

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

車輪踏面の微小な凹凸で 曲線横圧の低減を図る

車輪とレール間の摩擦係数は、特定の条件で大きくなることが知られていますが、詳しいことはわかっていません。車両が曲線を走行する際に作用する横圧（車輪がレールを左右方向に押す力）は、この摩擦係数の影響を大きく受けます。このため、走行安全性をさらに向上するには、横圧を小さくすることと摩擦係数の増加に影響されにくくすることが有効となります。ここでは、著者が提案している、微小凹凸を車輪踏面の反フランジ側に設けることで横圧を低減させる手法について紹介します。

車輪踏面の重要性

鉄道車両の輪軸は、車輪のレールと接する部分（車輪踏面）に付けられた勾配により左右の車輪間に直径の差（車輪径差）が生じて復元力が作用するため、舵を切らなくてもレールに追従して転走することができます。他方、この復元力は高速走行安定性を下げるため、台車構成や輪軸を支持するばね定数などを適切に決めて、営業速度域で問題とならない範囲で曲がり易さと走行安定性を両立（妥協）させています。このため、小半径の曲線では輪軸の車輪径差が不足する傾向となり、

レールを外側に押し倒そうとする方向に大きな横圧が作用し、車輪フランジやレールが摩耗しやすい傾向があります。横圧を小さくするために、車輪踏面に設けられた勾配を大きくする方法や、輪軸を強制的に曲線方向に動かす機構を台車に設けて横圧を小さくする方法（輪軸操舵）などが考案され、一部の鉄道会社で実用化されています。これらの手法は有効ですが、安易に導入できない課題もあります。例えば、車輪踏面形状の変更は車両の運動性能を向上させるためには有効ですが、保安設備で考えると、車輪とレール間の



山本 大輔
Daisuke Yamamoto
車両構造技術研究部
車両振動研究室
副主任研究員
【専門分野】 車両運動力学、車輪・レール接触力学

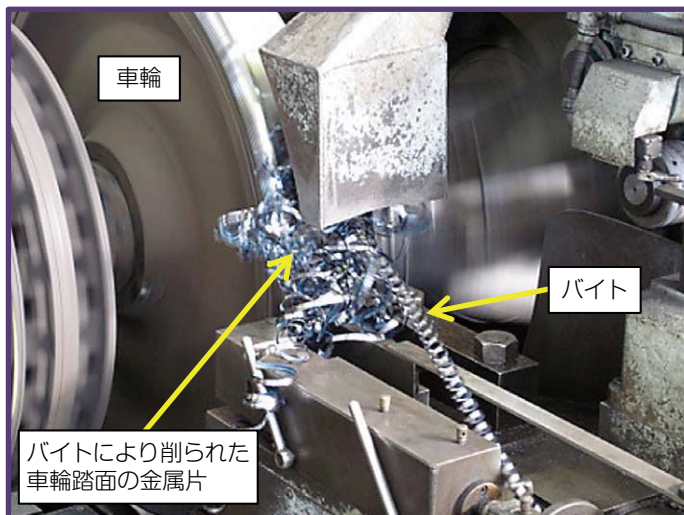


図1 車輪削正作業の風景

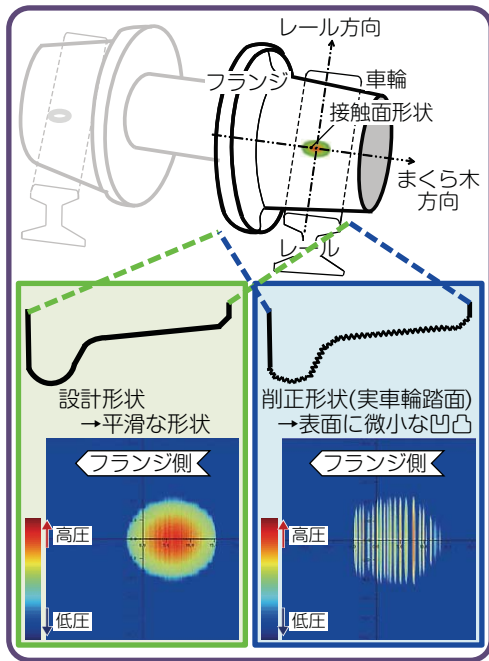


図2 車輪踏面と車輪とレール間の接触面形状

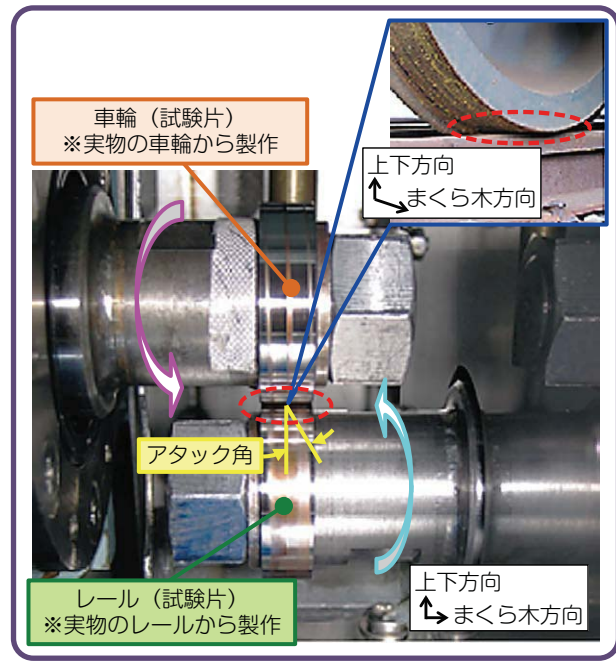


図3 接線力測定実験の概況

接触位置が変わるので軌道回路の短絡不良を誘発し、信号や踏切が動作しなくなる可能性があります。また、輪軸操舵機構を有する台車の導入は初期開発コストやメンテナンスコストの増加が考えられ、車両の軽量化にも不利となるなど、一長一短があります。

ここで発想を変えてみます。新たな装置の開発は他に譲ることとし、ここでは現状の台車構成や保守設備を極力変えずに不足する性能を補うことを考えます。例えば、曲線走行時に車輪とレール間に作用する横圧について考えます。横圧は車輪とレール間の接線力(微小すべり領域ではクリープ力とも言う)に関係する力で、走行安全性に多大な影響を及ぼします。また、接線力は車輪とレールの接触面の摩擦係数の増加により大きくなる特性があります。一方、摩擦係数については、車両の繰り返し走行や外気の相対湿度が低い条件で増加する傾向があることは知られていますが、増減するメカニズムについては詳しいことは分かっていません。このように特性が良く分からない摩擦係数により変動する横圧を、安価にしかも

確実に制御することは困難なため、走行安全性をさらに向上するには、接線力を小さくすること、横圧が摩擦係数の増加に影響されにくくすることが有効となります。著者らは、これまで車輪とレール間の接触面形状に着目した接線力特性の調査を行っており、接触面に微小な凹凸を設けることで、平滑形状より接線力を小さくできること、特に、接触面間の摩擦係数が大きい条件で効果的であることを報告¹⁾しました。

ここでは、車輪踏面に微小凹凸を設けることで曲線走行時の横圧を低減させる応用方法について紹介します。

車輪とレール間の接触面形状

車輪踏面とレール頭頂面の設計形状(平滑な形状)は、複数の円弧や直線で構成されています。このため、車輪とレールの断面形状を用いて接触面形状を計算で求めると、接触点が一定曲率の範囲であれば1個の楕円形状になることが知られています(図2左)。しかし、実際の車輪踏面には、車輪削正(図1)で生じる切削痕や摩耗などにより、表面に微小な凹凸が存在しま

す。この微小凹凸がある車輪踏面形状を用いて車輪とレール間の接触面形状を計算で求めると、外形寸法は設計形状の場合と同等になりますが、複数個の接触点が集合した形態となり、設計形状とは明らかに違う形状になることが、著者の研究で分かりました(図2右)。これまでの研究では、接触面形状が違っていても、接触面積には僅かな違いしかないので、ここに作用する接線力には大差がないと考える人が多く、車輪踏面の微小凹凸に着目して接線力特性を調査する研究は見られませんでした。

接触面形状に着目した接線力特性

車輪削正で生じる程度の大きさの微小凹凸が、車輪とレール間の接線力特性に及ぼす影響について、車輪とレールを模擬した直径30mmの小型円筒試験片を使って接線力特性の調査をしました(図3)。実際の車輪直径は860mm程度なので、小型円筒試験片の接触面形状の大きさは実際の車輪とレール間の接触面形状の大きさとは異

なりますが、ここで知りたいのは接触面の微小凹凸の有無が接線力特性に及ぼす影響なので、この条件で検討しました。接触面が平滑な時と微小凹凸がある時の接線力係数の特性を図4に示します。赤線が車輪の接触面が平滑な場合、青線と紫線は微小凹凸の高さが同じですが、山と山の間隔が異なる場合です。それぞれの接触面形状を、線と同色の丸内に示します。

接触面が平滑な時(赤線)は、前後・左右方向ともに接線力係数が最も大きいことが分かります。接触面に微小凹凸を設けると、接触面形状が赤丸のようにきれいな1個の楕円形状から、青丸や紫丸のように複数の楕円形状が集合した形態に変わるため、接線力係数は前後・左右方向ともに平滑形状より小さくなります。また、接線力特性はすべり率が大きくなると、一定の値に近づく(飽和する)ことが分かります。この一定値は、接触面の摩擦係数に一致することが知られています。興味深いのは、青線と紫線の左右方向の接線力係数が異なることで、接触面形状と接触点の数の違いが差となって表れています。この結果から、接触点を少なくするように微小凹凸形状を設けると、接線力係数を低減することができ、特に、接触面の摩擦係数が大きい条件ほど効果が増すことが分かりました。また、同じ高さの微小凹凸でも山と山の間隔によって接線力係数が変わるため、接線力を小さくすることを考えた場合、山と山の間隔を大きくすれば効果が増すことが分かりました。

ここで、図4の接線力係数は接線力を荷重で割った値です。接線力とすべり率の関係における勾配部分の傾きは、車両運動力学ではクリープ係数(☞参照)と呼ばれ、車両の運動性能を評価する際に重要な要素となります。車両が曲線を走行する際、横ク

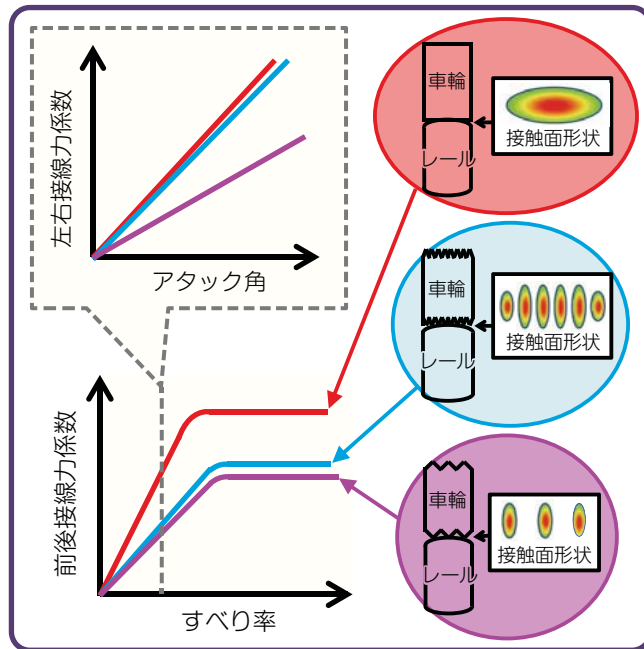


図4 接触面形状と接線力特性の関係

リブ係数が小さいほど横圧が低減して走行安全性が向上することが知られています。このため、車輪踏面に微小凹凸を適切な形で設けることで接線力を低減できると期待されます。さらに、後述するように、微小凹凸による接線力特性変化は走行安全性をさらに向上させるために必要となる摩擦係数に影響されにくい特性を持っているため、実車輪に上手に利用すれば走行性能を向上できる可能性があります。

微小凹凸で車輪とレール間の接線力特性を意図的に変える

(1) 実車両の車輪とレール間の特性

鉄道車両は速度や軌道の曲がり、傾き、ねじれ具合、車輪とレールの断面形状の違いなどにより、車輪とレール間の接線力特性が変わります。例えば、軌道カントの大きい曲線を均衡速度(☞参照)以下の速度で走行すると車体が曲線内側に傾くため、曲線内側(内軌側)の輪重が曲線外側(外軌側)より

大きくなります。ここで、左右の車輪とレール間の摩擦係数が同じと仮定すると、車輪とレール間の接線力は内軌側の方が大きくなり、左右方向の接線力は輪軸を外軌側に押し出す方向に作用するため、曲線に追従するための輪軸の旋回力を低下させ、横圧を大きくします。この時、内軌側の車輪とレール間に作用する左右方向の接線力を小さくできれば、横圧が低減して走行安全性が向上することになります。

(2) 微小凹凸による横圧低減手法

車輪踏面形状を変更せずに、接線力低減効果を車輪踏面に付加して走行性能を高めることを考えます。鉄道車両の車輪/レールの接触位置は、自動車のタイヤ/路面とは異なり、直線と曲線で接触位置が変化する特徴を持っています。この特徴に着目し、車輪踏面の曲線を走行する時に接触する位置に微小凹凸を設けます。こうすることで、直線では走行安定性をこれまで通りの特性とし、曲線を走行する時だけ、

☞ クリープ係数

接線力とすべり率の関係で、微小なすべり率の範囲での勾配の大きさ(比例係数)のことで、車両の運動特性に大きな影響を与えることが知られています。

☞ 均衡速度

曲線中を走行する車両に作用する超過遠心加速度がゼロになる走行速度のことで、カント、軌間、曲線半径から計算されます。

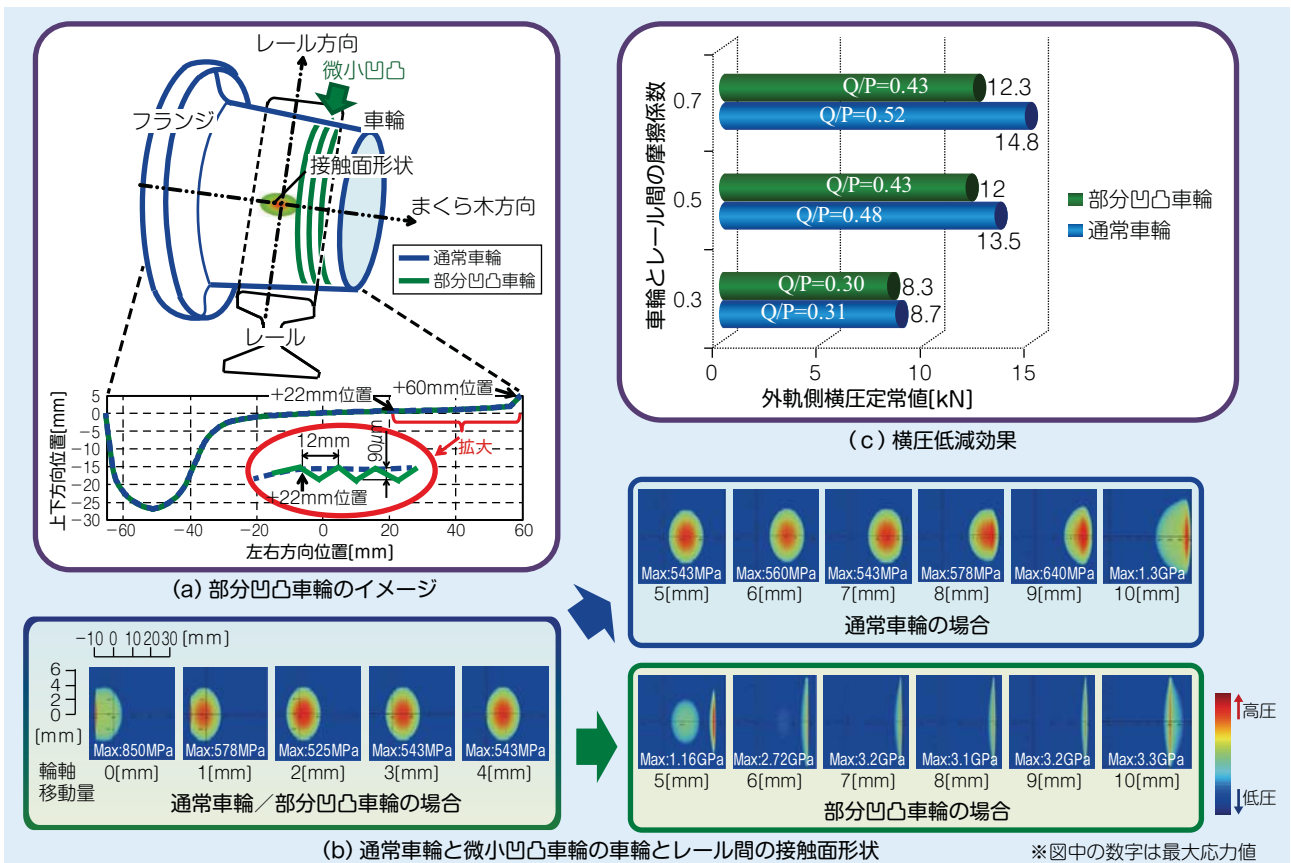


図5 通常車輪と部分凹凸車輪の比較

車輪とレール間に作用する接線力特性を変えることができます。ここでは、**図5 (a)** に示す、JRで主に使用している踏面形状に高さ90 μ m、間隔12mmの山型の微小凹凸を設けた車輪踏面形状を提案します²⁾。フランジの反対側にある緑線部が微小凹凸（以下、部分凹凸車輪）で、この部分のみ通常の踏面形状（青線：以下、通常車輪）より表に出っ張った形状になっています。また、輪軸が左側に10mm動いた時の内軌側の接触面形状を1mm刻みで計算した結果を**図5 (b)** に示します。

通常車輪の場合は、輪軸が動いても接触面形状は楕円形状であることが分かります。しかし、部分凹凸車輪は、輪軸が5mm以上動くと車輪踏面の微小凹凸の凸部がレールと接触するため、通常車輪の接触面形状より細長くなります。この接触面形状は、**図4**で示した特性と同様に接線力が小さくなるため、通常車輪より横圧が低減すると考えられます。

(3) 数値計算による効果の検証

微小凹凸による横圧低減効果を数値計算で確認しました。**図5 (c)** は、在来線の通勤型車両が、半径300mの曲線を10km/hで走行した時の外軌側の横圧定常値と脱線係数Q/P（**表3**参照）の計算結果です。車輪とレール間の摩擦係数が0.3の場合、通常車輪と部分凹凸車輪で大差はありません。しかし、摩擦係数が増加すると、両者の差が大きくなり、部分凹凸車輪は外軌側の横圧と脱線係数Q/Pの低減効果が増しています。

この結果から、部分凹凸車輪の横圧低減効果と走行安全性向上効果、および摩擦係数に影響されにくい特性が数値計算で確認できました。

脱線係数 Q/P

横圧 Q を輪重 P で割った値のことで、限界値以上になると脱線する可能性があるかと判断することができます。

おわりに

車輪削正で生じる程度の微小な凹凸でも、車輪踏面の反フランジ側に適切な形状で設けると、車輪とレール間の接線力特性を摩擦係数の影響を受けにくい特性に変えることができ、曲線走行時の横圧を低減できる可能性があることを紹介しました。本手法は車輪削正後の乗り上がり脱線防止対策に有効と考えられるため、今後は実用化に結び付けられるよう研究の深度化に取り組む計画です。**RRR**

文献

- 1) 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，日本機械学会論文集C編，Vol.77，No.781，pp.3211-3222，2011.5
- 2) 山本大輔：微小凹凸を有する車輪踏面による曲線通過性能向上に関する数値解析，鉄道総研報告，Vol.26，No.3，pp.35-40，2012.3