

遊星歯車式トルク感応型 LSD の摩擦挙動に及ぼす粗さとコーティングの影響^{* 1}

Effects of Roughness and Coating on Frictional Behavior of Planetary Gear Type Torque-Sensing LSD

安藤淳二 J. ANDO 安藤寛之 H. ANDO 齋藤秀幸 H. SAITO
 宅野 博 H. TAKUNO 原 利美 T. HARA 酒井直行 N. SAKAI
 山下洋三 Y. YAMASHITA 遠山 護 M. TOHYAMA 大森俊英 T. OHMORI

A planetary gear type torque-sensing limited slip differential (LSD) must prevent stick slip and allow smooth sliding between contact surfaces. This development aimed to achieve a fine roughness on the sliding surfaces along the planetary gear circumference to make it possible to acquire stable frictional characteristics.

Furthermore, these frictional characteristics can be studied in theory without testing on actual units by mixed lubrication analysis, which models the roughness of the planetary gear circumference. In addition, applying carbon-based hard-coating to the planetary gear secured durability against wear and seizure, characteristics normally sacrificed at the expense of roughness.

Key Words: power transmission, all-wheel drive system, limited slip differential, roughness, coating

1. はじめに

近年、安全性や走行安定性の向上を求める市場ニーズに伴い、世界的に全輪駆動（AWD：All-Wheel Drive）の重要性が再認識されつつある。

また、車両ニーズの多様化にこたえ、さまざまな AWD 機構が研究開発されており、大別すると図 1 に示すフルタイム式、オンデマンド式、およびパートタイム式となる。1980 年代に入るところから AWD の開発が活発化し、現在までに多数のシステムが考案され、それぞれの特長を活かして実用化されている。

フルタイム式の一例として、図 2 に示すメカニカルなデファレンシャル機構（以下デフと称す）をセンタデフとして用いた例を示す。この AWD システムは、遊星歯車式トルク感応型 LSD（Limited Slip Differential）であり、高性能な車両に広く採用されている。エンジンのトルクは常に 4 輪に伝えられており、安定した駆動力伝達を可能とするとともに、前後の差回転を許容するデフの働きによりフルタイム化と機構がメカニカルのため、高い応答性と信頼性を実現している^{1), 2)}。

本報では、遊星歯車式トルク感応型 LSD について、その信頼性に大きく影響を及ぼしているトライボロジー技術について述べる。

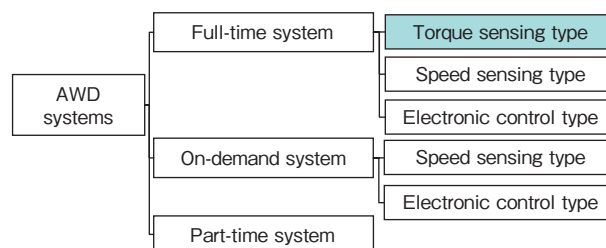


図 1 AWDシステムの分類
 Classification of AWD systems

2. 遊星歯車式トルク感応型LSDの構造

遊星歯車式トルク感応型 LSD は、通常のデフ機能に加え差動制限機能も併せ持つ。その中でも AWD 用に特化したタイプを本報では取り上げる。この AWD タイプの歯車式トルク感応型 LSD は、エンジン入力に応じて差動制限力を得る機構を有しており、図 2 に示すように、プラネタリギヤ、ハウジング、サンギヤ、インターナルギヤ、およびワッシャから構成される。その特長はプラネタリギヤのハウジングへの保持方法にある。プ

* 1 本論文は、自動車技術会論文集（vol. 42, no. 2, March 2011, p. 379-384）を基に作成した。

ラネタリギヤは、ハウジングに設けられたボアに、固定ピン無しで回転可能なように収納されており、プラネタリギヤトップランドは、ハウジングボア面から法線荷重を受ける。ハウジングに入力されたエンジントルクは、プラネタリギヤを介してサンギヤとインターナルギヤに分配される。差動制限には、主にワッシャ表面および図3に示すプラネタリギヤ外周部の摩擦力が利用されている。サンギヤとインターナルギヤへのトルク分配は、

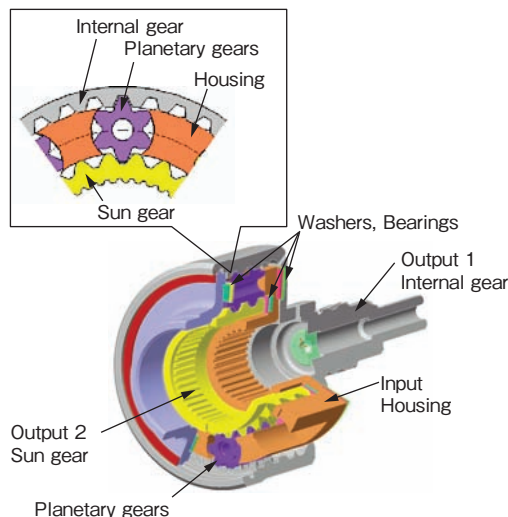


図2 遊星歯車式トルク感应型LSDの構造
Structure of planetary gear type torque-sensing LSD

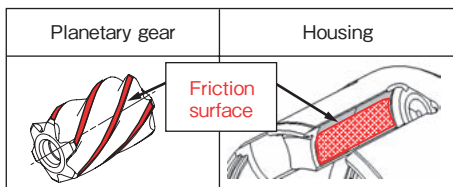


図3 プラネタリギヤ外周部およびハウジングボアのしゅう動面
Sliding surfaces of the planetary gear circumference and housing bore

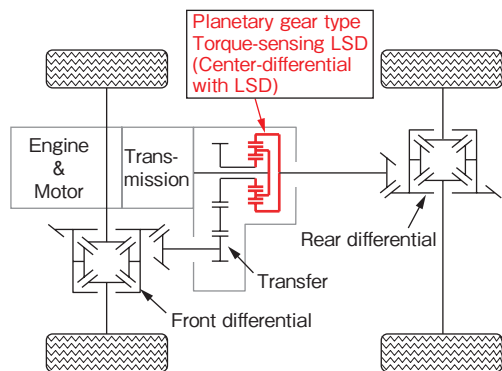


図4 遊星歯車式トルク感应型LSDのAWDレイアウト
AWD layout of planetary gear type torque-sensing LSD

構造上それぞれのかみあい半径比に応じて不等配分となる。図4に遊星歯車式トルク感应型LSDのAWDレイアウトの一例を示す。本遊星歯車式トルク感应型LSDは、トルクが不等配分であるために、センタデフ用に特化される²⁾。

3. 遊星歯車式トルク感应型LSDのトライボロジー

3.1 遊星歯車式トルク感应型LSDのしゅう動面形状と摩擦解析

車両の走行状態により、遊星歯車式トルク感应型LSDは、内部で摩擦しながら差回転を生じる場合がある。この際、しゅう動部のスティックスリップを抑制しつつ、スムーズに摩擦させることが求められる。スティックスリップは、摩擦係数(μ)の速度(v)に対する依存性(μ - v 特性)が負勾配を持つときに発生することが知られている³⁾。したがって、スティックスリップの防止には μ - v 特性の負勾配性を低減し、より正勾配($d\mu/dv \geq 0$)に近づけることが有効である。 μ - v 特性には、しゅう動面形状と材質の最適化やフルードに配合される各種添加剤が大きく影響を及ぼす^{4), 5)}。したがって、車両の静粛性向上には、この μ - v 特性の改善がきわめて重要となる。

図5に車種の異なるA車およびB車の振動量と μ - v 勾配の関係を示す。A車と比較して、B車は車両自体の静粛性や防振性が異なるため、振動に対する感度に違いがある。これはLSDに要求される耐振性能(μ - v 特性)が車種ごとに異なる、すなわち、B車においては、A車よりさらに優れた耐振性を有するLSDが必要となることを意味する。

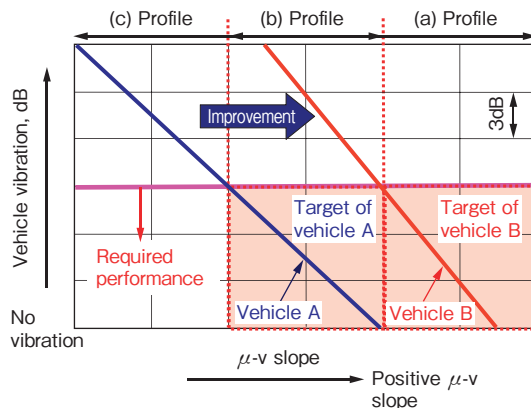


図5 車両振動量と μ - v 勾配の関係(車両A vs 車両B)
Relationship between vehicle vibration amount and μ - v slope (Vehicle A vs B)

この課題に対する制振技術（自励振動の抑制）の一例として、図 6 (a), (b), (c) および図 7 に、プラネタリギヤ外周部の 3 種類のしゅう動面粗さおよびハウジングボア面の粗さプロファイルを示す。しゅう動面粗さは、それぞれプラネタリギヤとして $Ra=2.5, 1.25, 0.125\mu\text{m}$ 、ハウジングボア面として $Ra=0.6\mu\text{m}$ とした。なお、表面粗さは、触針式粗さ測定機により、JIS B 0601-2001 (ISO 4287-1997) 規格に準じて測定長 4mm、カットオフ 0.8mm の条件で測定した。これら凹凸形状の耐振効果について、プラネタリギヤ外周部とハウジングボア面の潤滑モデルを用いて、しゅう動面粗さと μ - v 特性の関係について解釈を試みる。

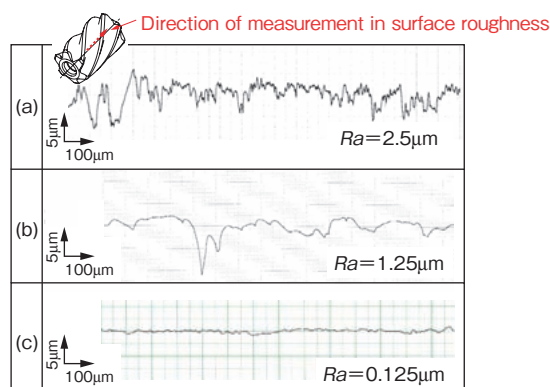


図 6 プラネタリギヤ外周部のしゅう動面プロファイル
(a) $Ra = 2.5\mu\text{m}$, (b) $Ra = 1.25\mu\text{m}$,
(c) $Ra = 0.125\mu\text{m}$

Sliding surface profile of the planetary gear circumference
(a) $Ra = 2.5\mu\text{m}$, (b) $Ra = 1.25\mu\text{m}$, (c) $Ra = 0.125\mu\text{m}$

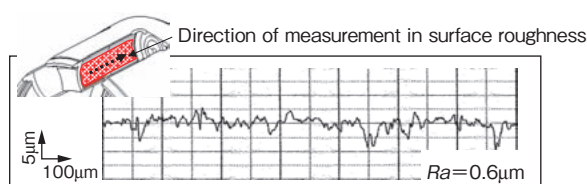


図 7 ハウジングボアのしゅう動面プロファイル
Sliding surface profile of the housing bore

本しゅう動材料の油中での摩擦は、図 8 に示すイメージで表され、フルードのせん断抵抗による流体摩擦と固体接触による境界摩擦が混在する、混合潤滑状態にあると仮定した。また、本解析は、しゅう動面の油膜反力によって変化する境界潤滑や混合潤滑などの巨視的な潤滑状態の摩擦特性を解析することを主眼においており、油膜厚さの増大に伴い影響が少なくなるフルード添加剤の影響は無視した⁶⁾。

理論解析のために、プラネタリギヤ外周部とハウジングボア面の摩擦界面を簡略化したモデルを図 9 に示す。

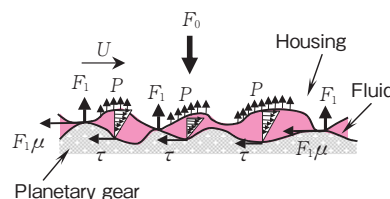


図 8 摩擦の概念 (油中)
Concept of friction force (in fluid)

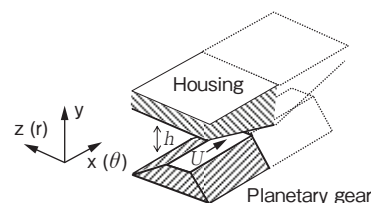


図 9 しゅう動面粗さの混合潤滑モデル

Mixed lubrication model of sliding surface roughness

ハウジングボア面およびプラネタリギヤ外周部の粗さは、それぞれ図 10 および図 11 (a), (b), (c) に示すような高さプロファイルを有する、くさび形の突起と仮定した。なお、くさび突起高さおよびピッチは、それぞれ平均粗さ Ra と粗さの高速フーリエ変換解析によって得られる粗さ波長の代表値とした。

ハウジング入力による押付け力 F_0 による固体接触部の抗力 F_1 は

$$F_1 = F_0 - \iint P \, dr \, d\theta \quad (1)$$

P はフルードによる油圧反力を、 r および θ はそれぞれ図 9 に示すようなしゅう動方向の垂直方向、および円周方向（しゅう動方向）を表す。固体摩擦による摩擦トルク T_F は

$$T_F = \int \frac{2\pi r^2 F_1 \mu_b}{A} \, dr \quad (2)$$

A はしゅう動部の見かけの接触面積を、 μ_b は固体同士の境界摩擦係数を表す。

次に、フルードの粘性によるトルク T_f は

$$T_f = \iint \tau r \, dr \, d\theta \quad (3)$$

τ は壁面に働くフルードのせん断応力を表し、 P は簡略化した流体運動方程式から、 τ はニュートンの粘性の式から、それぞれ次式で表される。

$$h^3 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + h^3 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 6MU \frac{dh}{dx} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{h}{2} \frac{dP}{dx} + M \frac{U}{h} \quad (5)$$

M はフルードの粘度を, U はすべり速度を表す。
したがって, 全トルク T_0 は

$$T_0 = T_F + T_f \quad (6)$$

となり, T_0 から油圧反力を考慮した境界摩擦と, フルードのせん断抵抗による流体摩擦を含めたトータル摩擦係数を算出した。なお, 固体摩擦による境界摩擦係数は $\mu_b = 0.12$ とし, 押付け力 F_0 は実機トルクから換算した 3 800N とした。

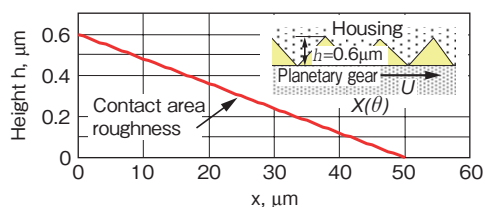


図10 ハウジングボアのしゅう動面モデル (x 方向)
Housing bore sliding surface model (x direction)

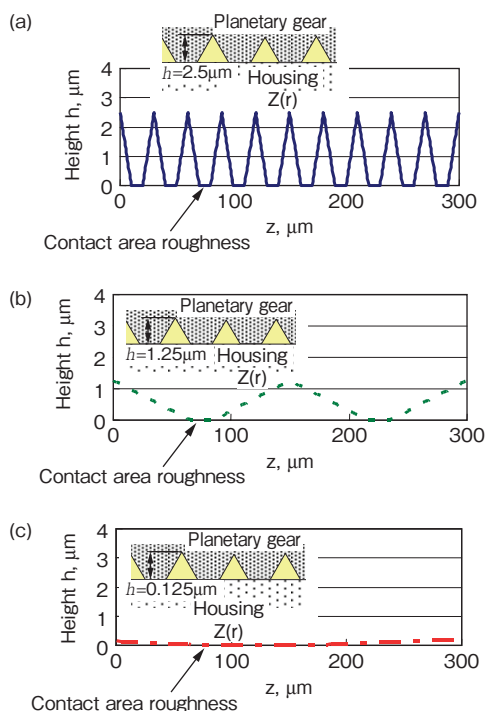


図11 遊星歯車外周部のしゅう動面モデル (z 方向)
(a) $Ra = 2.5\mu\text{m}$, (b) $Ra = 1.25\mu\text{m}$,
(c) $Ra = 0.125\mu\text{m}$
Sliding surface model of the planetary gear
circumference (z direction)
(a) $Ra = 2.5\mu\text{m}$, (b) $Ra = 1.25\mu\text{m}$, (c) $Ra = 0.125\mu\text{m}$

ここで, プラネタリギヤ外周部の粗さモデルとして, 図11に示すように3水準の粗さを有する場合について, 上述した混合潤滑解析を実施する。

図11(a)に示す粗さを有する場合の解析結果を図12に示す。図12より, 流体摩擦成分と油圧反力を考慮した境界摩擦成分の複合として, トータル摩擦係数が算出可能となった。各種しゅう動面粗さが及ぼす, トータル摩擦係数とすべり速度の関係を表した解析結果を図13に示す。図6(a)プロファイルを付与することによって, プラネタリギヤ外周部とハウジングボア間の μ - v 特性が正勾配となることが分かった。

駆動力伝達装置における耐振性は, 上述したように μ - v 特性が大きく影響を及ぼす。図6(a)に示すような粗さをプラネタリギヤ外周部に形成させることで, 表面の凹凸がすべり速度の増大に伴う過剰な油膜形成を防止する。このプロファイルは, 図5において, 耐振性要求が高いB車の成立領域を満足する。

また, B車においては, 図6(b)に示す粗さを適度に有するプロファイルでは, 要求 μ - v 特性を満足しないものの, A車においては, 図5に示すように, 車両要求 μ - v 特性を満足することができる。つまり, 車両に

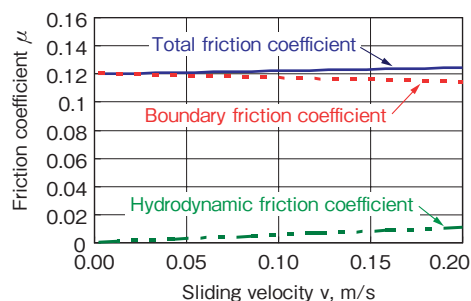


図12 摩擦係数とすべり速度の関係
(計算結果: 粗さ (a) の場合)

Relationship between friction coefficient and sliding velocity (Calculated results: For roughness (a))

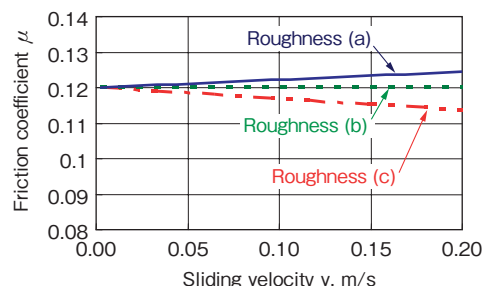


図13 摩擦係数とすべり速度の関係
(計算結果: 粗さ (a), (b), (c) の場合)

Relationship between friction coefficient and sliding velocity (Calculated results: For roughness (a), (b), (c))

よっては適度な粗さで十分な耐振効果が得られる場合もある。図 6 (c) に示す粗さが小さい場合においては、 μ - v 正勾配の維持が困難となり、図 5 に示すように A 車においても、耐振性が不足する。

これらの表面凹凸形状によって、安定した正勾配の μ - v 特性を得ることができる。

さらに、図 14 に実機ユニット（車両 B）における、車両振動量と μ - v 勾配の関係を示す。横軸の μ - v 勾配は、0.186m/s 時の摩擦係数を 0.0046m/s 時の摩擦係数で除した値である。プラネタリギヤに付与した凹凸形状によって、 μ - v 勾配が正勾配化し、車両の静粛性が向上しており、机上検討と符合する結果が得られていることが分かる。

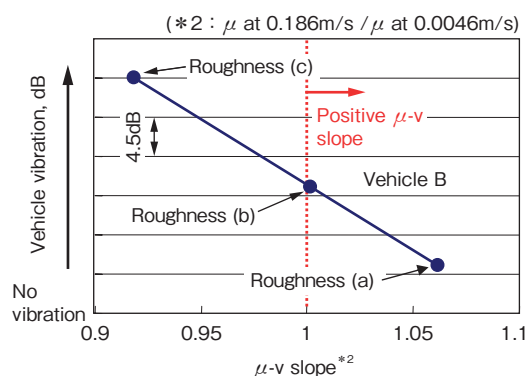


図 14 車両振動量と μ - v 勾配の関係（実機ユニットの実験結果：粗さ (a), (b), (c) の場合）

Relationship between vehicle vibration amount and μ - v slope (Results of actual unit testing: For roughness (a), (b), (c))

3.2 プラネタリギヤしゅう動面におけるコーティング技術

遊星歯車式トルク感应型 LSD のプラネタリギヤトップランドは、上述のように耐振性確保のために、表面に適度な凹凸形状を形成する必要があるが、凹凸を形成すると、しゅう動部の局部面圧が上昇することで摩擦が増大し、早期に凹凸は摩耗し、耐久性が低下する。つまり、耐振性能（凹凸）と耐久性（摩耗・焼付き）は、図 15 に示すようにトレードオフの関係にある。この背反する課題を先進の PVD（Physical Vapor Deposition：物理蒸着）法の一つであるマグネトロンスパッタ（Magnetron Sputtering）法を用いた炭素系硬質コーティングにより解決している。その一例として、WC（Tungsten Carbide）と DLC（Diamond-Like

Carbon）のナノ多層膜 a-C:H:W を示す⁷⁾。互いにしゅう動するプラネタリギヤ外周部の凹凸形状をミクロンスケールで最適設計し、その維持を炭素系硬質コーティングで実現している。(a) プロファイルの粗さを形成し、炭素系硬質コーティングを施したプラネタリギヤトップランドの破断面 SEM 像を図 16 に示す。図 16 より、母材から順に Cr 層、WC 層、WC/DLC 多層膜が全体で 3 μ m 程度形成されていることが分かる。さらに、最表層には、すべり方向と平行の粗さ状態が確認される。また、本コーティングは、遊星歯車式トルク感应型 LSD の耐焼付き性の向上にも寄与している。

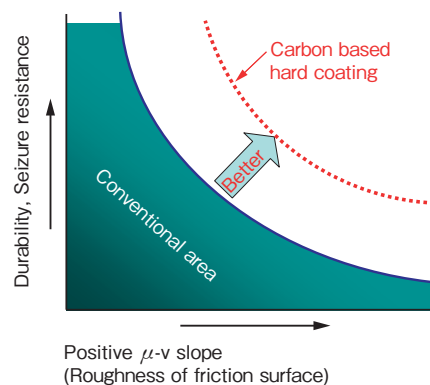


図 15 耐久性と μ - v 勾配の関係
Relationship between durability and μ - v slope

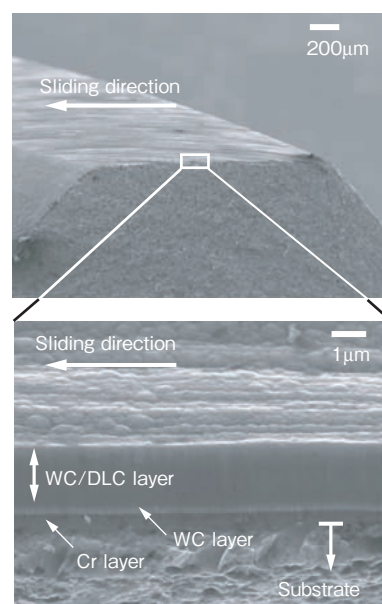


図 16 炭素系硬質膜を被覆した遊星歯車の破断面 SEM 像

SEM image of planetary gear fracture cross-section with carbon-based hard-coating

焼付き限界向上を検討するために用いたファレックス試験機の模式図を図17に示す。炭素系硬質コーティングを施したピン、もしくはコーティング無しのピンを開口角 96° の V ブロックで挟み込み、ピンを回転させ摩擦係数を計測する。徐々に V ブロックの締付け荷重を増加させて、摩擦係数が急激に増大する荷重を焼付き限界とした。図18に示すように、炭素系硬質コーティングを施したピン試験片は、コーティングを施さなかったピン試験片に比べ、耐焼付き荷重が大幅に向上していることが分かる。このように、凹凸を形成することにより背反となる焼付き性能を、炭素系硬質コーティング技術により解決し、図15に示すように μ -v 特性（耐振性）と摩耗・焼付き特性の背反する事象を克服した。

次に、凹凸形状を施すことにより増大する面圧の影響について検討した。図19に示すように、線接触の V ブロックを内接面接触の曲率半径 4.15mm の R ブロックに変更することにより接触面圧を低下させ、さらに外径の異なる2種類のピン試験片（半径 4mm, 3.175mm）を用いることにより接触面積、すなわち面圧を変化させた。表面粗さは、ブロック側を $R_a = 0.55\mu\text{m}$ として、ピン側はそれぞれ $R_a = 2\mu\text{m}$ とした。 μ -v 勾配に及ぼす面圧あるいは接触面積の影響を図20に示す。

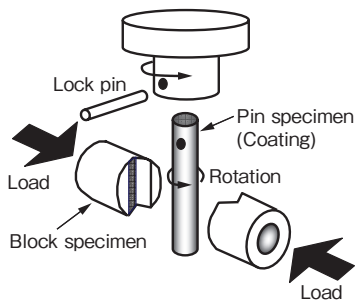


図17 ファレックス摩擦試験機の模式図
Schematic diagram of a Falex friction tester

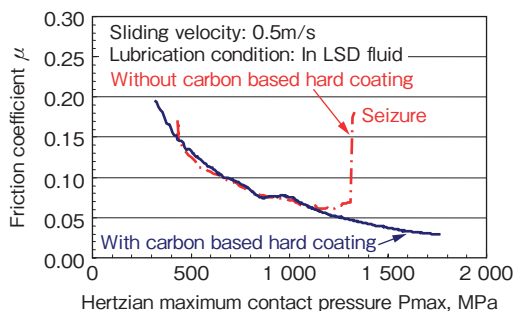


図18 ファレックス摩擦試験機による限界焼付き荷重試験

Critical load test for seizure using a Falex friction tester

図20より、ピン外径が小さい、すなわち面圧が高い場合は（図19(b), 912MPa）、 μ -v 勾配が負勾配であるのに対し、ピン外径が大きい、すなわち面圧が低い場合は（図19(a), 319MPa）、 μ -v 勾配が正勾配となっており、この低い面圧の場合は適度な面圧であることが分かる。

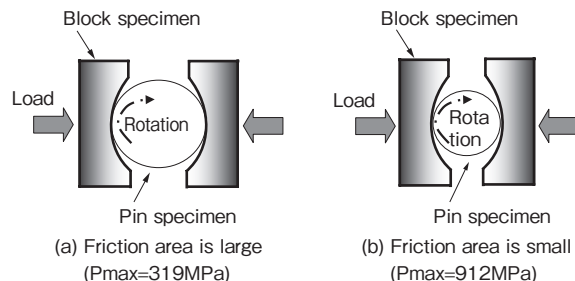


図19 2種類の面圧およびしゅう動面積のテストピース

2 test pieces of differing surface pressures and sliding surface area

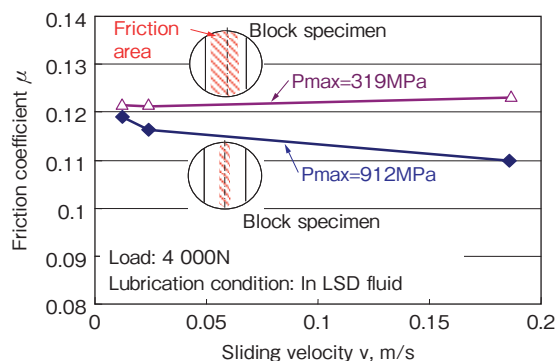


図20 ファレックス試験による面圧およびしゅう動面積が及ぼす μ -v 特性への影響

Effects of surface pressure and sliding surface area on μ -v characteristics measured using a Falex friction tester

これらの結果を、(a) プロファイルのしゅう動面における、 μ -v 勾配と接触圧力の関係として図21に示す。これまで述べてきたように、 μ -v 勾配を正勾配化させるためには、しゅう動面に凹凸形状を付与する必要がある。

一方、凹凸形状をしゅう動面に形成すると、摩擦面局部の面圧が増大するが、上述のように過大な面圧の上昇は、 μ -v 負勾配を誘発させる。その原因としては、油中の極圧添加剤によって形成される極圧反応被膜や FM (Friction Modifier) 剤によって形成される有機吸着膜の生成が、過大な面圧によって摩耗ないし脱落することで阻害されるためと推察される。したがって、本遊星歯車式トルク感应型 LSD は、凹凸形状を付与しても、面圧を (d) 点以下に設計することで正勾配の μ -v 特性を確保している。

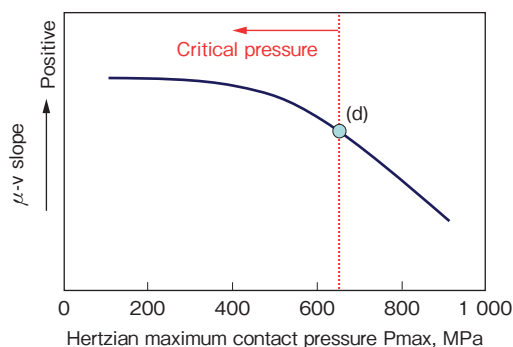


図21 μ - v 勾配と接触面圧の関係

Relationship between μ - v slope and contact surface pressure

これらの結果より、プラネタリギヤトップランドとハウジングボア面の適切なしゅう動面積を確保することで、安定した摩擦特性を得ることが可能となった。

以上のように、図22に示す遊星歯車式トルク感应型LSDは、しゅう動環境が過酷なギヤ部においても、先進のトライボロジー技術によって、その信頼性を確保している。これらトライボロジー技術をコアとした研究開発により、遊星歯車式トルク感应型LSDの信頼性および静粛性の向上が可能となった。

また、本遊星歯車式トルク感应型LSDは、トルセンタイプC[®]という商品名で、国内外自動車メーカーで採用拡大いただいている。



図22 開発された遊星歯車式トルク感应型LSDの外観（車両B）

Appearance of developed planetary gear type torque-sensing LSD (Vehicle B type)

4. まとめ

- (1) 遊星歯車式トルク感应型LSDの制振技術として、プラネタリギヤ外周部に適切な粗さを付与することで、耐振性能が良好（ μ - v 正勾配）となった。
- (2) プラネタリギヤ外周部およびハウジングボア面の粗さをモデル化した混合潤滑解析にて、実機の μ - v 特性に与える粗さの影響が定性的に把握できた。
- (3) 表面凹凸形状とトレードオフの関係にある耐摩耗性および耐焼付き性の確保は、プラネタリギヤへの炭素系硬質コーティングの採用、および摩擦面積の最適化により達成した。
- (4) プラネタリギヤ外周部への凹凸形状の付与、および炭素系硬質コーティングにより、遊星歯車式トルク感应型LSDの信頼性と静粛性を大きく向上させた。

参考文献

- 1) 山下洋三：4WD 車両におけるトルク感应型 LSD と車両運動制御の相乗効果について，自動車技術会学術講演会前刷集，no. 90-02，(2002)5.
- 2) 酒井直行：全輪駆動車(4WD)用トルセンデファレンシャルの技術動向，月刊トライボロジー，no. 230，(2006)28.
- 3) 山本雄二，兼田楨宏：トライボロジー，理工学社，(1998)46.
- 4) 遠山 護，大森俊英，三田修三，植田文雄：ATF 添加剤によるシャッター防止作用(第1報)，トライボロジスト，vol. 47，no. 7，(2002)49.
- 5) 遠山 護，大森俊英，三田修三，植田文雄：ATF 添加剤によるシャッター防止作用(第2報)，トライボロジスト，vol. 47，no. 7，(2002)59.
- 6) 村上 剛，原 利美，安藤淳二：微細表面形状によるクラッチ摩擦特性の最適化，豊田工機技報，vol. 44，no. 1，(2003)9.
- 7) 金森高司：DLC の応用事例(エンジン部品)，DLC 膜ハンドブック，NTS，(2006)142.

筆者



安藤淳二*
J. ANDO



安藤寛之**
H. ANDO



齋藤秀幸***
H. SAITO



宅野 博**
H. TAKUNO



原 利美**
T. HARA



酒井直行****
N. SAKAI



山下洋三****
Y. YAMASHITA



遠山 護****
M. TOHYAMA



大森俊英****
T. OHMORI

- * 軸受・駆動事業本部 駆動技術部 博士(工学)
- ** 軸受・駆動事業本部 駆動技術部
- *** 軸受・駆動事業本部 実験解析技術部
- **** 研究開発本部 研究開発センター
機械システム研究部
- **** 豊田工機トルセン株式会社 技術開発部
- **** 株式会社豊田中央研究所 機械基盤研究部
トライボロジ研究室 博士(工学)
- **** 株式会社豊田中央研究所 機械基盤研究部
博士(工学)