

トラクション油を適用した 車輪／レール潤滑油の基礎検討

曾根 康友* 鈴村 淳一*

Fundamental Study on Application of Traction Oil to Wheel/Rail Lubricants

Yasutomo SONE Junichi SUZUMURA

Possibility of application of the traction oil to wheel/rail lubricants was investigated. The traction oil is one of the latest materials of the lubricants and expected to possess higher traction coefficient than conventional lubricating oils. As the results of laboratory tests, it was found out that it had high traction coefficient of 0.14 and traction coefficient property would be decided by the oil type. It was also found out that anti-wear property could be controlled by the quantity of the anti-wear additives. Traction oil is considered to be a hopeful material as the wheel/rail lubricant, however more efforts should be required for clarifying the effect on the practical factors such as braking distance, lateral force and so on.

キーワード：車輪，レール，摩擦，摩耗，潤滑

1. はじめに

車輪とレールはいずれも鉄道システムの根幹をなしており、これらの品質管理や保守には細心の注意が払われている。しかし、鉄同士の摩擦によって動力を伝達する仕組みであるため、どちらにも摩耗が発生し、それにとめない保守を必要としている。

車輪およびレールの摩耗は、それぞれの主だった接触部である2カ所に発生する。ひとつは、主に曲線外軌レールのゲージコーナー（GC）部に発生する側摩耗と、対応する車輪のフランジ部に発生する直摩耗である。もう1カ所は、急曲線部の内軌レールや勾配区間の直線部レール等の頭頂面に発生する波状摩耗である。側摩耗や直摩耗に対しては、車輪のフランジ部あるいはレールのGCに潤滑剤を塗布して、しゅう動部に潤滑膜を作り、摩耗を低減する対策が古くからとられてきた。塗布する材料としては、液体である潤滑油類¹⁾、油を半固体状に加工したグリース類²⁾、ワックス類³⁾、二硫化モリブデンや炭素材料をはじめとする固体潤滑剤⁴⁾が知られている。塗布する方法として、車両側から曲線部でフランジあるいはGCに、また地上側から曲線入口に塗布装置を設置し、一定数の車両が通過するごとにレールに塗布するなどがとられている^{2, 5, 6)}。一方、波状摩耗は、内軌レールに発生する横圧がその原因のひとつであると考えられているため、内軌の頭頂面に潤滑剤を塗り、横圧低減をはかることにより、効果をあげる例が報告されている⁷⁾。

しかし一方、車輪やレールの摩耗防止のために塗布された潤滑剤は、レール頭頂面と車輪踏面の接触部に介在すると、摩擦係数が小さいことにより、加速時には空転、ブレーキ時には滑走の原因となる可能性があり⁷⁾、その影響に関する研究も進められている⁸⁾。摩耗を防ぐ性能を持つ潤滑剤が、空転や滑走の原因となりにくいものであれば、その適用意義が充分にあるものと考えられる。

このような条件に適するものとして、トルク伝達特性に優れた「トラクション油」が近年注目されている。トラクション油の持つ特性は、車輪とレールのトルク伝達面でのエネルギー損失を減らし、空転や滑走の可能性を低減できる期待がある。そこで、トラクション油の適用により、摩耗を低減すると同時に空転・滑走の原因となりにくい車輪／レール潤滑油の開発を試みた。

2. 車輪／レール間の潤滑

2.1 車輪／レール潤滑油の要求事項

車輪／レール潤滑油に必要な性能として以下が挙げられている^{9, 10)}。すなわち、安全上の制約からブレーキ距離を延伸させない、信号システムを阻害しない、保守費軽減の立場から損傷等の防止効果を持つ、疲労損傷を誘発しない、低コストである、さらに屋外の車輪およびレール周辺での使用に適合する、地球環境保全の妨げにならない、等の事項である。摩擦の観点に注目すると、粘着係数を極端に低下させないことが挙げられる。すなわち、車輪／レール間の転がり接触において、転がり時の摩擦係数であるトラクション係数が下がり過ぎないこと

* 材料技術研究部（潤滑材料）

表1 試料油

試料油	種別	組成の概要	粘度*	特徴
C	車輪／レール油	鉱油系	100	現行使用油
T-1	試作油	合成炭化水素系	22	かたい分子構造
T-2	試作油	合成エステル系	25	高引火点
T-3	試作油	合成系炭化水素系＋合成エステル系	96	現行油とほぼ同粘度
T-4	試作油	合成系炭化水素系＋合成エステル系	265	他の試作油より高粘度

※40℃における動粘度（単位 mm²/s）。

が要求されている。また、耐摩耗性に関しては、摩耗が低減されることが必要であるが、レールの損傷を誘発することは好ましくなく、適度な摩耗が必要であると考えられている。本報告では、車輪／レール潤滑油の、主に粘着、潤滑効果に関する評価を中心に記す。

2.2 トラクション油

潤滑油が車輪の踏面とレールの頭頂面の接触部に介在した際に空転や滑走の原因となるのは、潤滑油の摩擦係数が一般に低いためである。近年注目されているトラクション油は、トルク伝達特性に優れた油である。そのため、産業分野ではトラクションドライブの潤滑油として使用されている。特に最近自動車産業では、この油の応用により専用潤滑油が開発され、ハーフトロイダル式無段変速機が実用化されている¹¹⁾。

トラクション油が高い摩擦を示す理由は、その分子構造にある。高い摩擦を示す油の分子は、通常の潤滑油の分子と比べて、環状構造や枝分かかれ構造を多く持ち、自由に回転や屈曲をしにくいほか、立体的に並びやすい。このような分子構造を「剛直な」分子構造であるという。この構造のため、圧力がかかったときに分子同士が絡み合っただけで固体的ようにふるまい、分子間ですべりが起こりにくく、また、せん断を受けても通常の油よりも抵抗が大きい。このことが、油としては摩擦が大きい理由である¹²⁾。

このように高い摩擦係数を示すトラクション油の適用により、車輪／レール潤滑油に、接触面に介在した際に空転・滑走の原因となりにくい性能を付与できる可能性がある。

3. 実験方法

実験では、まず試料油のトラクション特性を室内試験により調べ、引き続きそれらの試料油に対して耐摩耗性を評価し、実用性能の一環として耐候性を確認した。以下、これらについて詳述する。

3.1 試料油

評価の対象とした試料油の代表例と特徴を表1に示す。

Cは鉄道会社で従来使用されている車輪／レール潤滑油の一種で、車体に搭載された塗油器から、曲線を検知して、主に外軌GCに塗布されている。T-1からT-4は、分子構造が剛直であり、高いトルク伝達性能を示すことが期待されるトラクション油である。T-1はもともと剛直で、高いトルク伝達性能が期待される油である。T-2は低粘度でありながら高引火点を有し、難燃性の点で優れている油である。T-3は現行油と同じ、T-4は現行油より大きい粘度を持つような、それぞれに適当な粘度の合成エステル系基油を加えたものである。なお、T-1～T-4にはいずれも保存による変質を防ぐため、微量の酸化防止剤が添加されている。

3.2 トラクション特性試験

試料油のトラクション特性を、試料油や試験輪の交換が比較的容易な室内実験装置を用いて測定した。

装置は二つの試験輪を、荷重下、油の存在する状態で、転がりすべり条件にて接触させ、回転時の軸トルクを測定することによりトラクション係数（転がりの摩擦係数）を調べ、トラクション特性を評価するものである（図1, 2）。

この装置は、直径約100mmで車輪とレールを模した二つの試験輪を、電動機の回転数により走行速度を、試験輪径およびベルトをかけるギヤプリーの径を変えることにより車輪側試験輪とレール側試験輪の間の式(1)で定義されるすべり率を、そこに装架する重錘の数により接触面の圧力（最大ヘルツ圧）を、それぞれ段階的に変えることができる。すべり率については、特に一般の油類のトラクション係数が最大値をとる領域である0.2～0.6%の微小すべり領域を細かく変化させるようになっている。なお、トルク計で測定した軸トルクをトラクション係数に換算した。

$$\text{すべり率} = \frac{|\text{車輪側回転速度} - \text{レール側回転速度}|}{\text{レール側回転速度}} \quad (1)$$

試験輪については、車輪側には普通鋼レールから削り出した材料に熱処理を施したものを、レール側は熱処理レールから削り出したものを加工して使用した。試験条件を表2に示す。

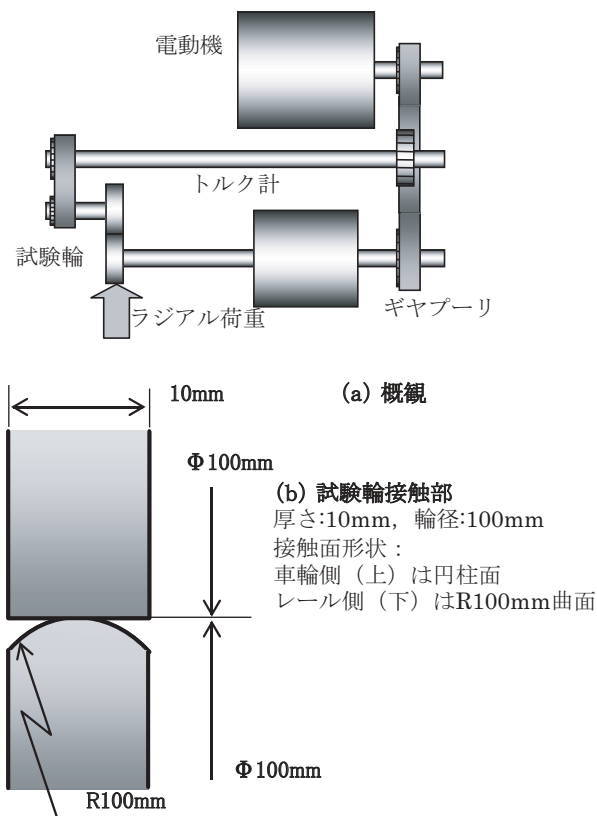
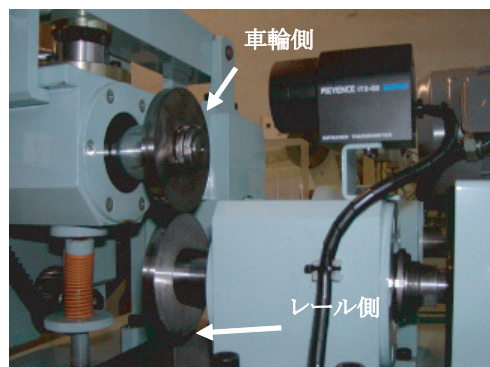


図1 トラクション特性試験装置の模式図



(a) 全体



(b) 試験輪の接触部を拡大

図2 トラクション特性試験装置の外観

表2 潤滑油トラクション特性試験の条件

回転数	1000min ⁻¹ (18.8km/h 走行相当)
荷重	3920N (最大接触圧力 Pmax=1.0GPa 相当)
試験輪条件	輪径: 100mm レール側接触面: 100mm 粗さ (Ra): 0.2 ~ 0.4 μm 硬さ (HRC): レール側:34, 車輪側:32
接触条件	おおよそ長径2.0mm, 短径0.8mmの楕円 (回転方向が短径)
すべり率	0.2, 0.4, 0.6, 3.0, 5.0%
測定項目	回転数, 試験輪温度, 軸トルク (トラクション係数)

3.3 耐摩耗性試験

耐摩耗性は、車輪とレールの間に塗布する油としての最も基本的な性能である。潤滑油の、フランジ/GC間における耐摩耗性を、潤滑油の汎用試験により評価した。

試験には、ASTM D4172に規定される高速四球型摩擦試験機を用いた。4個の直径1/2インチの玉軸受用鋼球をピラミッド状に積み上げ、下の3個を固定して試料油に浸し、上の1個を荷重下で回転させ、3カ所の接触部に生じる摩耗こん径、すなわち摩耗により生じた円形のキズの直径を測定し、その大きさを潤滑油の耐摩耗性能を評価する試験機である。この試験により、潤滑油の存在

下での摩耗の程度を、相対的に比較することが可能である。本報告における試験条件を表3に示す。

表3 耐摩耗性試験の条件

回転数	1200min ⁻¹ (0.46m/s)
ラジアル荷重	313N
試験時間	5分, 10分, 30分, 60分
評価項目	摩耗こん径 (摩耗の大きさ)

3.4 耐候性試験

油が車両や地上の塗油器から車輪やレールに塗布されて屋外環境にばく露されることを想定し、以下の2種類の耐候性試験を実施した¹⁰⁾。

(1) 冷熱サイクル試験

車上や地上のタンク内に貯蔵されている時に、高温と低温のサイクルにさらされた場合の性状変化を評価することが目的である。試験には、低温環境と高温環境の一定時間ずつのサイクルを作ることができる冷熱衝撃試験機を用いた。50mlの試料油が入った100mlのビーカーを装置に入れ、試験前後の外観変化の観察、試料油の粘度変化および質量変化を調べた。

(2) 紫外線照射試験

車輪やレール上で日光にさらされた際の性状変化を評

特集：材料技術

価することが目的である。試験には、デューパネル型光ウェザーメータを用いた。この装置は主に塗膜や樹脂の耐候性を調べる目的で設計されており、潤滑油の評価を行うには促進の程度が強過ぎる。そのため、安定に作動する最も弱い力で試験を行うこととした。60×40×1mmの鋼板に約30mgの試料油を薄く均一に塗布して装置に供し、試験前後の外観変化の観察および質量の測定を行った。本報告における、以上2種類の耐候性試験の条件を表4に示す。

表4 耐候性試験の条件

試験種別	条件	サイクル	評価項目
冷熱サイクル試験	60°C/6h - 室温 /10min - -20°C/6h - 室温 /10min	20	外観 質量変化 粘度変化
紫外線照射試験	紫外線照射 (1.0mW/cm ²) /20h - 湿潤 (相対湿度>90%) /4h	5	外観 質量変化

4. 結果と考察

4.1 トラクション特性

トラクション特性試験の結果を図3に示す。すべり率の増加にともなうトラクション係数の変化は、初めは増加し、すべり率が0.6～3.0%のときに最大を示し、それ以上では低下傾向となった。大きいすべり率に向けて低下して行くのは、油類に一般的に見られる傾向である。

図3において、最も高いレベルのトラクション係数を示したのはT-1およびT-4であった。これらの試料油が

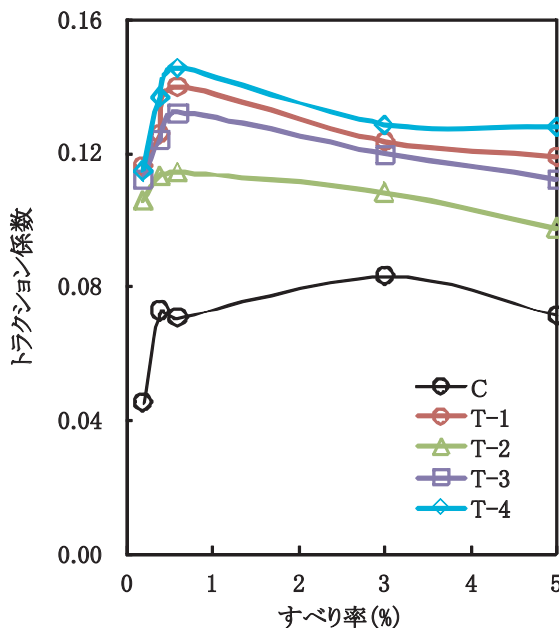


図3 トラクション特性試験結果

示した最大のトラクション係数は0.13～0.14であり、現行の車輪／レール潤滑油の0.08前後を大きく超えている。このことから、車輪／レール潤滑油として適用の可能性が極めて高い。

粘度の観点では、最も粘度が低いT-1と最も粘度が高いT-4が高いトラクション係数を示した。このことから、トラクション係数は粘度ではなく油の種別によって決まるものと考えられる。したがって、車輪／レール潤滑油の基油を選定する際、油剤の特徴を検討することで様々な粘度の設定が可能である。実用段階においては、塗油装置の動作原理や配管系の種類により様々な粘度の潤滑油を要求される可能性がある。したがって、基油粘度の自由度が高いことは、潤滑油の組成を決定しやすくさせるものと考えられる。

4.2 耐摩耗性

試料油の耐摩耗性試験の結果を図4に記す。同じ試験時間で比較したときに摩耗径が小さい方が耐摩耗性に優れていることを表す。試験時間が長くなるほど摩耗径が大きくなり、摩耗が進行していることは一般的な傾向である。

耐摩耗性試験の結果から得た摩耗速度を図5に示す。本報告での摩耗速度は、耐摩耗性試験の試験時間10分における摩耗径を、試験時間である10分で除した値である。摩耗速度の値が小さいほど耐摩耗性に優れていることを表す。

図5より、C、T-3およびT-4の摩耗速度が小さいことがわかった。Cには摩耗防止剤が処方されていると推定されるほか、T-3、T-4はT-1、T-2と比較して粘度が高く、油膜を形成しやすいため、摩耗を小さくすることができるものと考えられる。T-1、T-2については、摩耗防止効果を高めて現行の油と同レベルとするには、添加剤による改善が必要である。

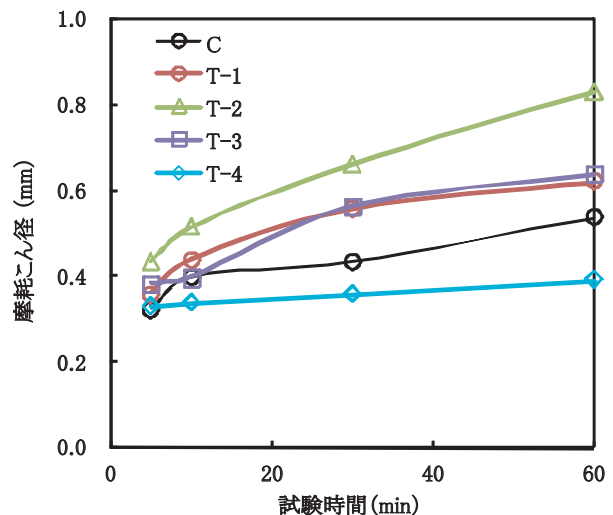


図4 高速四球耐摩耗性試験の測定結果

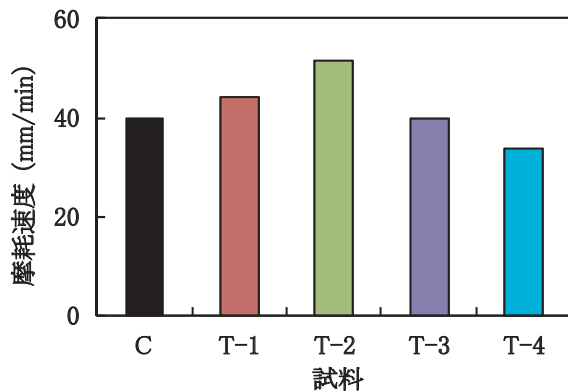


図5 高速四球耐摩耗試験による摩耗速度

4.3 添加剤による耐摩耗性の制御

曲線部外軌レールGCの摩耗に注目すると、接触部に油を塗布することにより、摩耗は低減される。しかし、摩耗を小さく抑えすぎると、レール表面で発生する微細なクラックが削り取られず成長するため、きしみ割れやシェリング等、大きな損傷へとつながっていく可能性がある。

潤滑油が摩耗を低減する効果は、基油がしゅう動面間に作る油膜により金属同士の接触を防ぐ場合と、金属同士が接触した際に潤滑油に配合されている添加剤によりしゅう動面表面に被膜が形成され、その被膜により摩耗を防ぐ場合とによりもたらされる。車輪／レール間の摩耗は金属同士の接触が存在する条件と考えられるので、添加剤による方法が有効で、この添加剤が摩耗防止剤である。

トラクション油を用いた試料油T-1に摩耗防止剤を添加した試料の耐摩耗性を調べ、摩耗防止剤添加量で整理したものを図6に示す。図4より、現行潤滑油Cの試験時間10分における摩耗径は約0.4mmであるが、図6において、T-1に、現行の潤滑油Cと同レベルの0.4mmを中心として、任意の耐摩耗性を付与できることがわかった。油潤滑を必要とする曲線部の諸元や目標となる

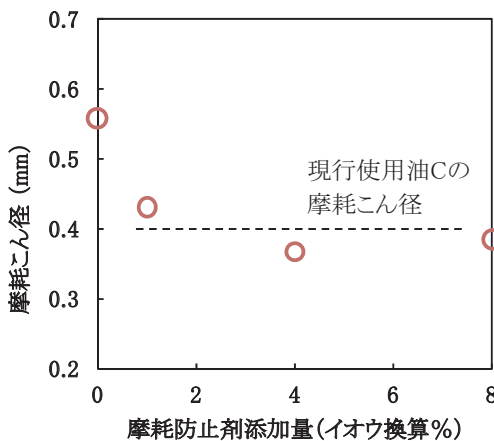
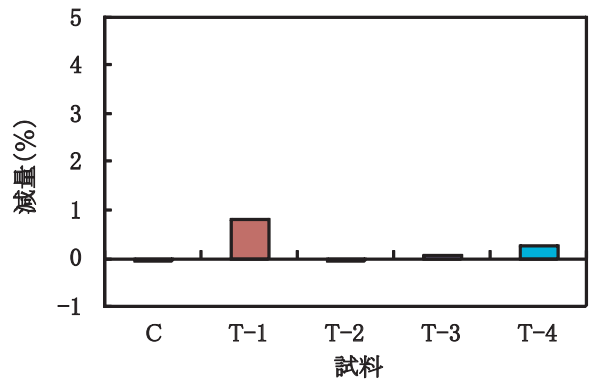
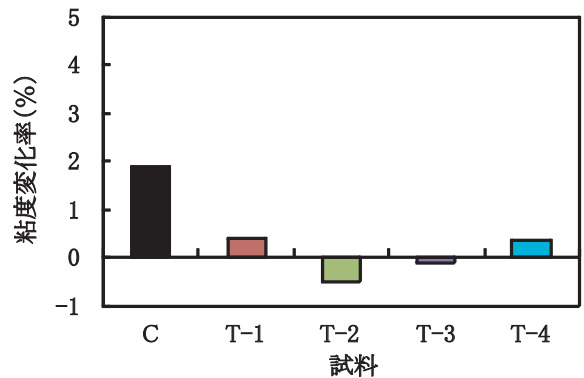


図6 摩耗防止剤の添加量による摩耗量の変化



(a) 減量



(b) 粘度変化率(40°C)

図7 冷熱サイクル試験の結果

摩耗量を考慮し、適切な摩耗防止剤を適量添加することにより、従来の潤滑剤との比較による所期の摩耗量が得られる可能性があることが明らかになった。

4.4 耐候性の評価

図7に冷熱サイクル試験の結果を示す。減量に関してはいずれも1%までの小さい値であった。減量が最も大きいのはT-1であったが、減少の原因は、沸点が低い成分の高温での蒸発によると思われる。一方、粘度変化率に関しては、Cと比較すると試作油は小さい粘度増加を示した。外観に関してはいずれも変化が見られなかった。

これらのことから、油タンクにおける高温と低温の繰り返しにより、T-1は蒸発により減量が生じるものの、試作油は粘度変化が小さく、性状が安定しているものと推定される。

図8に紫外線照射による減量の測定結果を、表5に同試験による鋼板上の試料油の外観調査結果を示す。減量の測定結果は3つのグループに分けられた。T-3およびT-4は減量が少なく、これらは紫外線の影響を受けにくいことがわかった。次にT-1は減量が大きく、ほとんど残らないことがわかった。これは紫外線による分解、試験中に温度調整のため稼動する送風装置の温風による蒸発の両方あるいは片方により鋼板上から消失した可能性

特集：材料技術

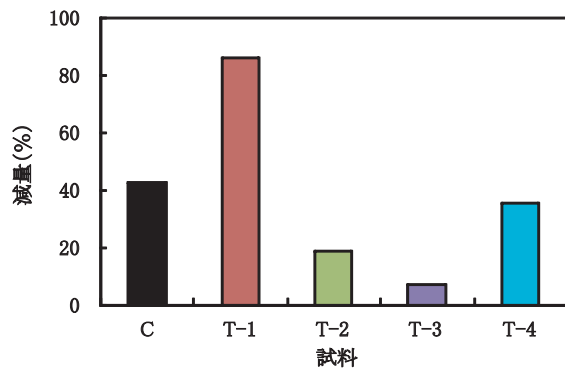


図8 紫外線照射試験による減量

表5 紫外線照射による試料油の変化

試料油	色相変化	性状変化
C1	白濁	一部茶褐色固化
T-1	変化なし	被膜状に残る
T-2	変化なし	変化なし
T-3	変化なし	変化なし
T-4	変化なし	やや硬化

(初期の色相はいずれも無色透明)

を示している。CおよびT-4はその中間にあり、いずれも茶褐色固化、粘度上昇などの性状変化が認められ、蒸発と分解の片方あるいは両方が起こっている可能性がある。

5. まとめ

トラクション油のトラクション特性、耐摩耗性、耐候性を調べることにより、車輪/レール潤滑油への適用可能性を検討した。トラクション油の評価の結果、従来から使用されている潤滑油のトラクション係数0.08と比較して約70%高い0.14を示す油が見出された。耐摩耗性に関しては摩耗防止剤の添加量により制御できることがわかった。耐候性に関しては、冷熱サイクルに対してはわずかに粘度変化をおこすものがあることがわかった。また、紫外線照射に対しては変化がない、ほとんど消失する、またその中間に位置するものがあることがわかった。

以上の検討結果から、今後は、車輪/レール潤滑油としての適用性を高めるため、実用性能を検討する必要がある。具体的にはブレーキ距離や横圧への影響の評価¹³⁾等がこれにあたる。また、同時に油剤のトラクション係

数を向上させること、トラクション係数が高い油剤を探索すること、トラクション特性が粘着に与える影響の評価を進めることが求められる。

なお、本研究は、出光興産株式会社との共同研究によって実施された。

文献

- 1) 田邊義雄：軌条を永持ちさす塗油の効果，新線路，Vol.4, No.2, pp.23, 1950
- 2) 桜庭隆：地下鉄におけるレール塗油，新線路，平8・5月，pp.16-18, 1996
- 3) 小原孝則，大野薫，大山忠夫：車輪・レールの粘着力を下げずに摩耗を減らす，RRR，Vol.47, No.9, pp.9-14, 1990
- 4) Eadie, D., T. and Kalousek, J.: "Spray it on, let 'em roll" , Railway Age, Vol.202, No.6, pp.48-49, 2001
- 5) 株式会社ヒューテックオリジンホームページ：http://www.lubefutec.co.jp/index_j.html
- 6) 斎藤禎夫，レール塗油とフラット，電気車の科学，1992年9月，pp.36-38, 1992
- 7) 石田誠，伴巧，前橋栄一：車輪を思い通りに転がす，RRR，Vol.59, No.10, pp.12-15, 2002
- 8) 大山忠夫，大野薫，中野敏：高速域における車輪/レール間の粘着力に及ぼす表面汚染の影響（第1報），潤滑，Vol.33, No.7, pp.540-547, 1988
- 9) 伴巧，瀧川光伸，陳樺，石田誠：車輪/レール用潤滑剤の粘着特性評価，鉄道総研報告，Vol.15, No.12, pp.17-20, 2001
- 10) 曾根康友，鈴木政治，木村浩，近藤信也：鉄道分岐器用生分解性潤滑剤の耐候性と粘度特性，トライボロジー会議予稿集新潟2003-11, pp.445-446, 2003
- 11) 畑一志，坪内俊之：ハーフトロイダルCVT車用トラクション油の開発，表面科学，Vol.24, No.6, pp.25-31, 2003
- 12) 坪内俊之，阿部和明，畑一志：トラクションフルードの分子構造とトラクション特性との定量的相関（第1報）—アルキレン鎖の影響—，トライボロジスト，Vol.38, No.3, pp.268-272, 1993
- 13) 瀧川光伸，石田誠，曾根康友：車輪/レールの動的挙動に与える摩耗と潤滑の影響，鉄道総研報告，Vol.16, No.4, pp.35-40, 2002