

車輪踏面の微小凹凸がクリープ力特性に及ぼす影響

車両構造技術研究部 車両振動研究室
副主任研究員 山本 大輔

1. はじめに

鉄道車両の車輪踏面は、走行距離の増加にともない摩耗して形状が変わるため、専用の車輪旋盤で元の車輪踏面形状に戻す作業(車輪削正)が定期的に行われている。この際、車輪旋盤の性能によっては車輪踏面の円周方向に切削痕(微小な凹凸)が残る場合がある。この微小凹凸は、高さが数 μm ~数十 μm 程度と小さいので、従来の研究では、車輪とレール間に作用するクリープ力は車輪踏面が平滑(設計形状)の場合と比べて大差がなく、車両の走行性能に与える影響は小さいと考えられた。しかし、著者の研究で、営業車両の車輪踏面形状を測定し、この形状に基づく車輪とレール間の接触面形状(図1中央下参照:接触点での弾性変形状)を計算で求めると、車輪踏面が平滑な場合(図1(a))と比べて外形寸法は同等であるが、前後方向に筋の入った形態となり(図1(b))、両者は明確に異なる場合があることが分かった。さらに、実車輪の踏面形状に基づく接触面形状から推定したクリープ係数¹⁾は、平滑な場合より小さく、実車両の運動特性は数値計算で推定した結果と異なると考えられた。

そこで、車輪とレール間の接触面形状に着目し、小型円筒試験片を用いたクリープ力測定実験により接触面形状とクリープ力特性の関係を調査した。本稿では、クリープ力測定実験の結果を紹介するとともに、車輪踏面の微小凹凸が車両の走行安定性に及ぼす影響を数値計算で検討した結果について述べる。

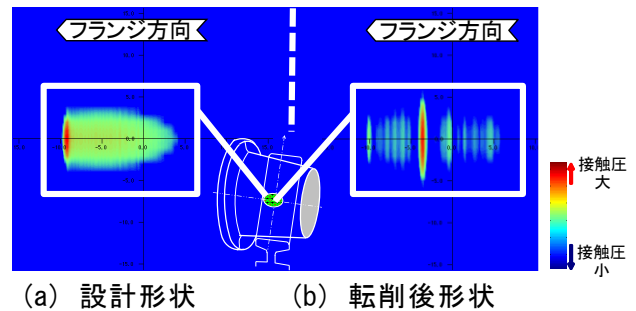


図1 車輪とレール間の接触面形状(計算結果)

2. 小型円筒試験片を用いたクリープ力測定実験

鉄道総研の転がり-すべり摩擦力試験機(図2)を用いて、実物の車輪とレールをそれぞれ外形直径30mm・幅8mmの円筒試験片で模擬し、両者間の接触面形状に着目したクリープ力測定実験を行った。本試験機は、駆動側(車輪)と制動側(レール)の試験片を取り付けた軸、それぞれにサーボモータを直結した構造をしており、モータの回転数を独立に制御することで精度0.1%の微小すべり率の条件でのクリープ力が測定可能である。さらに、手動で駆動側と制動側の軸をヨーイング方向に回転させることで、アタック角付与時の条件を模擬することができる。実験で用いた試験片は、それぞれ実物の車輪とレール

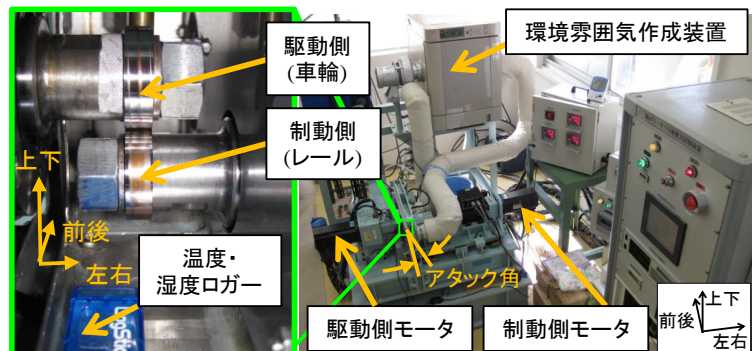
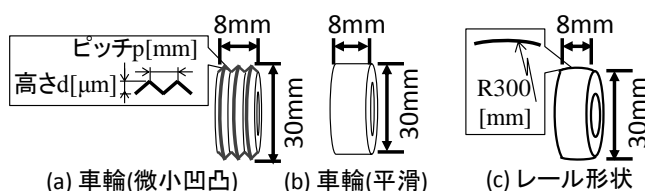


図2 試験機外観と実験状況

ルから切り出して作成し、車輪は接触面に高さ
とピッチの異なる 11 種類の山型の微小凹
凸を設けたタイプ(A~K)と平滑形状のタイ
プ(W)とし、レール接触面は接触面形状を楕
円形状とするため半径 300mm の円弧形状と
した。試験片間の荷重条件は 450N とした。
この値は車輪の接触面形状が平滑な場合にお
いて、実車両の車輪とレール間の接触面圧よ
り若干大きい 1GPa 程度の条件となる。環境
条件は 20℃, 30%RH(乾燥条件)とした。



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

図 3 試験片形状と車輪断面形状の仕様

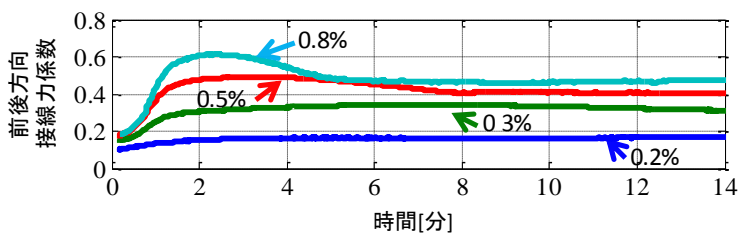
3. 接触面の微小凹凸とクリープ力特性の関係

3.1 アタック角がない場合

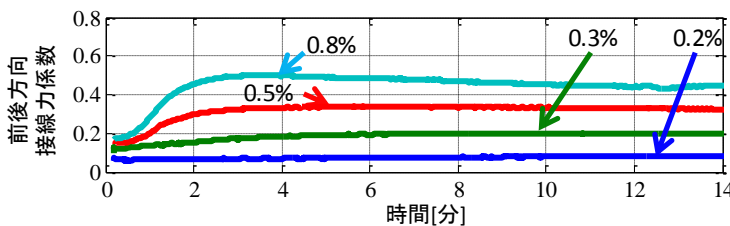
試験片の回転数を 1000rpm とした場合の接線力係数(=前後方向接線力/荷重)の測定結果を図 4 に示す。図 4(a)が平滑形状の場合、図 4(b)が微小凹凸のある場合(ピッチ $p=1\text{mm}$, 微小凹凸高さ $d=50\mu\text{m}$)の測定結果である。それぞれ縦軸が接線力係数、横軸が時間、すべり率は青線 0.2%, 緑線 0.3%, 赤線 0.5%, 水色線 0.8%である。

図 4(a)(b)ともに、すべり率の増加とともに接線力係数が大きくなり、すべり率が同じでも微小凹凸がある図 4(b)の方が前後方向接線力係数は明らかに小さい。これは微小凹凸の有無により接触面形状が異なるためと考えられる。ここで、接線力係数は経過時間とともに増加して最大値を示し、その後、減少する傾向が認められる。この傾向は、特に、すべり率が大きい条件で顕著である。これは試験片の接触面が連続的に作用する大きなクリープ力により摩耗して接触面に荒れが生じたためと考えられる。このように、接触面が摩耗して荒れが生じると真実接触面積が減少するため、十分時間の経過した後の接線力は最大値より小さくなる傾向を示す。本稿では、図 3 で定めた車輪断面形状とクリープ力特性の関係を調査することが目的であるため、接触面の断面形状が新品形状に近い状態である、接線力係数が最大となる付近の定常値を評価する。

接触面の微小凹凸とクリープ力特性
の関係を図 5 に示す。凡例内のアルファベットは図 3 の詳細表と同じである。微小凹凸の有無に関わらず、すべり率が増加すると接線力係数も比例して増加する。また、接触面が平滑形状より微小凹凸がある方が接線力係数は小さく、特に微小凹凸が高い条件ほど接線力係数が小さい傾向が認められる(例えば、J・K)。これは接触面のせん断剛性の違いが接線力係数の差として表れたと考えられる。回転実験中に試験片の接触面形状を厳密に測定できれば両者の関係が理解しやすいが困難なため、



(a) 車輪が W(平滑形状) の場合



(b) 車輪が C(ピッチ 1mm・高さ 50 μm) の場合

図 4 接線力係数と時間の関係

著者が提案した多点接触条件でのクリープ係数推定手法¹⁾を用いて、両者の関係を数値計算で推定する。本手法はカルカーの転がり接触理論を応用しており、各車輪形状に基づく推定値に差が生じた場合には接触面のせん断剛性の違いと判断できる。実験後に測定した車輪とレールの断面形状に基づく推定値と実験値の比較を図6に示す。数値計算による接線力係数の推定値は、平滑形状のWが最大で、微小凹凸の高さとピッチの違いにより差が認められ、それらの組合せによる接線力係数の傾向は実験結果とも良好な対応が認められる。この結果から、接触面の微小凹凸形状による接線力係数の変化は、接触面のせん断剛性の違いによるもので、高い凹凸条件の方が前後方向接線力係数は小さい傾向を示すと考えられる。

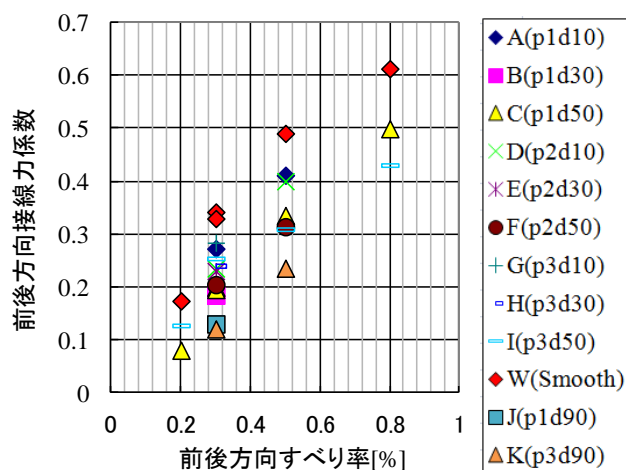


図5 前後方向接線力係数とすべり率の関係

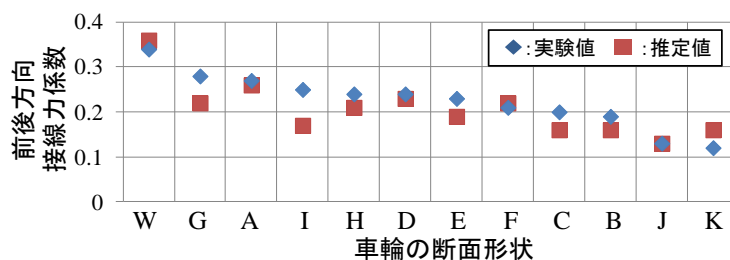


図6 実験値と推定値の比較(すべり率0.3%の場合)

3.2 アタック角がある場合

アタック角を約0.2deg.とし、回転速度を100rpmとした条件での測定結果を図7に示す。凡例は図5と同じである(一部の条件は省略)。アタック角を与えた条件で前後方向すべり率を与えると、前後と左右の2方向のクリープ力が同時に作用する。前後方向すべり率を0%とすると、前後方向接線力係数が概ね0となる一方、左右方向は最大値を示す。前後方向すべり率を大きくすると、接触面の微小凹凸形状に関わらず前後方向のクリープ力が大きくなり、左右方向のクリープ力が小さくなる特性が認められる。アタック角が0deg.の条件と同様に、接線力係数は接触面が平滑な条件が最も大きく、微小凹凸を設けると前後・左右方向ともに接線力係数が平滑条件より小さくなる。微小凹凸の高さとピッチが接線力係数に及ぼす影響について、前後方向すべり率が0.3%の条件で比較すると、左右方向接線力係数は微小凹凸の高さには明確な差がないが、ピッチが大きいほど小さい。

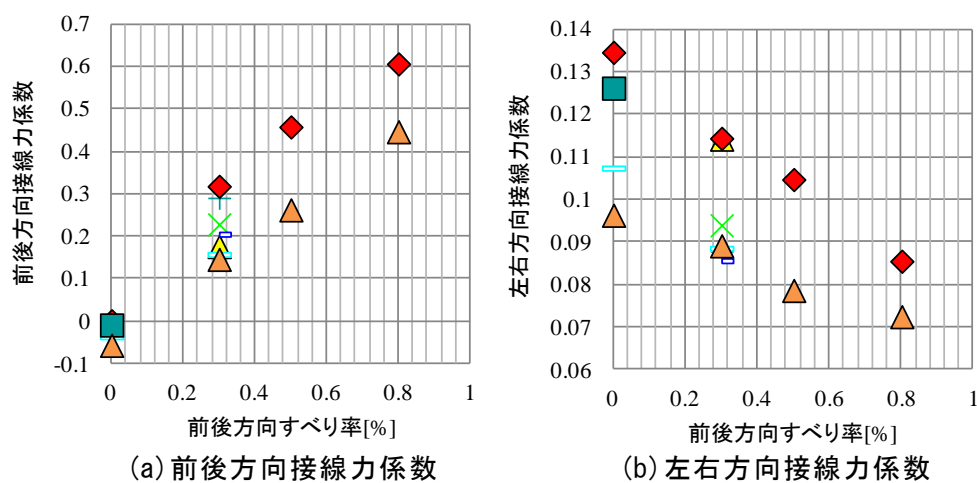


図7 前後方向・左右方向接線力係数と前後方向すべり率の関係

微小凹凸の高さには明確な差がないが、ピッチが大きいほど小さい。左右方向接線力係数

は、次元は異なるが、横クリープ係数(左右方向クリープ力 = 横クリープ係数 × アタック角 = 左右方向接線力係数 × 荷重)で考えることができ、それぞれの接触点のアタック角は同じなので、多点接触条件での横クリープ係数は総和で求まる。すなわち、接触面に微小凹凸があり、その接触点の数が少ない方が左右方向接線力係数は小さいことになり、図 7(b)の実験結果とも符合する。

4. 車輪踏面の微小凹凸と車両の走行安定性の関係

車輪踏面の微小凹凸が車両の走行安定性に及ぼす影響を数値計算で検討する。数値モデルは通勤形車両を想定した 25 自由度 1 車両モデルとした。入力波は片振幅 3mm の蛇行動波長を有する正弦波 3 波とし、走行速度を 5km/h 刻みで向上させながら輪軸の過渡応答の収束性を確認した。車輪踏面は JR 在来線修正円弧踏面を対象に、表面に異なる高さおよびピッチの山型の微小凹凸を設けた形状と平滑形状を比較した。接触面形状の計算結果(図 8 上)から多点接触条件でのクリープ係数推定手法¹⁾を用いてクリープ係数を算出し、前述の数値解析から蛇行動限界速度を計算した(図 8 下)。平滑形状の場合は 215km/h であるが、微小凹凸のピッチと高さが小さいほど蛇行動限界速度が高い傾向が認められる。これは微小凹凸を設けた条件での接触面形状が平滑条件での形状と異なるためで、この形状に基づく横クリープ係数が平滑形状の条件より大きいためと考えられる。この点について図 9 で具体的に説明する。黄丸は平滑形状の条件での接触面形状から横クリープ係数を算出した値、赤丸はピッチ 2mm・高さ 5 μ m の条件で同様に算出した値で、多点接触条件のため複数存在する。この条件で、赤丸の横クリープ係数の総和と黄丸の値を比較すると赤丸の総和の方が大きくなる。すなわち、各接触領域(接触楕円)に対応する長径短径比とポアソン比に応じた横クリープ係数の総和が、平滑形状の場合の 1 個の接触楕円から同様に求まる横クリープ係数より大きい場合、蛇行動限界速度が向上すると考えられる。

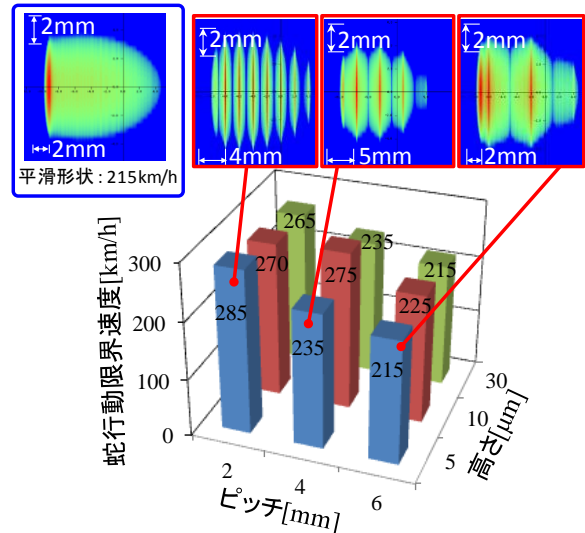


図 8 接触面形状と蛇行動限界速度

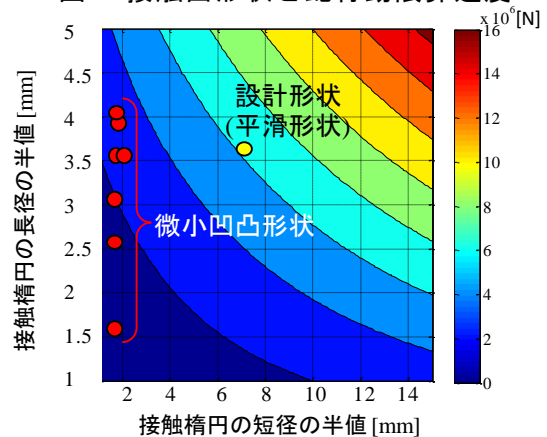


図 9 接触面形状と横クリープ係数

5. おわりに

本稿では、車輪踏面の微小凹凸がクリープ力低減効果を持つことをクリープ力測定実験結果に基づき紹介するとともに、この結果を上手に活用する事で、車両の蛇行動限界速度を向上できる可能性があることを数値計算で示した。今後は、実車両を用いた走行試験により、微小凹凸による走行安定性向上効果の検証、および車両の運動特性を向上させる手法の開発を行う計画である。

参考文献

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, 2011