

新幹線電車の粘着向上に関する研究（第2報）

○ [機] 嵯峨 信一（鉄道総合技術研究所） 松野 潤司（上田ブレーキ）

[機] 藤田 晋平 [機] 江戸 義博（東日本旅客鉄道）

Study on the adhesion improvement of Shinkansen trains (2nd report)

○Shinichi Saga, (Railway Technical Research Inst.) Jyunji Matsuno, (Ueda Brake Corp.)

Shinpei Fujita, Yoshihiro Edo, (East Japan Railway Co.)

As one method for shortening the braking distance in the event of emergency such as earthquake, we are developing an adhesive/active block that improves the adhesive strength between rails and wheels, which decreases in rainy weather or snowfall. Last year, we reported on the effect of increasing adhesion and issues regarding the running test results of the developed cast iron active block. Therefore, for the purpose of solving these problems, we have newly developed resin active block and conducted dynamo test and running test. In this paper, we report on these results.

キーワード：新幹線電車，踏面清掃装置，研磨子，活性子，低温散水，粘着係数，電制ブレーキ，空制ブレーキ

Key Words：Shinkansen train, tread cleaning device, abrasive block, active block, low temperature water spray, adhesion coefficient, regenerative brake electric brake, air(friction) brake

1. 緒言

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装置は、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軸設置されるセラミック噴射装置の増粘着効果は概ね3両目までとされているが、この効果はレール湿潤条件（雨天）の結果であり、実車両を用いた走行試験（セラミック噴射装置は1号車に搭載）でもその効果を確認している¹⁾。

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、上越新幹線では軌道の消雪装置を用いて、レール氷雪条件からレール湿潤条件へと環境を変えることで低粘着を抑制している。一方で、消雪装置を持たない軌道（貯雪構造）となる整備新幹線では、レール氷雪条件に加え、これまで以上の豪雪地区を高速走行することになり、さらなる低粘着傾向の懸念が高まる。このため、前述のセラミック噴射装置の他、各車輪での増粘着手法が求められる。

昨年度の報告²⁾では、増粘着研磨子（以下、研磨子）の機能をさらに向上した鋳鉄系増粘着活性子（以下、活性子

A）を開発した。台上試験および走行試験の結果から、活性子Aによる増粘着効果を確認したが、活性子Aには温度上昇や摩耗量、騒音等の課題が判明した。このため、これらの課題を解決する新たな活性子の検討を進め、台上試験により合成系活性子（以下、活性子B）を開発した。本稿では、活性子Bの台上試験結果および走行試験結果について報告する。

2. 車輪リム部円周方向応力を考慮した車輪踏面温度のシミュレーション

本章では、活性子に求められる安全上の制限について、既報告で掲載したものを改めて述べる。

2.1 車輪残留応力

これまでの研究により、レール／車輪間における粘着特性の改善には表面粗さと温度が寄与することが分かっている³⁾⁴⁾。増粘着研磨子やセラミック噴射装置は、表面粗さの増大を目的としたものである。一方で、レールや車輪踏面の温度上昇を目的とした材料や装置等は未だに導入されていない。この理由として、車輪踏面の温度上昇による様々なリスクへの懸念が挙げられる。

新幹線電車の車輪は、車輪割損対策としてリム部の熱処理を行っており、リム部円周方向の残留応力（約200MPa）

が規定されている。新幹線電車では、0 系当初からディスクブレーキ方式が採用された。これは、高速走行に車輪踏面形状の維持が必須であることの他に、制輪子による車輪踏面への入熱が車輪内面距離を変化させて蛇行動作を招くこと、熱き裂等によって車輪割損リスクを高めることなどが懸念されたからである。

従来以上の増粘着性能を得るには、表面粗さの増大と車輪踏面の温度上昇の 2 つの機能を兼ねる新たな研摩子が必要であり、車輪踏面の上限温度についてシミュレーションで検討した。

2.2 解析条件 (NASTRAN)

弾性域の解析を以下の条件で行った。2 次元車輪モデルの車輪踏面に対し、活性子の接触範囲を 3 種類の入熱範囲 (17.5, 35, 70mm) と 3 種類の入熱パターン (車輪踏面のみ、車輪踏面+車輪板部 100℃ (空制非常ブレーキ停止後を想定)、車輪踏面+輪重横圧) をそれぞれ設定した。入力熱量はブレーキ開始の 1 秒後に最大値に達し、以後 200 秒で $0\text{W}/\text{mm}^2$ となるように線形変化させた際の車輪踏面温度を用いて、車輪リム部の円周方向応力が引張側にそれぞれ 1, 50, 100MPa 増加する場合を抽出した。

2.3 解析結果

活性子による車輪踏面への入熱のみを想定した場合、入熱範囲 17.5mm の条件では、円周方向応力が 100MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 750°C と推定された。入熱範囲 35mm の条件では、円周方向応力が 30MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 860°C と推定され、最も応力が発生しない条件であった。入熱範囲 70mm の条件では、円周方向応力が 100MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 410°C と推定された (図 1 の①)。

車輪板部の初期温度を 100°C に想定した場合、入熱範囲 17.5mm の条件では、円周方向応力が 100MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 986°C と推定された。入熱範囲 35mm の条件では、円周方向応力が 20MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 863°C と推定され、最も応力が発生しない条件であった。入熱範囲 70mm の条件では、円周方向応力が 100MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 474°C と推定された (図 1 の②)。

入熱に加え、車輪に輪重 P と横圧 Q の負荷を想定した場合、入熱範囲 17.5mm の条件では、円周方向応力が 100MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 756°C と推定された。入熱範囲 70mm の条件では、円周方向応力が 100MPa 増加した際の車輪踏面温度は最大で 412°C と推定された。なお、35mm 条件では解析 (温度無限大) が発散したため、検討から除外した (図 1 の③)。

車輪割損リスクの許容範囲として、リム部円周方向応力の残留応力が 50MPa の増大、すなわち残留応力は 150MPa までの残存を制限し、これに加えて最も車輪踏面温度が低く安全側の条件となる入熱範囲 70mm を仮定した場合には、車輪踏面温度は最大で 225°C に抑える必要があるという設計指針を得た。

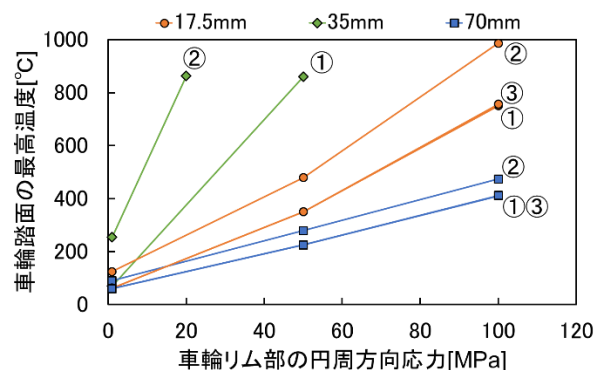


図 1 車輪踏面の最高温度の解析結果

①踏面のみ ②+板部 100°C ③+PQ 負荷

3. 新たな活性子の開発

既開発の活性子 A は、各種試験の結果から増粘着性能を有すること、車輪踏面温度の上昇はほとんど見られず、車輪リム応力増大のリスクは小さいことなどを確認した。一方で、ATC ブレーキ時の駅停車の際の活性子温度上昇が顕著であった。その最高温度は 300°C を超えることがあり、最悪の場合、雨天時に付着した水分が水蒸気となって台車周りから発生し、これを火災による煙と誤認される懸念がある。また、高速走行時には問題とならなかった振動・騒音についても、入駅のための低速走行時で増大する懸念があり、活性子本体の質量を合成系並みに軽減する必要がある。加えて、活性子背面に塗布した振動減衰用コーティングのコストは活性子のコストを大幅に押し上げる要因となっていた。その他、車輪踏面粗さを目標のセラミック噴射装置レベルまで引き上げる必要があった。

このため、増粘着性能をさらに向上しながらも活性子の温度上昇を抑え、なおかつ質量を軽減した新たな合成系増粘着活性子の開発を進めた。

3.1 開発のコンセプト

開発にあたって、以下に記すコンセプトを考慮した。試作した活性子 B を図 2 に示す。

- ①現用品の強度、車輪踏面粗さ生成力向上、耐かじり鉄片の配合組成および成型体構成に準拠、軽量化と背面コーティング廃止で低コスト化
- ②硬質金属充填割合を増加、バインダの樹脂量を調整、摺動面の活性化を促進、車輪踏面粗さ生成力向上
- ③活性子本体の温度上昇が水切り性能向上、増粘着効果向上、金属材および繊維材で熱伝導性向上

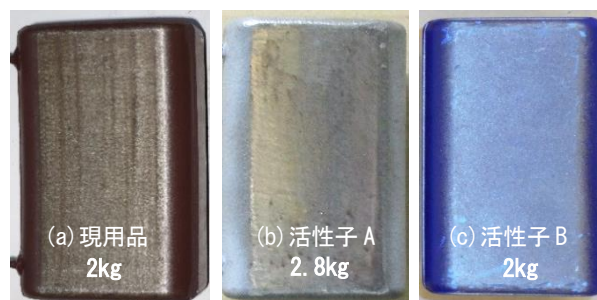


図 2 研摩子および活性子の外観

3.2 台上試験の条件

台上試験では、高速摺動試験、粘着試験および騒音試験により比較評価を行った。条件を以下に示す。

【高速摺動試験】

初期状態：100km/h（490N）、摩擦面：80%以上
 踏面粗さ：Ra0.3 μ m、試験前温度：30℃以下
 押付圧力：700kPa（押付力 700N）
 速度：300km/h→30km/h
 減速度：2.84km/h/s@300km/h→5.04km/h/s@124km/h
 5.04km/h/s@124km/h→0km/h（回生ブレーキ）

回数：各 3 回

【粘着試験】

軌条輪：Ra0.15 μ m、接触圧：最大ヘルツ圧 490MPa
 速度：100km/h（700N）、散水：50ml/min（常温）
 回数：各 3 回

【騒音試験】

初期状態：65km/h（700N）、摩擦面：70%以上
 速度：260→70km/h、360→70km/h、400→70km/h
 （回生ブレーキ：1.6km/h/s 以上）

回数：各 1 回

3.3 台上試験の結果

高速摺動試験および粘着試験の結果を図 3 に示す。現用品に比べて活性子 B は、車輪踏面粗さが約 1.6 倍に、粘着係数が約 1.4 倍にそれぞれ増大し、高い増粘着効果が得られた。さらに、車輪踏面温度が約 1.1 倍に、摺動材温度が約 1.4 倍に抑えられており、活性子 A よりも低い摺動材温度となった。なお、強度上の性能は規定を満足した。

音振試験の結果を図 4 に示す。騒音はディスク面（反フランジ側）から 1500mm、床面からの高さ 1100mm にマイクロフォンを設置して測定した。活性子 B は現用品と同等レベルの傾向を示し、活性子 A よりも低減している。

4. 実車両の走行試験による評価

開発した活性子 B を供試編成に搭載し、冬期走行試験において現用品との性能比較を行った。

4.1 仮設概要

供試編成における中間車両の後位台車を試験の対象とした。ブレーキ力の検出は、電制では伝送情報から、空制ではキャリパブレーキ装置に取り付けたセンサからそれぞれ取得した。散水は、車内に設置した散水タンク（100l）に投込式クーラー（トーマス科学 TRL-117N）を用いて約 10℃の冷却水を生成し、第 4 軸に設置した散水ノズルからレール／車輪間に向けて散水（2l/min/輪、既報告では 5l/min/輪）を行った。他号車の複数軸にも散水を仮設した。

試験台車の踏面清掃装置の一つには、超小型のサーモカメラを取り付けて車輪踏面の表面温度を観察した。また、踏面清掃装置の制御は、圧力制御を電空レギュレータで、動作ロジックをプログラマブルコントローラで行い、制御ロジックは現行の制御を設定した。

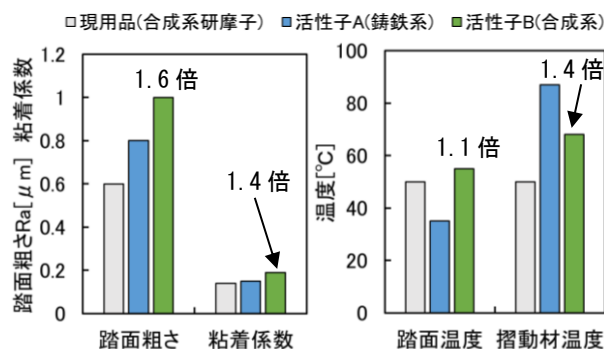
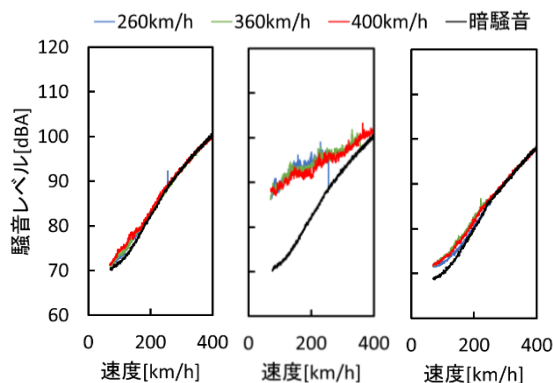


図 3 高速摺動試験および粘着試験の結果



(a) 現用品 (b) 活性子 A (c) 活性子 B

図 4 騒音試験の結果

4.2 試験条件

主な試験条件を以下に示す。

踏面清掃装置圧力 (TC 圧力) : 490kPa, 590kPa, 686kPa

ノッチ : 電制 EB (以下, EBD), 空制 EB (以下, EBF)

電制 B7 (以下, B7D), 空制 B7 (以下, B7F)

※編成停止ブレーキ, 590kPa は活性子 B のみ

初速度 : 160, 260, 275, 320km/h

セラミック噴射 : なし, 摺合せ : なし

4.3 試験結果

編成速度を基準に、第 3 軸および第 4 軸の速度差が 1km/h 以上になった瞬間を滑走開始と判定した。図 5 に滑走確率（試番数に対する滑走有無の割合）をそれぞれ示す。

活性子 B は現用品に比べて滑走の回数が少なく、滑走確率が半減する傾向を示した。増粘着効果の観点から活性子 B の 686kPa が優位であったが、一部の条件（活性子 B の 590kPa）では滑走が発生しやすい結果でもあった。

車輪との摺動状態には押付力と摩擦熱が影響するが、既報告の試験結果からは必ずしも高い押付力で増粘着効果が得られやすいとは限らなかった。これは、小さい押付力の場合には、摺動時の振動によって車輪踏面の全幅に渡り接触・粗さを生成することがあるからである。一方で、高い押付力の場合には、接触点が移動しにくく、粗さを生成する機能・範囲が限定的になることが考えられる。

現用品および活性子における温度の結果を図 6 に示す。本走行試験では、編成停止ブレーキである。このため、既報告の走行試験方法よりも踏面清掃装置の動作時間が長く

なること、特に ATC ブレーキで入駅する際の長い動作時間の影響により、ベース温度が底上げされ、ブレーキ時および入駅時ともに、現用品よりも活性子 B の方が高い温度を示した。このことは、ホットスタートに似た機能が増粘着効果に寄与した可能性がある反面、顕著な温度上昇を抑える方策として、ノッチに応じた動作制御などの制限を設ける必要があると考えられる。

サーモカメラを用いた車輪踏面温度の観察例を図 7 に示す。観察された摺動状態（発熱範囲）は、現用品の 490kPa よりも 686kPa の方が接触幅は広く理想的である。一方、活性子 B の 490kPa よりも 686kPa の方が接触幅は広く理想的であるが、590kPa では接触幅が小さく、接触位置の変化も少ない。こうした接触状態の傾向が滑走確率の傾向と概ね相関性があると考えられる。したがって、多点あるいは一定の幅を維持しつつ接触部がランダムに移動する様子がみられる摺動条件では、車輪踏面全体への粗さ生成に加えて水切り効果が得られ、これらが増粘着効果に寄与している可能性がある。いずれも全試番を通して車輪踏面温度は概ね 30℃程度を示し、車輪踏面への熱影響や車輪応力への割損リスクは小さいものと考えられる。

レール／車輪間の粘着に影響を与える車輪踏面粗さ Ra の測定結果を図 8 に示す。現用品では TC 圧力の違いによる差異はみとめられなかった。一方、活性子 B では 686kPa > 590kPa ≒ 490kPa の順で大きく、TC 圧力との相関性が高い傾向を示した。その粗さは平均で Ra0.83μm となり、目標とするセラミック噴射時の Ra1.0μm に近づいた。

試験後の供試体の外観状態は、現用品では割れ欠け等の有害な損傷や変形はなかったが、摺動面にかじり鉄片の付着や痕跡が散見された。一方、活性子 B では一部に薄片欠損がみられたが、かじり鉄片の付着や痕跡はなかったものの、現用品に比べて摩耗量が多い傾向であった。

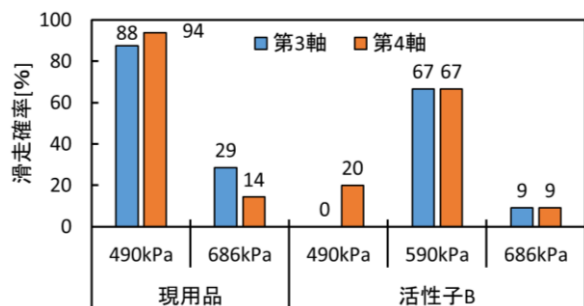


図 5 滑走確率の結果

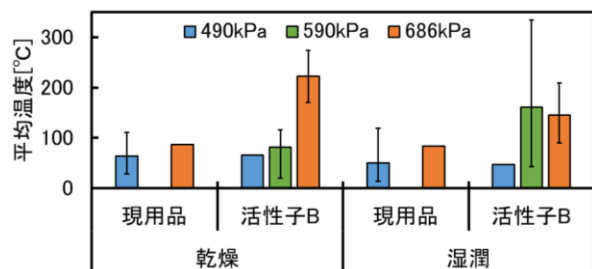


図 6 温度の結果（ブレーキ時）

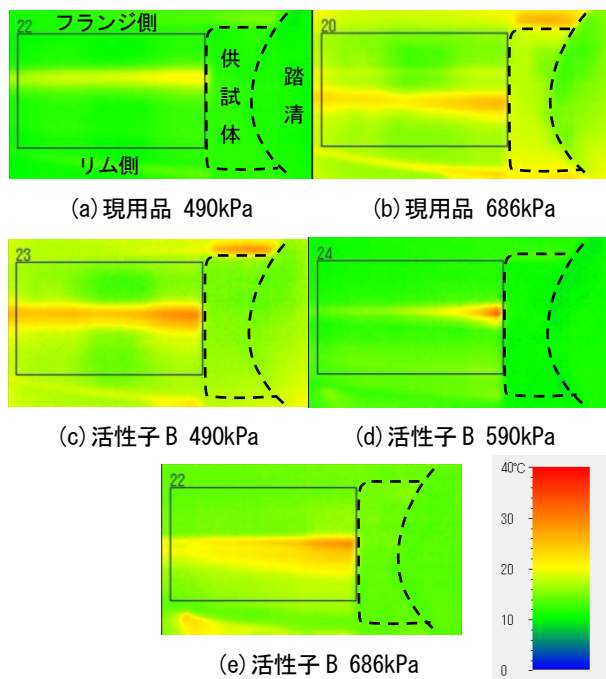


図 7 車輪踏面のサーモカメラ観察結果（出口側）

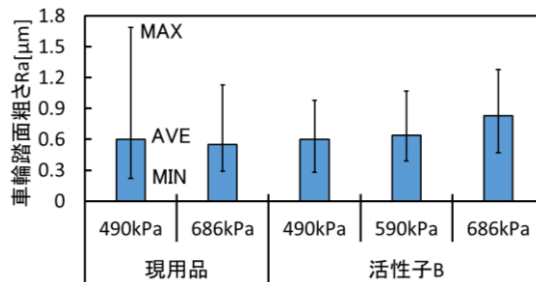


図 8 車輪踏面粗さの結果

5. 結論

合成系活性子 B を新たに開発し、各種試験により評価を行った。その結果、鋳鉄系活性子 A（最高 260km/h）を上回る増粘着効果を確認し、300km/h 超の速度域においても合成系で対応できる知見を得た。ただし、本走行試験は鋳鉄系活性子 A と異なる条件であったため、今後は、鋳鉄系活性子 A で実施した粘着試験条件で評価を進める予定である。なお、併せて踏面清掃装置の動作について、制御対策を講じ、温度上昇と摩耗量の抑制を図る計画である。

参考文献

- 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) 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.
- 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.