

超低粘度ATFの開発

潤滑油研究開発部 駆動系油グループ **ますだ こうへい**
増田 耕平



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おり、温暖化原因物質である二酸化炭素の排出量削減は、世界の産業界で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ため、二酸化炭素排出量削減には自動車からの排出低減、即ち自動車の省燃費化が極めて重要である。

自動車の省燃費化技術は、エンジンの高効率化や車体軽量化など枚挙に暇がないが、自動車において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効率の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転へ変換する装置であり、自動車の重要な構成要素である。また、トランスミッションにはその機構形態によって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。日本国内ではCVT車の比率が高いものの、北米やアジアを中心とした海外ではAT車が主流となっている。また近年、自動車に関しては「電動化」というキーワードがクローズアップされているが、いわゆるハイブリッド車のトランスミッションはAT機構をベースとしている場合も多い。このためATには依然として効率向上の課題が課せられている。

ATを構成する機能部品としては、自動車のスムーズな発進や動力伝達を担うトルクコンバーターや、複数の変速段を構成する遊星ギヤとギヤを切り替えるための変速クラッチ、それらを適切に動作させるための油圧制御装置など、様々存在する（図1）。ATF（Automatic Transmission Fluid）はATに充填される潤滑油であり、動力伝達機能、冷却機能、油圧媒体機能、および部品の潤滑・保護機能などの様々な機能を担い、まさに「機械の血液」としてATを適正に作動させる上で欠くことのできない重要部品である。



図1 AT（自動変速機）のカットモデル

ATの効率向上の一つの方法としてAT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。AT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低減が可能となる。ATFの低粘度化は、ATの損失トルクの低減に対して非常に有効な手法であり、過去、ATF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)}。

今回、従来ATFと比較して圧倒的な低粘度である超低粘度ATFの開発に成功したため、本稿にて報告する。

2. 超低粘度ATFの設計コンセプト

一般的に潤滑油は、基油に加えて、酸化防止性や耐摩耗性など使用環境に応じて必要となる性能を付与するために様々な性能添加剤が配合される。ATFの低温～常用温度領域の動粘度を下げることによって、低温始動性の改善、前述した攪拌抵抗や引きずり抵抗の抑制による省燃費化が可能となる。ただし高温域では、油圧制御装置内のオイルリーク防止、ギヤ・ベアリング摺動部の適正油膜保持の観点から高粘度であることが好ましい。従って、ATFにはエンジン始動時の低温域から高負荷運転時の高温域にいたる広い温度範囲で粘度変化が少ない、即ち高粘度指数であることが望まれる傾向にあり、粘度指数を高める

添加剤である粘度指数向上剤 (主にポリメタクリレート) が配合されることが多い。高温での粘度が低すぎると摺動部品の潤滑性が低下して部品損傷が生じたり、シール性が悪化するため、これまでの低粘度 ATF は粘度指数向上剤を配合することで高温下の粘度をある程度確保しながら、低温下の粘度を下げることで攪拌抵抗を低減するといったコンセプトのものが多かった。今回の ATF 開発は従来のコンセプトと一線を画すものであり、AT の効率向上効果を最大限に高めることを目的に、ATF による攪拌抵抗、引きずり抵抗を可能な限り低減させるため、高温下の粘度低減にも踏み込んだ圧倒的な低粘度 ATF の開発を目指した。

極限の低粘度 ATF (以下、超低粘度 ATF) の粘度設計のコンセプトを図 2 に示すが、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適用、低粘度基油の適用を検討した。

超低粘度化の主な課題としては、トランスミッション内で使用される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 1 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。このため、ATF を低粘度化、特に基油粘度を低下させると摺動部品間の油膜が形成しづらくなり、疲労寿命は悪化することとなる。また、単純に基油の粘度を下げることは、低分子量かつ低沸点の軽質基油の割合が増えることとなるため、ATF の引火点が低下することも懸念される。

超低粘度 ATF を安心安全に使用するためには、以上の 2 つの大きな課題を克服することが必要不可欠である (図 3)。

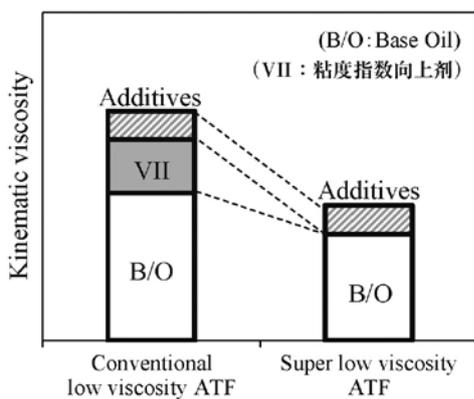


図 2 粘度設計のコンセプト

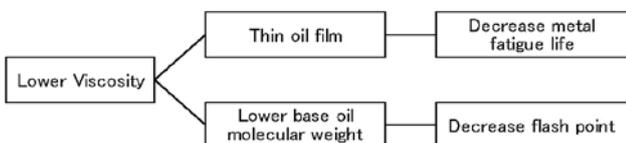


図 3 超低粘度化の課題

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 4 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：油膜が十分に存在している

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他の潤滑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、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、トラクション係数の大きさは疲労寿命に影響すると言われている³⁾。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 4 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。

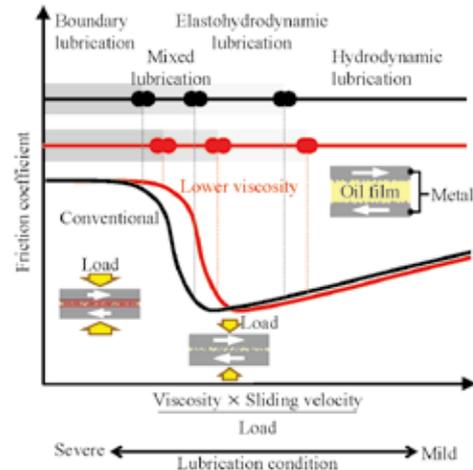


図 4 潤滑状態と低粘度化の影響

実際に、MTM (Mini Traction Machine) を用いて超低粘度化の影響を確認するため摩擦を測定した。MTM 試験では、ディスク試験片とボール試験片を接触させ、それぞれの回転を制御することで境界潤滑から弾性流体潤滑領域にかけて幅広い潤滑状態における摩擦係数を測定することができる (図 5)。従来の ATF である ATF-1 と、ATF-1 から粘度指数向上剤を抜いて基油粘度を低減させたサンプル A の測定を行った (表 1, 表 2)。測定結果を図 6 に示す。低粘度化により潤滑状態の遷移が起り、境界潤滑から弾性流体潤滑にかけて摩擦係数が增大していることが確認できる。このように摩擦が増大することに

より、超低粘度油ではギヤやベアリングなどの摺動部品の耐久性が低下することが予測される。

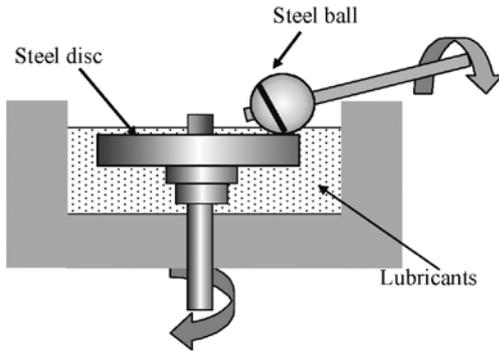


図 5 MTM 試験機の概要

表 1 MTM 試験条件

Oil temperature	100 °C
Test load	30 N
Rolling speed	1~3000 mm/s
Slide-to-roll ratio	50 %

表 2 サンプル A の処方概要

	ATF-1	Sample A
VII	○	—
Kinematic viscosity of base oil	a	b
	a>b	
Kinematic viscosity (mm ² /s), 100 °C	5.6	3.2

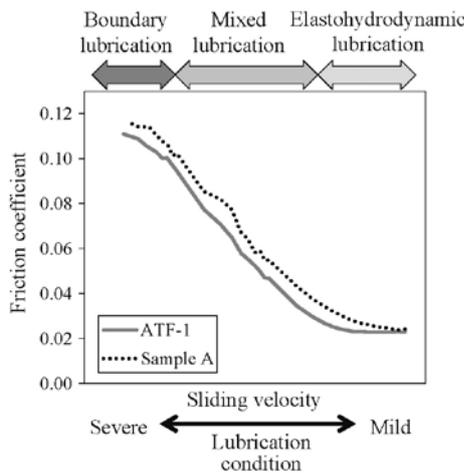


図 6 MTM 試験における摩擦特性 (サンプル A)

また、実際に超低粘度油の疲労寿命評価を行った。評価にはボールベアリング試験機とローラーピッチング試験機 (図 7) を用いた。ローラーピッチング試験では、2つのローラーを用い、一定のすべりを与えながら摺動させるため、ギヤの摺動形態を模擬できる試験機である。

試験条件をそれぞれ表 3 および表 4 に示す。また評価結果を図 8 および図 9 に示す。図に示すように、単純な超低粘度化ではいずれの試験でも疲労寿命が悪化してしまうことを確認した。超低粘度油においても疲労寿命を悪

化させないようにするためには、境界潤滑および弾性流体潤滑でそれぞれ発生するせん断応力を低減させる必要があるが、その手法について次項以降で述べる。

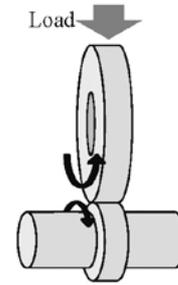


図 7 ローラーピッチング試験機の概要

表 3 ボールベアリング試験条件

Oil temperature	120 °C
Test load	5500 N
Motor speed	1500 rpm

表 4 ローラーピッチング試験条件

Oil temperature	80 °C
Contact pressure	2.8 GPa
Motor speed	2000 rpm
Slide-to-roll ratio	-40 %

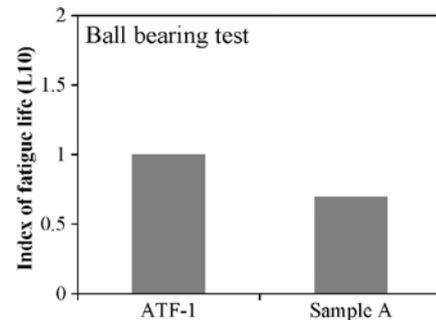


図 8 ボールベアリング試験結果 (サンプル A)

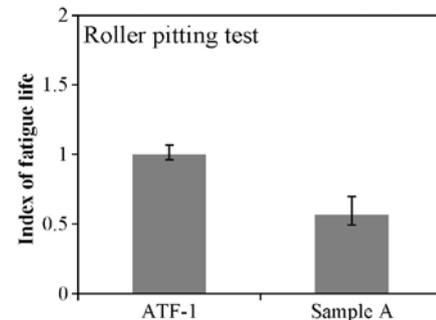


図 9 ローラーピッチング試験結果 (サンプル A)

3.2 弾性流体潤滑下の摩擦低減

弾性流体潤滑で発生するせん断応力を低減するには、ATF のトラクション係数を低減させる必要がある。トラクション係数の評価は、図 10 に示すようなボールオンディスク

ク試験機で行った。トラクション係数は、高圧時の粘性増加に起因するため、添加剤ではなく主に基油分子の構造が影響因子となる⁴⁾。そこで、各種基油のトラクション係数を測定した。その結果を図 11 に示す。

溶剤精製基油 (API 分類における Gp. I) に比べ、水素化精製基油 (Gp. III) や合成油であるポリ- α -オレフィン (PAO) のトラクション係数は低くなる。トラクション係数は前述の通り基油構造に起因し、環状構造や分岐構造が多いと基油分子の絡まり合いによる局所的な粘性増加が起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低くなり、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、トラクション係数が PAO レベルに低い「高性能基油 (High performance base oil)」を選定することとした。

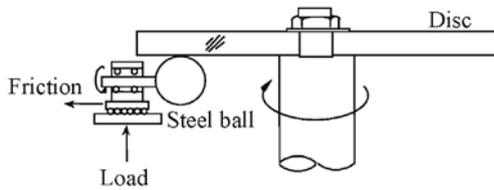


図 10 ボールオンディスク試験機の概要

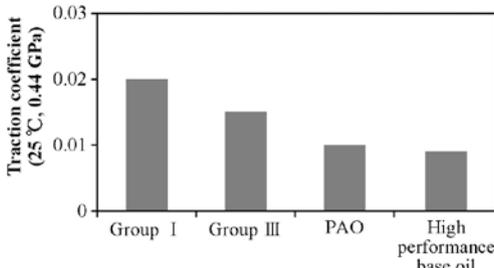


図 11 トラクション係数測定結果

MTM 試験にて、低トラクション化の効果を確認した。トラクション係数の低い「高性能基油」を適用したサンプル B (表 5) では、弾性流体潤滑領域における摩擦係数が低減することを確認した (図 12)。

表 5 サンプル B の処方概要

	ATF-1	Sample A	Sample B
VII	○	—	—
Kinematic viscosity of base oil	a	b	
	a>b		
Base oil type	Hydrocracked base oil		High performance base oil
Kinematic viscosity (mm ² /s, 100 °C)	5.6	3.2	3.2

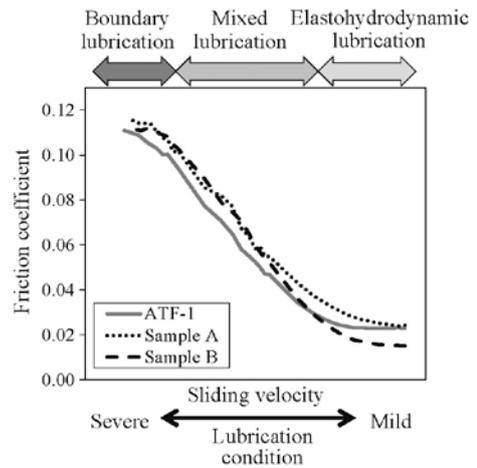


図 12 MTM 試験における摩擦特性 (サンプル B)

また、サンプル B ではボールベアリング試験の疲労寿命は向上し、低粘度油であるにも関わらず従来油 ATF-1 と同等レベルとなる (図 13)。しかしながら、ギヤ試験を模擬したローラーピッチング試験では低トラクション化による疲労寿命向上効果が見られなかった (図 14)。これは、ローラーピッチング試験はすべり速度が大きく潤滑状態がシビアであるため、トラクション係数の寄与が小さいためであると考えられる。

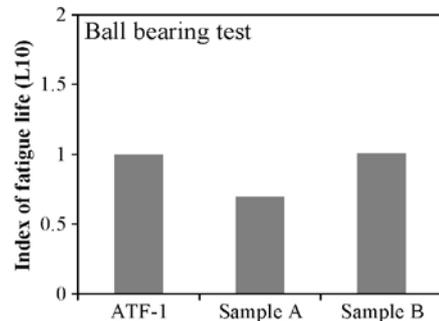


図 13 ボールベアリング試験結果 (サンプル B)

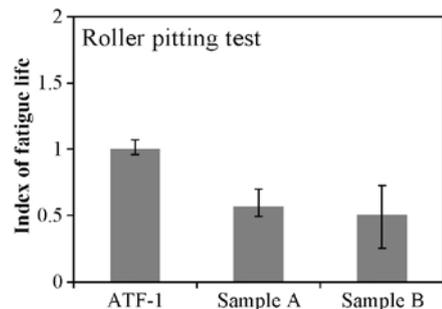


図 14 ローラーピッチング試験結果 (サンプル B)

3.3 境界潤滑下の摩擦低減

ギヤ部分の潤滑状態のような、高すべり環境下で金属接触が起きる厳しい潤滑状態における潤滑性向上には、発生する摩擦を緩和するために極性を持つ基油や添加剤

を配合することが有効であると考えられる。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できるが、それらは同時に ATF の重要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、その他の ATF の諸性能に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、か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。

エステル基油を適用した際の摩擦挙動を確認するため、MTM 試験を実施した。測定結果を図 15 に示す。前述したサンプル B にエステル基油を添加したサンプル C (表 6) は、境界潤滑から混合潤滑にかけて摩擦係数を低減することができ、超低粘度油であるにも関わらず、従来 ATF の ATF-1 と同等特性であることを確認した。

次に、ローラーピッチング試験における疲労寿命の評価結果を示す。サンプル C はサンプル B よりも疲労寿命が大きく向上し、従来油 ATF-1 以上の結果となった (図 16)。エステル基油の極性部分が摺動部品表面に吸着して厳しい潤滑環境下における潤滑性を向上させ、境界潤滑から混合潤滑における摩擦が低減することで疲労寿命の向上が見込めることが分かった。

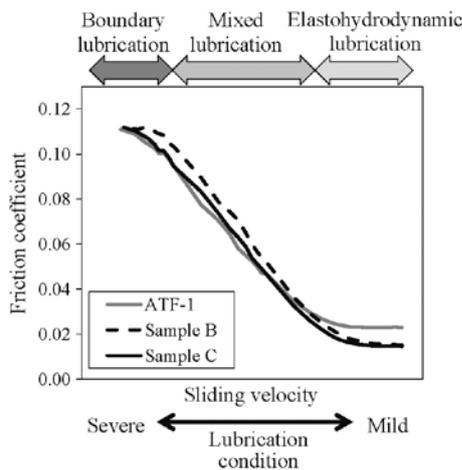


図 15 MTM 試験における摩擦特性 (サンプル C)

表 6 サンプル C の処方概要

	ATF-1	Sample B	Sample C
VII	○	—	
Base oil type	Hydrocracked base oil	High performance base oil	
Kinematic viscosity of base oil	a	b	
Ester type base oil	—		○
Kinematic viscosity (mm ² /s), 100 °C	5.6	3.2	3.2

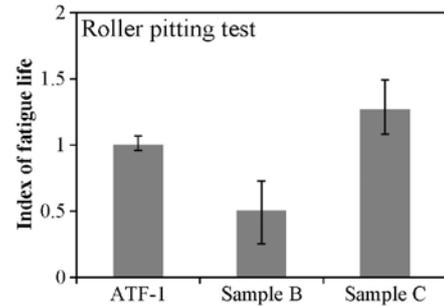


図 16 ローラーピッチング試験結果 (サンプル C)

4. 引火点の対策

安全性の観点から、引火点は従来油と同じレベルとすることが望ましい。引火点を低下させずに低粘度化を実現するためには、引火点低下の原因となる軽質な低分子量成分の割合を減らす、即ち、狭い分子量分布を有した基油が必要である。「高性能基油」は水素化精製基油に比べて分子量分布が狭く、「高性能基油」を適用したサンプル B では、図 17 に示すように低粘度であっても引火点を従来油同等に維持することが可能である。

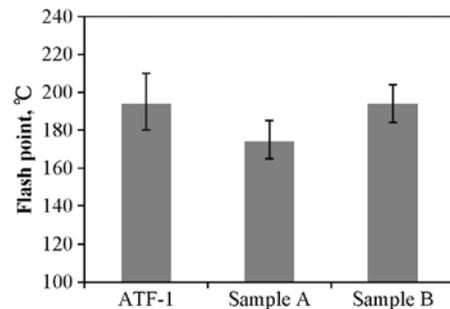


図 17 引火点測定結果

5. 超低粘度 ATF の諸性能

5.1 粘度特性

以上の検討結果より、「高性能基油」とエステル基油を用いた超低粘度 ATF 「ATF-2」を試作した。表 7 に ATF-2 の物性を ATF-1 との比較で示す。また、図 18 には市場 ATF との動粘度の比較を示す。動粘度は他の市場 ATF に比べて圧倒的に低い粘度設計となっており、AT の効率向上に絶大な効果を発揮する。ATF-2 は高温から低温にかけて全温度域で低粘度化がなされている。通常、寒冷地においては運転開始時の ATF の粘度が非常に大きいことから始動性が悪化する傾向となるが、ATF-2 は -40°C における粘度も大幅に低減しているため、低温時始動性も非常に良好である。

表 7 超低粘度 ATF の物性

	ATF-1	ATF-2
VII	○	—
Base oil type	Hydrocracked base oil	High performance base oil / Ester
Flash point (°C)	194	194
Kinematic viscosity at 40 °C	25.7	12.1
viscosity (mm ² /s) at 100 °C	5.6	3.2
Brookfield viscosity (Pa·s) at -40 °C	12.0	1.1

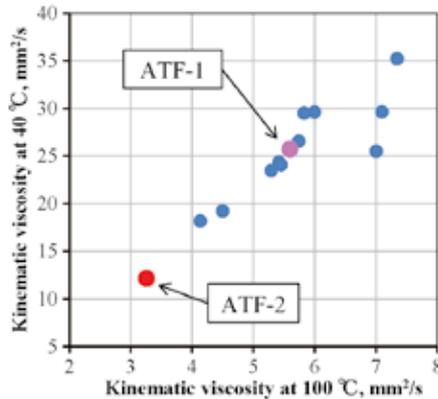


図 18 市場油および超低粘度 ATF の粘度比較

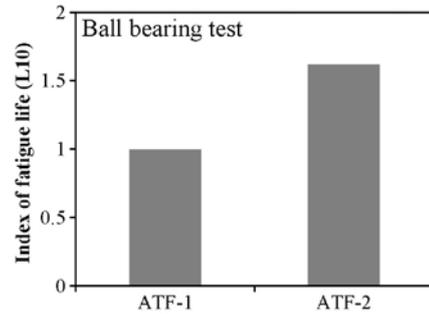


図 19 ボールベアリング試験結果

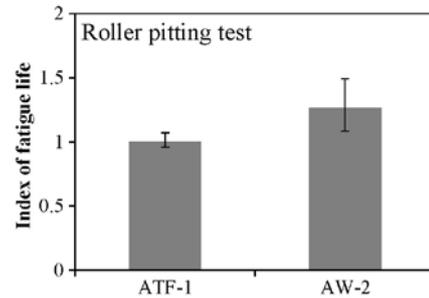


図 20 ローラーピッチング試験結果

5.2 疲労防止性

超低粘度油の疲労寿命に関して、ボールベアリング試験、ローラーピッチング試験、FZG ギヤピッチング試験の結果を示すが、いずれも従来油の ATF-1 よりも良好である (図 19, 図 20, 図 21)。

5.3 その他の性能

ATFとして求められる諸性能の評価結果概要を表 8 に示す。ロックアップクラッチや変速クラッチ等の湿式クラッチ性能は従来油同等であり、材料適合性等も ATFとして問題無い良好な性能を有することを確認した。

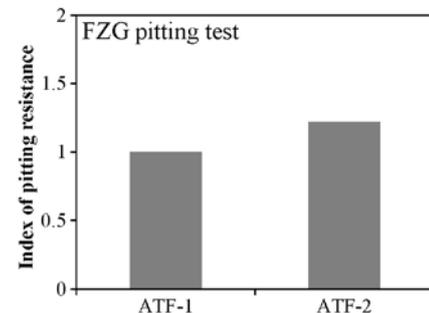


図 21 FZG ピッチング試験結果

表 8 ATF-2 の諸性能

Property	Method		ATF-1	ATF-2
Anti-shudder performance	JASO M349-2012 mod.	h	> 1000	> 1000
Torque capacity	JASO M348-2012		-	Equal to AW-1
	JASO M349-2012 mod.		-	Equal to AW-1
Friction characteristics	JASO M348-2012		-	Equal to AW-1
Thermal and oxidation stability	JIS K 2514 (165 °C, 150 h)	ΔViscosity (100 °C), %	10.0	5.5
		ΔTAN, mgKOH/g	1.6	1.5
Shear stability	CEC L-45-A-99 (80 h)	ΔViscosity (100 °C), %	-7.1	-0.1
Anti-foaming properties	ASTM D892		-	Equal to AW-1
Anti-wear properties	ASTM D4172 mod. (1800 rpm)	Wear diameter, mm	0.59	0.57
Anti-seizure properties	ASTM D2783	LNSL, N	618	618
Anti-corrosion and anti-rust protection	ASTM D130		Pass	Pass
Material compatibility	ASTM D471		Pass	Pass
	JASO M350-1998		Pass	Pass

5.4 実機・実車耐久性能

開発においては、超低粘度 ATF の耐久性能を確認するため、実機 AT ユニットや実車による耐久性評価も実施しているが、従来同様の判断基準において、開発油は従来油同等以上の耐久性を有していることを確認した。

5.5 省燃費性能

FF タイプの AT ユニットにおける効率測定結果を図 22 に示すが、開発油は従来油対比で 10% 強の損失トルク低減を図ることができ、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。

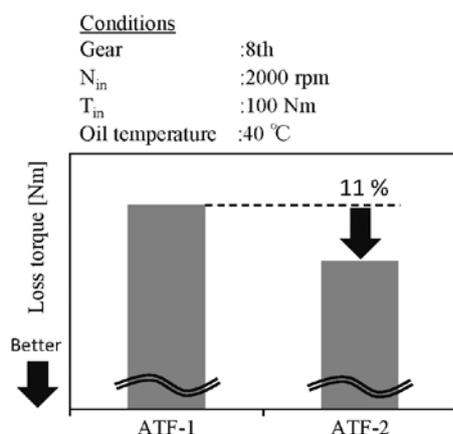


図 22 実機効率測定結果

6. おわりに

以上に述べたように、「高性能基油」およびエステル基油の適用により、超低粘度化の背反性能となる疲労寿命および引火点の低下といった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程の超低粘度油化であり、AT の省燃費性を大きく改善させる。

冒頭部分でも述べたように、ハイブリッド車のトランスミッションは AT 構造をベースとしている場合が多く、ATF-2 に適用した超低粘度化技術はそのまま適用可能になるほか、疲労寿命向上技術は、今後増えるであろう EV ユニット用フルードに有用な技術である。EV ユニットのバッテリーやモータの冷却を潤滑油が担う場合には冷却性が非常に重要な指標となってくるが、低粘度であるほど潤滑油の冷却性（熱伝達係数）は向上するため、本稿で紹介した潤滑油の超低粘度化と疲労寿命の向上を両立する技術は、今後の電動化を見据えても非常に有効な技術であると言える。

今後も、地球温暖化対策に貢献するため、トランスミッションの更なる効率向上技術を追求し、省エネルギー性の高い潤滑油の開発を継続したい。

－ 参考文献 －

- 1) Sasaki, T., Ohmori, I., Furumoto, M., Tanaka, H. et al.: "Development of Automotive Lubricants Based on High-Viscosity Index Base Stock", SAE Technical Paper 951028 (1995)
- 2) Kurosawa, O., Matsui, S., Komiya, K., Morita, E. et al.: "Development of the Fuel Saving Low Viscosity ATF", SAE Technical Paper 2003-01-3257 (2003)
- 3) Masuda, K., Nakao, H., Komatsubara, H., Kurosawa, O. et al.: "Super Low Viscosity ATF; AW-2", SAE Technical Paper 2018-01-1756 (2018)
- 4) 畑 一志 ; 「トラクションオイルの分子構造とトラクション特性」, "Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 56, 9, 1589 (1990)