

2608 表面改質技術による車輪/レール間の摩擦・摩耗の低減

○ 金 鷹 (鉄道総研)

[土] 石田 誠 (鉄道総研)

[機] 鈴木 秀人(茨城大学)

[機] 中村 雅史(茨城大学)

大瀧 鉦介(茨城大学)

Reduction of Friction and Wear between Wheel and Rail by means of Surface Modification Technique

Ying JIN (RTRI)

Makoto ISHIDA (RTRI)

Hideto SUZUKI (Ibaraki University) Masashi NAKAMURA (Ibaraki University) Kosuke OTAKI (Ibaraki University)

For sharp curves, oil lubrication has generally been used to decrease the friction of coefficient between wheel and rail. In this study, a surface modification technology was developed to control friction and wear. Stresses were analysed in considering the roughness of wheel matrix to estimate the durability of coating film. Based on the stress analyses, some types of composite coating films were developed to improve coating adhesion, and their characteristics of traction coefficient and anti-wear were estimated. The MoS₂ composite coating showed a low friction of 0.06. This implies that the possibility of preventing wheel flange climbing in dry environment. As a result, it was proved that Nitrided-treatment decreased the wear amount to one-third.

キーワード：表面改質，摩擦係数，車輪/レール摩耗，車輪乗り上がり，弾塑性 FEM

Keyword: Surface modification, Friction coefficient, Wheel/rail wear, Wheel flange climbing, Elastic-plastic FEM

1. はじめに

近年問題となっている急曲線低速走行時の車輪乗り上がり脱線¹⁾において、車輪とレール間の摩擦係数が注目されている。一方、曲線において、外軌レール上を車輪フランジが大きな接触圧力の下に大きな滑りを伴って進むことにより、車輪フランジの直立摩耗とレールゲージコーナの側摩耗が著しく、頻繁な削正および交換による膨大な労力と費用が投入されている。このように、急曲線における車輪/レール間の摩擦・摩耗の低減は、車両走行安全性や車両・軌道の保守にとって極めて重要な課題となっている。現在急曲線の摩耗ときしり音などを防止するため、潤滑油が多く用いられているが、適正な塗油および塗油位置の管理についてはまだ様々な問題を抱えている。

本報告は、表面改質技術により車輪に摩擦係数の小さいまた安定した潤滑膜を生成し、曲線走行時車輪フランジ/レールゲージコーナの接触における摩擦・摩耗を低減すること、および摩擦低減により車輪の乗り上がり脱線を防ぐことを目的に、運輸施設整備事業団の公募型研究プロジェクトで採用された茨城大学との共同研究について紹介する。初めに、車輪材の表面粗さを考慮した皮膜の応力解析を行い、表面改質皮膜の強度および耐久性を向上させるための方策を検討した。この検討を踏まえて、実用化できる表面改質コーティング技術により、表面改質皮膜を施したモデル車輪を用いて粘着力特性試験および摩耗試験を行い、表面改質による摩擦・摩耗低減および車輪の乗り上がり脱線防止の効果を検討した。

2. 車輪材の表面粗さを考慮した応力解析

2.1 解析概要モデル

既往の研究²⁾より、車輪とレールが接触する極表面層では、表面粗さによる発生応力が平滑面より 10 倍程度大きくなる場合もあることが報告されている。このことから、表面改質皮膜と車輪基材の結合強度を検討するために、表面粗さを考慮して、弾塑性有限要素モデルにより応力解析を行った。ここでは、粗さを有する車輪材表面に厚さ 2 μ m の DLC (ダイヤモンドライクカーボン) 膜を密着させることとした。また、その DLC 膜の硬さが車輪材の約 5 倍であるため、DLC 膜を弾性モデル、車輪材を弾塑性モデルとし、車輪材表面を平滑面と中心線平均粗さ (Ra) 0.4 μ m の余弦波を想定した表面の 2 種類とした。具体的な解析条件として、半径 2.5mm の剛体圧子を垂直方向に 10N (最大ヘルツ接触応力 1200MPa) で押付け、水平方向の接触面の摩擦係数として 0 と 0.2 の 2 通りを想定した。表 1 に解析条件、図 1 に解析モデルを示す。

2.2 解析結果および考察

図 2 に、表 1 に示す解析条件により、最大ミーゼス相当応力 (von Mises) および最大せん断応力の解析結果を示す。図より、最大ミーゼス相当応力およびせん断応力が車輪基材の粗さと表面摩擦係数の増加と共に大きくなったことがわかる。特に、粗さがある場合、せん断応力が著しく増加した。一方、実際の粗さと比較すると、図 1 (2) に示す余弦波の曲率がかなり緩やかであると考えられ、実際の表面凹凸の曲率半径が小さく、応力状態が今回の計算より厳しくなることが考えられる。

図3に、摩擦係数を0.2とし、車輪基材の表面粗さを考慮した接触応力分布の1例を示す。図より、最大ミーゼス相当応力が皮膜と基材の境界面に発生することがわかる。一方、摩擦係数が0.2の場合、車輪基材と皮膜の境界面が平滑面でも、最大応力は依然として膜の表面ではなく境界面で発生することがわかった。

以上の解析結果より、境界面の応力を低減するためには、

表1 解析条件

ケース No.	摩擦係数	下地粗さ (μm)	膜厚さ (μm)
1	0	0	2
2	0.2		
3	0		
4	0.2	0.4	

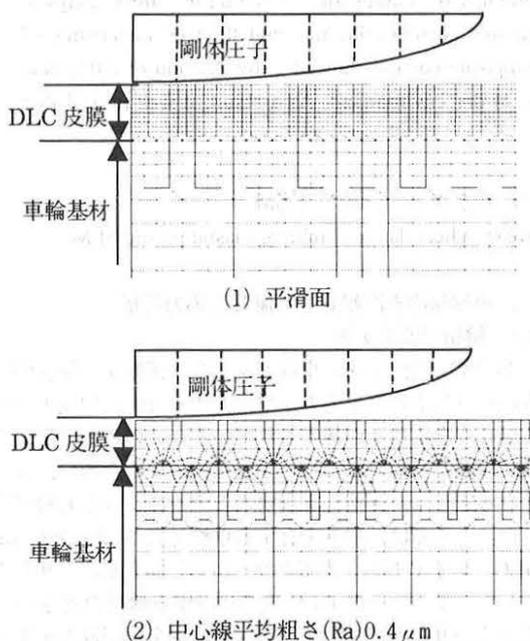


図1 車輪材の表面粗さを考慮した弾塑性有限要素モデル

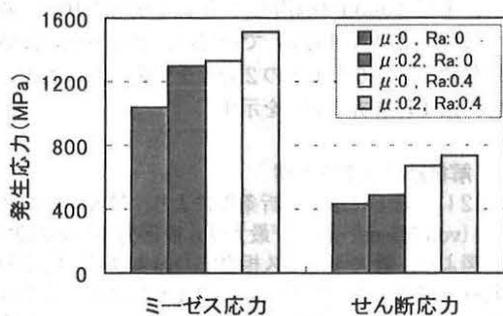


図2 粗さおよび摩擦係数の影響による発生応力の違い

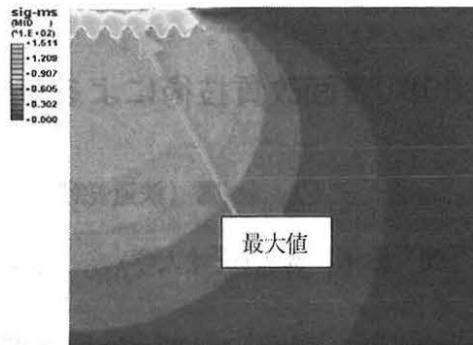


図3 車輪基材の表面粗さを考慮した場合のミーゼス相当応力分布 (表面摩擦係数0.2)

応力集中をある程度まで緩和するために必要な表面粗さの車輪材表面に仕上げることで、あるいは大きな応力に耐えられる中間層を設ける(複合皮膜化)ことにより、基材と皮膜との密着性と耐久性を向上させることが有効であると考えられる。

3. 試験片レベルにおける表面改質皮膜の評価

車輪に使用できる摩擦・摩耗特性を持つ皮膜を検討するため、試験片レベルにおける表面改質皮膜の評価試験を行った。鉄道車輪用高炭素鋼材(SSW-Q3R)の直径20mmディスク上に数種類の表面改質皮膜をUBMS(アンバランスドラッグマグネトロンスパッタ装置)を用いて生成した。直径6mmの超硬合金ボールとのすべり摩擦・摩耗試験、超微小硬度計による皮膜の硬度およびヤング率の測定、スクラッチ試験機による密着力の測定を実施した。その結果³⁾、摩擦係数はDLCおよびMoS₂(二硫化モルブデン)皮膜が最も低く、また耐久性と密着性に関してはDLC皮膜が他の改質皮膜より優れていた。

4. 表面改質モデル車輪の摩擦・摩耗特性評価

4.1 表面改質試験片の概要

試験片レベルでの結果からDLC皮膜およびMoS₂皮膜を選定した。既報³⁾では、試験片レベルと同様な成膜方法でモデル車輪(直径170mm,平均粗さ1.2 μm)をDLC皮膜に施し、図4に示す2円筒転がり摩擦試験機を用いて、接触圧力1000MPaでのすべり率とトラクション係数の関係を求めた。その結果、潤滑ありでは最大トラクション係数は約0.1であったが、一方、無潤滑の乾燥状態では僅かなすべり率の増加と共にトラクション係数が急激に上昇し、皮膜のはく離が発生した。これらの試験結果により、密着性の悪さがモデル車輪への適用化を阻む主要因となったことが確認された。そこで、皮膜の強靱化と密着性に着目して、複合表面処理により皮膜のはく離の改善を検討した。図5に3種類の複合皮膜の構成を示す。ここで、皮膜と基材の中間層を接着剤の役割として設けるためラジカル窒化を前処理として施した。窒化層の深さは、約150 μm であった。複合皮膜1には、窒化処理を施した後、耐摩耗性を持つ硬

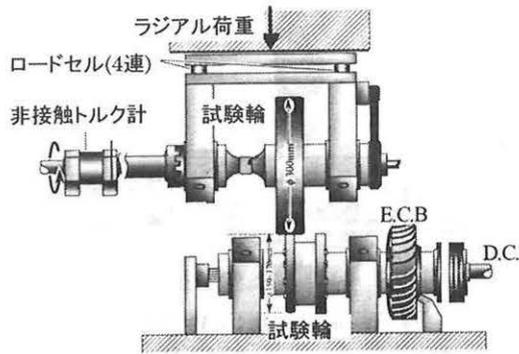
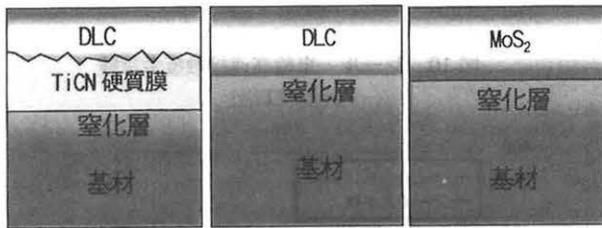


図4 2円筒転がり接触試験装置



複合皮膜1 複合皮膜2 複合皮膜3

図5 表面改質複合皮膜の構成

質膜 TiCN を、その上に DLC 皮膜をそれぞれイオンプレーティング法により皮膜した。なお、DLC の膜厚は $2.7\mu\text{m}$ であった。また、複合皮膜 2 と 3 は、窒化層の上に DLC および MoS_2 の皮膜を UBMS 装置により創成し、膜厚は $3.5\mu\text{m}$ と $3.0\mu\text{m}$ であった。一方、膜と基材の境界面の発生応力を低減し、できる限り界面粗さを小さくするために、モデル車輪試験片をバフ研磨し、中心線平均粗さ R_a を $0.1\mu\text{m}$ にした。

4.2 表面改質による摩擦低減性能の評価

図 4 に示す 2 円筒転がり接触試験装置を用いて、表面改質皮膜を施したモデル車輪の転がり摩擦実験を行った。試験輪として、直径 170mm と直径 300mm のモデル車輪を使用し、直径 170mm の方に表面改質処理を施した。接触圧力は、様々な電車の負荷を考慮し、地下鉄、在来線、新幹線等の実負荷に相当する最大ヘルツ接触圧力として 750MPa 、 850MPa 、 1000MPa を設定した。また試験を荷重が低い順から行い、モデル輪の周速度を 40km/h とした。

初めに、潤滑状態として、複合皮膜 (1~3) を施したモデル車輪に 0.3g 、 0.1g および 0.02g の潤滑油を塗布し、繰り返し摩擦試験を行った。その結果、荷重および潤滑量によらず、最大トラクション係数は 0.1 程度で、はく離もせず良好な状態を示した。図 6 に、潤滑量 0.02g および接触圧力 1000MPa の場合の粘着力特性を示す。図より、いずれの複合皮膜においても、乾燥状態に近いあるいは接触圧力が厳しい場合でも、粘着係数が 0.1 程度で良好な潤滑特性が得られた。

次に、複合皮膜の適用可能性を検討するために、同じ最

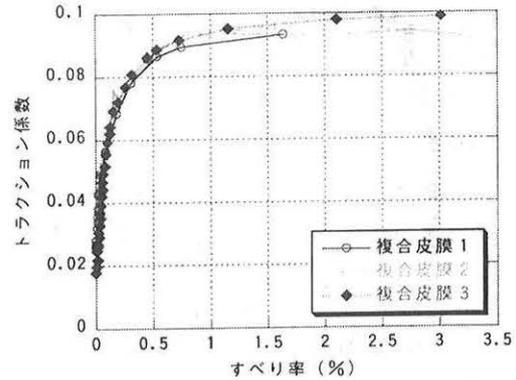


図6 潤滑状態の複合皮膜の粘着力特性 (潤滑量 0.02g 、接触圧力 1000MPa)

大ヘルツ接触圧力で乾燥状態の下に繰り返し転がり摩擦試験を行った。

図 7 に複合皮膜 1 の粘着力特性を示す。図より、1 回目の荷重が小さい (750MPa) 場合に、0.2 程度の粘着係数が得られたが、繰り返し試験を続けることにより皮膜状態が摩擦等により変化し、トラクション係数が上昇した。2 回目の接触圧力 820MPa および 3 回目の接触圧力 1000MPa の場合に、粘着係数が 0.3 程度で安定していることが分る。

図 8 に複合皮膜 2 の粘着力特性を示す。図より、広い荷重範囲で安定した 0.2~0.25 の粘着係数が得られ、複合皮膜 2 の耐久性および耐摩耗性は複合皮膜 1 より優れていた。

図 9 に複合皮膜 3 の粘着力特性を示す。図より、荷重の変化にかかわらず、0.06 程度の非常に小さい粘着係数が得られた。この複合皮膜は、通常の潤滑油 (粘着係数 0.1 程度) より潤滑性能が優れており、ドライ潤滑の可能性を示した。

一方、試験終了後に表面改質したモデル車輪の表面を観察した結果、潤滑、乾燥の両環境において皮膜の摩耗は確認されたものの、接触面において 3 種類の皮膜はいずれもはく離が発生しなかった。これは窒化層などの中間層の介入や車輪基材の表面粗さを小さくすることが表面の接触応力をよく分散し、皮膜界面の応力を低減させたと考えられる。

4.3 表面改質による耐摩耗性の評価

表面改質皮膜の耐摩耗性評価には、レール・車輪高速接触疲労試験装置を用いて摩耗試験を行った。図 10 に、試験装置の概略図を示す。車輪試験輪の直径は 500mm 、レール試験輪の直径は 350mm であり、断面形状および材質はそれぞれ車輪とレールの実物と同じである。試験条件として、接触圧力 800MPa (実輪重 50kN に相当) に設定し、窒化処理なしの普通車輪と窒化処理された車輪 (窒化層深さ $150\mu\text{m}$) を用いた。なお、車輪試験輪の周速度を 40km/h とした。

図 11 に、車輪試験輪の繰り返し数と摩耗進みの関係を示す。図より、車輪試験輪の 210 万回転後 (走行距離約

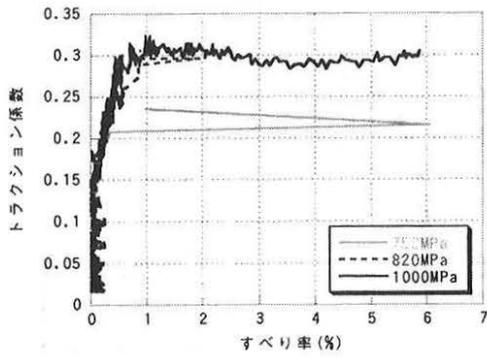


図7 複合皮膜1の粘着力特性

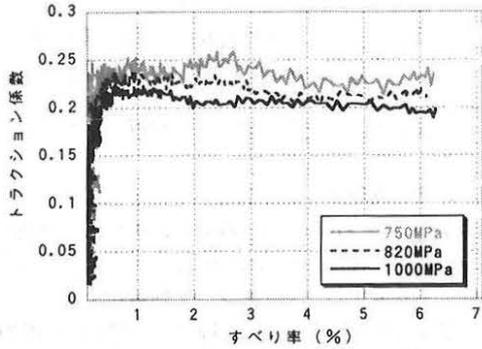


図8 複合皮膜2の粘着力特性

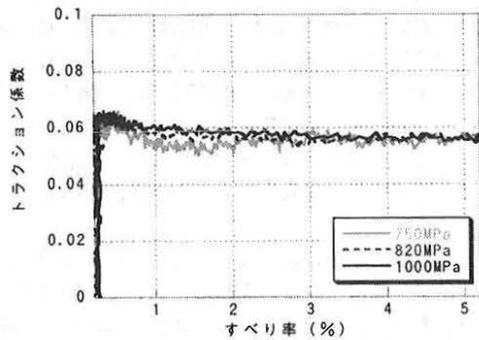


図9 複合皮膜3の粘着力特性

3300kmに相当)の踏面の摩耗量を比較すると、窒化処理車輪の方が普通車輪の1/3程度になった。ただし、今回の摩耗試験は車輪踏面のみを対象としたため、今後はフランジ部の耐摩耗性の効果も検証する必要がある。

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 表面粗さを考慮した車輪材における皮膜の応力解析を行った結果、最大相当応力や最大せん断応力が皮膜と基材の境界面に発生することから、基材と皮膜との密着性あるいは耐久性には車輪材の表面粗さが大きな影響を及ぼすことを明らかにした。
- (2) 2円筒転がり試験機を用いて、粘着力特性試験を実施

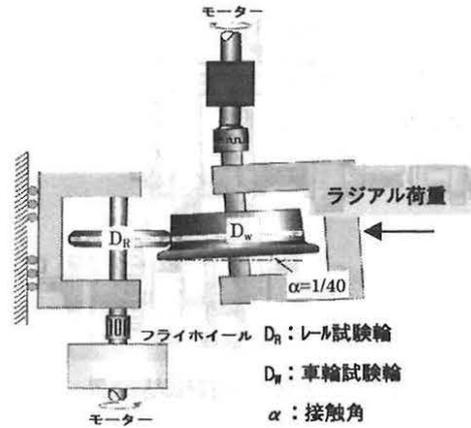


図10 レール・車輪高速接触疲労試験装置の概図

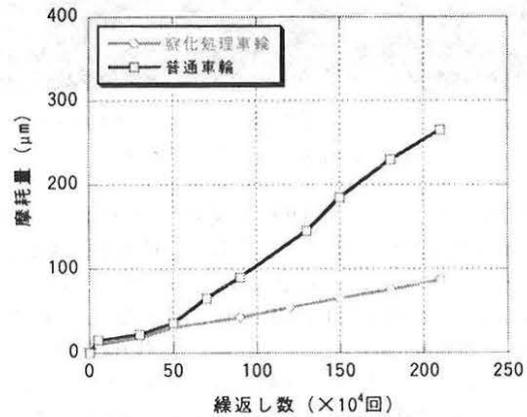


図11 窒化処理による踏面の摩耗量の違い (ヘルツ接触圧力800MPa、50kNの輪重に相当)

した結果、強硬化と密着性を考慮した複合皮膜を施したモデル車輪は、はく離せずに、0.3以下の低い粘着係数を示した。MoS₂窒化処理複合皮膜は、荷重の変化にかかわらず、乾燥状態でも0.06程度の非常に小さい粘着係数を示した。従来の潤滑油より粘着係数が小さく、ドライ潤滑の可能性を示した。

- (3) 大型転がり試験機を用いて、窒化処理を施したモデル車輪の摩耗試験を実施した結果、表面窒化処理することにより耐摩耗性が3倍程度向上する可能性を確認した。

参考文献

- 1) 事故調査検討会：高速営団日比谷線目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書，2000年10月
- 2) 石田誠，陳樺，フランクリン：表面粗さを考慮したシェリングの予防削正効果，J-Rail 2000，pp.97-98，2000
- 3) 石田誠他：表面改質皮膜による車輪/レール間摩擦制御，鉄道力学シンポジウム論文集，No.5，2001