

高速新幹線用合成系車軸軸受油の開発

材料技術研究部 潤滑材料

主任研究員 中村 和夫

1. はじめに

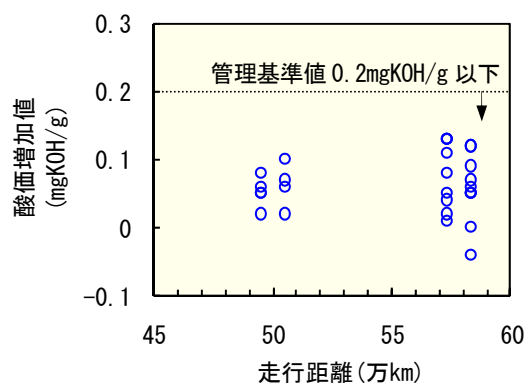
新幹線の車軸軸受油には、高速化では熱・酸化安定性の向上、更油周期の延伸では耐久性の向上がそれぞれ求められる。これらに対応するためには、鉱油系基油に代わるものとして合成系基油の適用が有効である。これまでに、ポリアルファオレフィン（以下、PAOと記す）を適用した歯車装置合成ギヤ油を開発した¹⁾経緯がある。車軸軸受油においても、PAOの適用が考えられるが、実使用時におけるコストを抑えるため、PAOと鉱油系基油との混合基油について検討を行った。混合基油を適用した車軸軸受油を試作し、PAOを50%混合した場合にも優れた特性が得られることが、各種試験の結果より明らかになった。そこで、この試作油について、運転速度420km/h、150万km走行相当の台上耐久試験を実施した結果、油の劣化は少なく軸受の状態も良好であった。以上のことから、試作油は、400km/h域高速化・120万kmメンテナンスフリー対応用として適した性能を有することが確認された。ここでは、これらの試験結果について報告する。

2. 現行油の劣化因子の把握

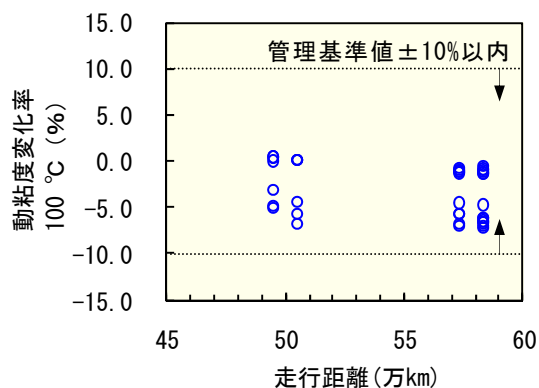
実車の現行油の劣化因子を把握するため、更油周期期間（1台車検査周期）使用された車軸軸受油を採取し性状分析を行った。その結果のうち、酸価増加値および動粘度変化率を図1に示す。図中の管理基準値²⁾は、油の劣化の判断基準として用いられているものである。各項目の分析値はすべて管理基準値内にあった。酸価増加値（酸化劣化の尺度）はプラスの傾向にあった。これは主に熱による酸化劣化によるものと考えられる。また、動粘度（油の粘性）は、全体的に変化率がマイナスであり、低下傾向にあった。これは、車軸軸受油が、軸受による機械的せん断を受けるためである。なお、ヘプタン不溶分は小さい値であり、油劣化生成物および金属摩耗量は少なく、問題はないことが分かった。

動粘度低下が著しい場合、油膜形成能力が低下、また、酸化劣化が進行すると、動粘度やスラッジの増大につながり、いずれの場合も潤滑不良を起こす可能性がある。そのため、これらを抑制する必要がある。

以上の結果から、高速化および長寿命化に対応するためには熱・酸化安定性能をより向上させるとともに、せん断安定性も考慮する必要があることが分かった。



(a) 酸価増加値



(b) 動粘度変化率

図1 実車の現行油の性状分析結果

3. 基油の検討

3.1 合成系基油の選定

潤滑油の開発にあたって、基材となる基油の選定は重要である。そこで、合成油の特性について文献等で検討した結果およびこれまでの経験を踏まえ、熱・酸化安定性や粘度特性が優れているとともに総合的にバランスが良い性能を有する合成油 PAO³⁾を試作油の基油として選定した。また、PAO は鉱油と比較すると高価であるため、コスト面を考慮し PAO と鉱油との混合基油についても検討を行った。

3.2 合成油と鉱油との混合基油の熱・酸化安定性

合成油 PAO および鉱油との混合基油の熱・酸化安定性をディーゼルエンジン油の劣化促進試験法である内燃機関用潤滑油酸化安定度試験 (Indiana Stirring Oxidation Test [JIS K2514]、以下、ISOT 試験と記す) を適用して評価した。試験後、試験油の劣化の指標である動粘度および酸価等を測定し、新油の分析値から粘度比および酸価増加値を求めた。図 2 に粘度比を示す。PAO および混合基油は鉱油と比較して、動粘度上昇は小さいことが分かった。酸価増加値も同じ傾向であり、酸化劣化およびそれに伴う劣化生成物および重合物が少ないことが分かった。従って、PAO とともに、混合基油も優れた熱・酸化安定性を有することが明らかになった。

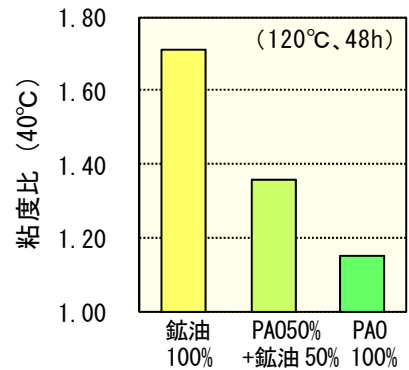


図 2 ISOT 試験による基油の動粘度変化

4. 合成系車軸軸受油の試作

基油の試験結果に基づき、PAO を基油とした合成系車軸軸受油の試作を行った。混合油については、基油の検討において、鉱油を混合しても PAO の有効性が発揮できることが明らかになったことから、混合油のさらなる性能向上を目指すため、現行油の基油に使用されている鉱油よりも、精製度の高い鉱油と混合した。これらの基油に、諸性能を向上させるため、酸化防止剤、極圧添加剤、摩耗防止剤、消泡剤、防錆剤等の各種添加剤を加え、試作油とした。試作油の組成を表 1 に示す。

表 1 試作油の組成

試作油	基油の組成割合		添加剤
	合成油 PAO	鉱油 (高度精製)	
試作 A	100%	0%	酸化防止剤 極圧添加剤 等
試作 B	75%	25%	
試作 C	50%	50%	

混合油のさらなる性能向上を目指すため、現行油の基油に使用されている鉱油よりも、精製度の高い鉱油と混合した。これらの基油に、諸性能を向上させるため、酸化防止剤、極圧添加剤、摩耗防止剤、消泡剤、防錆剤等の各種添加剤を加え、試作油とした。試作油の組成を表 1 に示す。

5. 性能試験結果

表 1 に示す 3 種類の試作油と現行油について各種性能試験を実施した。それらの結果について次に示す。

5.1 熱・酸化安定性

熱・酸化安定性を評価するため、基油の検討時と同様に ISOT 試験および回転ボンベ式酸化安定度試験 (Rotating Bomb Oxidation Test [JIS K2514]、以下、RBOT 試験と記す) を実施した。

ISOT 試験結果として、図 3 に酸価増加値を示す。試作油は現行油と比較して、粘度比、酸価増加値およびヘプタン不溶分が小さく、ビーカ内壁面等の劣化生成物の付着が少ない状態であった。

以上のことより、試作油は現行油と比較すると、酸化劣化や劣化生成物等が少なく、熱・酸化安定性に優れていることが分かった。また、試作油間の比較では、特に大きな差異はなかった。

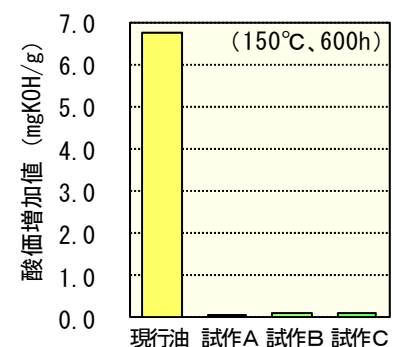


図 3 試作油および現行油の ISOT 試験による酸価増加値

RBOT 試験結果を図 4 に示す。試作品の RBOT 寿命は、現行油の約 6 倍で、酸化寿命が長いことが分かった。また、試作油は、基油に用いた PAO の熱・酸化安定性が良好であることと酸化防止剤の効果との相乗作用によって良好な耐酸化性を示しているものと思われる。試作油間では大差はないが、試作 A が最も長く、試作 B と試作 C とではほぼ同等であった。

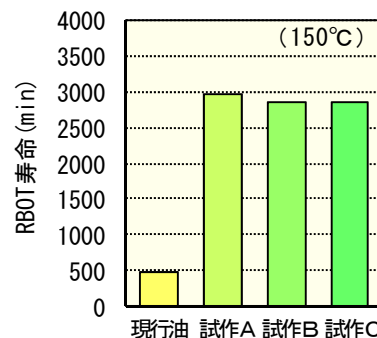


図 4 試作油および現行油の RBOT 試験結果

5.2 セン断安定性および潤滑性能

実車における現行油の動粘度が低下傾向を示したことから、機械的なせん断安定性を評価する必要があるため、超音波照射法によりせん断安定性試験を実施した。その結果を図 5 に示す。試作油は、せん断による動粘度低下率が現行油よりも小さく、せん断安定性は良好であることが確認された。また、試作油間の差は小さかった。

潤滑油の潤滑性能を評価するため、高速四球形摩擦試験機を用いて四球試験方法により、耐荷重性能（焼付き防止性能）および耐摩耗性能（摩耗防止性能）の試験を実施した⁴⁾。その結果を表 2 に示す。試作油の非焼付最大荷重および融着荷重は、現行油をすべて上回り、かつ、同じ値であったことから、試作油の耐荷重性能は、現行油よりも優れ、試作油間においてはほぼ同等であることが分かった。また、試作油の摩耗直径は現行油よりも小さいことから、試作油の耐摩耗性能は、現行油に比べ良好であることが分かった。以上の結果から、試作油は、現行油と比較して軸受の摩耗は小さく、過大な荷重が負荷された場合の耐久性が向上するものと考えられる。

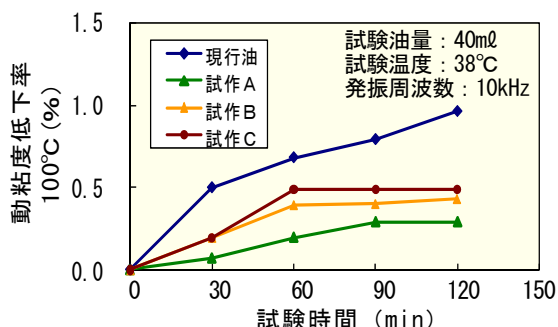


図 5 試作油および現行油のせん断安定性試験結果

表 2 試作油および現行油の潤滑性能試験結果

項目	耐荷重性能試験 1800min ⁻¹ 、10sec		耐摩耗性能試験 1200 min ⁻¹ 、490N	
	非焼付最大 荷重 (N)	融着荷重 (N)	試験鋼球の摩耗直径 (mm)	
			30min 試験	60min 試験
試作 A	784	1960	0.422	0.527
試作 B	784	1960	0.419	0.513
試作 C	784	1960	0.417	0.520
現行油	490	1568	0.462	0.755

6. 試作油の台上耐久試験

試作油の耐久性を評価するため、実車の車軸軸受および軸箱を用いて車軸軸受用潤滑剤耐久試験装置による台上耐久試験を実施した。

6.1 試験条件および試験油

試験条件を表 3 に示す。走行距離（換算）は、目標である 120 万 km 相当の 25% 増しの 150 万 km 相当とした。試験油は、各種性能試験結果において 3 種類の試作油間で大きな性能差が認められなかったことから、鉱油の混合割合が最も大きい試作 C とした。

表 3 台上耐久試験の試験条件

試験油	試作 C (PAO50%+鉱油 50%)
潤滑油量	約 1.2ℓ
回転速度	2825min ⁻¹ (運転速度 420km/h 相当)
回転パターン	正転と逆転を交互の回転 1 周期:3000km 相当
ラジアル荷重	60.9kN 連続負荷
アキシャル荷重	18.3kN 周期的負荷 ・5 秒間負荷(押し引き交互)、25 秒間無負荷
送風条件	室温・試験軸箱部を送風(約 10m/s)による風冷
走行距離(換算)	150 万 km 相当を目標(車輪径 790mm で計算)

6.2 試験結果

試作 C は、台上耐久試験において目標である走行距離 150 万 km 相当を回転させることができた。

試験中においては、潤滑油温度は約 95℃～110℃、軸受外輪温度は約 100～115℃で、100℃を超える高温となった。なお、潤滑油の漏れはなく、試験後のオイルシールに異常は認められなかった。

試験後の試作Cの性状分析結果を表4に、

車軸軸受の状態と軸受外輪の母線形状の代表例をそれぞれ図6および図7に示す。試作Cは、管理基準値を満たし、劣化程度は小さく問題はなかった。試験後の軸受には外観上の異常は特に認められず、母線形状の測定結果により摩耗は少ないことから、車軸軸受も問題のないことを確認した。以上、熱的に厳しい条件下で150万km走行相当の長期耐久試験に対しても劣化が小さく、かつ、軸受の状態も良好であったことから、試作Cは耐久性に優れていることを確認できた。

表4 台上耐久試験後の試作Cの性状分析結果

項目	試験油	試作Cの分析値	(参考)新幹線車軸軸受油の管理基準値
動粘度変化率100℃ (%)		-4.0	±10 以内
酸価増加値 (mgKOH/g)		0.06	0.2 以下
ヘプタン不溶分 (mass%)		0.01	0.2 以下



(a)外輪 (b)内輪およびころ (反軸端側)

図6 台上耐久試験後の車軸軸受の状態

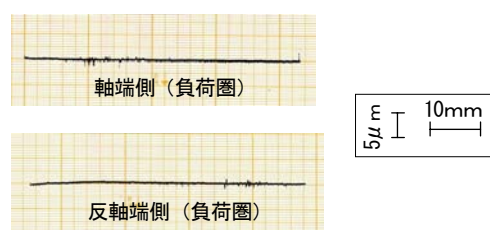


図7 台上耐久試験後の車軸軸受の外輪の母線形状 (代表例)

7. まとめ

新幹線での将来のさらなる高速化や省メンテナンスに対応可能な車軸軸受油を検討した。

実車で使用された現行油の性状分析結果を踏まえ、基油として、熱・酸化安定性に優れる合成油 PAO およびコスト面を考慮し鉱油との混合油の適用について検討を行い、PAO および混合油を用いた3種類の車軸軸受油を試作した。各種性能試験を実施した結果、試作油は現行油よりも熱・酸化安定性、せん断安定性および潤滑性能に優れていることが分かった。また、いずれも試作油間では大きな差は認められなかったことから、PAO50%でも優れた性能が得られることを確認した。コスト的に優位な試作C (PAO50%+鉱油 50%) を選定し、実物の車軸軸受を用いた台上耐久試験を実施した。その結果、420 km/h・150万km 走行相当の試験条件においても、試作Cの劣化は小さく、軸受の状態も良好であることを確認した。

以上のことから、試作Cは、新幹線の400km/h域の高速化・120万kmメンテナンスフリーに十分対応可能な車軸軸受油であると考えられる。

なお、本開発は、株式会社ジャパンエナジーと共同で実施したものである。

【参考文献】

- 1) 中村和夫, 鈴木政治, 曾根康友: 高速化, 省メンテナンス化に寄与する合成ギヤ油, RRR, Vol. 55, No. 7, 1998
- 2) 中村和夫: 鉄道車両用潤滑油の長寿命化技術, トライボロジスト, Vol. 53, No. 4, 2008
- 3) 日本トライボロジー学会編: 潤滑ハンドブック, 1987
- 4) 細谷哲也, 鈴木政治, 中村和夫, 曾根康友: 在来線車両用高性能車軸軸受グリースの開発, 鉄道総研報告, Vol. 14, No. 3, 2000