

# 踏面ブレーキ車輪における 車輪踏面の形状変化メカニズム

半田 和行\* 池内 健義\* 嗟峨 信一\*\*

## Mechanisms of Hollow Wear of Tread Braked Wheels

Kazuyuki HANDA Katsuyoshi IKEUCHI Shinichi SAGA

Root cause and mechanism of development of hollow wear of tread braked wheels were investigated using a full-scale wheel/rail/block brake performance tester. RTRI has already reported that softening of the tread surface due to temperature rise during the tread braking plays a major role in the development of the hollow wear of the tread braked wheels. However its development conditions have been left unclear due to complicated temperature change during braking and difficulties in defining it. Dynamometer experiments employing the rolling contact under the constant tread temperature has revealed the temperature dependence of the tread wear rate of tread braked wheels. Furthermore, methodologies to identify tread temperature, which is defined as inner temperature and thus cannot heretofore be measured in actual vehicle, applicable to actual vehicle have been proposed.

キーワード：車輪，制輪子，摩耗，温度，塑性変形，踏面ブレーキ

### 1. はじめに

車輪踏面には使用中に各種の損傷や摩耗が発生することから、これらが安全・安定な輸送業務に支障しないよう車輪削正が行われている。車輪削正により踏面の損傷は除去され、踏面形状は初期（設計）形状に回復される。

一方、車輪の削正しは有限であり車輪削正によって車輪径が限界まで減少した車輪は新品に交換される。また同一車両等における輪径差に限度値が定められており、1車輪の損傷や摩耗による車輪削正であっても通常1車両8車輪が同時に削正される。こうしたことから車輪の削正は、車輪購入費に加えて車両稼働率の低下や作業自体に伴う多大なコストを伴う。さらに近年では車輪を含む機器類の最適な検査周期に基づいて車両の検査周期や検査内容を設定できる<sup>1)</sup>ことから、車輪削正とその結果としての車輪寿命は車両メンテナンス体系全体に大きな影響を与える。

車輪踏面の損傷や摩耗に対する系統的な対策法を確立し、車輪寿命を的確に管理するには、それらの発生原因とメカニズムが正確に理解されることが不可欠である。鉄道総研ではこれまでに、踏面ブレーキ車両における車輪管理上の大きな課題である踏面熱き裂について、実物大台上試験・数値解析および材料分析を組み合わせた手法によりその発生メカニズムを解明し、対策策定に資する知見を提供してきた<sup>2)</sup>。

踏面熱き裂と並び、踏面ブレーキ車両の車輪管理上の課題として踏面中央部の摩耗、いわゆる踏面凹摩耗があげられる。これは車輪踏面の横断面形状（踏面形状）が凹状に形状変化する現象（図1）であり、等価踏面勾配の変化による車両走行安定性への悪影響やフランジ寸法の増大による寸法基準への抵触をもたらす可能性がある。この現象は、踏面ブレーキ使用車両の一部で観察されることから、これまで踏面制輪子（以後「制輪子」と記す）の摩擦による車輪踏面の摩耗であると認識され、制輪子/車輪の摩擦試験において車輪の摩耗量が小さくなる制輪子材料を適用する等の対策が行われた事例もあるが、必ずしも期待された成果を収めていない。

以上を背景として本報告では、踏面の凹状の形状変化（以後、凹摩耗と記す）の系統的な対策策定に資するため、台上試験によりその発生原因・発生メカニズム・発生条件を探求するとともに、実車における車輪使用状況や摩耗原因をより正確に把握する手法について検討した結果を報告する。

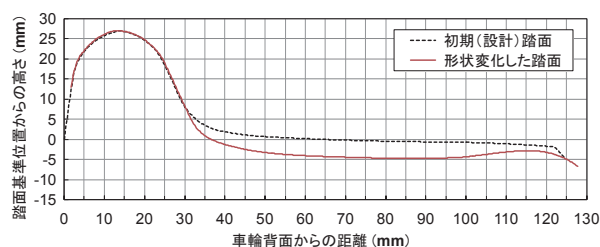


図1 踏面ブレーキ車両で見られた踏面形状変化の例

\* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

\*\* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

## 特集：材料技術

## 2. 踏面の凹摩耗に関する現在までの知見

過去に鉄道総研が実施した実物大台上試験において、車輪と制輪子に加えて車輪とレールの転動接触を模擬する軌条輪を用い、輪重に相当する車輪／軌条輪接触荷重を負荷して繰返し停止ブレーキ試験を実施したところ、車輪に対して制輪子のみが摩擦接触する領域では踏面の凹摩耗が見られないのに対して、制輪子による摩擦接触に加えて軌条輪による転動接触をうける部位ではブレーキ負荷回数の増大に応じて踏面の凹摩耗が進行することが確認されている<sup>3) 4)</sup>。

こうした条件下での車輪踏面の硬さは、制輪子のみが摩擦接触する領域では初期値に対して減少するのに対して、制輪子による摩擦接触に加えて軌条輪による転動接触をうける部位では硬さが増加する。これは摩擦熱と転動接触の両方を受ける部位において、400～600℃程度の温度範囲で急激な塑性変形が加えられた場合に生じる金属組織の変化（連続再結晶組織）によるものであることが見いだされている<sup>5) 6)</sup>。

一方実車において、踏面ブレーキが用いられない新幹線車両では、輪重が在来線車両と比較して大きいにもかかわらず踏面の凹摩耗はごく軽微であることが報告されている<sup>7)</sup>。

これらのことから、踏面の凹摩耗は、制輪子による摩擦ではなく、制輪子によって加熱された車輪踏面がレールと転動接触することに伴う塑性変形がその主たる原因であるとの知見が得られている<sup>3)</sup>。

また、鉄道総研では海外研究機関との共同研究を通じ国内車輪よりも炭素量が低く踏面の初期硬さが低い欧州規格（EN）ER7車輪を入手し、欧州での供用条件に合わせより大きな輪重を設定してこれらに準ずる試験に供したところ、従来からの知見<sup>3) 4) 5)</sup>の妥当性を裏付ける踏面摩耗の進展や踏面硬さの変化が観察された<sup>8)</sup>。

このように、踏面凹摩耗の定性的な発生要因については理解されているものの、車輪踏面の温度条件と踏面凹摩耗の関係や、凹摩耗が発生する条件下での走行距離に対する寸法変化の進行の度合いなど、実車の凹摩耗の診断や対策に活用できる定量的な知見は得られていない。また、同一車両内で明らかに踏面凹摩耗の進展に差がある場合など、上記のメカニズムでは説明できない場合があり、複数の踏面凹摩耗のメカニズムについて分別して把握する手法が求められている。

## 3. 踏面の形状変化に関する実験的検討

踏面ブレーキ車両における車輪踏面形状変化の発生条件を定量的に把握するため、各種条件下で踏面形状変化の再現試験を実施した。まず実車で凹摩耗が発生してい

る車種についてその運転条件をパターン化し、繰返し試験を行った。この車種は踏面ブレーキ方式の気動車で、機関ブレーキ等は通常使用されていないことから、全てのブレーキ負荷を踏面ブレーキによって模擬した。

## 3.1 実車の走行パターンを模擬した台上試験

## (1) 試験方法

踏面凹摩耗の再現試験には、車輪に対する制輪子とレールの接触を同時に模擬できる特殊な試験装置が必要ことから、鉄道総研所有のブレーキ性能試験機粘着測定ユニットを使用した。試験装置の構成を図2に示す。同試験装置は主に各種条件下での車輪／レール間の粘着係数等の測定に使用されるものである。レールを模擬する軌条輪に車輪（実体）が従動し、輪重に相当する車輪／軌条輪垂直荷重を付与できる。軌条輪軸には車両の1車輪あたりの質量に見合う慣性質量が付与され、車輪には制輪子（実体）を作用させることができる。また、車輪と軌条輪の軸方向相対位置を制御できる。



図2 ブレーキ性能試験機粘着測定ユニットの構成

この試験では、軌条輪による転動接触の下で、繰返し停止ブレーキおよび繰返し抑速ブレーキ動作を行い、試験中の踏面の形状変化を追跡した。踏面の形状変化については、軌条輪との転動接触がある部位とない部位の摩耗推移に着目して整理した。

試験装置の設定条件を表1に示す。試験では、車輪には在来線M車で一般的に使用されているφ860mmのB型車輪（SQ熱処理）を、制輪子には焼結合金制輪子MS504を用いた。各試験のブレーキ条件と繰返し回数を表2に示す。試験は繰返し停止ブレーキおよび繰返し抑速ブレーキ条件で実施した。試験条件は、輪重60kN車重48tの車両において繰返し停止ブレーキは平坦地・駅間距離約2.8kmの各駅停止パターン、繰返し抑速ブレーキは25%下り勾配・駅間距離約3.2kmの各駅停止パターンを模擬して設定したものである。各試験時の速度と制輪子押付力の推移を図3および図4に示す。試験中の踏面の形状推移と、赤外線画像装置による車輪リム面上・踏面から10mm位置の温度および埋込熱電対による踏面下10mm・車輪背面から85mm（リム面から40mm）位置の温度を計測した。

踏面形状の計測には一般的な踏面形状測定装置

表1 実車パターン模擬試験の装置設定

車輪種別	φ 860mm B 型 一体 (新品)
車輪材質	SSW-Q3S
踏面形状	修正円弧踏面
慣性モーメント	1458 kgm <sup>2</sup> (軌条輪軸) 60 kgm <sup>2</sup> (車輪軸)
車輪/軌条輪接触荷重輪重	60kN
車輪/軌条輪接触ヘルツ圧	約 780MPa
相対変位	なし
制輪子	焼結合金制輪子 MS504

表2 実車パターン模擬試験の試験条件

	繰返し停止ブレーキ	繰返し抑速ブレーキ
速度	95km/h → 停止 (ブレーキ時は動力カット)	60km/h 抑速 105 秒 → 停止 (抑速 105 秒時点で動力カット)
制輪子押付力	15kN	6kN
ブレーキ動作間隔	停止後再加速・停止 150 秒後に次回ブレーキ	停止後再加速・停止 120 秒に抑速 (105 秒) 開始
繰返し回数	20 回繰返し × 5 セット 計 100 回	10 回繰返し × 5 セット 計 50 回
車輪温度条件	20 回ごとに 60℃ 以下に冷却	10 回ごとに 60℃ 以下に冷却
備考	平坦地・駅間距離約 2.8km の各駅停車パターンを模擬	25% 下り勾配・駅間距離約 3.2km の各駅停車パターンを模擬

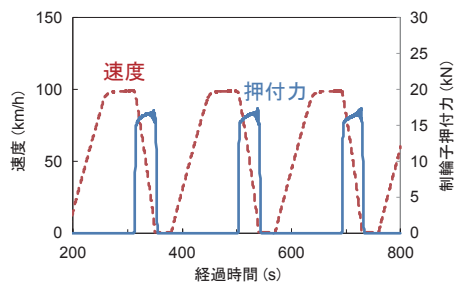


図3 繰返し停止ブレーキでの速度と制輪子押付力の推移

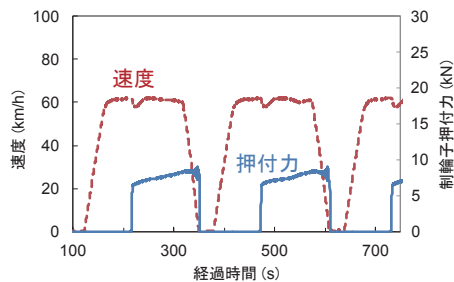


図4 繰返し抑速ブレーキでの速度と制輪子押付力の推移

(Greenwood 社製 Miniprof) を用いたが、従来の試験結果を踏まえ、寸法検出精度向上のための前処理を施して計測分解能および再現性を担保した。

(2) 試験結果

繰返し停止ブレーキおよび繰返し抑速ブレーキ試験時

の車輪踏面の制輪子接触部の踏面の形状推移を図5および図6に示す。図中の横軸(車輪背面からの距離)上にデータを示す範囲が踏面制輪子の接触範囲であり、軌条輪の接触範囲は踏面制輪子の接触範囲の中の一部である。図は奥から手前向きに試験回数の増加を示し、踏面形状の変化を試験前形状に対する高さ変化として示している。

繰返し停止ブレーキでは軌条輪接触部を含めて踏面の高さ変化は見られなかったのに対し、繰返し抑速ブレーキ試験では試験回数の増加とともに特に軌条輪接触部において踏面の形状変化が観察された。繰返し抑速ブレーキ試験での軌条輪接触部(車輪背面から 90mm ~ 100mm 位置の平均)と非接触部(同じく 50mm ~ 60mm 位置の平均)(いずれも制輪子は接触する)の形状の推移を図7に示す。制輪子のみが接触する領域では形状変化が軽微なのに対し、制輪子に加えて軌条輪が接触する領域ではブレーキ回数に対しほぼ直線的に摩耗が増加していた。

繰返し停止ブレーキ試験と繰返し抑速ブレーキ試験での摩耗進展の相違について検証するため車輪温度の推移を調べた。踏面下 10mm・車輪背面から 85mm に埋め込まれた熱電対による試験中の車輪温度の推移を図8に示す。これらの試験はいずれも、ブレーキ開始温度(ベース温度、通常 60℃)を設定してその温度まで冷却してから次回ブレーキを作用させる通常の台上ブレーキ試験と異なり、繰返しブレーキ動作の時期を実車走行パターンに基づいて設定した前回停止からの時間で規定しているため、車輪が完全に冷却される前にブレーキによる温度上昇が生じている。車輪温度は、繰返し停止ブレーキの場合約 200℃であるのに対し、繰返し抑速ブレーキの場合最高約 300℃に達している。2章で述べたとおり、踏面摩耗の主因は温度上昇時の強度低下に伴う踏面の塑性変形であることから、繰返し停止ブレーキ条件と繰返し抑速ブレーキ条件での踏面温度の違いが図5および図6に示す踏面形状推移の差をもたらしたことが考えられる。

3.2 車輪踏面温度と踏面形状変化との関係

(1) 試験方法

踏面ブレーキ時の車輪踏面温度と踏面形状変化の関係把握するため、踏面ブレーキによって車輪踏面温度を一定に保った状態で一定時間保持する定温度試験を行い、踏面の摩耗推移を検証した。試験装置設定はブレーキ開始条件を除き表1と同様とした。この試験は車輪速度を一定とする抑速ブレーキ条件であるが、車輪の熱電対温度に応じて制輪子の押付を自動で ON/OFF 制御し、車輪温度を一定の範囲内に維持したものである。

各温度での試験では、試験開始後速度 60km/h で抑速ブレーキをかけて車輪温度を上昇させ、設定温度 +5℃ となった時点で制輪子を緩解した。すると自然冷却により車輪温度は低下するため設定温度 -5℃ となった時点

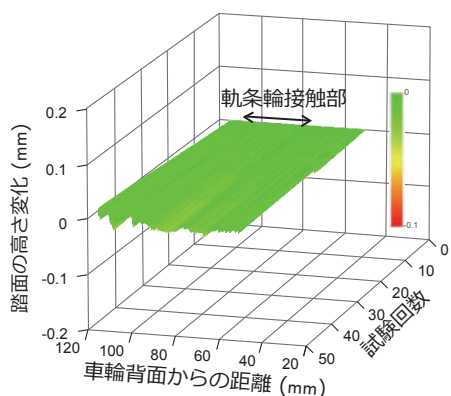


図5 繰返し停止ブレーキでの制輪子接触部の踏面の形状推移

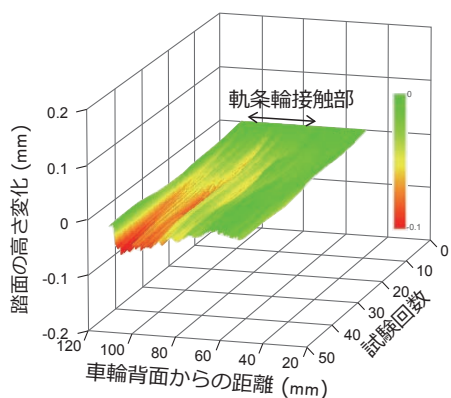


図6 繰返し抑速ブレーキでの制輪子接触部の踏面の形状推移

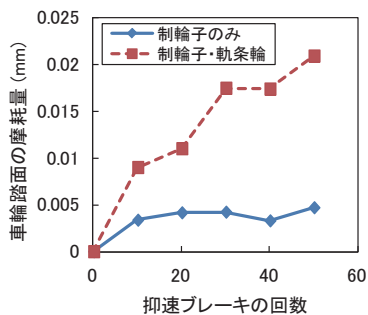


図7 繰返し停止ブレーキでの制輪子接触部の踏面の形状推移

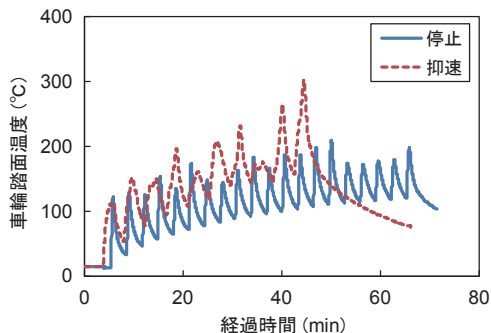


図8 繰返し停止および繰返し抑速ブレーキ試験時の車輪温度の推移

で再度制輪子を作用させた。以後この繰返しで、設定温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の状態を1200sec継続した時点で1セットの試験終了とした。これを3回繰返し、累積温度保持時間60min (1h)、累積転動距離60kmの試験を行った。

(2) 試験結果

定温度試験時の車輪踏面の制輪子接触部の踏面の形状推移を図9に示す。図中の横軸(車輪背面からの距離)上にデータを示す範囲が踏面制輪子の接触範囲であり、軌条輪の接触範囲は踏面制輪子の接触範囲の中の一部である。高さ(Z軸)方向は踏面形状の変化を試験前形状に対する高さ変化として示している。図は奥から手前に向かって試験時間の増加を示し、試験終了時は180minである。図9から明らかなように、この試験では軌条輪接触部において踏面の摩耗が大きく進展した。踏面の温度が高いほど摩耗の進展が顕著である。各温度での試験終了時の踏面の形状変化を図10に示す。

図10において、試験の進行に伴い主に軌条輪接触部で踏面の形状変化が進行し、特に $300^{\circ}\text{C}$ での試験時に大きく摩耗が進展していることが分かる。また、軌条輪接触部の両側にわずかではあるが凸状の形状変化が生じている。これは、温度上昇に伴って軟化した車輪踏面が軌条輪との転動接触によって塑性変形したことで接触部周囲への塑性流動が生じたものと考えられる。

各温度での摩耗の進展について、図10よりこの試験条件下での塑性変形による摩耗体積を算出した。試験では車輪/軌条輪相対位置の軸方向変位を行っていないこ

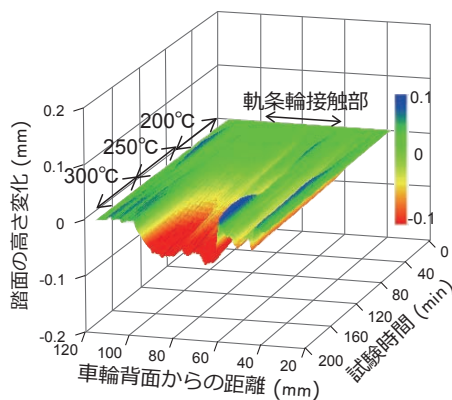


図9 定温度試験における車輪踏面の制輪子接触部の形状の推移

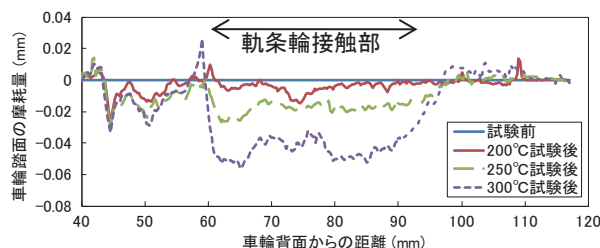


図10 定温度試験での各温度の試験終了時の車輪踏面の形状変化

とから、軌条輪との接触位置は一定である。一方実車では、レールは少なくとも制輪子接触幅の全域にわたり転動し、凹摩耗もその領域で発生する(図1参照)。このことから、各温度における転動距離あたりの摩耗体積を制輪子接触幅で除すことで、各温度における走行距離あたりの実車に換算した摩耗量すなわち摩耗率が算出できる。実車に換算した踏面の寸法摩耗率の温度依存性を図11に示す。車輪踏面の温度上昇に伴い摩耗率が急激に増加することが分かる。なおこの温度ごとの寸法摩耗率は表1に示す接触条件に対して適用されるものであり、車輪径が異なる場合には転動回数に比例して修正する必要があることに注意が必要である。

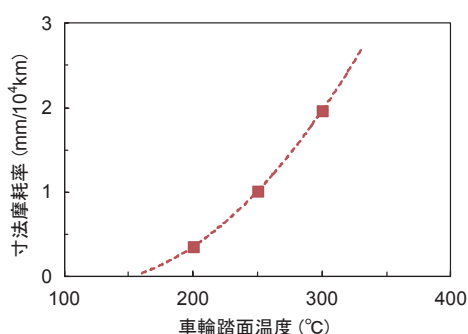


図11 実車の条件に換算した踏面摩耗率の温度依存性

### 3.3 実車での車輪温度の評価手法

上述の車輪踏面の形状変化に対応する車輪温度は、いずれも踏面下10mm・車輪背面から85mmの位置に埋込まれた熱電対による内部温度であり、この部位の温度を測定するには車輪に穴あけを行う必要があることから、実車殊に営業車ではこの温度は測定できない。他方、同部位の車輪温度は車輪リム部の引張残留応力発生の限界温度をはじめとする各種の車輪温度の基準計測位置として用いられており、基準部位を変更することは従来および将来データとの比較可能性の観点から不適切である。

実車の車輪では内部温度計測用に穴を設けることができないため測定可能な温度は表面温度に限られるが、フランジを含む踏面部は表面センサが破壊されることから不適である。従って測定できるのはリム面、背面および板部、ボス部等の表面に限られる。これらのうち制輪子接触部からの距離が最短であるのはリム表面であることから、リム部表面の温度に基づく踏面内部温度(踏面下10mm・車輪背面から85mm)推定の可能性を検討した。

3章で述べた試験に準ずる条件での台上試験における、停止ブレーキ(2回繰返し)および抑速(定温度)ブレーキ時の車輪温度を測定した。踏面内部温度の他、踏面表面温度を移動表面用接触熱電対により、リム面を黒体塗装した上でリム面表面温度を赤外線画像装置により各々測定した。踏面内部温度に対する車輪踏面および車輪リム面表面(踏面から10mm位置)の温度推

移を図12に示す。停止ブレーキ時にはリム面温度と内部温度とが一致しないのに対し、抑速ブレーキ時にはリム面温度の最大値が内部温度と一致することが分かる。このことから、車輪リム面の踏面から10mmの位置にサーモラベルを貼付することで、車輪温度測定の基準点である踏面下10mm・車輪背面から85mmの踏面内部温度を概ね評価可能であることを確認した。この手法は、踏面内部の温度変化が緩やかな抑速ブレーキや耐雪ブレーキ条件に適用可能であるが、急峻な温度変化が生じる停止ブレーキ条件には適用できない。

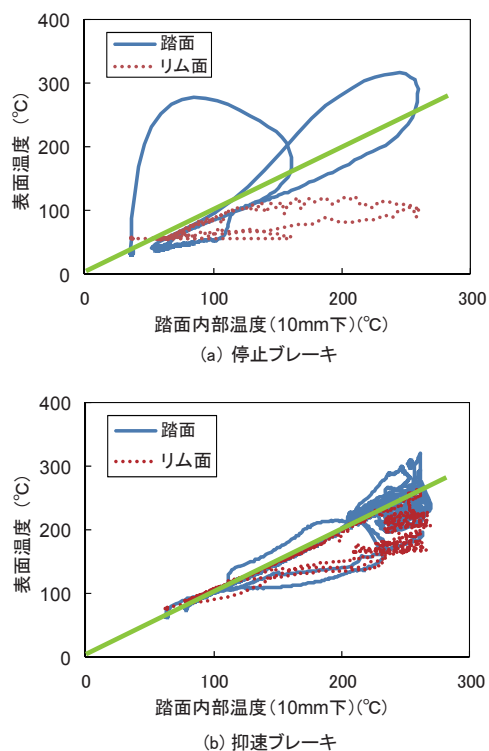


図12 ブレーキ中の踏面内部温度と表面温度の関係

## 4. 実車の踏面形状変化の原因分析

実車での車輪削正後の走行距離による車輪踏面の摩耗進展について把握するため踏面凹摩耗が発生している2形式の在来線車両について踏面形状調査を行った。耐雪ブレーキによる踏面摩耗への影響が考えられることから調査は冬季前と冬季後の2回に分けて実施し、車輪削正後の走行距離に対する車輪踏面の摩耗進展を整理した。図13にその結果を示す。形式Aでは走行距離70,000km程度で最大約3mm、形式Bでは走行距離40,000km程度で最大約4mmの凹摩耗が発生していた。

各々について、削正後走行距離20,000km以上での走行距離に対する摩耗率を求めると、その平均値は形式Aでは0.42mm/10<sup>4</sup>km、形式Bでは0.37mm/10<sup>4</sup>kmとほぼ同等であった。しかし各車輪の摩耗率の相対標準偏差

特集：材料技術

(RSD)をとると、形式A (n=80) では0.09に対して形式B (n=63) では0.50と大きな差が見られ、形式Aでは摩耗率は部位や季節に関わらずほぼ一定と見なせるのに対し、形式Bでは部位等によるばらつきが大きいことが分かった。

2章で述べた塑性変形による凹摩耗の進展は、ほぼ一定の負荷パターンが車両運用毎に繰り返されることから、長期的には摩耗率は一定となると考えられる。従って形式Aについては2章で述べた踏面の塑性変形が凹摩耗の支配的な要因であると言える。一方形式Bについてはそれ以外の摩耗原因が影響している可能性が高い。

なお形式Bについては、鉄道事業者による調査の結果冬季の耐雪ブレーキ使用時に突発的な踏面摩耗が発生していることが判明しており、削正後走行距離40,000km程度の大きな摩耗率とばらつきは主に制輪子摩擦面に堆積した車輪からの金属片が車輪踏面を切削するいわゆる「かじり」によるものと考えられる<sup>9)</sup>。以上より、削正後走行距離に対する各車輪の踏面摩耗率の相対標準偏差を用いることで、凹摩耗の主要因を判定できるものと考えられる。

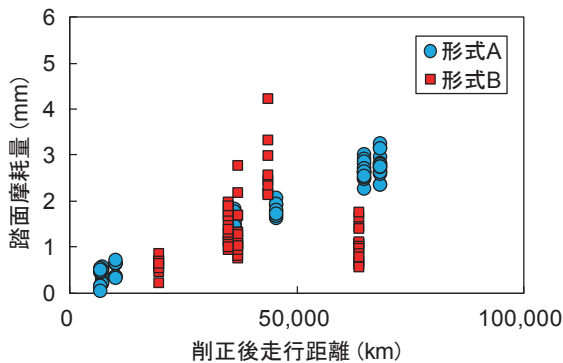


図13 車輪削正後の走行距離に対する踏面摩耗推移の例

5. 結論

本報告では、踏面ブレーキ車両における車輪踏面凹摩耗の系統的な対策策定に資するため、台上試験によりその発生原因・発生メカニズム・発生条件を探索するとともに、実車における車輪使用状況をより正確に把握する手法について検討した。踏面ブレーキ車両の車輪凹摩耗に関して得られた知見は以下の通りである。

(1) 車輪・制輪子に加えて車輪／レールの転動接触を模擬する軌条輪を用い、実車に相当するヘルツ接触条件下で車輪に踏面ブレーキを作用させる試験により、踏面ブレーキ車両における車輪凹摩耗の主因が温度上昇した車輪踏面がレールと転動接触することに伴う塑性変形であるとの従来の知見の妥当性を確

認した。

- (2) 踏面ブレーキにより踏面温度を一定に保ち車輪／軌条輪を転動させた際、車輪踏面の摩耗量は踏面温度の上昇とともに急激に増加した。この際の摩耗体積から、実車における走行距離に対する車輪踏面の摩耗率の温度依存性を定量的に把握した。
- (3) 実車の踏面凹摩耗について、踏面摩耗率の車輪部位ごとのばらつきに基づき、凹摩耗の主因が温度上昇時の塑性変形によるものか、制輪子による切削現象等の異常摩耗であるかを判定する手法を提案した。

文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修・車両関係技術基準調査研究会編・車両関係技術基準作業部会編：解説 鉄道に関する技術基準（車両編）改訂版，（社）日本鉄道車両機械技術協会，2006
- 2) 半田和行，森本文子，深貝晋也，柿嶋秀史：車輪踏面熱き裂の発生メカニズムと対策法，鉄道総研報告，Vol. 25，No.10，pp.23-28，2011
- 3) 半田和行，牧野一成，西森久宜，小原孝則，宮内瞳，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
- 4) Kazuyuki Handa, Yoshisato Kimura, Yoshinao Mishima: "Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat", Wear, Vol.268, pp.50-58, 2010.
- 5) Kazuyuki Handa, Yoshisato Kimura, Yuji Yasumoto, Taisuke Kamioka, Yoshinao Mishima: "Effect of deformation and annealing temperatures on ultrafine microstructure development and yield strength of pearlitic steel through continuous recrystallization", Materials Science and Engineering A, Vol.527, pp.1926-1932, 2010.
- 6) Kazuyuki Handa, Yoshisato Kimura, Yoshinao Mishima, "Ferrite and Spheroidized Cementite Ultrafine Microstructure Formation in an Fe-0.67 Pct C Steel for Railway Wheels under Simulated Service Conditions", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.40, pp.2901-2908, 2009.
- 7) 谷藤克也，咲山武司：新幹線電車の車輪摩耗特性と走行振動，日本機械学会論文集C編，No. 492，pp. 1743-1749，1987
- 8) 池内健義，半田和行：車輪・レール粘着試験機を使用した踏面ブレーキ試験による欧州用車輪踏面形状変化の評価，鉄道総研報告，Vol.31，No. 8，pp.29-34，2017
- 9) 長澤 新，飯島 宏康，半田 和行：車輪異常摩耗に対する制輪子 - 車輪間の介在物の影響，鉄道総研報告，Vol.18，No.5，pp.47-52，2004