

車輪粘着踏面ブレーキ試験による 欧州車輪の踏面形状変化の評価

池内 健義* 半田 和行*

European Wheel Tread Profile Evolution for Combined Block Braking and Wheel-Rail Contact
by Dynamometer Experiment

Katsuyohi IKEUCHI Kazuyuki HANDA

Wheel treads damage, such as wear, thermal cracks and plastic deformation, cause changes in the tread profile of the wheel, which necessitates frequent wheel reprofiling in order to maintain the ride comfort of the vehicle. In this study, a series of full-scale tread braking experiments, including those of wheel-rail rolling contact, were conducted to clarify the factors influencing the wheel tread profile evolution. The results obtained from the experiments on European wheel and brake block showed that the maximum tread indentation at the rolling contact area is larger than that in the case of Japanese wheel and brake block. This was caused by the plastic deformation of the wheel tread, due to the high contact pressure and material softening from high temperatures due to tread braking. The results were supported by the observed tread protrusions observed near the rolling contact area and the hardness measured in the rolling contact area.

キーワード：車輪，踏面ブレーキ，踏面形状変化，焼結合金制輪子，凹摩耗，熱き裂

1. はじめに

車輪踏面の損傷（凹摩耗や熱き裂など）が発生すると、車輪削正や車輪交換による車両補修負荷が増大するばかりでなく、放置すれば車両運動特性の悪化や重大事故につながる可能性があることから、その発生メカニズムの解明や抑制対策の確立が望まれている¹⁾。

鉄道総研ではメカニズム解明のため、台上試験による再現試験を実施してきた。熱き裂については、通常のブレーキ試験では再現できなかったが、車輪・軌条輪粘着試験により再現され、主に制輪子による車輪温度上昇による引張残留応力に車輪・レール間接線力が負荷されて降伏が生じ、それが繰り返されることによるものであることが確認されている²⁾。また、軌条輪接触位置のみに凹摩耗が観察されたことから、定常的な凹摩耗は車輪踏面温度上昇と塑性変形によって生じる現象であることが理解された³⁾。また、急激な車輪の凹摩耗については、特定のブレーキ条件のもと車輪・制輪子間の介在物により研削された車輪の摩耗片（かじり片）がさらに車輪を研削し摩耗させていく現象であることが示されている⁴⁾。

そこで本研究では、定常的な凹摩耗に着目し、その発生要因を確認するため、踏面ブレーキを使用した車輪の凹摩耗や熱き裂を、高負荷条件のもとで実験的に再現することとした。具体的には、日本向け車輪と材料物性が

異なる欧州向け車輪と制輪子を使用し、軌条輪上で高速・高輪重で車輪を転動させる条件において、制輪子による踏面ブレーキを作用させる試験を繰り返し実施し、凹摩耗や熱き裂の状態を調査した^{5) 6)}。また、過去に行った日本向け車輪を使用した試験結果と比較した。

2. 試験方法

2.1 試験装置

試験には鉄道総研のブレーキ試験機、車輪・レール粘着試験装置を使用した。この試験機は軌条輪と車輪を指定した荷重で接触させ、軌条輪側の駆動力により回転する車輪を踏面ブレーキ等で停止させる試験ができるものである。

2.2 試験供試体

車輪は UIC 規格⁷⁾ (UIC-812-3, ER7) に準拠した材料特性を持つ欧州用車輪で、欧州を走行する車両（電車、運転最高速度 160km/h、軸重約 20t）に使用されている。材料規格は表 1 の通りで、比較のため日本用車輪の JIS 規格も併記した。日本用車輪と比較して、炭素量が低めであることが特徴である。

車輪径は 855mm、リム幅 135mm、踏面形状は欧州で使用されているもので、車輪全体が切削加工された状態で実験に使用した。温度測定用として車輪にはリム端が

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：材料技術

らそれぞれ深さ 15mm, 45mm, 75mm となるよう穴をあけ、K 型熱電対を埋め込んだ。熱電対からのデータは試験機のスリップリングを通じて記録される。試験機に設置した状態を図1に示す。また図2にその模式図を示す。

表1 日本用と欧州用車輪鋼の各種物性値の違い^{7) 9)}

車輪材質名	準拠規格	炭素量 (wt%)	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)
ER7 (欧州)	UIC 812-3	≤ 0.52	≤ 520	820 ~ 940
SSW-Q3S (日本)	JIS E5402	0.6 ~ 0.75	規定なし	790 ~ 980

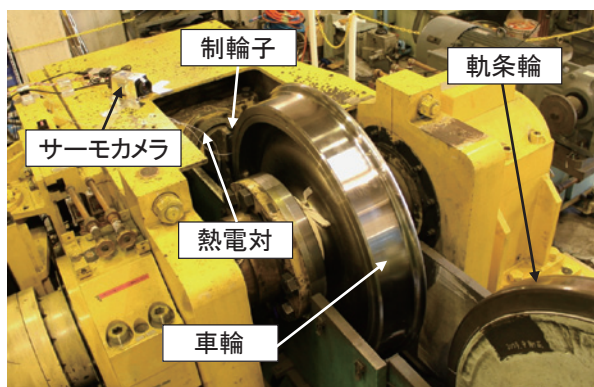
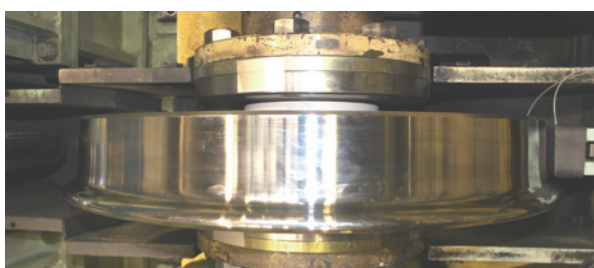


図1 試験機に設置した欧州用車輪と制輪子

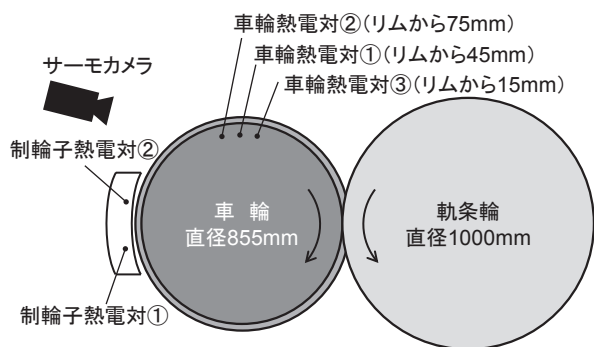


図2 試験機模式図

制輪子は欧州で使用されている焼結合金制輪子⁸⁾を使用した。制輪子の上下端から約 80mm, 踏面下約 10mm の箇所穴をあけ、温度測定用熱電対を埋め込んだ。鉄系成分を主成分としていると思われるが、詳細は不明で

ある。

これらの車輪等は、平成 25 年度に鉄道総研がチャルマース工科大と実施した共同研究の過程で入手したものである。

表2 試験条件

	130km/h 試験	160km/h 試験	すり合わせ
ブレーキ初速度	130km/h	160km/h	50km/h
ブレーキ回数	40 回		30 回
制輪子押付力	30kN		10kN
輪重	98kN (冷却時 30kN)		30kN
慣性モーメント	2196kg・m ²		
車輪	欧州用車輪 (ER7, φ=855mm)		
制輪子	欧州用焼結合金制輪子		
車輪回転方向	一方向のみ		

2.3 試験条件

試験条件を表2に示す。欧州の特急電車の走行状態を模擬した条件で試験を行った。試験前には制輪子踏面のすり合わせを行った。試験はすり合わせ、本試験ともに制動開始速度まで加速、速度が安定したところで駆動力を止めて停止ブレーキ動作し、停止後緩解して車輪温度が 60℃以下になるまでの冷却運転を 1 回の試験とし、所定の回数繰返し試験を行った。試験中は車輪と軌条輪の接触部直上に設置された監視カメラおよびサーモカメラの動画、および各温度測定点の温度、速度、トルク、制輪子押付力、輪重、横動位置について時間変化を記録した。

車輪および制輪子の状態について、約 5 ~ 10 回毎に写真撮影と浸透探傷、踏面形状測定装置 (MiniProf) による踏面プロファイル取得および制輪子重量の測定を行った。軌条輪と車輪の接触面積については、感圧紙を使用し、本試験開始前と終了後および軌条輪変更後に 1 回ずつ測定を行った。

試験結果については、測定した車輪温度と車輪踏面の外観、き裂および変形量により評価した。踏面の変形量については、異なる速度や輪重条件の試験結果を比較するために、ブレーキ回数のほかにブレーキ時の累積エネルギーを用いて評価した。車輪の運動エネルギーをすべて摩擦ブレーキにより吸収して停止させたとすると、ブレーキ 1 回あたりのエネルギーは初速 130km/h の場合は約 6.4MJ, 160km/h の場合は約 10MJ となり、これをブレーキ回数分乗じた。日本の車輪を使用した過去の試験²⁾では輪重条件を日本のものと合わせているので、初速 130km/h からのブレーキ 1 回あたりのエネルギーは 4.2MJ であった。

3. 試験結果と考察

3.1 車輪温度

ブレーキ試験中に測定した各種データの一覧を表3に示す。130km/hからの制動距離は約800mであり、一般的に日本で要求される条件（600m以内）と比較して長かった。試験中の温度変化について、図3に130km/hでの結果、図4に160km/hでの結果を示す。測定箇所により温度変化が異なるのは、車輪と制輪子の接触状態が常に変化するため高温である場所が変化することと、そこから車輪全体に熱拡散していることによるものと考えられる。主に温度の判断に用いた熱電対①（リム側から45mmの踏面10mm下、車輪踏面幅中央部）の温度は130km/hでは220℃程度、160km/hでは270℃程度に達した。

表3 試験結果の一覧

	130km/h 試験	160km/h 試験
車輪最高温度	熱電対①	225℃
	熱電対②	194℃
	熱電対③	202℃
ブレーキ距離	約 800m	約 1500m

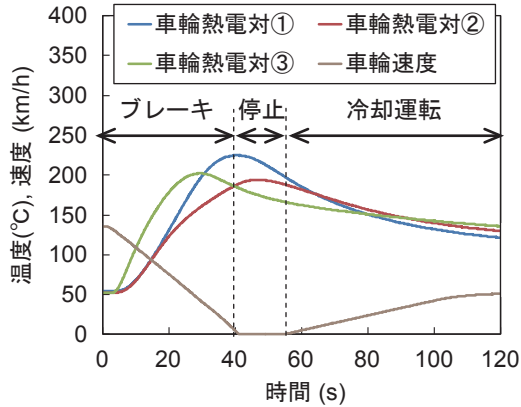


図3 制動時の温度および速度の推移（130km/h 試験）

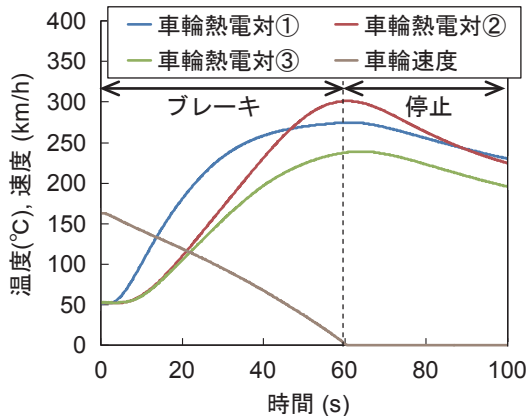


図4 制動時の温度および速度の推移（160km/h 試験）

3.2 車輪踏面

実験中の踏面状態の推移を写真撮影した結果を図5と図6に示す。試験前（すりあわせ後）の踏面はきれいだが、30回から40回試験を繰り返すと、踏面に付着物が確認できた。これは制輪子から移着した鉄等の金属成分であると考えられる。熱き裂については、肉眼で確認しづらいため浸透探傷によりその有無と、一部のき裂については大まかな長さを測定し追跡調査した。

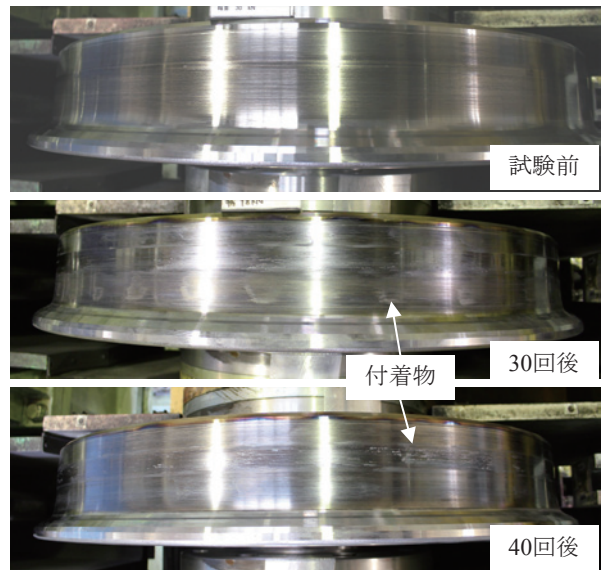


図5 130km/h 試験時の踏面状態の推移

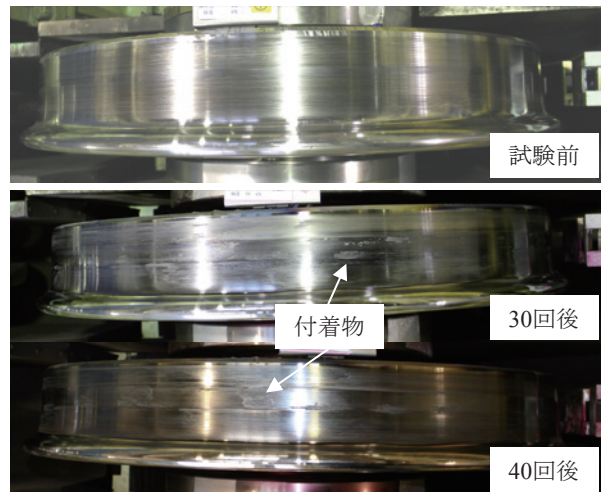


図6 160km/h 試験時の踏面状態の推移

踏面を浸透探傷した結果を図7と図8に示す。熱き裂は160km/h試験においては制動20回後の段階で小さなものが発生している様子が確認でき（図中点線枠内）、ブレーキ回数を追うごとに熱き裂の数が多くなり、40回後にはほぼ全周にわたって観察され、き裂の幅が大きくなっている様子が確認できた。図9に追跡調査したき

特集：材料技術

裂の長さの進展を示す。ブレーキ回数を重ねるごとに裂長さが長くなっていくことがわかる。また 160km/h 試験のほうが 130km/h 試験よりも、同じブレーキ回数における裂長さは常に長かった。

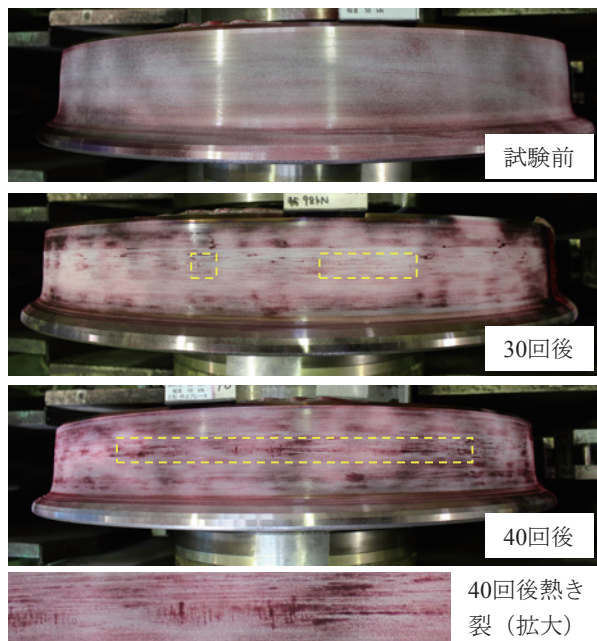


図7 130km/h 試験時の浸透探傷結果

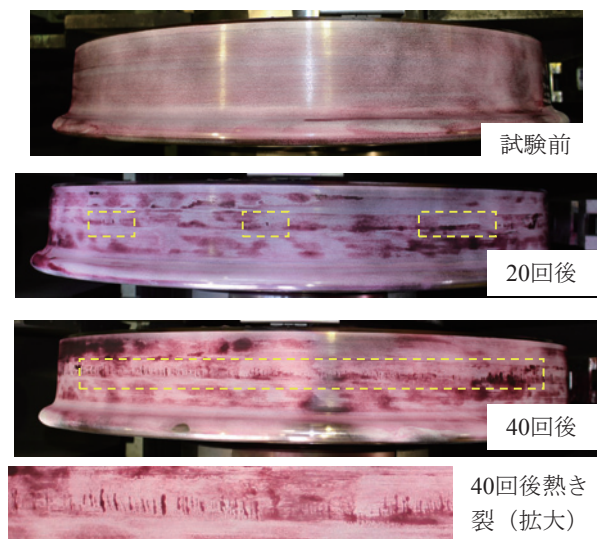


図8 160km/h 試験時の浸透探傷結果

次に、車輪踏面形状の推移を調査するため、踏面形状測定装置にて計測した結果を図10と図11に示す。それぞれのグラフの右上に示した、軌条輪との接触部分近傍を拡大したものを示している。図中に示すA点は制輪子と軌条輪が接触していた部分、B点は軌条輪接触部のすぐ外方、C点は制輪子のみ接触していた部分、D点は何も接触していない部分である。

どちらの図からも軌条輪との接触部位において、車輪

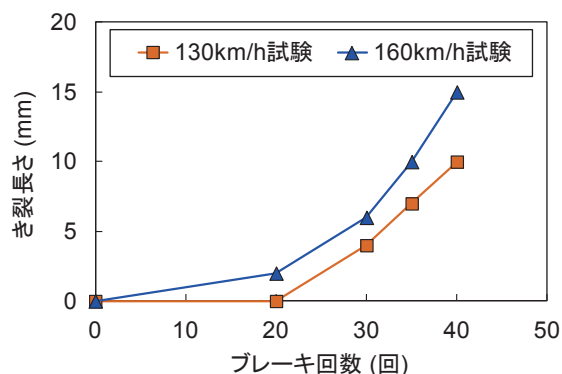


図9 試験終了後の車輪踏面熱き裂長さの進展

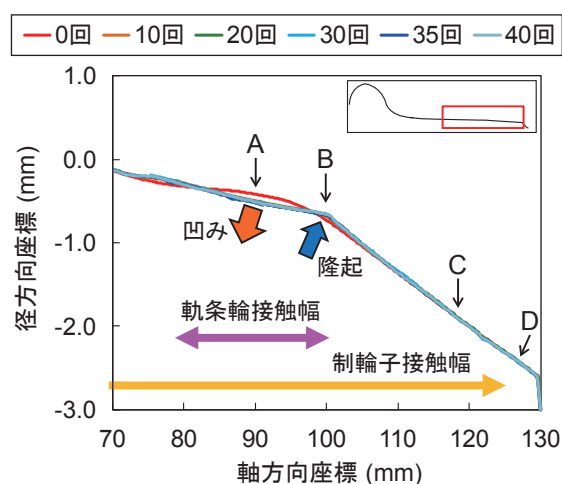


図10 130km/h 試験における踏面形状の推移

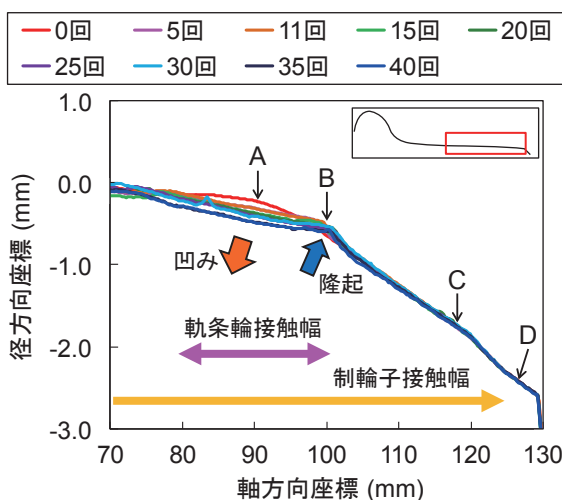


図11 160km/h 試験における踏面形状の推移

が凹んでいる状態が確認できた。一方軌条輪との接触部位の境界部近傍 (100mm 付近) では、試番を重ねるごとに踏面の高さが増大していることが確認された。これは、軌条輪との接触により車輪が塑性変形し、接触部両側に塑性流動が起きていることを示唆している。

図 10 および図 11 をもとに、試験前の踏面を基準とした変形量を示すグラフを図 12 と図 13 に示す。図 10 および図 11 内の A ~ C 点について、図中軸方向座標では、A 点が 90mm, B 点が 100mm, C 点が 115mm に相当する。この図より、軌条輪接触位置付近が凹み、その両側が隆起している様子がよく確認することができる。90mm 付近の凹んだ量は最終的に 160km/h 試験のほうが大きくなった。

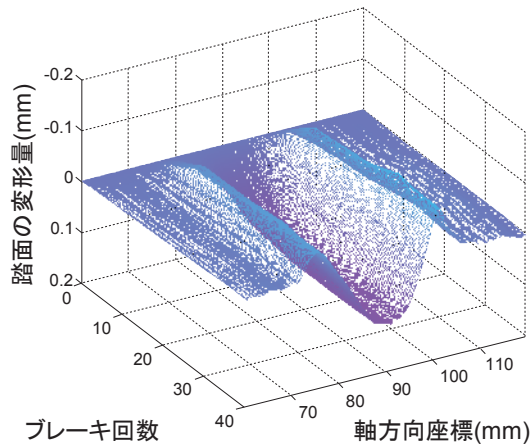


図 12 130km/h 試験における軌条輪接触部近傍の凹み量の推移

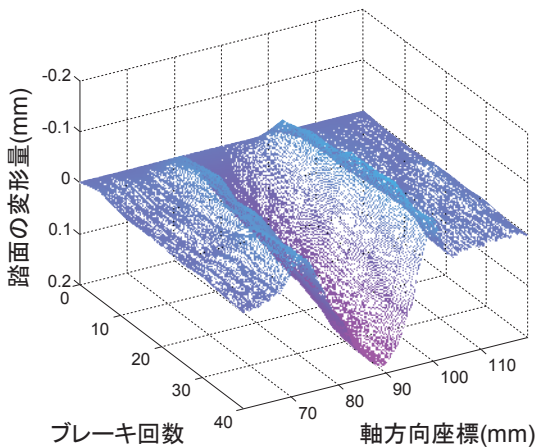


図 13 160km/h 試験における軌条輪接触部近傍の凹み量の推移

これらを累積ブレーキエネルギーに対して比較したものが図 14 である。図 14 から、制輪子のみが接触していた C 点はほとんど摩耗しておらず、何も接触していない D 点とはほぼ同等であったのに対し、軌条輪と接触していた A 点の平均の変形量は累積ブレーキエネルギーが約 400MJ の試験終了時で約 0.2mm となり、エネルギー量当たりの変形量は約 $50 \times 10^{-5} \text{mm/MJ}$ となった。これは過去に実施した日本用車輪の試験で得られた結果 (約 $20 \times 10^{-5} \text{mm/MJ}$) よりも大きかった。一方で、軌条輪

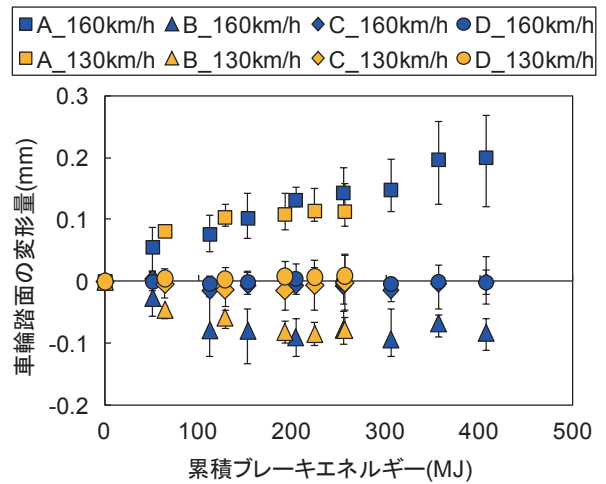


図 14 踏面の変形量推移

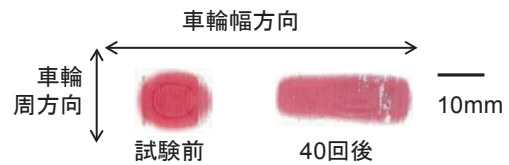


図 15 160km/h 試験時の車輪・軌条輪接触面の変化

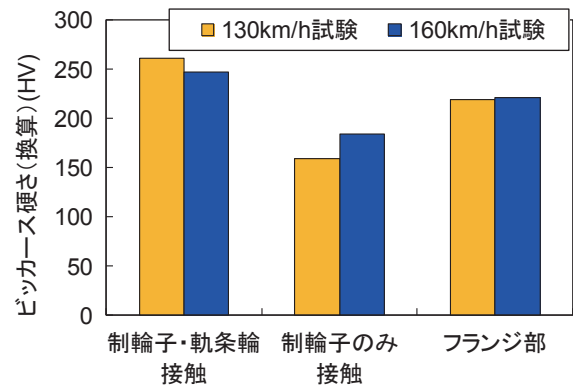


図 16 車輪踏面の硬さ

接触部両端となる B 点については約 0.1mm の隆起が確認できた。

図 15 に、感圧紙で記録した試験前後の接触面形状の変化を示す。試験前では直径 10mm の円に近い楕円であったのに対し、試験後には幅 25mm・高さ 10mm の長方形に近い楕円形状にまで変化している。この形状変化により面圧が低下するため、塑性変形が踏面の変形の主な要因であるならば試験の開始当初に踏面の変形量が比較的大きいことと合致する。

図 16 に試験後の車輪踏面の硬さ測定結果を示す。使用したのは反発式硬さ計で、非破壊的に物質の硬さを計測できるものである。結果は測定機器内でビッカース硬

特集：材料技術

さに換算した結果を示している。フランジ部の硬さは、踏面ブレーキによる大きな熱影響は受けずほぼ母材のままの硬さであると考えられる。制輪子の接触している部分は踏面ブレーキにより車輪温度が高くなる部分であるが、軌条輪が転動する部分については、加工硬化および軌条輪による急冷によってフランジ部よりも硬くなったとみられる。一方制輪子のみ接触する部分は、軌条輪の転動がなく、主に車輪の回転による空冷のみが作用されることから、焼きなましのような状態となり、フランジ部よりもやわらかくなったものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、日本と異なる材質の欧州用車輪について、車輪踏面の凹摩耗や熱き裂を実験的に再現するため、鉄道総研内の車輪・レール粘着試験機を使用して、欧州向けの走行条件となる高速・高輪重で車輪を軌条輪上で転動させ、欧州で使用されている制輪子による踏面ブレーキを作用させる試験を繰り返し実施し、凹摩耗や熱き裂の状態を調査した。その結果は以下ようになった。

130km/h および 160km/h から制輪子押付力 30kN でブレーキをかけたところ、停止距離は約 800m 以上となった。これは日本よりも輪重が大きいことと、制輪子材質が異なることなどが考えられる。また、踏面から 10mm 下の車輪踏面幅中央部に埋め込んだ熱電対の温度はブレーキ時には 130km/h では 220°C 程度、160km/h では 270°C 程度に達した。

試験後の踏面には制輪子由来とみられる付着物が存在していた。また、浸透探傷により 20 回経過後に熱き裂が確認され、40 回後には全周にわたって観察された。

踏面形状について、軌条輪と接触している部分が試験開始前と比較して約 0.2mm 凹んだ。これをブレーキエネルギーで除すると摩耗量は約 50×10^{-5} mm/MJ となったが、これは過去に日本で使用されている車輪と走行条件を模擬して試験した結果よりも大きかった。また、制

輪子のみ接触した箇所はほとんど変形しておらず、軌条輪接触部の両側が隆起していた。これらの結果のほか、車輪・軌条輪接触面形状の変化や踏面の硬さ測定により、凹摩耗の主な要因が踏面ブレーキによる温度上昇による軟化と転動による塑性変形であることが示された。

文献

- 1) 半田和行：車輪の損傷メカニズムに迫る，RRR，Vol.69，No.4，pp.8-11，2012
- 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) 長澤新，飯島宏康，半田和行：車輪以上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
- 5) Ikeuchi, K., Handa, K., Lunden, R., and Vernersson, T., "Wheel tread profile evolution for combined block braking and wheel-rail contact: Results from dynamometer experiments," *Wear*, Vol.366-367, pp.310-315, 2016.
- 6) Caprioli, S., Vernersson, T., Handa, K., and Ikeuchi, K., "Thermal cracking of railway wheels: Towards experimental validation," *Tribology International*, Vol.94, pp.409-420, 2016.
- 7) European Standard, "Railway Applications – Wheelsets and Bogies–Wheels–Product Requirements", CEN, EN13262: 2004 A2, Brussels, p.48, 2011.
- 8) International Union of Railways (UIC), "Brakes – Brakes with Composite Brake Blocks: General Conditions for Certification of Composite Brake Blocks", UIC 541-4, 3rd ed., 2007.
- 9) 日本工業規格，鉄道車両用一体車輪，JIS E5402，2005