

低粘度減速機油の設計コンセプトとその検証

Design concept and technical verification of low viscosity reducer oil

ジャトコ（正）*石神 和訓 ジャトコ（非）加藤 豪 ジャトコ（正）前田 誠

ENEOS（非）佐々木 涼 ENEOS（非）小松原 仁

Kazunori Ishigami*, Gou Kato*, Makoto Maeda*, Ryo Sasaki**, Hitoshi Komatsubara**

*JATCO Ltd, **ENEOS Corporation

1. はじめに

地球温暖化防止の観点から CO₂ 排出規制が強化されている。自動車メーカ、サプライヤーは、従来の内燃機関を搭載した車両に加え、ハイブリッド電気自動車（HEV）、電気自動車（BEV）などの普及に向けた開発を加速させている。BEV の普及に向けた課題の一つに航続距離の短さが挙げられ、航続距離を延ばすためにバッテリーの搭載量（容量）を増やす必要がある。しかし、バッテリー容量を増やすと大幅なコストアップとなるため、エネルギー効率の向上（以下、省電費化）によりバッテリー容量を抑えることが求められる。

また、BEVは小型・高出力密度化の要求も高く、小径・高回転モータによるトルク低下をギヤの高減速比で補う技術がトレンドになりつつある¹⁾。このモータの出力密度向上に伴い、モータの発熱が課題となり、冷却性が求められている。その対応策としてモータ油冷が有効である。

ここでは、減速機内のトルク損失の低減（フリクション低減）により省電費化を図り、モータ油冷に有効な低粘度減速機油の開発を行ったので、その設計コンセプトと検証結果について報告する。

2. 開発の狙いと目標

省電費化の為にベンチマークトップの低粘度を狙いつつ、且つしゅう動時の摩擦特性、金属部品の疲労防止性能、焼付き防止性能が既存油（ATF）以上となることを狙った。

目標粘度は車両の電費目標の達成と市場の減速機油のベンチマークから 40℃動粘度は 11mm²/s 以下とした（Fig.1）。また、モータ油冷のために電気絶縁性の確保も狙った。目標の電気絶縁性は、現行モータ冷却油の体積抵抗率以上とした。

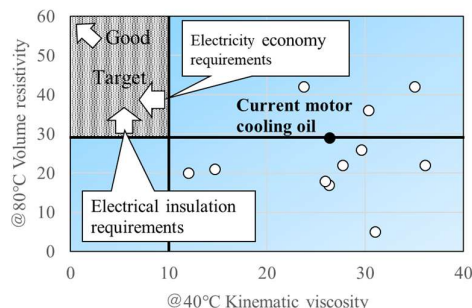


Fig.1 Target value development oil

3. 低粘度化の課題

Fig.2 のストライベック曲線より、低粘度 ATF は流体潤滑域の摩擦係数が ATF に比べて低下するが、混合潤滑域では油膜が薄くなり金属接触を生じやすくなる。このため、摩擦係数の上昇、金属の疲労防止性能、焼き付き防止性能の低下が懸念される。

従来の低粘度化技術では、油膜を確保するために粘性の高い油膜形成ポリマーを配合することで金属接触を防止（極圧性を向上）してきた²⁾。しかし、本開発では目標粘度達成のため、増粘効果がある上記ポリマーを除外し検討を行った。

4. 設計コンセプト

低粘度化による混合潤滑域の金属接触を生じにくくするために、添加剤の被膜形成により、極圧性を向上させる必要がある。そこで、油膜が薄くなることによるしゅう動面温度の上昇を利用し、混合潤滑域からしゅう動面に早期に添加剤による吸着被膜および反応被膜を形成させることを図った³⁾。具体的には、作用の異なる 2 種類のリン系添加剤を配合し混合潤滑域で早期にしゅう動面に被膜を形成させる。

5. 極圧性能の向上

5.1 リン系添加剤の配合

減速機の急激な荷重変動に対応するため、混合潤滑域から早期に被膜を形成させて、しゅう動部品の金属接触を防ぐ必要がある。そこで、低面圧、低速度条件で、吸着型リン系添加剤がしゅう動面に吸着して被膜を形成させ、高面圧、高速度条件で、化学反応型リン系添加剤がしゅう動面に被膜を形成させる方策を講じた。

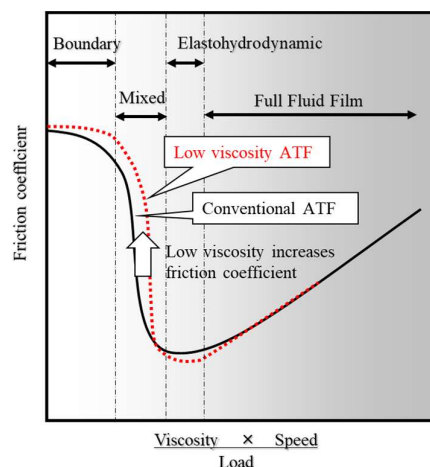


Fig.2 Stribeck Curve

5.2 添加剤 formulation の見直し

Table 1 に示す減速機 (Reducer) の要求性能⁴⁾を考慮し、低粘度化と背反する極圧性、電気絶縁性の確保を目指し既存油をベースに添加剤 formulation の見直しを図った。見直しの狙いは、減速機油に不要な添加剤を取り除き、しゅう動面の反応被膜形成を最大化させることである。具体的には、湿式クラッチの摩擦特性に影響を及ぼす分散剤、摩擦調整剤を取り除いた。

Table 1 Performance Required for e-Axle (Reducer)

Performance required for e-Axle (Reducer)	Performance required for Oil	Objectives of additive formulation optimization
Reduction of agitation resistance	Low viscosity	Elimination and reduction of dispersants with thickening effects, FM agents
Oil-cooling the motor	Electrical insulation	Elimination and reduction of conductive dispersants and FM agents
Gear durability	Wear resistance, Pitching resistance, Scuffing resistance	To maximize the effectiveness of the two phosphorus-based additives, the dispersant and FM agent that cause competitive adsorption reduced or eliminated

6. 検証結果

開発油の摩擦性能、焼付き防止性能を ATF および低粘度 ATF と比較した結果を以下に示す。

6.1 摩擦係数

MTM (Mini Traction Machine) 試験による Table 2 の混合潤滑条件での摩擦係数の測定結果を示す (Fig.3)。低粘度 ATF に比べ開発油は摩擦係数が低い。この結果から、吸着型リン系添加剤と化学反応型リン系添加剤がしゅう動表面に吸着被膜、反応被膜を形成し、金属接触を防止して低摩擦を実現するという設計コンセプトを検証できた。

6.2 焼き付き防止性能

Fig.4 に高速四球試験による焼き付き防止性能の評価結果を示す。既存油を低粘度化した場合、最大非焼き付き荷重が既存油より低くなるが、開発油は設計コンセプト通り最大非焼き付き荷重が既存油以上となった。この結果から、添加剤 formulation の見直しにより、しゅう動面に反応被膜形成させる設計コンセプトが検証できた。

Table 2 MTM test conditions

Surface pressure[GPa]	1.2(Load 60N)
Speed[mm/s]	10-3000
Oil temperature[°C]	40
Slip ratio[%]	50%

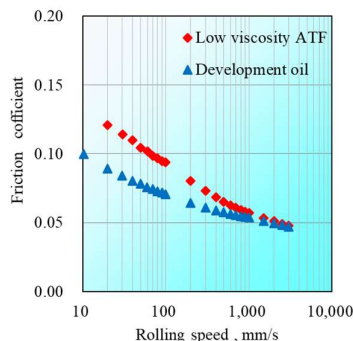


Fig.3 MTM test results

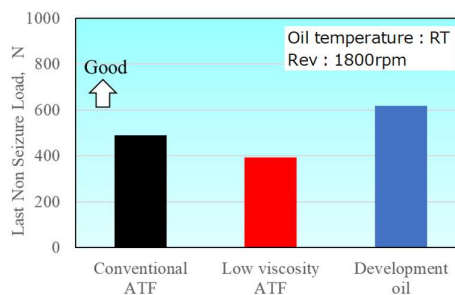


Fig.4 High-speed 4-ball test results

6.3 実機想定ギヤを用いた焼き付き防止性能

高周速歯車試験にて、実機ギヤ破面の貧潤滑環境、及び車両走行パターンを想定した試験条件にて焼き付き防止性能を既存油と比較した (Fig.5)。BEV の発進走行 (高トルク) を想定した条件においてギヤ表面の損傷が発生する回転数は既存油よりも高く、耐焼き付き性に優れていることが確認できた。

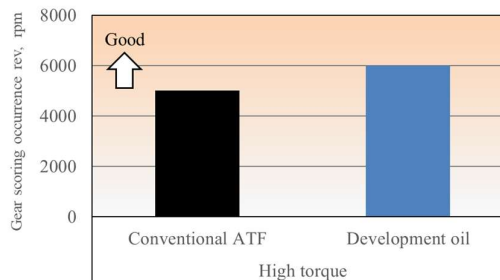


Fig.5 High-speed gear seizure test results

7. まとめ

ベンチマークトップの低粘度かつ、ギヤ部品などのしゅう動時に優れた摩擦特性、部品の疲労防止性能、焼付き防止性能を有し、かつモータ油冷も実現可能な電気絶縁性を備えた減速機油を開発した。

本開発油により既存油に比べてユニットのエネルギー効率約 10%向上し、航続距離を延ばすことが期待できる。

文献

- 塚越, 他: e-Axle 向け高回転モータにおける同期 3 パルス制御の開発, 自動車技術会論文集 Vol.53, No.3, May 2022
- 増田: 超低粘度 ATF の開発 JXTG Technical Review 第 61 巻 (2019.7)
- 有山・小松原: 低粘度デファレンシャルギヤオイルの摩擦低減機構解明 トライボロジー会議 (2017 秋)
- 石神・荒川・前田: 自動車用変速機油の変遷と最新動向 トライボロジスト (2020)