

曲線部における車輪／レール潤滑方法の評価

陳 樺* 深貝 晋也** 曾根 康友***
土井 久代# 伴 巧** 名村 明*

Assessment of Application of Lubricant to Wheel/Rail Interface in Curves

Hua CHEN Shinya FUKAGAI Yasutomo SONE
Hisayo DOI Takumi BAN Akira NAMURA

Lubrication between wheel and rail is generally known to decrease the friction between wheel and rail, resulting in the reduction of wheel flange wear, rail gauge face wear, low-rail corrugations and the squeal noise. However, the type of lubricants and their supplying method adopted by railway operators are not necessarily reasonable or effective. This paper describes a fundamental study on the basic characteristics of various types of lubricants such as effect on traction behavior of vehicle, spreading rate on the rail surface and effect on vehicle/track dynamic behaviors (focused on the lateral force interacting between wheel/rail interface), and propose appropriate lubrication method according to the track geometry of curves and train speeds.

キーワード：車輪，レール，急曲線，潤滑剤，トラクション，横圧，延び性

1. はじめに

列車が曲線を通過する際に発生する車輪フランジの直立摩耗とレールゲージコーナの側摩耗，レール頭頂面の波状摩耗などの主な原因の一つは，台車前軸で発生する横圧である。横圧の低減対策として，車両側では横圧の発生を抑制する操舵台車や一軸台車の研究開発が進められ，軌道側でもカントやスラックの適正化が検討されている。一方，材料面からのアプローチとして車輪とレール間の摩擦力を減らす潤滑剤の適用が国内外でも研究され，特に近年，内軌潤滑による横圧低減効果が注目されている^{1) 2) 3)}。車輪／レール潤滑システムは，潤滑の対象となる車輪／レールの接触部位により，“外軌（車輪フランジ／レールゲージコーナ）潤滑”と“内軌（車輪踏面／レール頭頂面）潤滑”とに分類できる。外軌潤滑は，車輪フランジとレールゲージコーナ間に発生する横圧による摩耗やフランジ音を抑制するために，その接触点の摩擦係数を低減して摩擦力を減らすことを目的としている。潤滑剤の付着範囲がレール頭頂面あるいは車輪踏面に拡大しなければ摩擦係数がより小さいことが望ましい。内軌潤滑は，車両が半径の小さい曲線を通過するときに発生する横圧を減らし，レール波状摩耗の発生

防止やきしり音の抑制に効果的である。ただし，レール頭頂面と車輪踏面間を潤滑することから，無潤滑状態と比較してブレーキ距離の延伸が小さく，かつ巨視すべり領域においてトラクション（接線力）係数が低下しない，あるいは上昇する傾向を有する空転・滑走を起こしにくい潤滑剤が望ましい。

潤滑剤の形態として，液体潤滑剤（油系，エマルジョン系，水ベース系，液体金属系），半固体潤滑剤（グリース）と固体潤滑剤（グラファイト，二硫化モリブデン）の3種類があるが，国内で使用されている車輪／レール用潤滑剤について，本研究では潤滑剤のタイプに応じて，油系，グリース系，水溶性潤滑剤，固体潤滑剤と分ける。また，潤滑剤の代替として，安価な水を適用する場合もある。油系やグリース系は外軌側の摩耗と騒音を軽減する目的として広く使用されてきた実績はあるものの，車輪踏面やレール頭頂面に付着してしまった場合，制動距離の延伸などが課題となる。この問題に対して近年，鉄道総研でブレーキ性能への影響が少ない油系の外軌用潤滑剤を開発し，性能確認を行っている⁴⁾（以後，既存試作品と呼ぶ）。固体潤滑剤は比較的安定した摩擦特性を示すことから，近年その使用が徐々に拡大している。水溶性潤滑剤は雨水等で簡単に洗い流されるため，保守作業や信号短絡への影響が少ないと考えられる。水はブレーキ性能や環境への影響などには基本的に問題がないが，金属部の腐食という欠点がある。故に近年，鉄道総研でその欠点を改善でき，なおかつ環境にやさしいバイ

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
** 材料技術研究部 摩擦材料研究室
*** 材料技術研究部 潤滑材料研究室
鉄道力学研究部 車両力学研究室

特集：鉄道力学

オタイプの水溶性潤滑剤（以下、新規試作品と呼ぶ）を試作した。特徴としては、安定性（分離しない）が比較的良く、また、油系等と違って水ベースのため、レール面への残存が少ないので、ブレーキへの影響が少なく、レール面を含む軌道側の汚れが少ない。

本研究では、代表的な既存と新規潤滑剤の基本特性（トラクション挙動、伸び性、横圧低減効果、ブレーキ性能）を調べ（表1）、さらに、車両運動シミュレーション手法を用いて行った車輪／レール潤滑による横圧低減効果の評価結果により、線区条件に応じて内軌潤滑と外軌潤滑をより適正に実施するための考え方および方向性について検討した。以下に、その結果を報告する。

表1 調査内容一覧表

潤滑剤種別	用途	トラクション挙動	伸び性		横圧低減効果	ブレーキ性能
			室内	構内		
グリース系	内・外軌	○	○	○		
油系	外軌	○	○	○		
既存試作品	外軌	○	○	○		
固体潤滑剤1	内・外軌	○	○	○	○	○
固体潤滑剤2	内軌	○	○	○	○	○
水溶性潤滑剤	内軌	○	○	○	○	○
水	内・外軌	○	○	○	○	○
新規試作品	内軌	○	○	○	○	○

（注）○は、本研究で調査した項目である。

2. 室内試験による潤滑剤の基本特性調査

2.1 トラクション挙動

空転または滑走を抑制するためには、巨視すべり領域ではすべり率の増大に伴ってトラクション係数が大きくなる潤滑剤が望ましい。本研究では、2円筒転がり接触試験機⁵⁾を用いて各種潤滑剤のトラクション挙動を調べた。なお、潤滑剤種別に応じて、2種類の塗布方法を用いた。一つは、あらかじめ適量の潤滑剤をレール輪の表面に均等に塗布し、それから速度5km/h、接触荷重1kNの条件下で潤滑剤が接触面に均一になるようになじみ運転を60秒程度行って試験した。もう一つは、噴射ガンから車輪／レール輪の接触部に潤滑剤を噴射しながら試験を行った。試験に用いた潤滑剤の塗布方法および塗布量を表2に示す。試験時の速度は40km/h、荷重は3.5kN（最大ヘルツ接触圧力751MPa）とした。

試験結果を図1に示す。固体潤滑剤や新規試作品のト

表2 潤滑剤の塗布方法および塗布量

潤滑剤種別	塗布方法	塗布量
グリース系	塗布後試験	0.2g
油系	塗布後試験	0.2g
既存試作品	塗布後試験	0.2g
固体潤滑剤1	塗布後乾いてから試験	0.7g
固体潤滑剤2	試験中噴射	適量
水溶性潤滑剤	塗布後試験	0.7g
水	試験中噴射	460ml/min
新規試作品	試験中噴射	520ml/min

ラクション係数がすべり率の増大に伴って大きくなったことから、これらは巨視すべりが生じにくい潤滑剤と考えられる。一方、グリース系、油系、水溶性潤滑剤のトラクション係数がすべり率の増大に従って小さくなるため、一旦滑走が起きたら、再粘着し難いことが考えられる。水の場合、微小すべり領域から巨視すべり領域にわたって上記のいずれの潤滑剤よりも高いトラクション係数が示され、また、すべり率の増大に従ってトラクション係数がほぼ一定値を維持することから、空転または滑走を起こしにくいものと考えられる。図中の微小すべり領域（約0.6%⁶⁾）でのトラクション係数に注目すると、新規試作品はグリース系や油系（既存試作品を除き）、水溶性潤滑剤と同程度に低く、かつ巨視すべり領域ではすべり率の増加に従って大きくなる挙動を有するため、車輪踏面とレール頭頂面の接触部に使用する潤滑剤としては横圧低減と空転・滑走抑制の面から有望であると考えられる。

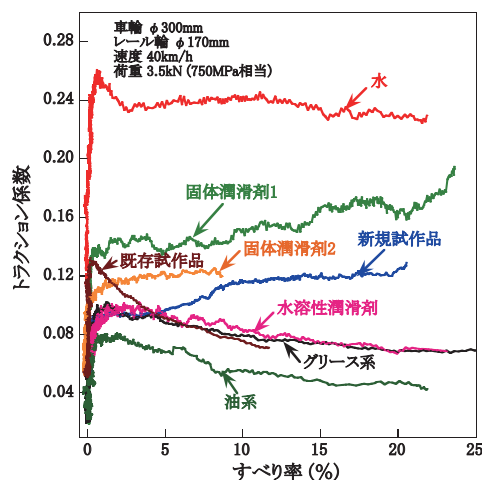
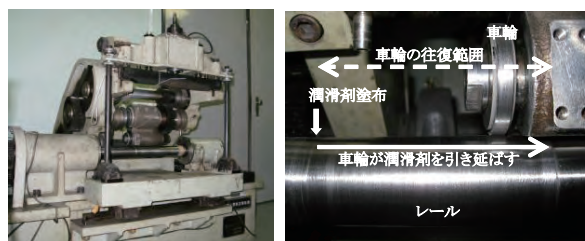


図1 各種潤滑剤のトラクション挙動

2.2 伸び性の相対評価

地上から潤滑剤を供給する方式において、潤滑剤は車輪の回転によって引き延ばされるが、伸び距離が長ければ長いほど地上装置の台数が少なくて済むので、コストの面では有利になる。本研究では、円盤／円筒型摩擦試験機（図2）を用いて各種潤滑剤の伸び性評価試験を行った。試験条件を表3に示す。試験機は図2（b）に示すように長さ110mmの円筒状のレール鋼と接触部の幅5mm



(a) 試験装置 (b) レール鋼と車輪の接触状態

図2 円盤／円筒型摩擦試験機

表3 円盤/円筒型摩擦試験機の試験条件

項目	値
接触荷重	約890N (最大ヘルツ接触圧力 650MPa)
試験片回転速度 (レール用)	26 rpm
試験片回転速度 (車輪用)	23 rpm
試験片径 (レール用)	44 mm
試験片径 (車輪用)	53 mm
すべり率	約6%

の鋼製車輪とが螺旋状に転動接触するように工夫した。すべりは両者の回転速度と外径の差から強制的に与え、トラクション係数は車輪のトルクと押付荷重より求めた。

潤滑剤の延び性を求める方法を図3に示す。図の上部は、試験

片の動きを模式的に示したものである。車輪試験片が、潤滑剤を塗布した領域に入るとトラクション係数が下がっている様子が分かる。延びは初期乾燥状態のトラクション係数が、潤滑剤の介在により低下した後、再び初期乾燥状態の値に戻るまでの距離 (S) とした。ここで、一旦低下したトラクション係数は線形に再上昇すると仮定している。試験は一つの潤滑剤に対して塗布量を変えて複数回実施した。図4に各種潤滑剤の塗布量と相対延びの関係を示す。縦軸に示す相対延びとは試験機の1ストローク長 (S_0) の距離を1として正規化した値である。図から、データにばらつきはあるものの全ての潤滑剤において、塗布量の増加に伴って延びが増加する傾向を示した。そして、同じ塗布量の場合、水溶性潤滑剤の延びが一番良く、次に油系とグリース系であった。新規試作品や固体潤滑剤1の延び状況は水とほぼ同程度であった。

実際の列車走行は、車輪とレールの間の潤滑剤が一つの車輪により延ばされた後に残存し、その地点から後続の

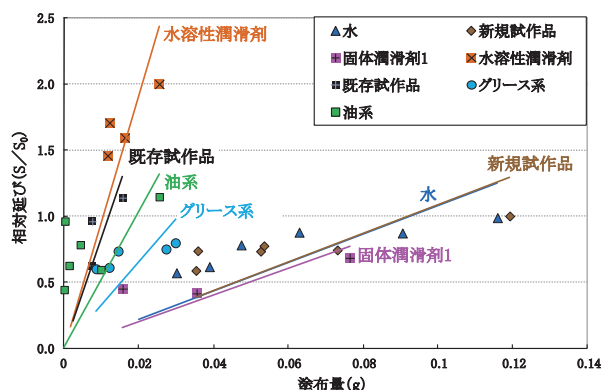


図4 各種潤滑剤の相対延びと塗布量の関係

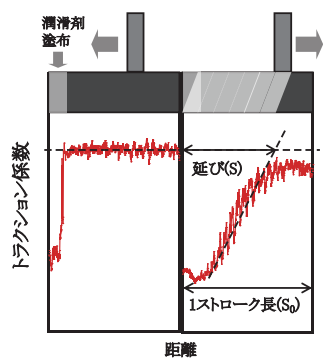


図3 延び性の評価法

車輪によりさらに延ばされていくため、延びには潤滑剤の残存量が大きく影響していると考えられる。つまり固体成分を含むものや、油系やグリース系等乾燥し難いものは繰り返しの車輪通過により徐々に延びていく可能性がある。

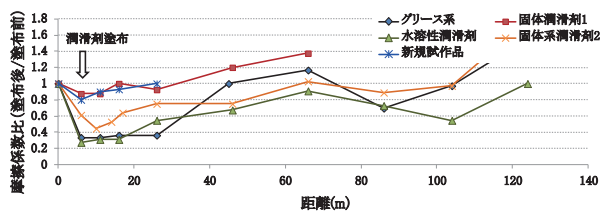
3. 構内試験線における潤滑剤の基本特性調査

3.1 摩擦係数測定による延び距離の調査

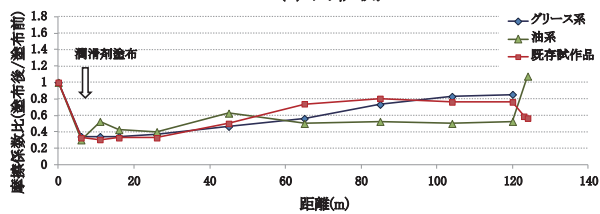
曲線区間 (半径 160m, カント 90mm, スラック 10mm) において、各種潤滑剤を所定の塗布箇所に塗布したのち、試験車両が 40km/h で通過した直後のレール面の摩擦係数を測定した。試験に際して、内軌用潤滑剤は内軌側レール頭頂面、外軌用潤滑剤は外軌側レールゲージコーナに塗布した。既存潤滑剤の塗布量は、過去に実施した営業線のレール面における油分付着量の調査結果の下限値を勘案して、車輪 (ϕ 860mm) の一回転分に相当する長さのレール (2.7m) に対して約 2ml を塗布した、さらに、塗布量による延び性の違いを確認するために約 5ml の塗布条件も設けた。一方、新規試作品について、同じ長さのレールに対して約 30ml を塗布した。

図5に各種潤滑剤の延び状況を示す。図5(a)は内軌側、図5(b)は外軌側の摩擦係数測定結果である。潤滑剤を塗布する前の摩擦係数に戻るまでの距離を観察すると、内軌潤滑の場合、固体潤滑剤1、新規試作品、グリース系、固体潤滑剤2、水溶性潤滑剤の順に延び距離が長くなっており、外軌潤滑の場合、120m 以後油系の摩擦係数が急に上がり油切れと考えられるが、グリース系と既存試作品については、塗布する前の摩擦係数に戻っていなかったため、両者の比較評価ができなかった。

潤滑剤の塗布量の違いによる延び状況を図6に示す。内軌用潤滑剤3種類を対象として、レール (2.7m) に対して塗布量 5ml と 2ml を設定した。図から、全体としてばらつきのあるものの、グリース系を除き、固体潤滑剤1や水溶性潤滑剤の塗布量が倍ほど異なっても、延



(a) 内軌側



(b) 外軌側

図5 各種潤滑剤の延び状況

特集：鉄道力学

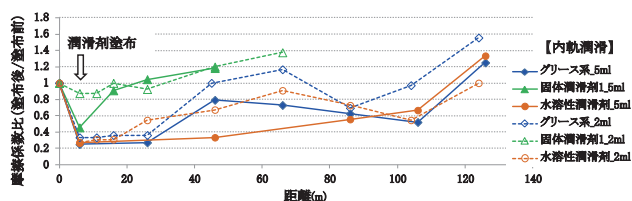


図6 潤滑剤の塗布量の違いによる伸び状況

び距離に顕著な差が見られなかった。一方、グリース系の場合、塗布量 5ml に比べて、塗布量 2ml の伸び距離は比較的短かった。この結果から、粘性の高いグリース系について、伸び距離が塗布量に影響される可能性があると示唆された。

3.2 レール面潤滑剤付着量の分析

潤滑剤の伸び性評価に関して、前節の摩擦係数測定のほか、レール面潤滑剤付着量の分析も行った。試験車両が潤滑剤塗布箇所を通過した後、グリース系や油系については、適量の油溶性溶剤（ノルマルヘキサン）を浸みこませたガーゼで車輪が接触するレールの部分を拭き取るにより採取した。その後、ガーゼ試料を円筒形のろ紙に入れ、ノルマルヘキサンでソクスレー抽出を 20 時間行い、抽出された油分の質量を測定した。一方、固体潤滑剤 1、水溶性潤滑剤を塗布した場合には、水をしみこませたガーゼで車輪が接触するレールの部分を拭き取るにより採取し、それぞれ固体潤滑剤 1 の有効成分の一つと考えられるモリブデン、水溶性潤滑剤の含有成分であるリンを、酸分解により水に溶解させ、プラズマ発光分光分析装置（ICP）により定量した。単位面積当たりの付着量は潤滑剤を採取した車輪が接触するレールの部分の面積で除して求めた。図 7 に各種潤滑剤の塗布箇所からの距離に対する付着量の分布（距離的な効果持続性）を示す。図中に塗布量 5ml の場合は「塗布量大」、塗布量 2ml の場合は「塗布量小」と記す。図から、グリー

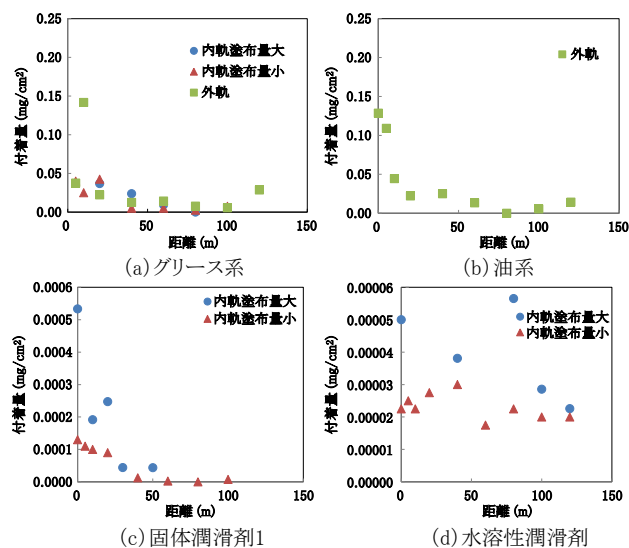


図7 距離に対する潤滑剤付着量の分析結果

ス系、油系と固体潤滑剤 1 は通過車輪によって延ばされているが、塗布箇所からの距離が大きくなるほど付着量が減少することが確認された。さらに、グリース系について、内軌あるいは外軌の塗布、塗布量によって顕著な差異は認められなかった。固体潤滑剤 1 では 50m を超えると有効成分がほぼ検出されなくなっており、付着量の観点でも伸び性に劣る潤滑剤であると言える。水溶性潤滑剤については、明確な距離依存性および量による変化が見られなかったが、伸び距離は比較的長かった。

3.3 横圧低減効果

曲線区間（半径 176m，カント 105mm，スラック 20mm）において、試験車両が内軌潤滑箇所を速度 40km/h で通過する際の横圧を測定した。潤滑剤は内軌用 4 種類を使用した。固体潤滑剤 2 は車載噴射装置を用い、固体潤滑剤 1、水溶性潤滑剤と新規試作品は、横圧測定箇所の前後約 20m 区間の内軌レール頭頂面に手塗り塗布した。

各種潤滑剤条件下における先頭軸の横圧（平均値）の測定結果を図 8 に示す。無潤滑（乾燥条件）と比べて内軌側横圧と外軌側横圧のいずれも潤滑により大幅に低下した。また、内軌側では新規試作品の横圧低減効果が一番大きく、外軌側では水溶性潤滑剤、新規試作品、固体潤滑剤 1、固体潤滑剤 2 の順に横圧低減効果が大きかった。

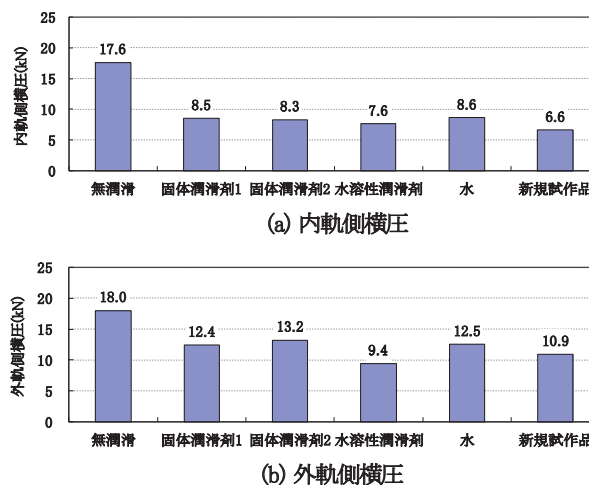


図8 各種潤滑剤の横圧測定結果

3.4 ブレーキ性能への影響

直線区間において、初速度 40km/h で通過してから空気ブレーキのみ（電気ブレーキなし）の常用最大（B7）ブレーキ試験を実施した。潤滑剤は内軌用 4 種類を使用した。固体潤滑剤 2 は車両の先頭軸に取り付けた噴射ノズルから通常の使用目安量 0.05g/m の 2 倍をブレーキ開始地点のやや手前からブレーキ区間全体に渡って片側の車輪とレールの接触部へ噴射した。水分散した固体潤滑剤 1 は、ブレーキ開始地点の手前から 3m の区間に 3.5ml を手塗りした。水溶性潤滑剤と新規試作品は走行直前に

設置した塗布装置から通常の使用目安量 1ml/sec で片側のレール頭頂面に塗布したが、新規試作品の伸び性が劣るため、上記の塗布量に加え、プレーキ全区間の片側レール頭頂面に追加塗布した。雨天を模擬した散水条件は、車両の先頭軸両側に取り付けた散水ホースより 4.0l/min の流量でプレーキ区間の手前から左右レールの頭頂面に散水した。

測定した各種潤滑剤の実平均減速度を図 9 に示す。散水なしの場合は「乾燥」、散水ありの場合は「湿潤」と記す。いずれの条件においても、潤滑剤の使用により実平均減速度が小さくなった。乾燥条件の場合、固体潤滑剤 2、固体潤滑剤 1、新規試作品、水溶性潤滑剤の順に実平均減速度が小さくなり、湿潤条件の場合、新規試作品を塗布した場合の実平均減速度はほかの潤滑剤と比べて高かった。一方、残りの 3 種類の潤滑剤はそれほど大きな差が見られなかった。

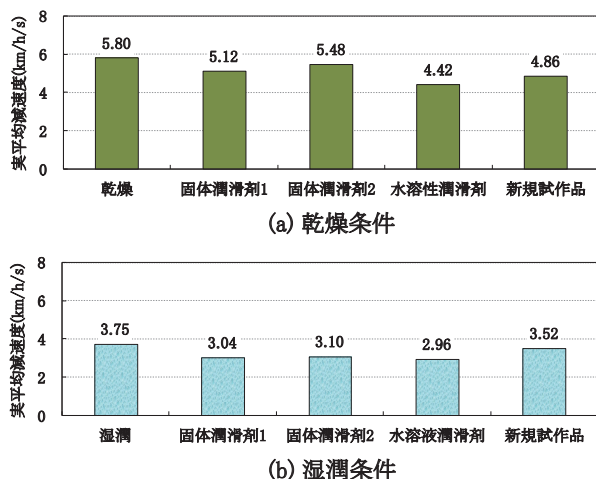


図 9 実平均減速度の測定結果

4. 曲線部内軌と外軌の潤滑パターンの検討

4.1 車両の曲線通過シミュレーション

列車が曲線を通る際に車輪とレールの接触部に発生する横圧の低減効果を推測するために、車両運動シミュレーションを利用することが有効と考えられる。ここでは、鉄道総研が開発したマルチボディダイナミクスの手法によるプログラム⁷⁾を使用し、無潤滑、内軌潤滑、外軌潤滑、および内軌・外軌両方潤滑の 4 つの条件に関する内軌側横圧と外軌側横圧の計算を行った。また、得られたシミュレーション結果から、線区条件に応じた横圧低減に有効な潤滑パターンを検討した。

シミュレーションに際して、車両モデルは通勤形電車相当の車両、車輪踏面形状はフランジ角度 65 度、フランジ高さ 27mm の修正円弧踏面の設計形状を用いた。この車両モデルの静止軸重は 58kN である。軌道モデルは JIS 50kgN レール頭頂面設計形状を持つ軌間 1067mm の

表 4 曲線通過速度条件 (km/h)

条件名	曲線半径 (m)			備考
	R200	R400	R600	
V1	36	51	63	カント超過量 50mm 相当
V2	50	71	87	均衡速度
V3	61	86	105	カント不足量 50mm 相当

狭軌で、曲線半径は 200m、400m、600m の 3 つの条件を設定した。カント量はいずれの曲線の場合も 105mm とし、スラックは 0mm とした。平面線形を直線 50 m → 入口緩和曲線 60 m → 円曲線 100 m → 出口側緩和曲線 60m と設定し、シミュレーションでは円曲線通過中の定常値に注目して内軌側横圧と外軌側横圧を求めた。計算条件について、走行速度はそれぞれの曲線に対して、均衡速度および 50mm 相当のカント不足またはカント超過状態にある走行速度、合計 3 条件を設定した (表 4)。

潤滑条件は、車輪とレール間の摩擦係数を変化させて表現し、乾燥の場合は 0.6、潤滑の場合は 0.1 と仮定した。

4.2 計算結果と考察

4.2.1 曲線半径が異なる場合 (均衡速度)

曲線半径 200m、400m と 600m におけるそれぞれの均衡速度で車両が走行する場合の内軌側横圧と外軌側横圧の計算結果を図 10 に示す。無潤滑に比べて、内軌潤滑は内軌側横圧と外軌側横圧が両方とも著しく小さくなり、外軌潤滑は大きくなる傾向が示された。また、内・外軌潤滑は内軌潤滑より内軌側横圧と外軌側横圧が僅かに大きくなったことがわかる。曲線半径別に横圧を見ると、曲線半径 600m と大きい場合は、無潤滑でも外軌側横圧が小さいので、内軌潤滑による外軌側横圧の低減効果が小さくなる一方、内・外軌潤滑の場合は無潤滑よりむしろ大きな外軌側横圧が発生する傾向が現れた。一方、曲線半径 200m と 400m の内軌側横圧と外軌側横圧を見ると、内軌潤滑の場合に内軌側横圧と外軌側横圧が無潤滑に比べて半分以下に低下することが示された。

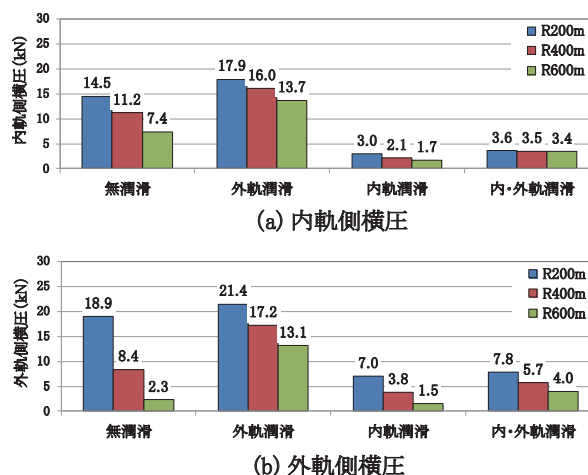


図 10 曲線半径が異なる場合 (均衡速度)

特集：鉄道力学

4.2.2 曲線通過速度が異なる場合（曲線半径 200m）

曲線半径 200m の曲線における車両の曲線通過速度が V1（カント超過量 50mm）、V2（均衡速度）、および V3（カント不足量 50mm）のときの内軌側横圧と外軌側横圧の計算結果を図 11 に示す。前項の結果と同じように、内軌潤滑は内軌側横圧と外軌側横圧が両方とも著しく小さくなり、外軌潤滑は大きくなる傾向が示された。また、内・外軌潤滑の場合は内軌潤滑とほぼ変わらない横圧低減効果があった。一方、曲線通過速度別に見ると、無潤滑および何れの潤滑の場合も、曲線通過速度が高くなるほど、内軌側横圧が小さくなり、外軌側横圧が大きくなる傾向が示された。これは、曲線通過速度に応じて生じる遠心力が外軌側横圧の増加をもたらした結果と考えられる。無潤滑条件に対する他の三つの潤滑条件下の内軌側横圧と外軌側横圧の変化率に着目すると、曲線通過速度が均衡速度以下の場合、内軌潤滑または内・外軌潤滑による内軌側横圧と外軌側横圧が無潤滑条件に比べて半分以下に低下した。一方、外軌潤滑の場合に外軌側横圧が無潤滑に比べて約 10% 大きくなることが示された。

上記のシミュレーション結果により、車両曲線通過時の内軌側横圧と外軌側横圧の低減に向けた潤滑方法として、内軌潤滑が内・外軌潤滑や外軌潤滑に比べて最も効果的であり、これまでの知見と一致することが確認できた。ただし、曲線半径が大きくなると横圧低減効果が小さくなり、ある曲線半径を超えたら、横圧が大きくなる可能性も否定できないので、曲線半径に応じて潤滑の実施を注意して判断する必要がある。さらに、横圧の低減効果は曲線通過速度にも依存し、同一曲線では通過速度が高くなると遠心力により発生する外軌側横圧が支配的となり、内軌潤滑による横圧の低減効果が小さくなる。

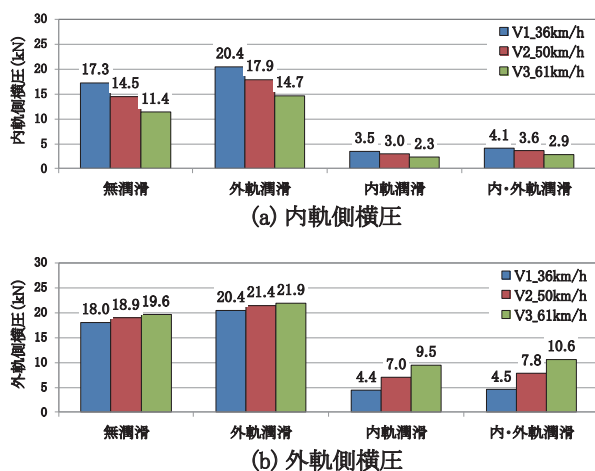


図 11 通過速度が異なる場合（曲線半径 200m）

5. まとめ

本研究は、室内試験機ならびに構内試験線を利用して

既存の潤滑剤および新たに試作した潤滑剤の基本特性、例えば、トラクション挙動、延び性、横圧低減効果およびブレーキ性能などを調べた。また、線区条件に応じた横圧低減に有効な潤滑パターンを車両運動シミュレーションにより検討した。以下、得られた結果をまとめる。

- (1) 内軌潤滑の場合、横圧低減効果のほかに、空転・滑走が生じ難いことが求められることから、比較的妥当な潤滑剤としては、固体潤滑剤が挙げられる。固体潤滑剤を地上から塗布する場合は、グリース系や油系、水溶性潤滑剤と比較して、延び性が劣るため、塗布装置の設置間隔を短くする必要がある。また、新規試作品は延び性が他のものと比較して小さいが、横圧低減効果やブレーキ性能において、固体潤滑剤と同等以上の性能を示した。
- (2) 外軌潤滑の場合、今回比較したグリース系や油系では顕著な性能の差はない。なお、外軌潤滑は内軌潤滑を実施しても外軌側横圧の低減効果が十分でなく、外軌側のレール側摩耗が激しい場合に実施するのが良いと考えられる。
- (3) 車両運動シミュレーションを用いて、様々な線区条件ならびに潤滑条件における横圧低減効果を予測・評価することは、曲線内軌・外軌潤滑の適正化を図る上で極めて効果的であると考えられる。

文 献

- 1) 石田誠：車輪／レール間潤滑による保守低減効果，RRR，vol.62，No.4，pp.26-29，2005
- 2) 石田誠，青木宣頼，飯田浩平，石田弘明：車輪／レール潤滑の車両・軌道動的挙動への影響，鉄道総研報告，vol.20，No.4，pp.59-64，2006
- 3) 桜庭隆：地下鉄におけるレール塗油，新線路，vol.10，No.5，pp.16-18，1996
- 4) 曾根康友，鈴木淳一，山崎大生，田本芳隆，古賀英俊：ブレーキ距離の増加を抑制する車輪／レール潤滑油，鉄道技術連合シンポジウム，pp.69-70，2007
- 5) 石田誠，伴巧，本卓也：高精度転がり接触試験機の試作と一二の実験結果，鉄道技術連合シンポジウム，pp.301-302，1998
- 6) 上林賢治郎，白井俊一，坂上啓，新村浩，岡田信之：画像処理を用いた輪軸アタック角測定方法，鉄道技術連合シンポジウム，pp.633-636，2001
- 7) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析（上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション），日本機械学会論文集 C 編，Vol.64，No.626，pp.3928-3935，1998