

# 車輪踏面の微小凹凸に着目した 車輪／レール接線力特性の評価

山本 大輔\* 陳 樺\*\*

**Tangential Force Characteristics of the Wheel/Rail Interface  
with Fine Unevenness on Wheel Tread**

Daisuke YAMAMOTO Hua CHEN

According to our previous study, the shape of the contact patch of the wheel/rail interface may not be a complete ellipse, because actual wheel tread profile has a fine unevenness due to wheel-turning or wear of wheel tread profile. Under such conditions, it is difficult to estimate a tangential force of the wheel/rail interface correctly by using usual method; accordingly the dynamic characteristics of railway vehicles cannot be estimated with sufficient accuracy. Therefore the authors proposed a numerical method to estimate tangential forces under such contact condition. In this study, we took notice of both cases with/without fine unevenness on the wheel tread profile first. And the relation between the fine unevenness on a contact surface and the tangential force characteristics was investigated by tangential force measurement tests for cylindrical specimen and actual wheels. As a result, the tangential force is greatly affected when fine unevenness exists under low relative humidity and the validity of the proposed numerical method is confirmed.

キーワード：車輪／レール，接線力測定実験，コンタクトパッチ，微小凹凸，クリープ係数

## 1. はじめに

鉄道車両の運動特性を数値解析で精度良く推定するためには、車輪とレール間の接線力特性を正確に把握することが重要となる。

そこで、著者の一人は、測定した営業車両の車輪踏面形状を使って、車輪とレール間の接触面形状を数値計算で厳密に求めるとともに、この形状に基づき、接線力特性を推定する研究<sup>1)</sup>を行った。その結果、設計形状に削正した実物車輪から測定した車輪踏面形状を用いて計算で求めた車輪とレール間の接触面形状は、設計形状を使って計算した形状と比べると、外形の包絡線形状は同等の大きさであるが、削正により生じた微小凹凸により、複数の接触領域が集合した形状となっており、両者は明らかに異なることが分かった(図1)。また、これらの接触面形状から、車輪とレール間のクリープ係数を推定すると、測定した車輪踏面形状に基づく値は設計形状から推定した値と比べて小さい可能性があることを示した。

これらの結果を踏まえて本研究では、車輪踏面にある微小凹凸が車輪とレール間の接線力特性に及ぼす影響についてより詳しい検討を行った。まず、実物車輪とレール間の接触面形状とは大きさは異なるが、小型円筒試験

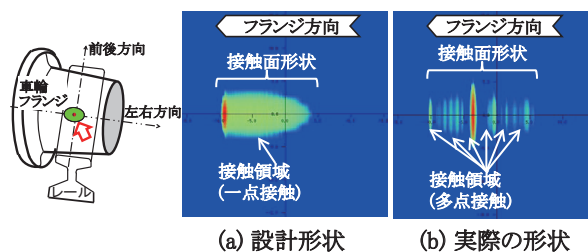


図1 車輪とレール間の接触面形状(計算結果)

片を用いた接線力測定実験により、接触面に設けた微小凹凸が接線力特性に及ぼす影響を調査した。さらに、この実験で得られた知見が、実物車輪とレール間に作用する接線力特性にも成り立つことを確認するため、実物車輪の車輪踏面に凹凸を付けた場合と平滑な場合の接線力特性を比較する調査を行った。

本稿では、接触面の微小凹凸が接線力特性に及ぼす影響について述べ、既報<sup>1)</sup>で報告した、微小凹凸により接線力が小さくなるという数値計算結果の妥当性を示す。

## 2. 小型円筒試験片を用いた接線力測定実験

接触面に微小凹凸がある場合の接線力特性を調査するため、鉄道総研の転がりすべり摩擦力試験機(図2)を使って、小型円筒試験片を用いた接線力測定実験を

\* 車両構造技術研究部 車両振動研究室

\*\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

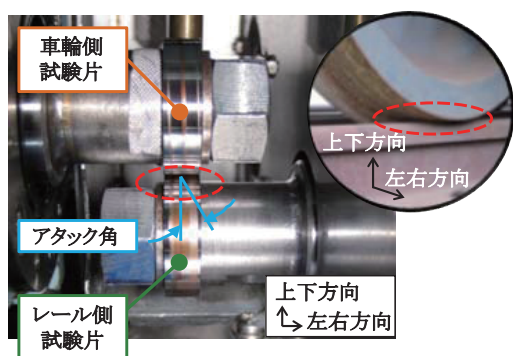


図2 小型円筒試験片を用いた接線力測定実験

行った。本試験機は、試験片を設置するチャンバ内の環境(温度と湿度)条件を制御しながら、縦すべり率を0.1%の程度の高精度な条件で接線力測定実験ができる。接線力測定実験では、実物の車輪とレールから切り出した直径30mmの円筒試験片を、それぞれ車輪とレールと見なして一定荷重で押付けながら、各試験片を僅かに異なる回転数で接触転動させ、接触面に作用する接線力を測定した。アタック角は、車輪側試験片を設置した軸をヨーイング方向に回転させて設定した。

本実験では、実物車輪とレール間の接触状態に近い接触面圧条件とし、微小凹凸形状と接線力係数(接触面に作用する接線力を荷重で割った値)の関係を評価した。

### 2.1 接触面の摩耗が及ぼす接線力特性の変化

小型円筒試験片を用いた接線力測定実験では、接触面が摩耗して接線力特性が変化する。そこで、まず、接触面の摩耗形状と接線力特性の関係を調べるため、接触面を半径150mmの円弧形状とした試験片(図3(a))を用い、荷重450N(最大接触面圧の計算値1.4GPa)、縦すべり率0.3%、アタック角約0.6deg.の条件で、測定時間を変えて実験を行った。図3(b)に接線力係数の測定結果を示す。太線は前後方向の接線力係数、細線は左右方向の接線力係数を示し、測定時間ごとに色を変えて実験結果を示す。

試験片同士を一定の縦すべり率で接触転動させると、接触面に酸化膜が生成し始め、接線力係数が増加する。その後、接触面が酸化膜に覆われ安定状態<sup>2)</sup>となると、接線力係数は最大値付近で飽和する傾向を示す。さらに実験を継続すると、実験条件によっては、接線力係数は最大値より若干小さくなる傾向を示す。

接線力係数が変化する要所(A点;左右・前後方向の接線力係数が最大値に近く飽和状態となる付近、B点;飽和状態であった接線力係数が低下し始める付近、C点;十分長い時間経過後)で実験を止め、この時の試験片の断面形状を粗さ測定器(小坂研究所サーフコーダSE3500)で測定し、断面形状と接線力係数の関係を調べた。ここでは、理解し易いように、測定した試験片の

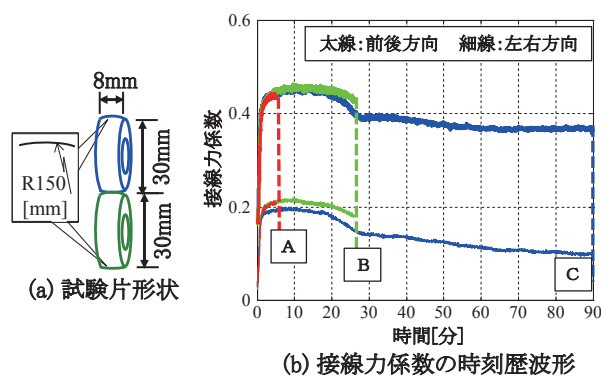


図3 円弧形状試験片同士の接線力測定実験

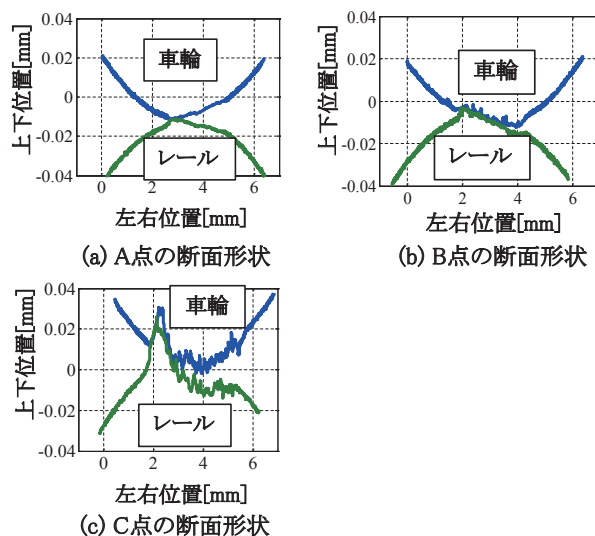


図4 試験片の断面形状の変化

断面形状を幾何学的に接触した状態で図4に示す。

A点では、試験片の断面形状は初期の円弧形状に近い形である。しかし、実験時間が長くなると試験片の断面形状が摩耗により変形し、C点では初期の断面形状とは全く異なる形状となっている。これらの幾何学的な接触状態と図3(b)を対比すると、接線力係数が最大値付近の飽和値から低下し始めるB点では、試験片の断面形状に5 $\mu$ m程度の筋状の荒れが生じ始め、その後、C点では接触面に大きな荒れが生じる。つまり、接線力測定実験を長く実施すると、摩耗に起因する微小な凹凸が接触面に生じるため、真実接触面積が小さくなり、接線力係数が小さくなると推察される。この特性は、接触圧が高く、縦すべり率が大きい条件(接線力が大きい条件)ほど顕著に認められる。

本研究では、試験片の断面形状の違いと接線力特性の関係を調査することを目的とするため、以降、接線力係数は最大値付近の飽和値で評価する。

### 2.2 接触面の微小凹凸が接線力特性に及ぼす影響

車輪側試験片の断面形状は、高さとピッチの異なる

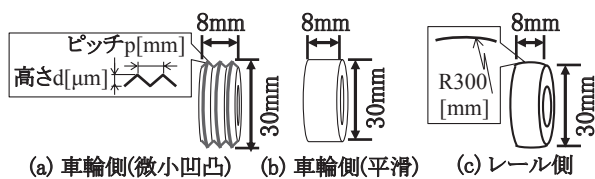


図5 試験片の形状

表1 車輪側試験片接触面の凹凸条件

		凹凸高さ $d$ [ $\mu\text{m}$ ]				
		10	30	50	90	Ra: 0.2 $\mu\text{m}$
凹凸	1	A	B	C	J	—
	2	D	E	F	—	—
ピッチ $p$ [mm]	3	G	H	I	K	—
	なし	—	—	—	—	W

11種類の山形の微小凹凸形状と、平滑形状の計12種類を製作した。一方、レール側試験片は、接触面形状を楕円形状とするため、半径300mmの円弧形状とした。これらの試験片の仕様を図5と表1に示す。全ての試験片は微小凹凸の有無に関わらず直径30mmである。本研究ではすべり率を高精度に保った接線力測定実験ができるので、同等の温度・湿度条件において、試験片ごとに接線力特性に差が生じた場合、これは接触面の微小凹凸による影響が表れたと考えることができる。

以降、試験片を区分するため、例えば、微小凹凸のピッチ  $p$  が3mm、高さ  $d$  が50 $\mu\text{m}$  の条件である試験片Iでは、I (p3d50) のように記号右側に条件を併記して示す。

### 2.2.1 試験片周辺の湿度と接線力特性の関係

試験片周辺の湿度の違いが接線力特性に及ぼす影響を調査するため、断面形状が同じ試験片W、試験片C (p1d50)、試験片I (p3d50) の3種類を用いて、温度20 $^{\circ}\text{C}$ 一定、湿度30%と60%の条件での接線力測定実験を行った。ここでは、アタック角なしの条件とした。実験結果を図6に示す。

前後接線力係数は、接触面が平滑な試験片Wが最も大きく、微小凹凸を設けると接線力係数は小さくなる。

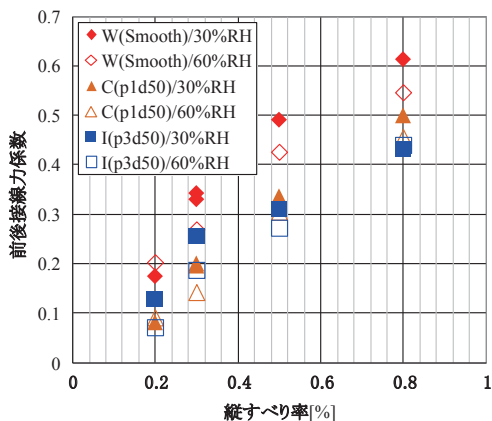


図6 試験片周辺の湿度と前後方向の接線力係数の関係

縦すべり率が同じ条件で、同じ断面形状の試験片同士を比較すると、湿度30%の条件の方が、60%の条件より前後接線力係数が大きい傾向が認められる。これは、空気中に含まれる水分量の違いが影響していると考えられ、湿度60%の条件の方が、30%の条件より定性的に接触面に付着する水分が多くなるため、接触面の潤滑効果が増し、接線力係数が小さくなると考えられる。既報<sup>3)</sup>でも、最大接触面圧、試験片の断面形状の条件は異なるが、今回の実験結果と同様の特性が得られている。

以降、微小凹凸の有無が接線力特性に及ぼす影響を明確にするため、湿度30%の条件について述べる。

### 2.2.2 微小凹凸形状と接線力特性の関係

試験片Wと試験片K (p3d90) について、アタック角約0.6deg、回転数100rpmの条件で測定した接線力係数の時刻歴波形を図7に示す。

アタック角を設定した条件で縦すべり率を加えると、接触面に前後と左右の2方向に接線力が作用する。

縦すべり率が増加するにつれて前後接線力係数は大きくなり、左右接線力係数は逆に小さくなる。これは、前後と左右の接線力の大小関係が、接触面に作用する2方向の接線力を合成した力の大きさと方向で決まるためである。

縦すべり率が同じ条件で両試験片を比較すると、接線力係数は前後、左右ともに試験片Wの方が大きい。しかし、試験片Wの接線力係数は、最大値付近で飽和した後、小さくなる傾向が認められ、特に、縦すべり率が大きい条件ほど早く、顕著である。これは縦すべり率の

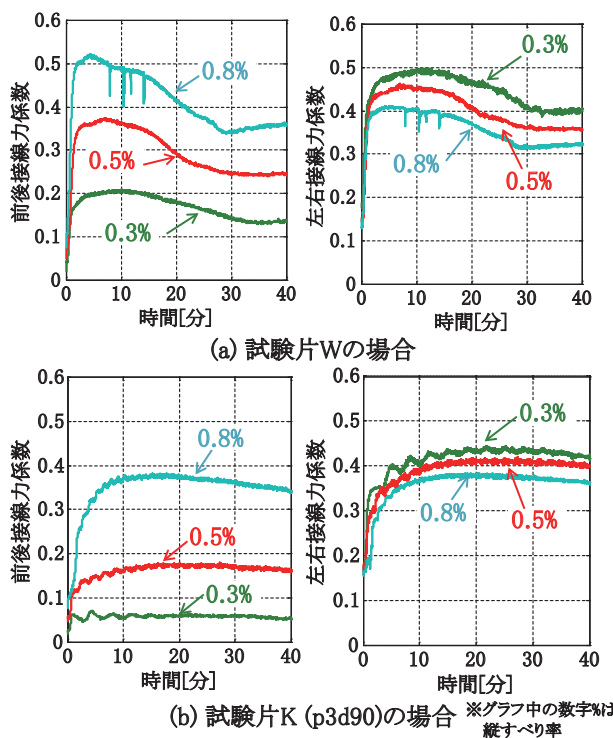


図7 接線力係数の時刻歴波形

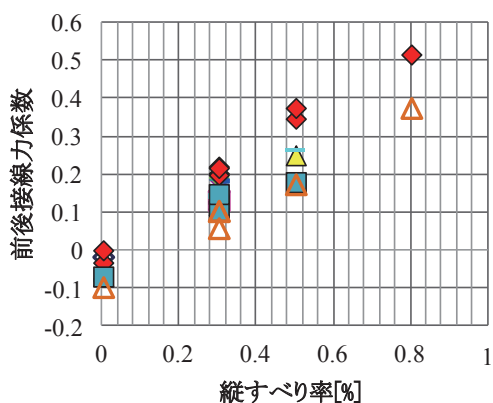
特集：鉄道力学

増加により、接触面が摩耗して形状が変化したことが理由と考えられ、2.1項と同様の現象と推察される。一方、試験片K(p3d90)の接線力係数の低下は、試験片Wほど大きくない。実験前後で試験片の断面形状を測定し比較すると、微小凹凸の高さが若干低くなり、接触している凸部の接触幅は僅かに広がる程度であった。すなわち、接触領域の変化が大きくないので、接線力係数の変化が小さいと考えられる。

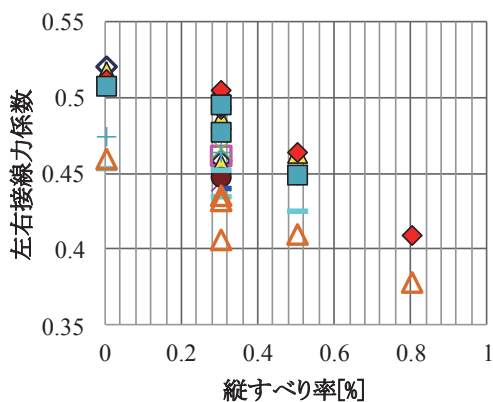
次に、図5で示した12種類の試験片全てに対して、アタック角約0.6deg、回転数100rpmの条件で、縦すべり率を変えて測定した接線力係数を図8に示す。

縦すべり率が0%の時、前後接線力係数の一部に負の値がある。これらの試験片は、微小凹凸の高さが高く接触面圧が高い条件である。実験後にレール試験片の断面形状を測定したところ、車輪側試験片の凸部と接触する部分が軸方向に掘り起こされる形態で摩耗していた。このことから、車輪側試験片とレール側試験片の中心間距離が変わったことで縦すべり率に誤差が生じたため、測定値が負になったと考えられる。

縦すべり率を増加すると、全ての条件で、前後接線力



(a) 前後接線力係数



(b) 左右接線力係数

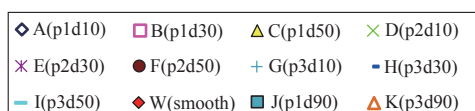


図8 断面形状の違いと接線力特性の関係

係数が増加し、左右接線力係数が小さくなる。接触面が平滑な試験片Wの接線力係数が、同じ縦すべり率の条件の中で最も大きく、接触面に微小凹凸を設けると、平滑な試験片Wより、前後と左右の2方向の接線力係数が小さくなるのが分かる。これは、接触面に微小凹凸を設けると、接触領域が平滑形状の場合より小さくなり、接触面の接触剛性が低下するためと考えられる。

ここで、試験片Wと、微小凹凸高さが同じ90μmで、ピッチが1mm(試験片J)と3mm(試験片K)の場合の計3種類の左右接線力係数に着目する。これらを比較すると、微小凹凸の高さが同じでもピッチが1mmの場合(試験片J)には試験片Wと同等の値であるのに対して、ピッチが3mm(試験片K)と大きくなると、左右接線力係数は他の条件より明確に小さくなる。これはピッチの大きさの違いにより接触点数が異なるためである。すなわち、左右接線力とクリープ係数は次元が異なるが、すべり率が同じ条件では相対的に比較することができ、クリープ係数の大きさが左右接線力の大きさに比例すると考えても問題ないので、それぞれの接触領域を合わせた左右接線力は、それぞれの接触領域に対応する横クリープ係数の総和として求めることができる。このため、接触面に微小凹凸があり、その接触点数が少ない方が左右方向接線力係数は小さいことになる。

以上の結果から、接触面に微小凹凸が存在すると、接触領域が小さくなるため、接触面が平滑な条件より接線力係数が小さくなること、さらに、微小凹凸の高さとピッチを変えると接線力特性が変わることが分かった。

### 3. 実物車輪を用いた接線力測定実験

#### 3.1 実験概要

小型円筒試験片を用いた実験結果を踏まえ、実物車輪に対しても同様に、車輪踏面に微小凹凸を設けると、接線力が低減することを確認するため、鉄道総研のブレーキ性能試験機粘着試験ユニットで、実物車輪を用いた接線力測定実験を行った(図9)。

この試験機は、2章で用いた試験機とは縦すべり率の

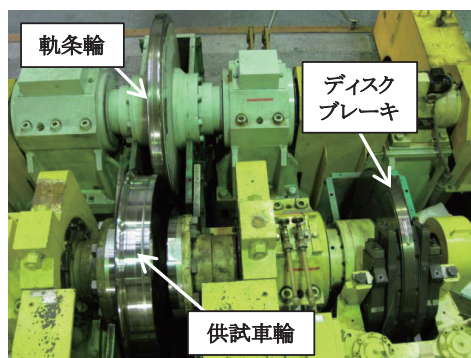


図9 実物車輪を用いた接線力測定実験

与え方が異なり、以下の方法で縦すべり率を作用させている。慣性質量を付加した軌条輪をモータで回転させ、軌条輪に押付けた車輪を従動回転させる。車輪が設定速度まで加速したら、車輪と直結したディスクブレーキをブレーキキャリアで挟んで制動力を与え、車輪と軌条輪間に強制的に縦すべり率を与える。

ここでは、供試車輪の車輪踏面に後述する微小凹凸を設けた場合と平滑な場合について、それぞれ同じ条件で接線力測定実験を実施し、制動力が加わり始めた状態から車輪が数回転する間に、車輪と軌条輪の周速度から算出した縦すべり率、車輪の回転トルクから算出した接線力をそれぞれ測定し、接線力と縦すべり率の関係から傾きの大きさ、すなわちクリープ係数の大きさを比較して評価する。荷重条件は在来線通勤形車両の静止輪重相当である30kNと、これより若干軽い20kNとし、同じ接触位置での荷重条件を変えた繰り返しの実験を行った。

なお、以下の実験結果は、アタック角なし、湿度制御なしの限定的な条件で得られた値であることを付記する。

### 3.2 供試車輪

直径810mmの新品B型車輪を供試車輪とし、車輪踏面形状はJR在来線用修正円弧踏面とした。接線力測定実験では、車輪踏面を平滑な修正円弧踏面とした場合(以下、通常車輪と記す)と、これに微小凹凸を設けた場合(以下、微小凹凸車輪と記す)の2条件について、車輪に接するレールの位置を同じにして、それぞれ測定した。

通常車輪の車輪踏面の粗さは、算術平均粗さRaで2.14μm程度であった。微小凹凸車輪の条件では、図10に示す2箇所の高さ150μm、2種類の異なるピッチの微小凹凸を設けた。微小凹凸のピッチが1mmと狭いものを微小凹凸条件、ピッチが12mmと広いものを微小突起条件とする。

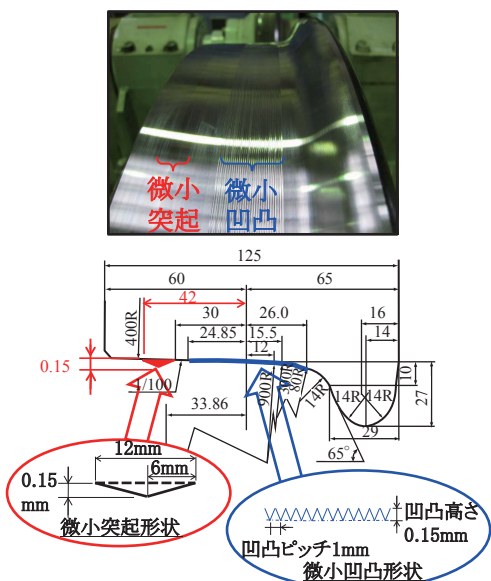


図10 供試車輪の車輪踏面形状

### 3.3 クリープ係数の測定結果

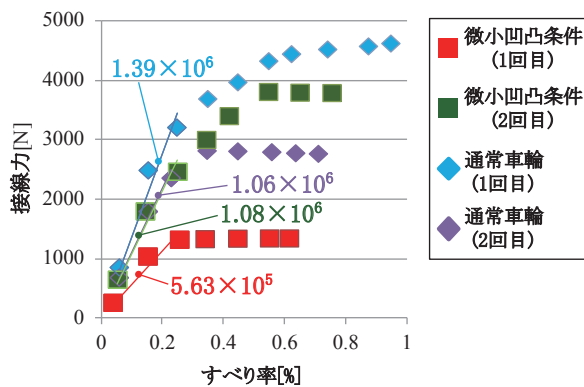
#### (a) 微小凹凸条件の場合

通常車輪の条件と微小凹凸条件で測定した結果を図11に示す。図中の直線は、接線力の変化が線形と見なせる範囲での原点を通る近似直線で、この傾きがクリープ係数となる。それぞれの条件でのクリープ係数を図中に数字で示す。

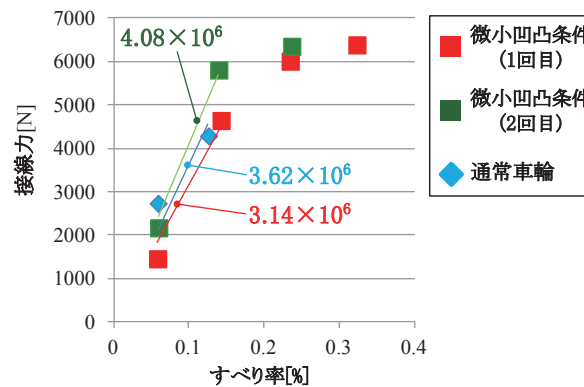
図11(a)の荷重20kNの条件では、微小凹凸条件の1回目と2回目のクリープ係数が2倍程度異なる。これは、車輪踏面に設けた微小凹凸が摩滅し、通常車輪の表面状態に近づいたためと考えられる。このように考える理由は、一番最初に実施した実験前後で車輪踏面形状を測定して比較したところ、実験前の形状は凹凸高さが150μmであったのに対し、実験後の形状は接触幅の一部の凹凸が完全に摩滅し、その周辺の凹凸も140μmから90μm程度に低くなっており、通常車輪の表面状態に近い形態であったためである。

図11(b)の荷重30kNの条件では、通常車輪と微小凹凸条件の場合のクリープ係数に明確な差異が認められない。これは、車輪踏面に設けた微小凹凸の高さが、繰り返しの実験により、最初から150μmより低い状態であったためと考えられる。

これらの結果から、微小凹凸条件のクリープ係数は、



(a) 荷重20kNの場合



(b) 荷重30kNの場合

図11 微小凹凸条件の場合の接線力特性

特集：鉄道力学

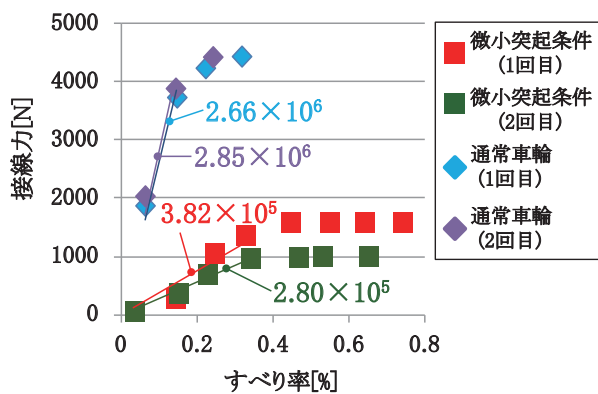
微小凹凸が残存していれば、通常車輪の場合より若干小さいと考えられる。また、微小凹凸部分が摩擦した場合には、通常車輪の条件と同程度の接線力特性になることが分かった。

(b) 微小突起条件の場合

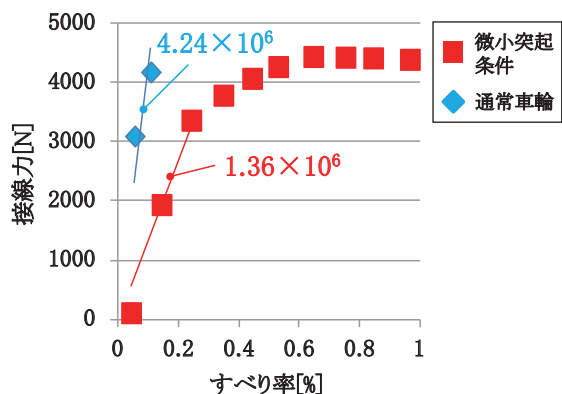
前項と同様に、通常車輪条件と微小突起条件の接線力と縦すべり率の関係を図12に示す。

図12(a)(b)から、微小突起条件の場合、荷重条件に関係なく、通常車輪条件の12～32%程度のクリープ係数で明確に小さい。また、微小突起条件では、1回目と2回目の実験結果を比較すると、クリープ係数は同程度で再現性も認められる。これは、車輪踏面の微小凹凸形状が比較的幅の広い一条の山型形状であるため、通常車輪の場合より接触領域が小さくなり、これに伴い、接線力が小さくなると考えられる。また、微小凹凸形状と比べて単位面積当たり作用する接線力が弱く、耐摩耗性に対して有利な形状であるため、繰り返しの実験でも微小凹凸条件より接線力特性は安定していると考えられる。

このように、接触領域が小さくなる形態で車輪踏面に微小凹凸があると、実物車輪とレール間の接線力特性は通常車輪の場合より小さくなることが分かった。また、この場合、左右接線力は小型円筒試験片による実験結果から、通常車輪の場合より小さくなると推察される。



(a) 荷重20kNの場合



(b) 荷重30kNの場合

図12 微小突起条件の場合の接線力特性

4. 結論

本研究では、小型円筒試験片および実物車輪を用いた接線力測定実験を実施し、接触面に設けた微小凹凸と接線力特性の関係を調査した。

小型円筒試験片を用いた接線力測定実験では、試験片周辺の湿度が相対的に低い条件において、空気中の水分量が少ないことによる潤滑効果の低下により接線力が大きくなる特性があること、アタック角を付与した条件では、接触面に微小凹凸を設けると前後と左右の接線力が小さくなり、さらに、微小凹凸形状の高さとピッチを変えることで、接線力特性が変化することが分かった。

この結果を踏まえ、実物車輪を用いた接線力測定実験を行い、車輪踏面に微小凹凸を設けた条件と平滑な通常車輪の条件でクリープ係数の比較を行った。その結果、車輪踏面に微小凹凸を設けると、通常車輪の場合よりクリープ係数が小さくなり、特に、車輪踏面に微小突起を設けて車輪とレール間の接触面形状を通常車輪の場合より小さくすると、通常車輪の場合より明確にクリープ係数が小さくなることが分かった。この結果は、小型円筒試験片を用いた実験結果と同様の結果である。

以上の結果は、既報<sup>1)</sup>で報告した、営業車両の車輪とレール間の接線力特性は、接触面に微小凹凸があるため、設計形状に基づき求めた理論値より小さくなるという数値計算結果の妥当性が確認できたことを意味する。

おわりに

本研究で得られた知見は、精度の良い車両運動解析を実施するためには、車輪踏面の微小凹凸を考慮する必要があることを示す結果であり、車輪踏面に適切な形状で微小凹凸を設けると、車両の運動特性が向上する可能性があることを示唆している。

今後は、車輪踏面に設けた微小凹凸による接線力低減効果を、実物車両の運動特性の向上に活かすための研究を進める計画である。

文献

- 1) 山本大輔：車輪踏面の実測形状に基づく車輪／レール接触特性解析，鉄道総研報告，Vol.25, No.1, pp.27-32, 2011
- 2) 摩擦・摩耗試験機とその活用：養賢堂，2007
- 3) 山本大輔，陳樺：鉄道車両の車輪踏面の微小凹凸と接線力に関する基礎的研究（2円筒転がり試験機による環境条件と接線力特性の関係），日本機械学会論文集C編，Vol.77, No.781, pp.3211-3222, 2011