

冬季におけるレール/車輪間の低粘着を改善する



嵯峨 信一
Shinichi Saga
車両技術研究部
ブレーキシステム研究室
主任研究員



陳 樺
Hua Chen
前 鉄道力学研究部
軌道力学研究室長
(現 鉄道国際規格センター 上席主査)



松野 潤司
Junji Matsuno
上田ブレーキ株式会社
開発部
主幹

はじめに

鉄道車両のレール/車輪間に働く**粘着力**[®]は、晴天時に比べ雨天時の方が低下すること¹⁾が知られています。このため、ブレーキの設計や制御では、こうした特性をふまえた**湿潤の粘着計画法**[®]を設定の目安としています。粘着力をより一層高めること(増粘着)ができれば、主電動機やブレーキ装置の性能向上により、停止距離の短縮化を図ることができます。増粘着手法として実用化されているセラミック噴射手法²⁾は、レール/車輪間に硬質粒子を供給して増粘着効果を得るもので、雨天時を模擬した実車両

の走行試験³⁾でもおおむね3両目までの効果を確認していますが、降積雪時の効果は知られていません。

降積雪の多い上越新幹線では、さまざまな雪の問題について、気象や取水条件などを検討したうえで軌道側の散水消雪装置⁴⁾を導入した結果、レール氷雪条件からレール湿潤条件へと環境が変化したことで低粘着の抑制が図られてきたものと考えられます(図1)。一方、散水消雪装置をもたない貯雪軌道の整備新幹線では、レール氷雪条件に加え、車両がより厳しい降積雪地域を高速で走行するため、低粘着の懸念が

コラム「粘着力」

車輪が転がり接触状態にあるときに、レール/車輪間で列車が進行する方向に作用する接線力のことで(図1)。粘着力は、車輪のすべりの増加にともなっていくたん増大し、やがて減少する特性をもっています。粘着力の最大値(車輪がすべる直前の値)を輪重で除した値を粘着係数とよびます。粘着係数は、すべりやすさを表す指標となるほか、列車の加速や減速に必要な性能の設計などにも使われます。

図1 レール/車輪間に働く粘着力

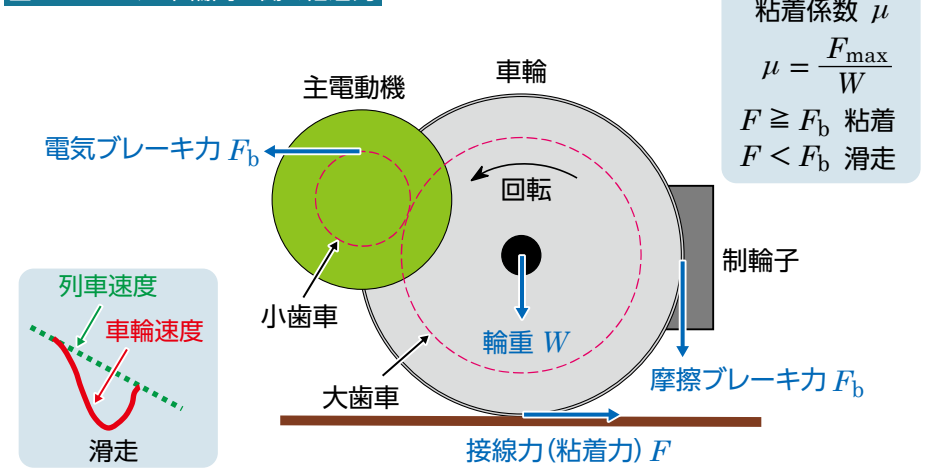




図1 散水消雪装置により融雪された軌道

高まります。

自動車分野では冬季走行性能の知見が数多くあり、冬用タイヤが実用化されています。一方、鉄道車両では一部限定的な条件下での粘着力の実験結果⁵⁾はあるものの、冬季走行性能の知見がほとんどありません。また、車輪踏面に自動車タイヤのような溝や切り込みを形成することができないこと、車輪交換が容易でないなどの制約条件を前提に、ここでは、レール/車輪間の粘着特性を実験的に調べ、冬季の低粘着を改善する増粘着手法の開発について紹介します。

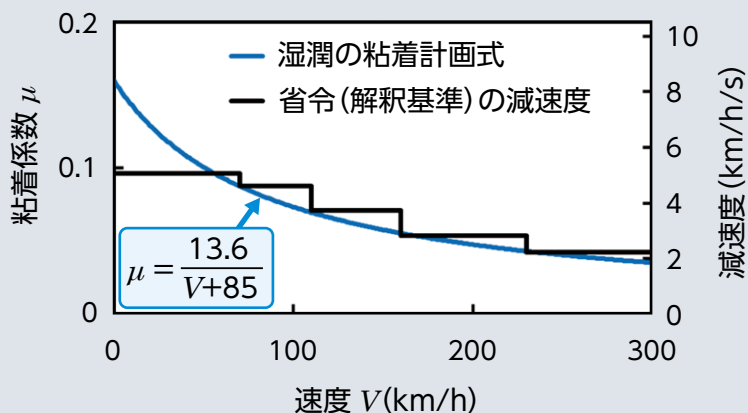
降積雪環境下の台上粘着実験

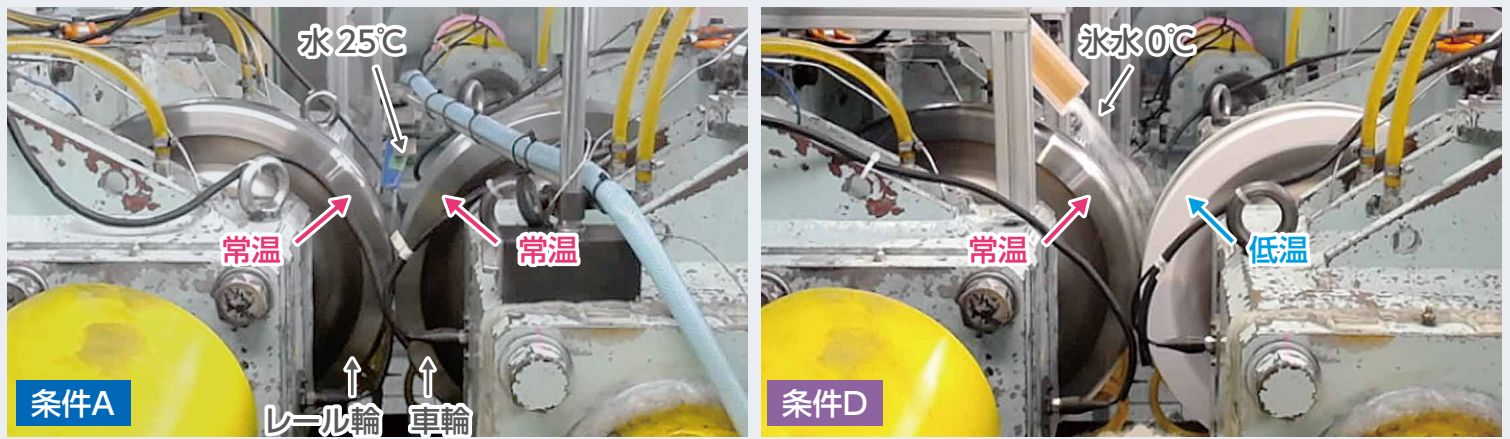
図2(a)に示す車輪・レール高速接触疲労試験装置を用いて、降積雪環境下を模擬した台上粘着実験を実施しました。この試験装置は、直径500mmのレール輪と同径の車輪を互いに接触かつ輪重を負荷しながら120km/hで強制的にすべらせる（空転または滑走）ことができます。粘着係数の測定結果を用いて近似式が得られた4条件の温度および介在物を表1に、測定された粘着係数の近似曲線を図2(b)に示します。高速域で比較すると、A>湿潤の粘着計画

コラム「湿潤の粘着計画式」

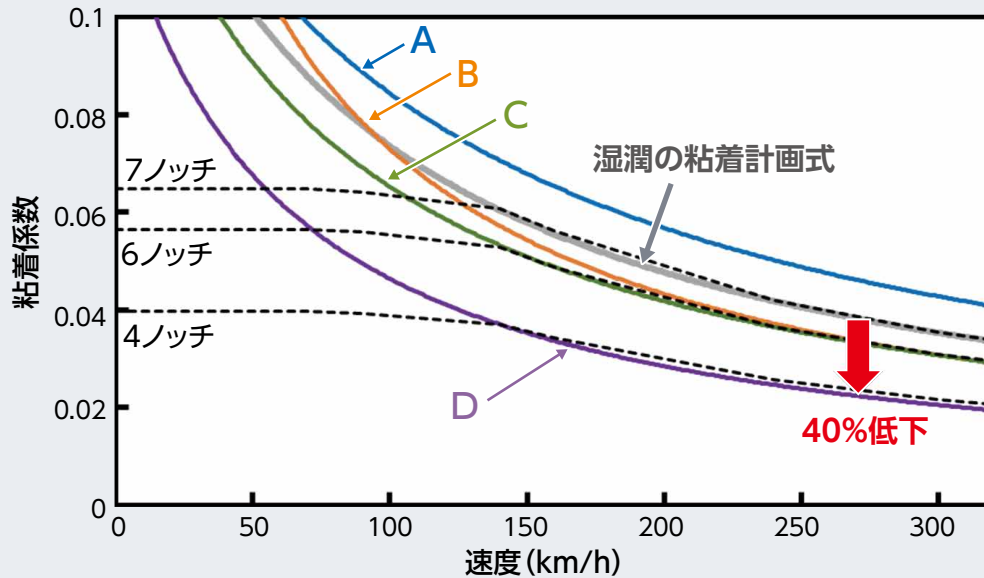
レール頭頂面が湿潤状態（雨天や散水による）の場合について、粘着係数の結果などから得られた近似式を湿潤の粘着計画式とよびます。これを車両の減速度（1秒間に減速する量、単位km/h/s）に換算したものが「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の解釈基準に記載されています（図II）。具体的には、新幹線電車の常用最大ブレーキ7ノッチ（ブレーキ力を7段階に刻んだときの最大値）の設定の目安とされています。このほか、在来線車両などではさまざまな粘着計画式が知られています。

図II 粘着計画式





(a) 実験の様子



(b) 測定された粘着係数の近似曲線

図2 台上粘着実験

表1 温度および介在物の条件

	A	B	C	D
レール輪	20~25℃	20~25℃	20~25℃	20~25℃
車輪	20~25℃	20~25℃	20~25℃	~-10℃
介在物	水25℃ 0.4ℓ/分	水5℃ 0.4ℓ/分	氷水0℃	氷水0℃

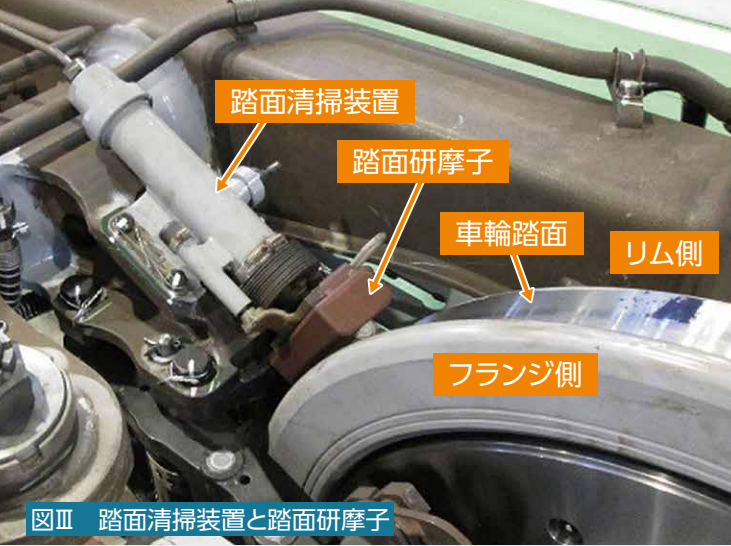
※氷水：水(5℃, 1ℓ/分)+削氷片(2kg/分, 320kg/cm³)

式>B≥C>Dの順で粘着係数が低下する傾向がみられます。BおよびCは常用ブレーキ6ノッチ、Dは常用ブレーキ4ノッチに合致し、湿潤の粘着計画式に対する低下割合は前者で約10%、後者で約40%と推定されました。これは、レール湿潤条件(A, B, C)よりもレール氷雪条件(D)の方がより低粘着傾向である可能性

を示唆しています。以上の結果をふまえ、粘着に寄与する要因⁶⁾として知られている車輪踏面の「温度」と「粗さ」に着目し、車輪ごとに搭載されている踏面清掃装置と踏面研摩子TMの機能を高める開発を進めました。

新たな研摩子の試作(実物大台上試験)

新幹線電車の車輪は割損対策として熱処理が行われており、リム部に圧縮応力が残るように製造されています。踏面が高温になるとその効果が低下するため、踏面温度と応力の関係についてシミュレーションを行いました。実物大台上試験の測定値とシミュレーション結果から、踏面温度が225℃を超えないことを目安としま



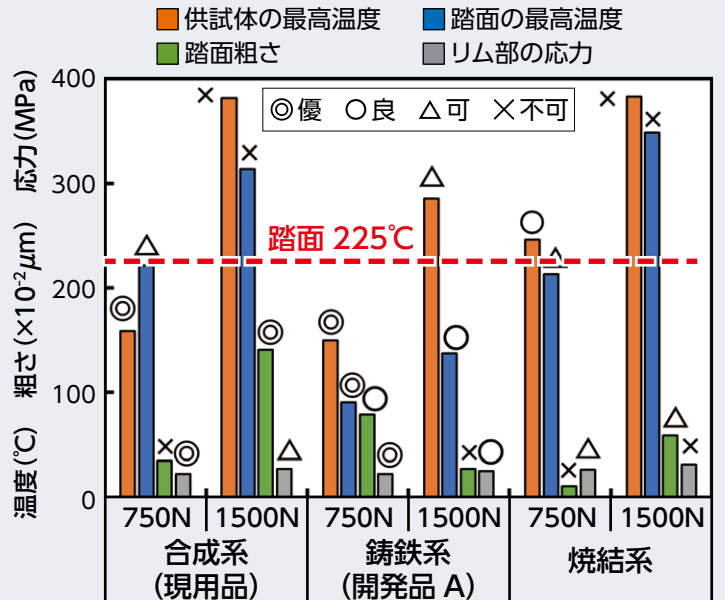
図Ⅲ 踏面清掃装置と踏面研磨子

新幹線電車は開業当初からディスクブレーキ方式を採用しており、車輪踏面をしゅう動するものではありませんでした。このため、列車の有無を検知するための軌道回路の短絡不良や空転滑走の懸念がありました。そこで、車輪踏面に踏面研磨子(図Ⅲ)を軽く押し当てて踏面の汚れを除去するとともに、粘着に寄与する踏面粗さを生成しています。後に増粘着研磨子とよばれるようになりました。

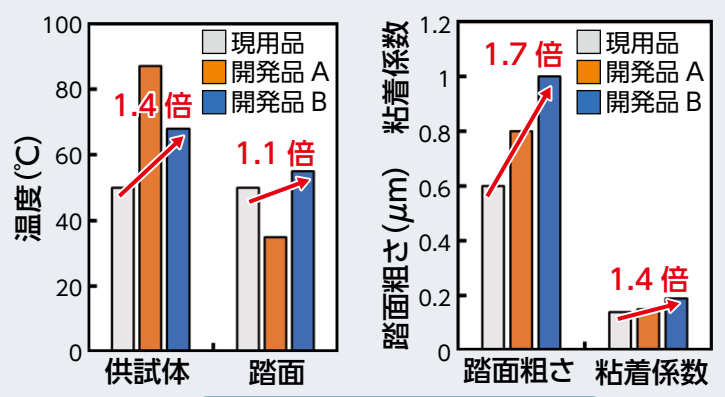
コラム「踏面清掃装置と踏面研磨子」

した。続いて、現用の研磨子である合成系と材質が異なる铸铁系および焼結系を新たに試作し、押付力を2種類(750, 1500N)とし、各種性能を実物大台上試験で評価しました。踏面の最高温度、踏面粗さおよび応力の変化量に着目し、優・良・可・不可で判定すると、铸铁系(開発品A)の750Nが優位でした(図3(a))。しかし、新幹線開業当初に採用された铸铁系研磨子は転動騒音が問題となった経緯があり、開発品Aも同様の問題が生じました。そこで、次点であった合成系の750Nをベースに、以下の方針で改良した開発品Bを試作しました。

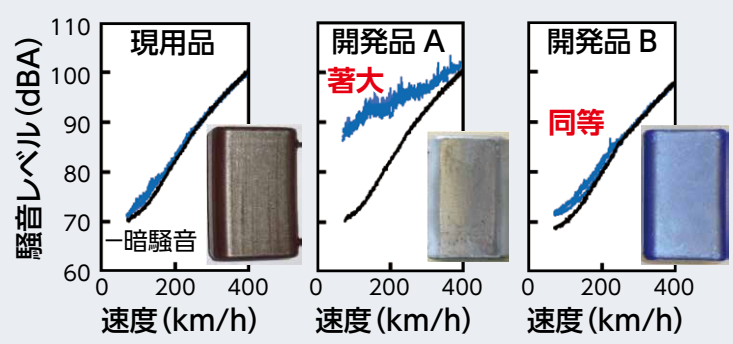
- 既存の踏面清掃装置(500N)を使用し、押付力を圧力調整で700Nにする
 - 強度、粗さの生成能力などに関わる配合組成は現用品をベースとする
 - 補強樹脂量の調整や硬質金属の充填量を増加し、熱伝導性を向上する
- 台上試験の結果、開発品Bの各種温度は現用



(a) 各種試作品の比較結果



(b) 温度と踏面粗さの比較結果



(c) 騒音レベルの比較結果

図3 実物大台上試験の比較結果

品と同等レベルの値で、踏面粗さは約1.7倍に、粘着係数は約1.4倍に増大し、高い増粘着効果が期待できます(図3(b))。また、騒音は現用品と同等レベルであり、開発品Aよりも大幅に低減することができました(図3(c))。

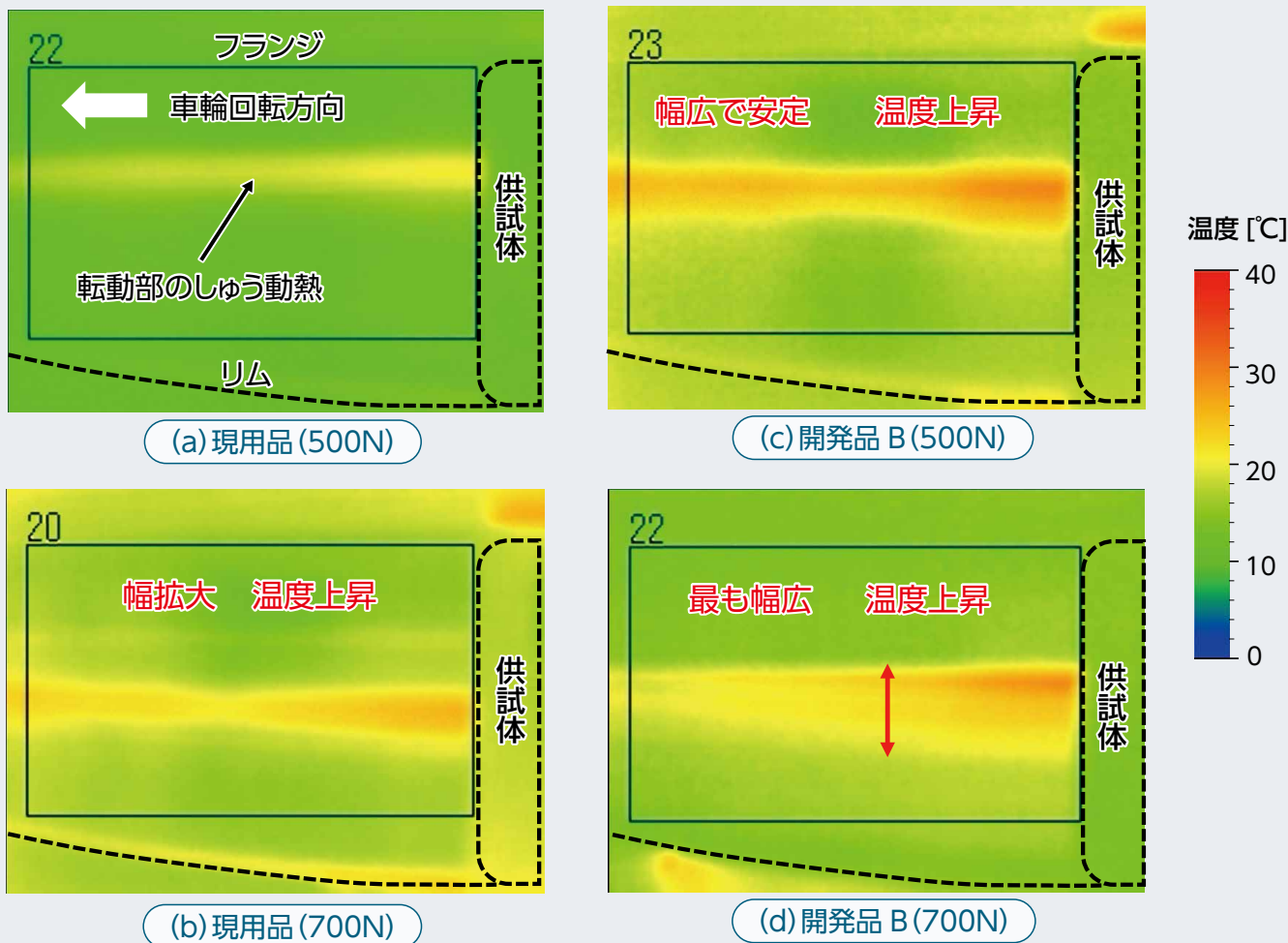


図4 踏面温度分布の観察結果 (300 km/h時)

実車両の冬季走行試験

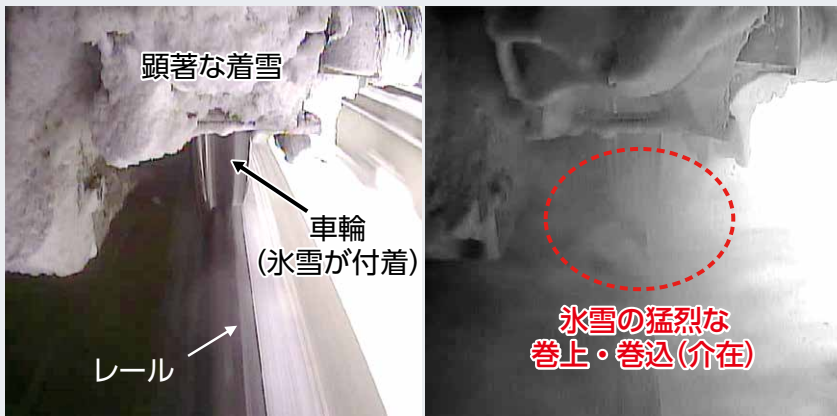
摩耗対策

実車両に開発品Bを搭載し、冬季走行試験を実施しました。開発品Bの踏面粗さは現用品に比べ増大すること、滑走回数が大幅減少すること、しゅう動熱が幅広であることを確認しました(図4)。その一方で摩耗量が現用品の約4倍となる課題が判明しました。このため、踏面清掃装置の動作パターンを見直しました。現行の動作パターンはブレーキ中に圧着と緩解を交互に繰り返す、その動作時間は3つの速度帯で異なります。そこで、速度帯を2分し、そのうち低速では常用ブレーキ6ノッチ以下で動作、高速では常用最大ブレーキ7ノッチ以上で動作する条件に変更しました。次に、しゅう動時の摩擦力の波形から最小圧着時間を見極め、3種

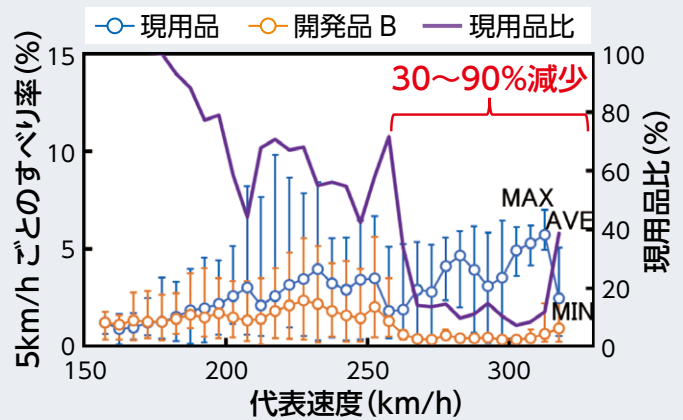
類(動作時間長: ①<②<③<現行)の対策パターンを検討し、台上試験で比較しました。その結果、現用品よりも高い踏面粗さを維持しながら、摩耗量も抑える動作パターンを選定しました。

対策効果の検証

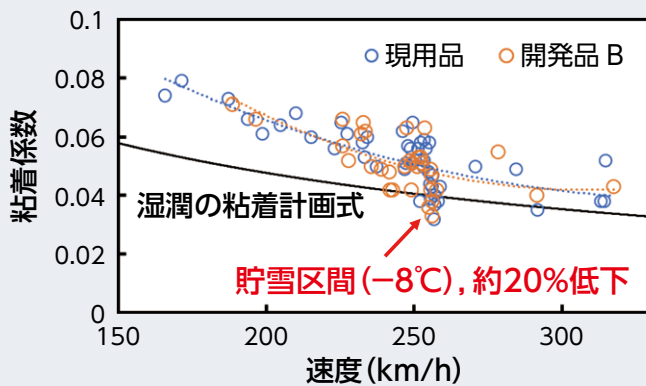
対策効果を検証する冬季走行試験を実施しました。走行環境を観察したところ、レール/車輪間には大量の氷雪が介在することがわかりましたが(図5(a))、開発品Bは現用品に比べ滑走発生率が約20%抑制されること、現用品でみられた空転が生じないことなどの増粘着効果を確認しました。一方で粘着係数に差異は認められないこと、湿潤の粘着計画式を約20%下回る低粘着傾向を示す場合(外気温-8℃程度、貯雪区間)があることを確認しました



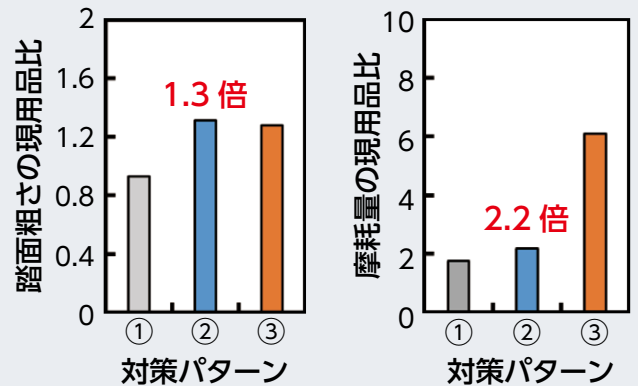
(a) レール/車輪間の観察例 (220km/h 時)



(c) すべり率の比較結果 (対策パターン②)



(b) 粘着係数の比較結果 (対策パターン②)



(d) 踏面粗さと摩耗量の比較結果

図5 冬季走行試験の結果 (対策効果の検証)

(図5(b))。そこで、編成速度に対する軸速度の比で表されるすべり率を用いて評価したところ、開発品Bは現用品比で約30～90%の減少を示しており、低粘着による滑走現象を改善できることがわかりました(図5(c))。また、踏面粗さは現用品よりも約1.3倍に増大すること、摩耗量は約2.2倍に抑えられること(図5(d))、各種温度は問題がないことを確認しました。以上の結果から、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見いだしました。

おわりに

ここでは、冬季におけるレール/車輪間の低粘着の改善を目的に、導入容易な合成系増粘着研磨子を開発し、さらに増粘着効果と耐摩耗性

を兼ね備えた動作パターンを提案しました。今後、動作パターンに期間(季節)や走行線区を加味することで、通年使用を可能とする耐摩耗性が見込まれます。厳しい冬の気象に備える車両側の取り組みを紹介しましたが、冬季の安全安定輸送の確保には地上側も含めた多岐にわたる施策を講じておくことが重要です。RRR

文献

- 1) 大山忠夫：粘着の話—車輪とレール間の粘着力とその有効利用—, レールアンドテック出版, 2002
- 2) 大野薫：増粘着材噴射装置(セラジェット)—その1—, RRR, Vol.63, No.1, pp.36-37, 2006
- 3) 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
- 4) 望月旭 編：新幹線電車の技術経緯, 日本鉄道車両機械技術協会, 2014
- 5) 陳樺, 井戸達哉：低温条件下における車輪/レールの粘着試験, 鉄道総研報告, Vol.35, No.9, pp.23-28, 2021
- 6) 大山忠夫：増粘着研磨子, RRR, Vol.64, No.5, pp.38-39, 2007