

## エンジン動弁系カム - シム間摩擦解析

大森俊英, 服部治博

## Friction Analysis between Cam and Shim in Engine Valve Train System

Toshihide Ohmori, Haruhiro Hattori

## 要 旨

直打式動弁系を対象とし、一対のカム - シム間の摩擦力を測定する装置を考案した。本装置の特徴は、3軸荷重計をシムとリフタとの間に配することにより、カム軸一回転中の摩擦力の実時間計測を可能とした点にある。

市販エンジン油を用い、カム軸一回転中の基本的なカム - シム間の摩擦挙動を評価した。全般的には、カム - シム間の摩擦発生域のうちの広い領域（カムのランプ部、ショルダ部およびノーズ部接触域：油膜厚さが小さく、境界潤滑条件下にあり）で、0.1～0.15の摩擦係数を示した。極大値は、油膜厚さ最小となるショ

ルダ部接触域において得られた。また、カムのフランク部接触域（油膜厚さが大きく、主に弾性流体潤滑条件下にあり）でのみ、0.05前後の低い摩擦係数を示した。

本装置を用い、エンジン油に配合される有機Mo系摩擦調整剤の効果について検討した。有機Mo系摩擦調整剤は、カム - シム間摩擦の主体を占める境界潤滑条件下での摩擦係数を著しく低減することにより、カム - シム間の摩擦低減に有効に作用することが明らかになった。

キーワード エンジン, 動弁系, カム, シム, 摩擦測定, エンジン油, 摩擦調整剤, 境界潤滑, 弾性流体潤滑

## Abstract

A friction measurement apparatus has been newly developed to analyze the frictional behavior between a pair of a cam and a shim in a direct acting valve train system. This apparatus has enabled the real time measurement of frictional force during the rotation of a cam shaft by placing a tri-axial transducer between the shim and lifter.

Frictional behavior between the cam and shim has been evaluated using commercial engine oil. Most of the contact regions, that is, the ramp, shoulder and nose part, exhibited frictional coefficients from 0.1 to 0.15. These regions are

judged to be under the boundary lubricating condition due to the theoretically confirmed low oil film thickness. Only the contact area of the flank part showed a low frictional coefficient of around 0.05, due to the thick oil film under the elastohydrodynamic lubricating condition.

The influence of an organo-Mo-type friction modifier (FM) added into the engine oil has been investigated. It was determined that the organo-Mo-type FM effectively decreased the friction between the cam and shim by means of reducing the friction in the boundary lubricating region.

Keywords Engine, Valve train, Cam, Shim, Friction measurement, Engine oil, Friction modifier, Boundary lubrication, Elastohydrodynamic lubrication

## 1. はじめに

エネルギー、環境問題に対応し燃費を向上させるため、自動車用エンジンにおいて、摺動部の摩擦低減は主要命題のひとつとなっている。エンジンの主要摺動部として、動弁系、ピストン系および軸受系が挙げられる。それらの摩擦損失に占める動弁系の割合は少なく、特に低回転域においては40%程度に達するとの報告もある<sup>1)</sup>。そのため、動弁系においても、他の摺動部と同様、摩擦損失の低減が強く望まれている。

動弁系の摩擦解析のための測定法としては、動弁系全体の駆動力をトルク計で測定する手法が一般的に用いられている<sup>2)</sup>。しかし、この方法による測定値には、最も重要なカム - シム間の摩擦力のみならず、軸受、ギヤ部などの摩擦力も含まれている。また、その測定値は複数個のカムを有するカム軸全体の駆動力の平均値である。

動弁系の摩擦挙動を詳細に解析するためには、カム軸一回転中の一对のカム - シム間の摩擦特性を捉える必要がある。そのためにいくつかの方法が試みられている。しかし、測定のための付加物が多い<sup>3)</sup>、動弁系の形式が現在主流のDOHC（直打式）と異なるOHVである<sup>4)</sup>などの問題点がある。

このような背景の下、著者らが新たに考案した、直打式の動弁系を対象とし、付加物を極力少なくした、カム軸一回転中の一对のカム - シム間の摩擦力測定法<sup>5)</sup>について述べる。また、カム - シム間の摩擦に及ぼす運転条件の影響、ならびにエンジン油に配合される摩

擦調整剤の摩擦低減効果に関する検討結果を示す。

## 2. 実験および解析

### 2.1 カム - シム間摩擦測定装置

カム - シム間摩擦測定装置の構成をFig. 1に示す。動弁系主要部は、実機エンジンから一对のカム - シム、リフタ、バルブ系を流用し、シム、リフタ間に3軸荷重計を配した構造となっている。カム軸は、直列4気筒排気量1.5Lガソリンエンジン用のカム軸からカム1個分を切り出し加工したものである。今回の検討範囲では、カムのシム中心に対するオフセット量は0とした。また、リフタの回転方向の運動は拘束し、軸方向の上下運動のみを許容した。エンジン油は温調を施され、カム上部から滴下供給される。测温箇所はノズル部である。

カム軸はモータによって駆動され、シムがカムから受ける垂直力 ( $F_z$ )、接線力 ( $F_x$ )、軸方向力 ( $F_y$ ) の3分力 (Fig. 2参照) が3軸荷重計によって測定される。測定値は、エンジン油温、ならびにロータリーエンコーダによって検出されたカム軸の角度、回転速度とともにパソコンに収録され、解析に供される。

### 2.2 3軸荷重計

3軸荷重計の構造をFig. 3に示す。上下に配された入力部と支持部の2枚の円盤体とその間に設けられた4本の中空角柱を骨格としている。材質は、軽量かつ高剛性なチタンである。各中空角柱の4面に貼り付けられた合計16枚の2軸交叉ひずみゲージによって作用力が検出される。3軸荷重計の出力が温度の影響を受け

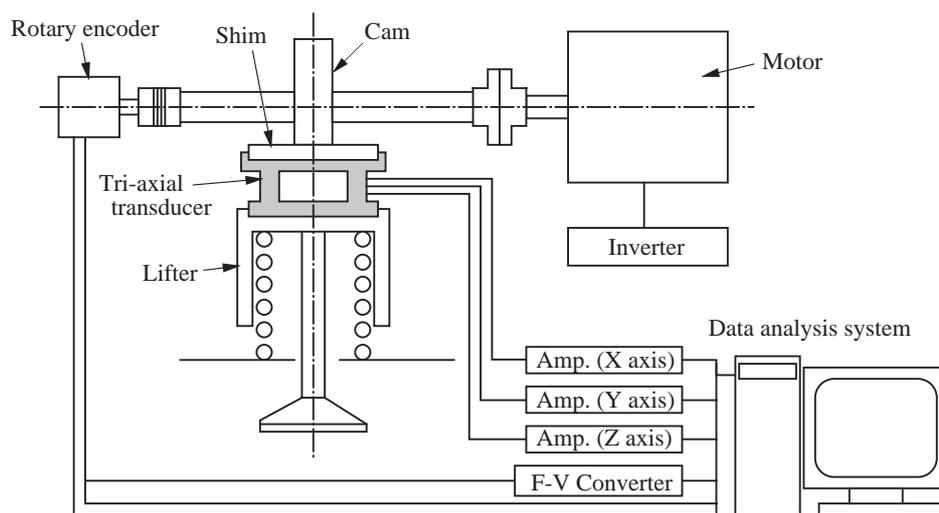


Fig. 1 Cam-shim friction measuring apparatus.

ないよう、またモーメントを排除し、3軸方向の力のみが検出されるように、ひずみゲージの配置およびブリッジの組み方に配慮した。また、出力検定を行い、クロストークの補正を行った。

### 2.3 摩擦測定試験条件

10時間程度のなじみ運転の後、測定を行った。本試験の条件は、カム軸回転数250, 500, 1000rpm, 油温50, 90, 130°Cである。

試料油には、市販のSHグレード10W-30エンジン油を用いた。また、有機Mo系摩擦調整剤の摩擦低減効果を検討するために、Mo-ジチオカーバメート (MoDTC) の配合の有無が異なるSHグレード5W-30相当の試作エンジン油も試験に供した。

### 2.4 油膜厚さの計算

カム-シム間摩擦測定の結果を解釈するために、接触部に形成される油膜の厚さを計算によって推定した。Chittenden-Dowson の点接触弾性流体潤滑計算式<sup>6)</sup>を用い、最小油膜厚さを求めた。

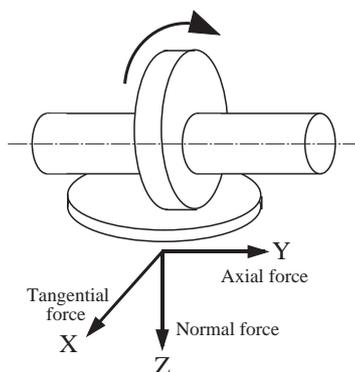


Fig. 2 Acting force from cam to shim.

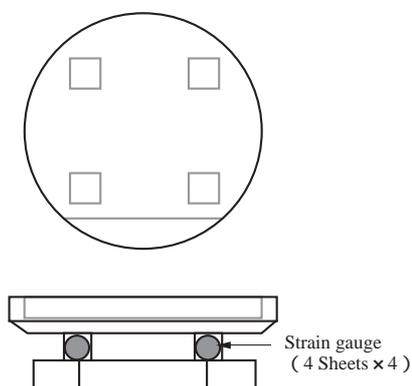


Fig. 3 Tri-axial transducer.

## 3. 結果および考察

### 3.1 基本的解析結果の例

測定結果および計算結果の一例として、市販エンジン油を用いた、油温90°C, カム軸回転数500rpmの場合をFig. 4に示す。併記したバルブリフト量は、幾何学的な計算によって求めたものである。カム-シム接触部での垂直荷重はセンサの出力 $F_z$ であり、摩擦力( $F_f$ )は $F_x$ と $F_y$ の合力として算出した。摩擦係数は、摩擦力 $F_f$ を $F_z$ で除した値である。

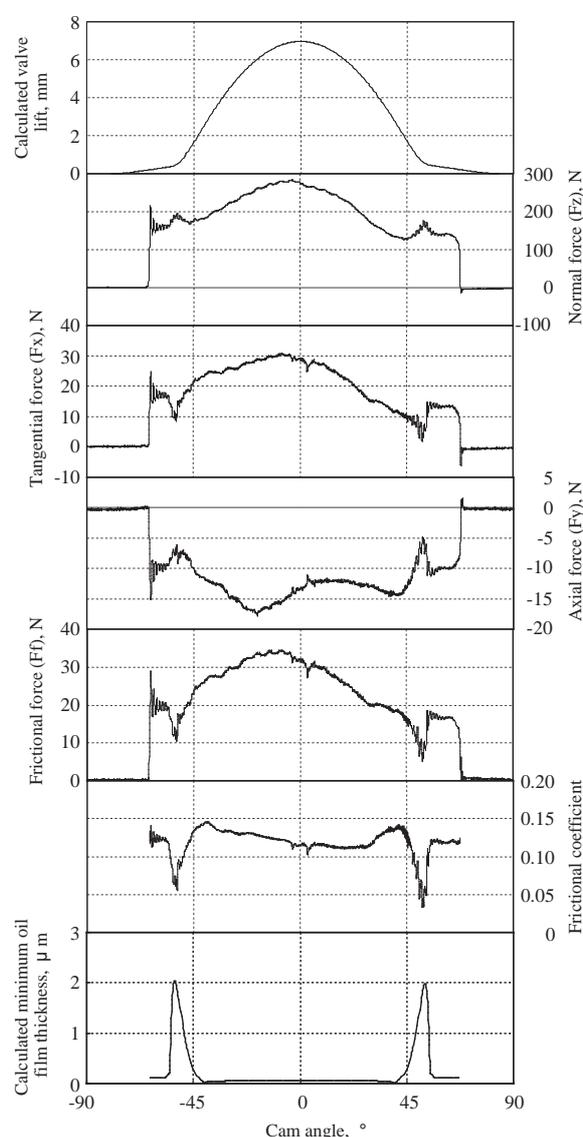


Fig. 4 Examples of results measured and calculated.  
(Oil temperature : 90°C, Rotating speed : 500rpm)

カム軸の回転に伴いシムに対するカムの接触部位 (Fig. 5参照) は移動する。カム角ならびにカムの接触部位の変化により、摩擦係数は次のように推移している。

- 60°近傍 (カムのランプ部) : 摩擦係数0.12前後
- 55°近傍 (フランク部) : 0.05前後で極小
- 40°近傍 (ショルダ部) : 0.15前後で極大
- 40 ~ 40° (ショルダ部 ~ ノーズ部 ~ ショルダ部)  
: 0.1 ~ 0.15
- 40°近傍 (ショルダ部) : 0.15前後で極大
- 55°近傍 (フランク部) : 0.05前後で極小
- 60°近傍 (ランプ部) : 0.12前後

このような摩擦係数の変化は、油膜厚さの推定値から次のように解釈される。

カム角  $\pm 55^\circ$  近傍のみ、突出して油膜が厚い。これはカムのフランク部が倒れ込むように接触する領域であり、弾性流体潤滑条件下にあるためである。このような条件下では、摩擦の発生は主に油膜のせん断抵抗に依存するため、0.05程度の最小摩擦係数を示す。

他の領域ではカム角  $\pm 40^\circ$  近傍を最小に、油膜は極めて薄い。これはカムのランプ部、およびショルダからノーズ部が接触する領域であり、転がりよりもすべりの要素が大きく、境界潤滑主体の条件下にあるためである。このような条件下では、摩擦の発生は固体間の接触 (境界摩擦) に負うところ大となり、0.10 ~ 0.15の大きめの摩擦係数となる。 $\pm 40^\circ$  近傍のショルダ部接触部位では、カムとシムとの相対速度が0となるため、油膜厚さは極小となる。それにより、この部位で摩擦係数0.15前後の最大値を示すこととなる。

カム - シム間の潤滑条件においては、弾性流体潤滑 (カム角  $\pm 55^\circ$  近傍, 油膜厚く, 低摩擦係数) と境界潤滑 (カム角  $\pm 55^\circ$  近傍以外, 油膜薄く, 高摩擦係数) とが共存しているが、後者の境界潤滑が主体を占めているといえる。

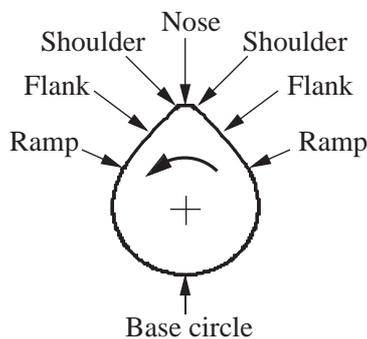


Fig. 5 Conventional name of cam surface locations.

### 3.2 油温および回転数の影響

市販エンジン油を用いて検討した、カム軸回転数 500rpm における潤滑油温の摩擦係数および油膜厚さへの影響を Fig. 6 に示す。油温が変わっても、カム角に対する摩擦係数および油膜厚さの変化のパターンにさほど影響は認められない。ただし、全般的に油温が高くなるほど摩擦係数が増大し、油膜厚さは減少している。したがって、油温の上昇に伴い潤滑油の粘度が低下し、油膜厚さの減少、固体接触割合の増大を引き起こし、それが摩擦の増大につながったと解釈できる。

ここで、油温の上昇に伴い単純に摩擦が増大する傾向を示したのは、試料油として供したエンジン油に配合されている摩擦調整剤が、油性剤系のものであったためと考えられる。近年、低燃費エンジン油に配合されるようになってきた有機Mo系の摩擦調整剤は、油性剤系のものよりも摩擦低減効果の度合いが大きく、また高温においてより効果を発揮しやすいとされている<sup>2)</sup>。この有機Mo系の摩擦調整剤を配合した試料油の摩擦挙動については、3.3において述べる。

潤滑油温 90°C におけるカム軸回転数の摩擦係数および油膜厚さへの影響を Fig. 7 に示す。全般的に低回転になるほど摩擦係数が増大し、油膜厚さは減少している。したがって、低回転ほど油膜が形成されにくく、固体接触の割合が大きくなり、摩擦が増大したものと説明づけられる。

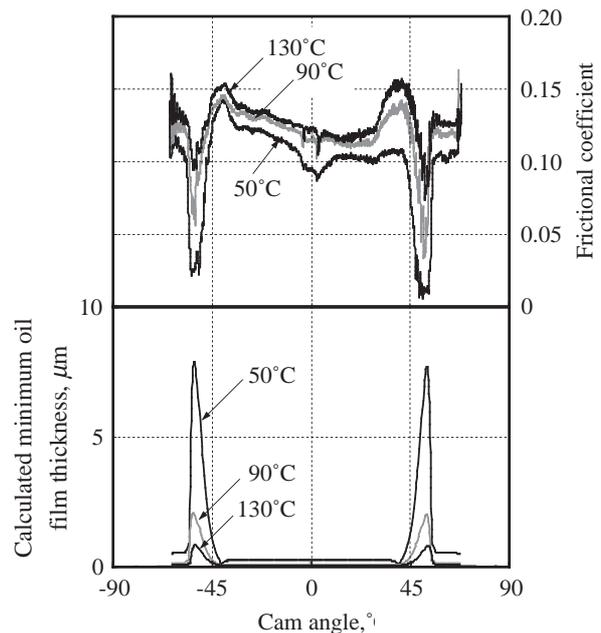


Fig. 6 Influence of oil temperature to frictional coefficient and oil film thickness. (Rotating speed: 500 rpm)

### 3.3 エンジン油の影響 (有機Mo系摩擦調整剤の効果)

3.1で述べたように、カム-シム間の潤滑条件においては、固体接触を生じる境界潤滑がその主体を占めている。このような条件における摩擦の低減には、摺動面に低摩擦の吸着膜もしくは反応被膜を形成して作用する、いわゆる摩擦調整剤を潤滑油に配合することが有効である。その中でも特に、有機Mo系化合物の効果が大きいとされている<sup>2)</sup>。

有機Mo系摩擦調整剤であるMo-ジチオカーバメート (MoDTC) の摩擦低減効果を評価した結果をFig. 8に示す。

MoDTC配合油では非配合油に比べ、全般的に摩擦係数が大幅に小さくなっている。油温の影響については、MoDTC非配合油ではFig. 6と同様に油温の上昇に伴い若干摩擦係数が増大しているのに対して、MoDTC配合油では、逆に摩擦係数はより小さくなっている。130°Cにおいては、MoDTC配合油での摩擦係数は非配合油のそれに比べ、1/2程度にまで減少している。すなわち、MoDTCは優れた摩擦低減効果を有しており、その効果は高温においてより促進されている。

MoDTCの効果が発現される領域については、非配合油においておよそ0.1程度以上の摩擦係数を示して

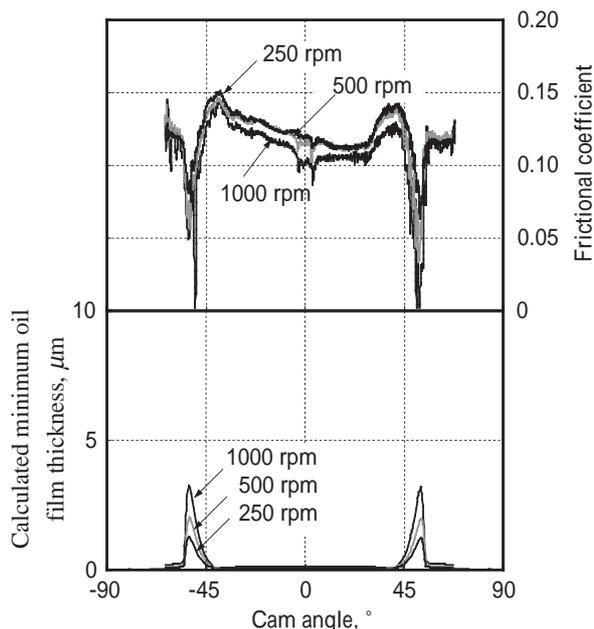


Fig. 7 Influence of rotating speed to frictional coefficient and oil film thickness. (Oil temperature : 90°C)

いる部分といえる。(50°Cおよび90°Cでは、±55°近傍の摩擦係数極小部を除く領域。130°Cでは全域。)このことは、MoDTCは固体間の接触が重要となる境界潤滑域において摩擦低減作用を発現することを示すものである。

MoDTCの作用機構については、MoS<sub>2</sub>の生成による境界摩擦の低減(質的因子)とMoS<sub>2</sub>の生成を介した摺動面の平滑化による固体接触割合の低減(形状因子)が指摘されている<sup>7)</sup>。また、上記のように高温においてより効果が大いなのは、MoS<sub>2</sub>の生成反応が高温ほど促進されるためと考えられる。

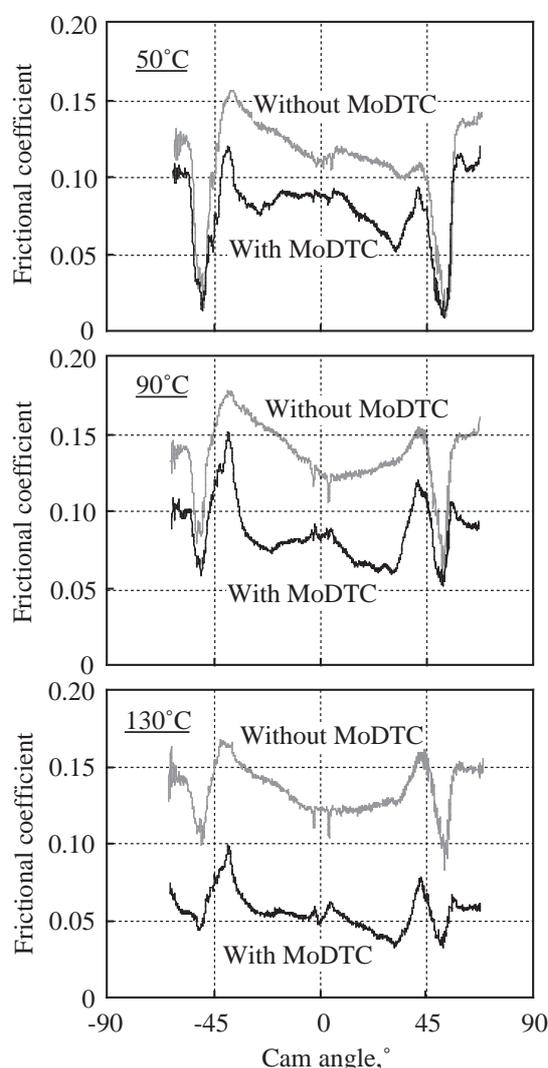


Fig. 8 Effect of MoDTC added into oil on reducing friction. (Rotating speed: 500 rpm)

#### 4. おわりに

新たに考案したカム - シム間摩擦測定装置において、これまで不明確であったカム軸一回転中の一對のカム - シム間の摩擦力の詳細な変化を捉えることができた。またその応用検討例として、エンジン油に配合される有機Mo系摩擦調整剤の有効性を示すとともに、その効果は主に境界潤滑条件域での摩擦低減に起因することを明らかにした。

本評価法は、エンジン油（配合添加剤、粘度等）の検討に留まらず、設計（カムプロファイル、弁バネ定数等）、材料（カムおよびシムの材質、表面処理等）にも適用可能と考える。今後、これら「設計」、「材料」、「エンジン油」の解析、開発に広く応用され、動弁系の摩擦低減、ひいてはエンジンの燃費向上に貢献できることを期待する。

#### 謝辞

カム - シム間摩擦測定装置の設計に際し、当所開発部設計課 小澤忠夫氏、機械2部生体力学研究室 佐久間茂氏、流体・トライボ研究室 吉田一徳氏、野田卓氏に協力頂いた。

#### 参考文献

- 1) Nakada, M. : Tribol. Int., 27-1(1994), 3
- 2) 遠山護, ほか3名 : 豊田中央研究所R&Dレビュー, 32-4(1997), 35
- 3) Wakuri, Y., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 952471(1995)
- 4) Ito, A. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 982663(1998)
- 5) 大森俊英, ほか5名 : 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, (1998), 479
- 6) Chittenden, R. J., et al. : Proc. Roy. Soc. London, 397A(1985), 245
- 7) Tohyama, M., et al. : Proc. of Int. Tribol. Conf. Yokohama, (1995), 739

(2000年11月9日原稿受付)

#### 著者紹介



大森俊英 Toshihide Ohmori

生年：1959年。

所属：CVT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&D100Award受賞。

1996年東海化学工業会賞受賞。

工学博士。



服部治博 Haruhiro Hattori

生年：1975年。

所属：CVT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。