

# 低温流動性を向上した新幹線車両用ギヤ油の開発

木川 定之\* 鈴村 淳一\* 沓掛 久志\*\*

Development of a Gear Oil with Improved Low-temperature Fluidity for Shinkansen Electric Cars

Sadayuki KIKAWA Junichi SUZUMURA Hisashi KITSUKAKE

A gear oil with improved low-temperature fluidity has been developed for Shinkansen electric cars used in cold districts. In this gear oil, much lower low-temperature viscosity and a higher viscosity index than the current gear oil have been achieved by using highly refined mineral oils as a base oil, and newly adding viscosity index improver additives. It has been indicated from performance tests that the gear oil developed has oxidation stability and lubricating performance equal to or higher than those of the current gear oil. The gear oil developed shows enough fluidity at -30°C in bench rotation test, and enough durability performance in on-track verification tests on Shinkansen cars.

キーワード：新幹線，歯車装置，潤滑油，ギヤ油，低温流動性，高度精製鉱油

## 1. はじめに

電車の走り装置において主電動機で発生した回転力を車軸，車輪に伝える役割を担っている歯車装置（図1）では，潤滑油としてギヤ油が用いられている。ギヤ油は，大歯車（車軸側の歯車）と小歯車（主電動機軸側の歯車）のかみ合い部の潤滑だけでなく，図2に示すように，回転する大歯車によりかき上げられる「はねかけ」により，それぞれの歯車の両側に取り付けられた円すいころ軸受に達し，軸受部の潤滑にも寄与している<sup>1)</sup>。

このギヤ油に求められる性能のひとつとして，低温流動性が挙げられる。一般に，潤滑油は低温になるほど粘度が上昇して流動性が低下するが，ギヤ油が十分な流動性をもたない低温下で車両を起動すると，ギヤ油のはねかけが十分に行われず，潤滑不良に起因する不具合が発生することがある<sup>1)</sup>。特に，油溜めから遠く，ギヤ油が到達しにくい小歯車軸受の潤滑条件が厳しくなることが知られており，損傷事例も報告されている<sup>2)</sup>。

新幹線の路線網が北海道などの寒冷地に拡大するにあたり，新幹線車両のギヤ油においても，低温環境への対応が求められる<sup>3)</sup>。しかし，現在使用されているギヤ油（以下「現行ギヤ油」）は低温での粘度上昇が大きいので，想定される低温条件では流動性の不足が懸念された。また，過去に最高速度400km/h域の高速新幹線車両向けに開発された合成系ギヤ油<sup>4)</sup>は低温下でも十分な流動性を有しているが，合成油であるポリアルファオレフィン（PAO）系基油を使用していることから高価であり，

\* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

\*\* 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター

現行ギヤ油からのコスト増加を抑えながら対応することが求められている。

そこで，寒冷地を走行する新幹線車両向けに，現行ギヤ油からのコスト増を小さく抑えながら，今後対応が求められる-30°Cの温度環境下においても十分な流動性を有するギヤ油（以下「開発ギヤ油」）を新規に開発した。

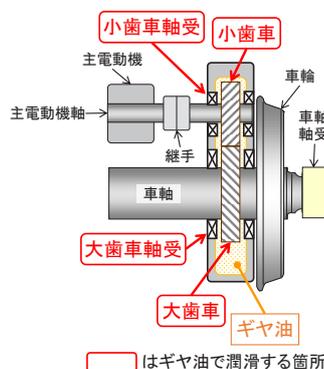


図1 電車歯車装置の構造

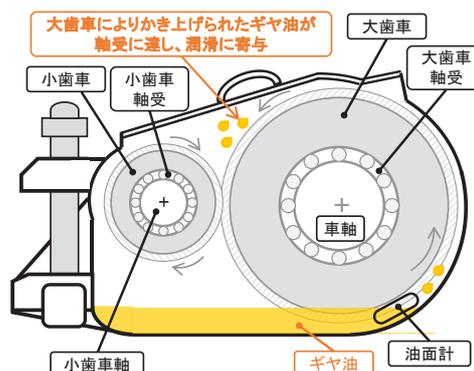


図2 電車歯車装置におけるはねかけ潤滑（正転の例）

## 特集：材料技術

本稿では、開発ギヤ油の概要とベンチ試験の結果、および現車試験の結果について述べる。

## 2. 開発ギヤ油の組成と性能試験

### 2.1 開発ギヤ油の性能目標と組成

開発ギヤ油の性能目標のうち、低温流動性については、「現行ギヤ油の適用が困難な $-30^{\circ}\text{C}$ の環境下において、安定して歯車装置を起動できること」と設定した。また、酸化安定性、潤滑性能といった低温流動性以外の性能面については、現行ギヤ油が現在の走行条件において十分な性能、実績を有していることから、「現行ギヤ油と同等以上」を目標とした。

以上の性能を達成するため、表1に示す組成の開発ギヤ油を試作した。現行ギヤ油からの変更点を以下の(1)～(3)に示す。なお、開発ギヤ油のコストについては現行油の2倍以内と見込まれ、基油を高度精製鉱油主体としたことなどにより、前述した既開発の合成系ギヤ油より低減している。

表1 開発ギヤ油と現行ギヤ油の組成

基油		開発ギヤ油 高度精製鉱油 (グループIII) 主体	現行ギヤ油 鉱油 (グループI)
添加剤	粘度指数 向上剤	あり	なし
	摩擦 調整剤	あり (Mo系)	なし

#### (1) 高度精製鉱油を主とした基油の採用

低温におけるパラフィン系潤滑油の粘度上昇の主因として、基油中に存在するワックス(長鎖の炭化水素)の析出が挙げられる。そのため、低温流動性の改善にあたっては、基油の選定が重要な項目となる。基油の分類法として広く使われているAPI分類を表2<sup>5)</sup>に示す。表2のうちグループI～IIIは鉱油系基油であり、数字が大きいほど精製度が高く、高い低温流動性が期待できる。

開発ギヤ油では、現行ギヤ油で使用されているグループI基油と比較して精製度の高いグループIII基油を主な基油として採用し、低温流動性や粘度指数の改善を狙った。粘度指数は温度による粘度変化の指標となる値

であり、数値が大きいほど温度低下による粘度上昇が小さいことを示す。また、鉱油系基油を主とすることで、合成系基油(グループIV, V)を使用した場合と比較してコスト増を抑えながら性能向上を図った。

さらに、開発ギヤ油では、鉱油と異なり極性基を有し、摩擦・摩耗の低減に効果があるエステル系合成油(グループV)を基油に添加した。

#### (2) 粘度指数向上剤の配合

低温流動性を向上する手法としては、基油の粘度を下げるのが有効である。しかし、すべての温度領域で一律に粘度を低くすると、低温流動性は向上するが、高温下で油膜形成に必要な粘度を確保できず、実使用温度域での潤滑性能が低下する。

そのため、開発ギヤ油では、添加剤として粘度指数向上剤を新規に配合し、高温下で必要な粘度を確保しながら粘度指数を向上させ、低温流動性の改善を狙った。電車歯車装置では、歯車のかみ合い部をはじめ、油に大きなせん断力が生じる部位が多いことから、せん断力を受けても粘度指数向上効果の低下が起きにくい、低分子量の粘度指数向上剤を採用した。

#### (3) その他の添加剤の変更

開発ギヤ油では、耐荷重性能、耐摩耗性能の確保のため、自動車エンジン油、デファレンシャルギヤ油等で使用実績、検討実績のある<sup>6)</sup>モリブデン(Mo)系の摩擦調整剤を新規に配合した。また、酸化防止剤等の添加剤を、前章で述べた既開発の合成系ギヤ油で使用されているものに変更した。

### 2.2 開発ギヤ油の性状・性能試験

前節に示した開発ギヤ油について、性状試験及び性能試験を実施し、現行ギヤ油と比較した。

#### 2.2.1 粘度および低温流動性

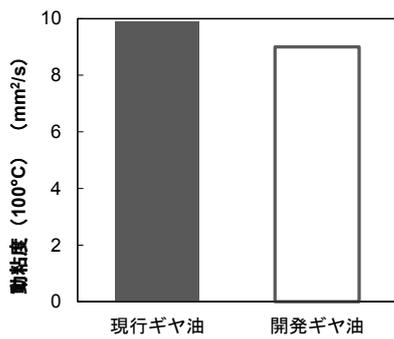
低温流動性の評価として、動粘度の測定と粘度指数の算出、 $-20^{\circ}\text{C}$ におけるブルックフィールド粘度の測定、および流動点の測定を実施した結果を以下に示す。

##### (1) 動粘度および粘度指数

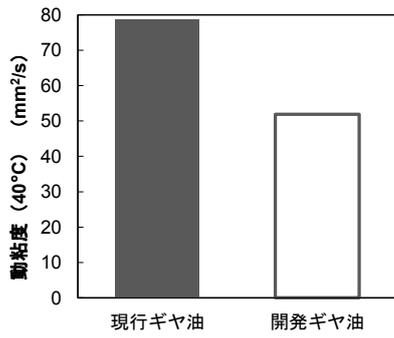
JIS K 2283に従い、開発ギヤ油と現行ギヤ油の $100^{\circ}\text{C}$ と $40^{\circ}\text{C}$ の動粘度を測定した結果、および粘度指数を算出した結果を図3に示す。開発ギヤ油では、現行ギヤ油と比較して、高温での油膜保持に必要な $100^{\circ}\text{C}$ における

表2 基油のAPI分類<sup>5)</sup>

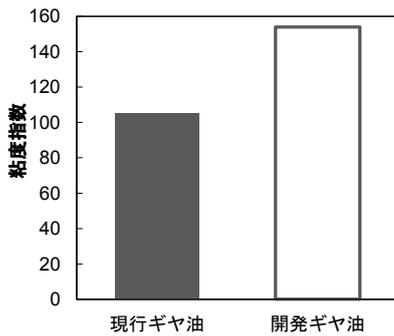
API分類	油種	粘度指数	飽和炭化水素分(%)	残留硫黄分(%)
グループI	鉱油	80以上120未満	90未満	0.03より大
グループII	鉱油	80以上120未満	90以上	0.03以下
グループIII	鉱油	120以上	90以上	0.03以下
グループIV	ポリアルファオレフィン系合成油			
グループV	グループI～IVに含まれない油(エステル系合成油等)			



(a) 動粘度 (100°C)



(b) 動粘度 (40°C)



(c) 粘度指数

図3 現行ギヤ油と開発ギヤ油の動粘度および粘度指数

粘度の低下を抑制しながら40°Cにおける動粘度の低下を実現していること、粘度指数が大幅に向上していることが認められる。

(2) ブロックフィールド粘度

低温環境下での粘度を直接評価するため、ASTM D 2983 で定められているブロックフィールド粘度測定法により、-20°Cにおける絶対粘度を測定した結果を図4に示す。開発ギヤ油の-20°Cにおける流動性は現行ギヤ油と比較して低く、低温流動性が大きく改善していることが認められる。

(3) 流動点

JIS K 2269 に従い、潤滑油が流動性を示す最低温度である流動点を測定した結果を図5に示す。開発ギヤ油の流動点が現行ギヤ油と比較して低下していること、およ

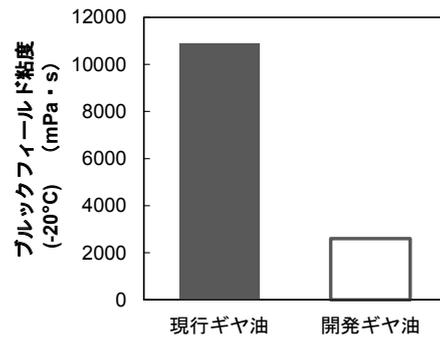


図4 現行ギヤ油と開発ギヤ油のブルックフィールド粘度 (-20°C)

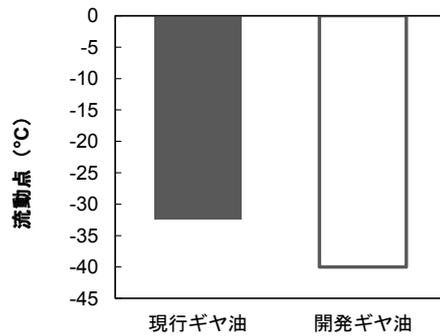


図5 現行ギヤ油と開発ギヤ油の流動点

び仕様目標の-30°Cに対して十分な余裕があることが認められる。

以上(1)～(3)により、開発ギヤ油では現行ギヤ油と比較して温度低下による粘度上昇が抑制され、低温流動性が改善されていることが示された。

2.2.2 酸化安定性

開発ギヤ油の酸化安定性を評価するため、JIS K 2514 に定められている攪拌酸化劣化試験 (Indiana Stirring Oxidation Test : ISOT) を実施した。試験温度は135°C、試験時間は96時間とした。

試験後の酸価 (全酸価) 増加値を図6に示す。開発ギヤ油の酸価増加値は現行ギヤ油と比較して低く抑えられており、開発ギヤ油が現行ギヤ油以上の酸化安定性を有することが示された。

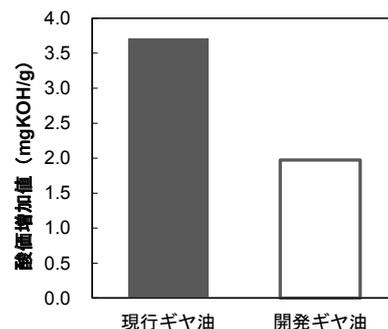


図6 攪拌酸化劣化試験後の酸価 (全酸価) 増加値

特集：材料技術

2.2.3 潤滑性能

開発ギヤ油の潤滑性能を評価する試験として、シェル式四球試験機を用いた耐荷重性能試験 (ASTM D 2783) および耐摩耗性能試験 (ASTM D 4172) を実施した。また、IAE 型歯車試験機を用い、過去のギヤ油開発時の試験条件<sup>4)</sup>に基づいた耐荷重性能試験を実施した。

開発ギヤ油と現行ギヤ油の潤滑性能試験の結果を表3に示す。耐荷重性能については、現行ギヤ油と比較して開発ギヤ油の非焼付き最大荷重は向上しており、融着荷重は同等であることがわかる。耐摩耗性能については、開発ギヤ油の摩耗痕直径が現行ギヤ油と比較して減少しており、向上していることがわかる。IAE 型歯車試験機による試験におけるスカuffing荷重については、開発ギヤ油において、2回の試験のうち1回で現行ギヤ油より低い値が見られたが、その差は小さく、耐荷重性能は同等と考えられる。

以上より、開発ギヤ油の潤滑性能について、現行ギヤ油と同等以上という目標仕様を満足することを確認した。

表3 潤滑性能試験結果

試験		開発ギヤ油	現行ギヤ油
四球試験 (耐荷重性能)	非焼付き 最大荷重 (N)	981	618
	融着荷重 (N)	3089	3089
四球試験 (耐摩耗性能)	摩耗痕直径 (mm)	0.27	0.55
IAE 型歯車 試験機試験	スカuffing 荷重 (kgf) (n=2)	60	60
		55	60

以上に述べた 2.2.1 ~ 2.2.3 項より、開発ギヤ油において低温流動性が向上していること、酸化安定性および潤滑性能が仕様目標を満足することを確認した。

3. 開発ギヤ油の低温起動性能試験<sup>7)</sup>

現行ギヤ油と比較して低温流動性が向上していること、酸化安定性および潤滑性能が仕様目標を満たしていることを確認した開発ギヤ油について、実車歯車装置を用いた -30℃環境での低温起動性能試験を実施した。

試験装置は図7のようになっており、設置した歯車装

置にギヤ油を入れ、室内を -30℃に冷却したのち、継手とベルトを介して接続した駆動モータによって、小歯車側から駆動して回転試験を実施する。本試験では、実車の加速時と同等の加速度で最高速度相当の回転数まで上昇させた後、最高回転数を 30 分間維持する回転パターンとした。試験中は小歯車軸受および大歯車軸受の外輪温度を測定し、試験結果に潤滑不良によるとみられる顕著な温度上昇が一定時間 (10 秒程度) 見られた場合には否判定、そのような温度上昇がなければ良好とした。

また、試験条件は表4のように設定した。油量については、少ない場合にかき上げられる油が減少するためより厳しい潤滑条件となることから、通常油量のほかに、当該歯車装置の規定下限量 (それ以上の減少が認められた場合は検査時に補油を行う量) を設定した。また、エンドプレイ値 (軸受すきま) については、大歯車軸受、小歯車軸受とも、20℃において、最も厳しい条件である公差内の最小値の近傍に調整した。

低温起動性能試験の結果を表5に示す。現行ギヤ油では最高回転数 320km/h 相当、通常油量の条件において

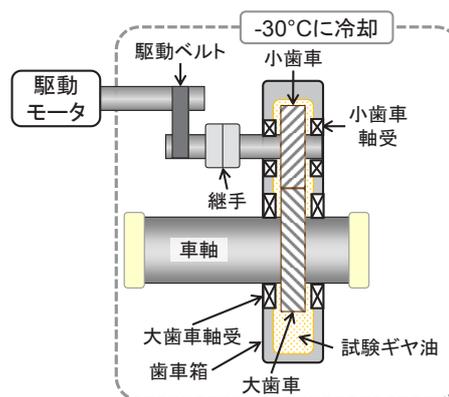


図7 低温起動性能試験 試験装置

表4 低温起動性能試験 主な試験条件

回転方向	正転・逆転とも実施 (正転→逆転の順)
最高回転数	320km/h 走行相当, 360km/h 走行相当
油量	通常油量, 規定下限量
エンドプレイ値	20℃における公差の 最小値近傍に調整

表5 低温起動性能試験結果

試験条件	最高回転数 油量	320km/h 走行相当		360km/h 走行相当	
		通常油量	規定下限油量	通常油量	規定下限油量
現行ギヤ油		温度上昇大：否判定 (小歯車軸受車輪側)		(試験実施せず)	
開発ギヤ油		良好	良好	良好	良好

過大な温度上昇が発生し否判定となった。そのため、より厳しい条件となる試験は実施しなかった。一方、開発ギヤ油では最も厳しい条件である最高回転数 360km/h 走行相当，規定下限油量での試験においても良好判定であった。この結果より，開発ギヤ油が「-30℃において安定して歯車装置を起動できる低温流動性」という仕様目標を満足していると認められる。

#### 4. 開発ギヤ油の現車走行試験

前章で述べた低温起動試験により優れた低温流動性が確認された開発ギヤ油について，長期使用時の耐久性等を調査するため，営業新幹線車両を用いた 1 台車検査間（最大 60 万 km）の現車走行試験を実施した。なお，現車走行試験の実施にあたっては，事前に実車の台車，歯車装置を用いた最大 6.2 万 km 走行相当の台上試験を行い，油の顕著な劣化や歯車装置の損傷がないことを確認している<sup>7)</sup>。

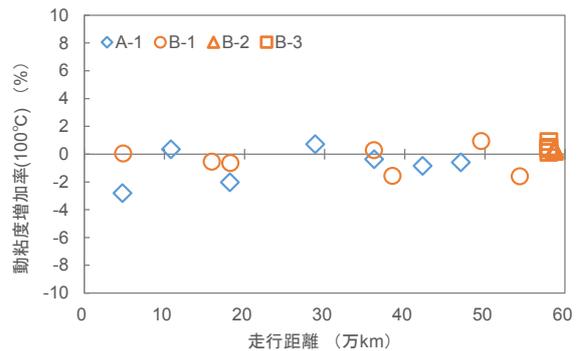
各編成の試験走行距離と最高運転速度を表 6 に示す。歯車箱形式，走行条件の異なる車種 A と B から編成を選定して，各編成の 1 両（4 軸）に開発ギヤ油を入れて営業走行に供し，次の台車解体時に試験ギヤ油を採取した。また，表 6 のうち A-1 編成と B-1 編成については，全般検査・台車検査時のほか，特定の交番検査時に 4 軸のうち 1 軸のギヤ油を採取し，試験期間の中間でのギヤ油の状態を調査した。このとき油を採取した部位には再度未使用の開発ギヤ油を入れ，次回台車解体時までの試

表 6 開発ギヤ油現車試験における試験走行距離と最高運転速度

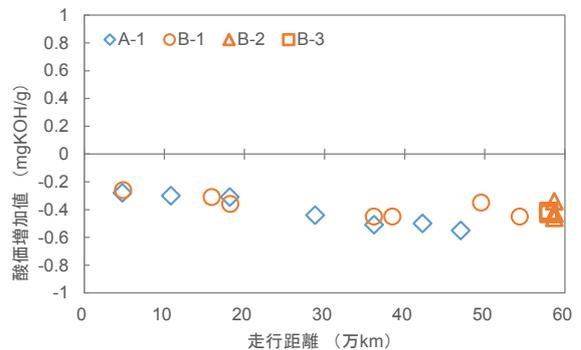
車種	編成	試験走行距離 (万 km)	最高運転速度 (km/h)
A	A-1	4.7 ~ 47.0	275
B	B-1	4.8 ~ 54.4	320
	B-2	58.7	
	B-3	58.0	

表 7 新幹線車両用ギヤ油の管理項目と管理基準値

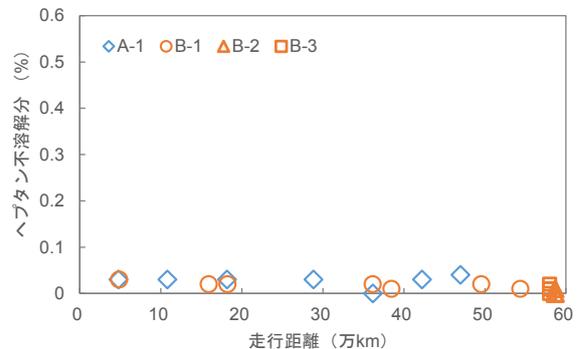
管理項目	管理基準値
動粘度 (100℃)	未使用油からの変化 ± 10%以内
酸価 (全酸価)	未使用油からの変化 +0.5mgKOH/g 以下
ヘプタン不溶解分 (A 法)	0.5%以下
水分	0.1%以下
油中の摩耗金属分 (鉄分)	0.1% (1000ppm) 以下



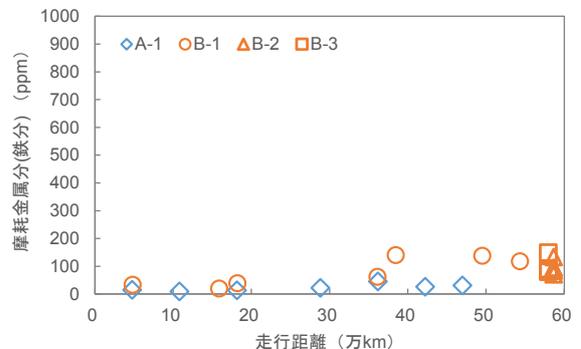
(a) 動粘度増加率 (100℃)



(b) 酸価 (全酸価) 増加値



(c) ヘプタン不溶解分 (A 法)



(d) 油中の摩耗金属分 (鉄分)

図 8 現車試験に供した開発ギヤ油の分析結果

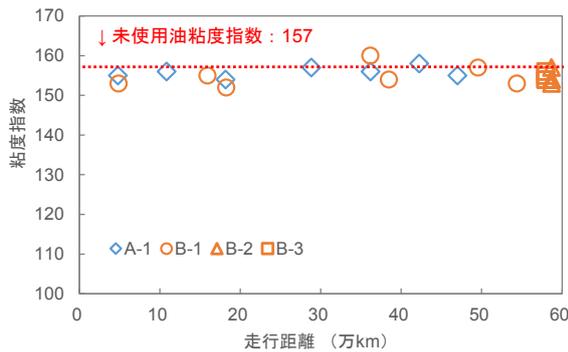


図9 現車試験に供した開発ギヤ油の粘度指数

験を実施した。

なお、A-1 編成については、検修の都合により、試験前に開発ギヤ油によるフラッシングを行えなかったため、各部位の初回採油時には、歯車装置内に残存した現行ギヤ油が僅かに混入している可能性が考えられる。B-1～B-3 編成については、給油前に試験ギヤ油 1L でフラッシングを実施した。

採取したギヤ油については、表 7 に示す管理項目の分析を実施し、使用限度の目安となる管理基準値<sup>8) 9)</sup>との比較によって性状を評価した。また、表 7 の項目のほか、40℃での動粘度を測定し、JIS K 2283 に従い、低温流動性の目安となる粘度指数を求めた。

走行試験後のギヤ油の動粘度変化率 (100℃)、酸価増加値、ヘプタン不溶解分、摩耗金属分の分析結果を図 8 に、粘度指数を図 9 にそれぞれ示す。いずれの項目においても顕著な劣化を示す値は見られず、粘度指数についても未使用油に対して大きな変化は見られなかった。また、摩耗金属分については、同一編成の歯車箱で使用された現行ギヤ油の分析値と同程度であった。なお、水分については、すべての編成、部位で検出されなかった。

以上より、開発ギヤ油は現状の 1 台車検査周期の使用に対して十分な耐久性を有すると認められる。

## 5. 結論

「-30℃の環境下において、安定して歯車装置を起動できること」を目標性能として、低温流動性を向上した新幹線車両用ギヤ油を開発した。開発ギヤ油では、高度精

製鉱油 (グループ III) 基油の採用、粘度指数向上剤の配合により、現行ギヤ油からのコスト増加を小さく抑えながら低温流動性の向上、および現行ギヤ油と同等以上の酸化安定性、潤滑性能を実現した。低温流動性を確認する試験として、実車歯車装置を用いた低温起動性能試験を実施し、開発ギヤ油が -30℃の環境下においても歯車装置を安定して起動可能な流動性を有することを確認した。また、新幹線車両を用いた最大 58.7 万 km の現車試験により、開発ギヤ油が十分な耐久性を有することが認められた。

この報告には、JX 日鉱日石エネルギー株式会社 (現 JXTG エネルギー株式会社) との共同研究の成果が含まれている。

## 文献

- 1) 小野寛：高速鉄道用歯車装置，トライボロジスト，58, No.7, pp.473-478, 2013
- 2) 田中清，鈴木政治：寒冷地運用電車ギヤ油の開発 (第 1 報) - 試作 80W-90 マルチグレードギヤ油の性能確認試験 -，鉄道技術研究所速報，A87, No.54, 1987
- 3) 川上修：新幹線に関する研究開発の概要，JR EAST Technical Review, 57, pp.7-10, 2017
- 4) Nakamura, K., Suzuki, M. and Sone, Y.: Development of Synthetic Gear Oils for High Speed Shinkansen Electric Cars, Quarterly Report of RTRI, Vol.39, No.3, pp.119-124, 1998.
- 5) The American Petroleum Institute: API 1509 ANNEX E API BASE OIL INTERCHANGEABILITY GUIDELINES FOR PASSENGER CAR MOTOR OILS AND DIESEL ENGINE OILS, 2016.
- 6) 栗原功，小松原仁：省燃費デファレンシャルギヤオイルの開発，自動車技術，71, No.9, pp.75-80, 2017
- 7) 関川翔子，長恵美子，鈴木史比古，岩波健，島宗亮平：新幹線用低温対応ギヤ油の開発，JR EAST Technical Review, 57, pp.33-36, 2017
- 8) 鈴木政治：車両用潤滑油，トライボロジスト，Vol.35, No.2, pp.101-106, 1990
- 9) 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, pp.242-247, 2008