

新幹線電車の粘着向上に関する研究 (第 3 報)

嵯峨 信一* 野澤 仁裕 陳 樺 辻江 正裕 幸野 真治 (鉄道総研)

松野 潤司 (上田ブレーキ)

藤田 晋平 北村 賢一 (東日本旅客鉄道)

Study on the adhesion improvement of Shinkansen trains (3rd report)

Shinichi Saga*, Masahiro Nozawa, Hua Chen, Masahiro Tsujie, Masaharu Kono, (Railway Technical Research Inst.)

Jyunji Matsuno, (Ueda Brake Corp.)

Shinpei Fujita, Kenichi Kitamura, (East Japan Railway Co.)

When railway vehicles running in snowy areas, the adhesive performance between rails and wheels gets lower than in rainy weather. For this reason, a method for increasing adhesive coefficient focusing on temperature and roughness of wheel treads was studied. From the viewpoint of minimizing specification changes, we improved the material of current adhesive blocks through full-scale dynamo bench testing, developed new adhesive blocks. The optimal operation pattern was found through running tests of an actual vehicle in winter. This pattern provides benefits of increasing adhesive effect such as increasing roughness of wheel treads, or suppressing sliding in the high-speed range, in addition, suppressing temperature rise and improving wear resistance.

キーワード：新幹線電車, 踏面清掃装置, 研摩子, 活性子, 粘着係数, 氷雪介在条件, 踏面粗さ, 動作パターン (Shinkansen train, tread cleaning device, abrasive block, active block, adhesion coefficient, icy/snowy condition, tread roughness, control pattern)

1. はじめに

新幹線電車の高速化あるいは高減速度化には、レール／車輪間に働く粘着力のより一層の向上が必要である。増粘着装置として既に実用化されているセラミック噴射手法は、レール／車輪間に硬質粒子を供給して増粘着を図るものである。編成中に 1 軸～2 軸設置され、その増粘着効果は、湿潤条件 (雨天) では概ね 3 両目まで発揮されるとされており、実車両の走行試験⁽¹⁾でもその効果を確認している。

一方、レール湿潤条件よりも低粘着となるレール氷雪条件が懸念された東北新幹線および上越新幹線では、軌道の消雪装置を用いて氷雪条件から湿潤条件へと環境を変えることで低粘着を抑制してきた。これに対して、消雪装置を持たない軌道 (貯雪構造) の整備新幹線では、レール氷雪条件に加え、これまで以上の豪雪地区を高速で走行するため、さらに低粘着の懸念が高まるものと考えられる。なお、自動車分野では、路面氷雪 (凍結) 条件の知見があり、特殊なトレッドパターン⁽²⁾を有するスノータイヤやスタッドレスタイヤが実用化されているが、鉄道の車輪交換は容易でない上に、レール氷雪条件に対する知見が見当たらない。

このため、レール／車輪間に氷雪・氷水が介在する条件下

の粘着特性を調べるため、鉄道総研所有の車輪・レール高速接触疲労試験機を用いた 2 円筒粘着試験を実施した (図 1)。

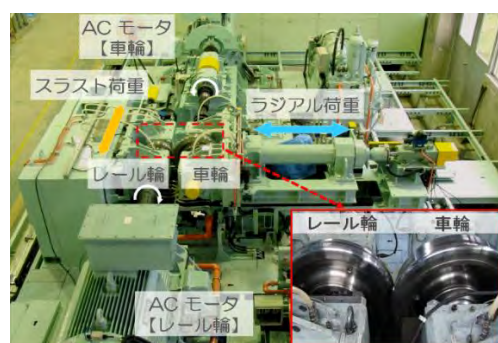


図 1 車輪・レール高速接触疲労試験機

差異がみとめられた条件の試験結果および最小二乗法で求めた近似曲線を図 2 に示す。なお、図中の WET とはレール湿潤条件の下限で計画されたもので、常用 7 ノッチ (B7N) に相当する。また、条件は A (レール常温, 車輪常温, 常温水), B (レール常温, 車輪常温, 5°C 水), C (レール常温, 車輪常温, 氷水), D (レール常温, 車輪氷雪, 氷水) である。ここで、常温は 20～25°C, 氷雪は -10°C である。

速度の増加に伴い近似曲線は、A→WET→B→C→D の順で粘着係数が低下する傾向がみられ、B および C は凡そ B6N、D は凡そ B4N にそれぞれ高速域で漸近し、B7N に対する低下割合は前者で約 10%、後方で約 40%と推定されたことから、レール湿潤条件よりもレール氷雪条件の方がより低粘着である可能性が示唆された。

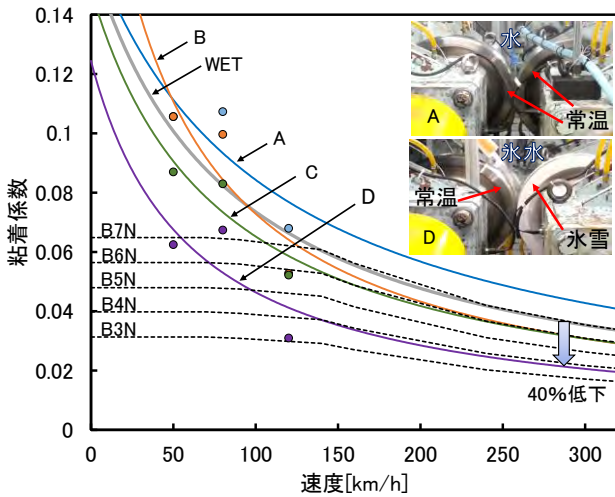


図 2 2 円筒粘着試験結果と近似曲線

以上のことから、セラミック噴射装置に加えて、粘着に寄与する要因⁽³⁾⁽⁴⁾として知られている車輪踏面の温度と粗さに着目した増粘着手法を備えておく必要がある。

本研究では、降積雪環境下における増粘着研摩子（以下、研摩子）の機能を高めた踏面清掃装置と増粘着活性化子（以下、活性化子）の開発を進めてきた。初めに、シミュレーションにより策定した踏面温度の目安値を踏まえ、铸铁系増粘着活性化子（以下、活性化 A）を試作・評価した。そこで判明した騒音等の課題解決を目的に、現用研摩子を改良した合成系増粘着活性化子（以下、活性化 B）を新たに試作・評価したところ、温度上昇や耐摩耗性に改善の余地があることをこれまでに報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾した。図 3 に供試体の外観を示す。

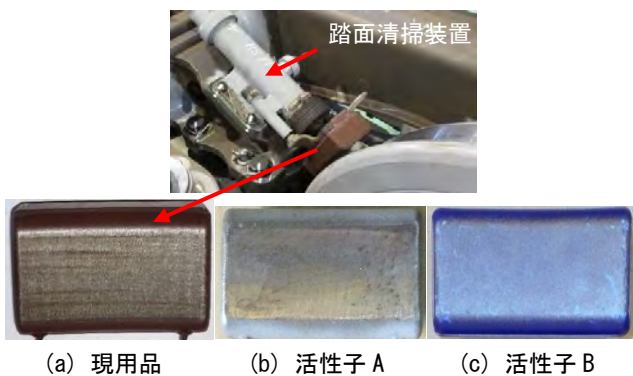


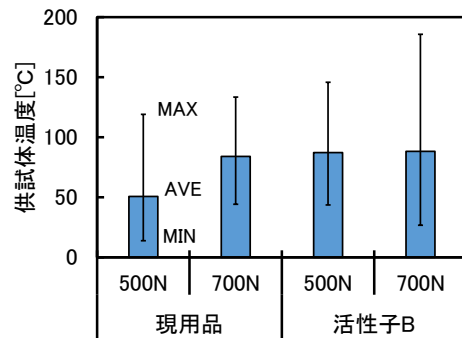
図 3 供試体の外観

本稿では、活性化 B の課題を解決する方策として、踏面清掃装置の動作パターン変更を検討し、台上試験および走行試験により動作パターンの効果検証を行ったので、これらについて報告する。

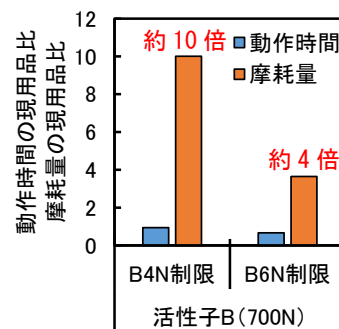
2. 合成系増粘着活性化子の課題と対策の検討

〈2・1〉 走行試験の結果（降雪積期） 実際に自然降積雪環境下を走行する際の性能評価を行った。試験条件は押付力を 500N、700N の 2 種類とし、編成ブレーキを掛けた。その結果、活性化 B の踏面粗さは現用品の約 1.4 倍に増加し、滑走発生率が大幅に減少した⁽⁶⁾。一方で、現用品に比べて供試体温度が上昇し、摩耗量が増大した。供試体温度および摩耗量の結果を図 4 に示す。

顕著な温度上昇は増粘着に寄与するが、反面、耐摩耗性が悪化する懸念がある。このため、摩耗量を低減する方策として、ノッチ制限を検討した。具体的には、ATC ブレーキで使用するブレーキノッチを考慮し、B4N あるいは B6N 以上で踏面清掃装置を動作させることとした（以下、B4N 制限、B6N 制限）。摩耗量の現用品比は、B4N 制限で約 10 倍、B6N で約 4 倍となり、一定程度の低減効果を確認したが、踏面清掃装置の動作時間は、B6N 制限で約 30%減少に留まった。このため、動作パターンを現行仕様から抜本的に見直し、増粘着性能を維持しながら耐摩耗性を付与するようなパラメータを見出す必要がある。



(a) 供試体温度の結果



(b) 摩耗量の結果

図 4 供試体温度と摩耗量の結果

〈2・2〉 摩耗対策の台上試験 現行の動作パターンはブレーキ指令 (全てのブレーキノッチ) に連動して動作と非動作を交互に繰り返す間欠動作を行い、予め設けられた速度帯毎にそれぞれ異なる ON-OFF 時間のパラメータが設定されている。したがって、車両が2つの速度帯を跨いで減速する際には、隣り合う2つの設定が一旦解除されることなく連続的に動作する場合があります、結果として動作時間が長くなって摩耗に影響することになる。

このため、速度条件を一部撤廃し、在来線の速度帯と新幹線の速度帯に二分することとした。この他、ブレーキ時間が長くなる ATC ブレーキによる入駅を想定した B1N~B6N 制限 (B1N~B6N で動作) を低速側に、粘着力不足を想定した B7N 制限 (B7N 以上で動作) を高速側にそれぞれ設けることとした。図 5 にこれらの動作パターンの模式図を示す。

対策パターン①は活性子 B が摺動する際のトルクの時間変化から、粗さ生成フェーズ (高いトルクを維持) と摩耗フェーズ (トルクが低下傾向) の境界を見極め、粗さ生成フェーズに特化した ON 時間を設定したものである。対策パターン②および対策パターン③の ON 時間は、対策パターン①の数倍になるように決め、結果的に現行のパラメータの一部を踏襲することとした。総合的な動作時間は対策パターン①→②→③→現行パターンの順で長くなる。

(1) 試験条件 実物大車輪を用いた台上試験を実施し、踏面粗さと摩耗量の比較評価を行った。

[速度]: 260→70km/h, 360km/h→70km/h (いずれも電制)

[押付力]: 500N (現用品), 700N (活性子 B)

[動作パターン]: 現行, 対策①, 対策②, 対策③

[回数]: 各 10 回

(2) 試験結果 踏面粗さおよび摩耗量の現用品比を図 6 に示す。踏面粗さはいずれのパターンも 1.2 倍以上の値を示した。摩耗量は対策パターン①で約 2 倍、対策パターン②で約 4 倍、対策パターン③で約 6 倍であった。以上の結果から、対策パターン①の有効性が示された。

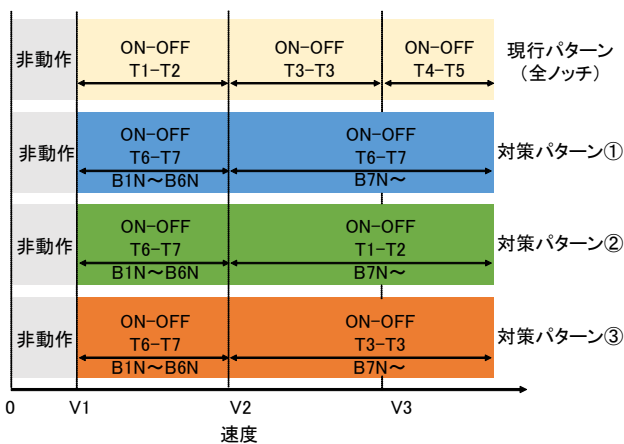


図 5 動作パターンの比較

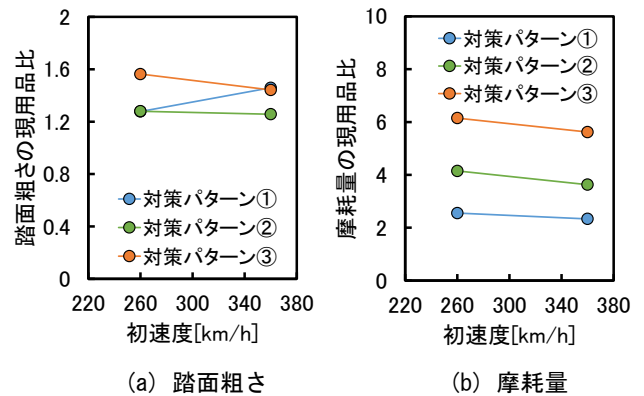


図 6 踏面粗さと摩耗量の比較結果

3. 走行試験による効果の検証 (降雪積期)

〈3・1〉 試験条件 摩耗対策の効果を確認するため、冬期の走行期間が比較的長い供試編成を用いて、自然降積雪環境下における評価を行った。ただし、それぞれの供試体における試験時期 (気候、環境) を同一にする目的で、これまでの台車単位の搭載から軸単位の搭載に変更した。具体的には、中間車の同一台車の第 1 軸に現用品 (押付力 500N の現行パターン) を、第 2 軸に活性子 B (押付力 700N の対策パターン①→②→③の順で試番を行った) を搭載した。

また、レール/車輪付近の氷雪介在状態を監視するカメラを台車に取り付けて走行環境を把握し、粘着力の挙動理解の一助とした。さらに、超小型サーモカメラのソフトウェアを改良し、映像中に表示される最高温度をデータ抽出できる仕様にし、高速回転する車輪の踏面温度を評価した。

〈3・2〉 試験結果 編成速度との差が 1km/h 以上になった瞬間を滑走開始点と判断し、試番数に対する滑走発生率を求めたところ、活性子 B は現用品に比べていずれのパターンにおいても再粘着傾向が強く、滑走発生率は約 15~20%抑制された。また、現用品には空転がみられた (図 7)。

自然降積雪環境下の粘着係数は、いずれの供試体においても WET を大きく下回る低粘着傾向を示す場合があることが分かった。粘着係数の測定点を多項式近似した曲線で比べると、現用品とほぼ同等レベルであった。ここで注意すべきは、粘着係数とは滑走開始の点データということである。すなわち、一点の瞬間的な現象を表しており、必ずしも動的に変化する連続的な粘着現象を示すものではない。そこで、編成速度に対する各軸速度の比で表されるすべり率に着目し、ブレーキ中の評価を行った。

図 8 はすべり率を速度 5km/h 毎に平均した結果 (対策パターン②の事例を挙げる) である。現用品に対する比で見ると、約 30~90%の減少を示しており、活性子 B による滑走の抑制効果がみとめられる。この傾向は、対策パターン①→②→③の順で顕著であった。このように、すべり率が抑制されることで、滑走再粘着制御における滑走検知の頻度を減

じ、その後の弁動作（供給停止，排気）によるブレーキ力の低下を抑え，停止距離の短縮すなわち高減速化に寄与することが期待できる。

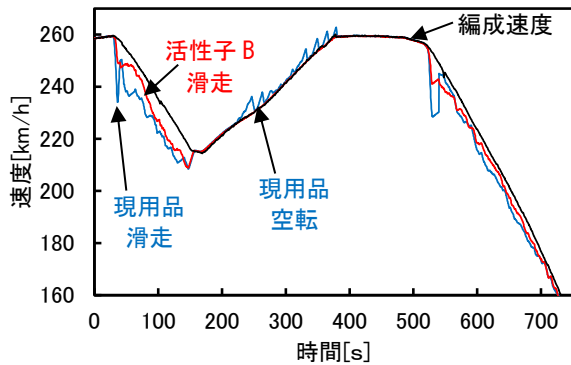


図 7 空転・滑走の例（対策パターン②）

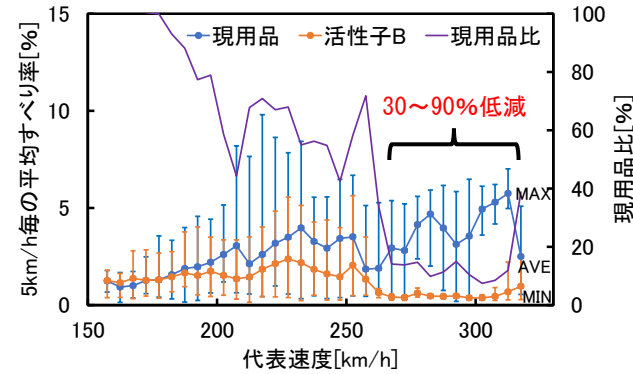


図 8 すべり率の結果（対策パターン②）

踏面粗さおよび摩耗量について，現用品比の結果を図9に示す。踏面粗さの結果から，動作時間が最も短い対策パターン①では踏面との間に介在する氷雪を除去することが困難であったと考えられる。一方，対策パターン②および対策パターン③は現用品の約 1.3 倍であり，介在する氷雪を除去して摺動できたと考えられる。

摩耗量の結果から，対策パターン①は現用品の約 1.8 倍，対策パターン②は約 2.2 倍，対策パターン③は約 6 倍であり，対策パターン②の優位性が示された。

供試体および踏面の温度の結果を図10に示す。活性子Bでは動作時間が長くなる順に温度上昇が高まる傾向があり，特に対策パターン③の温度上昇は摩耗量に直接影響を与えていると考えられ，望ましくない。一方，踏面温度の結果ではいずれのパターンも現用品とほぼ同等の値を示したことから，踏面への熱影響や車輪応力へ影響は小さいものと考えられる。なお，試験後の供試体は，いずれも割れや欠け等の有害な損傷・変形および偏摩耗はなかった。活性子Bの踏面は，比較的顕著な転動部の摺動跡がみられ，踏面粗さを生成する能力の即効性が確認された。

以上の結果を踏まえると，対策パターン②は増粘着効果と耐摩耗性を兼ね備えた機能を有していると考えられる。

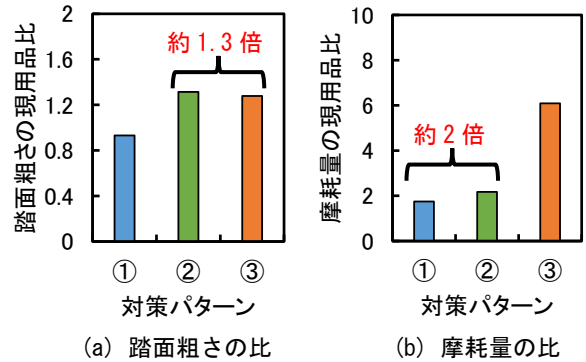


図 9 踏面粗さと摩耗量の結果

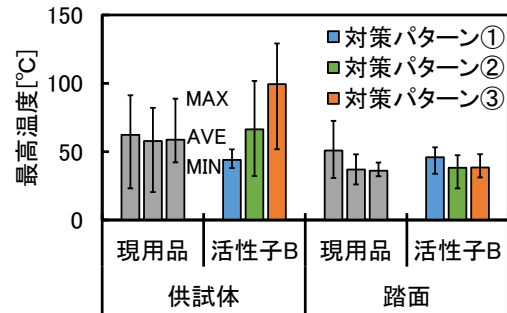


図 10 供試体および踏面温度の結果

4. まとめと考察

本研究では，低粘着が懸念される降積雪環境下の粘着性能を高めた合成系増粘着活性子を開発し，増粘着効果と耐摩耗性を兼ね備えた踏面清掃装置の動作パターンを提案した。現用品を活性子に交換するだけであり，導入コストが低く抑えられる。また，将来，営業車の制御仕様に走行線区や時期に応じた動作パターンを各々設定することで，適地・適時の性能確保の他，運用時のコスト削減も期待できる。

文 献

- (1) 嵯峨信一，宮部実，川村淳也，杉田裕伸，竹間克俊：「一本リンク牽引力を用いたブレーキ性能評価手法」，鉄道総研報告，Vol.29，No.2，pp.23-28 (2015)
- (2) 酒井秀男：「タイヤ工学」，グランプリ出版，2002
- (3) 大山忠夫：「鉄道技術アラカルト（増粘着研摩子）」，RRR，Vol.6，No.5，pp.38-39 (2007)
- (4) 陳華，伴巧，石田誠，中原綱光：「湿潤条件下の車輪とレール間の粘着係数に影響を及ぼす因子」，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.45-50 (2012)
- (5) 嵯峨信一，松野潤司，山口拓也，森弘元人：「新幹線電車の粘着向上に関する研究」，第 26 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，電気学会，S1-2-2 (2019)
- (6) 嵯峨信一，松野潤司，藤田晋平，江戸義博：「新幹線電車の粘着向上に関する研究（第 2 報）」，第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，土木学会，S1-1-2 (2020)