

粘着力に対する落ち葉の影響

陳 樺* 古谷 勇真** 深貝 晋也***
 嵯峨 信一# 村上 浩一** 伴 巧***

Influence of Leaves on the Adhesion between Wheel and Rail

Hua CHEN Takemasa FURUYA Shinya FUKAGAI
 Shinichi SAGA Koichi MURAKAMI Takumi BAN

In the slope section of a train service line located in mountainous area, idling and sliding of the wheels caused by fallen leaves in autumn often occurs, which hinders the scheduled operation of the train. Although sand and ceramic particles are sprayed onto the contact zone of wheel/rail as its countermeasures, the effect is not sufficient. In order to find more effective countermeasures, it is necessary to clarify the mechanism of a decrease in adhesion between the wheel and the rail by fallen leaves. The authors conducted vehicle running tests on the test track and investigated the influence of leaves on the adhesion of wheel/rail for the purpose of acquiring knowledge useful for the practical use of countermeasures. This paper introduces the characteristics of adhesion during driving and braking as well as the reason for the decrease of adhesion by fallen leaves.

キーワード：車輪 / レール, 粘着, 空転, 滑走, 落ち葉, 湿潤

1. はじめに

列車が加速や減速できるのは、車輪とレールの接触部に働く前後方向（列車の進行方向）の接線力、いわゆる粘着力が伝えられるからである。一方、加速や減速で列車の駆動力および制動力が粘着力を超えると、力行時には車輪が空転、ブレーキ時には車輪が滑走する現象が起こる。その結果、列車の加速距離ないし制動距離が長くなるなど、定時運行にも支障をもたらすことになる。さらに、大きな空転や滑走が発生すると、レールには空転傷、車輪にはフラット傷を与える可能性もある。

山間線区では、晩秋から初冬にかけて沿線樹木の枯葉が軌道上に落ちることが多い。レール面の落ち葉は、列車の通過で車輪が踏み潰されてレール面に付着し、その後列車通過の繰返しや時間の経過に伴ってレール面に潰された落ち葉は徐々に蓄積され、黒色の付着物へ変化してゆく¹⁾。過去の調査では、始発列車の空転発生頻度が高く、列車の遅延に留まらず、列車が前進不能に至るケースも見受けられる。始発列車など早朝時間帯に発生する空転は、レール面が濡れていることが主な原因と言われている^{1) 2) 3)}。それは、気温が低い季節には朝晩の気温変化が大きく、早朝時間帯においてレール面が結露す

るためと考えられる。これまで、落ち葉による車輪の空転や滑走が発生する状況の分析^{1) 2) 3)} および空転や滑走を抑制または防止するための対策法に関する研究報告は見られるものの^{4) ~8)}、空転や滑走に大きく影響する要因の一つである粘着力と落ち葉の関係について詳細な調査を行った研究例は極めて少ない。

本研究では、晩秋から初冬の寒冷期に見られる山間線区のレール面の状態を所内試験線において再現した後、試験車両を用いて力行試験とブレーキ試験を実施し、車輪のすべり状況を確認したうえで、車輪のすべる頻度が高いレール面状態に着目して粘着係数の評価を行った。さらに、車輪とレールの接触を模擬した室内試験機を用いて、乾燥、湿潤および落ち葉介在の各状態が連続的に変化する条件下の接線力係数（最大接線力係数を粘着係数とみなす）を測定し、レール面の状態による落ち葉の影響度合いを観察した。以下、本研究の実施内容と得られた結果について述べる。

2. 所内走行試験

2.1 試験概要

図1に示すように、鉄道総研の試験線の直線区間に全長約20mの試験区間を設定した。試験車両はR291系電車（2両編成0.5M1.5T）を使用した。本試験では、M台車の電気ブレーキのみを使用し、T台車の空気ブレーキは動作させなかった。台車枠にカメラを仮設し、

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
 ** 車両制御技術研究部 動力システム研究室
 *** 材料技術研究部 摩擦材料研究室
 # 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

特集：鉄道力学

車両走行時の動台車左右の車輪とレール接触状況および車輪のすべり状況を、車内で観察できるようにしている。

力行試験は、T車先頭で走行する際に、ブレーキ試験は、M車先頭で走行する際に実施した。つまり、1往復走行において、力行試験とブレーキ試験を交互に実施した(図1(a))。各試験における制御条件は、表1に示すとおりである。

表1 制御条件

力行試験		ブレーキ試験	
初速度目標値 (km/h)	30	初速度目標値 (km/h)	30
加速度 (km/h/s)	0.86 ~ 1.1	減速度 (km/h/s)	1.1 ~ 1.3
力行ノッチ	3 ~ 4	電/空種別	電気のみ
空転検知	あり	滑走検知	あり
再粘着制御	あり	再粘着制御	あり

走行試験を行う前に、多様な樹種の枯葉を混ぜたものをレール面に敷き、適切な環境条件を作りながら車両走行の繰返しにより山間線区のレール面の状態を再現した(図1(b))。湿潤条件に関しては、高圧噴水器を用いてレール面に霧状の水を噴射してレール面結露の状態を模擬した。

力行区間とブレーキ区間における計測値としては、動台車の軸速度や列車走行速度などを求めたほか、車両総重量と駆動用モーターの励磁電流指令値及びトルク電流指令値より、動台車(3軸目・4軸目)の接線力係数相当値を求めた。

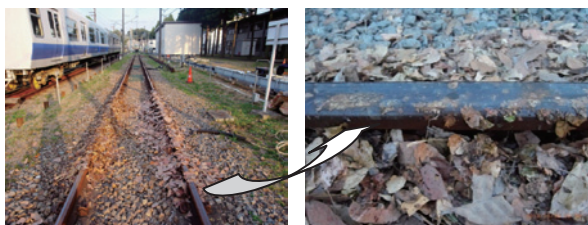
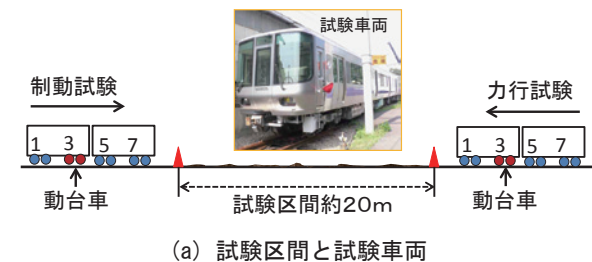


図1 試験概要

2.2 試験条件

走行試験に用いたレール側の条件として、図2に示すように、レール面に潰された落ち葉が存在する場合と、黒色の付着物が存在する場合の2通りを設けた。さらに、

それぞれのレール面の状態に対して、乾燥条件図2(a)(c)と湿潤条件図2(b)(d)を設けた。図2(a)の状態は枯葉を試験区間のレール面に敷いた後、車両走行によってレール面に枯葉を付着させて生成した。図2(d)の状態は枯葉を試験区間のレール面に敷いた後、車両走行と地上からの散水(霧状の水を供給)との繰返しにより、レール面に黒色皮膜を生成させる。

試験線の最高速度の制限(35km/h)により、試験区間への車両進入速度(力行時とブレーキ時の初速度)は30km/hとした。

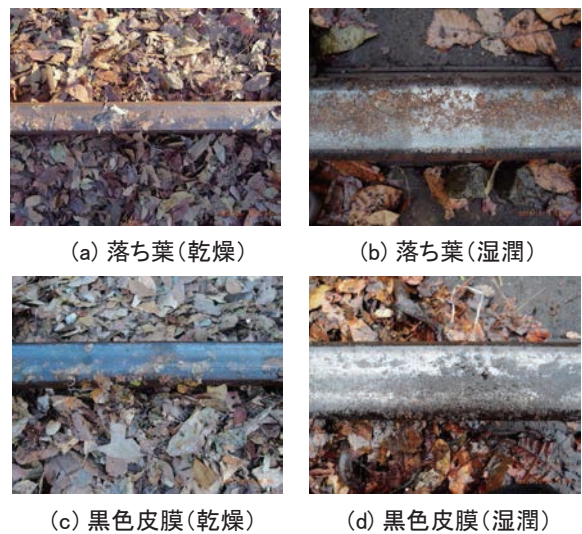
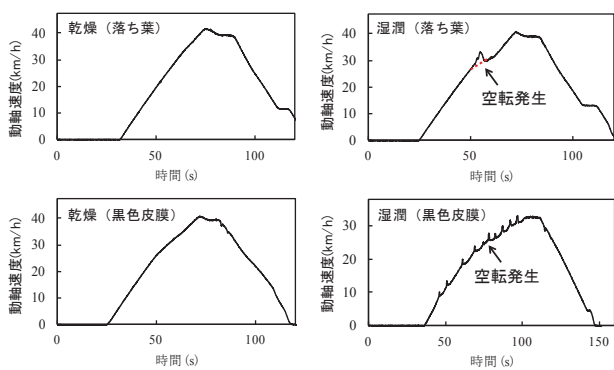


図2 走行試験用のレール面状態

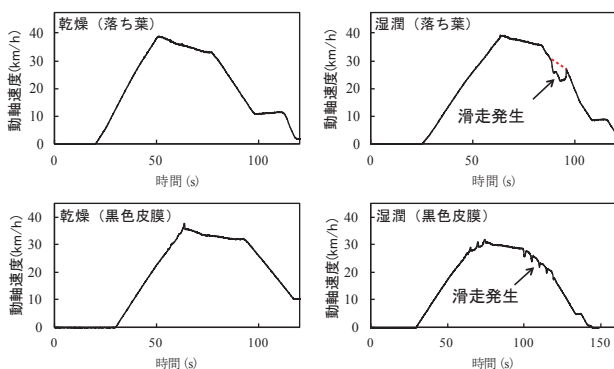
2.3 試験結果

力行試験とブレーキ試験により得られた、レール面の状態と動軸の車輪のすべり状況の関係を図3に示す。試験結果から、レール面に落ち葉や黒色皮膜が存在する場合は、乾燥条件では車輪の大きなすべりは発生しないが、湿潤条件では車輪が大きくすべる状況が発生することがわかる。また、レール面の黒色皮膜が濡れた状態では、車輪がすべる頻度が高く、試験区間(20m)のみならず、その前後の走行区間でも車輪のすべりが発生している。その原因については、以下のように推定される。初めに、車両が試験区間を通過する際に、レール面に付着した湿潤状態(ペースト状)の黒色皮膜が車輪踏面に転写される。次に、車両が試験区間を通過した後、車輪踏面に付着した黒色皮膜が、車輪の転がりによって試験区間以外のレール面に転写される。この箇所を後続の車輪が通過する時に粘着力が低下するため、試験区間の外側でも車輪のすべりが発生したものと考えられる。

車両走行による黒色皮膜の転写の様子を図4に示す。試験区間にレール面の黒色皮膜を生成させた後、その一部の箇所は研磨紙を用いて母材が出るまで研磨した。この状態で試験車両を通過させ、研磨したレール面を観察



(a) 力行試験



(b) ブレーキ試験

図3 空転と滑走の発生状況

したところ、黒色皮膜の転写が確認された。試験後、試験車両の全走行区間のレール面を観察してみると、試験区間以外のかかなり広い範囲にわたってレール面に黒色皮膜が転写されていた。このことから、山間線区で落ち葉が落下する箇所で車輪の空転や滑走が発生するだけではなく、その箇所の前後区間でも空転や滑走が起こる恐れがあると考えられる。



図4 列車走行によるレール面の黒色皮膜の転写

3. 粘着係数の評価

3.1 試験概要

図3からレール面に付着した黒色皮膜が車輪の空転や滑走を引き起こす大きな要因であることがわかったため、本研究では、レール面に生成する黒色皮膜に着目し、乾燥および湿潤条件下の黒色皮膜が、車輪とレール間の粘着係数に及ぼす影響について評価試験を行った。

試験方法と制御条件に関しては、2.1節で説明した力行試験とブレーキ試験と同じである。一方、粘着係数は、車輪がすべる直前の接線力係数相当値を粘着係数の評価値と見なすこととした。

3.2 試験条件

乾燥と湿潤条件下の黒色皮膜の粘着係数を比較するために、比較対象となるレール面の黒色皮膜はできるだけ均一の厚さを有する必要がある。しかし、図2(c)のつくり方は、均一の膜厚が得られにくいため、本試験では落ち葉を粉砕してペースト状にした後、1mあたり10mℓの量を試験区間(20m)にわたってレール面へ均一に塗布した。それから、車両走行とレール面を濡らす(地上散水)作業の繰り返しにより、図5に示すような黒色皮膜を生成した。

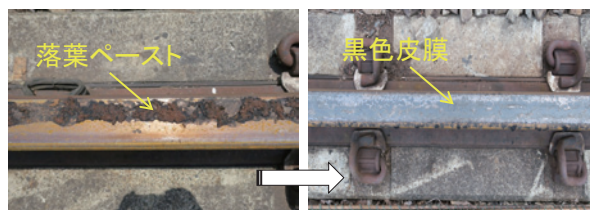


図5 レール面に黒色皮膜の生成

試験条件に関しては、乾燥条件と湿潤条件のほか、試験期間中に降雨の日があったため、雨条件下における走行試験も実施した。

試験区間への車両進入速度(力行時とブレーキ時の初速度)は30km/hとしたが、雨天時の車輪すべりが大きく、すべり状況とブレーキ時の予想停止距離を鑑みながら、速度条件を揃えるために、30km/h以下の初速度で試験区間に進入した場合もあった。

3.3 試験結果

図6に、走行試験結果(チャート)の例を示す。これは、湿潤条件下の落ち葉がレール面に存在する場合の力行試験の結果である。試験区間において、動軸の車輪がすべっていることが確認できる(青色の線、オレンジ色の線)。また、車輪のすべりに伴う再粘着制御の動作によって接線力係数が変動していることがわかる(紫色の線)。

力行試験とブレーキ試験で得られた乾燥条件、湿潤条件と雨条件下の粘着係数の平均値を図7に示す。粘着係数の平均値を見ると、乾燥条件の粘着係数を100%とした場合、湿潤条件下が約50%、雨条件下が約10%と大きく低下することがわかった。

図7に示す結果から、山間線区では、レール面の黒色皮膜が朝露や霜、霧雨などの環境下にある場合には、車輪が空転しやすいことが理解できる。また、測定機器と測定方法が異なるため、定量的に比較できないが、本試

特集：鉄道力学

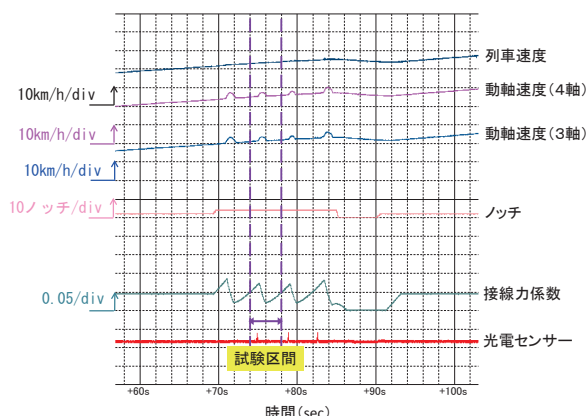


図6 走行試験結果の例（湿潤，力行試験）

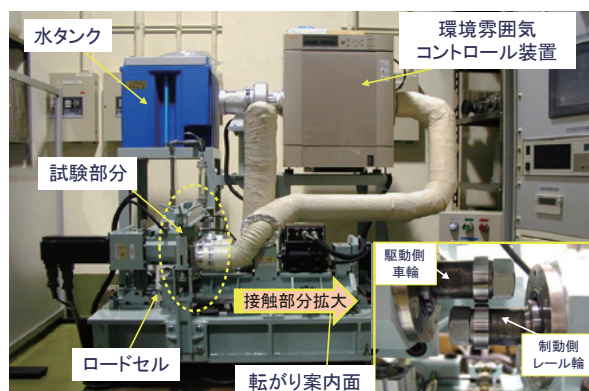


図8 転がり一すべり摩擦力試験機

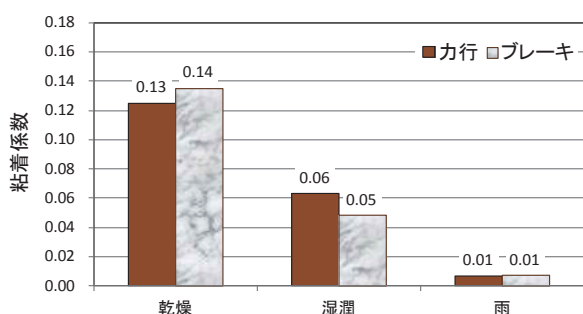


図7 粘着係数の推定平均値

験で得られた乾燥条件と湿潤条件下の車輪とレール間の粘着係数は、東北地方の山岳線において簡易測定法により測定した、同条件下のレール面の黒色皮膜の摩擦係数とほぼ同じ傾向である¹⁾ことから、営業線に近い状態を十分に模擬できたものと考えられる。

4. 室内試験

4.1 試験概要

レール面に黒色の付着物が生成する前、つまり通常の乾燥状態や湿潤状態のレール面に落ち葉が落下して車輪に踏まれる場合の粘着挙動を確認するために、図8に示す車輪とレールの接触を模擬する「転がり一すべり摩擦力試験機」を用いて、試験輪が乾燥、湿潤および落ち葉介在の各状態を連続的に変化させる条件下の接線力係数（最大接線力係数を粘着係数とみなす）を測定した。

試験機は車輪に相当する直径30mmの試験輪（車輪）とレールに相当する同径の試験輪（レール輪）で構成され、実際の車輪とレールの接触圧力を模擬するために車輪の接触踏面は平型、レール輪の接触踏面は曲率半径600mmの円弧が設けられている。なお、これらの車輪とレール輪は、それぞれ実際の車輪とレールから切り出して作られたものである。

試験機の運転条件は、荷重245N（接触圧力約800MPa）、実際の摩耗車輪と摩耗レール接触を模擬す

る）、試験輪の回転速度800rpm（周速度約4.5km/h、試験輪の共振速度が避けられる）、すべり率5%（すべり速度約0.2km/h、安定する接触力係数が得られる）と設定した。

4.2 試験条件と方法

室内試験は、落ち葉を試験輪間に介在させ、次のように実施した。

試験時には試験輪の状態を一定に保つのではなく、試験輪が回転している途中、以下のa)～e)に示す条件変化を設けた。b)の条件については、台風による緑葉の落下を想定し、枯葉の比較対象として試験を行った。湿潤条件については、ガーデンズプレーを用いて車輪とレール輪間に水を噴射した。

- a) 乾燥状態→湿潤状態へ変化（雨降り始めを模擬）
- b) 緑葉介在（台風による緑葉の落下を模擬）
- c) 枯葉介在（秋冬場の枯葉の落下を模擬）
- d) 乾燥状態→湿潤状態→枯葉介在へ変化（レール面結露→枯葉の落下→列車通過を模擬）
- e) 乾燥状態→枯葉介在→湿潤状態へ変化（枯葉の落下→レール面結露→列車通過を模擬）

4.3 試験結果

図9に、試験輪表面が乾燥状態から湿潤状態へ変化する場合の接線力係数を示す。乾燥状態下の接線力係数は0.6～0.7、湿潤状態下の接線力係数は0.2～0.3である。乾燥状態に比べて湿潤状態下の接線力係数は約1/3に低下することがわかる。

図10と図11に、緑葉と枯葉が試験輪間に介在する場合の接線力係数を示す。緑葉介在時の接線力係数は0.2～0.3程度を示しているが（図10）、緑葉が潰されて青汁が滲出すると接線力係数が著しく低下し、0.1以下になることがわかる。これは、一般的な油が介在する場合よりも低い値を示している。一方、枯葉介在時の接線力係数は0.2～0.3となっているが（図11）、試験時に車

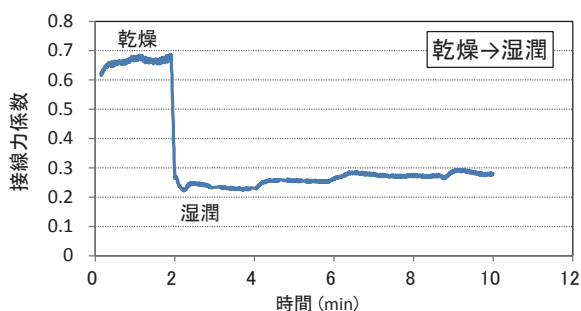


図9 乾燥と湿潤条件下の試験結果

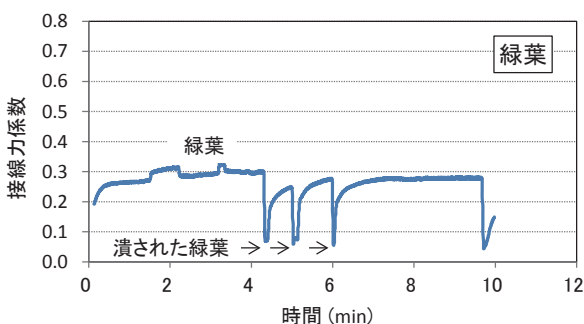


図10 緑葉条件下の接線力係数

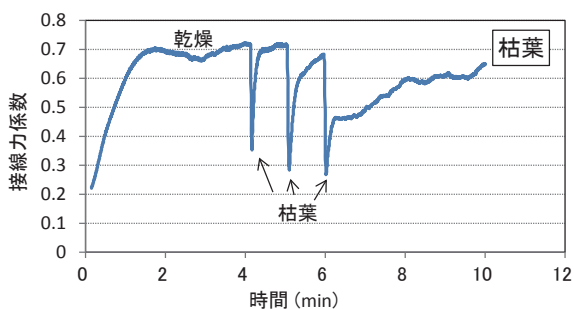


図11 枯葉条件下の接線力係数

輪とレール輪の接触部に供給した枯葉は潰れておらず、試験輪の回転に伴ってそのまま接触部から放出されてしまうため、この数値は、試験輪同士が枯葉に隔てられた状態での接線力係数と解釈される。

図12に、試験輪表面状態が、乾燥→湿潤→枯葉介在の順に連続的に変化する場合の接線力係数を示す。山間線区においてレール面が濡れた後、通過する車輪に落ち葉が踏み潰されてレール面に付着する状況を想定している。図9と同様に、乾燥状態に対して湿潤状態下の接線力係数は半減する。この状態において枯葉を加えると、接線力係数は更に低下し、乾燥状態に対して約1/10、湿潤状態に対して約1/4に低下することがわかる。

図13に、試験輪表面状態が、乾燥→枯葉介在→湿潤の順に連続的に変化する場合の接線力係数を示す。山間線区において落ち葉がレール面に落下して車輪に踏み潰された後、レール面が濡れる状況を想定している。図12と同様に、乾燥状態に対して、枯葉が介在すると接

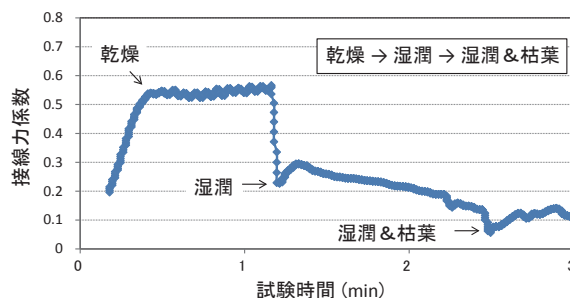


図12 乾燥→湿潤→枯葉条件下の接線力係数

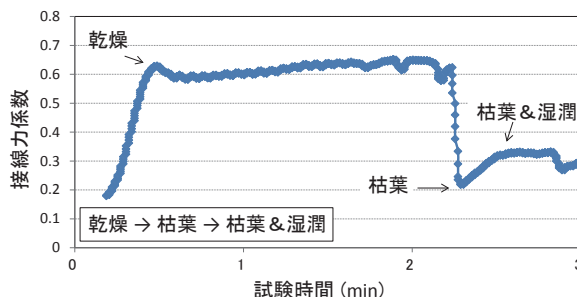


図13 乾燥→枯葉→湿潤条件下の接線力係数

線力係数は1/3に低下することがわかる。この状態で水を加えて湿潤状態とすると、接線力係数がやや回復して僅かに上昇する様子が見られる。

室内試験結果から、レール面が乾燥状態である場合と湿潤状態である場合とでは、レール面に枯葉が付着する際の接線力挙動が異なることがわかる。レール面が濡れた後に落ち葉が付着し、車輪に潰される場合の粘着係数が比較的低く、車輪が滑りやすい状況にあると推定される。

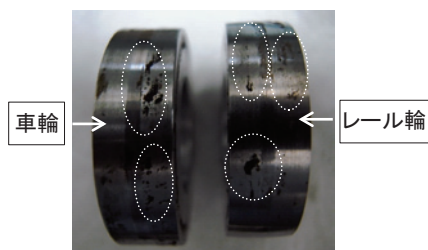
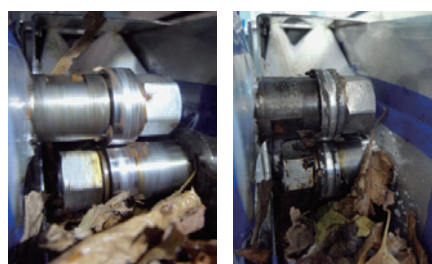


図14 緑葉試験後の表面様子 (試験条件 b))



(a) 試験中 (b) 試験後

図15 枯葉試験の表面様子 (試験条件 d))

特集：鉄道力学

試験後の試験輪の表面状況を観察した結果、緑葉が介在する場合（条件 b）は、図 14 に示すように試験輪表面に斑状に黒色の付着物が付着していることがわかる。また、試験条件 d）における試験中および試験後の試験輪表面の状況を確認してみると、図 15（b）に示すように試験後の表面に黒色の付着物が存在することが確認できる。これらは、山間線区で生成した黒色の付着物と類似しているものである。

5. 考察

試験線において実施した力行試験とブレーキ試験より、山間線区におけるレール面の黒色皮膜が湿潤状態になると、粘着係数が著しく低下し、車輪の空転や滑走が発生しやすい状況となることを確認した。その原因は、次のように推定される。秋季の山間線区で列車通過する時に落ち葉が車輪に踏み潰され、レール頭頂面に付着する。朝晩の気温変化により、夜や早朝の時間帯にレール面が結露し、湿潤状態になる。以上の過程が日々繰り返されることにより、レール面に黒色皮膜が生成され、時間が経つと共にその膜厚が大きくなる。また、雨天や早朝時間帯の結露により、生成された黒色皮膜はペースト状態になり、列車通過時に車輪の空転や滑走が発生する。

また、室内転がりすべり摩擦力試験機を用いて行った、試験輪が乾燥や湿潤状態を連続的に変化させながら、枯葉を試験輪間に介在させる接線力係数の測定試験により、山間線区には見られるように湿潤状態の落ち葉がレール面にある場合は粘着係数が低下することが確認できた。また、落ち葉が車輪に踏み潰された後にレール面が濡れる場合と、レール面が濡れている状態で落ち葉が落下して車輪に踏み潰される場合の粘着係数を比較すると、後者のほうが粘着係数が低いことがわかった。この結果から、山間線区において、早朝の時間帯に朝露や霜で濡れているレール面に落ち葉が落下し、これが列車通過時に車輪に踏まれることにより車輪の空転や滑走が起きやすくなると考えられる。

6. まとめ

所内試験線において山間線区のレール面状態を再現した条件下で力行試験とブレーキ試験を行うとともに、室

内転がりすべり摩擦力試験機を用いて秋季の落ち葉が降り始める頃の状況を模擬した接線力係数測定試験を実施した。これらから得られた結果を、以下にまとめる。

1. レール面に黒色皮膜が付着し、かつ湿潤状態になると、粘着係数が著しく低下し、車輪の空転や滑走が発生しやすい状況に陥る。
2. 黒色皮膜の生成過程に関して、レール面の落ち葉が車輪に踏み潰された後、レール面が湿潤状態になることが繰り返されると黒色皮膜が生成される。
3. 樹木の多い区間に黒色皮膜が生成されると、その前後の区間にも黒色皮膜が車輪により転写される。
4. レール面が濡れている状態で落ち葉が車輪に踏み潰されると、粘着係数が著しく低下し、車輪の空転や滑走が多発しやすい。

文献

- 1) 菅原 衛：“山間線区における空転や滑走に関する研究”，土木学会大 67 回年次学術講演会，VI-495, pp.989-990, 2012
- 2) Yi ZHU, Ulf Olofsson and Rickard Nilsson : A field test study of leaf contamination on railhead surfaces, Proc. IMechE Part F, Vol. 228 (1), pp. 71-84, 2014.
- 3) 坂本一美, 小坂正臣：“芸備線の落葉対策”，新線路, No.12, pp. 14-15, 1989
- 4) 田中正徳, ほか 4 名：軌道に落葉が散在する線区における DC 空転抑制操従法, 第 17 回鉄道技術連合シンポジウム, S8-1-5, pp. 617-620, 2010
- 5) 小野寺淳：急こう配区間の落ち葉等による仙山線の空転防止対策, 運転協会誌, Vol.63, No.5, pp.248-251, 1988
- 6) O Arias-Cuevas and Z Li: Field investigations into the adhesion recovery in leaf-contaminated wheel-rail contacts with locomotive sanders, Proc. IMechE Part F, Vol.225, pp. 443-456, 2010.
- 7) O Arias-Cuevas and Z Li: Field investigations into the performance of magnetic track brakes of an electrical multiple unit against slippery tracks. Part 1: Adhesion improvement, Proc. IMechE Part F, Vol.225, pp. 613-616, 2011.
- 8) O Arias-Cuevas and Z Li: Field investigations into the performance of magnetic track brakes of an electrical multiple unit against slippery tracks. Part 2: Braking force and side effects, Proc. IMechE Part F, Vol.226, pp. 72-94, 2011.