

1. はじめに

「摩擦・摩耗・潤滑」が英国で"Tribology"（トライボロジー）と呼ばれるようになって27年になる。1966年に生まれた用語「トライボロジー」の新しさは、従来の摩擦・摩耗・潤滑の研究を省資源、省エネルギーに有用な科学・技術と明確に位置付けたところにある。省資源・省エネルギーによる経済効果は、当時も今も先進工業国のGNPの1%に相当すると言われている。

自動車は、動力の発生と伝達の機械であり、

Fig.1¹⁾のように、まさにトライボロジーの技術によって成り立っている。しかしながら、自動車の設計・製造において、トライボロジーの重要さが特にクローズアップされたのは比較的最近である。それまでトライボロジーに関わる問題の多くは、トライボロジーを特に意識せずに、それぞれの要素技術の中で適当に処理されてきたからである。

では、今なぜトライボロジーが自動車技術において、クローズアップされるのか？トライボロジーのどういうところが期待されているのか？本稿では、これらの点を最近の話題とともに述べる。

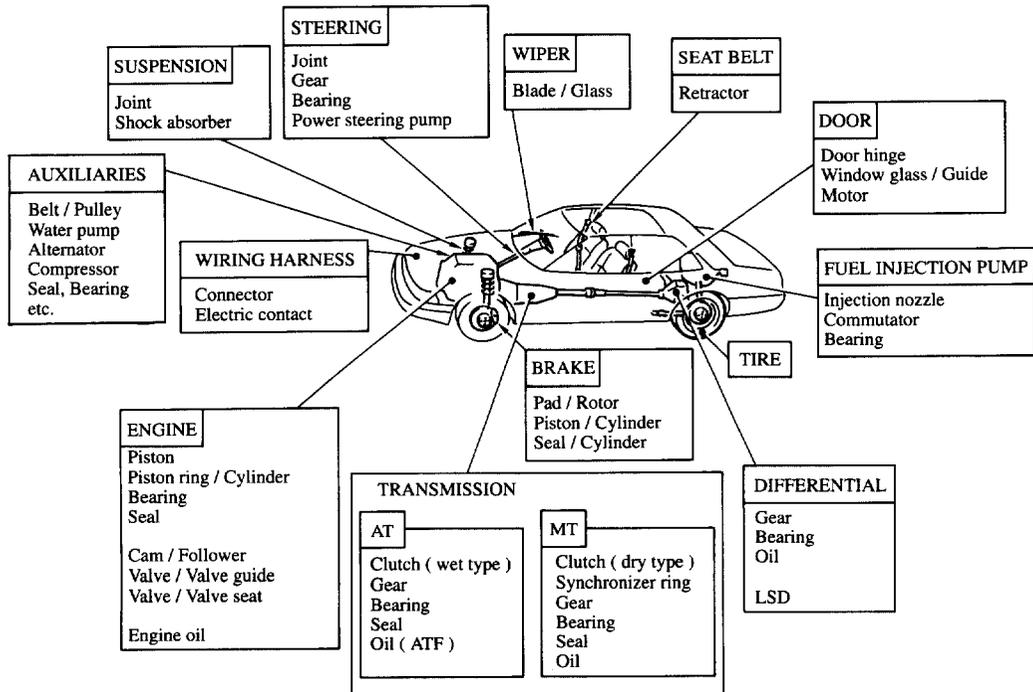


Fig.1 Parts and elements related with tribology in automobile¹⁾.

キーワード

トライボロジー，自動車，環境問題，燃費低減，排気対策，信頼性，快適性，技術動向

2. 自動車を取りまく最近の情勢

最近の自然界には、よくわからない現象が起こりつつある。その一つに蛙の激減があるという²⁾。この異変は公害が無いとみなされた地域にも認められ、専門家からも不思議がられている。原因は、地球の温暖化や酸性雨のような自然環境の変化に関係すると推察されているが、明らかではない。確かなことは、人間の日常の営みがこうした地球規模での自然破壊を招いているということであ

る。今や自然界を含めた地球規模での環境保全は、我々人間を含むあらゆる生態系にとって、重要かつ緊急を要する課題であるに違いない。

今日の環境問題は、たとえばFig.2³⁾のようにまとめられている。自動車においても、いくつかの問題があげられている。なかでも、地球温暖化の元凶と目されるCO₂の排出量低減は、燃費低減の問題としてトライボロジーに深く関わっている。燃費低減のためには、摩擦損失の低減、伝達効率の向上、軽量化による慣性質量の軽減、オイル開

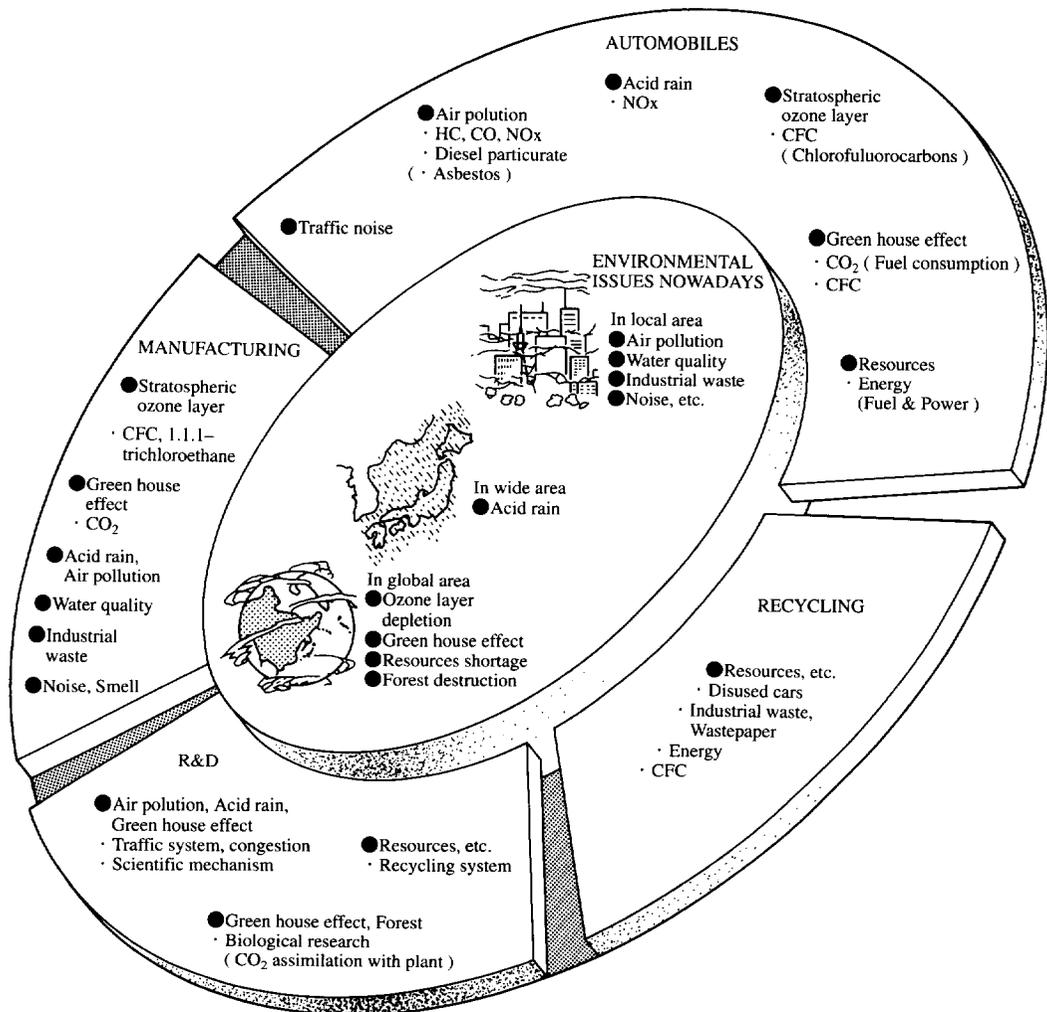


Fig.2 Global environmental issues nowadays³⁾.

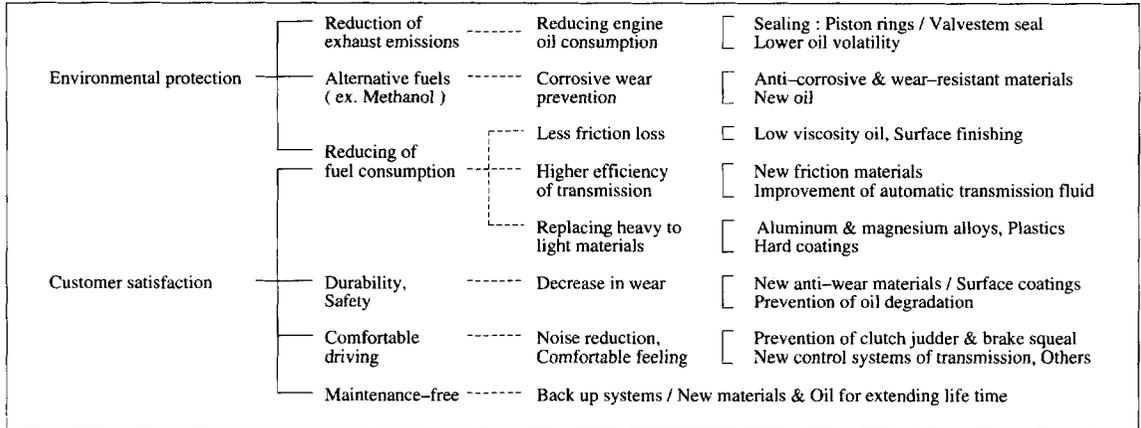


Fig.3 Relation between environmental issues and tribology in automobiles nowadays.

発などのなお一層の推進を要するからである。

周知のように、燃費の低減はこれまで主に経済的観点からのユーザ向け開発課題であった。この課題に環境保全の観点から火を付け、取り組みに拍車をかけたのが、米国の議会で提案されたCAFE (Corporate Average Fuel Economy: 自動車メーカー毎の平均燃費) 規制法案である。この法案は、各自動車メーカーの1988年度のCAFEを基準として1995年および2000年に、それぞれ、20%および40%の向上を求めたものである。法案は1990年度の議会では成立しなかったが、規制目標値の見直しなどを経て再提案されるものとみられている。一方、この米国の動きを受けて、1992年6月に日本版CAFE規制案が通産省・運輸省・環境庁の合同で政府に答申された。答申案は、車両重量別に細かく規定されているが、全車両の平均燃費向上率を1990年を基準にして2000年には8.5%とするものである。

温暖化に関する燃費低減の他に、燃焼室にリークしたエンジン油による大気汚染、摺動部の摩擦振動による騒音や摩耗の低減、潤滑油の長寿命化などの問題がトライボロジーに関わっている。これらの課題の解決は、環境保全のみならず、ユーザのニーズともよく合致している。

Fig.3は自動車を取りまく最近の情勢とトライボロジーの主な技術課題をまとめたものである。これらの課題のいくつかについて、以下に最近の技術動向を紹介する。

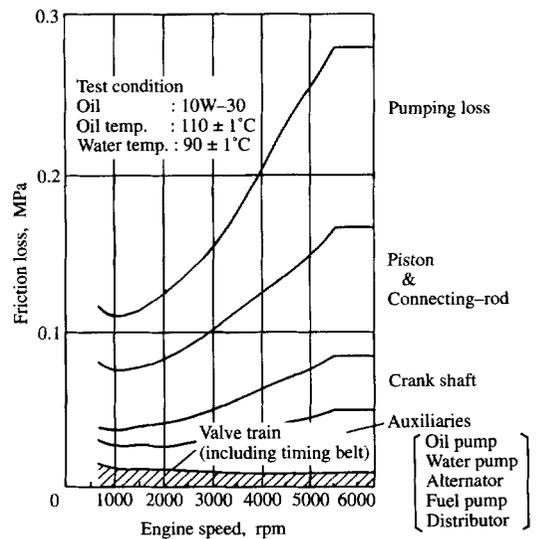


Fig.4 Friction loss with engine speed⁵⁾.

3. 省燃費のトライボロジー

3.1 フリクションの低減

エンジンにおける動力損失は、10モード試験の場合、車両全損失量の35~40%を占めている⁴⁾。ポンピングロスを除けば、エンジンの摩擦損失の約1/2はピストン系で生じ、ピストン系の損失は主に流体摩擦に起因する (Fig.4)⁵⁾。ピストン系の摩擦低減では、エンジン油の低粘度化、リング張力の緩和 (Fig.5)、3本リングから2本リングへの設計変更などが課題である⁶⁾。エンジン油では、

粘度を下げると耐摩耗性が低下するので、それをカバーできる油の開発が進められている。

エンジン油による乗用車の燃費改善率目標は、1992～1993年に2.7%で、1994～1995年には4%程度が見込まれている⁷⁾。この実現のために、基油の低粘度化による流体摩擦損失の低減に加え、摩擦調整剤の開発と配合による境界潤滑領域の固体摩擦損失の低減が検討されている。低粘度化はオイルの低分子化を伴い、蒸発しやすくなるのでそれには限界がある。優れた摩擦調整剤は摩擦の低減に有効であるが、Fig.6に示すように耐久性に乏しい⁸⁾のが現在の悩みである。よって、その改良・開発が今後の大きな課題となっている。

動弁系では、従来のスリッパ方式に替わってローラー付ロッカーアームが摩擦の低減に有効とわかり (Fig.7)⁵⁾、その採用が増加している。す

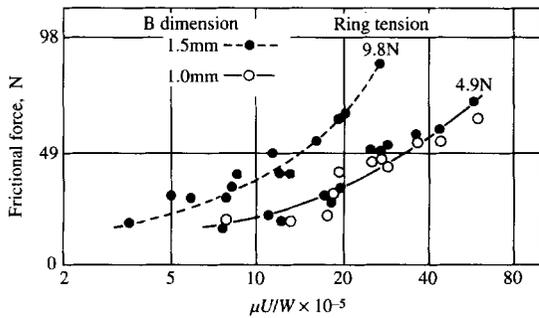


Fig.5 Frictional force vs. piston ring tension⁶⁾.
[μ : Frictional coefficient, U : Sliding speed, W : Load]

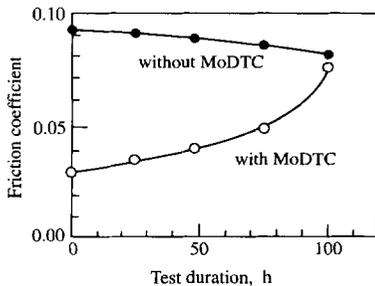


Fig.6 Oxidative degradation of a friction modifier (MoDTC) in engine oil; showing friction rise with test duration⁸⁾.

べり摩擦をころがり摩擦の様式に替えたもので、駆動トルクは従来のスリッパ方式の約1/3になる。しかし、最近ではスリッパ方式ではあるが、ロッカーアームを介さずに直接カムでバルブを駆動する直打式 (Fig.8) が開発され、脚光を浴びている。直打式では、摩擦ロスにローラー式に比べて大きいのが、部品点数が少なく軽量なので、トータルで見ると直打式のほうが燃費は少なく低コストである。

この他、摺動面の表面粗さや加工精度、組付精度なども低フリクション化のために見直される動向にある。

3.2 伝達効率と摩擦

自動変速機の動力伝達効率の向上はトライボロジーの重要な課題である。目下、増加しつつある湿式多板クラッチでは、摩擦板と潤滑油 (ATF: Automatic Transmission Fluid) の摩擦係数 (μ) 向上が動力伝達効率増大には有効である。ただし、

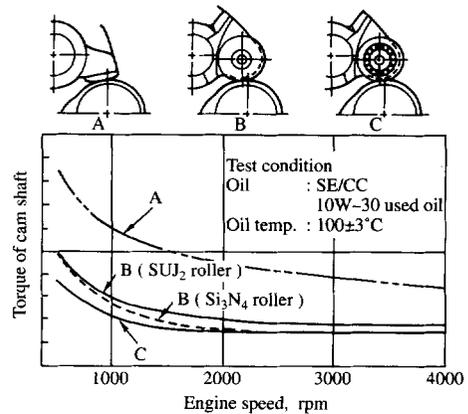


Fig.7 Effect of roller type cam follower on reducing frictional loss⁵⁾.

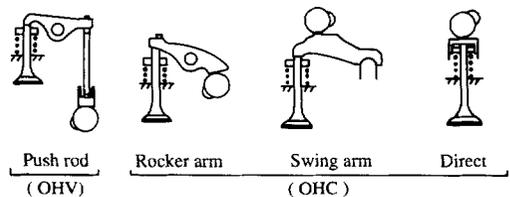


Fig.8 Types of cam and follower.

μ が高くなるとスティック・スリップに起因する摩擦振動が発生しやすくなるので、摩擦振動を発生させずに μ をどこまで高められるかが問われている。

無断変速機 (CVT: Continuously Variable Transmission) も従来から注目の技術である。CVTはフリクションドライブ方式とトラクションドライブ方式に大別され、多くの開発研究がなされてきた。前者は面接触による動力伝達で、後者は点または線接触による動力伝達機構である。

フリクションドライブ方式では、ラバーベルトドライブ方式が欧州で1950年頃から実用化されている。ただし、ラバーベルトは耐久性が充分でなく、約5万km走行毎に交換を必要とした。そのうち、このラバーベルトに替わる耐摩耗性・耐久性の高いスティールベルト (Fig.9) が欧州で開発され、それに電子制御システムを組み込んだCVTが国内で一部の小型車に採用されるようになってきた⁹⁾。

トラクションドライブ方式は、ころがり接触の様式で油膜を介して動力を伝達するものである。トロイダル方式、ハーフトロイダル方式、リング・コンドライブ方式等が研究されている。これらの伝達効率は、油のトラクション特性に大きく依存するので、トラクション係数の高い油の開発に向けて、研究が盛んに行われてきた。その結果によれば、油のトラクション係数は現在のところ最大で0.08~0.09程度である。実際の接触面圧は2GPa (約200kgf/mm²) に達するため、接触面内の油は固化状態になるという¹⁰⁾。自動車用CVTとしては、伝達トルクの安定性と耐久信頼性の確保が必要で、改善すべき課題は少なくない。

3.3 軽量化とトライボロジー

摺動部品の軽量化には2つの方法がある。1つは小型・簡素化の機械設計に關するものである。一般に、サイズダウンによる軽量化では接触面圧が高くなり、摩擦熱の発生が増大するので摺動材料と潤滑油の改良を必要とする。

軽量化のもう1つの方法は、鉄系材料から軽質材料への変更である。たとえば、エンジンバルブのセラミック化やシリンダブロックのアルミ化があげ

られる。前者の場合はコスト、信頼性、相手材 (バルブシート) とのマッチング等が、後者ではシリンダボア摺動面の耐摩耗性・耐焼付性の改善が課題である。たとえば、最近使用され始めた直打式動弁系では、バルブリフター (Fig.10) をアルミ化することによって、43%の軽量化と約1%の燃費低減が可能になった。ただし、シリンダヘッドと摺動するバルブリフター外周面は、Fe系合金の溶射による耐摩耗性の改善を要している¹¹⁾。このほかに、ピストンとクランク軸をつなぐコネクティングロッドを従来の鉄からアルミ複合材に変

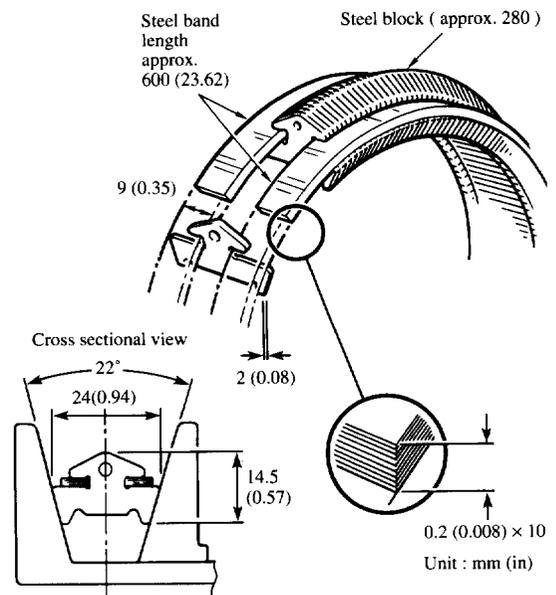


Fig.9 Steel belt type CVT⁹⁾.

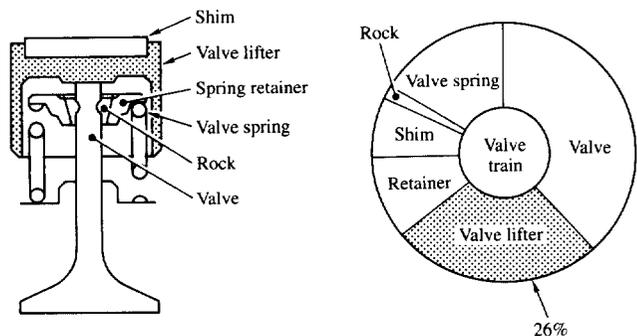


Fig.10 Relative weight of valve-train part¹¹⁾.

更して、コネクティングロッドの重量を27%軽減した実例がある¹²⁾。27%の軽量化によって、エンジンフリクションの4.5~7.0%が低減され、10モード燃費が22.5km/l 24km/lに改善された。これは、6.7%の燃費改善に相当し、慣性力が働く運動部分での軽量化がフリクションの低減、すなわち燃費の改善に非常に有効なことを示している。

4．排気対策のトライボロジー

4.1 排気エミッションとトライボロジー

燃焼室へのエンジン油の混入は不可避ではあるが、その経路と量は油消費の問題として従来から重視されている。エンジン油の混入経路としては、ピストンリング・シリンダボア間、パルプステムシール、PCVバルブ（クランクケース換気弁）等が知られている。とくに、ディーゼルエンジンで混入した油は、排気エミッションとして規制対象のパティキュレート（PM）やSOF（Soluble Organic Fraction）の成因となる。SOFはPM中に含まれて排出される。その含有率は、運転条件やエンジン機種によって異なるが、PM量の20~50%を占めるといわれている。したがって、燃焼室のシールを役目とするピストンリングの摺動部では、潤滑に必要な最小油膜の形成を確保しながら、シールもれによる油消費をいかに抑えるかが課題である。

シール性向上の観点から進展したピストンとリングの改良は、1970年代から今日まで、油消費の大幅な改善を可能にした。すなわち、1970年代初頭のディーゼルエンジンの油消費は0.61g/kw・hrであったが、次世代のエンジンではその1/10以下になるという¹³⁾。ピストンでは、トップリングの位置を高くして火炎に触れるクラウンランド部を狭くすると、油消費が少なくなる¹⁴⁾。反面、トップリングとリング溝はより高温にさらされて焼付きが生じやすくなる。この対策としては、ピストン頭部へのクーリングチャンネルの設置や耐熱性材料の適用等がある。

エンジン油の蒸発性も油消費に直接関わる重要な因子である⁷⁾。低フリクション化の実現には、エンジン油の粘度を下げて、流体潤滑抵抗をできるだけ少なくしたい。その一方法として、基油の

低粘度化が検討されている。粘度が低い基油ほど分子量が小さくて蒸発しやすい難点があるので、どこまで低粘度化できるかが課題である。また、同じ粘度の油でも、分子量分布の幅が広いと、蒸発しやすい低分子を多く含むので、油消費は大きくなる。

ピストンリング部をかくぐってクランクケースに混入するブローパイガスには、NO_x等の排気エミッションが10~25%含まれている¹⁵⁾。このブローパイガス中のHCとNO_xがエンジン油スラッジの主成分となっている¹⁶⁾。ディーゼルエンジンでは、排気エミッション中のパティキュレートが油中に入ると、そのアブレイブ作用が動弁系やピストン摺動部の摩耗を著しく増大させる。このため、カムと接するロッカーアームの当り面にセラミックスを用いたり、その部分を鋼製ローラにする方法が採用されてきた。ピストンリングでは、鋳鉄にCrめっきした従来品に替わって、ステンレス鋼の窒化処理品が普及している。

4.2 代替燃料とトライボロジー

ガソリンに替わる低公害燃料として、現在最も注目されているのはメタノールとそのガソリン混合燃料である。

メタノールは吸湿性があり、燃焼時にギ酸を生成するので、鋳鉄製シリンダボアに付着すると腐食による損耗が大きくなる。この付着は、ボアが燃焼ガス中のギ酸水蒸気の露点以下に冷えた場合に生ずるとみなされている。ボアの表面温度が露点を超える高温側では、ギ酸水蒸気はボアに結露せず排気管から外へ排出されるので、ギ酸による損耗は生じない。したがって、このギ酸腐食は寒冷地で発生しやすい現象である。対策として、耐食性のある耐摩耗材料（または表面処理）や中和能の高いエンジン油の開発が進められている。

5．信頼性、快適性のトライボロジー

5.1 耐摩耗性とメンテナンスフリー

自動車の信頼性、耐久性において、全摺動部品の耐摩耗性向上は、自動車技術の進展に伴う永遠の課題である。その課題のほとんどは材料と潤滑油に寄せられている。一方、わずかな冷却系などの設計変更や加工精度、組付精度の向上が、耐摩

耗性の向上に有効な場合も少なくない。

省燃費に対応した軽量化の動向には、耐摩耗性の問題が付随する。摺動部品材料の鉄系からアルミニウムやマグネシウム系材料への変更は、ほとんどの場合、耐摩耗性の低下をもたらすからである。このため、表面改質が必要とされ、その技術動向が注目される。

耐摩耗性の改善に際しては、相手材とのペアで良くすることをまず念頭におかねばならない。たとえば、一方の面に硬質皮膜をコーティングした場合に、それ自体の耐摩耗性は改善されるが、相手の摩耗が増大するという失敗によく遭遇するからである。新しい摺動材料の開発には、相手材とのマッチングを広範囲な使用条件の下で得る必要があり、明確な指導原理はまだ無い。このため、膨大な実験を要している。とくに、重要保安部品については、市場にでる前に細心の注意が払われている。

摺動部品では、耐摩耗性の向上、劣化防止、自動補給システムの開発等がメンテナンスフリー実現の鍵となっている。

たとえば、劣化防止によるロングライフ化において、エンジン油の発達が挙げられる。ガソリン車のエンジン油交換時期は新油の開発とともに延

び、API（米国石油協会）グレードでSD級オイルでは10,000km、SE級以上では15,000km走行毎の交換が推奨されている。現在、そのグレードはSG級まで開発され、油の品質はかなり向上してきている。

一方、油消費による油量の減少は、劣化よりも走行距離に依存する。このために、補給油を別タンクにもった自動補給システムが開発され、一部の車に採用されるようになった（Fig.11）⁷⁾。

5.2 ノイズとフィーリング

ブレーキノイズやクラッチ・ジャグのような摩擦振動に起因する問題は、従来からトライボロジーにおける難題中の難題である。この解決に向けて、摩擦振動現象の解析、系の防振設計、摩擦材料の改良等の数多の努力がなされているが、まだ応急処置的対策の域を出ず、根本的な解決には至っていない。また、摩擦材料では周知のように石綿の使用禁止規制がヨーロッパで先行し、我国も乗用車では1992年までに、トラック等の大型車は1994年までに自主規制の動向にある。石綿に替わりうる充填材としては、Table1¹⁷⁾のように、デュポン社が開発したアラミド繊維（商品名：ケブラー）が特性面では有望である。ただし、コストは石綿の約15倍と高い。充填材の変更はブレーキ

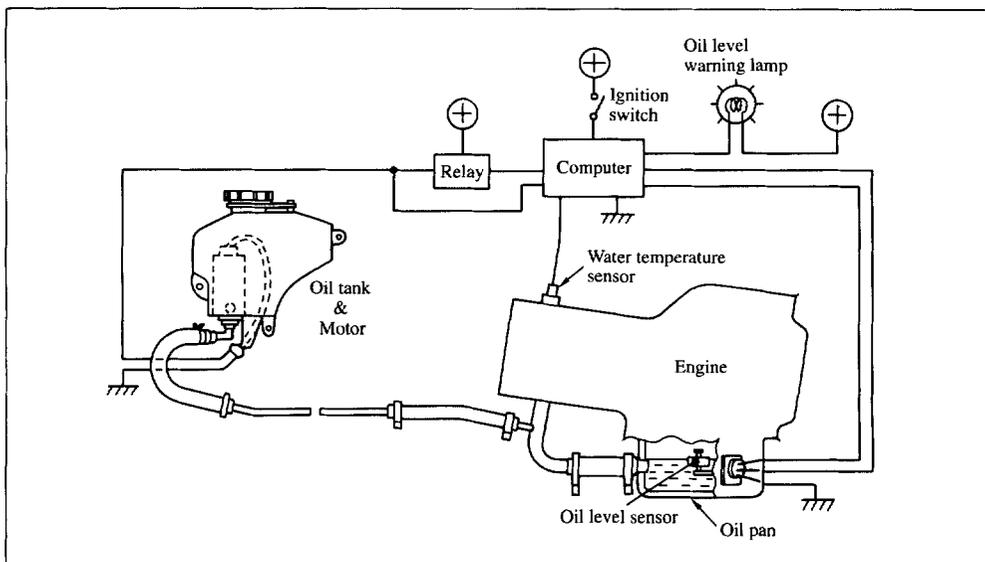


Fig.11 An automatic supply system of engine oil⁷⁾.

Table 1 Performances of brake lining with fillers¹⁷⁾.

Filler	Asbestos	Steel fiber	Glass fiber	Rock wool	Ceramic fiber	Potassium titanate fiber	Carbon fiber	Aramid fiber	Other organic fiber
Frictional coefficient	B	B~D	B	B	B	C	D	B	D
Wear resistance	B	A	B	B	B	B	B	B	D
Tensile strength	B	B	B	D	D	D	B	B	C
Less abrasive	B	B~D	C	C	D	C	B	B	B
Resistance vs. squeal	B	A~C	C	C	C	C	B	B	B
Thermal stability	B	B	B	B	B	B	B	B	D
Heat insulation	B	D	B	B	B	B	D	B	B
Facility in manufacturing	B	B	C	C~D	D	C	D	C	C
Relative cost	1	2	2~3	0.5	5	3~5	5~100	15	1~10

Excellent A ↔ B ↔ C ↔ D Poor

ノイズの発生形態を変えるので、新たな対策が求められる。こうしたノイズの発生は、系の固有振動によって違うので、対策は発生源である摩擦材側で行うのがベストである。しかしながら、ブレーキ性能に優れ、かつノイズが発生しない完全な摩擦材料の開発はまだない。

このほか、摩擦ノイズの発生源としては、ディファレンシャルギヤ、各種ゴム製シール、ワイパー等がある。なかでもワイパーのびびり振動は相手面である窓ガラスの状態、つまりドライバーの手入れの違いや気象条件に依存するので、その対策は容易ではない。

フィーリング特性における最近の問題に、AT車の湿式多板クラッチの摩擦特性の経時変化があげられる (Fig.12)¹⁸⁾。この経時変化は変速時の係合時間に影響し、変化が大きいと変速フィーリングの悪化をもたらす。また、係合時の摩擦力曲線の形も問題になる。係合終了直前の摩擦力が跳ね上がると変速ショックの一因となる。これらの問題と耐熱性、耐摩耗性等の改善のため、ペーパー製摩擦板と潤滑油 (ATF) の改良・開発が進め

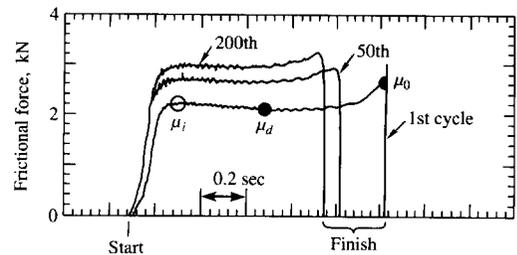


Fig.12 Change in frictional curve of a wet multiple disc clutch with engagement cycles¹⁸⁾.
[Speed : 3600rpm, Oil temperature : 110°C,
Load : 4kN]

られている。また、この湿式クラッチのトライボロジーに関する学会発表はこの数年來盛んになってきた。

6. トライボロジストの役割

自動車分野におけるトライボロジストの役割は大きく変わりつつある。つまり、旧來の問題解決

型から技術開発型への変換である。これは、守りの技術からの脱却を意味し、トライボロジー分野の発展にとって好ましいことである。そのためには、単なる現象解析や試験評価に安住するのではなく、常に先を見た設計マインドで問題に当たらねばならない。

上述のさまざまな技術課題を、トライボロジーの技術分野で大別すると、

設計 潤滑 材料

となり、それを支える多くの学問的基礎がある。つまり、機械、材料、化学、物理、数学など、広い分野にまたがっており、一つの部品開発においてもいろいろな専門家の力を必要とする。

ASME（米国機械学会）は、1984年にトライボロジーを機械工学の新分野と位置付け、次の3項目の研究の必要性を強調している。

- (1) トライボロジーのモデル化
- (2) トライボロジー要素における材料の挙動
- (3) トライボシステムの評価方法

これらの技術確立は、今こそ急務であり、優れたトライボパーツやトライボシステムの早期開発に不可欠である。この技術確立のためには、実用機械（実機）システムにおけるトライボロジー現象の精確な把握が必要となる。実機現象の把握は、たとえばFig.13のように総合的に行うべきで、と

くにリアルタイム計測がこれからは重要と考えている。リアルタイム計測によって、トライボロジー現象とそれの影響因子を同時に調べ、その間の因果関係を明確にすることができる。

エンジンやミッションのような大型で機構が複雑なトライボロジー装置の実機評価は、多大の時間、労力およびコストを要し、評価期間の長さが開発期間を左右する。よって、実機テストの大半が簡単なリグテストや単品テストで代行できれば、そのメリットはきわめて大きい。従来から簡易テストは実機の結果とよく合わないとして、実機テストの結果しか信用しないとの声もしばしば聞く。しかし、現実には実機ほどバラツキのある評価試験機はない。従来の簡易テストが実機のトライボ現象をシミュレートできなかった大きな原因は、実機の現象把握が不十分で、簡易試験機が具備すべき機構と盛り込むべき試験条件や環境がよくわからずにテストした点にある。したがって、自動車のトライボロジー課題をきちんと達成するには、先ず実機の正しい現象把握が重要である。そのために、実機運転中のリアルタイム計測¹⁹⁾は、ますます重視すべき技術分野になっている。

自動車のトライボロジー課題の早期達成に向けたトライボロジストの役割は、
実機現象の把握

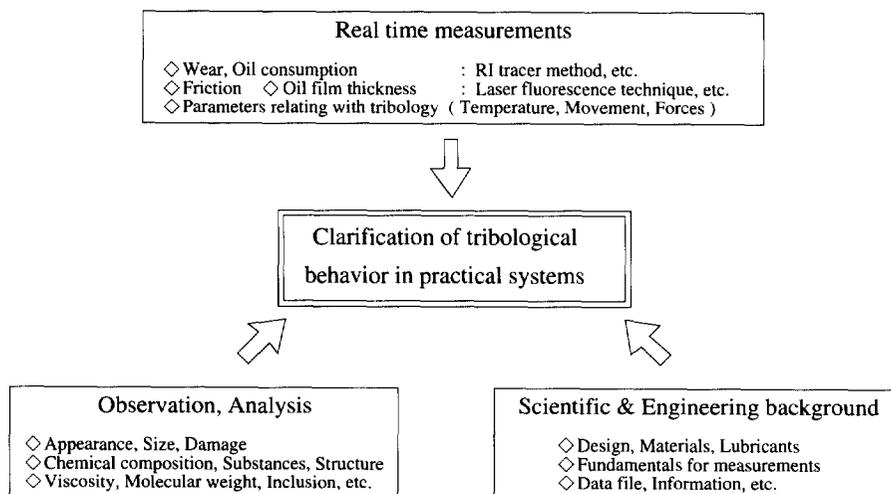


Fig.13 A method to well understand tribological phenomena in practical machine systems.

簡易評価法の確立と評価 関連基礎研究

を系統的に実施し、これに基づいてシステムや部品材料の設計・開発を的確に支援することにある。この役割を果たすためには、上述のように関連部門、関連分野との密接な連携が必要であり、もう一つのトライボロジーとして "Human Lubrication" が大切となる。

参 考 文 献

- 1) 水谷嘉之：日本機械学会第69期全国大会講演会講演論文集(Vol.C), No.910-62, (1991), 310
- 2) 朝日新聞朝刊, 1992年8月2日号, 14版
- 3) トヨタ自動車資料「自動車と環境 - 人と地球にやさしい車づくり - 」, (1992), 6
- 4) 林洋：内燃機関, 14-12(1975), 31
- 5) 宮村紀行：トライボロジスト, 36-11(1991), 855
- 6) 立石幸男：自動車技術会シンポジウム資料「トライボロジーの最新技術」, 名古屋, (1992), 14
- 7) 中田雅彦：月刊トライボロジ, 5-3 (1991), 9
- 8) 平田昌邦：日本機械学会ワークショップ講演論文集, No.910-51「自動車のトライボロジー」, 東京, (1991), 31
- 9) 馬場泰一：ref. 8), p.85
- 10) 改訂版「潤滑ハンドブック」, 日本潤滑学会編, (1987), 345, 養賢堂
- 11) 不破良雄, 中小原武：ref. 8), p.7

- 12) 林直義：第24回東海トライボロジー研究会資料, 名古屋, (1991), 41
- 13) 石井宏明：日石レビュー, 32-6 (1990), 253
- 14) McGeehan, J. A. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 831721, (1983), 22p.
- 15) トヨタ技術会：自動車用語事典(改訂版), (1988), 516
- 16) Kawamura, M., Moritani, H., Nakada, M. and Oohori, M. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 892105, (1989), 9p.
- 17) 神崎福：日本機械学会講習会教材, No. 910-13「新しい摺動部材の特性と応用」, (1991), 67
- 18) 三田修三, 長沢裕二, 志村好男, 水谷嘉之, 高橋信明, 植野賢治：日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集, 東京, (1991), 281
- 19) 例えば, 山本匡吾：自動車技術会シンポジウム資料「自動車のトライボロジ先端技術」, (1990), 48

著 者 紹 介



水谷嘉之 Yoshiyuki Mizutani

生年：1941年。

所属：機械3部。

分野：トライボロジーに関する研究開発。
学会等：日本トライボロジー学会, 日本機械学会, 自動車技術会, STLE (Soc. of Tribologists and Lubrication Engineers) 会員。

1988年日本潤滑学会(現日本トライボロジー学会)論文賞受賞。
工学博士。