

低温流動性を向上したギヤ油による起動加速度の向上

木川 定之* 鈴村 淳一* 生駒 一樹*

Improvement of Starting Acceleration by use of Gear Oil with Improved Low-temperature Fluidity

Sadayuki KIKAWA Junichi SUZUMURA Kazuki IKOMA

This study explores effects of gear oil with improved low-temperature fluidity on improvement of starting acceleration of trains running in cold districts. In starting performance tests at -20°C , temperature rise of gearbox in acceleration region was suppressed using the gear oil with improved low-temperature fluidity. Suppressing effects on temperature rise of gearbox using gear oil with improved low-temperature fluidity was also confirmed under condition where starting acceleration was increased up to 2.9km/h/s. Accordingly, from these results, it is found that the use of gear oil with improved low-temperature fluidity is effective in improving starting acceleration in cold environment. Moreover, it is confirmed that the use of gear oil with improved low-temperature fluidity tends to suppress gear oil temperature rise under conditions of operation at maximum speed.

キーワード：歯車装置，ギヤ油，起動加速度，低温流動性，低温起動性能試験

1. はじめに

歯車装置は、電車の走り装置において、駆動用電動機である主電動機の駆動力を輪軸に伝える。この歯車装置の潤滑剤として用いられるギヤ油は、図1に示すように、小歯車（主電動機軸側の歯車）と大歯車（車軸側の歯車）のかみ合い部の潤滑を担っている。また、回転する大歯車によるギヤ油のはねかけにより、それぞれの歯車軸に取り付けられている軸受の潤滑にも寄与している。

電車の歯車装置用のギヤ油に求められる性能として

は、歯面や軸受の各接触面での高荷重（高接触面圧）に耐えうる耐荷重性、高速回転時のかくはん熱などで劣化しない耐熱性、台車検査・全般検査までの期間交換せずに使用できる長期耐久性等のほか、低温における流動性も挙げられる。潤滑油は一般に低温になると粘度が増大し流動性が悪くなるため、寒冷地での留置などにより歯車装置が長時間低温にさらされると、ギヤ油の流動性が低下し、歯車装置の起動時に油が軸受の潤滑を必要とする接触面に十分行き渡らずに潤滑不良となり、焼付き等が発生して起動不良となることがある。新幹線ネットワークが北海道をはじめとする寒冷地に拡大するにあたり、新幹線車両の歯車装置に使用されるギヤ油は、低温流動性の向上が求められている。これに対応し、鉄道総研では過去に、 -30°C の低温環境で安定した起動性能を発揮する新幹線車両向けギヤ油（以下「寒冷地対応ギヤ油」）を開発した。この寒冷地対応ギヤ油については、これまで台車での低温起動性能試験による低温流動性の評価、台上回転試験および現車走行試験による長期使用時の劣化の評価をそれぞれ実施し、 -30°C 以下における十分な流動性、1台車検査期間の使用に対する十分な耐久性を有していることをそれぞれ確認した¹⁾²⁾。

ところで、この寒冷地対応ギヤ油では、低温から常温にかけての動粘度が新幹線車両で現在使用されているギヤ油（以下「現行ギヤ油」）と比較して小さく抑えられていることなどから、 -30°C の環境で走行する車両以外への適用においても、性能向上の効果が期待される。そのひとつに、車両の起動加速度の向上がある。寒冷地を走行する車両では、低温環境でのギヤ油の流動性の低下により、起動時に軸受の潤滑不良が発生する可能性があるため、起動加速度が制限される。このとき、想定さ

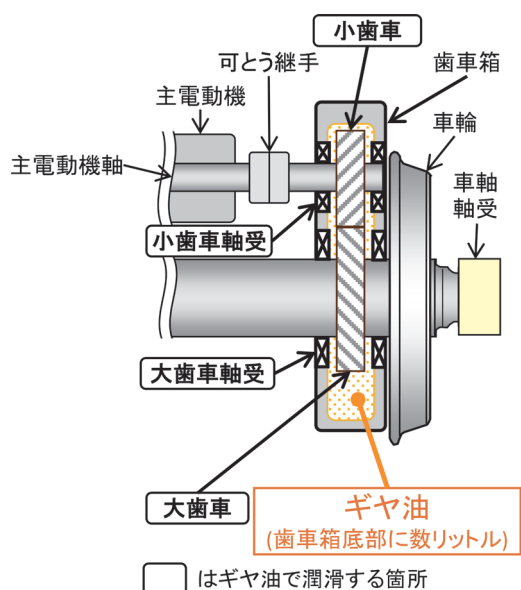


図1 電车用歯車装置の構造とギヤ油で潤滑される箇所

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

れる低温環境においてギヤ油が十分な流動性を有していれば、起動加速度を向上できる可能性がある。そこで、新幹線車両用歯車装置を使用した台上試験として、起動加速度を向上した条件での低温起動性能試験（-20℃環境）を実施し、寒冷地対応ギヤ油による新幹線車両の起動加速度向上の実現可能性を検討した。また、同じく新幹線車両用歯車装置を使用した台上試験として、常温での回転試験を実施し、寒冷地対応ギヤ油使用時の各部の温度上昇の特性を現行ギヤ油使用時と比較した。

2. 寒冷地対応ギヤ油の概要

寒冷地対応ギヤ油は、1章で述べたように、-30℃の低温環境で安定した起動性能を有するギヤ油として開発したものである。寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の組成、代表性状、および低温起動性能試験結果の比較を表1¹⁾に示す。寒冷地対応ギヤ油では、高度精製鉱油（グループIII）を主体とした基油の採用、および粘度指数向上剤の配合により、高温での粘度を現行油と同程度としながら低温流動性を大幅に改善している。このほか、寒冷地対応ギヤ油では現行ギヤ油と比較して酸化安定性が向上していること、潤滑性能が同等以上であることを試験により確認している。歯車装置の低温起動性能については実車の歯車装置を用いた-30℃での起動試験により、実使用環境での耐久性については1台車検査期間の現車走行試験によりそれぞれ確認している¹⁾。

3. 低温起動性能試験

寒冷地対応ギヤ油による起動加速度向上の可能性について検討するため、新幹線車両用の歯車装置を使用し、-20℃の環境下において、起動加速度を向上した条件

での低温起動性能試験を実施した。なお、使用した歯車装置は実車使用品を再整備したものであり、また低温起動性能試験に先立って実施した常温回転試験（4章に詳細を示す）にも用いている。

3.1 試験方法

試験に供するギヤ油を入れた歯車装置を台上試験用の装置に設置（図2）したのち室内を-20℃に冷却し、回転試験を実施した。試験中は、小歯車軸受、大歯車軸受それぞれの外輪温度、油温（排油栓内）、および試験室内温度を測定し、2秒ごとに記録した。

起動良否の判定は、軸受外輪の10秒ごとの温度上昇を指標にし、過去の実施例¹⁾にならって以下のように設定した。

- ・ 良好判定…試験中に、潤滑不良によるとみられる顕著な温度上昇が発生しない場合（目安：温度上昇3.0℃/10s以下）。
- ・ 否判定…試験中に、軸受が焼き付くような温度急上昇が発生した場合。

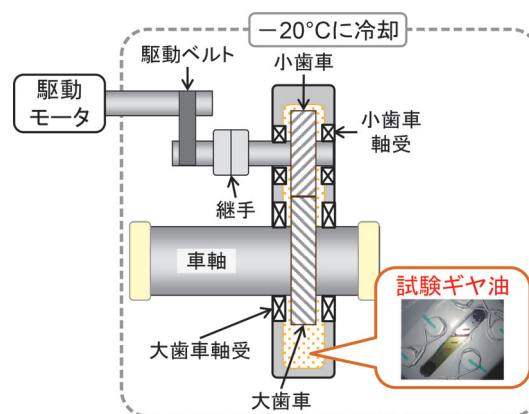


図2 低温起動性能試験における試験装置の構成

表1 寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の組成、代表性状および低温起動性能試験結果¹⁾

油種	寒冷地対応ギヤ油		現行ギヤ油	
組成	基油	高度精製鉱油（グループIII）主体*	鉱油（グループI）	
	添加剤配合	粘度指数向上剤	なし	
		摩擦調整剤	モリブデン系	なし
代表性状 低温流動性	動粘度（mm ² /s）	40℃	51.86	78.74
		100℃	8.986	9.908
	粘度指数	154	105	
	粘度（-20℃）（mPa・s） （ブルックフィールド粘度計法）	2600	10900	
	流動点（℃）	-40.0	-32.5	
低温起動性能試験結果	低温起動性能試験（-30℃） 最高速度320km/h相当、通常油量 最高速度360km/h相当、規定下限油量		良好 良好	温度上昇大 （試験実施せず）

*：少量のエステル油（グループV）を配合

低温起動性能試験の試番と試験条件は表2に示すとおり、寒冷地対応ギヤ油4試番、現行ギヤ油2試番とした。

試験に供したギヤ油の動粘度および粘度指数の実測値を表3に示す。寒冷地対応ギヤ油では起動加速度を現行の起動加速度以上の2.0~2.9km/h/sの条件で試験を実施した。現行ギヤ油では起動加速度を現行の加速度に最も近い2.0km/h/sのみとし、寒冷地対応ギヤ油の試験から継続して使用した軸受で1試番(試番5)の試験を実施したのち小歯車軸受を未使用品に交換し、同条件での試験を逆転のみ実施した(試番6)。なお、試番1の実施前には寒冷地対応ギヤ油によるフラッシング、試番5および試番6の実施前には現行ギヤ油によるフラッシングを実施している。油量は、潤滑状態が厳しい条件での試験を行うため、油面計長線(規定の油面位置 油量4.2L)から-2目盛相当(3.4L)とした。また、歯車装置の姿勢は大小歯車軸水平(定員乗車相当)とした。エンドブレイ値は、試番1~5では常温試験実施前に20℃

表2 低温起動性能試験の試番と試験条件

試番	油種	起動加速度 (km/h/s)	油量	最高回転数
1	寒冷地 対応 ギヤ油	2.0	長線 -2目盛 (3.4L)	5606 min ⁻¹ (最高走行 速度相当)
2		2.3		
3		2.6		
4		2.9		
5	現行 ギヤ油	2.0		
6*		2.0 (逆転のみ)		

*：試験実施前に小歯車軸受を未使用品に交換

表3 試験に使用したギヤ油の動粘度および粘度指数の実測値

油種	動粘度 (mm ² /s)		粘度指数
	40℃	100℃	
寒冷地対応 ギヤ油	52.76	9.271	159
現行ギヤ油	75.90	9.716	107

換算で小歯車側 0.12mm (使用した歯車装置における整備基準値：0.12~0.18mm)、大歯車側 0.12mm (使用した歯車装置における整備基準値：0.12~0.15mm)にそれぞれ調整した状態で実施し、試番6においては軸受交換後に小歯車軸側のみ20℃換算で0.12mmに再調整した。

回転パターンは、試験歯車装置を使用している車両の性能をもとに決定した運転曲線を3段階で加速するパターン(図3)に近似し、設定する加速度ごとに小歯車軸回転数と運転時間の関係をそれぞれ表4のように定めた。最高速度相当の回転数(5606min⁻¹, R₃)に到達後は、1800秒回転させたのち試験終了とした(t₃~t₄)。

3.2 試験結果

3.2.1 寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の低温起動性能の比較

低温起動性能試験において起動加速度を2.0km/h/sとした試番の試験結果について表5に示す。また、試験中の軸受外輪温度(最大温度上昇値が最も大きかった小歯車軸受の車輪側(以下PW軸受))の推移を図4、油温の推移を図5に示す。開始温度-20℃、起動加速度2.0km/h/sの条件では、表5に示すように、寒冷地対応ギヤ油、現行ギヤ油とも良判定であり、また現行ギヤ油で小歯車軸受交換後の試番6においても良判定である。

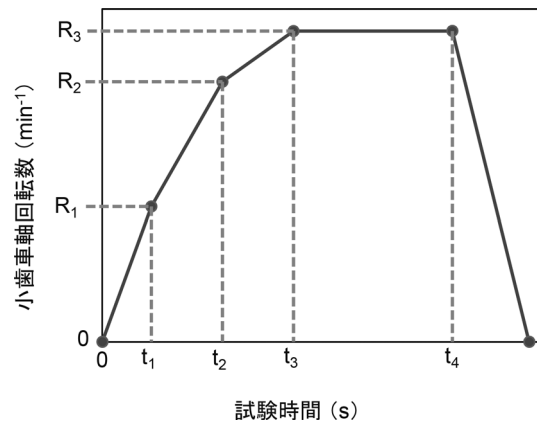


図3 低温起動試験の回転パターン

表4 低温起動性能試験における各試番の運転パターン

試番	加速度 (km/h/s) *			加速度切替時の 小歯車軸回転数 (min ⁻¹)			運転時間 (s)			
	0→R ₁ (起動)	R ₁ →R ₂	R ₂ →R ₃	R ₁	R ₂	R ₃	0→t ₁	t ₁ →t ₂	t ₂ →t ₃	t ₃ →t ₄
1・5・6	2.0	1.13	0.60	2446	4689	5606	60	97	75	1800
2	2.3	1.28	0.65	2161	4383		46	85	93	
3	2.6	1.42	0.68	1916	4118		36	76	107	
4	2.9	1.56	0.71	1712	3935		29	70	116	

*：車輪径φ790mm, 歯数比85:28として計算

しかし、温度上昇の最も大きいPW軸受外輪の温度推移を比較すると、図4に示すように、正転、逆転とも、寒冷地対応ギヤ油使用時の起動直後からの温度上昇が現行ギヤ油使用時と比較して小さい傾向が認められる。特に逆転においては、表5に示すように最大温度上昇値に差があるほか、PW軸受外輪温度において300秒付近で8~12℃の差が生じている。これより、-20℃の環境下

で加速度を2.0km/h/sまで向上した条件においては、寒冷地対応ギヤ油を使用することにより現行ギヤ油使用時と比較して起動直後の温度上昇を抑制でき、より安定して歯車装置を起動可能であると推定される。

また、図5に示す油温の比較においては、正転、逆転とも最高回転数での回転時に寒冷地対応ギヤ油の温度が低い傾向が認められる。

表5 低温起動性能試験（環境温度-20℃） 試験結果（起動加速度2.0km/h/s）

試番	油種	起動加速度 (km/h/s)	回転方向	判定	最大温度上昇値* (°C/10s)
1	寒冷地対応ギヤ油	2.0	正転	良	2.0
			逆転	良	1.9
5	現行ギヤ油	2.0	正転	良	1.9
			逆転	良	2.2
6	現行ギヤ油	2.0	逆転	良	2.3

*：いずれの試番も最大の温度上昇はPW軸受外輪で発生

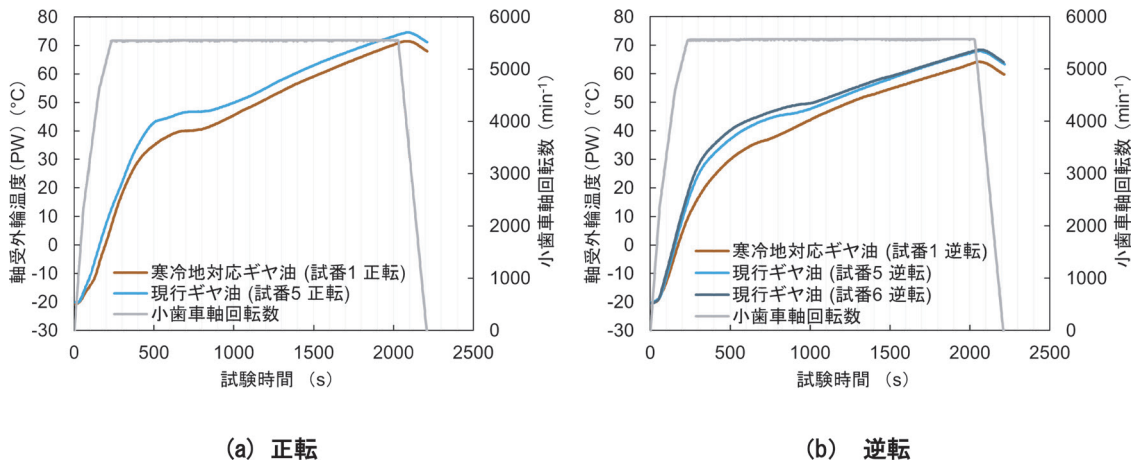


図4 低温起動性能試験（環境温度-20℃）における寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の軸受外輪温度（PW）の推移の比較（起動加速度2.0km/h/s）

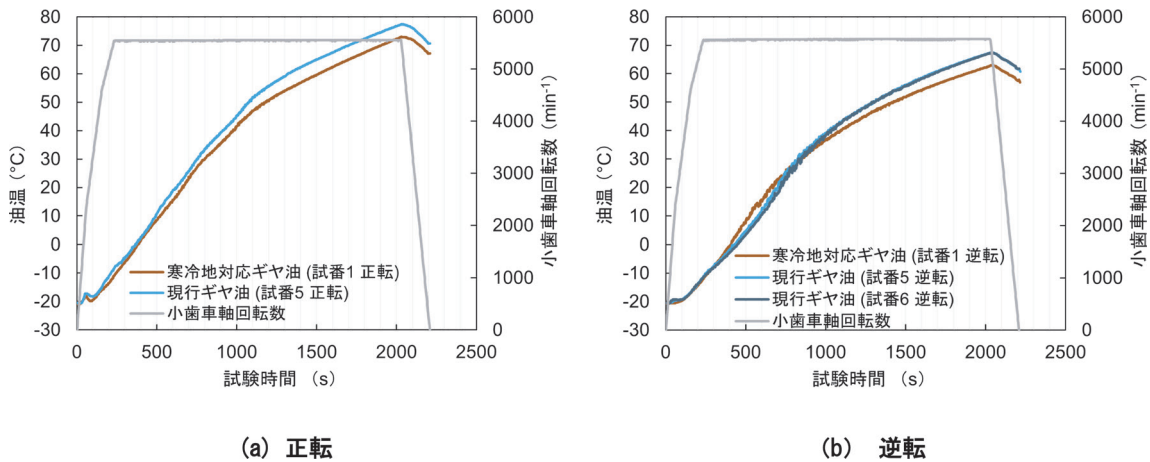


図5 低温起動性能試験（環境温度-20℃）における寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の油温の推移の比較（起動加速度2.0km/h/s）

3.2.2 寒冷地対応ギヤ油における加速度向上と温度推移の関係

寒冷地対応ギヤ油を使用し、加速度 2.0~2.9km/h/s とした試番の試験結果を表 6、試験中の軸受外輪温度の推移を図 6 に示す。表 6 に示すように試験結果はすべて良判定である。また、図 6 に示すとおり、正転、逆転とも 2.9km/h/s に加速度を向上しても PW 軸受外輪温度の推移に顕著な差は認められず、さらに起動時の PW 軸受外輪の温度上昇は現行ギヤ油で加速度 2.0km/h/s としたとき（図 4）と比較して低減されている。これより、寒冷地対応ギヤ油は、-20℃ 下で加速度を 2.9km/h/s まで向上しても安定して歯車装置を起動できる低温流動性を有すると推定される。

以上 3.2.1~3.2.2 項に示した結果から、-20℃ の環境下で起動加速度を向上した条件において、寒冷地対応ギヤ油を使用することにより、現行ギヤ油を使用する場合と比較してより安定して、またより高い加速度まで歯車装置を起動可能であることが認められる。

4. 常温回転試験

開始時の油温を 30℃ として最高走行速度相当の回転数での回転試験を実施し、寒冷地対応ギヤ油使用時と現行ギヤ油使用時の常温から高温における温度上昇を比較した。なお、3 章で述べたように、常温回転試験は低温起動性能試験に先立って実施している。

4.1 試験方法

試験ギヤ油を入れた歯車装置について、試験室中で油温を 30±1℃ に調整したのち、歯車装置を使用する車両の最高速度走行相当の回転数（5606min⁻¹）で回転試験を実施した。試験は正転、逆転各 1 試番を寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油それぞれで実施した。最高回転数までの加速度は、いずれの試番も車両の加速度に換算して約 1.5km/h/s 相当（概ね 30.6min⁻¹/s）とした。

試験中は低温起動性能試験と同様に軸受外輪温度、油温、および試験室内温度を測定し、軸受外輪温度または油温のうちいずれか 1 点が 100℃ に達した時点で試験終了とした。測定した温度は 2 秒ごとに記録した。油量は

表 6 低温起動性能試験（環境温度 - 20℃）試験結果（寒冷地対応ギヤ油 起動加速度 2.0~2.9km/h/s）

試番	油種	起動加速度 (km/h/s)	回転方向	判定	最大温度上昇値* (°C/10s)
1	寒冷地対応ギヤ油	2.0	正転	良	2.0
			逆転	良	1.9
2		2.3	正転	良	2.0
			逆転	良	2.0
3		2.6	正転	良	2.0
			逆転	良	2.1
4	2.9	正転	良	2.0	
		逆転	良	2.0	

*：いずれの試番も最大の温度上昇は PW 軸受外輪で発生

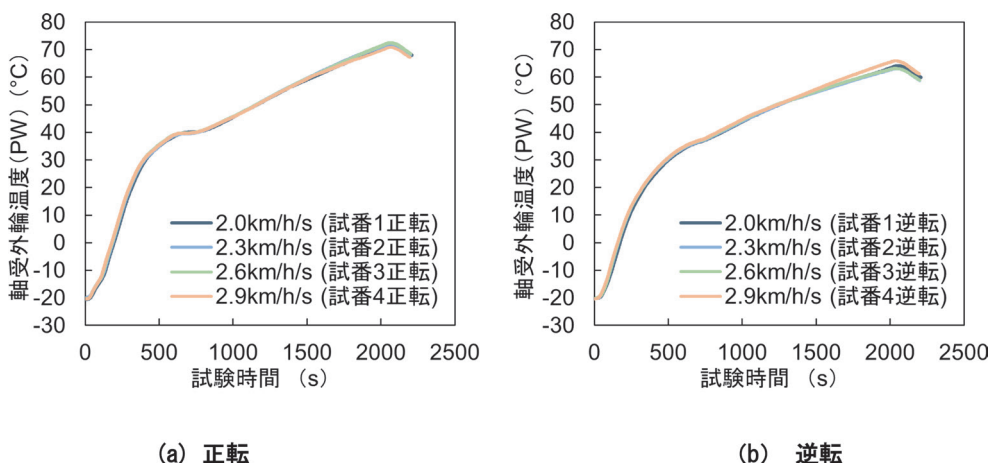


図 6 低温起動性能試験（環境温度 - 20℃）における起動加速度に対する軸受外輪温度（PW）の推移の比較（寒冷地対応ギヤ油）

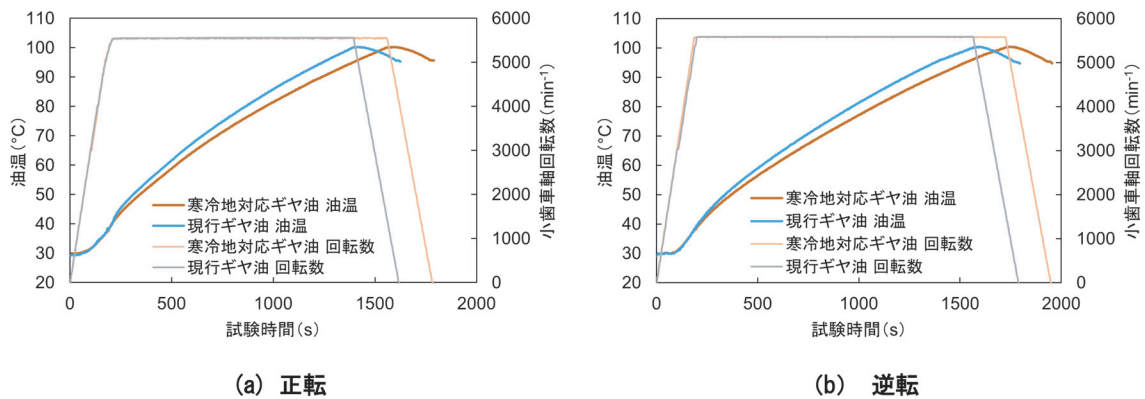


図7 常温回転試験における油温の推移の比較

表7 常温回転試験における油温 100°C到達までの試験時間

試番	油種	油温100°C到達までの試験時間 (s)	
		正転	逆転
1	現行ギヤ油	1188	1368
2	寒冷地対応ギヤ油	1354	1540

油面計長線 (4.2L), 歯車装置姿勢は大小歯車軸水平 (定員乗車相当) とした。エンドプレイ値は最もすきまが小さく厳しい条件として, 20°C換算で小歯車側 0.12mm (基準値 0.12~0.15mm), 大歯車側 0.12mm (基準値 0.12~0.18mm) にそれぞれ調整した。

4.2 試験結果

各試番での試験終了までの時間を表7に, 正転時, 逆転時それぞれの試験中の油温の推移を図7に示す。現行ギヤ油, 寒冷地対応ギヤ油どちらも油温が最も早く100°Cに到達し, また異常を示すような急激な温度上昇は軸受外輪温度, 油温とも認められなかった。

表7に示すように, 寒冷地対応ギヤ油使用時に油温が100°Cに到達するまでの時間を現行ギヤ油使用時と比較すると, 正転, 逆転とも寒冷地対応ギヤ油が180秒程度長い。また, 図7に示す油温の比較より, 寒冷地対応ギヤ油使用時の油温の上昇が現行ギヤ油使用時と比較して小さいことがわかる。

以上から, 寒冷地対応ギヤ油を使用した場合, 現行ギヤ油を使用した場合と比較して, 歯車装置の温度上昇を抑制できる可能性が考えられる。ただし, 実車走行時の歯車装置の油温や軸受温度については, 歯車装置の回転に起因する上昇のほかに, 運転パターンや走行風など,

走行条件も寄与することに留意する必要がある。

5. まとめ

低温流動性を向上した新幹線車両用ギヤ油 (寒冷地対応ギヤ油) を用いることによる起動加速度向上の検討として, 起動加速度を増加させた条件での歯車装置の台上回転試験による低温起動性能の評価, 常温での台上回転試験による温度上昇の評価を実施した。-20°C環境下における低温起動性能試験では, 現行より高い起動加速度である 2.0km/h/s の条件で寒冷地対応ギヤ油使用時における起動時の温度上昇が現行ギヤ油使用時と比較して抑制されること, 寒冷地対応ギヤ油使用時は起動加速度 2.0~2.9km/h/s の範囲で温度上昇が同程度であることから, 寒冷地対応ギヤ油を使用することによって現行ギヤ油を使用する場合と比較してより安定して, またより高い起動加速度まで歯車装置を起動可能であると認められた。また, 常温での台上回転試験において油温が 100°Cに達するまでの時間を比較し, 正転, 逆転とも現行ギヤ油と比較して寒冷地対応ギヤ油がより長い傾向にあることを確認した。

以上から, 新幹線車両の起動加速度向上のための方策として, 寒冷地対応ギヤ油を用いることは有用であると認められる。

文献

- 1) 木川定之, 鈴木淳一, 沓掛久志: 低温流動性を向上した新幹線車両用ギヤ油の開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.10, pp.23-28, 2018
- 2) 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, Vol.57, pp.33-36, 2017