

論文の内容の要旨

論文題目 鉄道における車輪／レール間の摩擦制御に関する研究

氏名 松本 耕輔

1. 序論

地下鉄を代表とした都市交通においては、高速走行安定性と曲線旋回性能の両立という課題に対し、台車の最適設計や構造の見直し等により改善を図りながらも、やはりいずれの対策についても限界が存在し、対症的に急曲線部のレールへの塗油により車両の曲線旋回性能の不足を補い、曲線通過に伴い生ずる諸問題に対応しているのが一般的となっている。

しかし実態の営業線の中では、高摩擦が必要とされる加減速区間と低摩擦が要求される急曲線区間がきれいに切り分けられているわけではなく、急曲線中やその付近で高い加・減速度が求められることも多々あり、油が車輪踏面に付着することにより車輪空転や滑走を招くリスクから、そのような場所ではレール塗油を積極的に行えない状況にある。

そこで本研究では、近年開発された鉄道向け摩擦調整材が

① 曲線通過に相当する車輪／レール間のすべり率において、転がり摩擦係数を適度に低く低減できる。

② すべり量の増加に伴い粘着力が増加するポジティブな特性を有する。

という特殊な摩擦特性を有しており、前者により急曲線走行時に発生する著大な横圧や車輪／レール間のスティックスリップ振動を低減し、車輪・レールの摩耗や騒音・振動の抑制、そして走行安全性を向上する効果が期待でき、後者により車輪滑走・空転の発生から回避できるとの考えから、その利用技術の確立により急曲線通過時の諸問題解決を図ることとした。

本論文の流れとしては、まず、本研究で新たに提案する「車輪／レール間の摩擦制御」の3つの基本コンセプトを構築し、2円筒転がり接触試験機（以降 2円筒試験機）による基礎実験やMBDソフトウェアによる曲線通過シミュレーション、1/10スケールモデル実験を通じて、その妥当性について検証・確認する。その上で、営業列車にこれら基本コンセプトを実現し得る「摩擦調整材噴射装置」を搭載し、試運転列車による本線

試験や営業線での長期評価試験を通じて、車輪／レール間の摩擦制御を導入した効果について確認を行う。

他方、2円筒試験機を用いて行った、営業線での摩擦制御の実施状況を模擬した実験を通じて得られた「摩擦調整材の供給～消費のバランス管理」に関する知見を基に、営業線での長期評価試験で得られたデータを検証し、その重要性について確認する。この観点から、摩擦調整材の供給～消費バランスを最適に管理するための手法として、車輪／レール間の摩擦状態を表す状態量の一つ、接線力をフィードバックし、摩擦調整材を噴射するタイミングを制御する手法を提案し、本線路試験によりその効果を確認する。

最後に、研究全体を通じて得られた知見を整理し、本研究で提案する車輪／レール間の摩擦制御の導入効果について確認するとともに、車輪／レール接触問題に更に取り組む上での方向性について考案した結果を示す。

2. 「車輪／レール間 摩擦制御」の概念

近年、開発された車輪／レール間の潤滑に適した摩擦調整材 **KELTRACK™ HPF** の特殊な摩擦特性に注目し、その特性を最大限活用するため、以下に示す「車輪／レール間の摩擦制御」の3つの基本コンセプトを考案し、提案した。

ー 基本コンセプト①

車輪／レール間の摩擦制御を行うにあたり、曲線全体で一様に効果が得られることやコスト、生産性、システム冗長性等の観点で地上設備より優位性が認められることから、車上側からレールに液体摩擦調整材を噴射するシステムを採用する。更に、本液体摩擦調整材は、固形潤滑剤である摩擦調整材を、水を主成分とする溶媒に溶いて作られているため、塗布後、乾燥すると車輪／レールの潤滑に適した摩擦特性が得られる。そこで、乾燥時間を確保する目的で、噴射編成の最後尾軸の後ろからレールに摩擦調整材を噴射し、後続編成が良好な状態に改善された区間を走行できるシステム構成とする。

ー 基本コンセプト②

本液体摩擦調整材は、上述のとおり「①塗布後、乾燥してその特性を発揮する」特徴と、材料特性から「②非常に薄く塗布すること」が必要とされるため、霧状に噴射してレールに塗布する手法により、都市鉄道の短い列車時隔においても乾燥できるようにするとともに、噴射量のきめ細かな制御により車輪／レールの接触楕円中に摩擦調整材を点在させ、車輪とレールが摩擦調整材を介して接触する領域と介さずに接する領域の取り合いを調整することで、摩擦調整材の特性の強弱を調整可能なものとする。

ー 基本コンセプト③

車両が急曲線を通過する際、内軌側の車輪／レール間の高い摩擦係数が横圧の増大を招いているというメカニズムを考慮し、内軌側レールのみ摩擦調整材を塗布

する。

3. 2円筒転がり接触試験機による摩擦調整材の基礎特性評価

摩擦調整材の利用技術を開発するにあたっては、その材料特性を十分に把握しておく必要があることから、車輪／レールの接触状態を模擬できる2円筒転がり接触試験機を製作し、モデル車輪と軌条輪の接触状態とクリープ特性を評価する実験を行った。その結果、上述の摩擦調整材に期待する2つの摩擦特性が確かに実現できていることが確認でき、更に、鉄道の実システムで摩擦調整材を使用した場合、供給～消費のサイクルが繰り返し行われることから、同試験機において模擬的にその状況を再現する実験を行い、車輪／レール間の摩擦制御では、摩擦調整材の噴射量と噴射間隔の管理が非常に重要であるという知見を得た。

4. MBDシミュレーションによる摩擦制御の検証

車輪／レール間の摩擦制御の実車両・実軌道を用いた評価の前段として、MBDソフトウエアA'GEMを用いた曲線通過シミュレーションを実施し、基本コンセプトの一つである「摩擦調整材の内軌側レールへの塗布」の妥当性を検証した。その結果、外軌塗布については、前軸外軌側車輪に作用する横圧は低減されず、車両の曲線旋回性能向上に対する効果は認められなかった。更に、内軌塗布と内外軌塗布の間には曲線旋回性能の観点では大きな差が認められず、使用する摩擦調整材を効率的に活用するとの観点から、消費量が少なく同程度の効果が得られる内軌塗布に優位性が認められるとの結論に至った。

5. 1/10スケール模型車両による実験

1/10スケール1台車モデルの車両を用いた実験を行い、MBDシミュレーション同様、実車両・実軌道試験に先立ち「車輪／レール間の摩擦制御」の検証を行った。4章に同じく、外軌塗布・内軌塗布・内外軌塗布の各条件間で比較、検証した結果、内軌塗布に優位性が認められた。

6. 摩擦調整材噴射装置の開発とその評価

摩擦制御の基本コンセプトを実現し得る、車両搭載のシステム「摩擦調整材噴射装置」を開発、実車両に搭載し、試運転による本線路試験及び営業列車による長期試験を行い、「車輪／レール間摩擦制御」の効果について確認・評価した。その結果、適切に摩擦調整材が機能すれば、車両の曲線旋回性能は向上し、横圧低減をはじめ、騒音や波状摩耗の抑制に対して大きな効果が得られることが確認できた。尚、本研究で提案する摩擦制御を鉄道の実システムに適用するにあたっては、ダイヤにより決められた場所を決められた順番に列車が走行するというシーケンス制御的な鉄道運行システムの基本に着目し、あらかじめ指定した運行番号で走行する場合にのみ摩擦調整材を噴射するという手法を採用した。しかしながら2円筒試験機での模擬実験で得られた知見と同様に、営業線で摩擦制御の効果を常に得るためには、やはり摩擦調整材の噴射量と噴射タイミング

をどのようにして適正なものとするかが非常に難しい問題であることが再認識された。

7. 接線力フィードバック制御の提案

運行番号により噴射編成を管理する手法では、常に良好な車輪／レール間の摩擦状態を確保する観点では、どうしても余裕を見込んで過剰な噴射量とせざるを得ず、又、ダイヤ乱れや装置故障等のシステム上の外乱に対しても、簡単に噴射間隔が最適値から外れてしまうという脆弱さが目についた。それらの課題を解決するため、車輪／レールの摩擦状態を表す指標の一つ、後軸接線力を制御パラメータとして摩擦調整材の噴射タイミングを判断する「接線力フィードバック制御」を考案し、その機能及び効果についてシミュレーション並びに試運転列車による試験により確認し、有用性を示した。

8. 構築した摩擦制御システムの評価

第7章までの各章で紹介した個々の取組みについて、それぞれの結果を整理、比較することで研究の全体像を考察する、更に、実システムにおける導入効果について評価するとともに、今後の車輪／レール接触問題に対する更なる向上を図るための取組みについて見解を示す。

9. 結論

本研究では、近年開発された「車輪／レール間摩擦調整材」の特性に着目し、それを有効活用するための利用技術「車輪／レール間 摩擦制御」の確立に取り組んだ。更に、営業線での長期的な試験の中から、恒常的に同制御が機能するため、車輪／レール間の摩擦状態を示す状態量をフィードバックし、自律的に噴射のタイミングを図ることができるシステムを提案し、作り上げた。この車輪／レール間の摩擦の状態を監視しながら管理するという新しい技術は、鉄道車両の走行性能を改善する手法として非常に効果が大きく、他の技術との組み合わせにより更なる貢献が期待できる有用な手法であると考えられる。