山間線区における車輪／レールの低粘着発生条件の実験調査

○［土］陳　樺　　日比野　澄子　　鈴村　淳一　　生駒　一樹　　松原　孝聡　（鉄道総研）

ビンセント メジエール　ガブリエル ギヨーム　　シャンピン バスティエン（ESTACA, フランス）

Experimental survey of low adhesion occurrence conditions for wheel/rail in mountainous lines

○Hua Chen,　Sumiko Hibino,　Junichi Suzumura,　kazuki Ikoma,　Takatoshi Matsubara
(Railway Technical Research Institute)

Maizieres Vincent,　Guillaume Gabriel,　Bastien Champin
(ESTACA, France)

In mountainous lines, the leaves of trees along the line often fall around the track from late autumn to early winter, which causes the wheels to slip and slide. In order to clarify under what environmental conditions slipping and sliding are likely to occur, in this study,　the influence of the rail surface state (dry or wet) and the form of fallen leaves (green leaves or dead leaves) on the adhesion coefficient were investigated in a laboratory test with a rolling-sliding friction force measurement machine. It was found that the rail surface condition and the morphology of fallen leaves have a great influence on the adhesion coefficient of wheel/rail.

キーワード：山間線区，落葉，車輪とレール，粘着，空転，滑走，葉成分
Key Words：Mountainous lines, green leaf, dead leaf, wheel/rail, friction, wheel slip, wheel slide

１．はじめに

山間線区では，晩秋から初冬にかけて沿線樹木の枯葉が線路周辺に落ちることが多い．また，風の強い日に緑葉も落ちることがある．レール面上の落葉は，列車が通過する際に車輪とレール間に介在するため，粘着力が低下し，車輪の空転や滑走が起きやすいと言われている．過去の調査では，雨天や結露などの湿潤条件下で列車の空転・滑走発生頻度が高く，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 [1]．これまで，落葉による車輪の空転や滑走が発生する状況の分析 [2-4] 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 [5-9]，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，粘着力と落葉の関係を調べるため，山間線区におけるレール面の状態を室内試験機を用いて模擬し，試験輪が乾燥，湿潤および落葉が介在する条件下の接線力係数（最大接線力係数は粘着係数とみなす）を測定した．得られた結果から，レール面の状態（乾燥，湿潤）や落葉の形態（緑葉，枯葉）が車輪とレール間の粘着力に与える影響度合いを評価した．さらに，山間線区の落葉に含まれる主な成分を構造解析により同定し，含有量の異なる主成分の葉について粘着力に及ぼす影響の有無を調べた．以下，本研究の実施内容と結果について紹介する．

２．室内試験

2.1 試験概要

図１に示す車輪とレールの接触を模擬する「転がりーすべり摩擦力試験機」を用いて，試験輪が乾燥，湿潤および落葉介在の各状態を連続的に変化する条件下で接線力係数を測定した．

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）で構成される．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り，材質は実車輪とレールと同じである．

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 800min^{-1}（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．

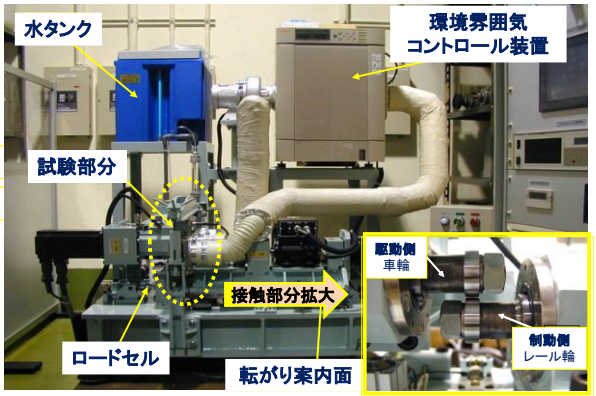


図１　転がりーすべり摩擦力試験機

2.2 試験条件と方法

室内試験は，試験輪の乾燥状態と湿潤状態を連続的に変化させながら，落葉を試験輪間に介在させるという方法で実施した．試験時には試験輪の状態は一定ではなく，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，散水スプレーを用いて車輪とレール輪の接触部に水を噴射した．

a) 乾燥状態→湿潤状態へ変化（雨の降り始めを模擬）
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）

2.3 試験結果

図２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．

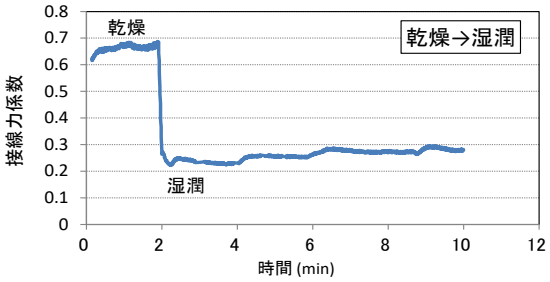


図２　乾燥と湿潤条件下の試験結果

図３と図４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３），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．この数値は，通常の油が介在する場合よりも低くなっている．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４），試験時に車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たれた状態での接線力係数と解釈される．

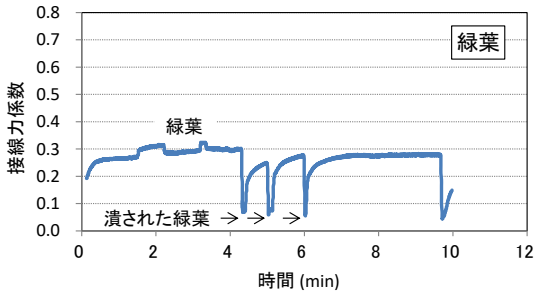


図３　緑葉条件下の接線力係数

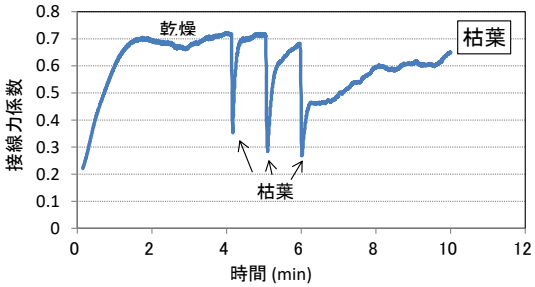


図４　枯葉条件下の接線力係数

図５に試験輪表面が乾燥→湿潤→枯葉介在の各状態を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，落葉が通過する車輪に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２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．

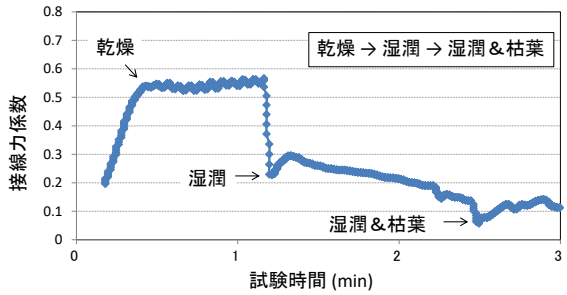


図５　乾燥→湿潤→枯葉条件下の接線力係数

図６に試験輪表面が乾燥→枯葉介在→湿潤の状態を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５と同様に，乾燥状態

に対して，枯葉が介在すると接線力係数は 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．

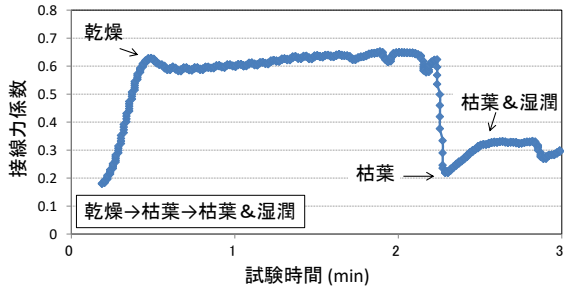


図６　乾燥→枯葉→湿潤条件下の接線力係数

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枯葉が落下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．

2.4 車輪への落葉転写状況

レール面が湿潤状態である場合と乾燥状態である場合の車輪への落葉転写状況を車輪往復転動試験装置（図７）により確認した．

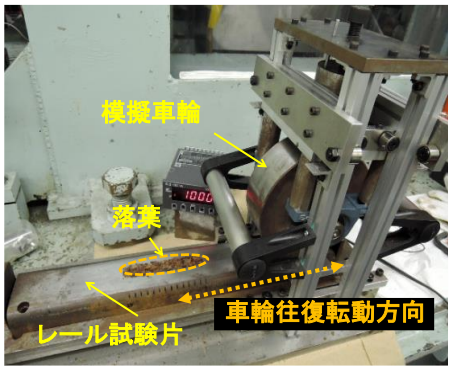
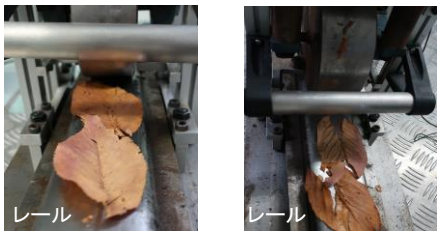
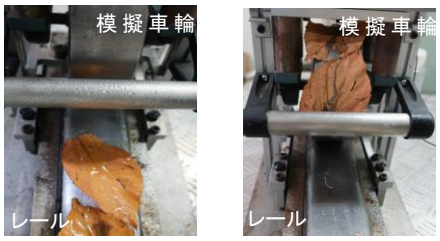


図７　車輪往復転動試験装置

レール面が濡れている状態で枯葉が付着して模擬車輪を転動させると，図８(a)に示すように枯葉は車輪に転写しない様子が観察された．また，予めレール面に枯葉が存在する状態で水を散布した後に模擬車輪を転動させると，図８(b)に示すように枯葉は車輪に転写した様子が観察された．この結果から，山間線区においては，雨天や朝露，霜で濡れている状態で枯葉がレール面に落下すると車輪への落葉転写が少なく，列車走行によるレール面への再転写も少ないため，沿線上のレール面に落葉の踏み潰し跡は少ないと推定される．一方で枯葉がレール面に落下した後，雨が降ってくると車輪への落葉転写が多く，列車走行によるレール面への再転写も多いため，沿線上のレール面に落葉の踏み潰し跡は多いと推定される．車輪踏面や沿線上のレール面に落葉の踏み潰し跡は多くなると，時間の経過とともに落葉の踏み潰しで形成した皮膜の厚さが大きくなり，車輪の空転・滑走を引き起こす可能性が高くなる．



（ａ）　レール湿潤状態で枯葉が付着



（ｂ）　枯葉が付着した後で散水

図８　車輪への枯葉転写状況

2.5 考察

転がりーすべり摩擦力試験機を用いた試験では，試験輪の乾燥や湿潤状態を連続的に変化させながら，枯葉を介在させる場合の接線力係数の測定結果から，山間線区には湿潤状態の落葉がレール面に付着する場合は粘着係数が低下することが確認できた．また，落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葉がレール面に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，後者のほうは数値的に低いことがわかった．この結果から，山間線区においては，雨天や朝露，霜で濡れているレール面に落葉が落下すると，列車走行時に車輪の空転や滑走が比較的起きやすいと考えられる．一方で車輪に踏まれた落葉の転写状況に鑑み（図７，図８），レール面に枯葉が落下している状態で雨が降ってくると車輪への落葉転写が多く，列車走行時に再びレール面に転写するため，沿線上のレール面に落葉の踏み潰し跡が多くなり，空転・滑走の発生区間が長くなることが考えられる．

３．落葉主成分の同定

3.1 構造解析

落葉が車輪に踏み潰される時に，落葉の中に含まれる成分が車輪とレールの粘着状態に影響を及ぼすと考えられるため，山間線区から採集した数種類の落葉（同種類の緑葉と落葉を含む）の構造解析を行い、主成分を同定した．また，落葉の主成分である脂質やガラクチュロン酸，リグニン，タンニンなどを固体核磁気共鳴法や可視・紫外分光法によって定量分析を行った．

図９に分析に用いた落葉の検体写真を示す．表１に定量分析結果を示す．この結果から，いずれの落葉に対しても主成分の含有量は，リグニンが最も多く，脂質，ガラクチュロン酸，タンニンの順に減少することがわかる．

3.2 落葉主成分の接線力特性

図１の「転がりーすべり摩擦力試験機」を用いて，粘着挙動に与える落葉主成分の影響を観察した．試験方法とし

図９　検体写真

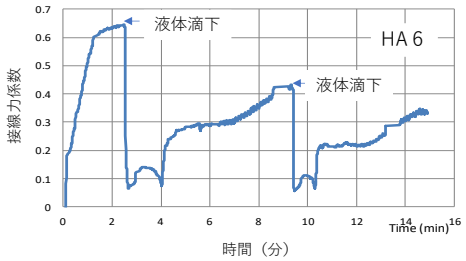
表１　主成分含有量分析結果

試料No.	検体名称		含有量(%)			
			脂質（注1）	ガラクチュロン酸	リグニン	タンニン
1	落葉（山間線区）	HA-1	14	9	20	7
2		HA-2	16	7	20（注2）	3
3		HA-3	14	5	24（注2）	6
4		HA-4	14	7	15	6
5		HA-5	17	10	20（注2）	4
6		HA-6	19	8	20（注2）	10
7		HA-7	15	13	15（注2）	5
8		HA-8	12	15	16	6

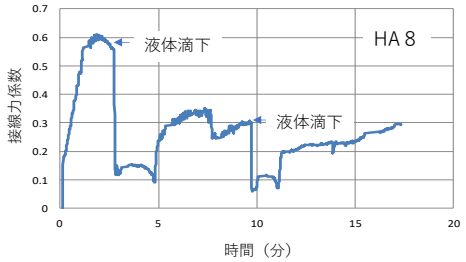
（注１）可視・紫外分光法の測定結果から推定した値
（注２）固体核磁気共鳴法により測定した値

て，まず市販のペクチン（ガラクチュロン酸を代用），リグニン，タンニンと精油（脂質を代用）の試薬を洗浄水（蒸留水）と混ぜて液体状の試薬を作った．それから，試験開始後２分が経過した時点で試薬 1mL をレール輪の接触踏面に塗布し，また，10 分経過した時点で試薬 1mL を追加して塗布した．

表１に示す HA-6 および HA-8 のガラクチュロン酸とリグニンの量は完全に反対であり，一方は少量であり，もう一方は大量であるため，代表例として接線力係数を測定した．試験結果を図 10 に示す．試験開始後，２回程度試薬をレール輪の接触踏面に塗布した結果，いずれも同程度の低接線力係数（0.1 以下）が示されていることから，主成分の量は異なっても，接線力係数の低下度合いはほぼ同程度であり，樹種に殆ど依存しないことがわかる．樹種の影響については，著者らの先行研究にも確認されていたため[10]，落葉の種類別に車輪とレール間の接線力係数に影響を及ぼす度合いは低いことが推定される．



（ａ）　HA-6 の接線力係数



（ｂ）　HA-8 の接線力係数

図 10　異なる主成分の葉の接線力係数

４．まとめ

本研究では，室内試験機を用いて山間線区における落葉が降り始め頃の状況を模擬した接線力係数測定試験，ならびに異なる主成分の落葉による接線力係数測定試験を実施した．得られた知見は，以下の通りである．

１．落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葉が落下して車輪に踏み潰される場合の接線力係数を比較すると，後者のほうは数値的に低い．

２．レール面が濡れている状態で落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状況にある．

３．落葉の主成分は脂質，糖類，リグニン，タンニンであり，そのうち，リグニンの含有量は最も多く，次に脂質，糖類，タンニンの順に減少する．

４．落葉の種類別に車輪とレール間の粘着力係数に影響を及ぼす度合いが低い．

参　考　文　献

1) 鉄道総研：落葉による空転・滑走に関する調査研究，2020 年 3 月
2) 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
3) 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
4) 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
5) 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
6) 小野寺淳：急こう配区間の落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.
7) 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
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 1: Adhesion improvement，Proc. IMechE Part F，Vol.225，pp. 613-616，2011
9) 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
10) 木村成克，ほか３名：落葉種別による接線力係数の評価，第25回鉄道技術連合シンポジウム，U00082，2018