

e-Axle 用フルードの課題と将来展望

Tribological issues and future prospects of e-Axle fluid

GS カルテックス（正）*浜口 仁

Hitoshi Hamaguchi*

*GS Caltex Corporation

1. はじめに

電気自動車の駆動系としてモータ、減速機およびインバータを一体化した e-Axle が採用されるケースが増加しており、潤滑油には、歯車の潤滑のみでなく、モータの冷却、絶縁など新たな性能が要求される。しかしながら、その機構は、車両の性能や乗り心地を大きく左右するため、日々改良が加えられており、e-Axle 用フルードの最適化までは手が回っていないのが実情のように思われる。本稿では、e-Axle 用フルードの技術的課題と将来展望につき述べる。

2. e-Axle の構成要素とフルードの役割

内燃機関を動力源とする従来の自動車では、内燃機関の出力特性、特に低回転数でトルクが低いという性質を補完するため、変速機を介在させて、発進時や加速時にエンジンが高出力を発揮できる高回転領域を選択できるようにする必要があった。また、内燃機関は、化石燃料の燃焼というプロセスが系内で発生するため、潤滑油には摩擦・摩耗を低減する機能に加えて燃焼生成物としての酸や水分に対する対策や、吸入空気から混入する異物に対する対策、さらには燃焼ガス（排気ガス）中に含まれる環境汚染成分を低減するための排気後処理装置を劣化させるような成分を含まないことなどが付加的に要求される。そのため、通常、変速機はエンジンからは分離された系で潤滑され、潤滑油には変速機構としての歯車類、動力の切替を行なう湿式クラッチ類、またこれらの作動を制御する油圧系などの潤滑が主な役割となっている。

これに対して、電気自動車の動力源としてのモータは、速度ゼロから最大トルクを発生し、中速から高速では出力一定の特性を持つので、動力伝達系にはクラッチやトルクコンバータおよび変速機は不要で、2 段程度の減速機構があれば、発進時のスムーズな加速と、高速時の電費向上（航続距離の延長）が確保できるといわれている¹⁾。また、エンジンのような燃焼プロセスが無いため、モータと減速機を隔離する必要がなく、モータの回転を制御するインバータを含めて、e-Axle と呼ばれるコンパクトな動力・駆動系を構成することができる。

しかしながら、前述したように、動力・駆動系は、自動車の走行性能や乗り心地に大きな影響を与えるので、それぞれの構成要素につき最適な機構が模索されているのが実情である。e-Axle の構成要素ごとのバリエーションを Table 1 に示すが、電動モータを例にとっても、幾つかのタイプが存在する。ただし、フルードの側から見ると、モータのタイプはあまり重要ではなく、その冷却をフルードが直接担当する油冷式か否かでフルードの役割が変わる。また、モータの小型化・高出力化のためには、高速回転化が進む傾向にあり（30 000min⁻¹ 以上）、可動部の高速化をもたらす。

インバータについては、現時点では直接フルードに接触しない構造が主流だが、将来的には、DC-DC コンバータや車載充電器さらには ECU までも一体化して e-Axle を構成する動向もあり、これら電子回路の発熱を冷却する機能をフルードが分担する可能性もある。

減速機構については、二対のはず歯歯車を用いた 3 軸 2 段の減速機に、すぐ歯傘歯車による差動機構を組み合わせたものが一般的で、構造が簡単のため伝達効率、信頼性、コストに優れるが、やや搭載性に劣る。搭載性を改善させた例として、遊星歯車とはず歯歯車を組み合わせた 2 軸 2 段の変速機や、二組の遊星歯車を用いた同軸 2 段の変速機などがあり、伝達効率、信頼性、コストの課題も大きい。車両前後・上下方向の搭載性に優れるため、適用が増加している²⁾。さらに、スポーツ車や大型車向けとして、動力性能を向上させるために、多段変速が可能な変速機を残す機構も検討されており、その場合、ベルト CVT 機構や湿式クラッチ機構が採用されると、それらの制御のための油圧システムも必要となり、フルードにはこれまでの変速機油と同様な機能が求められる。また、モータの高回転化に伴うギヤの噛み合いノイズを低減する技術として、トラクションドライブを応用した遊星ローラ式の減速機も提案されており、今後も様々な新機構が開発されていくものと思われる³⁾。

Table 1 Variations in Components of e-Axle

Unit	Component Type	Role of the e-Axle Fluid
Electric Motor	Induction Motor	(in case of water cooling)
	Permanent Magnet Synchronous Motor	• None
	Electrically Excited Synchronous Motor	(in case of oil cooling)
		• Cooling
Power Control Unit	Inverter	• Electric Insulation
	DC-DC Converter	
	On-board Charger	
Transaxle	Reduction Gear	• Anti-Seizure
	Differential Gear	• Anti-Wear
	Transmission	• Reduce Friction
	Wet Clutches	• Friction Characteristics
	Oil Pump	• Hydraulic Power
	Bearings	• Film Formation

3. e-Axle 用フルードへの要求性能

上述したように、e-Axle の機構は発展途上にあり、フルードに対する性能要求も変化が予想されるが、現時点で一般的に採用されている機構と、近い将来に導入が見込まれる機構を中心に、従来の変速機油（主に ATF）との比較で e-Axle 用フルードに要求される性能、特性などをまとめて Table 2 に示す。

モータは自身の発熱による昇温で効率低下するため、その冷却が自動車の電費を大きく左右する。モータの冷却方式としては e-Axle フルードで直接冷却する油冷式が主流となりつつあり、フルードには高い冷却性が要求される。同時に、モータの高速回転化に対応して攪拌抵抗を抑制するための低粘度化、モータ起動時の大トルクに対応する局所的な油膜厚さの確保などが要求される。さらに、電気自動車はエンジンがなく暗騒音が低いため、減速機のギヤノイズ低減が課題となる。フルードには、騒音を極力抑える適切な潤滑性が求められる。

また、フルードには適切な電気絶縁性が要求されるが、一方では静電気の蓄積による放電現象を防止するため、適度な体積抵抗率を保持するよう配慮する必要がある。さらには、モータの巻線に用いられる銅に対する腐食性を抑制したり、樹脂部品、被覆材などに対する適合性も要求される。

なお、オイル交換が難しい機構であるため、これらの性能が長期間にわたって保持されることも重要である。

Table 2 Performances Required for e-Axle Fluids

Performance Requirement	Background of the Requirement	Measures against the Requirement
Electricity Consumption	Reduced motor efficiency due to heat	Lower viscosity, higher density, etc.
High Speed	Higher revolution than engine	Lower viscosity, anti-fatigue wear
Film Thickness	Higher start-up torque	Proper viscometrics, high pressure viscosity
Lower Noise	No engine makes gear noise audible	Proper lubricity
Electrical Characteristics	Insulation for motor cooling	Sufficient volumetric resistance
Materials Compatibility	Contact with metals, plastics, etc.	Careful selection of additives
Longevity	Fill for Life	Highly refined base stocks

4. e-Axle 用フルードの処方技術と課題

上記の e-Axle 用フルードに要求される性能を満足するためには、従来の変速機用潤滑油とは異なる処方技術が求められる部分と、従来技術よりは要求が緩和される部分が混在すると思われる。

最も重要な要求性能の一つである冷却性を向上させるためには、フルードの低粘度化に加えて高密度化、高比熱化、高熱伝導率化などが有効で、高精製基油やエステルなどの合成潤滑油の使用が効果的との報告がある⁴⁾。また、モータの高回転化やフルードの低粘度化に伴い、歯車や軸受に発生する疲労摩耗の増加が懸念されるが、金属に対する吸着性をもつ油膜形成ポリマーの採用によりフルードの潤滑性を確保できるとの事例が複数報告されている（例えば文献 5 など）。さらに、未報告ながら、ノイズを吸収する特性を持つポリマー型添加剤なども検討される可能性がある。

次に、これも重要項目である電気特性の確保については、本来鉱油が持つ優れた電気特性を損なわない添加剤処方に配慮する必要があることと、フルードの劣化や、とりわけ摩耗による鉄粉の混入により電気特性が著しく低下するので、酸化安定性や摩耗防止性の確保が極めて重要である⁶⁾。なお、合成潤滑油の一部には、電気特性が劣るものもあるので、注意を要する。また、機構上、泡の混入が避けられないが、気泡の状態により熱伝導に影響が出る可能性が指摘されており、今後の研究が望まれる。一方、モータの巻線に多用される銅に対する腐食性を抑制するためには、極圧剤などに用いられる活性の高い硫黄系添加剤を用いない硫黄フリーの添加剤技術も報告されている⁷⁾。

なお、従来の変速機油とは異なる使用条件であるため、各種性能の評価法も見直す必要がある。

5. e-Axle 用フルードの将来展望

前述したように、e-Axle は実用化されて間もない機構であるが、電気自動車の運動性能、乗り心地などに直接関与するユニットであるために、すでに様々なバリエーションが存在するし、今後も試行錯誤を続けながら成熟していくものと予想される。とりわけ、フルードが持つ重要な機能の一つである冷却性については、フルードが機構のどの部分を冷却するか設計によって、フルードの物性の許容範囲すなわち化学構造の選択が異なってくる。それにより、粘度の設定も影響をうけるが、油膜厚さ、ひいては摩耗防止性とのトレードオフ関係にあり、ユニット設計との兼ね合いで最適解を模索する必要があるだろう。同じく、フルードの劣化が電気特性の悪化をもたらす点に留意すると、劣化を抑制する添加剤の使用が新油の電気特性にネガティブな影響を及ぼす可能性とのトレードオフ関係も、フルードの交換インターバルの考え方と合わせて十分検討を要する問題であろう。

文献

- 1) 村木：電気自動車用動力伝達装置に関わるトライボロジー，トライボロジスト，65，3 (2020) 125.
- 2) 甲斐ほか：統合型高効率 E-Drive システムの開発，自動車技術会 2019 年春季大会予稿集 (2019) 20195156
- 3) 山本：EV 高回転モータ用トラクションドライブの技術動向，S&T セミナー資料 (2022) 90.
- 4) 巽ほか：潤滑油の電動車用バッテリーおよびモータ冷却性評価に関する技術動向，トライボロジスト，68，2 (2023) 98.
- 5) 中村ほか：電動車用超低粘度トランスアクスルフルードの開発，自動車技術会 2021 年秋予稿集 (2021) 20216177
- 6) 加藤：電動 PU トライボロジー技術に対応した潤滑油要求性能，トライボロジスト，68，2 (2023) 92.
- 7) ゲーゲンほか：次世代パワートレイン向け専用 e フルード潤滑油添加剤の進化，トライボロジスト，68，2 (2023) 79.