

## 表面改質法による車輪の摩耗低減に向けた基礎検討

松井 元英\*      中村 誠\*\*      柿嶋 秀史\*  
伴 巧\*      深貝 晋也\*      久保 俊一\*\*\*

### Improvement of Wear Resistance of Solid Lubricant Coated Wheel Material Aimed at Application to Railway Wheel Flange

Motohide MATSUI      Makoto NAKAMURA      Hideshi KAKISHIMA  
Takumi BAN      Shinya FUKAGAI      Shunichi KUBO

We investigated the wear resistance of surface modified wheel specimens with solid lubricant coatings in dry rolling/sliding contact wear tests under a harsh loading and sliding condition, which aimed at an application of its surface modification technique to railway wheel flange. Their wear resistance property was closely relevant to the surface roughness and shape on a specimen prior to the coating process. We fabricated the prototype wheel with a surface modified flange and then performed quasi-static rolling contact tests with the prototype wheel and raw rail.

キーワード：車輪／レール，表面改質，ショットピーニング，固体潤滑，表面形状

#### 1. はじめに

産業分野で広範に利用されている表面改質技術は、その技術的進歩に伴い、様々な材料表面を改質可能としている。表面改質は、対象とする材料に不足する材料特性を改善できるため、高度に発達した産業社会を支える重要な材料技術の一つとなっている。その用途は様々で、産業機器構成部品の寿命延伸のための耐摩耗性向上、防錆、疲労強度向上、デザイン性を重視した装飾や着色技術等に利用されている。また、様々な表面改質技術から、目的、用途やコスト等を踏まえ、適切な手法が選択される。

鉄道車輪は鉄道の基幹部材である。この部材は、材質、熱処理や圧延方法の改良で鉄道の使用に適うように材料開発されてきた。しかし、昨今の鉄道車両の高速化、快適化や省メンテナンス化等の要求の高まりから、車輪に更なる特性向上による保守コスト低減が望まれるようになった。車輪は摩耗による形状変化や踏面に発生した熱き裂等を適宜削正しながら使用されている。しかし、車輪各部に要求される材料特性（耐摩耗特性、耐熱き裂性や転がり疲労強度等）が異なるため、これらの諸特性を考慮して車輪材の特性向上を行い、保守コストを低減する必要がある。そこで、我々は、鉄道車両の急曲線通過時に高面圧高すべり接触による摩耗が問題となる車輪フランジとレールゲージコーナー部の耐摩耗特性向上を目指し、固体潤滑被膜を用いた表面改質法の車輪フランジ

部への適用を基礎的に検討してきた<sup>1)</sup>。現在、この摩耗対策には車両上からの塗油、もしくは、地上からのグリース塗布等が実施されているが、フランジ部への適切かつ適量の散布が難しい。

本研究では、室内基礎試験により、ショットピーニングおよび固体潤滑被膜技術を用いた表面改質による耐摩耗特性を向上できるような下地処理を下地表面形状の観点から検討した。また、室内試験の結果に基づき、実物の鉄道車輪フランジ部にその表面改質加工を試み、車輪フランジとレールゲージコーナー部の接触を準静的に再現したしゅう動試験を行った。

#### 2. 耐摩耗特性向上に影響する表面改質制御因子

本表面改質法では、図1に示すように耐摩耗特性に影響を与える様々な因子が存在する。

##### (1) 被膜性状

固体潤滑被膜の成分である二硫化モリブデン、グラファイトおよびバインダの材質、それらの体積比、粒子径や分散状態が、固体潤滑被膜としての性能に大きな影響を及ぼす。また、被膜厚さは長期的な耐摩耗特性に影響すると考えられる。

##### (2) 下地表面性状

固体潤滑被膜の耐摩耗特性を十分に発揮させるために、被膜を付与する下地性状を適切に選択する必要がある。本表面改質法では、ショットピーニングにより下地処理を行うため、下地性状に影響を及ぼす因子として、下地表面形状、ショット材の噴射圧、加工時間、ショット材

\* 材料技術研究部（摩擦材料）  
\*\* 前 東京農工大学 大学院生  
\*\*\* 材料技術研究部

特集：材料技術

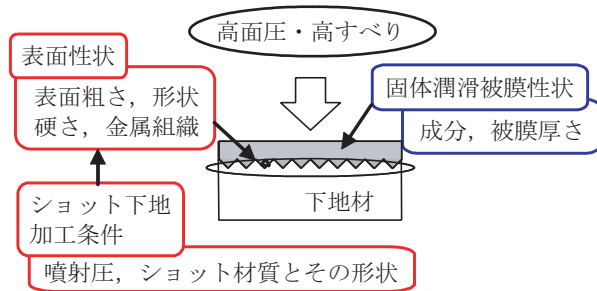


図1 耐摩耗特性向上に影響する因子

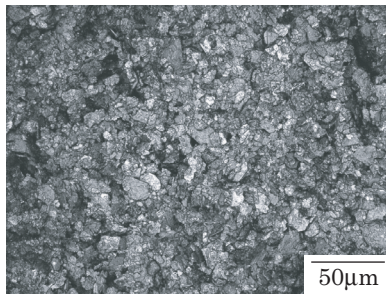


図2 開発した薄膜固体潤滑被膜

の材質および形状等がある。また、下地処理により、対象物に表面粗さ、金属組織、表面状態や硬さ等の下地性状の変化をもたらす。

以上のように影響因子は複数存在し、これらが高面圧高すべり条件下での耐摩耗特性に複雑に影響を及ぼすと考えられる。

### 3. 耐摩耗特性向上の検討

#### 3.1 耐摩耗特性向上のための薄膜固体潤滑被膜の開発

耐摩耗特性向上を目指して開発した薄膜固体潤滑被膜を図2に示す。被膜成分は、二硫化モリブデン、グラファイトおよび結合材である。液状材の被膜成分を対象物へ付与後、室温で乾燥させ、被膜化させている。本検討では、この開発被膜を用いて被膜性状の影響を一定とした。その上で、特に耐摩耗特性に大きな影響を及ぼすと考えられる下地表面粗さに着目し、加工条件を変化させて、種々の下地表面粗さを有する試験片を作製し、耐摩耗特性に与える影響を評価した。試験片には、現行車輪の踏面から切り出した小型車輪試験片(φ30×8mm)を

使用した。下地加工として試験片円筒面にショットピーニングを行い、触針式表面粗さ計による下地表面粗さの測定後、薄膜固体潤滑被膜をスプレーもしくは刷毛塗りで付与した。その後、室温で十分に乾燥させ、電磁膜厚計により、被膜厚さを測定した。被膜厚さは20μm程度とした。

#### 3.2 耐摩耗特性向上のための下地表面粗さおよび被膜形成方法の検討

下地加工に使用したショット材とその加工条件を表1に示す。ショット材には、容易に入手できる市販の球状ガラスビーズ(表中名称：G)および多角形状アルミナ粒子(表中名称：A)を選択した。また、これらを組み合わせ合わせた複合下地加工も行った。その後、薄膜固体潤滑被膜を付与し、2円筒転がり摩擦摩耗試験により、耐摩耗特性を評価した。相手材として、曲線用熱処理レール(HH340)の頭頂部から切り出した小型レール試験片を用いた。試験片の大きさおよび試験片円筒面の算術平均粗さは、それぞれφ30×8mmおよびRa=0.2μm程度とした。試験条件は鉄道車両の急曲線走行時の車輪/レール接触を想定し、接触面圧を900MPaおよびすべり率を9%とし、試験片回転数を816rpmとした。試験雰囲気は大気中乾燥状態とした。また、固体潤滑被膜が摩耗して消失するまでを潤滑効果と定義した。試験開始から固体潤滑効果が低減し、摩擦係数が増大し、最大値を示すまでの総試験回転数を被膜の潤滑効果とした。固体潤滑被膜の潤滑性が維持されている間は、車輪やレール試験片はほとんど摩耗しない。そのため、潤滑効果を増大させることが、車輪やレールの耐摩耗特性の向上に寄与する。

車輪試験片に異なる形状を有するショット材による下地加工を行った後、薄膜固体潤滑被膜を付与し、2円筒転がり摩擦摩耗試験を実施した。下地表面粗さの幅方向の評価指標であるSmと潤滑効果の関係を図3に示す。Smは測定長さにおける表面粗さの凹凸の平均間隔を表す。多角形状ショット材のみを使用した場合(Sm ≤ 0.2mm程度)は、球状ショット材を使用した場合に比べて、潤滑効果は低下し、そのばらつきも大きい傾向があった。しかし、全体的な傾向として、潤滑効果はSmの増大とともに増加し、その後減少する傾向があった。この傾向は高面圧高すべり条件下で薄膜固体潤滑被膜の

表1 使用したショット材種類およびその加工条件(表中記号G：ガラスビーズ、A：アルミナ粒子)

名称	主材質	形状	粒径(μm)	噴射圧(MPa)	加工時間(s)
G#10	SiO <sub>2</sub>	球状	1400-2000	0.9	60
G#40	SiO <sub>2</sub>	球状	350-500	0.9	60-90
G#100	SiO <sub>2</sub>	球状	150-180	0.9	60
G#1500	SiO <sub>2</sub>	球状	≤ 20	0.1	30
A#36	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	多角形状	425-500	0.3-0.9	30-60
A#60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	多角形状	212-250	0.3-0.9	30-60
A#1000	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	多角形状	11.5 ± 1.0	0.1	30

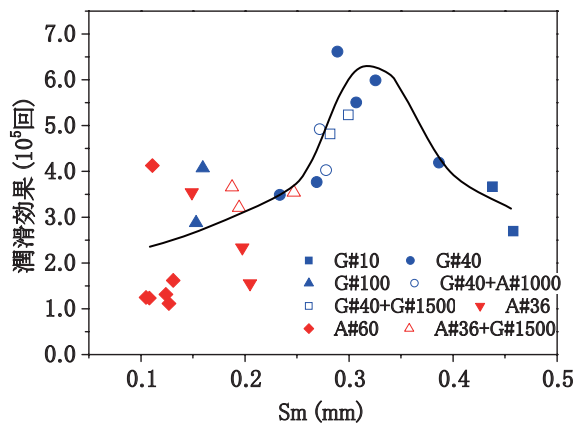


図3 Smと潤滑効果の関係

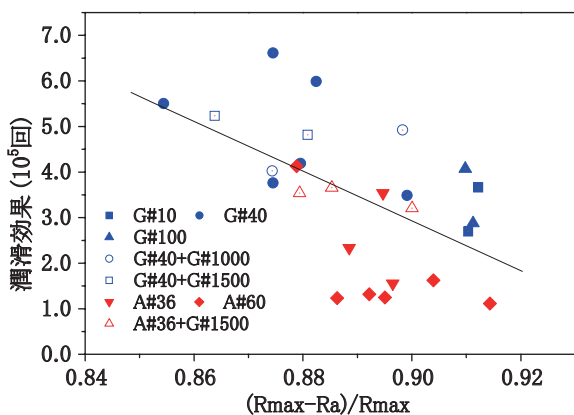


図4 均質性評価指標 (Rmax-Ra)/Rmaxと潤滑効果の関係

潤滑効果を効果的に得られる適切なSmの範囲があることを示唆している。そのため、使用目的に適したSmを得られるような下地加工条件を決定していく必要があり、Smはその加工指針になると考えられる。今回の検討で、高面圧高すべり条件に適した表面粗さの幅方向の評価指標Smの範囲はおおよそ0.3~0.35mmと考えられる。

次に、下地表面粗さの高さ方向の均質性を表す評価指標として、(Rmax-Ra)/Rmaxを導入し、それと潤滑効果との関係を図4に示す。ここで、Rmaxは測定長さにおける表面粗さの突起部と谷部の高低差の最大値を表す。また、Raは測定長さにおける表面粗さの算術平均粗さを表す。従って、今回導入した指標である(Rmax-Ra)/Rmaxが小さくなるほど、平均的な高さ評価指標であるRaと局所的な高さ評価指標Rmaxが近づき、表面粗さの突起部が均一の高さを有していくことを意味する。図4に示すように、多少のばらつきは見られるものの、下地加工に使用したショット材の種類、形状や加工方法等に依らず、全体的傾向として、(Rmax-Ra)/Rmaxが小さくなり、表面粗さの高さ方向の均質性が向上すれば、潤滑効果は増大していた。そのため、下地表面粗さが均一な突起高さを有しつつ、その高さが大きくなるように下地表面粗さを形成すれば潤滑効果は増大すると考えられ

る。したがって、図3に示すSmと同様に、高さ方向の均質性を表す評価指標である(Rmax-Ra)/Rmaxは、潤滑効果を増大させていく上での加工指針になると考えられる。また、図3および図4に示すように、下地加工に球状ショット材を使用した方が大きな潤滑効果が得られた。

以上のことから、高面圧高すべり条件下で固体潤滑被膜の潤滑効果を効果的に得られる下地表面粗さが存在すると考えられる。従って、潤滑効果を効果的に得られる下地表面粗さを得るためには、Smおよび(Rmax-Ra)/Rmaxを参考に、球状ショット材で適切な下地表面粗さを有するような下地加工を行う必要があると考えられる。

#### 4. 耐摩耗特性を更に向上させるための検討

薄膜固体潤滑被膜を用いた表面改質法の耐摩耗特性に及ぼす検討結果から、高面圧高すべり条件下で耐摩耗特性を向上させる下地表面粗さが存在することを見出している。そこで、より長期的に耐摩耗特性向上に寄与する固体潤滑の効果を得られるように、被膜を厚膜化できるような検討を行った。固体潤滑被膜はその材料特性のため、単純な厚膜化は耐摩耗特性向上に寄与しない。そのため、図5に示すような表面形状を検討した。表面形状検討のための試験片は、車輪踏面、および、比較として曲線敷設用レール(HH340)頭頂部から切り出した小型車輪およびレール試験片(φ30×8mm)を用いた。切り出した小型試験片に対し、その厚さ方向に1列2個の穴加工を円筒面全体に施した。また、その列間隔を試験片軸中心から10°、12°および15°に変化させた。車輪試験片には、12°(以下、W-12)および15°(以下、W-15)の2種類を準備した。一方、レール試験片には、10°(以下、R-10)、12°(以下、R-12)および15°(以下、R-15)の3種類を準備した。それぞれの列での穴加工位置は、試験片の大きさ制限から列毎に図5に示すように交互にずらした。これらの試験片に、前述した高面圧高すべり接触下で固体潤滑被膜の潤滑効果を向上できる表面粗さを考慮して、ショットピーニング下地加工を行なっ

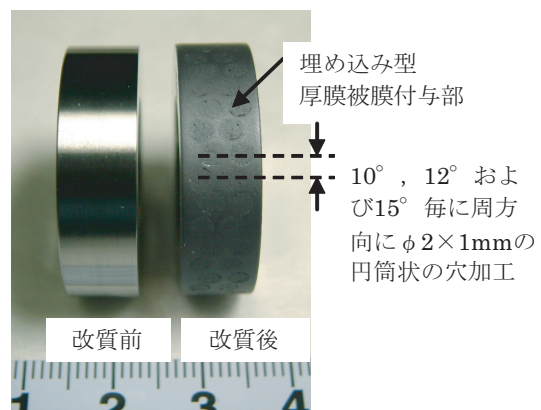


図5 試験片外観

特集：材料技術

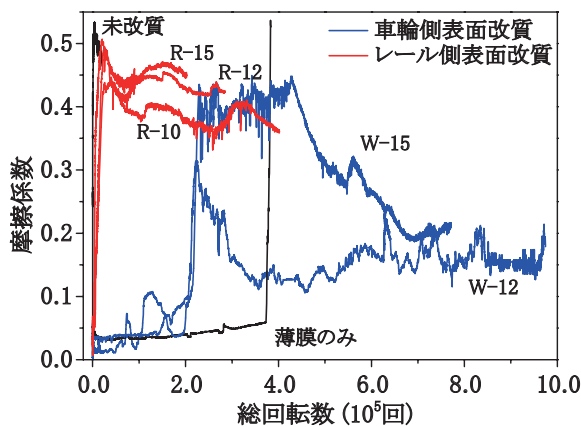


図6 車輪およびレール試験片の摩擦特性比較

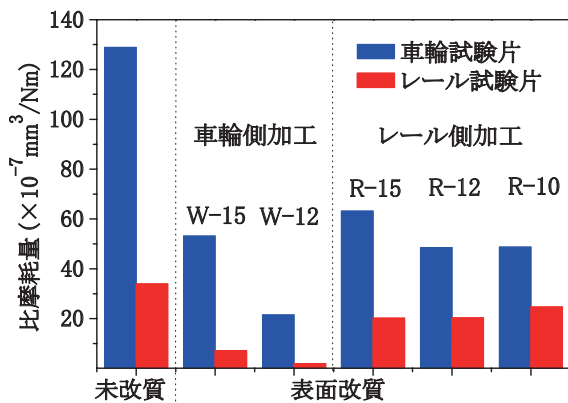


図7 車輪およびレール試験片の摩擦量比較

た。その後、脱脂洗浄を行い、穴加工部に厚膜固体潤滑被膜を埋め込み、試験片円筒面全体に薄膜固体潤滑被膜を付与した。ここで、厚膜固体潤滑被膜は加熱硬化処理した。作製したそれぞれの車輪およびレール試験片の摩擦摩耗特性を2円筒転がり摩擦摩耗試験により評価した。相手材として、車輪試験片を表面改質した場合は曲線用熱処理レール (HH340) の頭頂部から切り出したレール試験片を用い、レール試験片を表面改質した場合は車輪踏面から切り出した車輪試験片を用いた。相手材試験片の大きさおよび円筒面の算術平均粗さは、それぞれφ30×8mmおよびRa=0.2μm程度とした。試験条件は、接触面圧を900MPaおよびすべり率を9%とし、試験片回転数を816rpmとした。試験雰囲気は大気中乾燥状態とした。また、試験機に取り付けた加速度計が所定の値を示した時点で、試験終了とした。

作製したそれぞれの車輪およびレール試験片の摩擦特性を2円筒転がり摩擦摩耗試験で評価した結果を図6に示す。比較として、未改質および薄膜固体潤滑被膜のみを付与した時の平均的な摩擦特性を併記する。未改質のものと比較して、表面改質された車輪およびレール試験片は、低摩擦係数を発揮できる固体潤滑被膜の機能により、試験中の摩擦係数を低下させていた。しかし、車輪側を表面改質すると試験中の摩擦係数は、レール側のも

のに比べ、さらに低下する傾向にあった。特に車輪側を表面改質したものの中には、W-12のように、その摩擦係数が多少の変動は見られるものの長期的に0.1~0.2程度で推移する状態になるものがあった。これは、穴加工部に埋め込んだ厚膜固体潤滑被膜と相手材への移着膜が適切に低摩擦化へ寄与していたためと考えられる。しかし、W-15に見られるように、加工状態を変化させると摩擦特性に大きな影響が表れることから、適切な加工状態が存在すると示唆される。また、レール側を表面改質した方が車輪側のものより、摩擦係数が高くなる傾向を示した。レール試験片は車輪試験片と比較して、もともと耐摩耗特性に優れている。そのため、レール試験片と埋め込んだ厚膜固体潤滑被膜の摩耗度合いの釣り合いが取れていなかったことや車輪側への移着膜が適切に形成されていなかったこと等が、原因として考えられる。一方、図6に示すように、固体潤滑の機能が発揮された状態で摩擦係数が通常0.1以下を示す薄膜固体潤滑被膜のみで表面改質した場合と比較すると、今回検討したものはより高摩擦になる。これは厚膜固体潤滑被膜が機能している状態では、試験片接触面全体が被膜等で覆われておらず、厚膜固体潤滑被膜と移着膜部分にだけ固体潤滑剤が存在するためである。そのため、摩擦係数も薄膜固体潤滑被膜のみのものと比較して高くなった。しかし、車輪とレール双方の耐摩耗特性を向上させるには、長期的な低摩擦係数維持が必要となる。薄膜固体潤滑被膜のみでは、被膜が存在している間は耐摩耗特性を期待できるが、摩滅後、摩耗量は大きく増大すると考えられる。そのため、表面改質の対象となる部材が摩耗しても、厚膜被膜の固体潤滑効果を得られるように適切な表面形状を形成することが、長期的な耐摩耗特性向上に寄与する低摩擦係数維持に適すると考えられる。

厚膜固体潤滑被膜を付与した車輪およびレール試験片の平均摩擦量を2円筒転がり摩擦摩耗試験により評価した結果を図7に示す。未改質のものと比較して、表面改質した試験片の摩擦量は大きく減少していた。しかし、図6に示したように表面改質の加工状態の変化が摩擦特性に大きな影響を与えるため、摩擦量にもその影響が現れていた。以上のことから、適切な表面改質加工が低摩擦化による耐摩耗特性向上に寄与し、レール側よりも車輪側を表面改質した方が、耐摩耗特性をより向上させる可能性があると考えられる。

### 5. プロトタイプ表面改質車輪の作製と車輪/レール摩擦摩耗試験

これまでの試験で得られた知見を元に、実物車輪フランジ部(修正円弧踏面, フランジ角65°)に表面改質加工を試みた。フランジ部を表面改質したプロトタイプ車

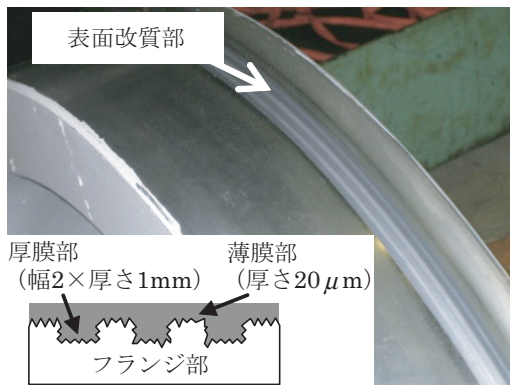


図8 フランジ部表面改質プロトタイプ車輪の外観と表面改質部の構造

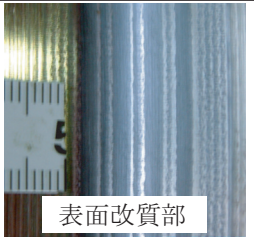
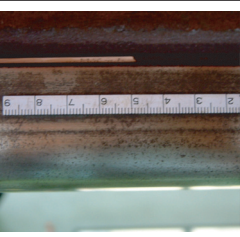
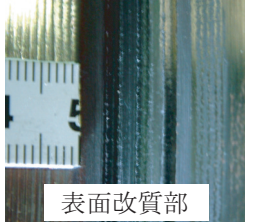
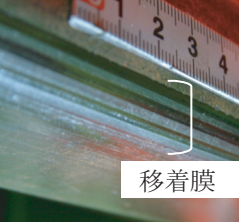
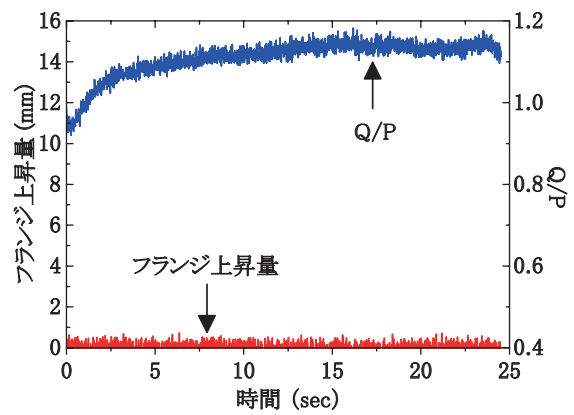
	車輪フランジ部	レールゲージコーナー部
試験前	 表面改質部	
50回しゅう動後	 表面改質部	 移着膜

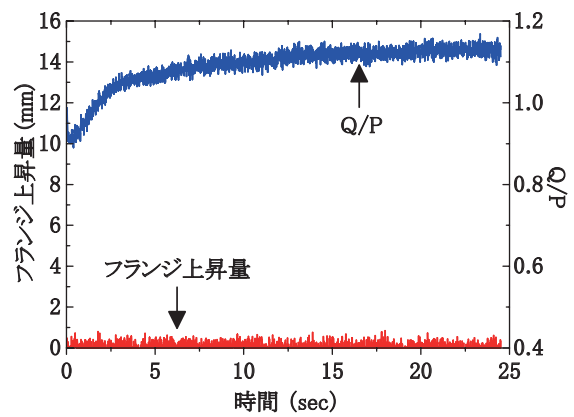
図9 表面改質車輪のしゅう動試験結果 (P=Q=37kN, アタック角1.5°)

輪を図8に示す。図8に示すように、当該表面改質技術は、今後詳細な加工方法を検討する必要はあるものの、実物車輪に適用可能と考える。この車輪のフランジ部には厚膜固体潤滑被膜を付与するためにフランジ部に数本の溝加工を施した。溝はNC旋盤で加工した。溝加工後、ショットピーニング下地加工により適切な表面粗さをフランジ部へ付与した。その後、脱脂洗浄等を行い、加熱硬化させた厚膜固体潤滑被膜と薄膜固体潤滑被膜を付与した。

試作したフランジ部表面改質車輪と新品50kgN熱処理レール (HH340) を用いて、しゅう動試験を行った結果を図9および図10に示す。また、比較として、新品未改質車輪 (修正円弧踏面, フランジ角65°) および新品50kgN熱処理レール (HH340) を用いて、同様の試験条件でしゅう動試験を行った結果を図11および図12に示す。試験は、車輪/レール往復運動ユニット<sup>2)</sup>を用いて、実際の車輪/レールの接触状態を準静的に再現した。ここで、試験に使用した車輪には、NC旋盤を用いて送り



(a) 1回目



(b) 50回目

図10 表面改質車輪のフランジ上昇量とQ/P値の変化

速度1mm/revで転削したものを用いた。表面改質車輪には、同条件で転削後、フランジ部を約2mm幅で約2mm間隔をもつ4本の溝を転削により加工した。その後、ショットピーニング下地加工および脱脂洗浄等を経て、加熱硬化させた厚膜および薄膜固体潤滑被膜を付与した。厚膜被膜部の摩擦摩耗特性や被膜剥離特性が、長期的な耐摩耗特性向上のために特に重要になると考えられる。そのため、試験前に薄膜部を出来るだけ研磨により除去し、試験を行った。試験に使用したレールはともに、試験前に頭頂面およびゲージコーナーをヤスリで研削し、#80仕上げとした。また、試験は乾燥状態で、その条件は輪重37kN、横圧37kN、アタック角1.5°およびしゅう動速度を20mm/sとした。

図9および図10に示すようにフランジ部を表面改質した場合には、当該試験条件下で50回しゅう動後も、被膜表面が相手レールと馴染んだ状態を呈する程度で、特に大きな状態変化はなかった。また、相手レールのゲージコーナー部にはしゅう動による移着膜が形成されていた。さらに、アタック角および横圧の大きな試験条件であるにもかかわらず、ゲージコーナー表面にしゅう動痕は確認されず、当該表面改質法による固体潤滑の効果が発揮されていた。一方、図11および図12に示すように、

特集：材料技術

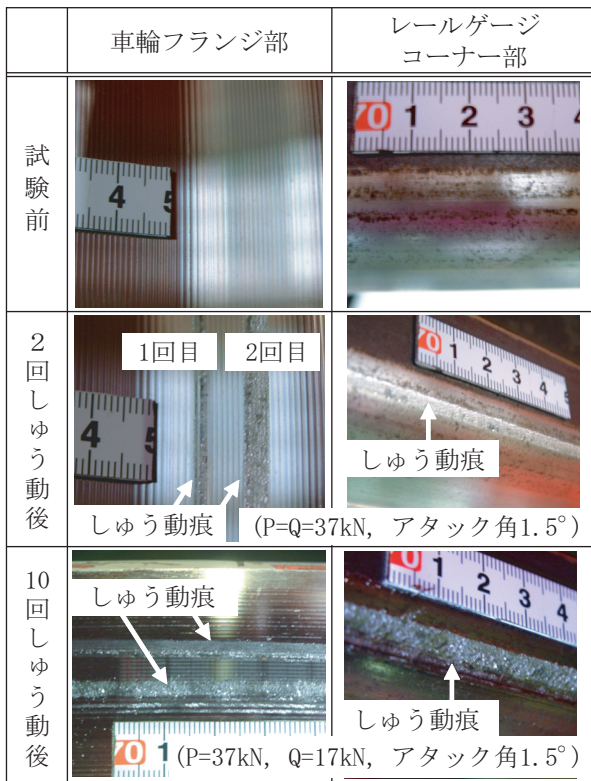


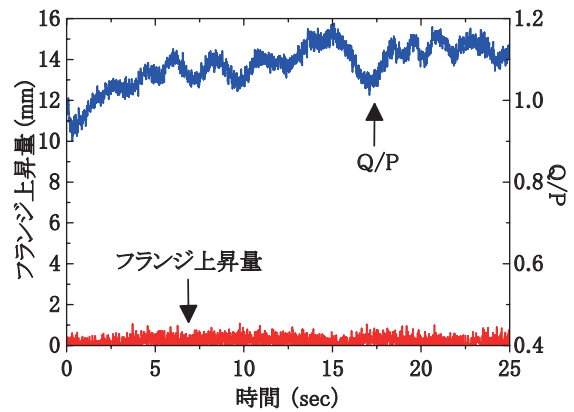
図11 比較未改質車輪のしゅう動試験結果

同じ試験条件で比較試験を行うと、試験1回目直後にフランジ部およびゲージコーナー部にしゅう動痕が形成されていた。2回目試験時には、フランジ部が乗り上がり始め、乗り上がりしゅう動痕が形成された。そのため、横圧を約1/2の17kNにまで下げ、フランジ部が乗り上がらないようにして、その後の試験を行った。10回目試験後、フランジ部およびゲージコーナー部には、アブレッシブ摩耗や凝着摩耗等による明らかなしゅう動痕が確認された。以上のように、当該表面改質法による摩耗低減に与える固体潤滑の効果を短期的には確認できたと考える。今後は、長期的な効果の検証が必要になる。

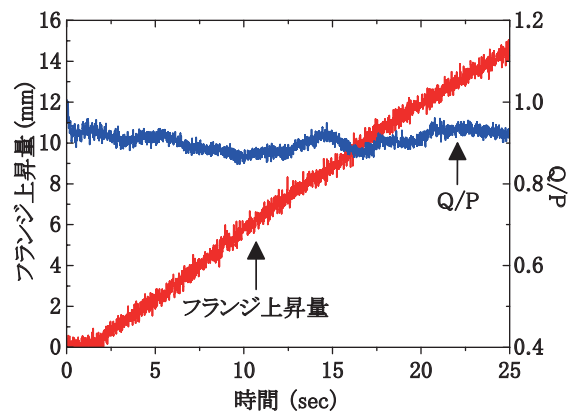
6. まとめ

簡易で低コスト化への可能性を有するショットピーニングおよび固体潤滑被膜を用いた表面改質法による車輪フランジおよびレールゲージコーナー部の耐摩耗特性向上を目指し、室内基礎試験による検討を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) 耐摩耗特性に優れた薄膜固体潤滑被膜を開発し、耐摩耗特性を向上させる下地表面粗さを検討した。その結果、急曲線での車輪/レールの接触条件を想定した高面圧高すべり試験条件下で、耐摩耗特性を向上させるのに適した下地表面粗さが存在した。その加工指針となるのが、表面粗さの幅方向の指標  $S_m$  と高さ方向の均質性指標  $(R_{max}-R_a)/R_{max}$  であった。表面改質のために車輪試



(a) 1回目



(b) 2回目

図12 比較未改質車輪のフランジ上昇量とQ/P値の変化

験片を下地加工する場合、 $S_m$ を0.3~0.35mm程度にし、 $(R_{max}-R_a)/R_{max}$ を出来るだけ小さくすれば、耐摩耗特性が向上すると考えられる。また、耐摩耗特性を向上させる下地加工には、球状ショット材が適していると考えられる。

(2) 固体潤滑被膜の厚膜化が可能な下地形状を適正化することで、低摩擦化による耐摩耗特性向上が可能と考えられる。また、レール側よりも車輪側を表面改質する方が固体潤滑による低摩擦化の効果を得られやすくなり、耐摩耗特性を向上できると考えられる。

(3) 検討した表面改質加工が実物車輪のフランジ部に適用可能であること示した。また、車輪フランジ部とレールゲージコーナー部の接触を準静的に再現したしゅう動試験で、短期的ではあるが、耐摩耗特性に寄与する固体潤滑の機能が効果的に発揮されていたことを確認した。

文献

- 1) 松井元英, 柿嶋秀史, 森久史, 佐藤幸雄, 岩淵研吾: 複合表面改質法による車輪鋼の摩耗低減効果, 鉄道総研報告, Vol.21, No.2, pp.39-44, 2007
- 2) 石田誠, 石田弘明, 伴巧: 車輪/レールに関する大型実験設備, RRR, Vol.6, pp.8-12, 2004