

4WD カップリング専用フルードの開発*¹

Development of Exclusive Fluid for AWD Coupling

安藤淳二 J. ANDO 酒井直行 N. SAKAI 齊藤利幸 T. SAITO
 桑原寛文 H. KUWABARA 黒澤 修 O. KUROSAWA

This paper describes the analysis of the shudder generation mechanism in AWD couplings and the development of a special Toyota ITCC Fluid "TIF" enabling an Intelligent Torque Controlled Coupling ("ITCC") with larger capacity that is applicable to large-size vehicles and that achieves better fuel efficiency due to size and weight reduction of the rear drivetrain. Optimization of the additives and base oil of this fluid, which is exclusive for AWD couplings, has improved anti-shudder durability, reduced maximum torque at low temperatures, and achieved both reliability improvement and weight reduction of the driveline.

Key Words: AWD coupling, fluid, additives, metallic detergent, EP-agent, dispersant, FM, synthetic fluid, shudder

1. はじめに

近年、自動車用駆動部品においては、安全性や走行性の向上に加え、更なる高容量化や、低燃費化につながる製品開発が益々重要となっている。当社の4WD車用電子制御カップリングITCC¹⁾(Intelligent Torque Controlled Coupling)においても、更なる寿命の向上によるITCC^{*2)}の小型・高容量化や、最大トルク低減によるリヤ駆動系の軽量化も含めた車両の低燃費化が要求されている。

ITCCは、車両の走行状況や路面状況に応じて最適な前後輪トルク分配を電子制御で瞬時に駆動力伝達装置である。図1にITCCの構造を示す。ITCCの構造は、ペーパー系湿式多板クラッチと、鉄系電磁クラッチから構成されており、これらクラッチを共通フルードにて潤滑している。ITCCの長寿命化にとっては、シャッターと呼ばれる自励振動の防止が重要となり²⁾、潤滑フルードの耐シャッター性能が大きく影響を及ぼす。シャッターは、クラッチしゅう動部でのスティックスリップが原因となつて発生する。しゅう動部のスティックスリップの発生には、摩擦係数(μ)の速度(v)に対する依存性(μ - v 特性)に負勾配性があること($d\mu/dv < 0$)が必要条件とされている³⁾。したがって、シャッターの防止には摩

擦係数が速度に対して正勾配($d\mu/dv \geq 0$)であることが有効である^{4)~7)}。一方、リヤ駆動系の軽量化のためには、全温度域でITCCの最大トルクを安定化させることが有効である。特に、低温域での最大トルクの増加において、クラッチ間の粘性流体抵抗が支配的であり、フルード粘度の影響が大きい。

このような背景のもとITCCの潤滑フルードは、従来ATF(Automatic Transmission Fluid)を適用してきたが、上述した要求を満たすためには、専用フルードの開発が必要となってきた。本報では、4WDカップリングのシャッター発生メカニズムを解析し、ITCCの性能を画期的に向上させた専用フルード(TIF: Toyota ITCC Fluid)の開発内容について報告する。

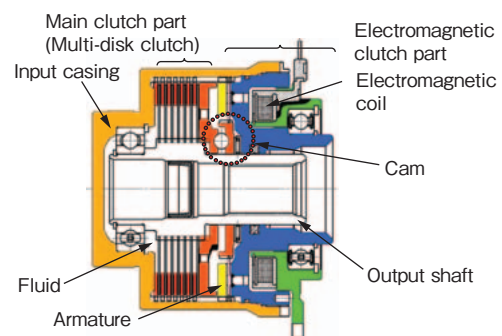


図1 ITCCの構造
Structure of ITCC

* 1 本論文は、2007年自動車技術会春季学術講演会前刷集(20075124)の一部を基に作成した。

2. 実験方法および解析方法

2.1 実機シャダー試験

図1に示す実機ユニットを用いて、各種フルードの耐シャダー寿命の評価を実施した。負荷エネルギー 350W 一定にて油温 140°C、クラッチ連続スリップ条件で運転を行い、 μ -v 勾配の経時変化を測定した。試験開始から μ -v 勾配が 1 以下（シャダー発生）となるまでの時間を耐シャダー寿命とした。

2.2 ペーパー湿式クラッチ単体におけるシャダー試験

JASO M349-2001⁸⁾ 法に準拠しペーパー湿式クラッチ単体での、各種フルードの耐シャダー寿命の評価を LVFA (Low Velocity Friction Apparatus) 試験機にて、油温 140°C の条件で行った。

2.3 フルードの分析

シャダー試験に伴うフルード添加剤の組成変化をフーリエ変換赤外分光 (FT-IR) 法により、主要元素の残存量を誘導結合型プラズマ発光分光 (ICP) 法により定量分析した。

3. 添加剤の最適化による耐シャダー寿命向上について

3.1 フルードの劣化メカニズム

図2に市販 ATF の実機耐久試験に伴う μ -v 勾配の経時変化を示す。縦軸は、すべり速度 0.23m/s 時の摩擦係数をすべり速度 0.009m/s 時の摩擦係数で除した値である。基本的に μ -v 勾配が 1 以上であれば摩擦係数は正の速度依存性を有し、耐シャダー性に優れる。図2より、市販 ATF は、耐久時間の増加と共に μ -v 勾配は低下し、シャダーが発生している。

ここで、本実施形態におけるシャダー発生要因(部材)を明確にするために、図3に示すように、シャダー発生後のフルードを新フルードに交換することによる μ -v 勾配の回復度合いを確認した。シャダー発生後、フルードのみを新フルードに交換することにより μ -v 勾配が、ほぼ初期値に回復している。これより、シャダー発生の主たる要因は、フルードの機能低下と判断される。

図4に実機耐久試験前後における市販 ATF のフルード中元素の経時変化を示す。ICP 分析により得られた特徴的なフルード中元素として、Ca 系金属清浄剤によるものと考えられる Ca、P 系極圧剤によるものと考えら

れる P および、クラッチ摩耗鉄分である Fe などが検出された。図4より、Fe の増加に伴い、Ca、P が著しく減少していることが分かる。さらに、耐久試験終了品の残留摩耗粉においてヘキサン不溶分の FT-IR 分析を行った結果、 $1\ 100\text{cm}^{-1}$ にリン酸鉄塩と推察される吸収帯を確認した。この結果から、活性な摩耗鉄分により P、Ca などの主要添加剤が化合物を生成し不溶分として減少したために、フルードの耐シャダー寿命が低下したものと推察された。

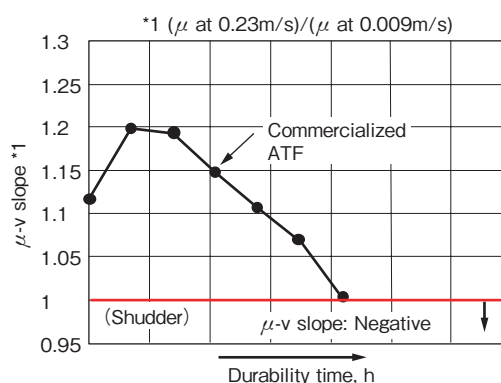


図2 μ -v勾配の経時変化
Change over time of μ -v slope

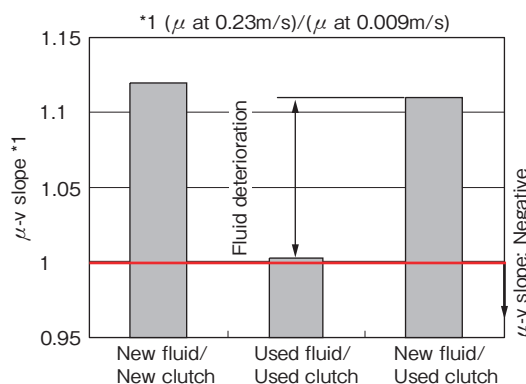


図3 シャダー発生後、フルードを交換した場合の μ -v勾配 (市販ATF)
 μ -v slope in case of fluid change after shudder occurrence (commercialized ATF)

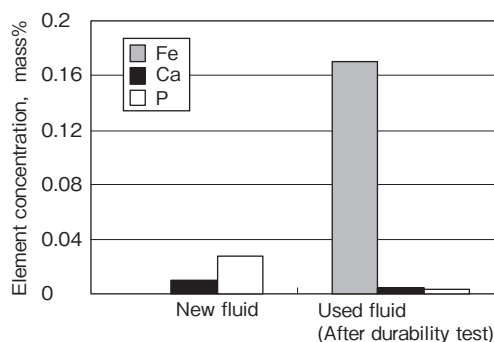


図4 フルード中元素の経時変化
Change over time of elements in fluid

図5に上述したメカニズムの立証試験として、市販ATFおよび、Ca系、P系添加剤を無配合とした試製フルードのペーパー湿式クラッチ単体における初期 μ - v 特性を示す。Ca系、P系添加剤を無配合とすることにより、初期状態から μ - v 負勾配となっており、シャッターが発生した。また、文献よりCa系金属清浄剤がシャッター防止寿命の延長に有効である^{6), 7), 9)}ことや、高すべり速度領域の摩擦係数を増大させ、低すべり速度領域の摩擦係数を低下させる(μ - v 正勾配)などの報告がなされている^{10), 11)}。したがって、シャッター防止性が低下した原因は、Ca系、P系添加剤などの主要添加剤の減少が関与しているものと推察される。

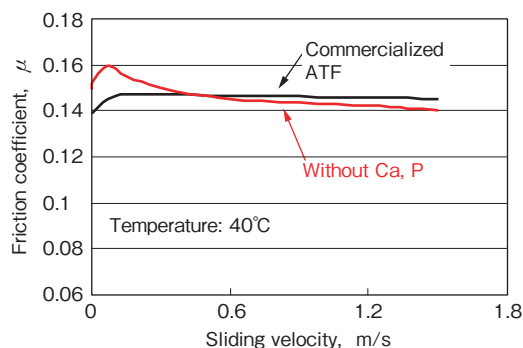


図5 μ - v 特性に及ぼすフルード添加剤の影響
Influence of additives on μ - v characteristics

3.2 主要添加剤の最適化

実機耐久試験後のフルードの分析および検証実験の結果、鉄分がフルード中に混入し、P系極圧剤やCa系金属清浄剤などが減少すると耐シャッター寿命が低下することが分かった。したがって、フルードの耐シャッター寿命が低下する原因は、鉄分混入によるP系極圧剤やCa系金属清浄剤の消耗による性能低下と推察された。これら

結果より、耐シャッター寿命の延長には摩耗防止性の向上が効果的であると考えられる。そこで摩耗防止性に影響を及ぼすP系極圧剤およびCa系金属清浄剤の量や種類の最適化を検討した。また、コハク酸イミド系分散剤¹¹⁾もITCCの摩擦特性に影響を及ぼす¹²⁾ことから、分散剤の最適化も含めて検討した。

試製油として、コハク酸イミド系無灰分散剤やFM (Friction Modifier) 剤、さらにP系極圧剤やCa系金属清浄剤を用い、それらの配合量を増加させ、種類を最適化したフルードについての耐シャッター寿命への影響について検討した。基油の影響についての詳細は、後述する。

これら供試油の一覧を表1に示す。

ここでは、単体LVFA (Low Velocity Friction Apparatus) 試験にて実機耐久状態を再現するため、鉄分を実機耐久試験後のフルード相当の含有レベルである0.18mass% 溶出させた試製油について検討した。図6に鉄分を溶出させた市販ATFおよびフルードA, B, Cの耐シャッター寿命を示す。市販ATFにおける添加剤の詳細は不明であるが、鉄分の混入により、耐シャッター寿命は大幅に低下し、72h後にシャッターが発生しており、実機の劣化加速状態が再現できた。鉄分を混入させ、コハク酸イミド系無灰分散剤およびアミン系FM剤を添加したフルードAは、耐シャッター寿命が90hとなっており、両者配合の効果が確認できた。さらに、P系極圧剤やCa系金属清浄剤、コハク酸イミド系無灰分散剤の配合量を増加させたフルードBにおいては、耐シャッター寿命が100hとなっており、これら添加剤増量の効果が認められた。また、フルードBよりCa系金属清浄剤の種類を最適化したフルードCにおいては、鉄分を溶出させても、耐シャッター寿命が170hとなっており、市販ATFと比較すると2倍以上向上していることが分かる。

表1 供試フルード
Test fluids

	Commercialized ATF	Fluid A	Fluid B	Fluid C	Fluid D
EP-agent	Phosphorus type	Phosphorus type A			
Phosphorus content (mass%)	0.03	0.03	0.055		
Metallic detergent	Calcium type	Calcium type A		Calcium type B	
Calcium content (mass%)	0.01	0.01	0.05		
Ashless dispersant	Succinimide type	Succinimide type A			
Concentration	Unknown	Normal	Increase		
Friction Modifier: FM	Unknown	Amine type A			
Base oil	Mineral	Mineral			Synthetic

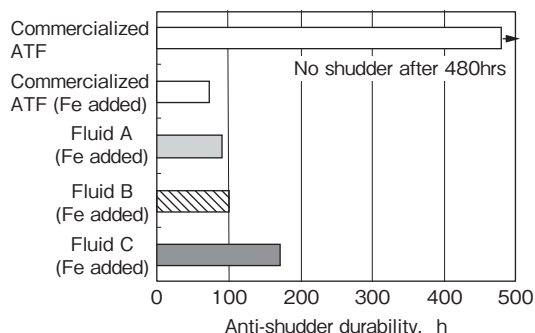


図6 フルード添加剤の耐シャッター寿命への影響
Effect of additives on anti-shudder durability

このような結果から、コハク酸イミド系無灰分散剤やアミン系 FM 剤、さらには P 系極圧剤や Ca 系金属清浄剤の増量および、種類の最適化が耐シャッター寿命の延長に有効であることが分かる。

図 7 に、ASTM D 4172 法に準拠し、回転数 1800min^{-1} 、荷重 294N 、温度 80°C 、時間 30min の条件で高速四球試験を行い、各種フルードの耐摩耗性の評価を実施した結果を示す。図 7 より、フルード A、B、C は、市販 ATF と比較して、摩耗量が減少しており、耐シャッター寿命の順序と一致している。これは、主要添加剤の最適化による添加剤自体の構造安定性のみならず、クラッチの鉄分摩耗を抑制させることが、フルードの耐シャッター寿命延長に寄与する可能性を示唆している。また、これら耐摩耗性の向上は、P 系極圧剤および Ca 系金属清浄剤などの配合量や種類の最適化が寄与しているものと考えられる。

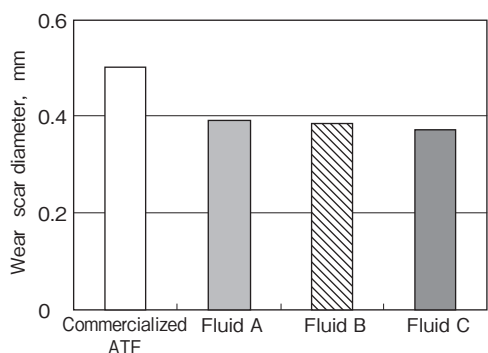


図7 高速四球試験による耐摩耗性の比較
Comparison of wear resistance in four ball wear test

図 8 に市販 ATF とフルード C のペーパー湿式クラッチ単体における初期 μ - v 特性を示す。図 8 より、フルード C の摩擦係数は、市販 ATF と比較して最低値で、約 6% 低下していることが分かる。これは、低すべり速度領域の摩擦係数を低下させる作用のある FM 剤と Ca 系

金属清浄剤によるものであり、実機において許容範囲内で調整した。また、図 9 に、上記供試油の最低摩擦係数 (at 0.006m/s) の経時変化を示す。図 9 より、初期状態ではフルード C は市販 ATF と比較して約 6% 低下しているものの、25h 以降においては、同等あるいは、それ以上の安定した摩擦係数を示していることが分かる。

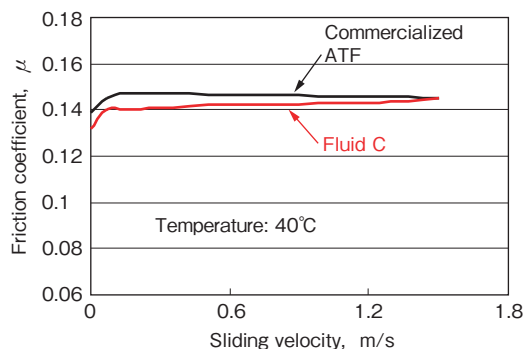


図8 市販ATFおよびフルードCの μ - v 特性
 μ - v characteristics of commercialized ATF and fluid C

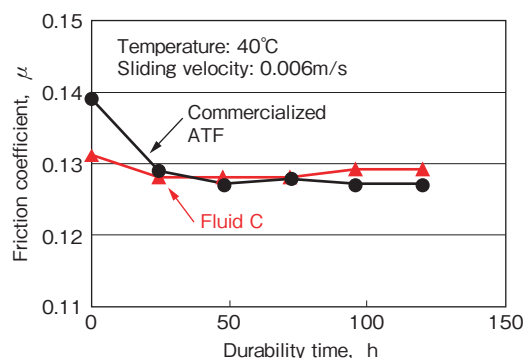


図9 市販ATFおよびフルードCの摩擦係数の経時変化
Change over time of friction coefficient of commercialized ATF and fluid C

以上の検討結果から推察される耐シャッター寿命向上メカニズムについてまとめる。図 10 に、遠山らによって提唱されているしゅう動面への表面生成物の模式図⁷⁾の改変図を示す。本研究において耐シャッター寿命を向上させた添加剤の作用機構としては、P 系添加剤により形成されたリン酸鉄皮膜に金属系清浄剤や分散剤、FM 剤などの塩基性化合物が吸着したものと考えられる。P 系添加剤を最適化することにより、長期にわたりこのリン酸鉄皮膜が形成され摩擦を制御する化合物が吸着可能であったこと、また、このリン酸鉄皮膜の形成により摩耗が抑制され Fe の溶出が少なかったことが耐シャッター寿命の向上に寄与したものと考えられる。同時に、構造安定性に優れる金属系清浄剤や FM 剤を使用したこともシャッター寿命の向上に寄与しているものと推察される。

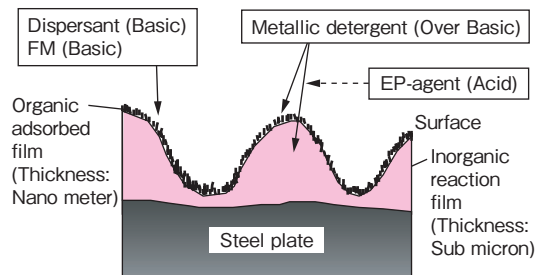


図10 スチールプレート表面への生成物の模式図 (改変：文献7)

Schematic of products on steel plate surface (alteration : literature 7)

4. 低温粘度の低減について

4.1 基油の低粘度化

フルードの低温粘度の低減においては、高温域での摩耗防止性の確保と高温粘度低下の対策が必要不可欠である。高温極圧域での摩耗防止性については、図11に示したように油膜の確保が重要となり、基油粘度や製品粘度が影響を及ぼす。一般的に粘度が高い程、極圧状況下において油膜形成能力に優れる。

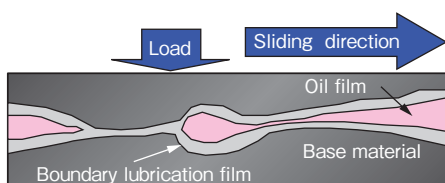


図11 極圧下の潤滑モデル

Lubrication model under extreme high pressure

これらニーズを満足させるために、基油の合成油化を検討した。図12に、合成系基油による粘度特性の向上イメージを示す。合成系基油を採用することにより、高温粘度を保持しつつ、低温粘度を低減させることが可能となる。また、高分子ポリマであるVII (Viscosity Index Improvers) を無配合にしても、良好な粘度指数を得ることができる。

図13に、鉱物系基油の市販ATFおよび合成系基油のフルードDの低温域におけるBF (Brookfield) 粘度比較を示す。フルードDは、低温域である-40℃のBF粘度を画期的に低下させており、市販ATFと比較して約80%の低減効果が見られる。

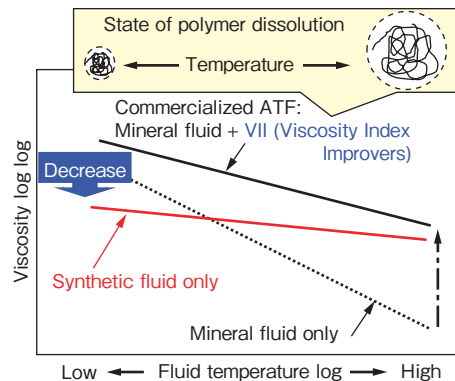


図12 合成油による粘度特性向上イメージ

Improvement of viscosity-temperature property using synthetic fluid (conceptual scheme)

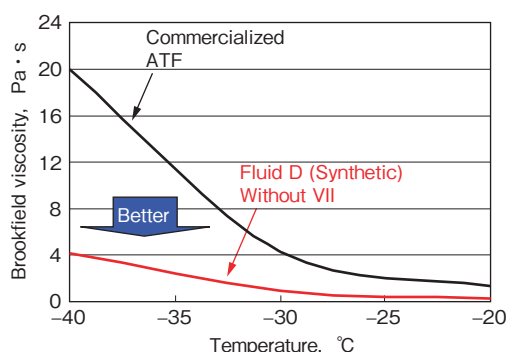


図13 フルードCおよび市販ATFの低温域の絶対粘度比較

Comparison of dynamic viscosity (bf) in low temperature region

一方、高温域での動粘度の低下については、耐摩耗性の低下やシールからの漏れが懸念される。そのため、開発フルードの高温粘度の目標値を耐久による経時変化も含めて、従来実績のある市販ATFにおける実機耐久後のレベルに設定した。すなわち、使用時に動粘度が $4.2\text{mm}^2/\text{s}$ 以下まで低下しない設計が重要となる。

図14に、100℃のせん断時間における動粘度の安定性比較を示す。せん断安定性の評価は、SONIC(超音波)せん断にて実施した。図14より、市販ATFにおいて、VIIのせん断劣化などにより、100℃の動粘度が低下しているが、合成油でかつVIIを無配合としているフルードDにおいては、せん断時間によらず安定している。また、フルードDの動粘度は、目標値である $4.2\text{mm}^2/\text{s}$ 以上を満足していることが分かる。以上のように、合成系基油の採用により極低温域の粘度を画期的に低減させ、かつ高温域の粘度も経時劣化の場合も含めた安定性を確保した。

図15に、市販ATFとフルードDのISOT (インデ

ィアナスターリング酸化安定度試験)による耐熱性評価の比較を示す。試験は、165°C、150hで実施し、各フルードの酸価変化を比較検討した。図15より、フルードDは、酸価増加が認められず耐熱性は、市販ATFと比べ非常に優れていることが分かる。酸価変化がマイナスの値を示しているのは、酸性物質の劣化によるものと推察される。

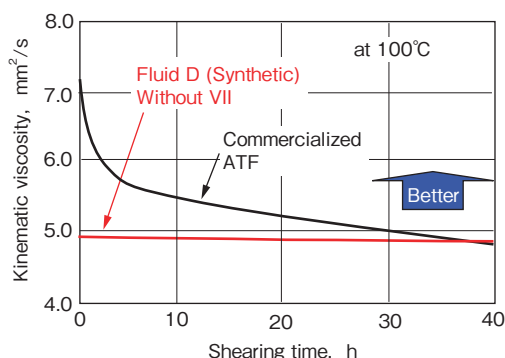


図14 高温域のせん断時間における動粘度の安定性比較

Shear stability of commercialized ATF and Fluid D

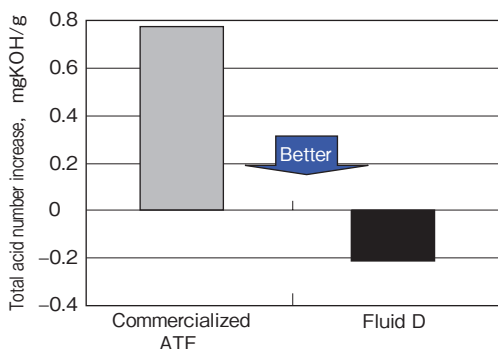


図15 フルードDと市販ATFの全酸価の比較

Comparison of total acid number increase between commercialized ATF and fluid D

これより、フルードDは、Feと主要添加剤との反応性を抑え、耐シャッター寿命の向上に寄与するものと考えられる。

5. 実機における性能評価

5.1 耐シャッター寿命および最大トルクの温度依存性評価

ITCC 実機を用いて、各種フルードの耐シャッター寿命の評価を実施した。図16に、市販ATFとフルードDの耐久試験に伴う、 μ -v 勾配の経時変化を示す。なお、本試験において、鉄分は無配合としている。図16より、フルードDでは市販ATFと比較して耐シャッター寿命

が画期的に向上していることが分かる。また、フルードA、B、Cにおける耐シャッター寿命の順序は、上述した単体LVFA試験結果と同様であった。

図17に、市販ATFとフルードDの実機耐久試験後における、スチールプレートの摩耗比を示す。摩耗比は、スチールプレートの耐久前後の板厚変化量から求めた。図17より、フルードDは市販ATFと比較してスチールプレートの摩耗を抑制しており、上述したメカニズムと符合する結果が得られた。

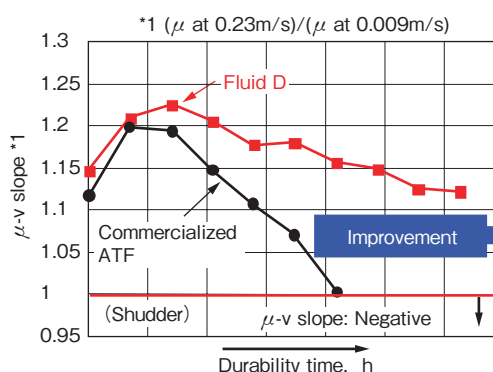


図16 μ -v勾配の経時変化

Change over time of μ -v slope

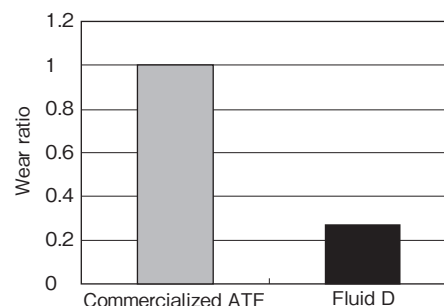


図17 実機耐久試験におけるスチールプレートの摩耗比比較

Comparison of wear ratio of after durability test

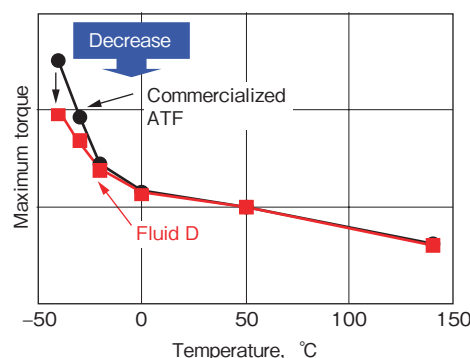


図18 最大トルクの温度依存性

Relationship between maximum torque and temperature

図18に市販ATFとフルードDの実機における、最大トルクの温度依存性を示す。図18より、フルードDは、市販ATFと比較して低温域の最大トルクを低減させていることが分かる。

以上のように、耐シャッター寿命を画期的に向上させつつ、低温域の最大トルクを低減させたフルードDは、ITCCの小型、高容量化を達成させ、かつリヤ駆動系の軽量化により、車両の低燃費化をさらに向上させており、使用環境が苛酷な仕向け地においても、信頼性の高い性能を確保している。

また、専用フルードであるTIFは、フルードDをコンセプトに開発されている。最後に、TIFを搭載したITCCは、2005年10月より量産を開始しており、国内外自動車メーカーで採用拡大いただいている。

6. おわりに

- (1)ITCCのシャッター発生メカニズムとして、鉄分によりP系極圧剤、Ca系金属清浄剤、コハク酸イミド系無灰分散剤などが化合物を作り不溶分として減少することにより、シャッター防止性が低下することを明らかにした。
- (2)シャッター防止のための添加剤の処方として、P系極圧剤、Ca系金属清浄剤、コハク酸イミド系無灰分散剤、アミン系FM剤の増量および最適化が有効であることを確認し、小型・高容量化を可能とする専用フルードを開発した。
- (3)低温域のフルード粘度低下は、合成系基油の最適化にて達成した。

*2 ITCCは、(株)ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 宅野 博, 酒井俊文, 酒井直行, 池田暁彦:自動車技術会学術講演会前刷り集, vol. 5(1998)95.
- 2) J. Ando, T. Saito, N. Sakai, T. Sakai, H. Fukami, K. Nakanishi, H. Mori, H. Tachikawa, T. Ohmori: SAE Paper, 2006-01-0820(2006).
- 3) 山本雄二, 兼田禎宏:理工学社(1998)46.
- 4) T. Kugimiya, J. Mitsui, N. Yoshimura, H. Kaneko, H. Akamatsu, F. Ueda, T. Nakada & S. Akiyama: SAE Paper, 952348(1995).
- 5) T. Kugimiya, N. Yoshimura, T. Kuribayashi, J.

Mitsui, F. Ueda, Y. Ando, T. Nakada & H. Ohira: SAE Paper, 972927(1997).

- 6) 遠山 護, 大森俊英, 三田修三, 植田文雄:トライボロジスト, vol. 47, no. 7(2002)49.
- 7) 遠山 護, 大森俊英, 三田修三, 植田文雄:トライボロジスト, vol. 47, no. 7(2002)59.
- 8) 社)自動車技術会:自動車規格M349-2001(2001).
- 9) K. Komiya and S. Shirahama: Proceedings of the International Tribology Conference Nagasaki(2000) 1361.
- 10) 釘宮貴徳:トライボロジスト, vol. 45, no. 5(2000) 387.
- 11) 釘宮貴徳:トライボロジスト, vol. 45, no. 5(2000) 396.
- 12) 安藤淳二, 酒井直行, 西 幸二, 桑原寛文, 大森俊英, 村瀬 篤, 江崎泰雄:2007年自動車技術会春季学術講演会前刷り集, 20075119(2007).

筆者



安藤淳二*
J. ANDO



酒井直行**
N. SAKAI



齊藤利幸***
T. SAITO



桑原寛文****
H. KUWABARA



黒澤 修*****
O. KUROSAWA

- * 軸受・駆動事業本部
カップリングシステム技術部
- ** 豊田工機トルセン株式会社 開発部
- *** 研究開発センター 材料技術研究部 工学博士
- **** 研究開発センター 材料技術研究部
- ***** 新日本石油株式会社 潤滑油事業部