

電動車用超低粘度トランスアクスルフルードの開発

Development of Ultra-low Viscosity Transaxle Fluid for Electrified Vehicles

トヨタ自動車（非）*岩見 雅弘 （正）白石 有 （非）須藤 淳一
 ENEOS（正）多田 亜喜良 （非）薄田 洋平 豊田中央研究所（正）森谷 浩司
 Masahiro Iwami*, Yu Shiraishi*, Junichi Sudo*, Akira Tada**, Yohei Susukida**, Hiroshi Moritani***
 *Toyota Motor Corporation, **ENEOS, ***Toyota Central R&D Labs., Inc.

1. はじめに

カーボンニュートラルの達成を念頭に、HEV, PHEV, BEV, FCEVといった電動車の更なる燃費・電費性能の向上が求められている。そのためにはパワートレーンの損失低減が重要な技術課題の一つであり、その有効な手段として、電動車に共通に存在するユニットであるトランスアクスルの潤滑油を低粘度化することが、大幅な損失低減に寄与する^{1),2)}。しかしながら、通常は粘度を低下させると金属摺動面の油膜が確保できず、摩耗や焼き付きなどの不具合が生じる。また、ギヤやベアリングにおいては油膜厚さの低下により金属基材が直接接触する頻度が高まり、表面疲労による剥離が生じやすい。そこで本開発では、電動車用トランスアクスルフルードの低粘度化に向け、電動車に特化したオイル中の添加剤設計を新たに実施した。中でもギヤの表面起点剥離を防ぐために摩耗防止剤、極圧剤、金属清浄剤などを見直すことで、金属表面への添加剤の吸着を制御し、トライボ被膜の強化に取り組んだ。

2. 低粘度化による課題

電動車用トランスアクスルフルードの低粘度化により影響を受ける技術課題として、摺動面の耐疲労性・耐焼き付き性の低下、モータへの適用で求められる潤滑油の電気絶縁性の低下、シール性の低下などがあげられる。特に摺動部位での潤滑課題を明らかにするため、従来の ATF を単純低粘度化させたサンプルでユニット耐久評価を実施した。

結果として Fig.1 に示すように各種軸受の摺動面に表面起点の疲労剥離が生じ、ギヤ歯面でも同様に疲労剥離、異常摩耗が発生した。また、オイル供給が乏しく、貧潤滑になる摺動部においては焼き付きが生じた。以上より、低粘度化を実現するためには、油膜厚さ低下による摺動部の損傷を補うための添加剤改良が必要であることが明らかとなった。

3. 添加剤改良によるトライボ被膜の強化

3.1 添加剤の処方改良

特に課題の大きかった表面起点の耐疲労性を向上させるべく、リン系トライボ被膜の強化を狙って、S-P 系添加剤の增量、リン系摩耗防止剤の新たな添加、カルシウム系金属清浄剤の変更を実施した^{3), 4)}。中でも金属清浄剤については、硫黄やリンのトライボ被膜にカルシウムを取り込むことで、被膜の密度向上と膜厚向上、韌性向上を期待して、従来のカルシウム系添加剤 A から分子構造の異なるカルシウム系添加剤 B に変更した。さらに、耐焼き付き性の向上を狙い、吸着基を持つ油膜形成ポリマーを新たに追加した。これにより、低粘度化で悪化した油保持性が向上し、貧潤滑摺動部における局所的な油膜切れの改善が図られる。

通常添加剤の增量や変更に対し、背反として絶縁性の低下が懸念されるが、電動車トランスアクスルの場合、変速機構の多くはモータが担っており、従来トランスアクスルに必要な湿式クラッチが存在しないので、摩擦制御のための添加剤を削減することが可能である。従って、従来 ATF 同等の絶縁性を確保しながら、各種添加剤の增量や変更が可能になった。

3.2 クロスピング試験機でのトライボ被膜分析

3.1 項に示す処方改良を施した Trial oil に対し、Fig.2 に示すクロスピング試験機により摺動評価を行い、被膜厚さや被膜構成元素、被膜の弾性率を計測した。まず、Fig.3 より Trial oil のピン摺動部の摩耗痕径が 0.64mm で従来 ATF の 0.90mm よりも抑制されていることが確認できた。次に摺動表面の TEM(透過型電子顕微鏡)による断面観察結果と XPS(X 線光電子分光法)による被膜元素の元素濃

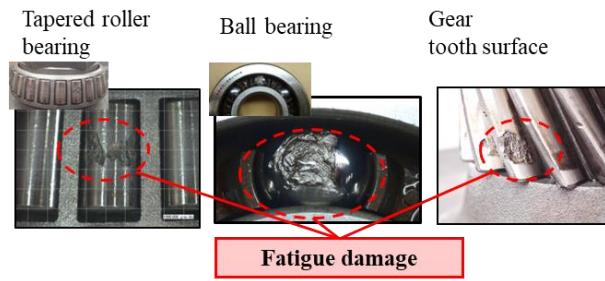


Fig.1 Result of Transaxle unit test in low vis. ATF

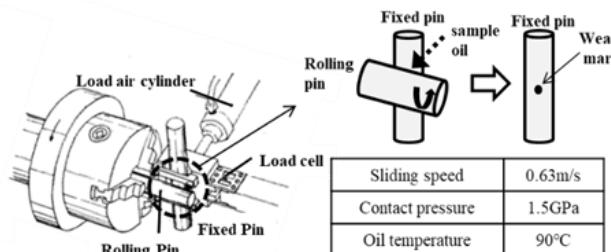


Fig.2 Schematic of cross-pin test machine

度(atomic%)の測定結果を Fig.4 に示す。添加剤改良の狙い通り、Trial oil では厚い被膜が形成され、同被膜中のリン、カルシウム量が増加することが確認された。さらに、Fig.5 に示すように、ナノインデンテーション測定にて被膜を含む表面近傍の弾性率が低減していることが確認されたことから、被膜によって表面のせん断応力が緩和されている可能性が示唆される。

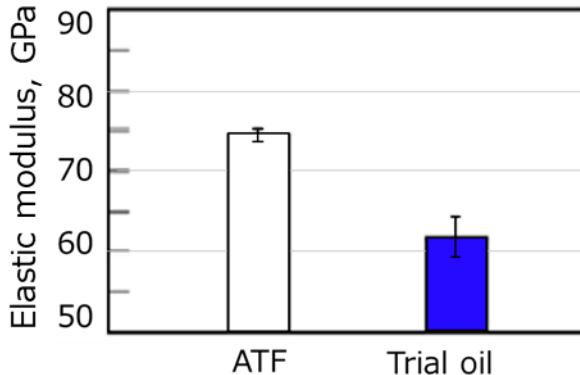


Fig.5 Results of surface elastic modulus measurement by Nano-indentation

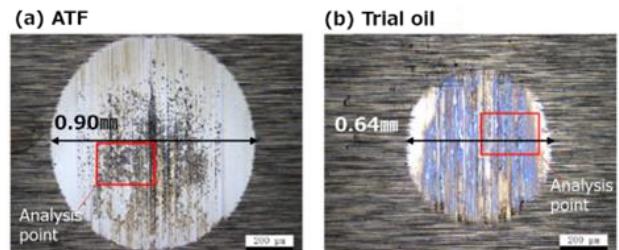


Fig.3 Optical images of wear marks on cross-pin test pieces

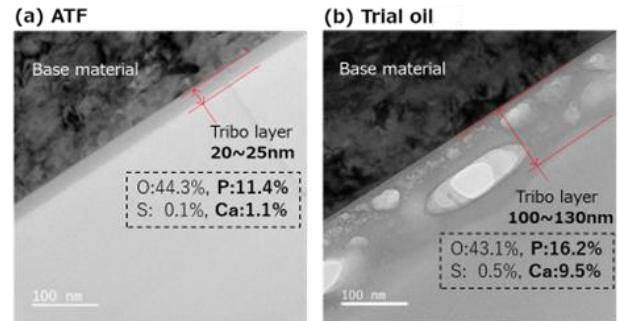


Fig.4 TEM images and XPS analysis of tribo film on cross-pin test pieces

3.3 ギヤユニットを用いた耐疲労性向上の効果確認

耐疲労性向上の検証として、ギヤユニットを用いて油温100°Cにて高負荷で運転する歯面の疲労剥離評価を行った。Figure 6 に示す通り ATF と比較して Trial oil は 4 倍の耐久時間でも疲労剥離が生じず、疲労寿命の向上を確認した。さらに、EPMA(電子線マイクロアナライザ)を用いて評価後のギヤ歯面に形成されている被膜の元素成分を確認すると、ATF に対し、Trial oil の歯面ではリンとカルシウムが多く検出された。このことから、3.2 項と同様に、狙い通りリン系被膜が増強され、その被膜にカルシウムを取り込んだことによる疲労寿命の向上が、実際のギヤでも起きていたと推定される。

4. おわりに

今回、電動車の更なる燃費・電費向上のため従来 ATF の低粘度化に挑戦した。課題となる摺動部の耐疲労、耐焼き付きなどの損傷に対して、オイル中の添加剤設計を新たに実施することで、従来 ATF 同等以上のユニット耐久性を示す、電動車用超低粘度トランスアクスルフルードを開発した。この新しい潤滑油は、従来 ATF 比でモード燃費を 1%以上向上させることができ、カーボンニュートラルに大きく貢献できる技術である。

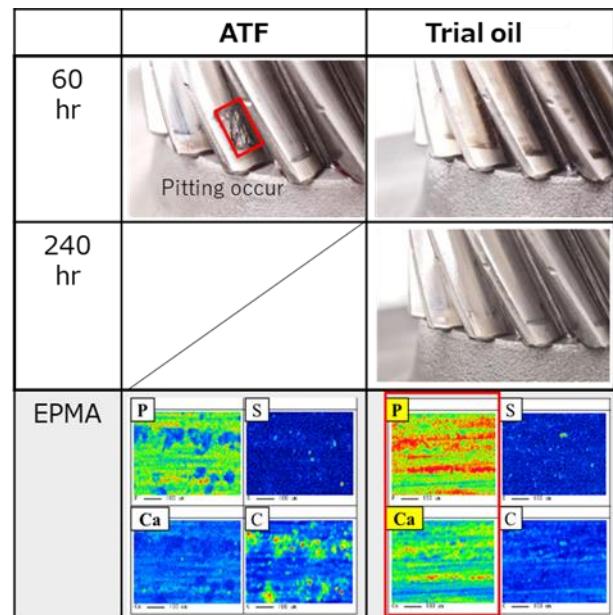


Fig.6 Result of gear durability test and EPMA in the gear tooth surface after durability test

文献

- Iino, M., Tada, A., Masuda, K., Onumata, Y., et al., "Drivetrain Lubricants with High Cooling and Efficiency-Boosting Properties for Electric Vehicles," SAE Technical Paper 2021-01-1215, 2013: doi: 10.4271/2021-01-1215
- Yungwan, K., Christopher, C., Atanu, A., Xinggao, F., "Understanding Base Oils and Lubricants for Electric Drivetrain Applications," SAE Technical Paper, 2019-01-2337, JSAE20199085
- 白濱真一・宮島誠・岡村敦夫：転がり疲れに及ぼすリン系添加剤の影響，トライボロジスト，46,7, pp.564-570,(2001)
- 白濱真一・中村純一：転がり疲れに及ぼす硫黄系添加剤の影響，トライボロジスト，46,7,pp.571-577,(2001)