

鉄道一般
車 両
施 設
電 気
運転・輸送
防 災
環 境
人間科学
浮上式鉄道

車輪踏面が摩耗する原因を探る

車輪の踏面には走行中にさまざまな損傷や摩耗が発生し、場合によっては踏面が凹むように摩耗する場合があります。こうした踏面の形状変化がおこると、走行安定性や乗り心地が悪化します。これを防ぐためには、踏面を切削して踏面形状を元に戻す必要があり、メンテナンス費用がかかります。このような踏面形状の変化には、ブレーキ時の車輪の温度が大きく影響しています。ここでは、車輪の温度と車輪摩耗の関係について解説します。



半田 和行
Kazuyuki Handa
材料技術研究部
摩擦材料研究室
主任研究員
【専門分野】車輪・ブレーキ系材料、金属材料

車輪踏面形状の管理

鉄道車輪(図1)が受ける負荷を模式的に図2に示します。車輪は車両の重量を支えながらレール上を回転し、レールから車輪が落下しないようフランジが案内します。さらに駆動力やブレーキ力なども車輪を経て車両からレールに伝えられます。こうした走行にともなう負荷によって車輪にはさまざまな損傷や摩耗が発生します。使用中に車輪の踏面に発生する代表的な損傷を図3に示します。

このうち踏面凹摩耗は、図4に示すように車輪踏面が凹むように摩耗する現象です。

車輪踏面には傾き(踏面勾配)がつけられており(図5)、カーブ区間では内側車輪のレール接触部の半径が小さく外側車輪の半径が大きくなるため、鉄道車両は外から操作しなくてもカーブの方向に曲がっていくことができます(自己操舵性)。しかしこの傾きが大きいと、直線区間で輪軸がレールに対して左右にくねるように揺動し特定の速度で振動が増幅する、蛇行動とよばれる現象がより低い速度で発生してしまいます。このため車輪の踏面形状は、直線区間を高速で安定して走行できるとともに曲線区間をスムーズに通過できるという相反する特性が求めら

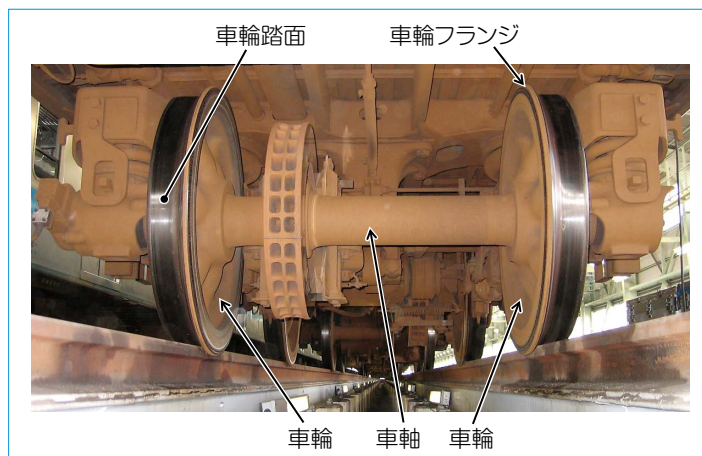


図1 鉄道車輪の外観と名称

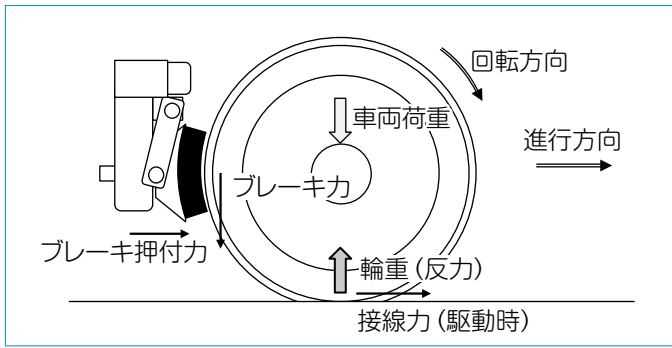


図2 車輪が受ける負荷の種類

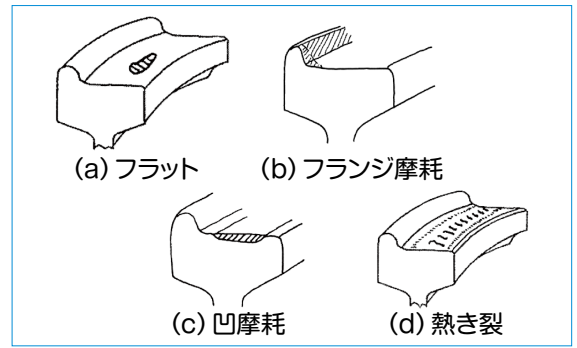


図3 車輪使用中に発生する代表的な踏面損傷

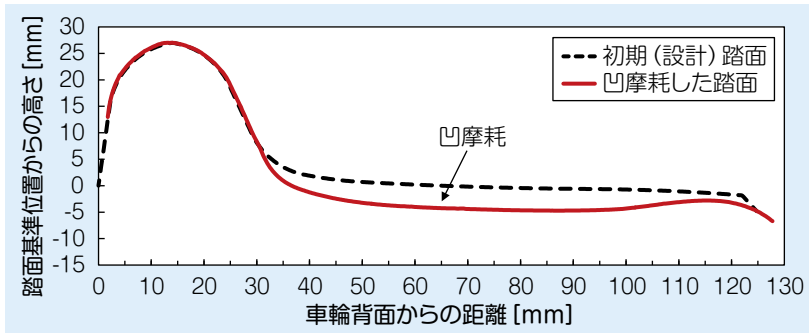


図4 車輪踏面の凹摩耗の例

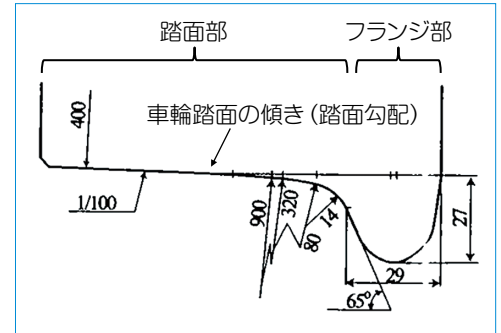


図5 車輪踏面形状の例

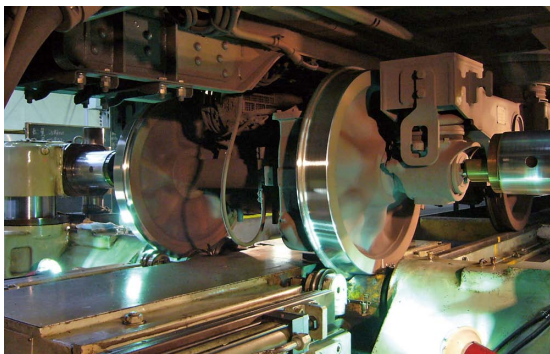


図6 在姿(車両の状態で行う)車輪削正の例

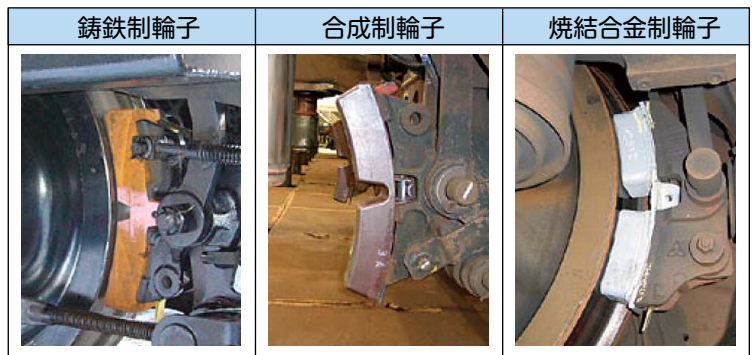


図7 踏面制輪子の種類と外観の例

れ、両者の微妙なバランスのもとに設定されています¹⁾。

踏面凹摩耗が発生すると、摩耗量がわずかであってもこうした踏面形状のバランスを崩す場合があります。車輪踏面に損傷や摩耗が発生した場合には本来の形状に戻すための機械加工(車輪削正)が行われます(図6)。摩耗が多く頻繁な車輪削正が必要な場合には、車輪の交換寿命が短くなるほか、車輪削正中はその編成が運用できないため稼働率が低下するなど、鉄道事業者にとって大きな負担となります。

踏面制輪子と踏面の摩耗

踏面凹摩耗は、踏面制輪子(☞参照)が使われる車両で発生することから、踏面制輪子が車輪を摩擦することによる摩耗と考えられてきました。しかし、台上試験で車輪と制輪子を摩擦しても車輪踏面にはほとんど摩耗が生じない

など、正確な原因は理解されていませんでした。

一方、車輪踏面損傷の中でも大きな課題である踏面熱き裂(図8)については、車輪と制輪子の摩擦による熱だけでなく、車輪とレールとのころがり接触が原因であることがわかりました²⁾。

☞ 踏面制輪子の種類

鉄道車両の機械ブレーキは、車輪踏面に制輪子を押つける踏面ブレーキと、車輪とは別のブレーキディスクを用いるディスクブレーキに大別されます。

踏面制輪子には大きく分けて、铸铁製の铸铁制輪子、フェノール樹脂を主成分とする合成制輪子、粉末金属の焼結でつくられた焼結合金制輪子の3種類の材質があり、各々の特性に応じて使い分けられています(図7)。



図8 車輪踏面熱き裂の例

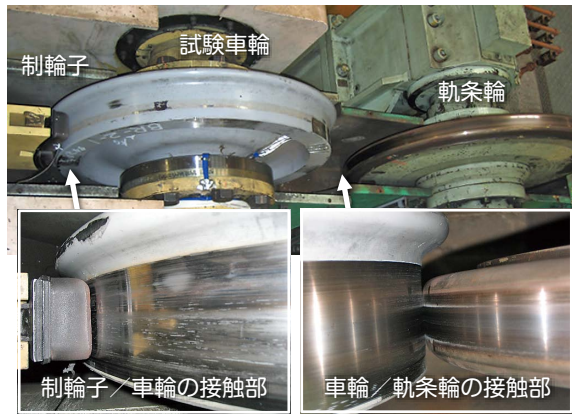


図9 軌条輪によるレールとの接触を模擬できるブレーキ試験装置

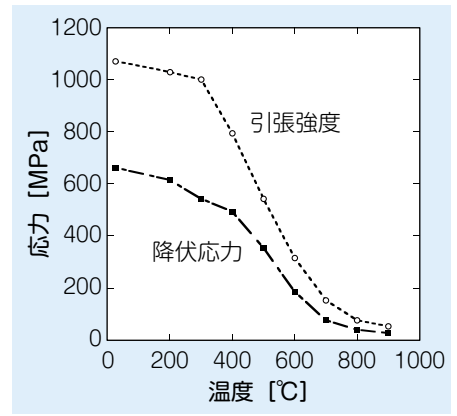


図10 車輪鋼の強度の温度依存性

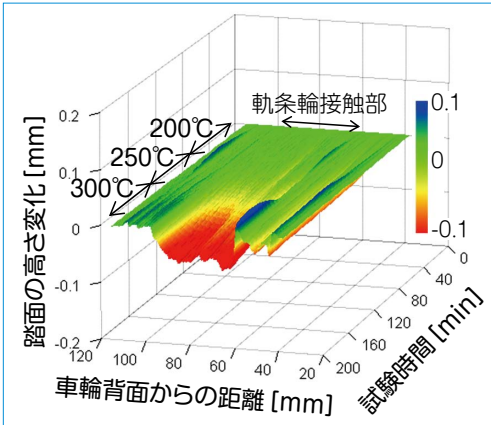


図11 車輪温度の違いによる踏面の摩耗の推移

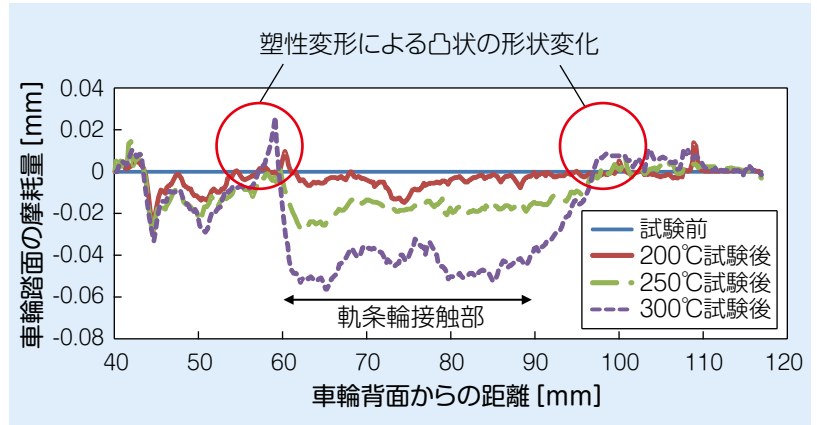


図12 転動試験後の踏面形状の変化

この検討を行う中で、車輪と制輪子に加えてレールの車輪に対する接触を模擬する軌条輪を用いた台上試験を行いました(図9)が、その際、踏面上で制輪子のみが接触する部分ではほとんど摩耗が生じないのに対し、制輪子と軌条輪が接触する部分では摩耗が生じていることがわかりました。これにより、凹摩耗は制輪子の摩擦による摩耗ではなく踏面ブレーキによって温度が上昇

した車輪踏面がレールを転動する際の塑性変形(図12参照)が影響していることがわかりました。

車輪踏面のころがり接触による摩耗の温度依存性

車輪は炭素量が0.6~0.75%の炭素鋼でつくられており、鋼材の中では硬く強度が高いものです。しかしながら、鋼材をふくむ金属材料の強度は温度が

上がると低下します(図10参照)。車輪鋼の強度の温度による変化を図10に示します。温度が上昇すると強度が低下することがわかります。

そこで、温度が凹摩耗に与える影響を確かめるため、踏面制輪子を使用して車輪を設定温度に保持しながら一定時間軌条輪を転動させる試験を行いました。その結果、保持温度を上げるにつれて軌条輪が接触する部分で摩耗が進行することがわかりました(図11)。さらに、踏面形状の変化をみると、軌条輪が接触して摩耗している部分の両側で凸状の盛り上がりが生じており、踏面の摩耗が塑性変形で起きていることが確かめられました(図12)。

試験で摩耗した体積を、制輪子接触幅全体で凹摩耗が発生すると仮定し、走行距離あたりの摩耗寸法に換算すると、車輪温度ごとの走行距離あたりの踏面摩耗率がわかります。この条件で

塑性変形による摩耗

一般的に、ころがり接触する表面の主たる摩耗機構は疲労損傷による疲労摩耗とされています⁴⁾。疲労とは弾性域内での繰り返し負荷による材料の破壊です。温度上昇した車輪踏面では塑性変形が発生していることから、疲労摩耗の寄与は小さく踏面の形状変化の主因は塑性変形と考えられます。

金属の強度の温度による変化

金属の変形は転位とよばれる結晶中の原子の配列が乱れた部分が移動することによって生じ、転位の移動は、温度に応じて振動している金属原子に外力が加わることで周囲の動きにくさ(ポテンシャルの山)を乗り越えることで起こります。このため、温度が上昇すると変形が容易になり強度が低下します。こうした、熱振動の助けをかりて状態が変化する過程を熱活性化過程とよびます。

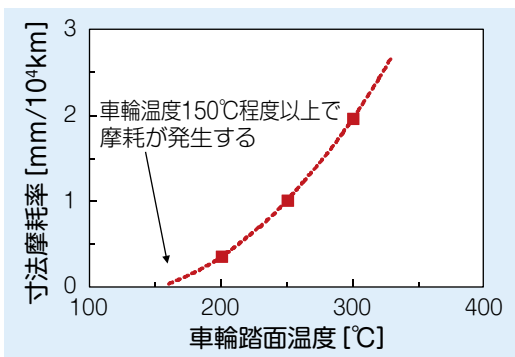


図13 転がり接触による踏面の摩耗率の温度依存性の例

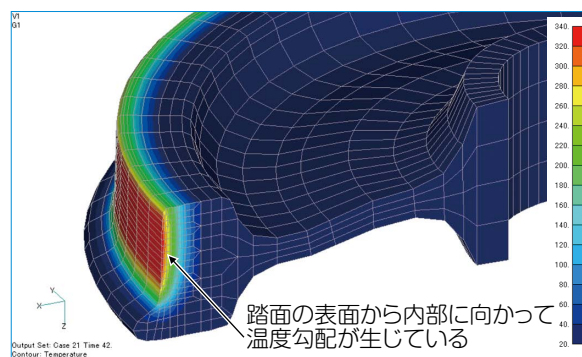


図14 踏面ブレーキ中の車輪内部の温度分布の計算例

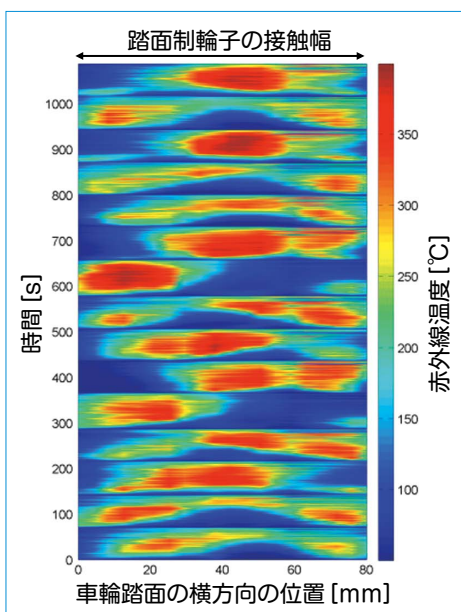


図15 踏面ブレーキ作用ごとに制輪子と車輪の接触が変化する様子の例

は表面で発生し、内部に向かって温度勾配が生じます(図14)。また制輪子と踏面は、見かけ上の接触面の一部でしか接触せず、さらにこの接触部は時間とともに変化します(図15³⁾)。これは、局所的な熱膨張と接触圧分布のゆらぎが起こるためで、こうした現象を熱弾性不安定とよびます(☞参照)。このため、踏面表面の温度は10mm内部の温度よりもはるかに高くなります。

おわりに

車輪踏面が摩耗する原因について、踏面ブレーキによって温度が上昇した際の塑性変形という観点から検討例のいくつかを紹介しました。ここでは割愛しましたが実車の車輪では、制輪子の摩擦面に車輪の摩耗片が埋め込まれ、踏面を摩擦し続けることで踏面を切削してしまう現象も踏面凹摩耗に大きな影響を与えることがわかっています。

踏面ブレーキは、車輪踏面の温度を上昇させることからさまざまな現象を引き起こしますが、経済性やメンテナンス性、踏面清掃機能などを総合的に考慮すると在来線車両に最適な選択であることは今後も不変と考えられます。車輪/制輪子の接触にまつわる現象には未解明な部分も多く、さらなる取り組みが求められています。RRR

は、車輪の摩耗は150°C程度以上で発生し温度が上昇すると摩耗率が増えることがわかります(図13)。

車輪踏面の温度について

車輪温度が摩耗に及ぼす影響をみてきましたが、車輪の温度とはどの部分の温度なのでしょう。踏面制輪子のJIS規格では、車輪温度は踏面の表面から10mm下の内部で測定した温度で、上記の試験でもこれを用いています。一方、踏面ブレーキによる摩擦熱

制輪子の種類によって、凹摩耗の発生しやすさに差があることが知られています。これは制輪子が(温度が上がっても)硬く、熱弾性不安定を起こしやすい材質の場合には踏面の局所的な温度上昇が大きいと考えられます。このように、制輪子と車輪踏面の接触の状況を把握することで、踏面摩耗を抑制できる制輪子の材質や、車両の走行条件に対して摩耗を一定の範囲に押さえる踏面ブレーキの使い方を導き出すことができます。

☞熱弾性不安定

摩擦材と回転体は全面均一には接触せず、接触面圧のゆらぎが不均一な熱膨張を起こしてゆらぎを拡大させ、結果的に一部の領域のみで接触する現象を熱弾性不安定とよびます。ブレーキディスクに発生するヒートスポットはその典型例です。車輪/制輪子の場合、接触領域はブレーキ動作ごとに変化します。

文献

- 1) 佐藤栄作：車輪踏面形状を科学する、RRR, Vol.56, No.10, pp.12-15, 1999
- 2) 半田和行, 牧野一成, 西森久宜, 小原孝則, 宮内瞳岨, 柿嶋秀史：車輪踏面熱き裂の実験的再現と生成条件, 鉄道総研報告, Vol.24, No.8, pp.35-40, 2010
- 3) Sara Caprioli, Tore Vernersson, Kazuyuki Handa, Katsuyoshi Ikeuchi：Thermal cracking of railway wheels：Towards experimental validation, Tribology International, Vol.94, pp.409-420, 2016
- 4) 長谷亜蘭：トライボロジーの基礎, 精密工学会誌, Vol.81, No.7, pp.643-647, 2015