

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

山本 大輔*

Influence of the Machined Surface on Transient Characteristics of Tangential Force at the Wheel/Rail Interface

Daisuke YAMAMOTO

In this paper, in order to investigate the influence of the machined contact surface made by the wheel turning on the transient characteristics of the tangential force of the wheel/rail, the tangential force measurement experiments were carried out using a pair of small cylindrical specimens with/without the machined contact surface. The experimental results show that the coefficient of friction on the contact surface is large due to the repetition of the rolling and sliding friction, the tangential force coefficient in the case of the specimen with the machined contact surface is small compared with that in the case of the specimen without the machined contact surface in the range of the slip ratio of at least less than about 1.0% due to the difference in the contact-patch and the contact properties, and the tangential force coefficient in the case of the specimen with the machined contact surface and that without it are almost the same in the range of the slip ratio of more than about 1.0%. This means that the influence of the machined contact surface on the steady and transient characteristics of the tangential force of the wheel/rail is small if only the ordinary wheel turning is conducted.

キーワード：車輪／レール，車輪削正痕，接線力特性，接触面形状，表面性状，乗り上がり脱線

1. はじめに

車輪削正後の乗り上がり脱線は、車両基地構内での車両の入れ替え作業の際にまれに発生しており、軌道の不整や車両のロール方向の運動に起因する輪重減少、さらに車輪削正により生じた接触面の比較的大きな削正痕(円周方向に生じた微小な凹凸)、繰り返し走行にともなう車輪／レールの摩擦係数の増加など、複数の要因が複合して関与すると考えられている¹⁾。特に、車輪／レールの接触面に作用する接線力特性(摩擦特性)に着目すると、本研究で対象とする脱線が車輪削正後から少ない走行距離で発生する特徴があるため、車輪削正で生じた削正痕(図1)が、歯車が噛み合うような形態で接触面の摩擦係数を大きくし脱線を助長したと考えられることが少なくない。このため、車輪フランジに大きな凹凸を与えない車輪削正作業の実施や、車輪削正後の車輪フランジへの機械油の塗布などが鉄道現場で必要に応じて行われてきた。その一方で、「摩擦」は現代文明においても説明が困難な現象の一つであるため、車輪とレールの接触条件に特化した摩擦特性の解明が望まれている。

このため著者は、車輪削正で生じる程度の大きさの車輪踏面の削正痕に着目し、数値解析および2円筒転がり接触実験により、接触面に削正痕を設けた場合とこれの

ない平滑な場合の定常的な接線力特性を調査した。その結果、前者の接触面に作用する定常的な接線力(摩擦力)は、後者より小さいことを明らかにした²⁾。

本稿では、車輪とレールの接触を直径30mmの小型円筒試験片を用いた2円筒転がり接触実験で模擬し、接触面に削正痕を設けたときとこれがない平滑なときの過渡的な接線力特性、すなわち、車輪削正から接線力が次第に増加して定常状態に至る特性を調査する。さらに、過去の実験で得られた知見²⁾を踏まえ、通常的車輪削正で生じる程度の高さやピッチの削正痕は、車輪／レールで作用する接線力特性に顕著な影響を与えないことを示す。

2. 車輪／レールの定常的な接線力特性

2.1 車輪／レールの接触面形状と接線力特性の関係

車両が加速度一定でレール上を走行するとき、車輪／レールの接触面には定常的な接線力が作用する。車輪／レールの接触部は、車両の輪重または横圧相当の力によ

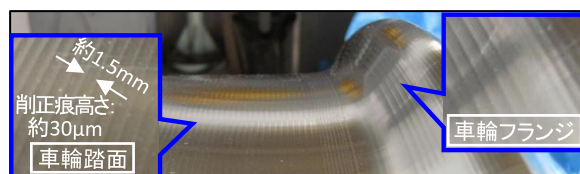


図1 車輪旋盤で削正した後の車輪踏面の削正痕

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

特集：鉄道力学

る弾性変形により面接触した状態となっている。Hertz理論に基づくKalkerの転がり接触理論³⁾によると、車輪とレールが設計形状の場合、車輪踏面とレール頭頂面または車輪フランジとレールゲージコーナの組合せでも、その接触面は楕円形状となる。ここで、図2に示すように、車輪フランジの削正痕と歯車が噛み合う形態となるレールの凹凸形状を示すことが難しいことが分かる。

車輪／レールの接触面の摩擦係数を一定とすると、この間に作用する接線力は摩擦力に飽和する特性となる。

車両が加減速走行すると、車輪／レールの接触面には固着領域とすべり領域が現れ、加減速度が増すとすべり領域が増えて接線力が大きくなる。

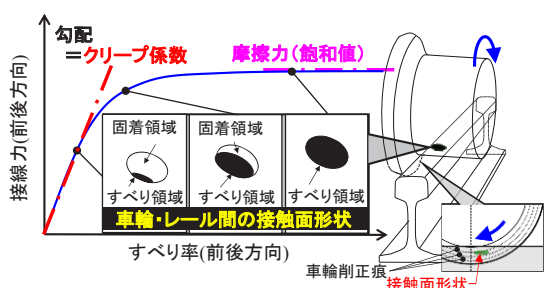


図2 車輪／レールの接触面形状と接線力特性

2.2 前後方向と左右方向の接線力特性の関係

車輪／レールの接触面に作用する接線力は、すべり率が小さい範囲ではクリープ力とも呼ばれ、接触面のすべり領域はクーロン摩擦の法則に従う⁴⁾。車輪とレールがアタック角を持って走行するとき、接触面には前後と左右の2方向の接線力(それぞれ F_x , F_y)が作用する。これらの合力と、摩擦係数 μ と荷重 F_z の積には、接触面の削正痕の有無ごとに式(1)の関係があり、この関係を x - y 平面で表すと摩擦円と呼ばれる半径 μF_z の円となる。

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu F_z \quad (1)$$

式(1)は、アタック角を設けない条件では、前後方向の接線力が大きいほど摩擦円が大きいことを意味するため、接触面の削正痕の有無ごとに、この条件で測定した前後方向の接線力を比較すると、同じアタック角を設けたときの左右方向の接線力の最大値 $F_{y,max}$ が評価できる。

2.3 接触面の削正痕と定常的な接線力特性の関係

車輪旋盤を用いた定期的な車輪削正作業により、実物車輪の踏面には、高さ数 μm から数十 μm の山型の削正痕が生じる。接触面の削正痕の有無と定常的な接線力特性の関係を調査するため、荷重450N、回転数100rpm、温度が約20°C、湿度が約30%で、すべり率を一定条件とした接線力測定実験を実施した。実験結果を図3に示

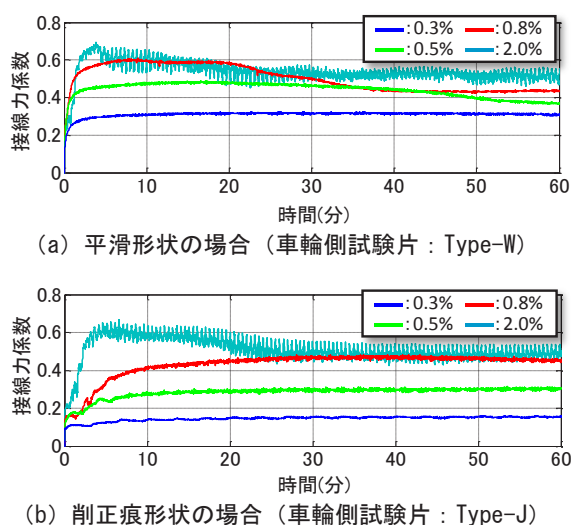


図3 接触面の削正痕の有無と定常的な接線力特性の関係

す。図3(a)は、車輪側試験片の接触面を平滑としたもの(Type-W)、図3(b)は削正痕を想定して高さ90 μm 、ピッチ1mmの山型の凹凸を設けたもの(Type-J)である。試験片の断面形状は3.3節で後述する。

図3(a)の場合、すべり率0.3%一定条件(青線)では、接線力係数(=接線力/荷重)が飽和するまで15分程度要している。すべり率が大きい条件ほど接線力係数は大きく、これが飽和に至るまでの時間に短い傾向が認められる。すべり率の大きい条件では、接線力係数が飽和した後若干小さくなる傾向が認められる。これは接触面の摩耗によるもので、接触形態が面接触から表面粗さの突起部で局所的に接する形態に変わったためである。

図3(b)の場合、すべり率が小さい条件での接線力係数は、接触面に削正痕があるType-Jの方が平滑なType-Wより小さい。これは接触面に設けた削正痕の突起部で接触する形態となったことで接触面積が減少し、接触面のせん断方向の剛性が低下したためである。なお、接線力係数が安定した付近の最大値を読み取り、すべり率ごとに整理すると、接触面の断面形状ごとにすべり率一定条件での定常的な接線力特性となる。

以上、接触面に削正痕があるときの定常的な接線力(最大値)は、すべり率が小さい範囲では、前後・左右方向ともに接触面が平滑なときより小さいことが明確となった。その一方で、接線力特性が定常的とならない場合、例えば、図3の実験開始から接線力係数が次第に増加し飽和するまでの過渡的な接線力特性については検討の余地が残されているため、以降で実験的に調査を行う。

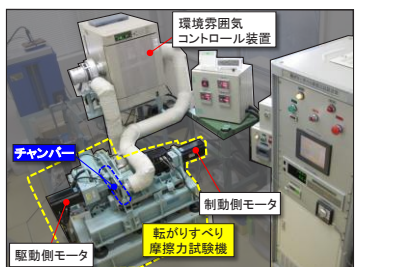
3. 車輪／レールの過渡的な接線力特性

3.1 小型円筒試験片を用いた接線力測定実験の概要

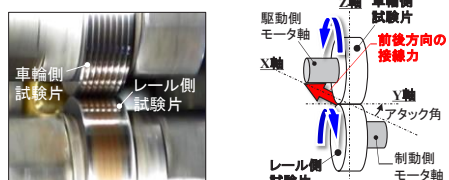
実物車両がレール上を走行するとき、車輪／レールの

接線力特性は常に接線力一定の定常状態となる訳ではない。車輪／レールの過渡的な接線力特性を調査するため、車輪／レールの接触を直径 30mm の一對の小型円筒試験片の接触で模擬した接線力測定実験を行い、実験前後の接触面の断面形状の変化を考慮し、接触面に作用する過渡的な接線力特性を評価した。

接線力測定実験では、すべり率を連続的に変化させる機能を持つ、鉄道総研の転がり－すべり摩擦力試験機(図 4)を用いた。荷重 450N (接触面が平滑の場合、接触面圧の計算値は約 1GPa)、回転数 100rpm、アタック角ゼロ、すべり率は実物車両が加速走行する場合を想定し、すべり率が連続的に大きく変化する条件で連続 5 回実施した。また、車輪／レールの摩擦係数を大きくかつ安定した状態に保つため、環境雰囲気コントロール装置を稼働させ、試験片の周辺環境を温度 20℃程度、湿度 30%程度となるよう制御しながら実験を行った。



(a) 転がり－すべり摩擦力試験機



(b) チャンバー内の様子

図 4 小型模型実験による接線力測定実験

3.2 すべり変化率の設定条件

鉄道車両では加減速走行や空転・滑走時など、車輪／レールのすべり率が連続的に変化する状態となる。このときのすべり率の変化を明確に示すことは困難であり、本稿では、実物車両の走行を模擬するため、車輪側試験片とレール側試験片のすべり率を異なる 3 つの変化率(以下、すべり変化率)で 0.1% から 3.0% まで増加するパターンを設け、これを模擬走行条件と定義する。すべり率の変化パターンを図 5 に示す。例えば、CASE 1 では、約 970 秒間で 0.1% から 3.0% まですべり率を大きくするので、平均のすべり変化率は約 0.003% / s となる。3 章の実験では、図 5 の各 CASE を 1 回分の模擬走行条件とし、それぞれ合計 5 回ずつ用いて接線力特性の変化を調査した。

	すべり率のレンジ(%)	すべり率の変化時間(s)	平均のすべり変化率(%/s)
CASE 1	0.1→3.0	約 970	約 0.003
CASE 2	0.1→3.0	約 98	約 0.030
CASE 3	0.1→3.0	約 11	約 0.26

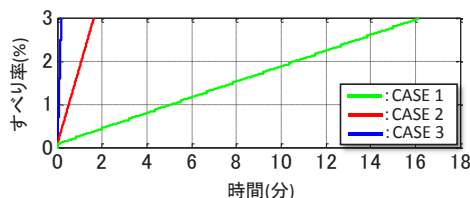
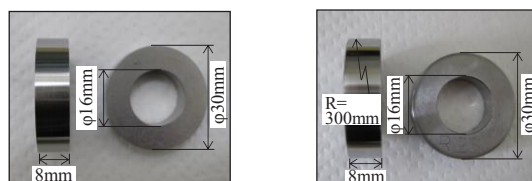


図 5 接線力測定実験での模擬走行条件

3.3 試験片の仕様

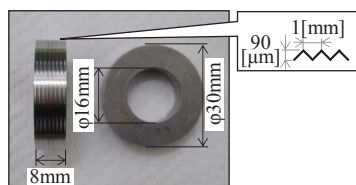
車輪側試験片とレール側試験片を図 6 に示す。これらの試験片は、それぞれ実物車輪と実物レールから切り出して製作し、接触面は NC 旋盤で所望の断面形状に加工した。車輪側試験片は、接触面に削正痕がない平滑な Type-W (図 6(a)) と山型の削正痕を設けた Type-J (図 6(b)) の 2 種類を製作した。Type-W の接触面の表面粗さは算術平均粗さ Ra で 0.2 ~ 0.5μm 程度、Type-J は、削正痕を想定した高さ 90μm・ピッチ 1mm の山型の微小な凹凸を接触面に設けている。レール側試験片(図 6(c)) は、車輪側試験片との間の接触面形状を楕円形状とするため、接触面を半径 300mm の円弧形状とし、接触面の表面粗さは Ra で 0.3 ~ 0.6μm 程度である。

ここで、接線力測定実験で用いた全ての試験片は、接触面の油分や不純物を除去するため、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、試験片の表面を完全に乾燥させたものを用いた。



(a) 車輪 (Type-W : 平滑形状)

(c) レール



(b) 車輪 (Type-J : 削正痕形状)

図 6 新品状態の車輪側試験片とレール側試験片

3.4 すべり変化率と過渡的な接線力特性の関係

3.4.1 接線力係数と時間の関係

CASE 1 (約 0.003% / s) の模擬走行条件のときの実験結果を時系列で図 7 に示す。Type-W (平滑形状) が青線、Type-J (削正痕形状) が赤線である。

特集：鉄道力学

Type-W（青線）の接線力係数は、実験1回目に実験開始から約6分後に約0.6から約0.3に急激に減少した。これは接触面にフラットが生成し、試験片間の接触が不連続となったためである。その後、3分程度経過すると周期的な衝突音が小さくなり、接線力係数は再び増加し、すべり率が約2.0%以上のときに約0.5から約0.6で飽和する傾向を示した。実験2回目以降では、接触面に新たなフラットは生成せず、接線力係数はすべり率が約1.0%まで線形的に増加し、すべり率がこれ以上となると約0.5に飽和する同様の傾向を示した。

Type-J（赤線）の接線力係数は、実験1回目に小刻みに振動しながら増加し、Type-Wの接触面にフラットがないとすると、すべり率が約2.0%まではType-W（青線）より小さいと推察される。しかし、これ以上のすべり率では接線力係数はType-Wと同等の約0.6で飽和した。実験2回目の接線力係数は、すべり率が約1.0%以下でType-Wよりも小さく、その後、接線力係数の差異が大きくなるすべり率の範囲が増えた。

以上、すべり率が少なくとも約1.0%までは、接線力係数は接触面に削正痕がある方が平滑形状のときより小さく、すべり率が約1.0%以上となると、削正痕の有無による明確な差異が認められなくなることが分かった。

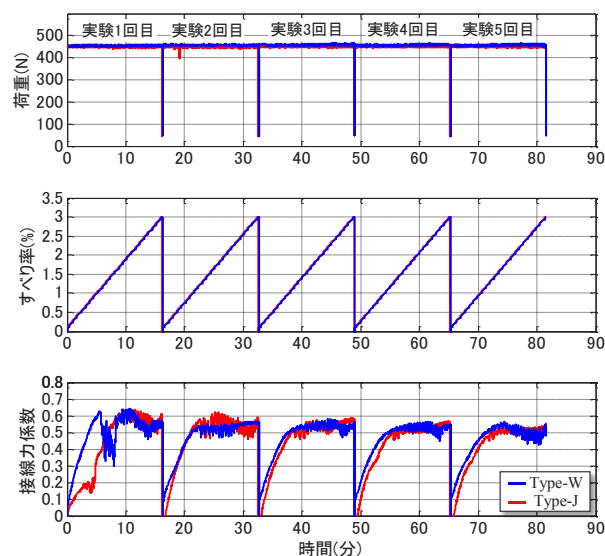


図7 CASE 1のときの過渡的な接線力係数の時系列波形

3.4.2 接線力係数とすべり率の関係

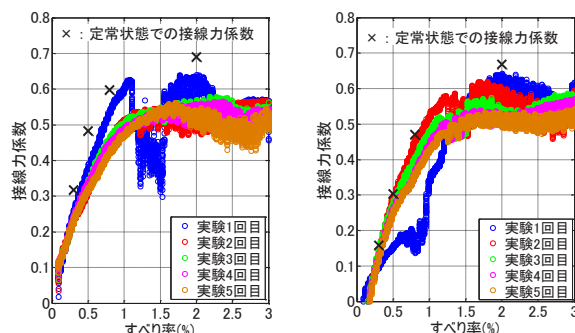
すべり率変化率を変えたときの接線力係数を、実験回数ごとに色別で図8～図10に示す。縦軸は接線力係数、横軸はすべり率である。また、図中の×印は、すべり率一定条件（0.3%、0.5%、0.8%、2.0%）での接線力係数が安定した付近の最大値で、図3から求めた値である。

(1) CASE 1（約0.003%/s）の場合

図8(a)のType-Wの場合、実験1回目の接線力係数は接触面のフラット生成により、すべり率が約1.0～

1.5%の範囲で小さくなった。実験2回目以降の接線力係数は、実験1回目と比較して勾配が小さく最大値も0.1～0.2程度小さい。後日、同一条件での再現実験で確認したところ、接触面にフラットを生成していないときには、接線力係数は定常状態での接線力係数（×印）に近い値となったことから、図8(a)において接線力係数が小さいのは実験1回目に生成したフラットに起因する接触面の摩耗の影響と考えられる。

図8(b)のType-Jの場合、実験1回目の接線力係数は、すべり率が0.7～0.9%付近で若干減少する傾向が認められるが、接触面にはフラットは生成していなかった。その後、実験を繰り返すごとに、すべり率1%程度より小さい範囲での接線力係数が大きくなり、定常状態での接線力係数（×印）に近づく傾向を示した。



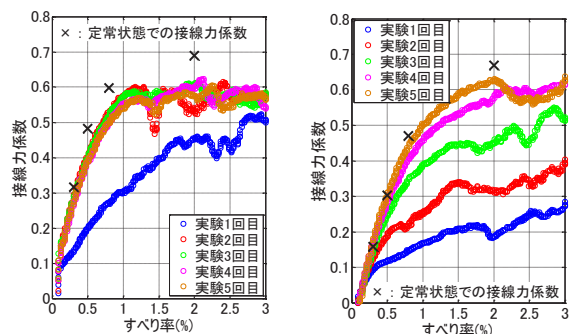
(a) Type-Wの場合 (b) Type-Jの場合

図8 すべり変化率がCASE 1のときの接線力特性

(2) CASE 2（約0.030%/s）の場合

図9(a)のType-Wの場合、実験1回目における接線力係数の勾配はCASE 1より小さく、接線力係数は小刻みに変動し、一定値に飽和する傾向も認められない。しかし、実験2回目以降では接線力係数の勾配は大きく、定常状態での接線力係数（×印）に近い値となり、接線力係数は0.6程度で飽和した。

図9(b)のType-Jの場合、実験1回目では、CASE 1と比較して接線力係数の勾配はさらに小さく、接線力係数は小刻みに変動し、一定値に飽和する傾向も認められない。しかしながら、実験2回目以降では、実験を繰り返



(a) Type-Wの場合 (b) Type-Jの場合

図9 すべり変化率がCASE 2のときの接線力特性

返すごとに接線力係数は大きくなり、定常状態での接線力係数（×印）に近づく傾向を示している。

(3) CASE 3 (約 0.26% / s) の場合

図 10(a) の Type-W の場合、実験 1 回目では接線力係数の勾配は、CASE 1、CASE 2 と比べると最も小さく、接線力係数が一定値に飽和する傾向は認められない。しかし、実験を繰り返すと接線力係数は次第に大きくなり、定常状態での接線力係数（×印）に近づく傾向を示したが、実験 5 回目でも接線力係数は飽和に至っていない。

図 10(b) の Type-J の場合、実験 1 回目の接線力係数は、最大で 0.2 以下の値で他の CASE の条件と比較して小さく、実験を繰り返し行っても、接線力係数は連続 5 回では僅かに大きくなる程度であった。

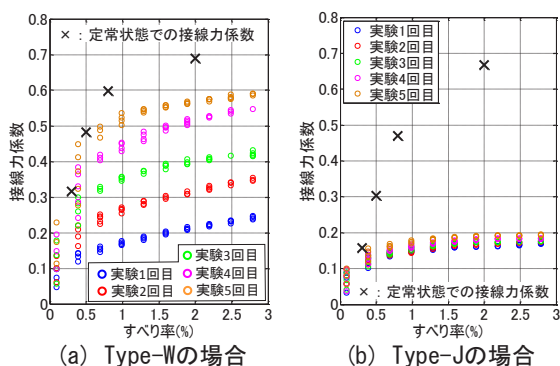


図 10 すべり変化率が CASE 3 のときの接線力特性

以上から、接触面の削正痕の有無に関係なく、車輪／レールの過渡的な接線力特性は、実験の繰り返し回数が多いほど接線力係数が大きくなり、接触面の削正痕の有無ごとに求まる定常状態での接線力係数に近づく傾向を示すことが分かった。さらに、今回の実験で接線力係数が最も大きくなる条件である CASE 1 (図 8) を見ると、すべり率が少なくとも約 1.0% 以下のときは、接触面に削正痕がある方がこれのない平滑のときより接線力係数は小さく、すべり率が大きいときは接触面の削正痕の有無に関係なく接線力係数は同等となることが分かった。

これらの結果から、車輪削正で生じる程度の削正痕が接触面にあっても、平滑な接触面のときより接線力係数は大きくなるということが分かった。

4. 接触面の表面性状と接線力増減の関係

すべり率の変化が小さい条件ほど、接触面に転がりすべり摩擦力が長時間作用していることと同義となるため、接触頻度と接触面の微細な剥離の程度との間には相関関係があることになる。このため、着眼点をすべり率の変化から接触面の表面性状に変えて考察を行う。

4.1 実験後の接触面の表面状態と接線力係数の関係

接触面の表面状態と過渡的な接線力特性の関係を考察するため、実験 5 回目後の試験片の断面形状をサーフコーダ SE3500 (小坂研究所製) で測定した。車輪側試験片の接触面の写真と並べて断面形状を図 11 に示す。

図 11(a) が CASE 3 の図 10(a) で示した実験 5 回目後に測定した Type-W の断面形状、図 11(b) が CASE 2 の図 9(b) で示した実験 5 回目後に測定した Type-J の断面形状である。なお、CASE 3 の図 10(b) の実験 5 回目後の接触面には、茶褐色の変色が認められないため、ここでは比較を行わない。

図 11(a) の Type-W の断面形状は、実験前後で明確な差異が認められず、むしろ接触幅の表面粗さは実験前の青線より実験 5 回目後の緑線の方が小さい。しかしながら、左側に示す実験 5 回目後の接触面には、レール側試験片との接触幅に茶褐色の変色が認められ、接線力測定実験で実験回数が増すごとに接線力係数が大きくなる現象は、接触面の形状変化によるものではなく、表面性状の変化によるものと判断できる。

図 11(b) の Type-J の断面形状も同様で、実験前後で突起の高さを比較すると、レール側試験片との接触幅は最大 30 μ m 程度低くなっているが、突起部の断面形状の変化率が小さいため、接触面積の増加は大きくない。左側に示す実験 5 回目後の接触面には、図 11(a) と同様に茶褐色の変色が認められる。

このことから、接線力係数が増加する過程では、接触面の表面性状の変化が大きく関与していると推察される。

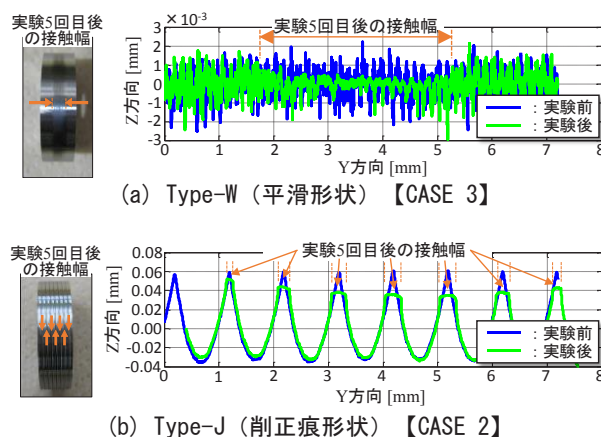


図 11 実験 5 回目後の接触面の状態

4.2 接線力の増加・低減メカニズム

接線力測定実験で観察された接触面の表面性状が変化する過程を、摩擦係数の増加メカニズムについて述べた文献⁵⁾ と対比して考察する。接線力測定実験で観察された試験片の接触面の変化の過程を、模式図で図 12 に示す。

図 12 の左側に示す実験前の新品試験片の接触面は、図 6 のように銀色である。接触面に転がりすべり摩擦力

特集：鉄道力学

を加えると、接触面がゆっくりと茶褐色に変色し、これに追従するように接線力係数が大きくなる。この変化は、接触面圧、すべり率が大きく、接触頻度が高いほど速い。接触面が濃い茶褐色に変色するとき接線力係数は最大値を示し、接触面が微細に剥離し再び銀色になるまで、接線力係数は飽和傾向を示す。接線力係数が大きくなる過程は、4.1節で述べた理由から接触面の断面形状の変化ではないと考えられる。接触面の変色は、すべり率が小さい条件で長時間実験を実施するとき顕著に認められ、このときの実験後の試験片の断面形状を測定すると、接触面に数 μm 程度の膨らみが認められることから、接触面から剥離した金属粉の酸化物の色と考えられる。

ここで文献5によると、接触面に摩擦が加わると微細な金属粉の剥離により金属素地が表面に現れ、接触面が活性化することで凝着が促進され摩擦係数が大きくなる。しかしながら、接触面の金属素地には大気中の酸素との接触により酸化膜が瞬時に生成され潤滑効果が生じるため、接触面の摩擦係数は一定値に飽和するとしている。この摩擦係数の増加メカニズムは、図12に示す新品からの接触面の変化の過程と良好に一致しており、接触面の表面性状の変化が摩擦係数の増加と深い関係にあることが理解できる。また、接触面の微細に剥離過程は、前述の通り、接触面圧、すべり率、接触頻度により異なるため、Type-WとType-Jで接線力が飽和に至る時間は異なるが、そのメカニズムは本質的には同様と考えられる。

他方、2.3節で述べたように、接触面に繰り返しの転がりすべり摩擦力をさらに加えると、接触面の摩耗が進展して接触形態が一様な面接触から表面粗さに起因する微小な突起部での接触形態に変化するため接線力係数は若干低下する。このことは、過去に行った同様の接線力測定実験でも、接触面の荒れにより接線力係数が低減することを確認している⁶⁾。

以上から、接線力係数の増加は、接触面への繰り返しの転がりすべり摩擦力が加わり、接触面に微細な剥離が

連続的に生じたことで凝着が促進されたことによるものと考えられる。一方、接線力係数の低減は、接触面形状が一様な面接触から摩耗による表面粗さに起因する局所的な突起部での接触形態に変化したこと、すなわち、接触面積が減少したことにより生じたものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、車輪踏面の車輪削正で生じる程度の大きさの削正痕に着目し、車輪削正後から定常状態に至るまでの過渡的な接線力特性を把握するため、2円筒実験により調査を行った。その結果、車輪削正による削正痕の有無に関係なく、接触面に作用する接線力は車輪削正直後が最も小さく、接触面に転がりすべり摩擦力を繰り返し加えると、接触面の表面性状が変化し接線力が次第に大きくなることが分かった。また、車輪削正後から定常状態までの全ての過程において、接触面に高さ $90\mu\text{m}$ 、ピッチ 1mm の削正痕がある場合とこれがない平滑形状の場合の接線力係数を比較すると、すべり率が少なくとも約 1.0% より小さい範囲では前者の方が小さく、すべり率がこれより大きくなると同等となることが分かった。

これらの実験結果から、通常的車輪削正で生じる程度の高さとしピッチの削正痕では、車輪/レールで作用する接線力特性に顕著な影響は与えないものと考えられる。

文 献

- 1) 桃崎秀二ほか：車輪削正が低速乗り上がり脱線へ及ぼす影響に関する基礎試験（繰り返しの走行条件下における摩擦状態の変化）、土木学会第13回鉄道力学シンポジウム、土木学会鉄道力学連絡小委員会、pp.37-42, 2009
- 2) 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, DOI:10.1299/transjsme.2014trans0061, 2014
- 3) Kalker J.J. : Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1990.
- 4) 公益社団法人自動車技術会：自動車技術ハンドブック第1分冊 基礎・理論編、精興社、p.231, 2015
- 5) 鈴木峰男：宇宙でのトライボロジー実験、日本真空学会論文集、Vol.51, No.8, 2007, p.542-545
- 6) Yamamoto D. : Characteristics of Tangential Force at the Wheel/Rail under Non-Steady Slip Ratio, 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2018), Delft, The Netherlands, 2018, pp.1147-1155.

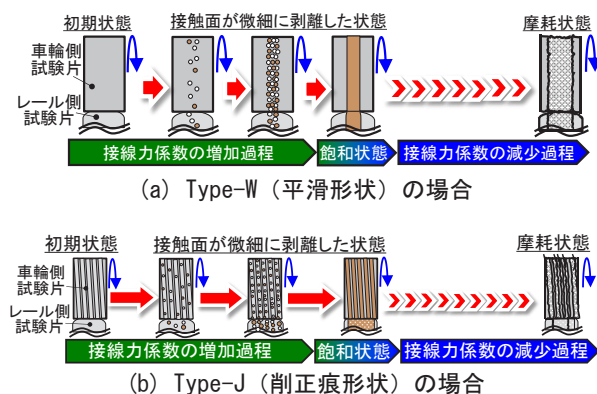


図12 新品状態からの接触面の表面性状の変化の過程