

# 在来線電車歯車装置用長寿命ギヤ油の開発

木川 定之\* 曾根 康友\*\* 鈴木 淳一\*  
 中村 和夫\*\*\* 工藤 貢# 戸田 昌利#

## Long-life Gear Oils for Conventional Railway Electric Trains

Sadayuki KIKAWA Yasutomo SONE Junichi SUZUMURA  
 Kazuo NAKAMURA Mitsugu KUDO Masatoshi TODA

Long-life gear oil for conventional railway electric trains is developed to reduce workloads and costs of maintenance of a gearbox. Semi-synthetic base oil, mixture of polyalphaolefin (PAO) and highly purified mineral oil, is used in the developed gear oil at the prospect of high thermostability. The additive composition is also modified to enhance oxidation resistivity. In an Indiana stirring oxidation test (ISOT) at 135°C/96hours, the developed gear oil showed enough oxidation resistivity to be used for 1,200,000 km without oil replacement at conventional railway electric trains. And the reliability at low temperature is improved as compared with current gear oil, because the viscosity at low temperature and pour-point became lower by use of semi-synthetic base oil.

キーワード：ギヤ油，歯車装置，メンテナンス，長寿命，ポリαオレフィン，酸化安定性

### 1. はじめに

電車の走り装置において主電動機からの駆動力を車軸に伝える役割を担う歯車装置では、潤滑油としてギヤ油が用いられている。このギヤ油は、歯車装置の大歯車（車軸側の歯車）と小歯車（主電動機側の歯車）の噛みあい部の潤滑、および歯車装置の軸受部の潤滑に使用されている（図1）。ギヤ油は現在、多くの場合全般検査時、重要部検査時、もしくは相当する定期検査時に交換されており、使用される期間は概ね最大60万km走行相当となっている。

歯車装置は解体を行わなくても油面計の目視観察、および磁気栓への摩耗粉の付着状況から、ギヤ油と内部の状況を把握できる可能性がある。そのため、ギヤ油が現在の使用期間の2倍、すなわち120万km走行相当の使用が可能な耐久性を有していれば、図2に示すように60万km時点でのギヤ油の交換が不要となり、歯車装置の省メンテナンス化を進めることができる。そこで、新幹線と比較して一般的に回転数は低いが使用期間が長い在来線電車用歯車装置向けに、非交換で120万km走行相当使用可能な耐久性を有するギヤ油の開発を行った。

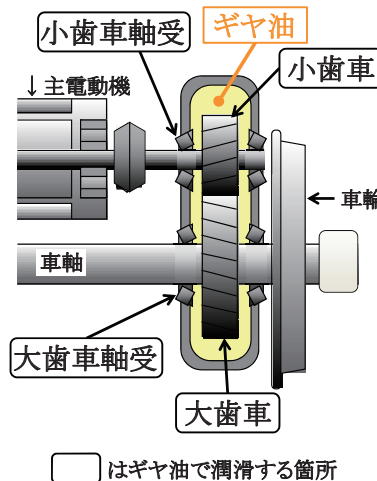


図1 電車歯車装置の構成とギヤ油により潤滑する箇所

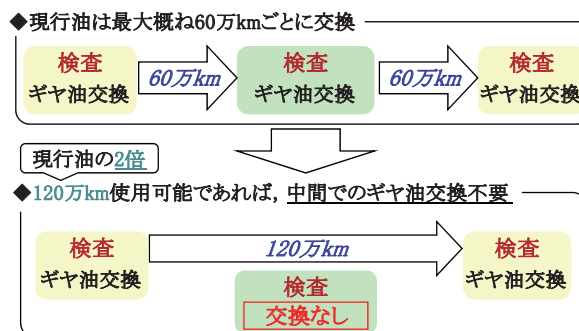


図2 長寿命ギヤ油による省メンテナンス化の例

\* 材料技術研究部 潤滑材料研究室  
 \*\* 材料技術研究部  
 \*\*\* 元 材料技術研究部 潤滑材料研究室  
 # 出光興産株式会社

特集：材料技術

2. 現行ギヤ油の分析による劣化因子の把握

2.1 現行ギヤ油の分析結果

開発にあたり現行ギヤ油の劣化の状況を把握するため、在来線電車にて18～58万km使用した現行ギヤ油について、油の粘り気を示す動粘度（JIS K2283）、摩耗金属粉やスラッジの量の目安となるヘプタン不溶分（ASTM D893に相当）、ギヤ油中に混入した水分（JIS K2275）、酸化劣化の指標となる酸価（JIS K2501）の測定を行い、表1にある鉄道総研が示した管理基準値<sup>1)</sup>（油交換要否の判断基準となる値）と比較した。

表1 歯車装置油の管理基準項目と管理基準値<sup>1)</sup>

管理基準項目	管理基準値
動粘度（JIS K2283）	新油からの変化 ±15%以下
ヘプタン不溶分 （ASTM D893 相当）	1.0%以下
水分（JIS K2275）	0.2%以下
酸価（JIS K2501）	新油からの増加値 +0.5mgKOH/g 以下

その結果、図3 (a) 動粘度、(b) ヘプタン不溶分、(c) 水分については問題となる値は見られなかったが、図3 (d) に示す酸価については40～60万kmで減少から増加に転じる傾向が見られた。潤滑油の酸価は一般的に、使用開始直後からしばらくは酸化防止剤の作用により減少し、その後酸化防止剤の消耗に伴って増大することから、現行ギヤ油は40～60万kmで酸化防止剤が消耗して油中に酸化劣化生成物が生成し始めていると推測される。さらに、40～60万kmの上昇傾向から、目標とする120万km使用に達する前に管理基準値である+0.5mgKOH/gを超過する可能性が示唆された。

以上より、ギヤ油の長寿命化にあたっては、現行ギヤ油と比較して酸化安定性を向上させる必要があることがわかった。

2.2 開発ギヤ油の仕様目標

本開発にて設定したギヤ油の仕様目標を表2に示す。現行ギヤ油の分析にて課題として抽出された酸化安定性については、120万km走行相当における劣化の度合いを、管理基準値である酸価増加値+0.5mgKOH/g程度とすることを目標とした。

また、寒冷地での起動時において軸受部に焼付きが発生することがあり、低温において油の流動性が低下して潤滑部位に行き渡らないことが原因のひとつと考えられ

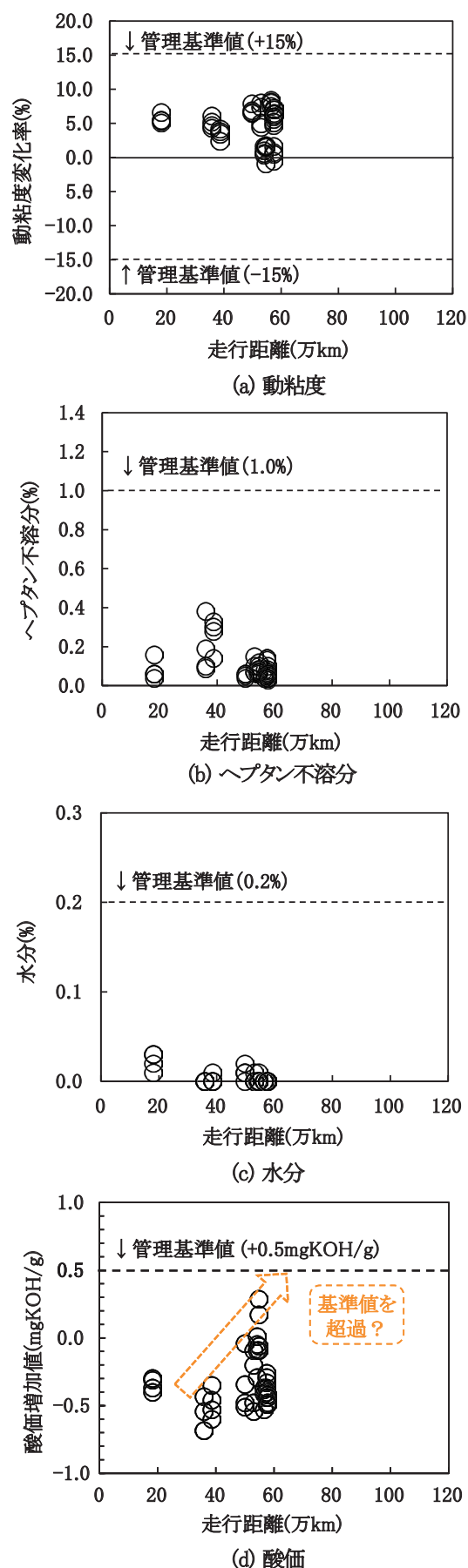


図3 在来線電車で使用した現行ギヤ油の分析結果

ていることから、低温での粘度を現行ギヤ油より低粘度とし、低温流動性を改善することを合わせて目標とした。

また、高温下での粘度については現行ギヤ油と同程度、潤滑性能（焼付き防止性能、摩耗防止性能）については現行ギヤ油と同等以上と設定した。

表2 開発ギヤ油の仕様目標

酸化安定性 (酸価増加値)		120万km 走行相当において +0.5mgKOH/g 程度
粘度・流動性		低温流動性の改善
		100℃での粘度は現行ギヤ油と同程度
潤滑性能	焼付き防止性能	現行ギヤ油と同等以上
	摩耗防止性能	

### 3. ギヤ油の試作と評価

#### 3.1 基油の選定

潤滑油は一般に、ベースとなる油である基油と、基油の性能を向上させる添加剤で構成されている。このうち基油は潤滑油の8～9割を占めるものであり、多くは石油を精製したものに由来する「鉱油」、もしくは化学的に合成した「合成油」のどちらかが使われている。本開発では、ギヤ油の大部分を構成する基油を、これまで使用されていた鉱油から合成油とすることにより、酸化安定性の大幅な向上、および低温流動性の向上を図った。合成油には炭化水素ベース、エステルベース等様々なものがあるが、本開発では、高粘度指数であり低温での流動性が良好であること、および過去に高速新幹線用ギヤ油や車軸軸受油において検討実績がある<sup>2) 3)</sup>ことから、ポリ $\alpha$ オレフィン (PAO) を基油に用いることとした。粘度指数とは温度変化に対する粘度の変化の目安となる指標であり、100℃での粘度が同じであれば粘度指数が高いものが低温での流動性が高い。また特に本開発では、合成時にメタロセン触媒を用いたPAOを用いることで、従来のPAOと比較して更に高い粘度指数による低温流動性の向上、およびさらなる攪拌損失（油が攪拌されるとき抵抗に由来するエネルギーロス）の低減を期待した<sup>4)</sup>。

しかし、合成油は一般に鉱油と比較して高価であることから、基油全体を合成油とすると、コストが上がる可能性がある。そこで、基油を全てPAOとするのではなく、PAOによる性能向上を損なわない範囲で高度精製鉱油と混合した混合基油とすることにより、コストの適正化を図った。

この混合基油を基油として使用し、さらに添加剤の検討を行い、ギヤ油を試作した。

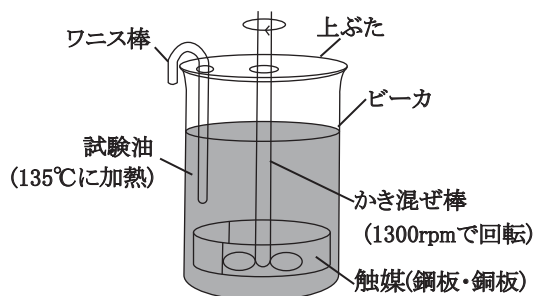


図4 ISOT 試験方法

#### 3.2 酸化安定性試験の条件決定

潤滑油の酸化安定性を評価する実験的試験方法としては、JIS K 2514 に規定される ISOT (Indiana Stirring Oxidation Test: 内燃機関用潤滑油酸化安定度試験, 図4) が知られている。ここでは ISOT により酸化安定性を評価することとし、現車 120 万 km 走行相当の酸価劣化の状態を再現する試験条件を検討した。本開発では試験温度を 135℃とし、試験時間については、現行ギヤ油において添加剤に由来する塩基価が使用により減少する<sup>5)</sup>ことから、現車から採取したギヤ油と ISOT 後の油の塩基価との比較により決定した。

現行ギヤ油について、現車使用時の走行距離による塩基価の変化を図5 (a)、ISOT (135℃) 試験時間による塩基価の変化を図5 (b) に示す。これらを比較すると、57 万 km 走行したときの塩基価は 1.4mgKOH/g まで低下しており、ISOT (135℃) を 42 時間行ったものの塩基価に相当することがわかる。この関係より、ISOT

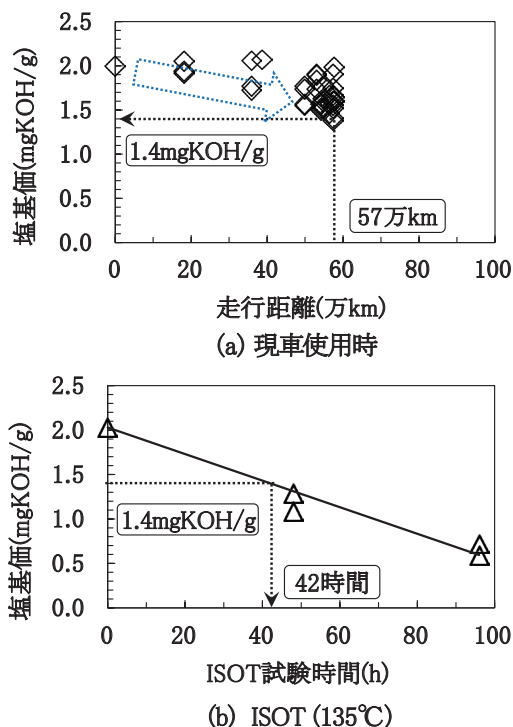


図5 現行ギヤ油における現車使用時と ISOT 時の塩基価

特集：材料技術

(135℃)を96時間行くと、現車では現在の更油周期の2倍以上である130万km走行に相当することが導かれる。

以上より、本開発では現車120万km以上走行相当の酸化劣化を再現する試験として、135℃、96時間のISOTを行うこととした。

3.3 酸化安定性の評価

混合基油による酸化安定性の向上効果を調べるため、基油を混合基油とし、添加剤を現行ギヤ油と同等の配合としたギヤ油（以下「開発ギヤ油A」）についてISOT（135℃、96時間）を行い、現行ギヤ油と酸価増加値を比較した結果を図6に示す。開発ギヤ油Aの酸価増加は現行ギヤ油と比較して抑えられており、基油の変更によって酸化安定性が改善することが確認された。しかし、目標とする酸価増加値+0.5mgKOH/gは達成できず、更なる酸化安定性向上が必要であることが示された。

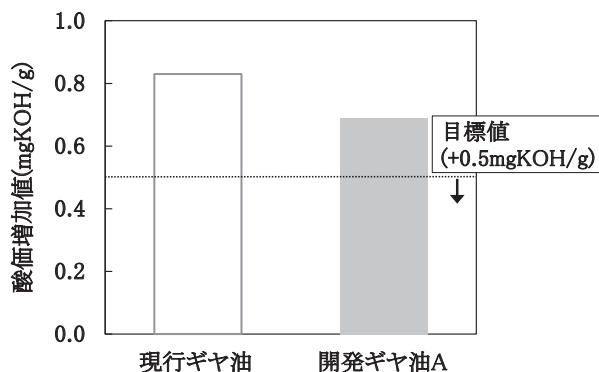


図6 開発ギヤ油AのISOT（135℃/96時間）後の酸価増加値

そこで、酸化安定性を向上させるため添加剤の検討を行い、PAO混合に加え清浄分散剤を増量したギヤ油（以下「開発ギヤ油B」）を試作し、同様に酸化安定性を比較した。その結果、図7に示すとおり、清浄分散剤の増量によって酸価増加値は目標値である+0.5mgKOH/g程度となり、開発ギヤ油Bが必要な酸化安定性を備えて

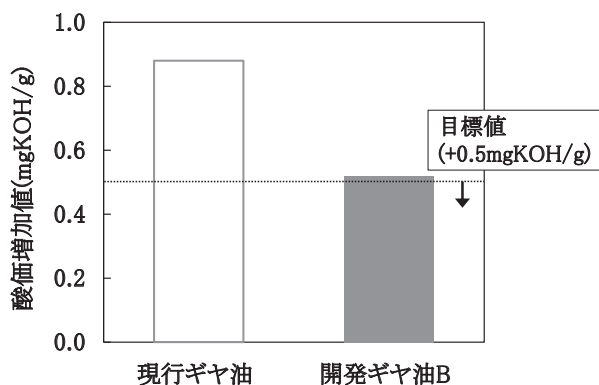


図7 開発ギヤ油BのISOT（135℃/96時間）後の酸価増加値

いることが確認された。また、試験後のビーカ内壁を観察したところ現行ギヤ油では酸化劣化によって生成したラッカーによる汚れが認められたのに対し開発ギヤ油Bでは清浄であったほか、試験後の塩基価、動粘度、ヘプタン不溶分についても開発ギヤ油Bは現行ギヤ油より良好な値を示した。

3.4 潤滑性能の評価

良好な酸化安定性を示した開発ギヤ油Bについて、シェル式四球試験機による耐荷重性能、耐摩耗性能試験、およびIAE歯車試験機（IP166/68）を用いた歯車試験により潤滑性能を評価した。

3.4.1 シェル式四球試験による評価

開発ギヤ油Bの耐荷重性能試験（ASTM D2783）における非焼付き最大荷重、融着荷重を現行ギヤ油と比較した結果を図8（a）および（b）にそれぞれ示す。いずれも大きい方がより高い荷重まで潤滑性能を保てる、すなわち耐荷重性能の高い油であることを示すが、開発ギヤ油Bでは非焼付き最大荷重は現行ギヤ油と比較して大きく、融着荷重は現行ギヤ油と同等であった。これより、開発ギヤ油Bの耐荷重性能は現行ギヤ油同等以上

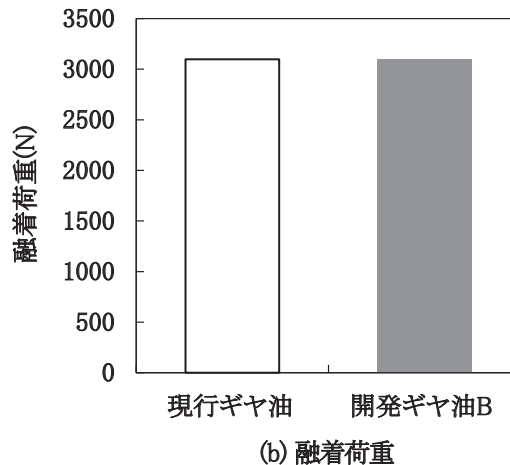
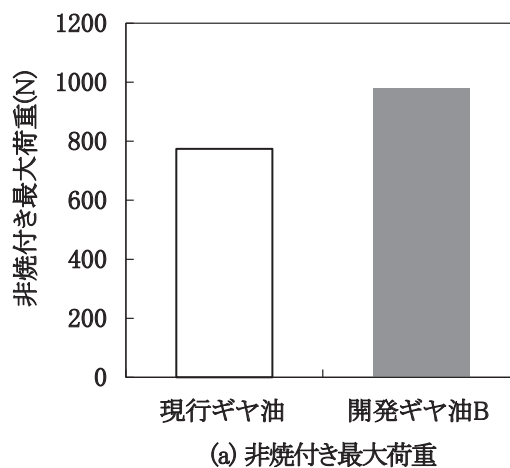


図8 開発ギヤ油Bの耐荷重性能試験（ASTM D2783）結果

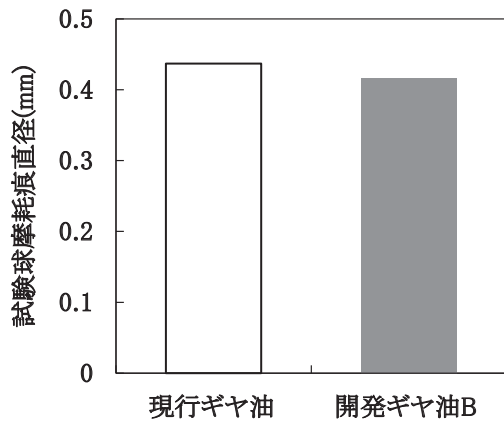


図9 開発ギヤ油Bの耐摩耗性能試験 (ASTM D2266) 結果

であることを確認した。

また、図9に示す耐摩耗性能試験 (ASTM D2266) での試験球の摩耗痕直径が、開発ギヤ油Bでは現行ギヤ油より減少していることから、開発ギヤ油Bの耐摩耗性能が現行ギヤ油より高いことが確認された。

### 3.4.2 歯車試験による評価

開発ギヤ油では3.4.1項に示したシェル式四球試験のほか、IAE (Institute of Automobile Engineers) 型歯車

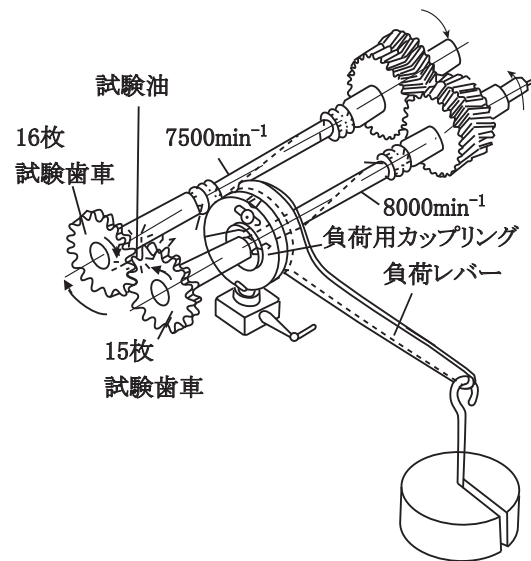


図10 IAE型歯車試験機

試験機による耐荷重性能試験を行った。IAE型歯車試験機は図10のような構成にて歯面に荷重をかけながら回転試験を行う装置であり、歯面にスカuffingが生じる荷重で耐荷重性能を評価するものである。本開発では、小歯車 (歯数15枚) 回転速度 8000min<sup>-1</sup>、大歯車 (歯数

表3 開発ギヤ油Bの代表性状

項目	仕様目標	開発ギヤ油B	現行ギヤ油
基油	混合基油 (PAOと高度精製鉱油を混合)	PAO 40% 鉱油 60%	鉱油 100%
動粘度 [mm <sup>2</sup> /s] (JIS K2283)	SAE80W90	40℃ :103 100℃ :16.3	40℃ :158 100℃ :17.7
粘度指数	130以上	171	124
流動点 [℃] (JIS K2269)	-40以下	-47.5	-37.5
酸化安定性試験 (ISOT 135℃, 96時間)			
酸価増加値 [mgKOH/g]	+0.5mgKOH/g以下	0.52	0.88
動粘度変化率 (100℃) [%]	現行ギヤ油同等以下	0.27	0.43
塩基価 [mgKOH/g]	現行ギヤ油より大	0.93	0.73
不溶分 (ヘプタン) [%]	現行ギヤ油より小	0.08	0.12
潤滑性能試験 (シェル式四球)			
耐荷重性能試験 (ASTM D2783)			
非焼付き最大荷重 [N]	現行ギヤ油同等以上	980	774
融着荷重 [N]	現行ギヤ油同等以上	3097	3097
耐摩耗性能試験 (ASTM D2266)			
試験球摩耗直径 [mm]	現行ギヤ油同等以下	0.416	0.437
潤滑性能試験 (IAE型歯車)			
80℃, 8000rpm			
スカuffing荷重 [N]	現行ギヤ油同等以上	509.6	490.0
せん断安定性試験 (ASTM D2603)			
動粘度低下率 (100℃) [%]	現行ギヤ油同等以下	0.3	2.4
あわ立ち性試験 (JIS K2518)			
24℃ [ml]	100以下	10	5
93.5℃ [ml]	100以下	35	15
93.5℃後の24℃ [ml]	100以下	10	5

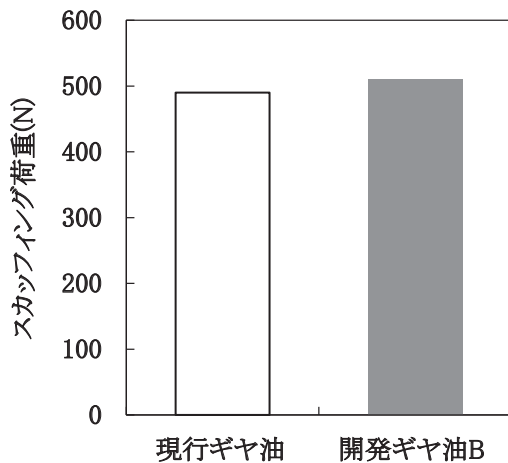


図 11 開発ギヤ油 B の IAE 型歯車試験機試験結果

16 枚) 回転速度  $7500\text{min}^{-1}$ , 油温  $80^\circ\text{C}$  で試験を行った。

現行ギヤ油と開発ギヤ油 B のスカフティング荷重を比較すると、図 11 のように開発ギヤ油 B のほうがわずかに高い値を示した。これより、3.4.1 項に示した四球試験による評価と合わせて、開発ギヤ油 B が現行ギヤ油同等以上の耐荷重性能をもつことを確認した。

### 3.5 開発ギヤ油の代表性状

開発ギヤ油 B の粘度・低温流動性等の代表性状、および各種試験の結果を表 3 に示す。開発ギヤ油 B では流動点が  $-47.5^\circ\text{C}$  と現行ギヤ油の  $-37.5^\circ\text{C}$  と比較して低くなっており、また粘度指数が現行ギヤ油と比較して大きくなっていることから、低温下での流動性が改善されていることを確認した。また開発ギヤ油 B は、歯車や軸受のせん断力による粘度低下の指標となるせん断安定性、攪拌によって油中に発生する気泡量を示すあわ立ち性など、その他の性能、性状についても全て仕様目標を満たしていることを確認した。

## 4. おわりに

在来線電車用歯車装置の省メンテナンス化を目標として、従来の更油周期の 2 倍である 120 万 km 使用可能なギヤ油の開発を行った。従来油の分析結果から長寿命化のためには酸化安定性の向上が必要であることがわかり、開発ギヤ油では PAO と高度精製鉱油の混合基油を採用することで、コストの増加を抑制しながら酸化安定性の向上を図った。混合基油を採用し、さらに添加剤配合の再検討を行った開発ギヤ油 B において、目標とする 120 万 km 無交換での使用に耐えうる酸化安定性をもつことを、ISOT により確認した。また開発ギヤ油 B について、現行ギヤ油と同等以上の耐荷重性能、耐摩耗性能をもつこと、および低温下での特性が現行ギヤ油より優れていることを確認した。

以上のように、開発ギヤ油 B はコストの増加を抑制しながら 120 万 km 非交換での使用に対応する酸化安定性を持つことから、在来線電車歯車装置の保守軽減に資することができると考えられる。

この開発ギヤ油については現在、実際の鉄道車両での試験に向けた検討を進めている。

## 文 献

- 1) 鈴木政治, 中村和夫, 細谷哲也: 電車走り装置用潤滑剤の劣化評価, 鉄道総研報告, Vol.11, No.9, pp.25-30, 1997
- 2) 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, pp.18-21, 1998
- 3) 中村和夫, 細谷哲也, 日比野澄子, 鈴木淳一, 設楽裕治, 平野亨: 新幹線車両用合成系車軸軸受油の開発, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail 講演論文集, pp.185-189, 2009
- 4) 岡田憲夫, 藤川真治郎: 高機能ポリアルファオレフィン (PAO) の開発と適用, 月刊トライボロジー, Vol.268, pp.20-21, 2009
- 5) 日本トライボロジー学会編: トライボロジーハンドブック, 養賢堂, pp.812-816, 2001