

減速機油の設計コンセプトとその検証

石神 和訓* 加藤 豪* 前田 誠** 佐々木 涼*** 小松原 仁***

抄 録

地球温暖化対策としてCO₂排出抑制が喫緊の課題となる中、自動車産業における電気自動車（EV）の開発が加速している。しかし、EVの航続距離確保に必要なバッテリー容量の増加は、製造コストの大幅な上昇を招くという課題がある。本研究では、EVの電費向上によるバッテリー容量削減などを目的として、減速機用低粘度油の開発および性能評価を行った。具体的には、減速機内のフリクション（攪拌抵抗）に着目し、電費向上に寄与する低粘度油の設計コンセプトを確立した後、実機試験により性能検証を実施した。開発した低粘度油により、従来油と比較して減速機内のフリクションが有意に低減され、電費向上効果が確認された。本研究で開発した低粘度油は、EVの電費向上に有効であり、バッテリーコスト削減への貢献が期待できる。

1. まえがき

近年、地球温暖化対策としてCO₂排出規制が世界的に強化される中、自動車産業では電動化が加速している。自動車メーカーおよびサプライヤは、従来の内燃機関車両に加え、ハイブリッド電気自動車（HEV）や電気自動車（BEV）の開発・普及に注力している。しかしながら、EVの本格的な普及に向けて、航続距離の制約という重要な技術的課題が存在する。航続距離の延長にはバッテリー容量の増加が必要となるが、これは大幅なコスト上昇を招くため、エネルギー効率の向上（以下、省電費化）による解決策が求められている。

また、EVの小型・高出力密度化への要求に応えるため、小径・高回転モータと高減速比ギヤの組み合わせによる駆動システムが主流となりつつある¹⁾。このような高出力密度モータの採用に伴い、モータの発熱対策が新たな技術課題として浮上しており、その有効な解決策としてモータ油冷システムが注目されている。

本研究では、EVの省電費化を実現するため、減速機内のトルク損失低減（フリクション低減）に着目し、同時にモータ油冷にも適した低粘度減速機油の開発を行った。本論文では、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

省電費化のためにベンチマークトップの低粘度を狙いつつ、かつしゅう動時の摩擦特性、金属部品の疲労防止性能、焼き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。

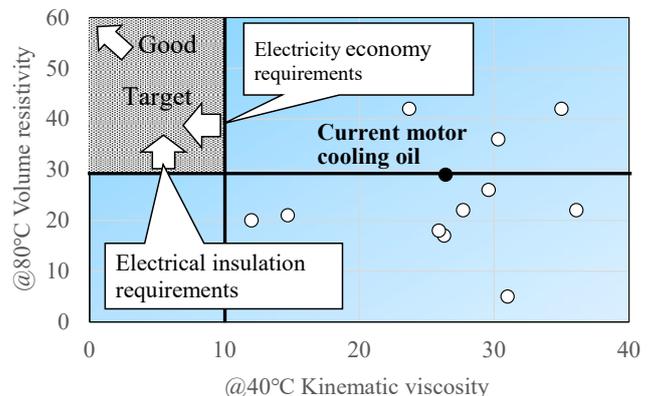


Fig. 1 Target value development oil

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既存油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。

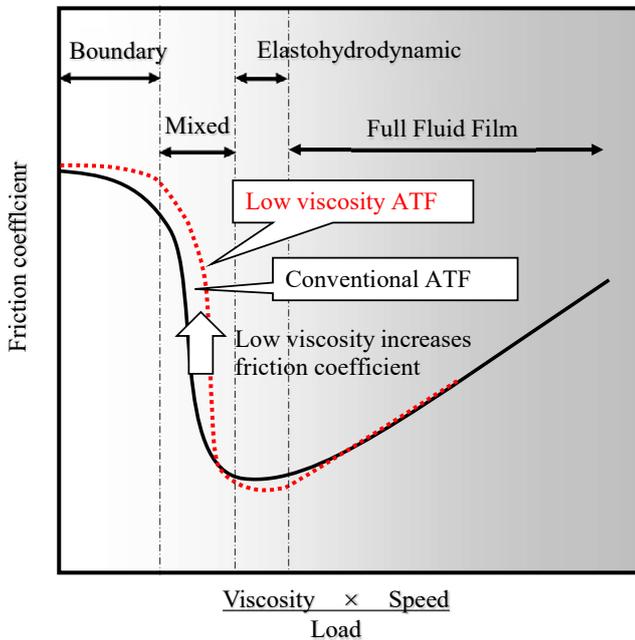


Fig. 2 Stribeck Curve

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。

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、焼き付き防止性能を既存油および低粘度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の混合潤滑条件下における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。

Table 2 MTM test conditions

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

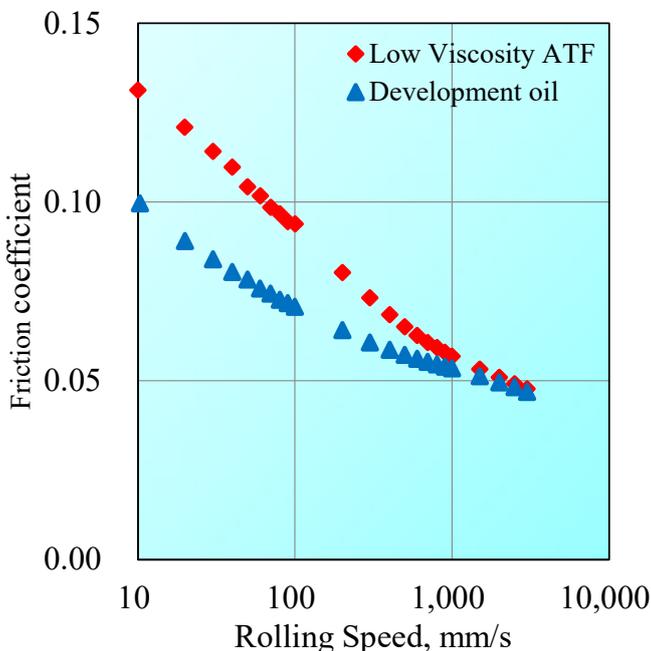


Fig. 3 MTM test

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。

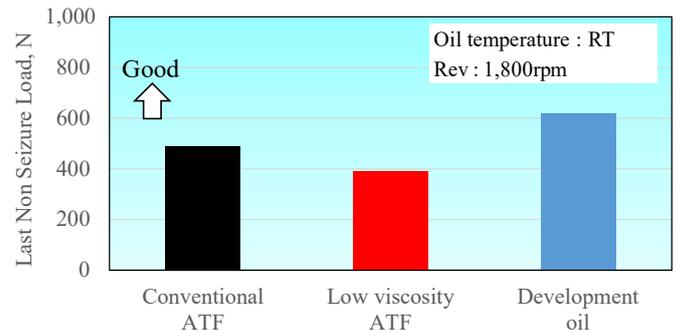


Fig. 4 High-speed 4-ball test

6.3 実機想定ギヤを用いた焼き付き防止性

高周速歯車試験にて、実機ギヤ破面の貧潤滑環境、およ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)。開発油は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。

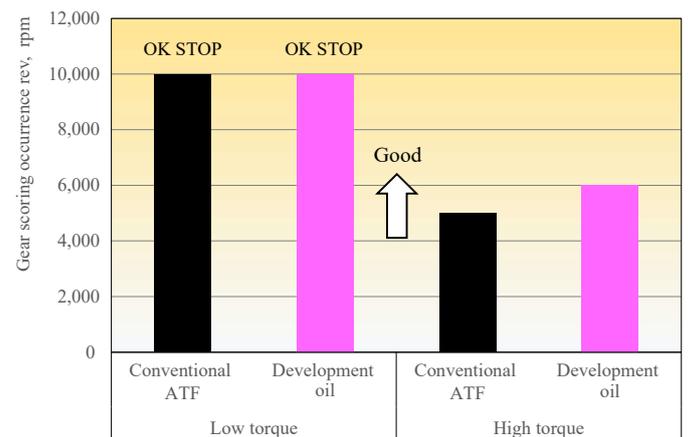


Fig. 5 High-speed gear seizure test

7. まとめ

本研究では、電気自動車用減速機油の開発を行い、以下の成果を得た。

開発した減速機油は、業界最高水準の低粘度特性を実現しながら、ギヤ部品のしゅう動時における優れた摩擦特性、疲労防止性能、および焼き付き防止性能を両立させた。さらに、モータ油冷に必要な電気絶縁性も確保することに成功した。

性能評価試験の結果、本開発油の使用により、従来油と比較してユニットのエネルギー効率が約10%向上することを確認した。この効率向上は、電気自動車の航続距離延長に直接的に寄与することが期待される。

本研究で得られた知見は、電気自動車の普及促進に向けた技術的課題の解決に貢献するものであり、今後の潤滑油の設計技術向上にも大きく貢献するものである。

8. 参考文献

- 1) 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
- 2) 増田：超低粘度ATFの開発 JXTG Technical Review 第61巻 (2019.7)
- 3) 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説明 トライボロジー会議 (2017秋)
- 4) 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)
- 5) 石神・加藤・前田：低粘度減速機油の設計コンセプトとその検証, トライボロジー会議2024秋 名護 予稿集, 2024, A32

■ 著者 ■



石神 和訓



加藤 豪



前田 誠