

アルミナ粒子散布による 低粘着皮膜条件下での接線力の増加

深貝 晋也* 古谷 勇真** 高野 亮***

Increase of Tangential Force by Ceramic Particles on the Low Adhesion Condition

Shinya FUKAGAI Takemasa FURUYA Ryo TAKANO

Vehicle slipping and sliding caused by fallen leaves especially in autumn is an important issue that needs to be resolved in terms of safety and on-time operation. Though the equipment which apply ceramic particles between rail and wheel of vehicle to increase the adhesion has been developed, a complete solution has not yet reached at the peak of fallen leaves season. Therefore, the authors conducted a brake test to investigate the influence of particle amount and particle size on the tangential force. The test was conducted with paper tape attached to the rail for simulating leaves on the rail. The test results showed that the tangential force increased with the amount of particle apply. A correlation was also observed between the number of holes penetrated by particles remaining on the paper tape and the tangential force. In particular, a relatively good correlation was found between the estimated area of the holes and the tangential force. These results will contribute to design and performance evaluation of particle for improving adhesion between wheel and rail.

キーワード：低粘着条件，アルミナ粒子，増粘着材，滑走，走行試験

1. はじめに

車輪とレールの間に生じる接線力が低下し空転すると、列車の遅延や運休の原因となり得る。また、制動時の滑走はオーバーランを引き起こし、安全上の問題となる可能性がある。さらに、空転や滑走はレールおよび車輪などの部材に損傷を引き起こす場合がある。

接線力の低下を抑制するために、車両から砂などの硬質の粒子を散布することが一般的に行われている。国内では特に、噴射応答性の高さや過度の散布による弊害（軌道短絡の阻害や道床の目詰まり等）の抑制等を利点として、直径約 0.3~0.4mm のアルミナ粒子を圧縮空気少量（例えば 30g/min）散布する技術が開発され、広く実用化されている^{1) 2) 3)}。

接線力の低下はさまざまな要因で起こり得るが、最も日常的に生じる要因として降雨による水の介在が挙げられる。車輪とレールの間に形成される水膜は通常 1 μ m 未満として見積もられており⁴⁾、この場合僅かな粗さ増大で車輪とレールの粘着性能を向上させることが期待できる。一方で秋の山間部のレールに形成される厚い皮膜は、より困難な問題となり得る。線路上に落ちた葉は、通過する列車によって舞い上がり、レールと車輪に押し

つぶされることでレール頭頂面上に厚い皮膜を形成する。このような膜の厚さは数十 μ m のオーダーであると報告されている⁵⁾。

Skipper らは、車輪とレールの接触圧を模した高圧ねじり試験機を用いて、乾燥条件、湿潤条件、葉からの抽出液で汚染された条件で 3 種類の砂の効果を調査し、いくつかの条件下で、介在する粒子の径が大きくなるほど接線力が高まると報告した⁶⁾。また葉からの抽出液で汚染された場合、より大きな粒子が皮膜の破壊を起こしやすいとした。一方で、Arias-Cuevas らは、試験線のレール上に葉を貼り付けた条件で数百 μ m から数 mm までの幅広い粒径の粒子を用いて、車輪とレールの粘着に及ぼす砂の粒径の影響を調査した⁷⁾。その結果、粒子径が大きくなるにつれて摩擦係数が低下すると報告した。

このように、増粘着材の粒径の違いが及ぼす効果については、これまでに調査が行われているが、砂の種類や試験条件が統一されておらず一般的な傾向は不明である。本研究では、増粘着材にアルミナ粒子を用い、ブレーキ粘着を対象に、単純で均一な低粘着性の皮膜として紙テープを使用して、増粘着材の散布量や粒子径の違いについて調査した。試験線で実車を走行させ、車載の噴射装置から増粘着材を噴射散布しながらブレーキ試験を行った。また試験終了後、紙テープの状態を観察することにより、摩擦特性への影響を考察した。

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 車両技術研究部 駆動システム研究室

*** 株式会社テス

2. 試験手法

2.1 試験車両および試験条件

図1 (a) に試験車両の写真, 図1 (b) に試験時のレール頭頂面の写真を示す。試験は鉄道総合技術研究所の試験線で行われた。試験車両には同所が所有する R291 系車両 (2 両編成) を使用した。計 4 台車のうち進行方向 2 番目の動台車に搭載されたモーターを駆動した。図2 は, 試験車両に取り付けた各試験装置の位置関係の概略図である。図3 に試験車両に取り付けた各試験装置の外観を示す。動台車の進行方向前方の車輪とレールの間にアルミナ粒子を散布する装置を設置した。

図1 (a) に示すように, 試験区間のレール頭頂面に紙テープ (幅 50mm×厚さ 0.14mm) を貼り付けて低粘着条件とした。なお, こうした紙テープによる皮膜条件での試験は, 従来にも実施例がある⁸⁾。実際の落葉による皮膜の厚さは 5~100 μm との報告があり⁵⁾, 本研究の試験の皮膜条件はこれらの値と比較してやや厚さが大きい。本研究では, 散布した粒子の量と大きさが粘着に及ぼす影響に着目するために, 他のパラメータをできるだけ均一にする必要があることから, 既往研究^{8) 9)} を踏ま



図1 実車制動試験の様子

え紙テープを使用した。

試験時の制動では, 動台車の電気ブレーキのみを使用した。今回使用した試験車両では, ブレーキを開始した後, 直線的にブレーキ力を増加させる制御を用いた。また, ブレーキ力の増加後, 車輪の滑走が開始し減速度が一定時間, 所定の閾値を下回ると, ブレーキを緩めるように設定した。

紙テープは導電率が低いため, 紙テープで覆われたレールを試験車両が走行する際に, 帰線電流の経路が遮断され, 車輪やレールにアークが発生する可能性が懸念された。そのため, 駆動用バッテリーによる運転を行い, レールに帰線電流が流れないようにした。車輪とレールの設計形状から算出したヘルツ接触圧は約 650MPa であった。

車輪外周に生じる接線力 F_t は, 式 (1) で算出した。

$$F_t = T_m \alpha \eta_i / r \eta_g \quad (1)$$

ここで, T_m はモータートルク, α はギア比, r は車輪半径, η_g はギア効率, η_i はインバータ効率である。 T_m は, 測定したモーター電流に校正試験から得られた係数を乗じて算出した。接線力 F_t を輪軸の静荷重 F_n で除した F_t/F_n を接線力係数とした。試験条件を表1に示す。

2.2 試験手順

図4 は, 試験手順の概略図である。試験では (1) ~ (5) の手順を繰り返した。

- (1) 試験車両を目標速度 (30km/h) まで加速。
- (2) 動台車が低粘着区間に入る前に, アルミナ粒子の散布と制動を開始。このとき, 動台車の電気ブレーキのみを動作 (制動力は徐々に直線的に増加)。
- (3) 滑走の発生。
- (4) 動台車が低粘着区間を通過した時点で試験終了。

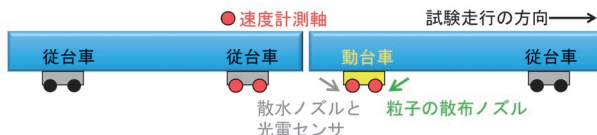


図2 試験車両に取り付けた各試験装置の位置関係の概略図



図3 試験車両に取り付けた各試験装置の外観

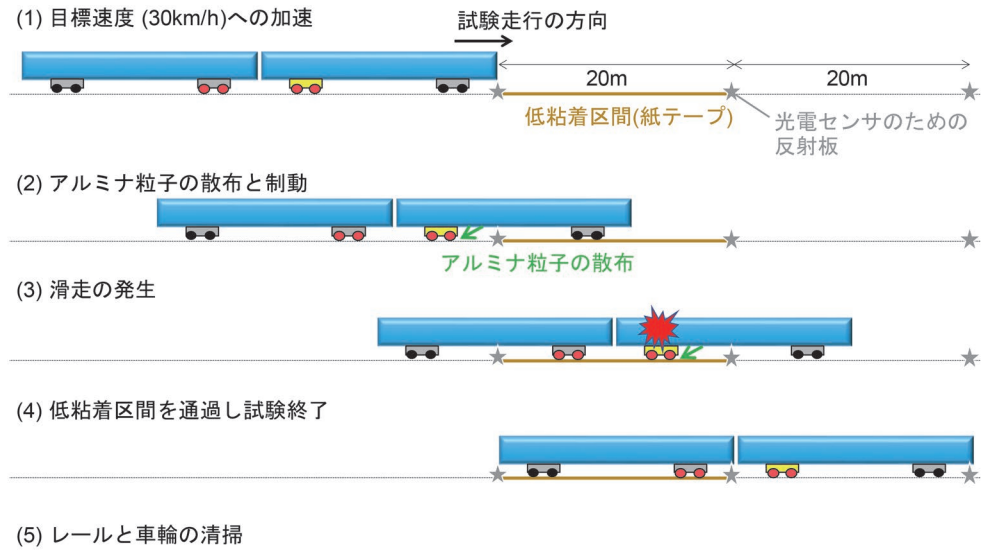


図4 試験手順

表1 試験条件

| 項目 | 値 | |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| ブレーキ初速度 (目標値) | 30km/h | |
| 粒子噴射用空気圧 | 500kPa | |
| ブレーキ制御 | 電気ブレーキのみ (ブレーキ開始後ブレーキ力が直線的に増加) | |
| 粒子の粒径 (中央値) | 通常粒径: 383 μ m 大粒径: 487 μ m | |
| 粒子散布量 | 通常粒径 | 0 (散布なし), 54, 134, 235g/min |
| | 大粒径 | 0 (散布なし), 56, 135, 189, 249g/min |
| レール皮膜 | 疑似皮膜 (紙テープ使用) | |
| 各条件での走行回数 | 1~3回 | |

(5) レールから紙テープを剥離。その後レール研磨機で頭頂面を研磨するとともに、車輪踏面を清掃。

(5) において剥離したテープの一部をサンプルとして、透明なポリエチレンテレフタレートフィルムに貼り付けて保管した。このフィルムをLEDパネル上に置き、下から光を照射しながら写真を撮影することで、アルミナ粒子散布によるテープの孔の分布状態を調査した。噴射条件や車両の走行条件、レール形状の変化による影響をできるだけ少なくするため、各試験では、試験区間の入口付近、中央、出口の3カ所で左右のレールの合計6点からサンプルを採取した。調査した紙テープのサイズは、幅方向は写真撮影時に若干の傾き誤差が生じることを考慮して、紙テープ幅50mmから両端部の数mm分を除外した45mmとし、長さ方向は紙テープをレールから剥がす際に破れずに取得できた最大の長さの135mmを基本とし(45×135mm)、レールから剥がす際に破れた紙テープ等については45×90mmもしくは45×45mmとした。

3. 試験結果

3.1 試験中の接線力係数の変化

図5は、試験中に各測定値に生じた変化の一例である。一番下の線は光電センサで測定した値である。左から1番目と2番目のピークの間は、動台車が低粘着区間(紙テープ上)を走行したときに得られたものである。下から2番目の線(点線)は、噴射装置のON/OFF状態を示しており、数値が大きい方がON、小さい方がOFF状態を表す。アルミナ粒子の散布とブレーキ動作は、動台車が低粘着区間に入る前に開始した。 F_t/F_n は、動台車が同区間に入る約2秒前から増加し始め、同区間内でピークに達した。以降では、このピーク値を $(F_t/F_n)_{peak}$ と呼ぶ。図5から明らかなように、接線力係数 F_t/F_n がピークを示したのは、従軸と動軸の速度差(動軸の車輪/レール間のすべり)が最大となる瞬間であった。2.1節で述べたように、制動力は、減速度が一定時間、所定の閾値を下回ると弱まるようにプログラムされている。そのため、 $(F_t/F_n)_{peak}$ は、同プログラムが増加してきた制動力を低下させ、車輪/レール間のすべりが減少をはじめる直前に最大となった瞬間の接線力係数と解釈できる。

3.2 アルミナ粒子散布量と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

図6は、1分間あたりのアルミナ粒子の散布量と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係を示したものである。いずれの粒径においても、アルミナ粒子の散布量が多いほど、 $(F_t/F_n)_{peak}$ が大きかった。通常粒径の粒子では、アルミナ粒子の散布量とともに $(F_t/F_n)_{peak}$ が直線的に増加した。

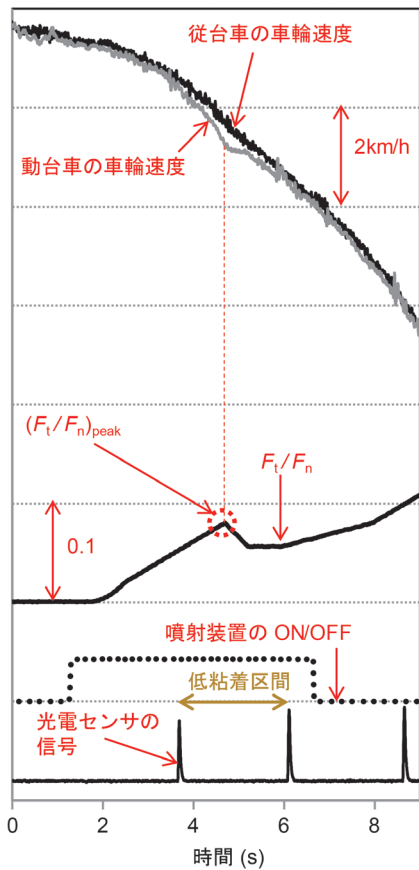


図5 試験中に各測定値に生じた変化の一例

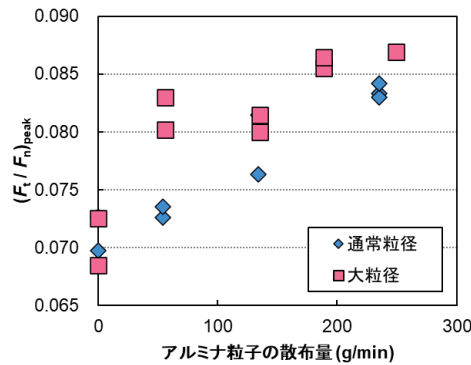
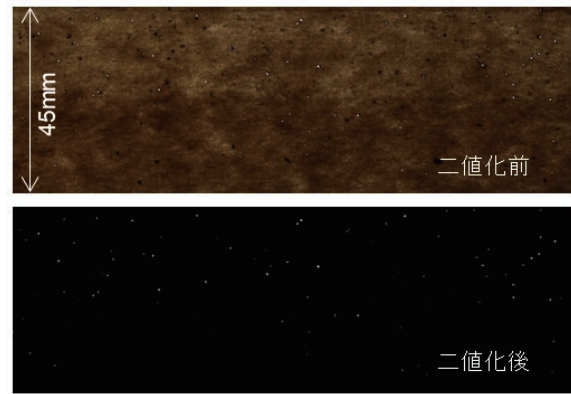


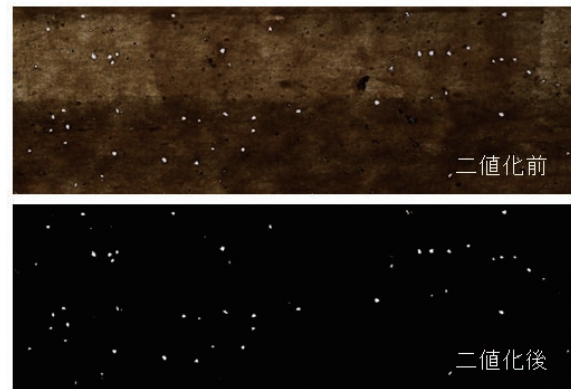
図6 アルミナ粒子の散布量と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

3.3 アルミナ粒子の散布量と貫通孔の数の関係

図7は、試験後の紙テープの写真で、各写真を白/黒に二値化したものである。比較のため、(a) 通常粒径の粒子を散布した試験と (b) 大粒径の粒子を散布した試験で得られた紙テープを示す。両写真において、デジタルカメラのシャッタースピード、絞り、感度、露出補正等の設定は同一である。いずれの場合も多数の孔が見られたが、両写真を比較すると (a) は (b) と比較して微小であった。これらの孔は車輪とレールの間に粒子が介在して、粒子がテープを貫通することで形成されたものと推測した。



(a) 通常粒径, 粒子の散布量: 130 g/min



(b) 大粒径, 粒子の散布量: 130 g/min

図7 試験後の紙テープの写真

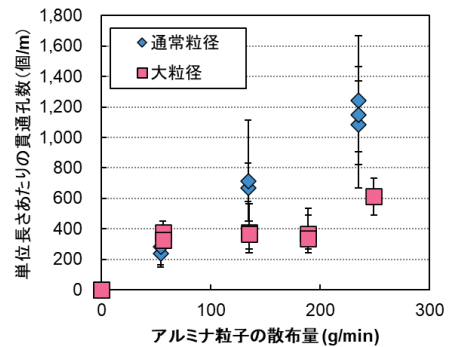


図8 アルミナ粒子の散布量と単位長さあたり (m) の貫通孔数の関係 (エラーバーは最大—最小値)

図8は、1分間あたりのアルミナ粒子の散布量と単位長さあたりの貫通孔数の関係を示す。貫通孔数は、取得した画像を二値化処理することで孔を現出させ、所定の範囲 (例えば、45×135mm) 内の孔の数を計数し、単位長さあたり (m) の孔数として求めた。左右両レールの低粘着区間の入口付近、中央付近と出口付近の計6本の紙テープの貫通孔数をカウントし平均値を求めプロットした。通常粒径の粒子では、アルミナ粒子の散布量に応じて貫通孔数が直線的に増加していた。

3.4 貫通孔数と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

図9に単位長さあたりの貫通孔数と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係を示す。いずれも単位長さあたりの貫通孔数に対して、 $(F_t/F_n)_{peak}$ が増加する傾向が見られた。しかしながら、通常粒径と大粒径を比較すると同程度の貫通孔数でも $(F_t/F_n)_{peak}$ に差があり、大粒径の方が高い傾向が見られた。

4. 考察

図6では、通常粒径では $(F_t/F_n)_{peak}$ と粒子量の間に関係が見られたが、大粒径では、具体的には56g/minにおける $(F_t/F_n)_{peak}$ が線形関係から外れていた。通常粒径の粒子は大粒径と比べて散布された粒子の数が多いため、車輪とレールの界面に均一に介在することができ、これと比較して大粒径の粒子では粒子の数が少なく、貫通孔数に不規則に多寡が生じることで、貫通孔の数と散布量の間には線形関係から外れた可能性が考えられる。また、粒度分布の均一性の違いの影響も考えられる。両粒子の粒径分布は均等係数（粒度分布を表す指標の一つで、1に近いほど粒径がそろっている）に差があり（通常粒径：1.64、大粒径：1.98）、大粒径は通常粒径に比べて粒度分布のばらつきが大きい。これにより、車輪とレールとの接触部における粒子分布のばらつきが大きくなった可能性が考えられる。

図6および図8において、 $(F_t/F_n)_{peak}$ および貫通孔数は、粒子の散布量が多いほど増加し、図9において、 $(F_t/F_n)_{peak}$ および貫通孔数の間に相関がある可能性が示唆された。しかしながら、通常粒径と大粒径を比較すると同程度の貫通孔数でも $(F_t/F_n)_{peak}$ に差が見られた。図7から、大粒径の粒子を散布した場合、紙テープに形成される貫通孔は、通常粒径の粒子で形成される貫通孔よりも大きかった。図10に、紙テープの面積に対する推定貫通面積の比率と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係を示す。ここで貫通面積は粒子の個々の投影面積に比例すると仮定し、貫通孔数に粒子あたりの投影面積（面積は粒径から算出）を乗じて推定した。図9の貫通孔数と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

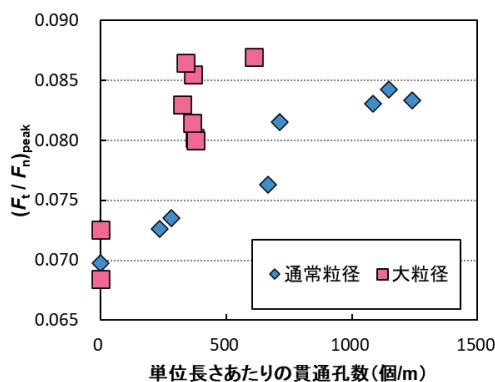


図9 単位長さあたりの貫通孔数と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

と比較して、図10の推定貫通面積の比率と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係では通常粒径と大粒径の差が小さくなっており、貫通孔数よりも推定貫通面積の比率の方が、粒径の差に依らず $(F_t/F_n)_{peak}$ との相関が高いと考えられる。このことから、車輪とレールで接線力を伝達する増粘着材の領域が増加したことで $(F_t/F_n)_{peak}$ が増加した可能性が考えられる。硬質粒子が接線力を増加させる要因としては、車輪やレールの表面の粗面化、表面の洗浄などいくつか考えられるが、低粘着性皮膜を効率よく貫通させ、貫通面積を増加させることが、接線力を高めるための有効な手段となり得る可能性がある。

図11は、散布時の粒子数に対して皮膜を貫通した粒子数の比率を通常粒径と大粒径について比較したものである。散布個数は、全体の重量を粒子一個の平均重量で割ることで求めた。粒子一個の平均重量は、数十個の粒子の重量を、実際に数えた粒子の数で除すことで求めた。数値は全試験結果の平均値であり、エラーバーは最大値と最小値の範囲を示す。今回の試験においては、大粒径の粒子は、通常粒径の粒子に比べて、紙テープを貫通しやすかったと考えられる。こうした傾向に関連して、Skipperらは高圧ねじり試験により、粒子の特性が表面状態に及ぼす影響を調査し¹⁰⁾、小さな粒子は葉への作用面積が減少するため、葉の除去効率の低下につながる可

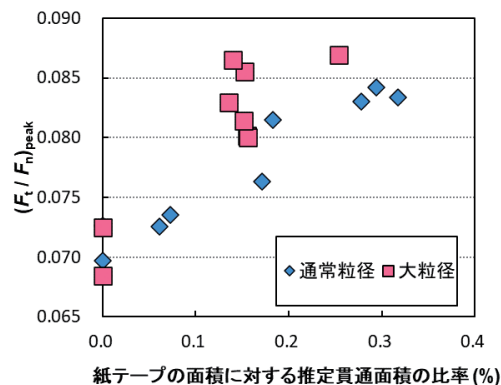


図10 推定貫通面積の比率と $(F_t/F_n)_{peak}$ の関係

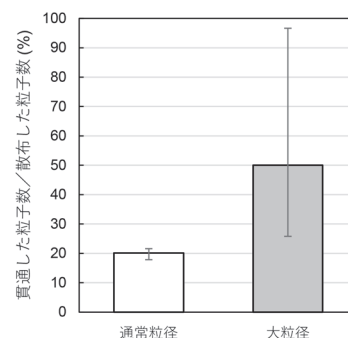


図11 散布した粒子数に対する皮膜を貫通した粒子数の比率（エラーバーは最大—最小値）

能性があるとしている。

しかし、既に述べたように、粒子が大きくなることで車輪とレールの界面への介入が不均一になり、安定的な効果を得づらくなる可能性がある。今後膜厚と粒子径の関係や圧縮時の粒子挙動についてなど、より系統的な研究が求められる。

今回用いた接線力測定手法では、粒子の大きさに関わらず皮膜を貫通した面積が増加するとともに接線力が増加すると考えられた。このことから、対象となる低粘着皮膜を貫通できる特性を持つ粒子を散布することが重要と考える。これらの知見は、新しい増粘着材の設計に役立つと期待される。また皮膜の貫通面積と接線力の間に相関が見られた知見は、たとえば、皮膜の貫通状況を観察・比較することで増粘着材の性能の違いを簡易に評価できる可能性を示していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、低粘着皮膜条件下でアルミナ粒子を散布した際の接線力の増加効果について実車走行試験により調査した。試験には増粘着材としてアルミナ粒子を散布する装置を搭載した車両を使用した。また、秋の落ち葉で形成される厚い皮膜による低粘着状態を、紙テープを用いた単純かつ均一な膜により模擬した。試験結果より、以下の知見を得た。

- (1) アルミナ粒子の散布量が多いほど、車輪／レール間のすべりが最大となった瞬間の接線力係数が高くなった。粒径約 0.4mm のアルミナ粒子の場合、接線力は散布量に対して直線的に増加した。粒径約 0.5mm の粒子でも散布量に対して接線力が増加する傾向が見られた。
- (2) 試験後の紙テープに形成された孔の数と車輪／レール間のすべりが最大となった瞬間の接線力係数の間には相関が見られた。
- (3) 紙テープに形成された孔の数と粒子 1 個あたりの投影面積の積から、紙テープの貫通面積を推定した。貫通面積と車輪／レール間のすべりが最大となった瞬間の接線力係数には相関がみられた。
- (4) レール上に厚い低粘着性の皮膜がある場合、散布した硬質粒子により十分な貫通面積を得ることが

接線力を増加させる上で重要であると考えられる。

この論文は、Elsevier の許可を得て、Wear, Volumes 530-531, Shinya Fukagai, Takemasa Furuya, Ryo Takano, Penetration of contaminated film on rails by ceramic particles and increase of traction force, 205001, 2023 年から転載したものである

文 献

- 1) 大野薫, 伴巧, 小原孝則, 川口清: セラミックス粒子による高速域の増粘着, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.31-36, 1995
- 2) 大野薫, 伴巧, 小原孝則: セラミックス粒子噴射による車輪・レール間の増粘着, トライボロジスト, Vol.41, No.12, pp.973-978, 1996
- 3) 大野薫: 車輪・レールの転がり摩擦とその制御, トライボロジスト, Vol.44, No.7, pp.506-511, 1999
- 4) 陳樺, 名村明, 石田誠: 湿潤状態における車輪 / レール間の粘着力に及ぼす輪重の影響, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.27-32, 2010
- 5) C.R. Fulford, Review of Low Adhesion Research, RSSB Rep. CRF04002, 2004.
- 6) W.A. Skipper, S. Nadimi, A. Chalisey, R. Lewis, Particle characterisation of rail sands for understanding tribological behaviour, Wear, Vol. 432-433, 202960, 2019.
- 7) O. Arias-Cuevas, Z. Li, Field investigations into the adhesion recovery in leaf-contaminated wheel-rail contacts with locomotive sanders, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit. Vol.225, pp.443-456, 2011.
- 8) L. Purcell, A. Lightroller, Trial of Sander Configurations and Sand Laying Rates (T1107) RSSB Report, 2018.
- 9) 伴巧, 深貝晋也, 高野亮, 大野薫: 秋季の空転防止用増粘着材の検討, 第 21 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2014) 講演論文集, No.21, pp.665-668, 2014
- 10) W.A. Skipper, S. Nadimi, M. Watson, A. Chalisey, R. Lewis, Quantifying the effect of particle characteristics on wheel/rail adhesion & damage through high pressure torsion testing, Tribology International, Vol.179, 108190, 2023.