

車輪フランジ潤滑と踏面増粘着の機能を統合した 車輪摩擦材の開発

半田 和行* 嗟峨 信一** 池内 健義*
深貝 晋也* 野崎 圭祐***

Development of Wheel Frictional Block Integrating the Functions of
Wheel Flange Lubrication and Tread Adhesion Improvement

Kazuyuki HANDA Shinichi SAGA Masayoshi IKEUCHI
Shinya FUKAGAI Keisuke NOZAKI

This paper describes the development of a wheel friction block that integrates the functions of wheel flange lubrication and tread adhesion improvement. We devised a configuration in which friction material with adhesion increasing material on the tread and material containing solid lubricant with MoS₂ at the flange are applied vertically by a tread cleaning device. The developed blocks were tested for an express train in operation and traveled about 200,000 km. As a result, the wear rate of the wheel flanges was reduced by an average of about 40% compared to the one of the wheel flanges of the vehicles without the developed blocks.

キーワード：車輪，フランジ，摩耗，潤滑，増粘着，踏面清掃装置，固体潤滑，踏面調整子

1. はじめに

車輪踏面（図1）には位置により異なる性状が求められる。レール頭頂面と接触し加減速のための接線力をレールに伝達する踏面部は、粘着を確保し空転・滑走を防ぐため適度な表面粗さをもち摩擦係数が高いことが必要である。一方、曲線外軌のレールゲージコーナ部と接触するフランジ部は、乗り上がり脱線防止、車輪・レール双方の摩耗低減、フランジ音防止等の観点から摩擦係数が低いことが求められる。

踏面部の摩擦係数を確保する手法としては、水分や汚れを除去する踏面清掃子、踏面を研摩して粗さを増加する踏面研摩子のほか、鑄鉄制輪子や増粘着ブロック挿入型の合成制輪子など、車輪踏面に粗さを付与する性質を持つ踏面摩擦材によって踏面粗さの低下を防いでいる。

一方、フランジ部の摩擦係数や摩耗を抑制する手法としては、主として塗油など液体による外部潤滑が適用されている。潤滑剤には液体の油、グリースのほか、水（散水）や水系潤滑剤等が用いられている。しかしながら塗油等を行う場合、潤滑剤の飛散による床下機器や主電動機フィルタの汚染、踏面部に付着した場合の摩擦係数低下による空転・滑走などの問題を誘発する場合がある。

潤滑剤が液状であることに起因するこれらの問題への

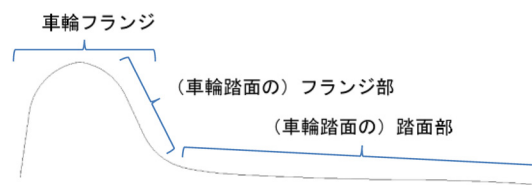


図1 車輪踏面の模式図

対策として、箱形断面のホルダに入れた棒状の固形潤滑剤をバネ圧によってフランジ部に接触・摺動させる装置が提供されている。こうした固形潤滑剤は海外では多用されており、国内でも一部の車種で使用事例がある¹⁾。

このように車両設置のフランジ部潤滑装置としては、棒状固形潤滑剤のほか、噴射式レール塗油器、回転式グリース塗油器、噴射式フランジグリス塗油器等が実用されている。これらはいずれも、車輪フランジもしくはレールゲージコーナに正対して、車輪/レール横断面上の垂直軸に対して斜め方向からフランジ部に潤滑剤を作用させている。このため車輪削正によって車輪径が変化した場合にその都度装置の位置を調整する必要があり、保守性の点で課題がある。

これを踏まえ本論文では、以下に挙げる全ての課題を解決することを目標として開発した車輪踏面摩擦材について述べる。

- ① 車輪の踏面部とフランジ部で必要な性状が異なる。
- ② フランジ部に塗布された潤滑油やグリースが飛散・流出して保守・保安上問題となる。
- ③ 車輪径変化時に位置調整作業が必要となる。

* 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
*** 車両構造技術研究部 車両運動研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）

2. 新たな車輪摩擦材の構成

考案した踏面摩擦材は、図2に示すように、車輪の踏面部に研磨材が、フランジ部に固体潤滑材がそれぞれ接触するよう設置されており、これを車輪に対して垂直方向（車輪外周面に対する法線方向）に押付けて作用させる。これにより以下の利点が得られる。

- ① フランジ部は固体潤滑材により潤滑される一方、踏面部に研磨材が作用することで、踏面部とフランジ部双方に好適な表面性状が付与される。
- ② 万一潤滑成分が踏面部に付着した場合でも研磨材の清掃研磨効果により速やかに除去される。
- ③ 垂直押付式のため、車輪径が変化しても位置調整が不要である。

この構成を成立させるための踏面部の摩擦材には踏面制輪子材、踏面研磨子（清掃子）材ともに適用可能であるが、既往の踏面研磨子に替えて踏面清掃装置に取付けて使用することを意図し、踏面部の摩擦材料として踏面研磨材を選択した。この摩擦材は踏面増粘着とフランジ潤滑の機能を統合し、踏面部とフランジ部各々を必要な性状に調整することから以後、踏面調整子と呼ぶ。また、当面の想定適用対象は在来線車両とする。

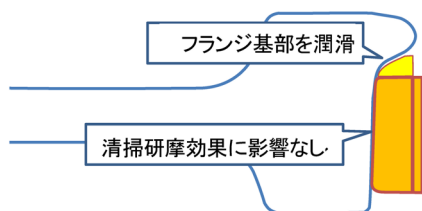


図2 考案した車輪摩擦材の構成

3. 固体潤滑材の材質検討

3.1 摩耗低減性能の評価試験

踏面調整子の固体潤滑材としての適用を念頭に複数の固体潤滑材について摩耗低減効果を検証した。評価試験には鉄道総研所有の高速摩擦試験機（図3）を用い、車輪・レール材の類似鋼種であるS65C製のディスクに、S65C製の円筒状試験片を押付けて摩擦させることで曲線通過時の車輪／レール間の接触条件を模擬した。2か



図3 高速摩擦試験機の外観

所の試験片ホルダにS65C試験片と固体潤滑材試料を各々設置して固体潤滑材による車輪摩耗低減効果を検証した。なお装置構成上、各試料ホルダの垂直接触荷重を個別に制御することはできない。

3.2 試作材質

供試材質のうち本稿ではP1およびJ01、J02の計3材質について述べる。P1はパラフィン基材とする固形潤滑剤で、J01・J02はレジン基材として二硫化モリブデン（MoS₂）等を配合し、踏面研磨材と一体成型を念頭に強度や成形性を考慮した材質で、配合割合が異なる。

試験片形状は、S65C製の円筒試験片がφ10mm（摩擦部）×110mm、潤滑材が10×10×10mm³である。円筒試験片は長手方向をディスク半径方向に設置し、φ10の円周側面がディスク面とヘルツ接触する状態とした。

3.3 試験条件

試験条件は以下の通りである。

- ① 摺動速度 : 2 m/s (7.2 km/h)
- ② 押付力 : 1000N (左右試験片に対する合計)
- ③ ヘルツ接触圧 : 410MPa / 580MPa (片側荷重時)
- ④ 時間・回数 : 10s・50回

接触圧は、両方の試料ホルダに円筒試験片を取付けた場合には410MPa、円筒試験片と固体潤滑材を使用した場合は試料の弾性定数差により荷重の大部分が円筒試験片に負荷されるため、全荷重に対する接触圧である580MPaとみなした。

3.4 評価結果

無潤滑時および各固形潤滑材適用時の円筒試験片の比摩耗量を図4に示す。固形潤滑材の適用によりいずれの試験片も比摩耗量が1/100程度となった。無潤滑時と固体潤滑材適用時の試験後のディスクおよび円筒試験片の表面状態の例を図5に示す。無潤滑時には接触部で焼きつきが見られたのに対し、固体潤滑材適用時には摩擦面に平滑な被膜の形成が認められた。これらの結果より、試作した固体潤滑材は良好な車輪摩耗低減性を有すると判断した。

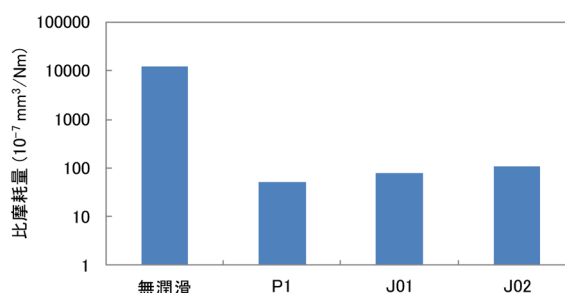


図4 車輪を模擬した円筒試験片の比摩耗量

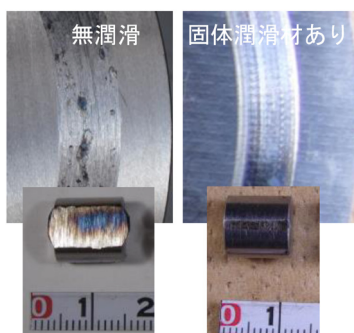


図5 台上試験での固体潤滑材の効果

4. 踏面調整子の形状検討

4.1 輪軸の台車枠に対する左右変位

輪軸は軸箱支持装置と軸ばねで台車枠に対して支持され、走行中の荷重変動によって台車枠に対して前後上下左右の並進方向およびXYZ軸回りの回転方向に変位する。車輪踏面に作用する踏面ブレーキや踏面清掃装置はその作用機構が台車枠に固定されており、台車枠に対して車輪が変位しても機能が阻害されない程度の寸法余裕ないし取付遊間が設けられているものと解釈される。

踏面調整子のフランジ接触部の形状も同様に、走行中の輪軸の変位を踏まえて設定する必要がある。しかし輪軸の台車枠に対する変位は実測結果の報告例が少なく、さらに軸箱支持剛性等の車両諸元や超過遠心力等の走行条件によって大きく異なる事が予想された。

そこで在来線車両で想定される輪軸の台車枠に対する左右変位を把握するため、曲線通過時の超過遠心力が大きいと目される振子特急車両で、低速の構内線走行時や分岐器通過時から高速での曲線通過時まで種々の走行条件下で輪軸の台車枠に対する左右変位を測定した。現車測定試験の概要は以下のとおりである。

- ① 試験車両：振子特急車両 A 系式
- ② 測定部位：T1 車 No.7 車輪・T2 車 No.1 車輪
- ③ 測定機材：台車枠にレーザ変位計を仮設
- ④ 測定対象：台車枠と車輪リム部の距離を測定
- ⑤ 走行線区：B 本線 C 駅～D 駅間（2 級線）
- ⑥ 最高速度：130 km/h

現車測定試験の結果、振幅 2mm 程度以下の高周波の左右動のほか、分岐器通過や高速での曲線通過に対応した著大な左右動が観察された。この試験により、停止時の位置を基準とした片側の変位量ならびに左右合計の変位量の最大値を把握した。

4.2 実車に適用可能な潤滑材部分の形状の検討

踏面調整子では車輪フランジ側に固体潤滑材が配置され、既存の踏面研摩子と比較してフランジ側の寸法が大きいため、走行中左右に変位する車輪のフランジ部との

位置関係を考慮して形状を決定した。

実車適用に向けた踏面調整子の形状は、図 2 に示すように踏面研摩子に対してフランジ側の寸法を拡大し、フランジ側端部から一定の幅に固体潤滑材を配置して車輪背面から 25～40mm のフランジ外側面に接触する寸法とした。摩擦材の厚さは踏面研摩子と同様に 40mm とし、裏金の形状は現用の踏面研摩子と同一として互換性を持たせた。この形状は、以下の条件を満足する。

- ① 緩解時、踏面清掃装置が車輪に最も接近した状態で、車輪が外側に最大限変位し、さらに取付左右遊間がゼロの場合でも車輪フランジ部と接触しない。
- ② 車輪踏面研摩機能を優先し、使用初期には研摩材部分が先に踏面に接触し、摩耗がある程度進行してから潤滑材部分がフランジに接触する。
- ③ 取付遊間よりも大きな車輪左右変位に対しては踏面清掃装置作動中であっても踏面との接触面が浮き上がって変位を逃す。同様の挙動は既存の踏面研摩子でも生じうる。

5. 一体成形された試作材の特性確認

5.1 シャルピー衝撃試験

旧国鉄 JRS 規格では車両用増粘着研摩子の衝撃強さが表 1 の通り定められていた。研摩子材と一体成型された J01 および J02 について、構造上最も脆弱と考えられる研摩子材と固体潤滑材の接合界面の強度について、衝撃試験片の一端側が研摩子材、他端側が固体潤滑材となるように切出し、界面付近にハンマーが打撃するようシャルピー衝撃試験を行った。試験結果を表 2 に示す。J01 および J02 はいずれも弱点部において規格値を満足した。

表 1 車両用増粘着研摩子の衝撃強さ規格値

規格名	規格番号	衝撃強さ
車両用増粘着研摩子 (新幹線車両用)	JRS 12114- 3B-15AR4T	2.0 kJ/m ² 以上
車両用増粘着研摩子 (在来線車両用)	JRS 12114- 6A-15BR4D	2.0 kJ/m ² 以上

表 2 踏面調整子の衝撃強さ測定値

試料名	衝撃強さ	測定方法
J01	2.2 kJ/m ²	JIS K 7111 準拠
J02	2.1 kJ/m ²	JIS K 7111 準拠

5.2 繰返し接触耐久試験

踏面調整子は、走行中の輪軸の左右変位に伴い、動作中に枕木方向の力を受ける可能性がある。衝撃試験により接合界面の強度は踏面研摩子の規格値を満足することを確認したが、さらに衝撃負荷が繰返された場合の接合界面の健全性を検証した。

繰返し接触耐久試験には図6に示す高速回転疲労試験装置を用い、φ500mmの小径車輪に対して踏面清掃装置によって踏面調整子試作材を接触させた。なおこの試作材には4章で述べた形状は反映されていない。試験は走行中の輪軸の左右変位を考慮して表3に示す条件で実施した。試験は図6に示すように可能な限り潤滑材部分とフランジ部のみを接触させることで研摩材と潤滑材の界面に剪断方向の力を作用させるような位置関係で行った。途中、摩耗によって踏面側（研摩材側）への接触が生じた際には踏面清掃装置の角度を微調整し再度初期状態に近づけて試験を継続した。繰返し数は、車輪変位測定時の走行距離あたりの踏面清掃装置動作回数0.47回/kmに基づき、日車キロ1000km・交換周期180日から得られる動作回数が約84,000回であることから、90,000回を目標として実施した。

本試験では実車の踏面清掃装置空気配管に設置される空気絞りを設けず、動作空気タンクから電磁弁を介して踏面清掃装置のシリンダに直接空気圧が供給される構成とした。これにより、試作材が停止した車輪に接触すると反響音が生じる程度の衝撃状態とし、実車を上回る衝撃を伴う接触荷重を負荷した。

試験前後の試作材の外観状態と試験後の浸透探傷結果

表3 繰返し接触耐久試験の試験条件

試験片	踏面調整子 (J01 使用)
試験車輪	SSW-QR φ500 新幹線円弧踏面
速度	130 km/h 一定
踏面清掃装置	1-SC01143
動作空気圧	490 kPa
押付力	500 N
押付／緩解時間	2 s / 3 s
繰返し回数	92,841 回
累計作用時間	51.6 h

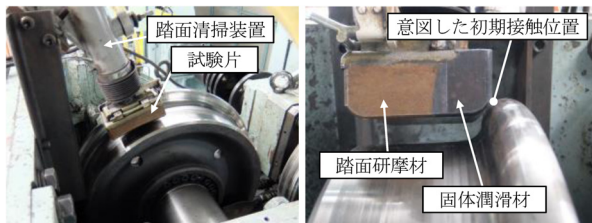


図6 繰返し接触耐久試験の装置構成と接触位置



図7 繰返し接触耐久試験後の試験片の浸透探傷

を図7に示す。試験終了後の試験片には、潤滑材部分はもとより接合界面にも傷や欠損は見られなかった。この結果において、踏面調整子に対して実車での上回る衝撃を伴う摩擦荷重を作用させた場合でも固体潤滑材および接合界面に損傷等は見られないことから、実車適用に強度上の問題はないと判断した。

6. 現車での耐久性能確認試験

6.1 耐久性能確認試験概要

定置試験での摩耗低減性能と強度を確認し現車搭載用の形状を決定した踏面調整子（衝撃強度の観点から材質はJ01）について、実車に搭載した際の車両部材としての耐久性能を確認するため、現車搭載試験を行った（図8）。搭載部位は踏面清掃装置のあるT車の1台車4部位とし、編成内の他のT台車は既往の踏面研摩子を使用した。

実施した現車搭載試験の概要は以下の通りである。

- ① 試験車両 振子特急車両 A 系 B 編成 6 号車 T 車
- ② 試験部位 6 号車 第 2 台車 車輪 No. 5～No. 8
- ③ 走行距離 189,881.4 km（出場～第 2 回交番検査）

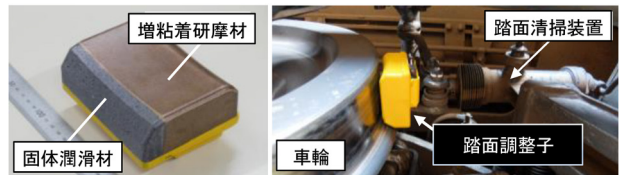


図8 踏面調整子と実車取付状態

6.2 耐久性能確認試験結果

踏面調整子（取付部位5～8位）と同一車両の踏面研摩子（取付部位1～4位）の走行距離に対する質量の推移を図9に示す。比較部位の踏面研摩子については継続使用品のため開始時点の質量は新品質量を示すものではない。試験期間中、踏面調整子供試品に割れ・欠け等の損傷や異常摩耗、かじり等は発生しなかった。踏面調整子の摩耗量は現用研摩子と同等であった。交換周期については既往踏面研摩子と同様の基準での取替判断に

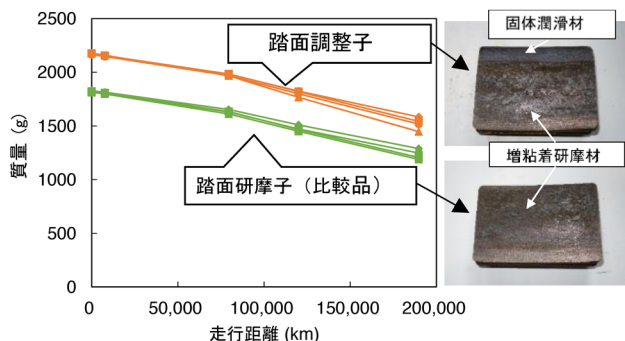


図9 踏面調整子実車搭載時の質量変化と外観

よって、現用の踏面研磨子と同様に交番検査2回帰まで使用可能であった。以上より踏面調整子は踏面研磨子の互換品として実車適用可能と判断した。

7. 現車での車輪摩耗低減効果検証試験

7.1 効果検証試験の概要

上述の耐久性能確認試験により踏面調整子は踏面研磨子の互換品として実車適用可能であることが確認された。次に実車における車輪フランジの摩耗低減性能を検証するため、編成内の複数部位に踏面調整子を搭載して長期使用し、車輪の摩耗傾向を調査し同時期に同一線区を走行する同型式車両の摩耗傾向と比較した。

搭載数は踏面清掃装置を有する編成内T車3両中2両の両台車計16部位とし、それ以外のT台車では既往の踏面研磨子を使用した。同時期に同一線区を走行した同型式車両の車輪と比較して車輪摩耗低減効果を評価した。実施した効果検証試験の概要は以下の通りである。

- ① 試験車両 振子特急車両 A 系 B 編成 T 車 2 両
- ② 試験期間 171 日間（出場～第 2 回交番検査）
- ③ 走行距離 約 194,000 km
- ④ 比較編成 A 系 G 編成（B 編成と共通運用・A 編成の 29 日後に出場）

試験車両と比較編成の比較車両、同一編成内の参照車両の位置関係を図 10 に示す。

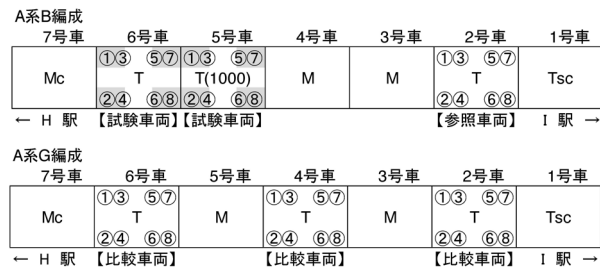


図 10 試験車両と比較車両・参照車両の位置

7.2 効果検証試験の結果

車輪踏面形状の変化について、車輪フランジ部の摩耗量を算出してフランジ摩耗低減効果を評価した。算出に際し踏面形状測定値に対し以下のように補正計算を行った。

通常、フランジ摩耗の評価にはフランジ幅の変化量（減少量）が用いられる。車輪のフランジ幅は、踏面基準位置（車輪背面から 65mm 位置）の車輪踏面から垂直方向に一定距離（JR 在来線では 10mm）外方の水平線がフランジと交わる部分の寸法として定義される。このため、踏面の摩耗（凹摩耗）によって基準位置が下方に移動した場合、フランジ寸法が増大する。車両走行に伴

うフランジ寸法の変化量（減少量）は、踏面の摩耗による見かけ上のフランジ寸法の増大が減算された値であるため、踏面の摩耗がゼロである場合を除き実際のフランジの摩耗量よりも小さな値となる。これを補正しフランジの物理的な摩耗量を算出した。さらに、車輪径によって走行距離あたりのレールとの接触回数が異なることから、上記のフランジ摩耗量を、当該車輪の回転回数の設計車輪径の車輪の回転回数に対する比率（車輪径比率の逆数）で除し、車輪径差の摩耗量への影響を補正した。

試験車両、参照車両および比較車両の車輪各部位のフランジ摩耗量（補正值）の推移を図 11 に示す。フランジ摩耗量を走行距離で除したフランジ摩耗率の推移を図 12 に示す。走行距離の増加にともないフランジ摩耗量が増加する。一方フランジ摩耗率は当初ばらつきが大きいのが走行距離の増加にともないばらつきが減少した。これはフランジ寸法の推移として一般的な挙動である。

試験車両、比較車両および参照車両のフランジ摩耗率を比較すると、試験車両のフランジ摩耗率は走行距離が近い比較車両のフランジ摩耗率と比較して平均で約 40% 低かった。また試験車両のフランジ摩耗率は参照車両と比較して平均で約 30% 低かった。試験終了時点での試験車両と比較車両のフランジ摩耗率を図 13 に示す。誤差棒は最大・最小を示す。

試験車両と参照車両の試験後の車輪フランジ部について、可搬型蛍光 X 線分析装置により表面元素分析を行った結果を表 4 に示す。試験部位の車輪フランジの表面からは Mo が検出された。測定により得られた特性 X 線エネルギー分散スペクトルを図 14 に示す。検出元素の大部分は Fe だが、試験部位では微弱ながら Mo のピークが認められた。試験部位から検出された Mo は踏面調整子に含まれる MoS₂ に由来すると考えられる。このことから踏面調整子の潤滑成分が車輪フランジに付着し摩耗低減に寄与したものと推定した。

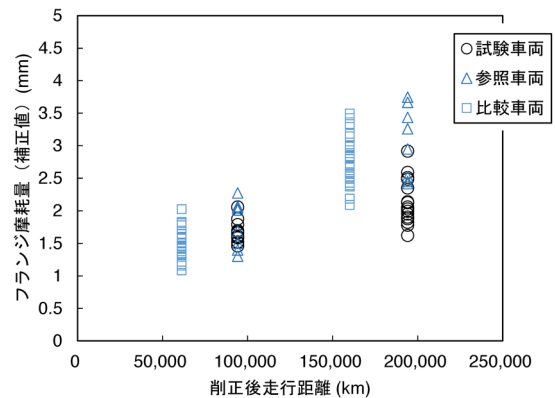


図 11 削正後走行距離に対する各車両の車輪フランジ摩耗量（補正值）

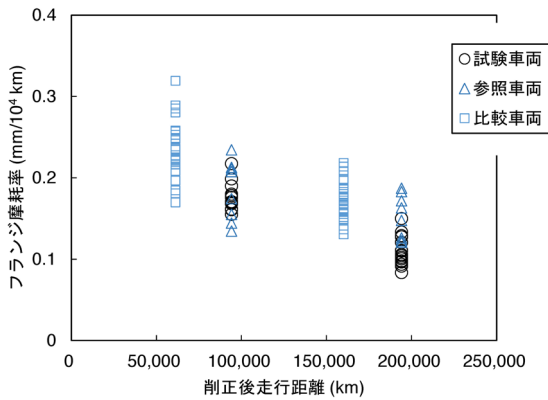


図 12 削正後走行距離に対する各車両の車輪フランジ摩耗率

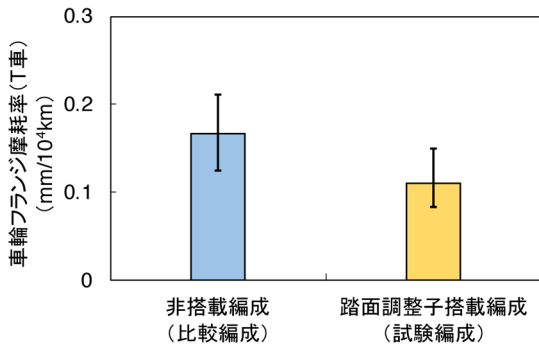


図 13 削正後走行距離約 19 万 km 時点での各車両のフランジ摩耗率

表 4 試験部位車輪および参照部位車輪表面の蛍光 X 線分析装置による元素分析結果

元素(抜粋)	Fe	Si	Mn	Mo
試験部位の表面組成 (%)	98.5	0.29	0.5	0.04
参照部位の表面組成 (%)	89.9	0.17	0.65	-

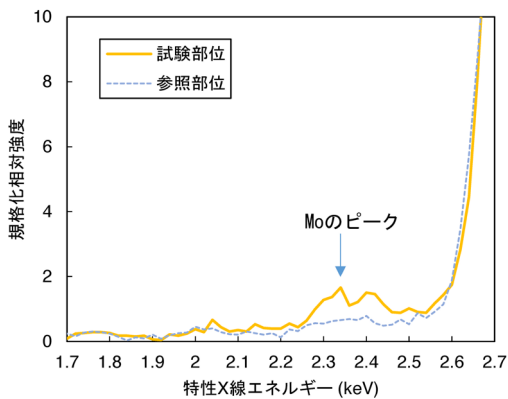


図 14 試験部位車輪および参照部位車輪表面の特性 X 線エネルギー分散スペクトル

8. まとめ

車輪フランジ潤滑および踏面増粘着の機能を統合し、車輪踏面部の増粘着効果を維持しつつフランジ部の摩耗低減が可能な車輪摩擦材（踏面調整子）を開発した。開発品の概要と評価結果は以下の通りである。

- ① 開発材は、車輪踏面部に踏面研磨材、フランジ部に固体潤滑材が接触するよう構成され、踏面研磨子と互換性を有し、既存の踏面清掃装置に無改造で取り付け可能である。
- ② 振子特急車両の走行中の輪軸の台車枠に対する左右変位を測定し、踏面調整子に求められる機能を満足する形状設計を行った。
- ③ 開発材のシャルピー衝撃強度は、踏面研磨材／固体潤滑材の境界部分を含め、旧 JRS 規格で踏面研磨子に規定された値を満足した。
- ④ 開発材は、回転する車輪に対して実機を上回る条件での約 10^5 回の繰返し衝撃接触試験において、割れ・欠け等の損傷やき裂が生じなかった。
- ⑤ 開発材を、踏面研磨子に替えて振子特急車両の 1 台車に搭載し、長期耐久試験を行った。その結果、開発品に割れ・欠け等の損傷や異常摩耗やかじり等が発生しないこと、摩耗量は踏面研磨子と同等であること、踏面研磨子と同様の交換基準を適用して踏面研磨子と同等の走行距離まで使用可能であることを確認した。
- ⑥ 踏面研磨子に替えて開発材を振子特急車両の 2 両 16 部位に長期搭載し、車輪フランジ部の摩耗低減効果を確認した。その結果、同時期に同一線区を走行した同型式車両と比較して車輪フランジの摩耗率が平均で約 40% 低減していた。また、試験車輪にフラット等は発生しなかった。試験車輪のフランジ表面から固体潤滑材の成分が検出されたことから、潤滑成分が車輪フランジに付着し摩耗低減に寄与したものと推定される。

謝 辞

踏面調整子の開発に多大なご尽力をいただいた上田ブレーキ株式会社ならびに同社の関係各位に深く感謝の意を示します。現車試験に多大なご協力をいただいた九州旅客鉄道株式会社ならびに同社の関係各位に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 萬谷 太郎, 村越 史明, 瀧川 光伸: 車輪とレールの潤滑手法の研究, Technical review JR East, (17), 59-63, 2006