

1105 曲線部における車輪・レール潤滑剤の適用性評価

○陳 樺 (鉄道総研) 深貝 晋也 (鉄道総研) 曾根 康友 (鉄道総研)
正 [機] 土井 久代 (鉄道総研) 伴 巧 (鉄道総研) 正 [土] 名村 明 (鉄道総研)
正 [機] 宮本 岳史 (鉄道総研) 鈴木 淳一 (鉄道総研) 正 [機] 鈴木 貢 (鉄道総研)
正 [機] 嵯峨 信一 (鉄道総研) 木川 定之 (鉄道総研) 正 [機] 辻江 正裕 (鉄道総研)

Assessment of Application of Lubricant to Wheel/Rail Interface in Curves

H. CHEN & co-authors, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho Kokubunji-shi, Tokyo

Lubrication between wheel and rail is generally known to decrease the friction between wheel and rail, resulting in the reduction of wheel flange wear, rail gauge face wear, low-rail corrugations and the squeal noise. However, the type of lubricants and their supplying method adopted by railway operators are not necessarily reasonable or effective. This paper describes a fundamental study on the basic characteristics of various types of lubricants such as effect on traction behavior of vehicle, spreading rate on the rail surface and effect on vehicle/track dynamic behaviors (focused on the lateral force interacting between wheel/rail interface), and propose appropriate lubrication method according to the track geometry of curves and train speeds.

Keywords : wheel, rail, lubricant, traction, lateral force, extension

1. はじめに

列車が曲線を通過する際に発生する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、レール頭頂面の波状摩耗などの主な原因の一つは、台車前軸で発生する横圧である。横圧を低減するためには、車両と軌道側の対策の他に車輪とレール間の摩擦係数を低減する潤滑剤の使用も有効である。車輪/レール潤滑システムは、潤滑の対象となる車輪/レールの接触部位により“外軌(車輪フランジ/レールゲージコーナ)潤滑”と“内軌(車輪踏面/レール頭頂面)潤滑”とに分類できる。外軌潤滑は、車輪フランジとレールゲージコーナ間の摩擦係数を低減して摩耗やフランジ音を抑制するために実施されるが、潤滑剤の付着範囲はレール頭頂面あるいは車輪踏面に拡大せず摩擦係数がより小さいことが望ましい。内軌潤滑は、半径の小さい曲線に発生する横圧を減らして波状摩耗やきしり音を抑制するために実施されるが、レール頭頂面に潤滑剤が存在することから、空転・滑走を起こし難く、制動距離の延伸が小さい潤滑剤が望ましい。国内で使用されている車輪/レール用潤滑剤は、油系、グリース系、水溶性潤滑剤、固体潤滑剤に分類され、潤滑剤の代替として安価な水が適用される場合もある。油系やグリース系は外軌側の摩耗と騒音を軽減する目的として広く使用されてきた実績はあるものの、車輪踏面やレール頭頂面に付着し、制動距離の延伸などが問題となった。近年、鉄道総研でブレーキ性能への影響が少ない油系潤滑剤(以後、既存試作品と呼ぶ)を開発し、性能確認を実施している¹⁾。また、波状摩耗を抑制する内軌用固体潤滑剤も開発し、実線路での追跡調査を行っている²⁾。一方、水は安価であるが、金属腐食という欠点があるため、防錆効果のあるバイオタイプの水溶性潤滑剤(以下、新規試作品と呼ぶ)を試作した。

本研究では、代表的な既存および新規潤滑剤の基本特

性(トラクション挙動、延び性、横圧低減効果、ブレーキ性能)を調べたうえ、車両運動シミュレーション手法により車輪/レール潤滑による横圧低減効果を評価した。それを踏まえて線区条件に応じた潤滑剤の適用性も検討した。以下に得られた結果を報告する。

2. 室内試験による潤滑剤の基本特性調査

2.1 トラクション挙動

空転または滑走を抑制するためには、巨視すべり領域ではすべり率の増大に伴ってトラクション係数が大きくなる潤滑剤が望ましい。本研究では、2円筒転がり接触試験機³⁾を用いて各種潤滑剤のトラクション挙動を調べた。試験時の速度は40km/h、荷重は3.5kN(最大ヘルツ接触圧力751MPa)とした。試験結果を図1に示す。

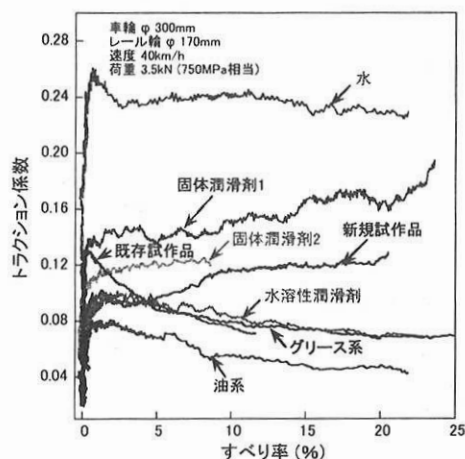


図1 各種潤滑剤のトラクション特性

図から、固体潤滑剤や新規試作品のトラクション係数がすべり率の増大に伴って大きくなったことから、これらは巨視すべりが生じにくい潤滑剤と考えられる。一方、グリース系、油系、水溶性潤滑剤のトラクション係数がすべり率の増大に従って小さくなるため、一旦滑走が起きたら、再粘着し難いことが考えられる。水の場合、微小すべり領域から巨視すべり領域にわたって上記のいずれの潤滑剤よりも高いトラクション係数が示され、また、すべり率の増大に従ってトラクション係数がほぼ一定値を維持することから、空転または滑走を起こしにくいものと考えられる。図中の微小すべり領域（約0.6%⁴⁾）でのトラクション係数に注目すると、新規試作品はグリース系や油系（既存試作品を除き）、水溶性潤滑剤と同程度に低く、かつ巨視すべり領域ではすべり率の増加に従って大きくなる挙動を有するため、車輪路面とレール頭面の接触部に使用する潤滑剤としては横圧低減と空転・滑走抑制の面から有望であると考えられる。

2.2 延び性の相対評価

地上から潤滑剤を供給する方式において、潤滑剤は車輪の回転によって引き延ばされるが、延び距離が長ければ長いほど地上装置の台数が少なくて済むので、コストの面では有利になる。本研究では、円盤/円筒型摩擦試験機を用いて各種潤滑剤の延び性評価試験を行った⁵⁾。潤滑剤の延び性を求める方法を図2に示す。図の上部は、試験片の動きを模式的に示したものである。車輪試験片が、潤滑剤を塗布した領域に入るとトラクション係数が下がっている様子が分かる。延びは初期乾燥状態のトラクション係数が、潤滑剤の介在により低下した後、再び初期乾燥状態の値に戻るまでの距離(S)とした。なお、一旦低下したトラクション係数は線形に再上昇すると仮定している。試験は一つの潤滑剤に対して塗布量を変えて複数回実施した。図3に各種潤滑剤の塗布量と相対延びの関係を示す。縦軸に示す相対延びとは試験機の1ストローク長(S_0)の距離を1として正規化した値である。

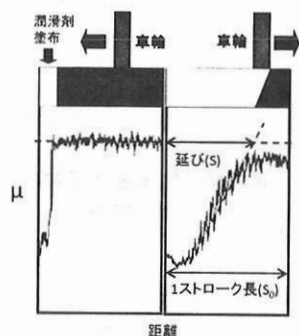


図2 延び性の評価法

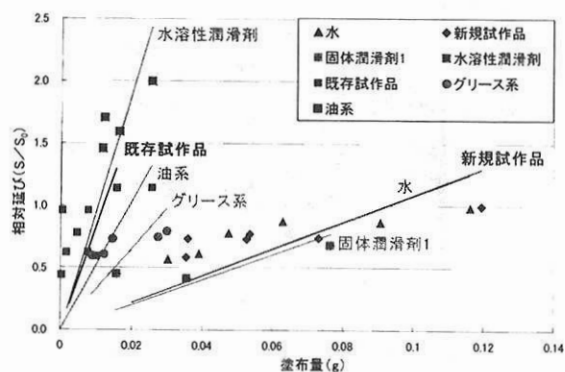


図3 各種潤滑剤の塗布量と相対延びの関係

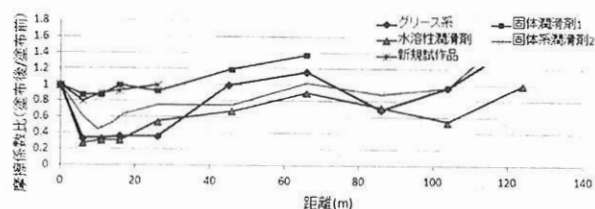
図から、データにばらつきはあるものの全ての潤滑剤において、塗布量の増加に伴って延びが増加する傾向を示した。そして、同じ塗布量の場合、水溶性潤滑剤の延びが一番良く、次に油系とグリース系であった。新規試作品や固体潤滑剤1の延び状況は水とほぼ同程度であった。

実際の列車走行は、車輪とレールの間の潤滑剤が一つの車輪により延ばされた後に残存し、その地点から後続の車輪によりさらに延ばされていくため、延びには潤滑剤の残存量が大きく影響していると考えられる。つまり固体成分を含むものや、油系やグリース系等乾燥し難いものは繰り返しの車輪通過により徐々に延びていく可能性がある。

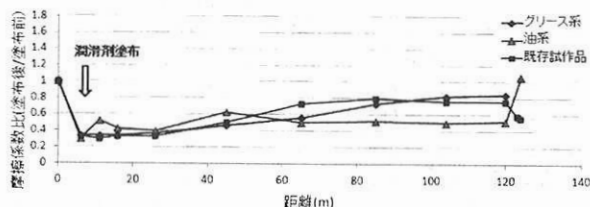
3. 所内試験線における潤滑剤の基本特性調査

3.1 摩擦係数測定による延び性の評価

曲線区間（半径160m、カント90mm、スラック10mm）において、各種潤滑剤を所定の塗布箇所（塗布箇所）に塗布したのち、試験車両（2両編成）が40km/hで通過した直後のレール面の摩擦係数を測定した。既存潤滑剤の塗布量は、過去に実施した営業線のレール面における油分付着量の調査結果の下限値を勘案して車輪（φ860mm）の一回転分に相当する長さのレール（2.7m）に対して約2mlを塗布した。新規試作品については、同じ長さのレールに対して約30mlを塗布した。図4に試験車両が塗布箇所を通過してからの距離とレール面摩擦係数の測定結果の関係を示す。縦軸は塗布前の摩擦係数を“1”と正規化している。塗布前の摩擦係数に戻るまでの距離を観察すると、内軌潤滑の場合は、固体潤滑剤1、新規試作品、グリース系、固体潤滑剤2、水溶性潤滑剤の順に延び距離が長くなっている。また、外軌潤滑の場合は、油系の摩擦係数が120m以後急に上昇したが、グリース系と既存試作品は塗布する前の摩擦係数に戻っていなかったため、両者の比較評価ができなかった。



(a) 内軌側



(b) 外軌側

図4 各種潤滑剤の延び状況

潤滑剤の塗布量の違いによる延び状況を図5に示す。レール（2.7m）に対して5mlと2mlを塗布して比較した。全体としてバラツキのあるものの、固体潤滑剤1や水溶性潤滑剤では延び距離に顕著な差が見られなかった。一

方、グリース系の場合、塗布量 5ml に比べ塗布量 2ml の伸び距離は比較的短かった。

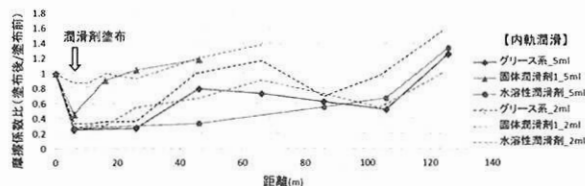
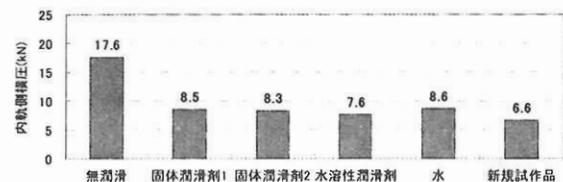


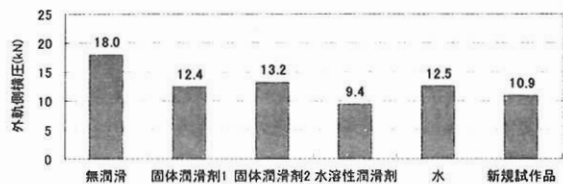
図5 潤滑剤の塗布量の違いによる伸び状況

3.2 横圧低減効果

曲線区間（半径 176m, カント 105mm, スラック 20mm）において、試験車両が内軌潤滑箇所を速度 40km/h で通過する際の横圧を測定した。潤滑剤として内軌用 4 種類と水を使用した。水と固体潤滑剤 2 は車載噴射装置を用い、固体潤滑剤 1、水溶性潤滑剤と新規試作品は、横圧測定箇所の前後約 20m 区間の内軌レール頭頂面に手塗り塗布した。各種潤滑剤条件下における先頭軸の内軌側と外軌側の横圧（平均値）を比較した結果を図 6 に示す。



(a) 内軌側横圧



(b) 外軌側横圧

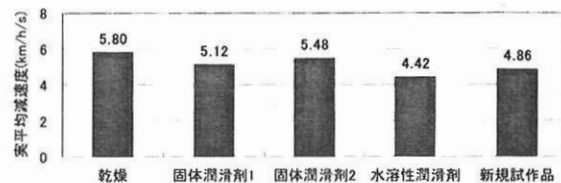
図6 各種潤滑剤の横圧測定結果

無潤滑（乾燥条件）と比べて内軌側横圧と外軌側横圧のいずれも潤滑により大幅に低下した。また、内軌側では新規試作品の横圧低減効果が一番大きく、外軌側では水溶性潤滑剤、新規試作品、固体潤滑剤 1、固体潤滑剤 2 と水の順に横圧低減効果が大きかった。

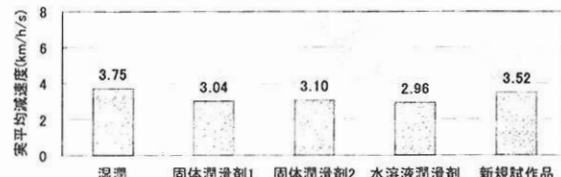
3.3 ブレーキ性能への影響

直線区間において、初速度 40km/h で通過してから空気ブレーキのみ（電気ブレーキなし）の常用最大（B7）ブレーキ試験を実施した。潤滑剤は内軌用 4 種類を使用した。固体潤滑剤 2 は先頭軸に取り付けたノズルから 0.1g/m の量をブレーキ区間全体に渡って片側の車輪とレールの接触部に噴射した。水分散した固体潤滑材 1 はブレーキ開始地点の手前から 3m の区間に 3.5ml を手塗りした。水溶性潤滑剤と新規試作品は走行直前に設置した塗布装置から通常の使用目安量 1ml/sec で片側のレール頭頂面に塗布したが、新規試作品の伸び性が劣るため、上記の塗布量に加え、ブレーキ全区間の片側レール頭頂面に追加塗布した。雨天を模擬した散水条件は、先頭軸

両側に取り付けた散水ホースより 4.00 /min の流量でブレーキ区間の手前から左右レールの頭頂面に散水した。測定した各種潤滑剤の実平均減速度を図 7 に示す。



(a) 乾燥条件



(b) 散水条件

図7 実平均減速度の測定結果

いずれの条件においても、潤滑剤の使用により実平均減速度が小さくなった。乾燥条件の場合、固体潤滑剤 2、固体潤滑剤 1、新規試作品、水溶性潤滑剤の順に実平均減速度が小さくなり、散水条件の場合、新規試作品を塗布した場合の実平均減速度はほかの潤滑剤と比べて高かった。一方、残りの 3 種類潤滑剤はそれほど大きな差が見られなかった。

4. 曲線部内軌と外軌の潤滑パターンの検討

鉄道総研が開発したマルチボディダイナミクスの手法によるプログラム⁶⁾を使用し、無潤滑、内軌潤滑、外軌潤滑、および内軌・外軌両方潤滑の 4 つの条件に関する内軌側横圧と外軌側横圧の計算を行った。シミュレーションに際して、車両モデルは通勤形電車相当の車両、車輪踏面形状はフランジ角度 65 度、フランジ高さ 27mm の修正円弧踏面の設計形状を用いた。この車両モデルの静止軸重は 58kN である。軌道モデルは JIS 50kgN レール頭頂面設計形状を持つ軌間 1067mm の狭軌で、曲線半径は 200m, 400m, 600m の 3 つの条件を設定した。カント量はいずれの曲線の場合も 105mm とし、スラックは 0mm とした。計算条件について、走行速度はそれぞれの曲線に対して、均衡速度および 50mm 相当のカント不足またはカント超過状態にある走行速度、合計 3 条件を設定した。平面線形を直線 50m → 入口緩和曲線 60m → 円曲線 100m → 出口側緩和曲線 60m と設定し、シミュレーションでは円曲線通過中の定常値に注目して内軌側横圧と外軌側横圧を求めた。

潤滑条件は、車輪とレール間の摩擦係数を変化させて表現し、乾燥の場合は 0.6、潤滑の場合は 0.1 と仮定した。

4.1 曲線半径が異なる場合（均衡速度）

曲線半径 200m, 400m と 600m におけるそれぞれの均衡速度で車両が走行する場合の内軌側横圧と外軌側横圧の計算結果を図 8 に示す。無潤滑に比べて、内軌潤滑は内軌側横圧と外軌側横圧が両方とも著しく小さくなり、外軌潤滑は大きくなる傾向が示された。また、内・外軌潤滑は内軌潤滑より内軌側横圧と外軌側横圧が僅かに大

きくなったことがわかる。曲線半径別に横圧を見ると、曲線半径 600m と大きい場合は、無潤滑でも外軌側横圧が小さいので、内軌潤滑による外軌側横圧の低減効果が小さくなる一方、内・外軌潤滑の場合は無潤滑よりむしろ大きな外軌側横圧が発生する傾向が現れた。一方、曲線半径 200m と 400m の内軌側横圧と外軌側横圧を見ると、内軌潤滑の場合に内軌側横圧と外軌側横圧が無潤滑に比べて半分以下に低下することが示された。

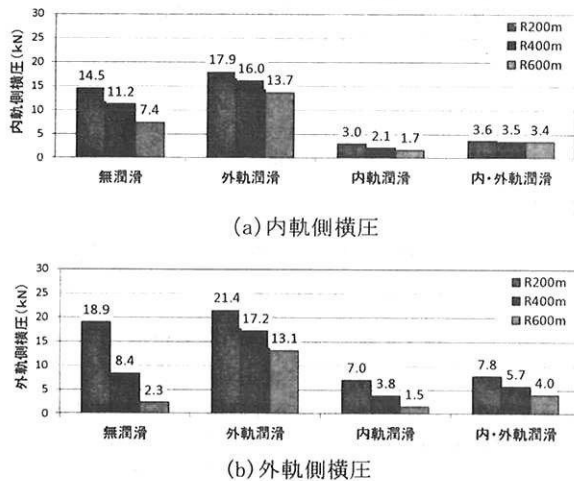


図 8 曲線半径が異なる場合 (均衡速度)

4. 2 曲線通過速度が異なる場合 (曲線半径 200m)

曲線半径 200m の曲線における車両の曲線通過速度が V1 (カント超過量 50mm), V2 (均衡速度), および V3 (カント不足量 50mm) のときの内軌側横圧と外軌側横圧の計算結果を図 9 に示す。前項の結果と同じように、内軌潤滑は内軌側横圧と外軌側横圧が両方とも著しく小さくなり、外軌潤滑は大きくなる傾向が示された。また、内・外軌潤滑の場合は内軌潤滑とほぼ変わらない横圧低減効果があった。一方、曲線通過速度別に見ると、無潤滑および何れの潤滑の場合も、曲線通過速度が高くなるほど、内軌側横圧が小さくなり、外軌側横圧が大きくなる傾向が示された。これは、曲線通過速度に応じて生じる遠心力が外軌側横圧の増加をもたらした結果と考えら

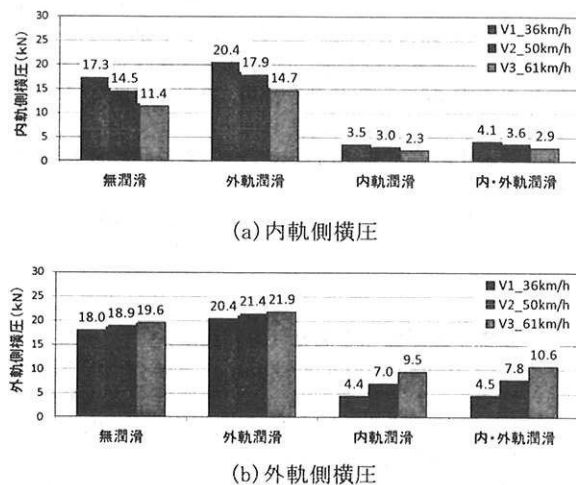


図 9 通過速度が異なる場合 (曲線半径 200m)

れる。無潤滑条件に対する他の三つの潤滑条件下の内軌側横圧と外軌側横圧の変化率に着目すると、曲線通過速度が均衡速度以下の場合は、内軌潤滑または内・外軌潤滑による内軌側横圧と外軌側横圧が無潤滑条件に比べて半分以下に低下した。一方、外軌潤滑の場合に外軌側横圧が無潤滑に比べて約 10% 大きくなることを示された。

上記のシミュレーション結果により、車両曲線通過時の外軌側横圧の低減に向けた潤滑方法として、内軌潤滑が外軌潤滑に比べて効果的であることが確認できた。

5. おわりに

(1) 内軌潤滑の場合、横圧低減効果のほかに、空転・滑走が生じ難いことが求められることから、比較的妥当な潤滑剤としては、固体潤滑剤が挙げられる。固体潤滑剤を地上から塗布する場合は、グリース系や油系、水溶性潤滑剤と比較して、延び性が劣るため、塗布装置の設置間隔を短くする必要がある。また、新規試作品は延び性が他のものと比較して小さいが、横圧低減効果やブレーキ性能において、固体潤滑剤と同等以上の性能を示した。

(2) 外軌潤滑の場合、今回比較したグリース系や油系では顕著な性能の差はなかった。なお、外軌潤滑は内軌潤滑を実施しても外軌側横圧の低減効果が十分でなく、外軌側のレール側摩耗が激しい場合に実施するのが良いと考えられる。

(3) 車両運動シミュレーションを用いて様々な線区条件ならびに潤滑条件における横圧低減効果を評価した。曲線半径が小さい場合は内軌潤滑による外軌側横圧低減効果が大きく、曲線半径の増大に従ってその効果は小さくなる傾向が示された。

謝辞

本研究を実施するにあたって助言を下さった石田誠氏 (鉄道総研), ならびに所内試験においてご協力をいただいた宮内瞳苗氏 (鉄道総研), 松井元英氏 (鉄道総研), 日比野澄子氏 (鉄道総研) に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 曾根康友, 鈴木淳一, 山崎大生, 田本芳隆, 古賀英俊: ブレーキ距離の増加を抑制する車輪/レール潤滑油, 第 14 回鉄道技術連合シンポジウム, pp. 69-70, 2007
- 2) 石田誠, 伴巧, 緒方政昭, 深貝晋也: 車輪/レール摩擦緩和システム実用化への取り組み, 鉄道車輛と技術, No. 123, pp. 11-14, 2006
- 3) 石田誠, 伴巧, 本卓也: 高精度転がり接触試験機の試作と一の実験結果, 鉄道技術連合シンポジウム, pp. 301-302, 1998
- 4) 上林賢治郎, 臼井俊一, 坂上啓, 新村浩, 岡田信之: 画像処理を用いた輪軸アタック角測定方法, J-Rail' 01, pp. 633-636, 2001
- 5) 深貝晋也, 伴巧, 陳樺, 名村明: “曲線内側レールへの摩擦緩和材の効果的な散布方法”, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 6, pp. 29-34, 2011
- 6) 宮本岳士, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析 (上下, 左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 64, No. 626, pp. 3928-3935, 1998