

ATF添加剤のシャダー防止作用機構解析

遠山護，大森俊英，三田修三

Anti-Shudder Mechanism of ATF Additives

Mamoru Tohyama, Toshihide Ohmori, Shuzo Sanda

要 旨

オートマチックトランスミッション (AT) 搭載車の燃費を改善するため、ロックアップ (L/U) クラッチにおけるスリップ制御の採用が広まっている。このスリップ制御では、L/Uクラッチしゅう動部のスティック・スリップ現象に起因して生じる車両全体の振動 (シャダー) が発生しやすいことが問題となる。そのため、ATフルード (ATF) にはシャダーの発生を防止する特性が長期に渡って要求される。

本研究では、シャダー防止寿命が長いATFの設計指針を得ることを目的に、ATF添加剤の効果およびその作用機構を検討した。それによって、過

塩基性Ca-スルホネートおよび摩擦調整剤 (FM) が優れたシャダー防止効果を有し、両者の配合がATFのシャダー防止寿命の延長に有効であることを示した。

L/Uクラッチしゅう動面の解析結果から、シャダー発生の有無がスティール材の接触面粗さおよび境界摩擦特性に依存し、接触面粗さが大きく境界摩擦係数が小さいほど、シャダーが発生しにくくなることがわかった。接触面粗さの増大には過塩基性Ca-スルホネートが作用し、境界摩擦係数の低減には過塩基性Ca-スルホネートおよびFMが作用することを明らかにした。

キーワード

自動変速機，ロックアップクラッチ，ATF，添加剤，シャダー，摩擦，粗さ，摩擦調整剤，Ca-スルホネート

Abstract

A slip-controlled lock-up clutch system has been widely adapted in automatic transmissions for improving the fuel efficiency of the vehicle. The slip-control might induce a vibration, a so-called "shudder", caused by a stick-slip between the clutch surfaces. To prevent shudder from occurring for a long time, ATF's are required having a good anti-shudder property and improving anti-shudder durability.

In this study, the anti-shudder effect of ATF additives and their mechanisms have been investigated.

The addition of over-based Ca-sulfonate and friction modifiers (FMs) remarkably improved the anti-shudder

durability of ATF.

From the results of surface analyses, it was found that the shudder occurrence was correlated with the contact area roughness and the boundary frictional property of the steel plate surface. Large contact area roughness and low boundary friction coefficient were preferred to prevent shudder. It was suggested that the increase in the contact area roughness was caused by the over-based Ca-sulfonate and that lowering the boundary friction coefficient was caused by the over-based Ca-sulfonate and the FMs.

Keywords

Automatic transmission, Lock-up clutch, ATF, Additive, Shudder, Friction, Roughness, Friction modifier, Ca-sulfonate

1. はじめに

近年、オートマチックトランスミッション(AT)搭載車の燃費を改善するため、ロックアップ(L/U)クラッチにおけるスリップ制御の採用が広まっている¹⁾。スリップ制御によって、低車速度領域におけるL/Uクラッチの係合が可能となり、動力伝達効率が向上する。しかしながら、スリップ制御時には、L/Uクラッチしゅう動部のスティック・スリップ現象に起因して生じる車両全体の振動(シャダー)が発生しやすいことが問題となる。そのため、スリップ制御ATに用いられるATフルード(ATF)には、シャダーの発生を防止する特性が要求される。

スティック・スリップが生じるには、摩擦係数(μ)のすべり速度(v)に対する依存性(μ - v 特性)に負勾配性($d\mu/dv < 0$)があることが必要条件である。したがって、ATFのシャダー防止性を向上させるには μ - v 特性を正勾配化($d\mu/dv > 0$)することが有効となる²⁾。

ATFのシャダー防止性は、使用に伴う添加剤の変質・分解等によって低下する²⁾。そこでATFには、添加剤の変質・分解等を考慮した上で、十分に長いシャダー防止寿命を有することが求められる。

このような背景のもと、本報では優れたシャダー防止寿命を有するATFの設計指針を得ることを目的に、ATF添加剤のシャダー防止効果およびそれらの作用機構について検討した結果をまとめる。

2. ATF添加剤のシャダー防止効果

シャダー防止性向上への寄与が予想される添加剤としてCa-スルホネートおよび摩擦調整剤(Friction Modifier; 以後、FMと称す)に着目し、それらの配合がATFのシャダー防止効果に及ぼす影響を検討した。

2.1 供試ATF

試験に供した解析用ATFの組成をTable 1に示す。これらの試料油は、ATFとしての総合性能を確保した上で組成をできるだけ単純化した標準組成油(Std)を基準に、Ca-スルホネートの配合量、

種類およびFMの配合量を変えたものである。

2.2 シャダー防止寿命

ATFのシャダー防止性を実際のスリップ制御ATを用いたエンジン台上試験によって検討した³⁾。一定の連続スリップ条件で運転を行い、シャダーが発生するまでの所要時間によってシャダー防止寿命を評価した。

各試料油のシャダー防止寿命をFig. 1に示す。過塩基性Ca-スルホネートの配合量が異なるATF(Std ~ Without-Ca)を比較すると、配合量の多いものほどシャダー防止寿命が長い。中性タイプのCa-スルホネートを用いたN-Caは、Ca-スルホネートを配合していないWithout-Caと同程度となっている。また、FMを配合していないWithout-FMの寿命は、Stdに比べて半分以下まで短くなっている。

このような結果から、過塩基性Ca-スルホネートおよびFMがシャダー防止作用を有し、これらの配合がシャダー防止寿命の延長に有効であることがわかる。Ca-スルホネートについては、中性タイプでは効果が得られないことから、過塩基性成分である炭酸カルシウムが有効に作用していると推察される。

3. 接触面粗さ形成によるシャダーの防止

添加剤が関与し μ - v 特性に影響を及ぼす因子として、見かけの接触部(以後、接触ユニットと称す)上に存在する粗さ(以後、接触面粗さと称す)に着目し^{4,5)}、ATF添加剤の作用機構を検討した。

3.1 接触面粗さとシャダーとの関係

電子線式粗さ解析装置を用いて、シャダー試験後におけるL/Uクラッチのスティール材およびペーパー摩擦材の接触面粗さを測定した³⁾。粗さについては算術平均粗さ(Ra)によって整理した。

スティール材の接触面粗さとシャダーの発生、非発生との関係をFig. 2に示す。シャダーが発生していないなじみ運転後において、初期面よりも接触面粗さが大きくなっている。その際、過塩基性Ca-スルホネート配合量の多いものほど粗さが大きい。一方、シャダーが発生した耐久試験後で

は小さな粗さを呈している。これらの結果から、スチール材の接触面粗さとシャッターとの間には相関があり、粗さが大きいほどシャッターが生じにくくなっていることが考えられる。

N-CaはWithout-Caとそれほど大きな差がなく、Without-FMではFMを配合しているStdと同程度となっている。これらのことから、中性Ca-スルホネートおよびFMの接触面粗さに及ぼす影響は小

Table 1 Composition of experimental ATF.

	Concentration						
	Std (4/4-Ca)	3/4-Ca	2/4-Ca	1/4-Ca	Without -Ca	N-Ca	Without -FM
Over-based Ca-sulfonate	a	3/4 a	2/4 a	1/4 a	0	0	a
Neutral Ca-sulfonate	0					b	0
Amine-type FM	c					0	
Ester-type FM	d					0	
Phosphorus-type EP-agent	e						
Succinimide	f						
Anti-oxidant (A)	g						
Anti-oxidant (B)	h						
Polymethacrylate	i						
Silicone (Anti-formant)	j						
Base oil	rest						

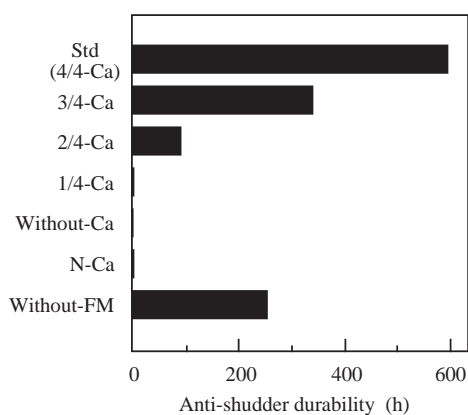


Fig. 1 Effect of ATF additives on anti-shudder durability.

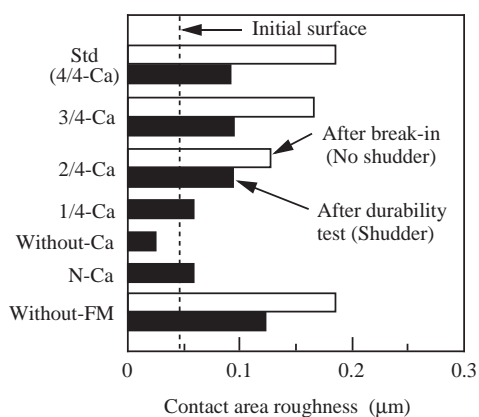


Fig. 2 Contact area roughness of steel plates.

さいことがわかる。

一方、ペーパー摩擦材の接触面粗さにはスチール材の場合とは異なり、シャダーとの相関が認められなかった。これは、スチール材に比べて柔らかいペーパー摩擦材では、荷重が付加された実しゅう動状態において粗さの大きさが全体的に小さくなることに起因すると推察される。

3.2 粗さ形成機構

スチール材の接触面における反応生成物の分布状態をエネルギー分散型X線分析(EDX)によって測定した。Stdを用いたなじみ運転後における、接触面粗さに対応付けたCa元素の分布状態をFig. 3に示す。粗さの凸部に対応する部分に白い点が多く表示され、選択的にCaが多く存在していることがわかる。また、Caと同一部分にOおよびPが多く検出された。

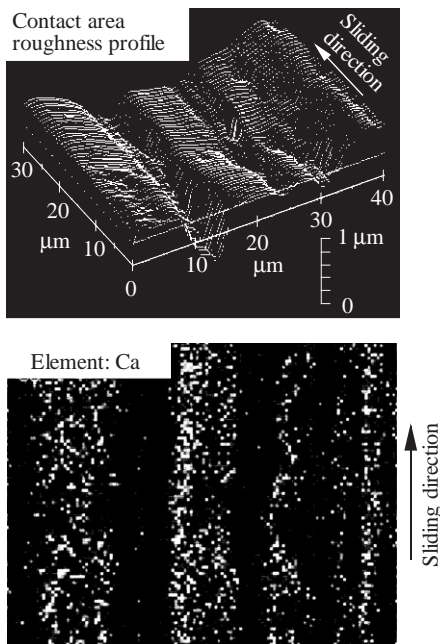


Fig. 3 Comparison of contact area roughness with distribution of element on steel plate. (After break-in used Std)

X線光電子分光分析(XPS)の結果、スチール材の接触面には酸化カルシウム、リン酸カルシウム、炭酸カルシウムおよびリン酸鉄の生成が示唆された。これらは、過塩基性Ca-スルホネート中の炭酸カルシウムおよびリン系極圧剤に起因する無機反応生成物である。

赤外分光分析(FT-IR)によって求めた、シャダー試験後におけるATF中の炭酸カルシウムの残存量とスチール材の接触面粗さとの関係をFig. 4に示す。炭酸カルシウム残存量の増加に伴い、接触面粗さが大きくなる傾向にある。一方、リン系極圧剤の残存量と接触面粗さの間には相関が認められなかった。

以上の結果から、スチール材の接触面粗さは、主として過塩基性Ca-スルホネート中の炭酸カルシウムがしゅう動面に無機反応物を生成することによって形成されたと推察される。

3.3 シャダー防止機構

湿式クラッチの摩擦状態に関して、表面を簡易的に同一断面形状の接触ユニットの集合体として表した混合潤滑モデルを先に提示した⁴⁾。モデルの概要をFig. 5に示す。このモデルに基づいて計算される μ - v 特性は、実験値と定性的に一致するとの結果が得られている。

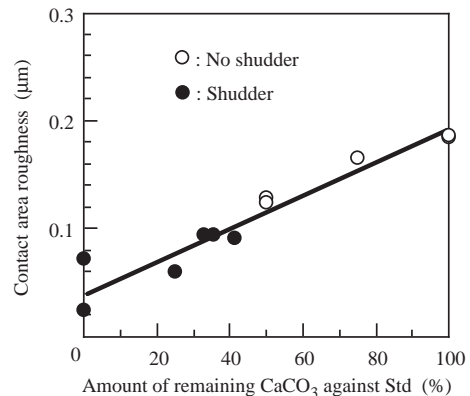


Fig. 4 Comparison between amount of remaining CaCO₃ in ATF and contact area roughness.

スチール材の接触面粗さを変えた場合の μ - v 特性の計算結果の一例をFig. 6に示す。粗さが大きい場合 (a) の方が、小さい場合 (b) に比べて全体の摩擦における μ - v 負勾配が小さい。摩擦の内訳に着目すると、粗さが大きい場合にすべり速度の増大に伴う境界摩擦成分の減少割合が小さくなっていることがわかる。これは、すべり速度の増大に伴い油膜形成が促進されるが、粗さが大きいと油膜が平均的に厚くなって固体接触が維持されることに起因する。このような理由により、3.1に示したスチール材における接触面粗さの増大は、 μ - v 負勾配を減少させ、シャダー防止に作用していると推察される。

4. 境界摩擦低減によるシャダーの防止

接触面粗さ以外の μ - v 特性への影響因子として固体接触部における境界摩擦特性に着目した。

4.1 境界摩擦特性とシャダーとの関係

シャダー試験後のL/Uクラッチ試片を脱脂した後、乾燥条件下でのボール・オン・プレート型摩擦試験³⁾に供することによって、摩擦面に形成さ

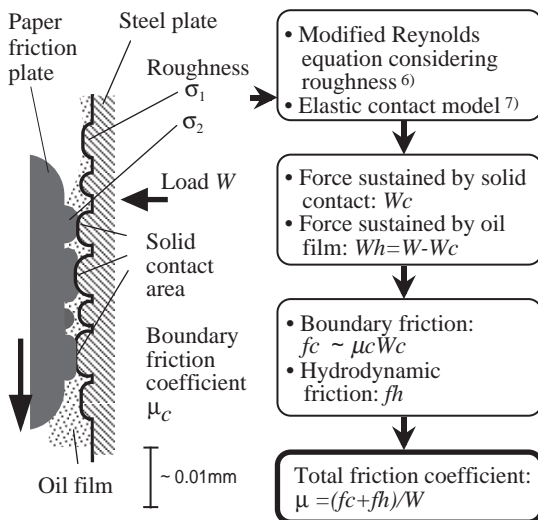


Fig. 5 Mixed lubrication model of a single contact unit.

れた添加剤に起因する吸着膜もしくは反応被膜の摩擦特性を評価した。得られた摩擦係数 μ_c' (Fig. 5中の μ_c とは同一ではない) を境界摩擦係数 μ_c の評価尺度とした。

スチール材しゅう動面での μ_c' の測定結果をFig. 7に示す。 μ_c' の大小とシャダーの発生、非発生との間には、3.1に示した接触面粗さの場合ほどの明瞭な相関は認められない。しかし、詳細に見ると、Std, 3/4-Ca, 2/4-CaおよびWithout-FMにおいて、いずれも μ_c' はシャダー非発生品の方で小さく、シャダー発生品で大きくなっている。このことから、接触面粗さのみならず、境界摩擦特性もまたシャダーに影響を及ぼし、境界摩擦係数の小さい場合にシャダーが生じにくくなっていると考えられる。

一方、ペーパー摩擦材の μ_c' は、供試ATFによらずおおむね一致しており、シャダーとの相関が認められなかった。今回の検討範囲内では、摩擦材へのATF添加剤の影響は小さいと考えられる。

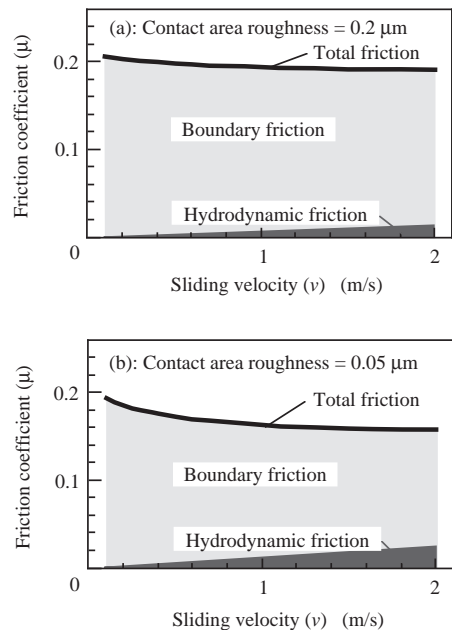


Fig. 6 Influence of contact area roughness on μ - v characteristics.

4.2 摩擦低減機構

スチール材の μ_c' を示したFig. 7において、過塩基性Ca-スルホネートに着目してStd, 3/4-Ca, 2/4-Ca, 1/4-CaおよびWithout-FMと比較すると、一般的に過塩基性Ca-スルホネートの配合量の多いものほど μ_c' が小さくなっている。また、中性Ca-スルホネートを配合したN-Caに比べて、過塩基性Ca-スルホネートを配合したStdの方が μ_c' は小さい。FMについては、配合品であるStdの方が、配合されていないWithout-FMよりも小さな値となっている。

これらの結果から、過塩基性Ca-スルホネートおよびFMには境界摩擦係数を低減する作用があると推察される。この摩擦低減作用は、スチール材の最表面に形成した有機吸着膜によってもたらされていると考えられる⁸⁾。

4.3 シャッター防止機構

接触面粗さと同様に、境界摩擦特性とシャッター防止性との関係について3.3で述べた潤滑モデル⁴⁾を用いて検討した。

スチール材の境界摩擦係数 μ_c を変えた場合の μ - v 特性の計算結果をFig. 8に示す。 μ_c が小さいFig. 8(a)の方が大きい場合(b)に比べて、 μ - v 負勾配性が小さい。これは、固体接触割合が大きい低すべり速度域ほど、 μ_c 低減の寄与度が大きくなるこ

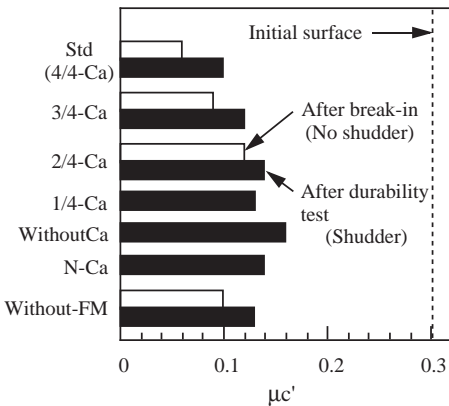


Fig. 7 μ_c' value of steel plates.

とに起因する。このような機構に基づき、4.1に示した過塩基性Ca-スルホネートおよびFMによるスチール材における μ_c の低減もまた、 μ - v 負勾配性の低減を通じ、シャッター防止に作用していると推察される。

5. ATF添加剤の作用機構

5.1 シャッター発生、非発生条件

台上シャッター試験後のすべてのスチール材試片における、シャッター発生の有無と接触面粗さおよび μ_c' の測定値との関係をまとめてFig. 9に示す。

接触面粗さと μ_c' との関係によって、シャッター発生域と非発生域とに二分されている。すなわち、シャッター発生の有無は、接触面粗さおよび μ_c' のどちらか一方ではなく、両者に依存していることがわかる。シャッターの防止に望ましいのは、接触面粗さが大きく、かつ μ_c' (すなわち境界摩擦係数) が小さい方向といえる。

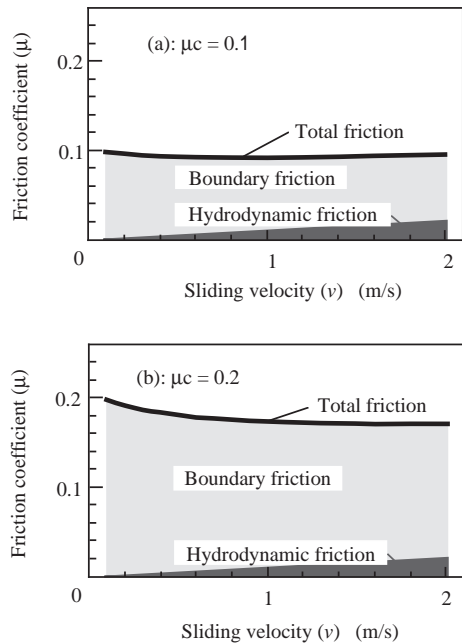


Fig. 8 Influence of μ_c on μ - v characteristics.

5.2 検証試験

試料油に 3/4-Caを用いてシャッターが発生するまで台上試験をいったん行った後、過塩基性Ca-スルホネートもしくはFMを再添加してシャッターを収束させた際、接触面粗さおよび $\mu c'$ がどのように変化するかを調査した³⁾。得られた結果をFig. 9

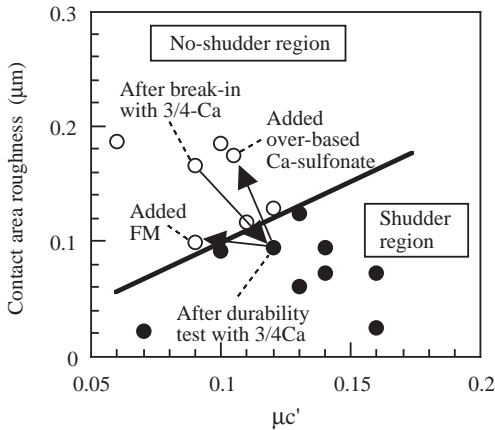


Fig. 9 Relationship between shudder, contact area roughness and $\mu c'$ of steel plates.

に併記する。

過塩基性Ca-スルホネートを再添加した場合、接触面粗さが大きくなると共に $\mu c'$ は小さくなり、プロットはシャッター非発生域に移行している。また、FMを再添加した場合には、接触面粗さはほとんど変化することなく、 $\mu c'$ だけが小さくなり、シャッター非発生域にプロットが移行している。

この結果は、接触面粗さの増大には過塩基性Ca-スルホネートが作用し、境界摩擦係数の低減には過塩基性Ca-スルホネートおよびFMが作用しているとの推察を裏付けるものである。

これまでの解析結果から推察されるスティール材しゅう動部の表面生成物を、模式的にFig. 10にまとめる。接触面粗さの増大は過塩基性Ca-スルホネートによる無機反応被膜の形成に起因し、境界摩擦係数の低減は過塩基性Ca-スルホネートおよびFMによる有機吸着膜の形成に起因すると判断される。

6.まとめ

Ca-スルホネートおよびFMのシャッター防止効果およびこれらの添加剤の作用機構について検討し、以下の知見を得た。

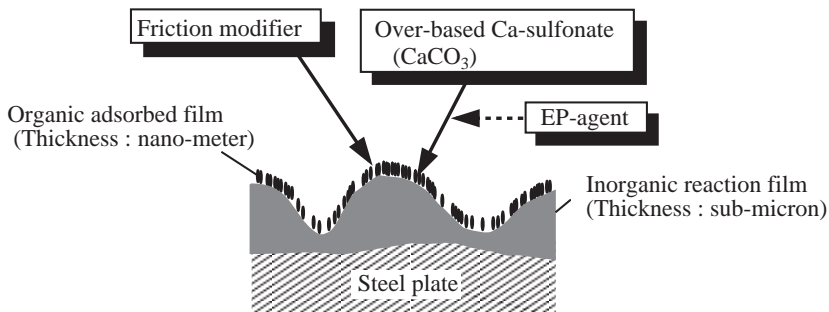


Fig. 10 Schematic illustration of mechanism of lowering boundary frictional property.

(1) 過塩基性Ca-スルホネートおよびFMは優れたシャダー防止効果を有し、両者の配合がATFのシャダー防止寿命の延長に有効である。

(2) シャダー発生の有無は、L/Uクラッチのステール材の接触面粗さおよび境界摩擦特性に依存する。接触面粗さが大きく、また境界摩擦係数が小さいほど μ - v 負勾配性が減少し、シャダーが発生しにくくなる。

(3) 過塩基性Ca-スルホネートのシャダー防止作用は、ステール材表面における無機反応被膜の形成による接触面粗さの増大ならびに最表面での有機吸着膜の形成による境界摩擦係数の低減にあると推察される。

(4) FMのシャダー防止作用は、ステール材最表面での有機吸着膜の形成による境界摩擦係数の低減にあると推察される。

謝辞

本研究はトヨタ自動車(株)との共同研究によるものであり、ご協力頂いた関係各位に謝意を表します。また、当所分析部有機分析研究室の江崎泰男氏、ミクロ解析研究室の磯村典武氏、高橋直子氏ならびに関係各位に協力して頂いた。

参考文献

- 1) 河野克巳, ほか2名: 自動車技術, 50-9(1996), 89
- 2) Kugimiya, T., et al.: SAE Tech. Pap. Ser., No.952348(1995)
- 3) Tohyama, M., et al.: SAE Tech. Pap. Ser., No.1999-01-3616 (1999)
- 4) Sanda, S., et al.: Proc. Int. Trib. Conf., Yokohama 1995 (1996), 1519
- 5) Suzuki, A., et al.: Proc. Int. Trib. Conf., Yokohama 1995 (1996), 1525
- 6) Patir, N. and Cheng, H.: Trans. ASME; J. Lub. Tech., 100 (1978), 12
- 7) Greenwood, J. A. and Tripp, J. H.: Proc. IMechE, 185 (1971), 625
- 8) 益子正文, ほか2名: トライボロジスト, 30-6(1985), 422 (2000年4月3日原稿受付)

著者紹介



遠山護 Mamoru Tohyama
 生年: 1967年。
 所属: 動力伝達研究室。
 分野: 潤滑油・摩擦材料に関する研究・開発。
 学会等: 日本トライボロジー学会会員。
 1994年度日本トライボロジー学会論文賞受賞。



大森俊英 Toshihide Ohmori
 生年: 1959年。
 所属: 動力伝達研究室。
 分野: 潤滑油・摩擦材料に関する研究・開発。
 学会等: 日本トライボロジー学会, 日本塑性加工学会会員。
 1991年度日本潤滑学会(現日本トライボロジー学会)論文賞受賞。
 1991年R&D100 Award受賞。
 1996年東海化学工業会賞受賞。
 工学博士。



三田修三 Shuzo Sanda
 生年: 1956年。
 所属: 動力伝達研究室。
 分野: 変速機・パワートレーンの摩擦, 動力伝達要素のトライボ特性に関する研究・開発。
 学会等: 日本機械学会, 日本トライボロジー学会, 自動車技術会会員。
 1995年自動車技術会論文賞受賞。
 工学博士。