

e-Fluid Effects Made Visible Through Full-scale e-Axle Testing

アレックス ウォン（非）， 樋口 智也（正）

Alex Wang*, Tomoya Higuchi**,

Lubrizol China*, Lubrizol Japan Limited**

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが世界中で加速するなか、電気自動車（EV）の生産台数と販売台数が急増している。また、今後も中国と EU を中心にグローバル新車販売台数の EV シェアが拡大していくと予想されており、EV 用パワートレイン（eAxle）の特性に合わせた専用フルード（e-fluid）の必要性が高まっている。

これらの e-fluid には、従来のトランスミッション油で求められるギヤ・軸受などの機械要素の潤滑性に加え、電子機器の耐久性向上や熱マネジメントシステムに適した特性、駆動モータの効率も考慮したエネルギー損失の低減などが求められる。また、粘性抵抗によるエネルギー損失を低減するため、益々低粘度化が進んでいるが、同時に様々な性能を担保する高性能な e-fluid が必要とされている¹⁾。

そこで我々は、高性能な e-fluid を設計するため、従来のトランスミッション台上試験機を全面改修し、eAxle を用いた高負荷条件下での耐久性評価、駆動モータのピーク温度やステータコイルの冷却速度、および様々なドライブサイクルにおけるエネルギー損失を測定できるようにした。本報では、eAxle のエネルギー損失に着目し、駆動モータとトランスアクスルが別体構造になっている場合、また一体構造になっている場合のそれぞれで e-fluid がエネルギー損失に与える影響を調査したので報告する。

2. 実験方法

2.1 実機効率試験

eAxle のエネルギー損失の測定は、e-fluid を駆動モータの冷却にも使用している場合、銅損・鉄損など駆動モータの効率に関わる損失も考慮する必要があるため、ハイブリッド車用トランスミッションや eAxle の駆動モータの制御が出来るトランスミッション台上試験機を用い、インバータと eAxle 間の 3 相 AC 電圧・電流の入出力と出力軸の回転数・トルクから算出した。

2.2 供試体

e-Axle には、駆動モータとトランスアクスルが別体構造で潤滑のみに e-fluid に用いるタイプ（dry motor）と、駆動モータとトランスアクスルが一体構造でステータコイルの冷却にも e-fluid を使用するタイプ（wet motor）の 2 種類の市販品を用い、試験油には Group III 基油とポリアルファオレフィン（PAO）の 2 種類の基油に e-fluid 用添加剤パッケージと粘度調整剤を配合したものを用いた。なお、試験油の組成と物性の影響を解析するため、組成の異なる 6 種の添加剤パッケージと 5 種の粘度調整剤を組み合わせ、それぞれの基油と添加剤の組み合わせで、100℃動粘度が 1.9 ～ 15.5mm²/s の範囲で異なるように配合している。動粘度以外の物性に関しては、摩擦係数、トラクション係数、熱伝導率、比熱、比重を測定した。

2.3 試験油の分析

摩擦係数とトラクション係数の測定にはボールオンディスクトラクション試験機（MTM）を用い、試験条件は、滑り率 50%，引き込み速度 3000～10mm/s，押し付け荷重は 72, 37N の 2 水準，油温は 23, 40, 60, 80, 100, 120℃ の 6 水準で行った。ストライバック曲線で境界潤滑領域を摩擦係数、弾性流体潤滑領域をトラクション係数とした。熱伝導率と比熱は ASTM D7896 に準拠した方法で、比重は ASTM D4052 に準拠した方法で測定した。

2.4 試験条件

エネルギー損失の測定条件については、EV の電費に対する影響を比較するため、WLTP（World Light Vehicle Test Procedure）に対応したドライブサイクルを模擬した走行中の総エネルギー損失を測定する方法と、運転条件ごとに試験油の組成・物性の影響を解析するため、Fig.1 に示す 37 点の入力回転数と入力トルクのマッピングで測定する方法の 2 種類の試験を実施した。

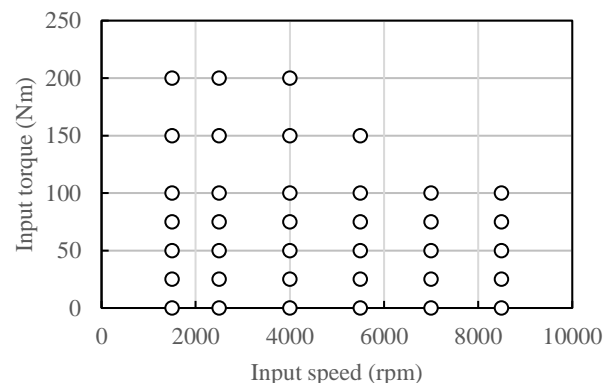


Fig.1 Speed-Load map

3. 実験結果と考察

3.1 WLTP ドライブサイクル損失

Fig.2 に添加剤が同じ試験油での eAxle (wet motor) の損失測定の結果を示す。粘度が低いほど損失が小さく、低粘度化によって伝達効率が向上する傾向がある。また、基油を比較すると Group III 基油より PAO の方がより損失が小さく抑えられている。eAxle (dry motor) の場合でもこの傾向は変わらなかった。WLTP のドライブサイクルは NEDC に比べてより幅広いトルクと回転数を使用しており、走行中に使われる潤滑領域も広くなるため粘度や基油組成が相対的に大きな影響を持つと考えられる。

ただ、100℃動粘度が 2.8mm²/s と 1.9mm²/s の場合の比較では、必ずしも低粘度の方が損失低減に有利に働く結果ではなかった。e-fluid の粘度については、油膜形成不足による摺動面の摩耗や焼付きといった摺動部損傷に対する懸念だけでなく、電費の観点でも eAxle ユニットの適した粘度を選択することが重要であることが示唆された。

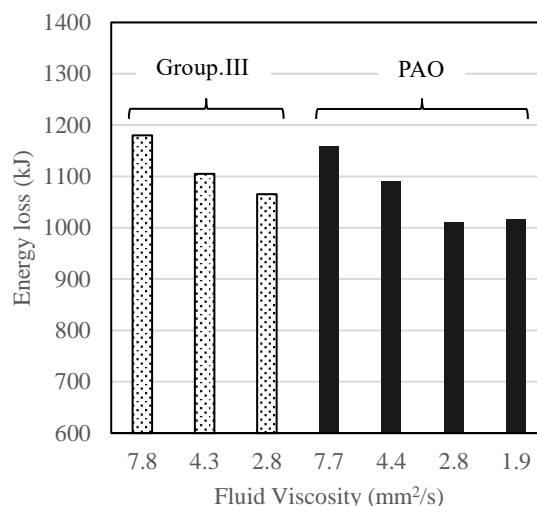


Fig.2 WLTP energy loss

3.2 Speed-Load Map による解析結果

次に Fig.1 で示した Speed-Load Map の 37 点の運転条件ごとに、損失と試験油物性との相関について解析した。

高回転数・低トルク領域においては低粘度ほど損失が小さく、逆に低回転数・高トルク領域では低粘度ほど損失が大きい傾向を示した。また、トラクション係数については低トルク領域では顕著な差は見られないが、高トルク領域では低回転数から高回転領域まで低トラクション係数ほど損失が小さい傾向を示した。その一方で、摩擦係数については全領域において明確な傾向は見られなかった。

Group III 基油に比べて PAO を用いた試験油の方が低損失なのは、低トラクション係数化による高トルク領域での損失低減が寄与していると考えられる。また、低粘度化で損失が大きくなる低回転数・高トルク領域は WLTP のドライブサイクルでも使用されている領域であり、この領域での損失増加が、低粘度化による損失低減効果が 2.8~1.9mm²/s 辺りで横ばいになった要因と考える。

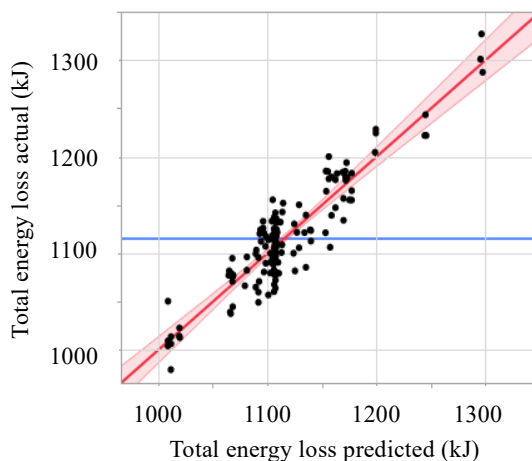


Fig.3 Prediction Model

3.3 エネルギー損失の推定モデル

モータ冷却性能への影響も考慮し、入力値として試験油の粘度、トラクション係数、摩擦係数、熱伝導率、比熱、比重を用いて、今回実験した eAxle (wet motor) の WLTP ドライブサイクルにおける損失を推定するモデルを構築した。Fig.3 は縦軸に損失の実測値、横軸に推定値をプロットしたグラフである。R² 値が 0.84、RSME が 22 であり、一定の精度で推定できている。

4. まとめ

eAxle に適した高性能な e-fluid を設計する指針を得るため、eAxle の駆動モータ制御が出来るトランスミッション台上試験機を用い、e-fluid の組成・物性が WLTP ドライブサイクルにおけるエネルギー損失に与える影響を明らかにした。低粘度化・低トラクション係数化によって伝達効率が向上するが、低粘度化で損失が増加する領域が使用されることもあるため、eAxle ユニットの適した粘度を選択することが重要である。

今回得られた知見や評価法は、eAxle ユニットの効率、耐久性、熱マネジメントに最適な e-fluid 設計を行う上で、有用な手段となることを期待する。

文献

- 1) GAHAGAN Michael, DURKIN William, UMEHARA Ryoji : 次世代パワートレイン向けの専用 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.