力を向上することができる。すなわち、水潤滑条件での摩擦力の低減を抑制することができる。

他方、車輪とレールの場合、これらの間の接触面圧は理論的には 800 MPa 以上と言われ、式 (5) から求まるハイドロプレーニングの臨界速度は鉄道車両の常用速度域よりはるかに大きい 1000 km/h 以上となること、そして、それぞれの材質は金属で完全弾性体とみなすことができ鉄道車両の実用速度域で想定される水の慣性力に対して

十分な堅さを有するのでゴムタイヤのように部分的な変形が生じる可能性が低いことから、常用速度域で車輪がレールから完全に浮き上がることは考えにくい。また、式(1)の損失接線力は一般に無視されるので、接触面で作用する全接線力は粘着接線力のみとなる。さらに、金属同士の接触面で作用する粘着接線力はタイヤと路面間のときより一般に小さく、水潤滑条件ではさらに小さくなる。このため、接触面に削正痕を設けても真実接触面積が小さくなり粘着摩擦力が低減するだけなので、タイヤと路面間のように摩擦力向上効果は得られないと考えられる。

以上、車輪とレール間の水潤滑条件における前後方向の接線力係数は、試験輪の回転数の増加とともに減少する特性となることが分かった。これらの特性はタイヤと路面間のものと同様である。しかしながら、散水量が0.01ℓ/min.と極少量で、かつ試験輪の回転数が3500rpm(周速度20km/h)と低速でも、車輪とレールは完全弾性体に近く十分な堅さを有することに加え、車輪とレール間の接線力は元々小さいため、前後方向の接線力係数は乾燥条件のときの半分以上に低下すること、そして、接触面に削正痕を設けても、タイヤと路面の場合のように水潤滑条件での摩擦力の低減を抑制する効果は期待できないことがそれぞれ分かった。これらは、ゴムタイヤと路面の組合せでは見られない車輪とレールの組合せ特有の特性と考えられる。

なお、本実験では試験機の仕様制限から、試験輪の周速度が最高20km/h程度までしか測定することができなかった。しかしながら、それぞれの実験値を結ぶ近似曲線から推察すると、今回の実験条件以上に試験輪の回転数(周速度)を増加させたとき、接触面に設けた削正痕の有無による接線力係数の差異は無視できる程度になると推察される。

3・5 散水量の多寡が接線力特性に及ぼす影響

散水量の多寡が接線力特性に及ぼす影響を調査するため、0.01ℓ/min.と0.5ℓ/min.の2つの散水量の条件でそれぞれ接線力測定実験を行った。アタック角は設けず、前後方向のすべり率は0.5%一定とした。前後方向の接線力係数(約2分間の平均値)と試験輪の回転速度の関係を図9(a)に示す。凡例は、散水量0.01ℓ/min.のときを●▲■印、0.5ℓ/min.のときを○△□印で示す。

図9(a)から、試験輪の回転数が増加するとともに前後方向の接線力係数は減少している。これは前述のように接触面に侵入する水量が増加するためと考えられる。散水量0.5ℓ/min.のときのType-Wの前後方向の接線力係数(青色○印)は、0.01ℓ/min.のとき(青色●印)より若干小さく、この差異は試験輪の回転数が遅い条件でも認められる。その一方で、Type-Jの前後方向の接線力係数(緑色▲印、緑色△印)は、試験輪の回転数1500rpm以上のときに、散水量の多寡による差異が生じる傾向が認められる。これは局所的な接触面圧の違いにより前後方向の接線力係数が異なる特性となったためと考えられる。このように考える理由を、図9(b)の水潤滑条件のときの接触面の様子を示す模式図で説明する。

試験輪の接触面には微小な凹凸による突起があるため、図9(b)に示すように、双方の試験輪はその突起の先端で接触する形態となる。水潤滑条件での接触形態は、赤色○印と青色○印の2つに大別できると考えられる。赤色○印は、接触面に生じた微細な非接触空間より少ない体積で水が存在する場合である。接触部付近に存在する水は、その前後の非接触空間に流出するため、乾燥条件に近い接触形態となり前後方向の接線力係数は大きい傾向を示す。他方、青色○印は、接触面に生じた微細な非接触空間を満たす量の水が存在する場合である。この場合、接触部付近では水の流出する微細な非接触空間がないため、水による潤滑効果が増して前後方向の接線力係数は小さくなる。

このように、試験輪の回転数ごとに定まる接触面への侵入可能な水量と実際の散水量の大小関係から、後者が少ない場合、乾燥条件と水潤滑条件の中間的な値にばらつくと考えられる。このため、散水量が多い0.5ℓ/min.のときの方が0.01ℓ/min.のときより接触面に侵入することができる水量が多いため、前後方向の接線力係数は小さい傾向を示したと考えられる。また、接触面の表面粗さを同等としたとき、接触面圧が高い方が接触面の微細な非接触空間は一般に小さくなる。このことから、Type-Wのときより接触面に水が浸入しにくい条件となるType-JやType-Kの前後方向の接線力係数は、試験輪の回転数が大きい条件から低減効果が生じたと考えられる。

以上、散水量の多寡が接線力特性に及ぼす影響を調査した結果、前後方向の接線力係数は、試験輪の回転数(周速度)により定まる接触面に侵入可能な水量と実際の散水量との大小関係で決まり、接触面圧が小さく、接触面に水が浸入しやすい高速回転条件のときに散水量を多くすると、前後方向の接線力係数は小さい傾向を示すこと

が分かった。その一方で、散水量の多寡による前後方向の接線力係数の変化が小さいこと、実用速度域では理論的に両試験輪が水により完全に非接触状態とならないことを考慮すると、水潤滑条件における前後方向の接線力係数には、散水量をこれ以上多くしても低減しなくなる下限値が存在すると推察される。

(a) Experimental result under different wet conditions

Fig. 9 Experimental result and schematic figure of contact surface under different wet condition. It is confirmed that the tangential force coefficient in the longitudinal direction under the condition of water sprinkling amount of 0.5ℓ/min. tends to be smaller than that of condition of water sprinkling amount of 0.01ℓ/min. But the difference of both conditions is not large. This experimental result means that the tangential force coefficient in the longitudinal direction under wet conditions saturated when the amount of water is above a certain level, considering that the wheels and rails are not completely separated with water in the practical speed range of the actual vehicle.

3・6 前後方向・左右方向のすべり率と接線力特性の関係（散水量 0.1ℓ/min. 程度の場合）

3・6・1 前後方向のすべり率のみを与えた場合

前後方向のすべり率と同方向の接線力特性の関係を調査するため、アタック角を設けず、試験輪の回転数を 1000rpm に固定し、前後方向のすべり率をそれぞれ 0.3%, 0.5%, 0.8%一定とした接線力測定実験を行った。前後方向の接線力係数（最大値）と前後方向のすべり率の関係を図 10 に示す。縦軸と横軸はそれぞれ前後方向の接線力係数と前後方向のすべり率である。凡例は、●▲■印が散水量 0.1ℓ/min. のとき、○△□印が試験輪の周辺湿度 30%程度の乾燥条件のときである。

図 10 から、乾燥条件の場合、接触面が平滑な Type-W の前後方向の接線力係数は、前後方向のすべり率が 0.8%

Fig. 10 Tangential force characteristics in the case of the non-attack angle under the different specimen. Regardless of the wheel turning trace, it is confirmed that the tangential force coefficient in longitudinal direction saturated under larger than 0.8% slip ratio condition in the same direction under wet condition.

までは、前後方向のすべり率の増加とともにおおむね線形的に増加している。接触面に削正痕を設けた Type-J と Type-K の前後方向の接線力係数でも、Type-W のときよりそれぞれ値は小さいが、同様の傾向が認められる。

一方、水潤滑条件の場合、Type-W の前後方向の接線力係数は、全ての前後方向のすべり率の条件で乾燥条件のときより小さい。これは、接触面に水が浸入したことによる影響と考えられる。また、Type-W の前後方向の接線力係数は、前後方向のすべり率が 0.5% までは増加傾向が認められるが、これが 0.8% になると増加傾向が小さくなる。このような傾向は Type-J や Type-K のときも同様である。

3・6・2 左右方向のすべり率を同時に与えた場合

アタック角を約 0.2deg. とし、試験輪の回転数 1000rpm で、前後方向のすべり率をそれぞれ 0.3%, 0.5%, 0.8% 一定としたときの前後・左右方向の接線力係数（最大値）を図 11 に示す。縦軸は、図 11 (a) が前後方向の接線力係数（最大値）、図 11 (b) が左右方向の接線力係数（最大値）を表し、それぞれ横軸は前後方向のすべり率である。凡例は図 10 と同様である。

乾燥条件の場合、アタック角を設けた状態で前後方向のすべり率を与えると、前後と左右の 2 方向の接線力が接触面に作用する。前後方向のすべり率を大きくすると、図 11 (a) のように前後方向の接線力係数は増加するが、逆に、左右方向の接線力係数は図 11 (b) のように減少する。これは 2・1 節で述べたように、前後と左右方向の接線力特性が摩擦円の原理に基づくためである。また、前後と左右方向の接線力係数について接触面の削正痕の有無ごとに比較すると、接触面積の大きい Type-W が最も大きく、Type-J、Type-K の順に小さくなっており、アタック角を設けない条件である図 10 と同様の大小関係となっている。水潤滑条件においても、車輪側試験輪の種別に関係なく同様の傾向を示している。

このことから、水潤滑条件で接触面の接線力係数が小さい条件においても、乾燥条件のときと同様に接触面には前後と左右の 2 方向の接線力が作用することが分かる。しかしながら、Type-W の前後・左右方向の接線力係数は、前後方向のすべり率が 0.5% までは増加しているが、0.8% のときには増加傾向が小さくなっており、この傾向はアタック角を設けない条件（図 10）と同様である。Type-J と Type-K のときの前後と左右方向の接線力係数も Type-W のときと同様で、前後方向のすべり率が 0.8% のときに増加傾向がともに小さくなっている。この理由を調査するため、縦軸に前後方向の接線力係数、横軸に左右方向の接線力係数を取り、前後方向と左右方向の接線力係数の相関関係を評価する（図 12）。凡例は、○□△印が乾燥条件の場合、●■▲印が散水量 0.1ℓ/min. の水潤滑条件の場合である。また、図中の数字は前後方向のすべり率の設定値である。

乾燥条件では、前後方向のすべり率を 0.3% から 0.5%, 0.8% と大きくすると前後方向と左右方向の接線力係数のベクトル和は一点鎖線矢印で示す方向に増加することが分かる。このとき、前後方向の接線力係数には、前後

Fig. 11 Tangential force characteristics in both longitudinal and lateral directions under the conditions of 1000rpm rotational velocity and approximately 0.2deg. attack angle. When the attack angle is provided, the tangential forces in two directions, longitudinal and lateral, act on the contact surface even under wet conditions. At this time, when the slip ratio in the longitudinal direction is 0.8%, it is confirmed that the tangential force coefficient in the same direction saturated, and the tendency is the same as the condition without the attack angle.

方向のすべり率の設定値を大きくすることでさらに増加する余力があることが推察される。しかしながら、水潤滑条件では、前後方向のすべり率を大きくしても実線矢印で示す方向に変化するだけで前後方向の接線力係数は大きくなっておらず、このことは接線力係数が飽和していることを意味している。このような関係は、接線力係数のベクトル和の絶対値は異なるが、車輪側試験輪の種別に関係なく同様の傾向を示している。

Fig. 12 Correlation between longitudinal and lateral tangential force coefficient under the conditions of 1000rpm rotational velocity and approximately 0.2deg. attack angle. It is confirmed that both longitudinal and lateral tangential force coefficients are saturated under wet conditions.

次に、前後方向の接線力係数の増加傾向が小さくなる理由を調査するため、図 11 の実験条件で試験輪の回転数のみ 100rpm と遅くして接線力測定実験を行った。図 13 に乾燥条件で試験輪の回転数を 1000rpm としたときの結果と重ねて示す。

図 13 から、接触面の削正痕の有無に関わらず、試験輪の回転数を 100rpm と遅くすると前後方向と左右方向の接線力係数は、図 11 に示す試験輪の回転数 1000rpm のときより全体的に大きくなる事が分かる。また、前後と左右方向の接線力係数の増加傾向が小さくなる前後方向のすべり率の条件が大きい範囲に移動することが分かる。このことから、前後・左右方向の接線力係数の増加傾向が小さくなる前後方向のすべり率の条件は、接触面に侵入する水量の多寡により変化し、接触面に侵入する水量が多いほど、前後と左右方向の両方の接線力係数とこれらが飽和する前後方向のすべり率の条件の 2 つが小さくなる事が分かった。

Fig. 13 Tangential force characteristics in both longitudinal and lateral directions under the conditions of 100rpm rotational velocity and approximately 0.2deg. attack angle. Regardless of the wheel turning trace, it is confirmed that the tangential force coefficient in both directions, longitudinal and lateral, under 100rpm rotational velocity condition is larger compared with that under 1000rpm rotational velocity condition. Furthermore, the experimental results show that the value of the slip ratio in longitudinal direction when the tangential force coefficient saturates moves to a large value.

以上、試験輪の回転数（周速度）が増加すると、水潤滑条件では接触面に侵入した水による潤滑効果により、前後と左右方向の接線力係数は前後方向のすべり率のより小さい範囲で小さくなる傾向を示すことが分かった。

最後に、実際の車輪とレール間のコンタクトパッチと試験輪間のコンタクトパッチは大きさが異なるため、本研究で実施した散水量がそのまま実際の車輪とレール間の接線力を同様に低下させる条件とはならないと考えられる。すなわち、試験輪間のコンタクトパッチの面積に対する接触面に侵入した水量の比率が、車輪とレール間のコンタクトパッチの面積とそこに進入した水量の比率と同等となると、両者は同等の接線力特性を示すと考えられる。

4. 数値解析による車輪踏面に設けた削正痕による車体の前後振動低減効果の検討

4・1 数値解析の概要

雨の降り始めなど、レール面が局所的に濡れた状態となっているとき、鉄道車両が制動運転をすると車体の前後振動が発生するため乗り心地が低下する場合がある。このような環境条件のとき、前章で検討した室内実験の結果から考えると、車輪踏面の円周方向に削正痕を設ける（図 14 参照）ことで車体の前後振動が低減すると考えられる。

他方、現状の鉄道車両には、走行中に車輪踏面に削正痕を設けたり消したりする機能は装備されておらず、これを行うとしたときには幾つかの課題をクリアする必要がある。このため本稿では、これらの課題がクリアとなった場合を想定し、このような装置を開発することの意義を数値解析により検討する。

数値解析では、レール頭頂面上に局所的に水滴が存在する平坦直線区間で、鉄道車両が初速度 $\dot{x}_w$ から踏面ブレーキの操作により制動運転をしている場合を考え、運動方程式を導出するとともに、サンプリング周期を 0.5msec. とした 4 次の Runge-Kutta 法により車体前後方向の振動加速度を求める。そして、車輪踏面に設けた削正痕の有無と車体の前後振動加速度の関係を評価した。

4・2 力学モデルと運動方程式

数値解析に用いる力学モデルを図 14 に示す。車輪、レール、車体をそれぞれ剛体とみなし、並進方向と回転方向の 2 自由度を考慮した車輪がレールに接しながら転走する条件を考える。制動運転時に生じる車輪とレール間のすべりの変化に起因して生じる車輪の並進方向の振動加速度を外力とし、この外力により車体が強制加振されたときに生じる車体の前後振動加速度を評価する。

Fig. 14 Numerical analysis model and conceptual drawing of wheel turning trace.

図 14 の力学モデルから導出される運動方程式は以下の通りである。

$$M_w \ddot{x}_w = -\mu(\dot{x}_w) M_w g \quad (7)$$

$$I_w \ddot{\theta}_w = -T_B + \mu(\dot{x}_w) M_w g r_w \quad (8)$$

$$M_B \ddot{X}_B + C_x \dot{X}_B + k_x X_B = -M_B \ddot{x}_w \quad (9)$$

ここで、 x_w 、 θ_w はそれぞれ車輪の並進方向の変位、回転方向の変位、 M_w 、 I_w はそれぞれ1車両の質量と輪軸4本分の回転方向の慣性モーメント、 $\mu(\dot{x}_w)$ は車輪とレール間で生じる速度 $\dot{x}_w$ を関数とする接線力係数である。制動トルク T_B は、式(10)に示すように時間的に増大し、最大ブレーキトルク T_k に漸近する特性とする。

$$T_B = T_K(1 - e^{(-t/0.5)}) \quad (10)$$

ここで、最大ブレーキトルク T_k は、 F_B を制輪子の押付力、 μ_B を制輪子と車輪踏面間の摩擦係数、車輪半径を r_w とすると、式(11)で求まる。

$$T_K = F_B \mu_B r_w \quad (11)$$

4・3 セミウェットな状態における車輪とレール間の接線力特性

雨の降り始めなど、レール上に局所的に水滴が存在するときでは、車輪とレールの接触面はセミウェットな状態となり、接触面に侵入した水量の違いにより接線力係数は変動することが3章の実験結果から分かった。さらに、これまで著者は直径500mmの大型試験輪を用いた接線力測定実験(山本, 2020)を行っており、水潤滑条件で計測された接線力特性は、図8に示す接線力特性と定性的に一致することを確認している。具体的には、車輪とレール間の接触面圧を図8の接触面圧を同等とするとともに十分な散水量で接線力測定実験を実施すると、その接線力係数は試験輪の周速度が20~30km/h程度に増加するまでの間に0.1程度まで急激に低下し、その後は周速度を増加しても接線力係数は微減傾向となることなどが分かっている。

このため数値解析では、セミウェットな状態における車輪とレール間の接線力係数(図15)は、図8に基づき、速度20km/h以上では下限値を一定とし、青色と緑色の範囲内で走行速度ごとにランダムにばらつくものとした。青色の範囲は接触面が平滑のとき、緑色の範囲は接触面に微小凹凸を設けたときの接線力係数の取り得る範囲を表す。なお、これらの接線力係数はそれぞれの速度依存性を有する範囲に収まる一様分布の疑似乱数から求めたものである。

Fig. 15 Characteristics of tangential force coefficient obtained on the experimental result as shown in Fig.8. The tangential force coefficient in the case of the smooth contact surface and the contact surface with wheel turning trace shows blue area and green area respectively. The tangential force coefficient under dry condition and full-wet condition is upper value and bottom value respectively. Furthermore, the tangential force coefficient under semi-wet condition defines randomly vary for each velocity within each range.

4・4 数値解析の結果

鉄道車両が初速度 130km/h から停止するまで制動運転したときに生じた車体の前後振動加速度を数値解析で求めた結果を図 16 に示す。車体の前後振動加速度は、人間の感じやすい周波数帯域である帯域通過周波数 4~14Hz のバンドパスフィルタを通過させたものとした。縦軸が車体の前後振動加速度、横軸が時間を表し、青線は接触面が平坦を平滑としたとき、赤線は接触面に削正痕を設けたときである。

図 16 から、ブレーキ動作の開始から停止までの間に生じる前後振動加速度を比較すると、車輪踏面が平滑のときの前後振動加速度の RMS 値は 0.28m/s^2 であるのに対し、車輪踏面に削正痕を設けるとその RMS 値は 0.16m/s^2 と小さくなるのが分かる。この理由は以下のように考える。

車体の前後振動加速度は、制動運転時の車輪の並進距離と回転による距離の差異により生じる車輪とレール間の接線力の変動により発生するものである。このため、車輪踏面に削正痕を設けることで、図 15 に示す緑色の範囲のように接触面の接線力係数の変動幅が縮小し、車輪とレール間の接線力変動が小さくなるため車体の振動加速度は小さくなると考えられる。すなわち、車輪とレール間の接線力変動を小さくすることが、車体の前後振動加速度の低減に有効となる。

近年の車両では、車輪の空転・滑走を低減するため、再粘着制御装置を搭載していることが多い。再粘着制御はさまざまな考えに基づき開発されているが、基本的には車輪の空転や固着をいち早く検知しこれを収束するよう制御則に基づき動作させている。一方で、雨の降り始めのようにレール面に局所的に水滴が乗った状態のとき、図 15 の青色範囲のように、その程度により車輪とレール間の接線力係数の変動幅は大きくなる。このとき、車輪とレール間の接線力係数のばらつきが大きくなると、再粘着制御が遅れ要素などにより追従しにくくなると考えられ、この場合、車輪踏面の削正痕の有無による車体の振動加速度の低減効果は、図 16 の数値解析結果と同様の傾向を示すと考えられる。このように、車輪踏面に溝を設けることは、レール面に局所的に水滴が存在する状態のときに、これに起因して生じる車体の前後振動加速度を低減させる手法として有効と考えられる。

このようなメリットの裏返しとして、車輪とレール間の接線力係数を小さくすることは、ブレーキ動作時の停止距離の増加を懸念することがある。

しかしながら、ブレーキ動作による車両の停止に至るまでの時間はそれぞれ図 16 に示す青色と赤色の「Stop」の位置となるが、接触面に削正痕を設けてもこれが平滑なときと比べて大差がないことが分かる。これは本数値解析の条件では、ブレーキ力により車輪が完全にロックした状態での走行に至らなかったためである。車輪が完全にロックした場合、ブレーキ停止距離は車輪とレール間の接線力係数の差で決まることになり、これが大きい状態ほど距離が短縮し停止までの時間が短くなる。今回の数値解析の条件では、非常制動など大きなブレーキ力を与えていないため、両者の接線力係数の差異が小さくなり、ブレーキ距離に明確な差異を生じなかったと考えられる。

Fig. 16 Numerical analysis results of longitudinal acceleration of carbody. When the contact surface of wheel/rail interface is under semi-wet condition, the longitudinal vibration of acceleration of the carbody is calculated when the vehicle is braked from an initial velocity of 130km/h to 0km/h. The calculated results of the longitudinal vibration of acceleration of the carbody is the result of passing through a bandpass filter with a bandpass frequency of 4 to 14Hz. It is confirmed that if the wheel turning trace is provided on the wheel tread, the longitudinal vibration acceleration of the carbody is reduced because of the fluctuation range of the tangential force coefficient is reduced.

このことから、乾燥条件、レール面に水滴が局所的にあるセミウェット条件、完全な水潤滑条件の3パターンに分類して車輪踏面の表面性状を変えることで、適切な再粘着制御技術との組み合わせにより、さらなる乗り心地の向上を図ることができると考えられる。

以上、雨の降り始めのように、レール面に局所的に水滴が存在することで車輪とレール間の接線力係数が大きくばらつく環境となると、車輪踏面に削正痕を設けることで、鉄道車両の制動運転時に生じる前後方向の振動加速度が低減することが数値解析により分かった。

5. 結 言

本研究では、車輪踏面に残った車輪削正作業で生じた削正痕が水潤滑条件における車輪とレール間の接線力特性に及ぼす影響について、一對の小型円筒試験輪を用いた接線力測定実験により調査し、車輪とレール間と同様の接触形態となる自動車用ゴムタイヤと路面間の接触形態との比較により考察を行った。その結果、車輪とレールの場合、接触面に削正痕を設けてもこれら母材の剛性が高く、完全弾性体と見なせることから、水潤滑条件ではタイヤと路面間のように接線力の向上は期待できないことが分かった。さらに、水潤滑条件のときに接触面で作用する接線力特性は極少量の散水条件であっても、周速度 20km/h 程度で乾燥条件の接線力係数の 25%程度まで急激に低下する場合があること、接触面に水を含んだ状態で転がりすべり摩擦力を加えると研磨作用が生じる場合があり、このとき、接触面に生成した酸化膜が除去されるので接線力係数が少しずつ低下することが室内実験により分かった。

その一方で、散水量を増加させても接線力係数がそれ以上低減しにくくなる下限値が存在し、散水量が比較的小さい条件では乾燥条件と水潤滑条件の下限値の間でばらつき特性となること、そして、接触面に削正痕を設けると水潤滑条件での接線力係数のばらつきを縮小できることが分かった。特に、後者の接線力特性は、車両の走行性能向上に活用できると考えられるため、活用できる範囲を明確に示すとともに、数値解析によりその妥当性について検討を行った。その結果、雨の降り始めなどレール頭頂面上に局所的に水滴が存在するセミウェット条件となるとときに鉄道車両が制動運転する場合、車輪踏面に削正痕を設けた状態にすることにより、車体の前後振動が低減することを数値解析により示した。

なお、現状の鉄道車両には、走行中に車輪踏面に削正痕を設けたり消したりする機能は装備されておらず、これを行うとしたときには幾つかの課題をクリアする必要がある。しかしながら、そのような環境が整備されたときには、車輪とレール間の接線力特性を適切に変化させることが車両の乗り心地向上に対する一つの手段となり得ることが分かった。

文 献

- Fletcher, D.I. and Lewis, S., Creep curve measurement to support wear and adhesion modelling, using a continuously variable creep twin disc machine, *Wear* 298-299 (2013), pp.57-65.
- 中島幸雄, タイヤのハイドロブレーニングについて, 混相流, Vol.27, No.2 (2013), pp.102-109.
- 大原利一郎, 摩擦の理論, 日本ゴム協会誌, Vol.68, No.9 (1995), pp.587-594.
- 大山忠夫, 中野敏, 夏井由郎, 大家光伸, 車輪/レール間の粘着力に及ぼす表面性状の影響 (大形転動試験装置による水潤滑状態下での実験), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.52, No.475 (1986), pp.941-948.
- 酒井秀男, タイヤ工学, グランプリ出版 (2004), pp.271-276.
- Wu, B., Wen, Z., Wang, H. and Jin, X., Numerical analysis on wheel/rail adhesion under mixed contamination of oil and water with surface roughness, *Wear* 314(2014), pp.140-147.
- Yamamoto, D., Study on the running vibration characteristics of railway vehicle (1st report, Estimation of creep coefficient between actual wheel and rail), *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.4, No.6 (2010), pp.823-836.
- 山本大輔, 鉄道車両の曲線定常横圧低減のための微小凹凸付車輪踏面の開発, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.812(2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014trans0061.
- 山本大輔, 鉄道車両における車輪削正後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(2019), DOI: 10.1299/transjsme.18-00394.

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(2020), DOI:10.1299/transjsme.19-00451.

References

- Fletcher, D.I. and Lewis, S., Creep curve measurement to support wear and adhesion modelling, using a continuously variable creep twin disc machine, *Wear* 298-299 (2013), pp.57-65.
- Nakajima, Y., Hydroplaning of tire, *The Japanese Society for Multiphase Flow*, Vol.27, No.2(2013), pp.102-109(in Japanese).
- Ohara, R., Friction theory, *The Society of Rubber Science and Technology, Japan*, Vol.68, No.9(1995), pp.587-594(in Japanese).
- Ohya, T., Nakano, S., Natsui, Y., and Ohya, M., Influence of surface characteristics on adhesion force between wheel and rail: Some experiments under water lubrication with a large scale rolling contact testing machine, Vol.52, No.475(1986), pp.941-948(in Japanese).
- Sakai, H., Tire engineering, Grand prix book publishing(2004), pp.271-276(in Japanese).
- Wu, B., Wen, Z., Wang, H. and Jin, X., Numerical analysis on wheel/rail adhesion under mixed contamination of oil and water with surface roughness, *Wear* 314(2014), pp.140-147.
- Yamamoto, D., Study on the running vibration characteristics of railway vehicle (1st report, Estimation of creep coefficient between actual wheel and rail), *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.4, No.6 (2010), pp.823-836.
- Yamamoto, D., Development of micro-ribbed wheel tread profile of railway vehicle for reducing steady lateral force on curve, *Transactions of the JSME(in Japanese)*, Vol.80, No.812(2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014trans0061.
- Yamamoto, D., Transient characteristics of tangential force at wheel/rail interface after wheel re-profiling for railway vehicles, *Transactions of the JSME(in Japanese)*, Vol.85, No.876(2019), DOI: 10.1299/transjsme.18-00394.
- Yamamoto, D., Evaluation of the tangential force characteristics at wheel/rail interface of railway vehicles varying according to various sizes of the contact-patch under dry condition, *Transactions of the JSME(in Japanese)*, Vol.86, No.888(2020), DOI:10.1299/transjsme.19-00451.