

# 2407 新幹線車両用合成系車軸軸受油の開発

○中村 和夫 細谷 哲也 日比野 澄子 鈴木 淳一 (財団法人鉄道総合技術研究所)

設楽 裕治 平野 亨 (株式会社ジャパンエナジー)

## Development of Synthetic Oil for Axle Box of Shinkansen Vehicles

Kazuo Nakamura, Tetsuya Hosoya, Sumiko Hibino, Junichi Suzumura

Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540

Yuji Shitara, Toru Hirano

Japan Energy Corporation 3-17-35, Niizo-Minami, Toda-shi, Saitama 335-8502

To lubricate the axle bearing of the Shinkansen vehicles, it is essential to improve the thermal oxidation stability of the lubricating oil in terms of speed-up, and also it is important to improve the durability to extend the intervals for oil-changes. In order to deal with such requirements, application of synthetic base oil was effective. But we tried correspondence by the mixture of synthetic base oil and mineral base oil to suppress the cost of the lubricating oil. Therefore, we selected poly- $\alpha$ -olefin (PAO) for the synthetic base oil, and verified that upgraded performance with the mixture of PAO and mineral base oil. Then, we experimentally manufactured the lubricating oil for axle box that applied such mixed base oil. Consequently, we confirmed experimental lubricant was excellent in thermal oxidation stability and durability. We report the consequences herewith.

キーワード：新幹線，潤滑油，車軸軸受，車軸軸受油，高速化，メンテナンス

Keyword: Shinkansen, lubricating oil, axle bearing, oil for axle box, speed-up, maintenance

### 1. はじめに

新幹線電車の車軸軸受油は，高速化にともない熱・酸化安定性の向上，更油周期の延伸にともない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。これまでの研究では，ポリアルファオレフィン（以後，PAOと記す）を適用した歯車装置合成ギヤ油を開発した<sup>1)</sup>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，コスト面を考慮し，PAOと鉱油系基油との混合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，各種試験を実施した結果，PAOを50%混合した場合にも優れた特性が得られることが明らかになった。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。その結果，試験後において，油の劣化は少なく軸受の状態も良好であり，400km/h域の高速化かつ120万kmメンテナンスフリーに十分対応可能であることが分かった。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

現行油の実車における劣化状態を把握するため，更油周期期間（1台車検査周期）使用された現行車軸軸受油を採取し性状分析を行った。その結果を図1に示す。図中の管理基準値<sup>2)</sup>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。項目別の分析値の特徴としては，酸価増加値（酸化劣化の尺度）は，プラス傾向にあった。これは主に熱による酸化劣化の影響であると考えられる。また，動粘度（油の粘性）

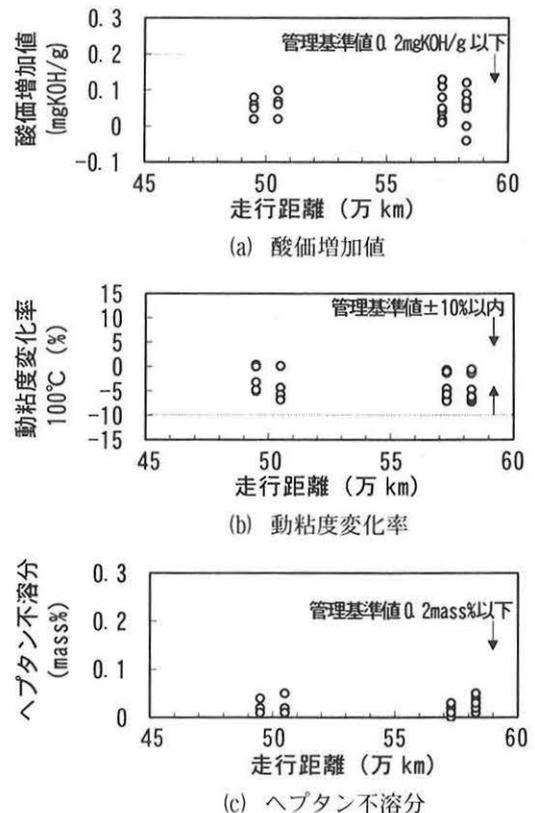


図1 実車の現行油の性状分析結果

は、全体的に変化率がマイナスであることから、低下傾向にあった。これは機械的せん断によるものと思われる。なお、ヘプタン不溶分（油劣化生成物および金属摩耗量等の尺度）は、小さい値であった。

動粘度低下が著しい場合、潤滑不良を起こす可能性がある。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る可能性がある。そのため、これらを抑制する必要がある。

これらの結果から、高速化および長寿命化に対応するためには熱・酸化安定性により優れた性能を有す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。

### 3. 基油の検討

#### 3.1 合成系基油の選定

潤滑油の設計にあたって、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、粘度特性や熱・酸化安定性が優れているとともに総合的にバランスが良好な合成油 PAO<sup>(3)</sup> 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・酸化安定性を評価するため、内燃機関用潤滑油酸化安定度試験（Indiana Stirring Oxidation Test, 以下 ISOT 試験と記す）を行った。その試験法は、JIS K2514 に準拠させ、ピーカ内に入れた試験油 250ml、鉄と銅の金属片の触媒およびガラス製のワニス棒を浸し、高温で所定時間で、プロペラ状のかき混ぜ棒を回転させ攪拌することによって油の空気に接触する表面積を大きくして、試験油の酸化劣化を促進させるものである。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、新油のそれらの分析値とから粘度比および酸価増加を求めた。

試験結果を図2に示す。PAO および混合基油は鉱油と比較して、動粘度上昇および酸価増加値が小さく、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 はもとより、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。

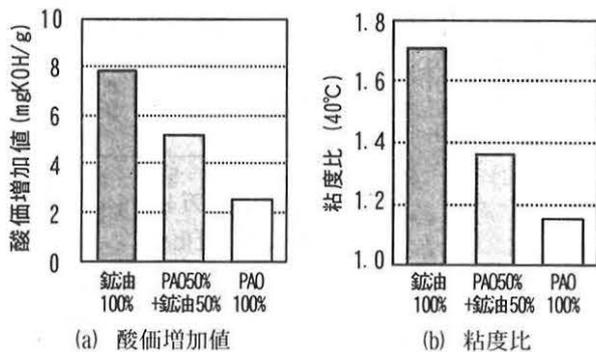


図2 ISOT 試験 (120°C, 48h) 後の基油の性状変化

### 4. 合成系車軸軸受油の試作

#### 4.1 試作油の仕様目標

試作油の性状および性能の仕様目標を表1に示す。粘度グレードは現行油と同一とした。粘度指数は、現行油の111より高い120以上を目標とした。この指数は温度による粘度変化の尺度を示し、値が大きいほど温度による粘度変化

が少ない。すなわち、同一粘度グレードで粘度指数の異なる潤滑油を比較した場合、粘度指数が大きいほど、低温時には動粘度が小さく流動性が良く、高温時には動粘度が大きく油膜厚さを十分に確保でき、また、オイルシールからの油が漏れ難くなる利点がある。

引火点は、現行油 (252°C) とほぼ同等以上の 250°C 以上とした。また、流動点は、潤滑油が固体から流動しはじめる温度である。寒冷地での始動時の潤滑性を考慮して、現行油の -27.5°C に対して -40°C 以下とした。

性能面では、回転ボンベ式酸化安定度試験 (RBOT (Rotating Bomb Oxidation Test [JIS K2514], 以下 RBOT 試験と記す) の RBOT 寿命を現行油の 4 倍以上とした。これは、高速化した新幹線での酸化寿命に十分余裕を持たせるためである。潤滑性能は、実車の現行油のヘプタン不溶分の分析結果から、現行油の摩耗が少なく良好な潤滑状態を保持していると考えられるため、現行油と同等以上とした。

表1 試作油の性状および性能の仕様目標

項目	仕様目標
基油	合成油 (PAO) または PAO と鉱油との混合
動粘度グレード	ISO VG68
粘度指数	120 以上
引火点	250°C 以上
流動点	-40°C 以下
酸化安定性 RBOT 寿命 (150°C)	現行油の 4 倍以上
潤滑性能 (四球試験)	
・非焼付最大荷重	490N 以上
・融着荷重	1568N 以上

#### 4.2 合成油と鉱油との混合比率

基油の試験結果に基づき検討を行い、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。試作油の合成油と鉱油との混合比率を表2に示す。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。

表2 合成油と鉱油との混合比率

試作油	合成油 PAO	鉱油 (高度精製)
試作 A	100%	0%
試作 B	75%	25%
試作 C	50%	50%

### 5. 性能試験結果

3種類の試作油および現行油について、各種性能試験を実施した。それらの結果について以下に示す。

#### 5.1 熱・酸化安定性

熱・酸化安定性の評価にあたっては、基油の検討時と同様に ISOT 試験および RBOT 試験を実施した。

試験結果の例として、酸価増加値とヘプタン不溶分について、図3のそれぞれ (a) および (b) に示す。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、ピーカ内壁面やワニス棒へのスラッジやラッカ一等の劣化生成物の付着が少ない状態であった。以上より、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いことから、熱・酸化安定性に優れていることが分

かった。なお、試作油間の比較では、特に大きな差異はなかった。

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倍であり、酸化寿命が長いことが分かった。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。

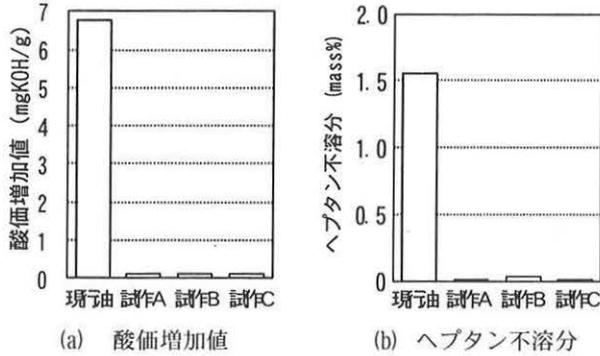


図3 ISOT 試験 (150°C、600h) 後の試作油および現行油の性状変化

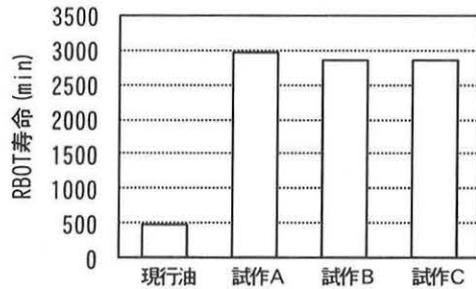


図4 試作油および現行油のRBOT 試験結果 (150°C)

## 5.2 潤滑性能

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試験と耐摩耗性能試験を行った<sup>4)</sup>。この試験は、試料容器に入れた試験油中で、下部に固定した3個の鋼球と回転軸にセットした1個の鋼球を上からピラミッド状に接触させ、下部から荷重を负荷させ回転軸を回転させることによって、回転球と固定球間で摩擦や摩耗を発生させて、その大きさから耐荷重性能および耐摩耗性能を評価するものである。試験結果を表3に示す。

表3 耐荷重性能および耐摩耗性能の試験結果

項目	耐荷重性能試験 1800min <sup>-1</sup> , 10sec		耐摩耗性能試験 1200 min <sup>-1</sup> , 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

表3から、3種類の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、耐荷重性能は、試作油が現行油よりも優れ、試作

油間においては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、耐摩耗性能は、試作油は現行油に比べ良好であると判断できる。

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、過大な荷重が负荷された場合の耐久性が向上するものと考えられる。

## 5.3 セン断安定性

実車の現行油において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確認する必要があるため、せん断安定性試験を実施した。試験は、ASTM D2603に準拠し、超音波照射法により行った。これは、ピーカにとった試験油に超音波を照射しキャビテーションを発生させることによってせん断を与える試験である。一定時間照射後、100°Cにおける動粘度を測定し、照射前の動粘度からその低下率を求めた。試験結果を図5に示す。試作油は、現行油と比較して、動粘度低下率が小さく、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。

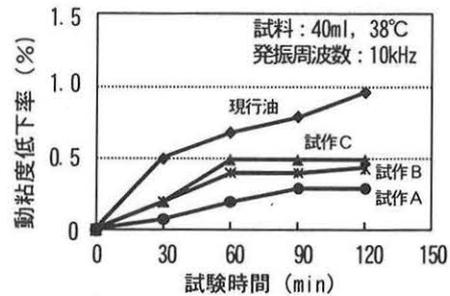


図5 試作油および現行油のせん断安定性試験結果

## 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 試験方法

本試験に使用した車軸軸受用潤滑剤耐久試験装置を図6に示す。実車を模擬した試験条件を表4に示す。走行距離(換算)は、目標120万km相当の25%増しの150万km相当とした。試験終了後、試験油の劣化を評価するために、動粘度、酸価およびヘプタン不溶分の測定を行ったほか、試験に供した軸受の調査を行った。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。

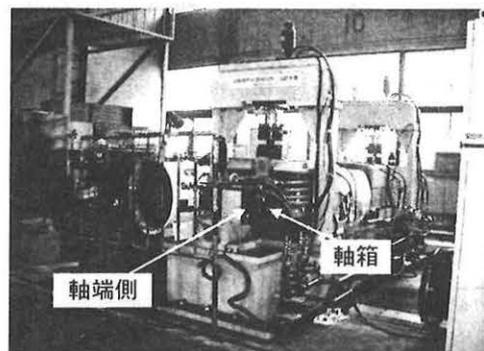


図6 車軸軸受用潤滑剤耐久試験装置

表4 台上耐久試験の試験条件

試験油	試作C (PA050%+鉱油50%)
潤滑油量	約1.2ℓ
軸箱	アルミ合金製
回転速度	2825min <sup>-1</sup> (回転速度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

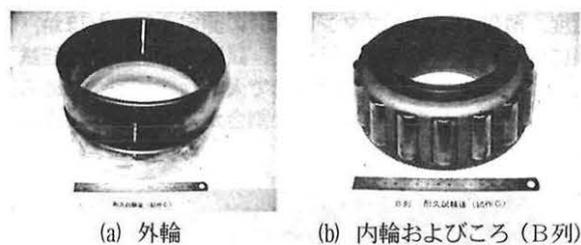
## 6.2 試験結果

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℃であった。100℃を超える高温となったのは、2825min<sup>-1</sup>(420km/h相当)の高速回転により、主に潤滑油の攪拌熱や軸受のところがり接触部における発熱が増大したためと思われる。なお、潤滑油の漏れはなく、試験後のオイルシールも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5に、車軸軸受の状態および軸受外輪の母線形状の代表例をそれぞれ図7および図8に示す。試作Cは、前述の管理基準値を満たし、劣化程度は小さく問題はなかった。また、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5 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 (B列)

図7 耐久試験後の車軸軸受の状態

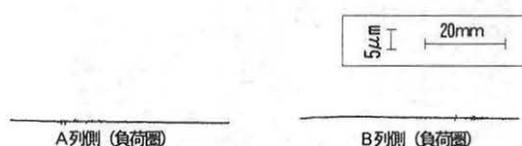


図8 耐久試験後の車軸軸受の外輪の母線形状 (代表例)

## 7. 試作Cの評価結果および代表性状

3種類の試作油の中で最も安価でコストパフォーマンスに優れた試作Cは、各種性能試験および台上耐久試験結果から、仕様目標も満たしており、400km/h域の高速化、かつ、更油周期延伸(60万km→120万km)に十分に対応可能であることが分かった。試作Cおよび現行油の主な代表性状を表6に示す。

表6 試作Cと現行油の主な代表性状

項目	試作C	現行油
基油	PA050% +高度精製鉱油50%	鉱油100%
動粘度グレード	ISO VG68 動粘度 40℃:65.58 100℃:10.33	ISO VG68 動粘度 40℃:62.34 100℃:8.63
粘度指数	145	111
引火点(℃)	271	252
流動点(℃)	-50	-27.5
酸化安定性 @150℃ ・RBOT 寿命 (min)	2863	485
・ISOT (600h)		
粘度比 @40℃ (%)	1.017	1.28
酸価増加値 (mgKOH/g)	0.12	6.57
ヘプタン不溶分 (mass%)	0.01	1.55
潤滑性能 (四球試験)		
・非焼付最大荷重 (N)	784	490
・融着荷重 (N)	1960	1568

## 8. 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。その結果を以下に示す。

- (1) 実車走行した現行油の性状分析結果から、熱・酸化安定性に優れ、かつ、せん断安定性を考慮した車軸軸受油の開発が必要であると判断した。
- (2) 熱・酸化安定性に優れた合成油PAOの適用について検討を行い、仕様目標を立てるとともに、3種類の車軸軸受油を試作した。
- (3) 試作油について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、試作油間では、大きな差は認められなかった。
- (4) コスト的に優位な試作C (PA050%+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、420km/h 150万km走行相当の試験条件においても、試作Cは、分析結果から劣化が小さく、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域の高速化および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ことが分かった。

## 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, 55巻7号, pp. 18, 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, 53巻4号, pp. 242, 2008.
- 3) 日本トライボロジー学会編: 潤滑ハンドブック, pp. 269, 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, 14巻3号, pp. 25, 2000.