

電動車駆動モーター用 高速回転玉軸受の開発



鈴木 栄作
Eisaku SUZUKI

日本精工(株) 自動車技術総合開発センター 自動車軸受技術センター パワートレイン軸受技術部

1. はじめに

地球温暖化などの環境問題を背景として、カーボンニュートラルの実現に向けた社会的取組みが注目される中、環境負荷が小さいハイブリッド自動車(HEV)・電気自動車(EV)などの電動車の普及が期待されている。電動車の普及に向けた重要課題の一つが航続距離の延長であり、燃費・電費の向上と電池を搭載できるスペースの確保が求められている。そのため、HEV・EV用駆動モーターは小型・軽量化が必要とされている¹⁾。

モーターの出力は、トルクと回転数の積で決まるため、回転数を高めることができれば、トルクを小さくすることが可能であり、ローターや周辺部品を小さくできる。そのため、HEV・EV用駆動モーターの高速回転化が進んでいる。最近では、駆動モーターの最高回転数が30000rpmを超えるEVユニットの開発も報告されており²⁾、駆動モーターを支持する転がり軸受にも30000rpm以上の高速回転性能が要求されている。HEV・

EV用駆動モーターでは一般的に内径30～40程度の軸受が使用される。30000rpm以上の高速回転を達成するためには、dmNに換算するとdmN140万以上で回転可能な転がり軸受が必要とされている。dmNとは、「軸受のピッチ円径」×「回転数」の積であり軸受の高速回転性を示す指標である。

2. 高速回転の課題

一般的に、HEV・EVの駆動モーターには深溝玉軸受が用いられる。玉軸受が高速で回転すると、すべりによる発熱の影響で軸受内部の温度が上昇する。そのため、鋼球と軌道輪間の油膜形成が不十分になり、焼付きが発生する。また遠心力の増加に伴い保持器が変形し、玉の拘束や外輪・シールと接触することによる発熱や保持器の破損が課題となる。そのため、玉軸受の高速回転を実現するためには、発熱を低減する潤滑方法や変形を抑制する保持器の開発が必要である。

3. 深溝玉軸受の高速回転化技術

3-1 グリースの最適化

転がり軸受の潤滑方法には油潤滑とグリース潤滑がある。油潤滑は、グリース

潤滑と比較して、軸受内部の熱を外部に逃がしやすいことから、高速回転に有利である。そのため、既存技術(後述する高速仕様「Gen1」)でdmN140万以上を達成可能である。一方、グリース潤滑の場合、既存技術でdmN140万以上を実現することは困難であり、グリース潤滑で使用されるHEV・EVモーター用軸受の高速回転化技術の開発が必要である。

自動車の走行環境は極低温から高温にわたり、駆動モーター用軸受のグリースには、幅広い温度域で発熱を抑制することが求められる。当社では、広域温度で高速性能を高めたEA9グリースを開発した。基油にはポリ α オレフィンを採用することで、グリースの劣化を抑え、耐久性を確保した。また、この基油に高速・高温性に優れたウレア系増ちょう剤を適量添加することで、離油(増ちょう剤からの基油の染出し)を適正化し、耐焼付き性を向上させ、広域温度においてグリース流動性を高めて攪拌抵抗を低減させた。図1に示すように、EA9グリースの使用により、極低温と高温の両環境において発熱を低減することで、高速回転性能を向上させた。

【著者問合せ先】

〒251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明1-5-50

Tel.0466-21-3111

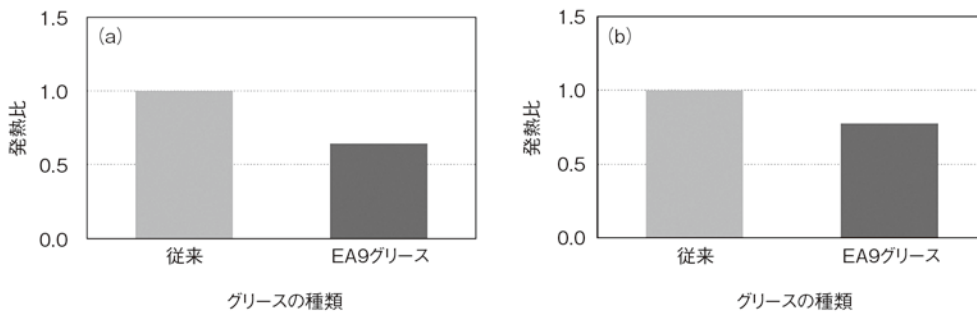


図1 EA9グリースの発熱量の比較¹⁾
(a) -30°C環境、(b) 80°C環境

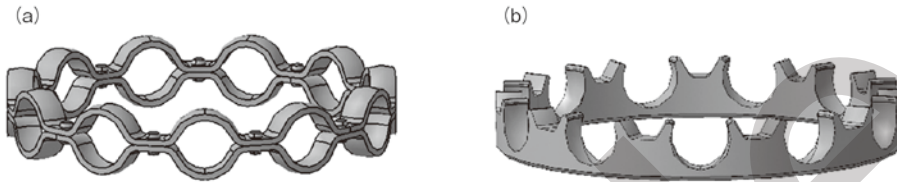


図2 保持器形状の比較
(a) 鉄保持器、(b) 樹脂保持器

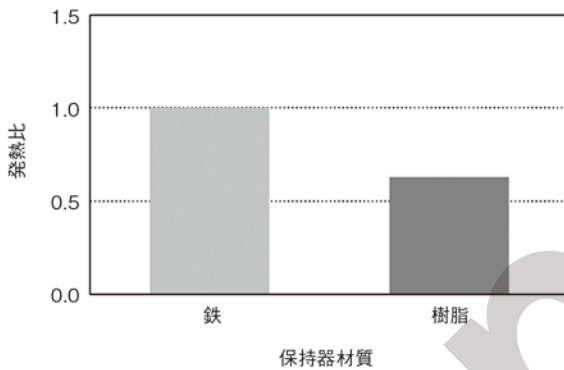


図3 保持器材質による発熱量の比較¹⁾

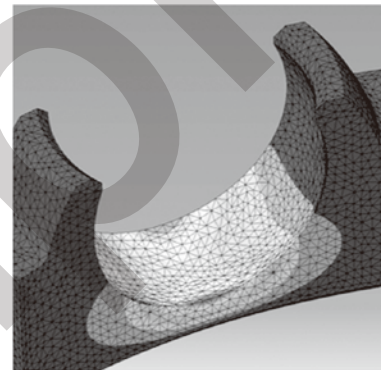


図4 保持器強度解析の一例¹⁾

3-2 保持器形状の最適化

HEV・EV用の深溝玉軸受には、鉄製の保持器（以下、鉄保持器）や冠型の樹脂製の保持器（以下、樹脂保持器）が使用される（図2）。樹脂保持器は鉄保持器と比較して、軽量であるため高速回転時の遠心力が小さく、鋼球と保持器ポケット間の摩擦係数が小さいため、玉と保持器の接触部の発熱量が小さくなる。

図3に示すように、樹脂保持器は鉄保持器と比較して発熱が小さいことを確認しており、高速回転性能を向上させることが可能である。これまで、高速回転で使用される軸受には、樹脂保持器を推奨しており、温度上昇による保持器材料の強度や剛性の低下を抑制するため、耐熱性の良好な樹脂材料を採用している（第一世代「Gen1」）。

前述したように、樹脂保持器を高速回転で使用した場合、遠心力の影響で爪の先端が円周上に変形することによる外輪やシールとの干渉や、ポケット底への過大な応力の発生による破断が問題となる。樹脂保持器を設計する際には、遠心力を考慮した保持器の強度解析を行い、使用条件に応じてポケット底の肉厚を最適化して保持器の変形によるほかの部品との接触や破断を回避した仕様としている（図4）。しかし、ポケット底の肉厚を大きくすると、保持器および軸受の軸方向寸法が大きくなり、モーターの軸長や重量が増加してしまう課題があった。

そこで、第二世代「Gen2」では、これまでの樹脂保持器設計の考え方を一新し、遠心力に耐えるために保持器を高剛性化（肉厚）にするのではなく、遠心力を低減

するために保持器を軽量化する思想にもとづき、保持器形状を見直した。図5(a)に「Gen2」の保持器形状を示す。

同保持器は、軽量化のため爪の先端部外周側の肉を削って爪の根元よりも薄くし、遠心力を低減した。その上で、変形や強度の影響が大きい爪の根元の肉厚を厚くし、円環部と爪を円弧で滑らかにつながり形状に変更した。この結果、爪の変形量を「Gen1」と比較し、約50%低減した（図6）。

さらに、図5(b)に第三世代「Gen3」の保持器形状を示す。同保持器では、トポロジー最適化計算を活用して保持器形状を決定した。また、試作・実験を極力減らし、解析技術を多用することで、第二世代の開発から約1年という短期間で第三世代の開発に成功した。

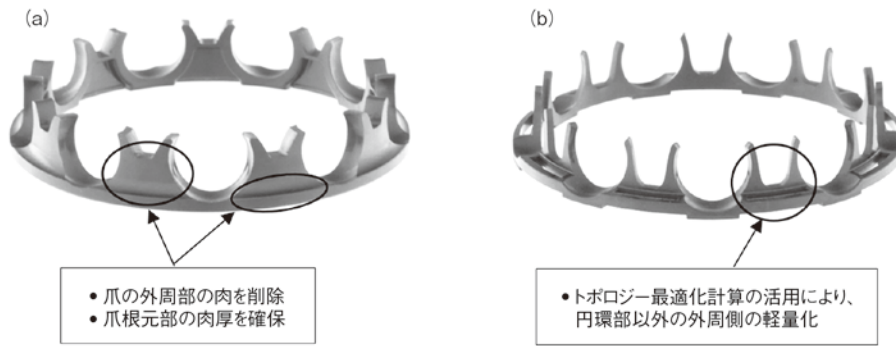


図5 「Gen2」、「Gen3」の保持器形状の特徴
(a)「Gen2」、(b)「Gen3」

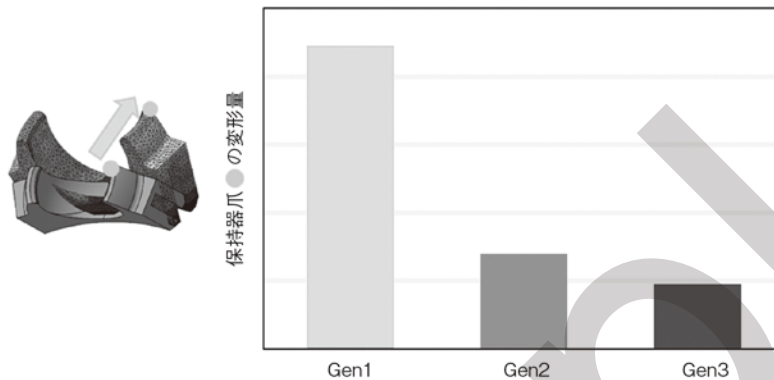


図6 保持器爪先の変形量の結果

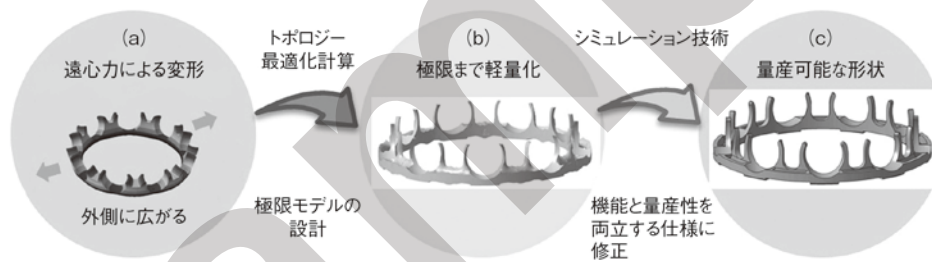


図7 「Gen3」保持器の新設計手法
(a)課題形状、(b)仮形状、(c)最終形状

トポロジー最適化計算とは、形状を設計変数に、強度・剛性を目的関数と設定し、設計空間内で目的に関与しない部分を削除し最適化(軽量化)する設計手法である³⁾。当社ではトポロジー最適化計算を軸受設計に適用し、実用化に成功した。図7に、「Gen3」の保持器の設計フローを示す。図7(b)に示すように、トポロジー最適化計算のみで導出した形状は、生産面を考慮した仕様となっていない。そのため、製造時に樹脂の成形不良や保持器を組み込む際に破損する可能性がある。そこで、トポロジー最適化計算で得られた形状をもとに、樹脂射出時の樹脂の流体解析や組み込み時の応力解析

を行い、製造可能な形状へ改良した。「Gen3」では、保持器の円環部以外の外周側を軽量化し、遠心力を低減させることで、「Gen1」と比較し、約70%の軽量化に成功している。この保持器の軽量効果により、高速回転時の変形量を約70%低減した。

3-3 高剛性材料の採用

高速回転で使用される樹脂保持器の材料には、遠心力の影響による変形を抑制するために高剛性であることが求められる。そのため「Gen2」と「Gen3」では、保持器の材料であるPA(ポリアミド)に添加する強化繊維を「Gen1」のガラスから炭素に変更した。繊維を炭素に変更する

ことで、高剛性化するだけでなく、比重も小さくできる。図8に示すように、採用した樹脂材料は従来のガラス繊維の樹脂より30%程度変形が小さくなるため、高速回転時に遠心力の影響による変形を抑制できる。また、本材料は吸水性が低く寸法変化が小さいため、寸法安定性が向上する効果もある。

4. 評価結果

前述したように、HEV・EV駆動モーター用の高速回転軸受「Gen2」と「Gen3」は、当社オリジナルグリースEA9の適用と遠心力低減を目的とした軽量形状および高剛性材料を採用した樹脂保持器によ

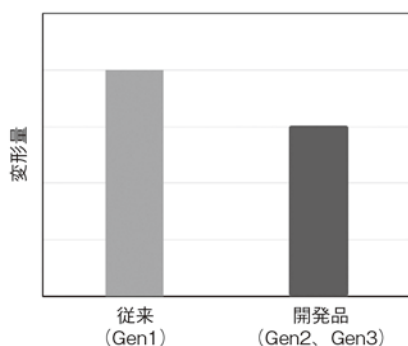


図8 樹脂材料の変形量の測定結果

り高速回転が可能な仕様となっている。本章では、第二世代と第三世代の高速回転性能を評価した結果を示す。

4-1 保持器変形の可視化

図6では解析により、高速回転時の「Gen2」と「Gen3」の保持器爪先端の変形量抑制効果を示したが、実測による確認も行った。保持器を軸に組付けて高速回転させ、変形挙動を高速度カメラで撮影し、保持器変形量を測定した。

試験は、保持器の回転数が軸受のdmNに換算すると200万相当で、温度は120℃で行った。変形量の測定は、初期位置から径方向に変形した量を画像から読み取る方法で行った。その結果、「Gen1」は1.77mmの変形が確認できたが、「Gen2」は0.35mm程度の変形しか確認できず、「Gen3」の変形量は読み取れない程度のレベルであった。測定結果より、第二世代と第三世代の保持器は軽量化と高剛性材料の適用によって、高速回転時の遠心力による変形が抑制されていることが確認できた。

4-2 高速回転性

開発した「Gen2」と「Gen3」の高速回転性能を確認するため高速回転耐久試験を実施した。試験条件は、ラジアル荷重は軸受の基本動定格荷重の10%、試験温度は外輪外径温度が120℃となるようにヒーターで温度調整を行った。また、20時間を試験の打ち切り時間とした。

図9に試験結果を示す。図9(a)が「Gen2」、(b)が「Gen3」の試験結果である。図9(a)に示すとおり、「Gen2」はdmN140万の条件では異常発熱を起こさずに20時間打ち切りとなったが、

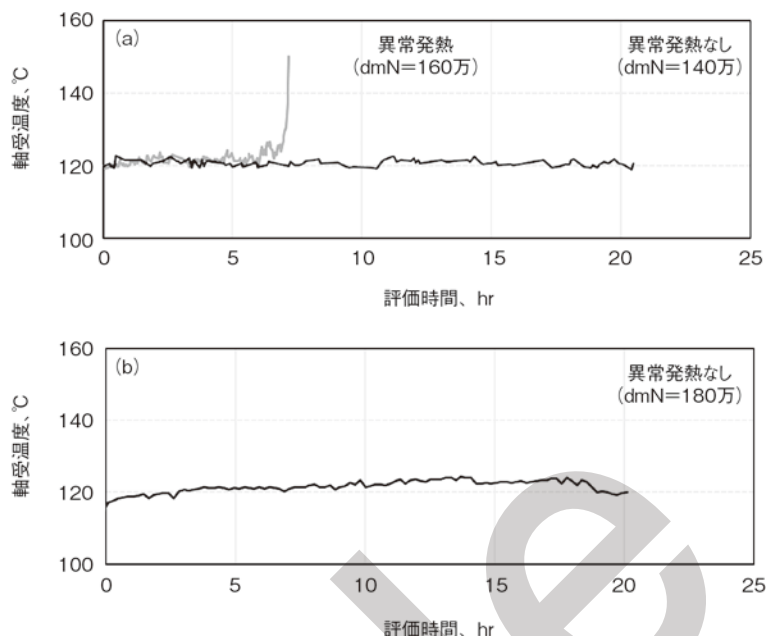


図9 高速回転評価結果 (a)「Gen2」、(b)「Gen3」

dmN160万の条件では約7時間で異常発熱を起こした。dmN160万の条件で異常発熱を起こした軸受の内部を観察した結果、保持器が遠心力の影響により変形し、シールに干渉した痕跡が認められた。一方、「Gen3」は、図9(b)に示すとおり、dmN180万の条件でも異常発熱がなく、目標時間に達した。第三世代は、トポロジー最適化計算により第二世代と比較してさらなる保持器の軽量化が図られており、軽量化の効果により、dmN180万以上の高速回転を達成した。

5. おわりに

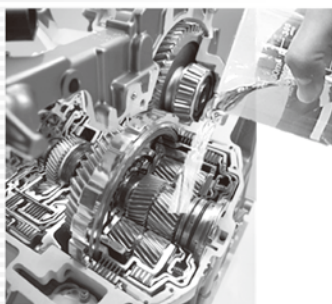
本稿では、当社が開発したHEV・EV駆動用電動モーター用のグリース潤滑高速回転玉軸受について紹介した。オリジナルの高速グリースEA9の適用や保持器の高剛性化・軽量化により、「Gen3」ではdmN180万以上の高速回転を達成した。

今後カーボンニュートラルな社会を実現するために、急速にHEV・EVなどの電動車が普及すると考えられている。当社では、ユーザーの使用環境を十分に把握し、市場のニーズに応える商品開発を継続的に推進することで、HEV・EVの燃費・電費改善および信頼性の向上に貢献していく。

参考文献

- 1) 岩永泰弘：“HEV・EVパワートレイン用軸受の最新技術動向”、月刊トライボロジー、2019.10.
- 2) 相本宏介：Mathias Deiml, Tommie Eriksson, Matthias Schneck and Peyman Jafarian, “高回転モーターを用いた電動ドライブユニット開発”、自動車技術会2019年春季大会学術講演会公演予稿集(2019)、20195157.
- 3) 山崎慎太郎：“最適化(軽量化)する設計手法である。”、システム/制御/情報、Vol61、No1、2017、29-34.

超低粘度ATFの開発



角谷 真夕子
Mayuko SUMIYA

ENEOS(株) 潤滑油カンパニー 潤滑油研究開発部 駆動系油グループ

1. はじめに

地球温暖化問題の解決は現代社会において重大な課題となっている。日本政府は、2050年までに脱炭素社会、カーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言しており、同様に世界の多くの国や地域において、2050年までのカーボンニュートラルへの賛同がなされている。これに伴い世界の産業界でも、二酸化炭素排出量の削減は重要なテーマとして位置づけられている。自動車は二酸化炭素の大きな排出源の一つであることから、自動車からの二酸化炭素排出量の削減、すなわち自動車の省燃費化による低炭素化への貢献は極めて重要である。

自動車における省燃費化技術の一例としては、エンジンの高効率化や車体の軽量化などが挙げられるが、エンジンからの動力を車輪へ伝える装置であるトランスミッション(変速機)に対しても、動力伝達の効率向上が強く求められている。トランスミッションはギヤ比を切り替えることでエンジン回転を走行に適切な回

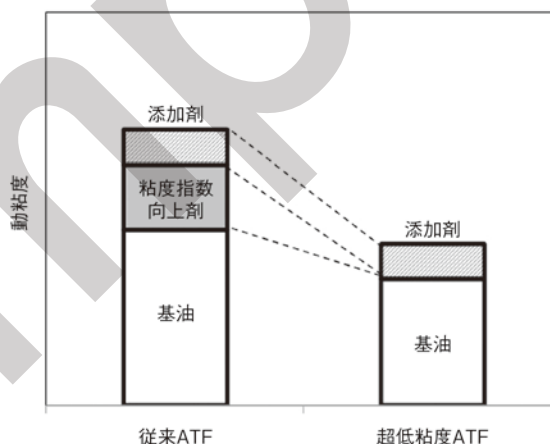


図1 粘度設計のコンセプト

転へ変換する装置であり、自動車の重要な構成要素の一つである。また、トランスミッションはその構成形態によって、AT(Automatic Transmission、自動変速機)、CVT(Continuously Variable Transmission、無段変速機)、MT(Manual Transmission、手動変速機)などに分類される。

変速機の効率向上の一つの方法として、変速機内部で発生する損失トルクを低減させることが挙げられる。変速機内部では、オイルの粘性に起因する攪拌抵抗や引きずり抵抗により損失トルクが発

生するが、オイルの粘度を低減することでこれらのトルク損失を低減することが可能となる。変速機油の低粘度化は、変速機の損失トルクの低減に対して非常に有効な手法であり、変速機油の低粘度化を行うことで省燃費性が改善した報告もなされている^{1), 2)}。

本稿では、変速機の効率向上に大きく寄与する変速機油の超低粘度化の成功事例として、極限まで低粘度化した自動変速機油(以下、超低粘度ATF)の開発内容について紹介する。

【著者問合せ先】

〒231-0815 横浜市中区千鳥町8
Tel.045-415-7596

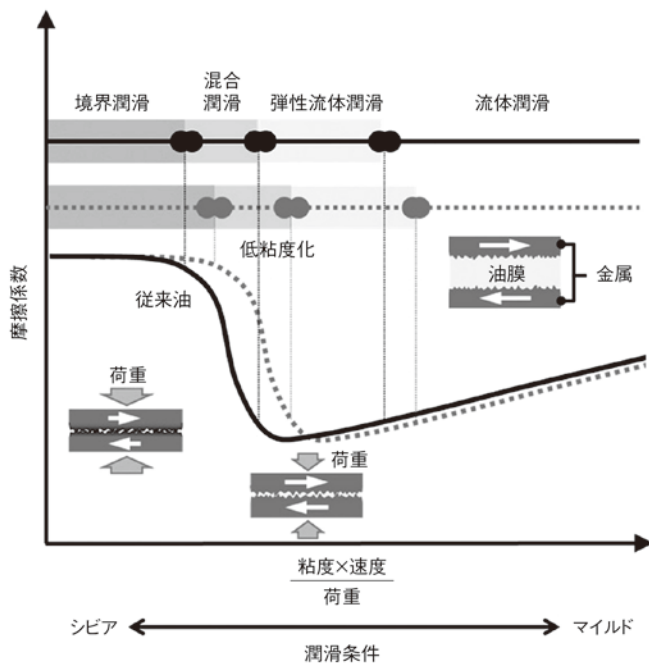


図2 潤滑状態と低粘度化の影響

2. 超低粘度ATFの設計コンセプト

ATFの粘性に起因する攪拌抵抗や引きずり抵抗を可能な限り低減させ、省燃費性の改善を図るため、圧倒的な低粘度ATFの開発を目指した。設計のコンセプトを図1に示す。従来の低粘度ATFに対して大幅な粘度低減を図るため、粘度指数向上剤の不使用、および低粘度基油の適用を検討した。

ATFの超低粘度化に伴う主な課題としては、トランスミッション内で使用されるギヤやベアリングなどの、摺動部品の疲労寿命の低下が挙げられる。ATFの重要な機能の一つとして、摺動部品の潤滑作用があるが、本作用は摺動部品間に介在する油膜が大きく影響する。ATFを低粘度化、特に基油の粘度を低下させると、摺動部品間の油膜が形成されにく

くなり、疲労寿命は悪化することとなる。超低粘度ATFを安心安全に使用するためには、疲労寿命の低下という大きな課題を克服することが必要不可欠である。

3. 疲労寿命への対策

3-1 各潤滑状態における低粘度化の影響

潤滑油が介在する摺動部品の潤滑状態は、その摩擦形態に応じて主に以下の四つに分けることができる。

- ①境界潤滑：金属同士が直接接触し、油膜はほぼ介在できない
- ②混合潤滑：境界潤滑と弾性流体潤滑が混在している
- ③弾性流体潤滑：金属同士は直接接触しないものの油膜は非常に薄く、介在する潤滑油が圧縮されている
- ④流体潤滑：油膜が十分に介在している

境界潤滑では金属表面が直接接触することで摩擦が増加し、摺動面で発生するせん断応力はそのほかの摩擦状態に比べて大きい。また弾性流体潤滑では、潤滑油(主に基油分子)が圧縮され、局所的に粘性が大きく増加する。これは高压時の粘性増加に起因するものであり、高压下での摺動時に発生する引きずり抵抗はトラクション係数と呼ばれる。トラクション係数の大きさは疲労寿命に影響されている^{3), 4)}。またATFを低粘度化させると摺動部での油膜は薄くなり、流体潤滑、弾性流体潤滑から混合潤滑、境界潤滑への遷移が早まる。

図2に示すように、低粘度化の結果として部品表面で発生する摩擦は増加し、それに伴いせん断応力が大きくなることで疲労寿命へ悪影響を及ぼすこととなる。そこで本開発では、弾性流体潤滑および境界潤滑それぞれにおける摩擦低減を図った。

3-2 弾性流体潤滑下での摩擦低減

弾性流体潤滑で発生するせん断応力を低減するには、ATFの高压下における粘度、すなわち、トラクション係数を低減させる必要がある。図3に示すように、トラクション係数の大きさは基油構造に起因し、環状構造や分岐構造が多いと基油分子が引っかかり合うことによる局所的な粘性増加が起こりやすくなり、トラクション係数は高くなる。一方、直鎖構造の場合には基油分子がスムーズに動けるため、トラクション係数は小さくなり、基油圧縮時の粘性増加が抑制できる。今回の超低粘度ATF開発では、疲労寿命の観点から低トラクション化が必要であるため、直鎖構造を多く含むPAO(ポリ- α -オレフィン)にも匹敵する、トラクシ

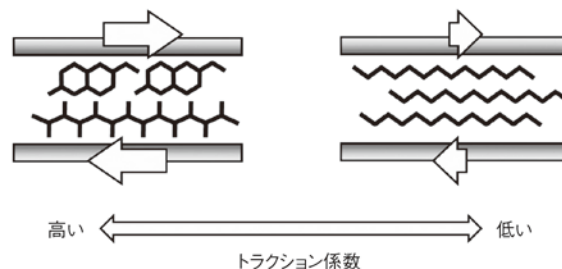


図3 基油構造とトラクション係数の関係

表1 Sample A、Bの処方概要

	ATF-1	Sample A	Sample B
粘度指数向上剤	○	—	
基油種類	水素化精製基油		高性能基油
基油動粘度	a	b	
	a>b		
エステル基油	—	○	
動粘度 (mm ² /s)、100℃	5.6	3.2	3.2

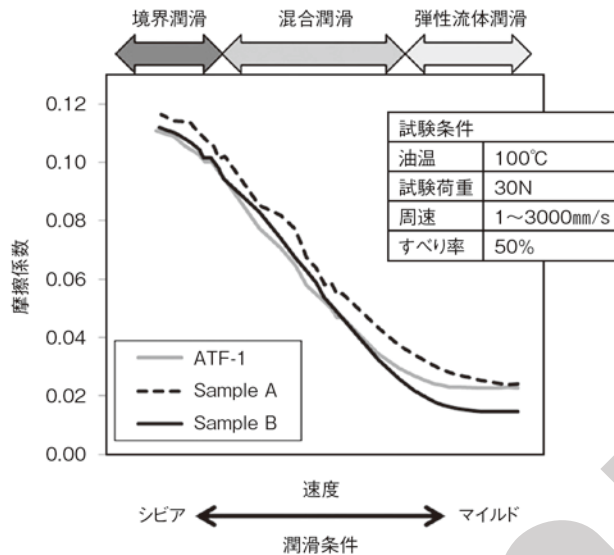


図4 Sample A、Bの摩擦係数

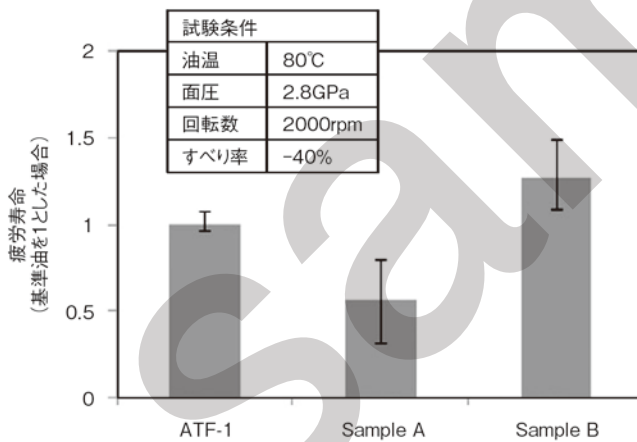


図5 ローラーピッチング試験結果

3-4 コンセプトの検証結果

前項までに述べた弾性流体潤滑および境界潤滑における摩擦低減手法の効果を確認するため、MTM (Mini Traction Machine) を用いて摩擦係数を測定した。試製したサンプルの組成要素を表1に示す。従来ATFのATF-1に対し、単純に低粘度化したサンプルをSample Aとし、高性能基油およびエステル基油を適用したサンプルをSample Bとした。図4に示すように、Sample Bでは、境界潤滑から弾性流体潤滑にかけてSample Aに比べ摩擦係数が低減し、従来ATFであるATF-1と同等レベルとなることが確認された。また、ギヤ疲労寿命を評価する試験であるローラーピッチング試験の結果を図5に示す。高性能基油を適用したSample BはSample Aよりも大幅に疲労寿命が向上し、ATF-1以上の結果となった。以上より、疲労寿命向上コンセプトが実際に有効であることが確認された。

4. 超低粘度ATFの諸性能

以上の結果より、高性能基油とエステル基油を用いた超低粘度ATF「ATF-2」を試製した。表2に「ATF-2」の物性をATF-1との比較で示す。また、図6には市場ATFとの動粘度の比較を示しているが、動粘度はほかの市場ATFに比べて圧倒的に低い設計となっている。「ATF-2」はATの効率向上に絶大な効果を発揮することを確認しており、FFタイプのATユニットで、従来油対比で10%強の損失トルク低減効果をもたらし、ユニットの高効率化ひいては車両の省燃費化に有効なことが示された (効率測定条件 Gear : 8 速、Nin : 2 0 0 0 rpm、Tin : 100Nm、油温 : 40℃)。

以上に述べたとおり、高性能基油およびエステル基油の適用により、超低粘度化の背反である疲労寿命の低下という課題を解決することで、従来ATFからの圧倒的な低粘度化を実現することに成功した。超低粘度ATFである「ATF-2」は、市場ATFと比較して類を見ないほどの超低粘度であり、ATの伝達効率を大きく改善させる。

ン係数の低い「高性能基油」を適用した。
3-3 境界潤滑下の摩擦低減
 ギヤのような、高すべり環境下で金属接触が起きる厳しい潤滑状態である境界潤滑で発生する摩擦を緩和するためには、極性を有する基油や添加剤を配合することが有効と考えられる。摩耗防止剤や摩擦調整剤などを多量に用いれば、境界潤滑での潤滑性を向上させることが可

能であるが、それらは同時にATFの重要な性能であるクラッチのトルク伝達容量を低下させるほか、そのほかのATF性能にも大きな影響を及ぼす。そこで今回は、クラッチのトルク伝達容量などATFの諸性能への影響を極力抑えつつ、境界潤滑状態にある摺動部品の潤滑性を向上させる手法として、極性を有した基油であるエステル基油に注目した。

表2 超低粘度ATFの物性

	ATF-1	ATF-2
粘度指数向上剤	○	—
基油種類	水素化精製基油	高性能基油/エステル基油
引火点(°C)	194	194
動粘度(mm ² /s)	40°C	25.7
	100°C	5.6
BF粘度(Pa·s)	-40°C	12.0
		1.1

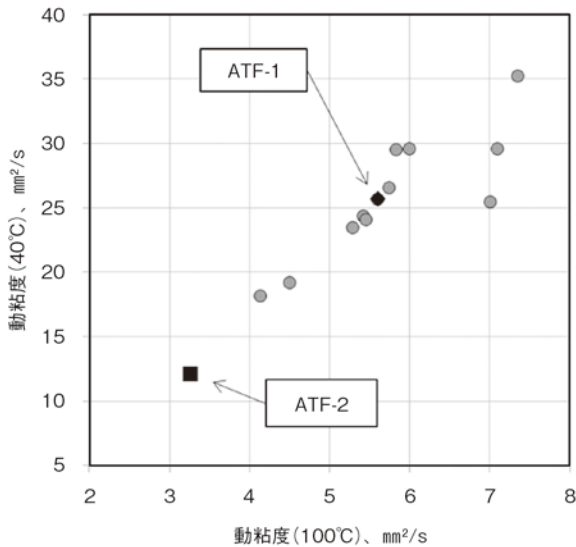


図6 市場油および超低粘度ATFの粘度比較

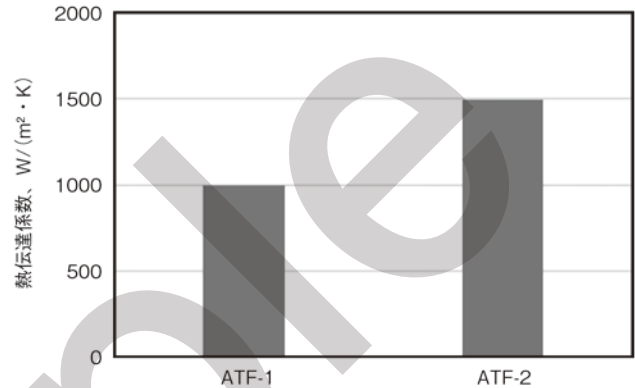


図7 熱伝達係数評価結果(60°C)

5. 今後の展望

トランスミッションの高効率化に寄与する超低粘度変速基油の一例として、超低粘度ATFの開発事例について述べた。近年では、ハイブリッド車(以下、HEV)や電気自動車(以下、EV)が増加傾向にあるが、HEVやEVにも一般的に変速機や減速機(一段変速機)が使用されており、伝達効率や疲労寿命の向上技術は引き続き要求されると考えられる。さらに加えて、HEVやEVにおいては、潤滑油がモーター冷却に使用される形式もあり⁵⁾、モーターの発熱抑制のため潤滑油の冷却性能の向上も求められる。冷却性能の指標となる熱伝達係数は、媒体(ここでは潤滑油)が低粘度であればあるほど大きくなり、冷却性に優れるということが出来る。

実際に冷却性を評価するため、熱交換機を用いて熱伝達係数の測定を行った。熱交換部での試料油と管壁の温度を測定

することで、熱伝達係数を算出できる。管内を流れる試料油温度(T_{oil})と、管壁温度(T_h)の差、ヒーター発熱量(Q)、および熱交換面積(配管内の表面積)(A)から熱伝達係数(h)を算出した。

$$h = Q / A (T_h - T_{oil})$$

(評価条件：配管内径φ10mm、配管長さ5m、油温60°C、体積流量20L/min)

図7に示すとおり、超低粘度ATFであるATF-2は、従来油ATF-1よりも熱伝達係数大きいことが確認できる。

このように、超低粘度化技術は、HEVやEVの変速機油としては高効率化を図れることに加え、冷却性能を大きく向上させることができる非常に有用な技術であるといえる。当社においても、前章までに述べた技術を活用しながら、高効率化や冷却性向上を目指した低粘度タイプのHEVやEV用フルードである、「ENEOS EV FLUID」の開発も行ってい

る。今後の自動車業界における電動化を見据えても有用であり、将来にわたり自動車産業における二酸化炭素排出量削減、すなわち地球温暖化対策へ貢献していきたい。

参考文献

- 1) Sasaki, et al.: "Development of Automotive Lubricants Based on High-Viscosity Index Base Stock," SAE Technical Paper 951028 (1995).
- 2) Kurosawa, O.: "Development of the Fuel Saving Low Viscosity ATF," SAE Technical Paper 2003-01-3257(2003).
- 3) Masuda, K. et al.: "Super Low Viscosity ATF; AW-2," SAE Technical Paper 2018-01-1756(2018).
- 4) 増田: 超低粘度ATFの開発, JXTG Technical Review, 61, 2(2019).
- 5) 鬼丸, ほか: ハイブリッド電気自動車(HEV)のATFを用いたモータ冷却構造の熱解析, デンソーテクニカルレビュー Vol.13, No.1(2008).