

エンジンのトライボロジー計測

山本匡吾, 野田 卓

Measurements for Tribology in Automobile Engines

Masago Yamamoto, Takashi Noda

1. はじめに

近年, 自動車用エンジンの技術動向を決める因子は, 全地球的な環境保護・省資源のニーズと顧客からのニーズが主なものである。この要請の中には二律背反の関係にあるものもあり, それらをいかにバランス良く進めていくかが, エンジン開発に課せられた命題である。

この命題を解くキーテクノロジーの一つはトライボロジー技術であり, その果たす役割は今後ますます重要になってくると思われる。エンジンは周知のようにピストン, 軸受, 動弁系など多くの運動部位があり, そこには摩擦・摩耗・潤滑などの問題が非常に多い。これらエンジンのトライボロジーに係わる問題を扱うとき, 各々の現象を的確に計測・評価することは, 非常に重要である。

ここでは, 油消費計測, 摩耗計測, 摩擦計測および各種現象を解析する上で必要な運動部位の温度, 圧力, ひずみなどの物理量の計測につき, 著者らの経験をまじえて紹介する。

2. エンジン油消費計測

エンジンにおいてエンジン潤滑油(以下油)は各摺動部の潤滑および冷却などのため不可欠である。この油の消費(以下油消費)が多いと油補給のわずらわしさやランニングコストが増加するばかりでなく点火プラグ汚損, ピストンデポジットの増加, ピストンリング(以下リング)の膠着なども起こりやすい。

また, 最近では排気浄化に係わる社会的要請から, さらに油消費の低減が求められている。この油消費低減を実現する上で, 油消費計測技術は必

要不可欠である。本章ではこの計測法とその特徴を述べる。

2.1 油消費経路

エンジンにおいて油が消費される経路としてはピストンとシリンダのすきまを通して燃焼室に入る経路(以下油上り), バルブとバルブガイドのすきまを通して燃焼室に入る経路(以下油下り)およびPCV(Positive Crankcase Ventilation)系よりブローバイガスと共に持ち去られる経路の3通りがある。またターボチャージャ付きエンジンではそのシール部よりもれる経路もある。いずれの場合も最終的には排気ガスに含まれて排出される。

2.2 各種油消費計測法

2.2.1 重量法および容量法

これらの方法は簡便で, かつ特殊な設備・機器を必要としないため古くから利用され, いろいろ工夫されている¹⁾。その中から代表的なものをFig.1に示し, その概要を以下に説明する。

(1) ドレイン法

供試エンジンを暖機運転し, ここで油を抜きとり計量する。この油をエンジンに入れ所定条件で運転した後再び油を抜きとり計量し, その差より油消費量を求める方法である。実際にはこの操作を数回くり返す。

(2) 連続重量法

オイルパンをエンジン本体から分離して秤の上に置き, 運転中のオイルパンの重量変化より求める方法である。また類似のものに, 油供給をドライサンプ方式として, オイルタンクの重量変化より求める方法もある。装置は複雑になるが精度はドレイン法より高い。

(3) 定油面法

キーワード

エンジン, トライボロジー, 計測, オイル消費, 摩耗, 摩擦, 潤滑, 運動部計測, リンク機構, RI

オイルパン内が一定の油面になるようにリザーブタンクから油を供給し、リザーブタンクの重量変化または容積変化から求める方法である。またオイルパン外に別途設けた油タンク内の油量変化から求める方法もある。

2.2.2 トレーサ法

トレーサ法は重量法や容量法に比べて精度が高く、多くの特徴を持っている。このため、解析実験には非常に有効である。このトレーサ法には以下に示す4つの方法がある。

(1) ラジオ・アイソトープ (以下RI) を利用する方法²⁻⁴⁾

RIで標識した油を用いてエンジンを運転し、この時排出される排気ガス中の放射能強度を測定することで油消費量を求める方法である。用いるRIは、 ^{14}C 、 ^3H 、 ^{82}Br 、 ^{35}S などである。ここでは、当所で開発、実施してきた ^{35}S によるRIトレーサ法⁵⁻⁸⁾を紹介する。

この方法では、まず油を ^{35}S -硫化オレイン酸で標識する。ついでFig.2に示すように、運転過程で排気からサンプリングした $^{35}\text{SO}_2$ および $^{35}\text{SO}_3$ を吸収筒内の過酸化水素水に反応させて $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$ に固定し、その放射能強度をプラスチックシンチレータを用いた検出器で連続的に計測する方法である。高感度であるためFig.3に示すような油消費特性を短時間で求めることができる。ここで、各気筒より排気を採取すれば気筒毎の油消費も容易に求められる。さらに2.1節で述べた油下りなど各経路毎の分離測定もできる。また吸収筒を接触反応方式に変更すれば、Fig.4のような過渡運転時での測定も可能である。この方法はディーゼルエンジンにも適用できる。

(2) アルカリ金属による方法⁹⁾

油中に添加物として含まれるNaなどのアルカリ金属をトレーサとし、蛍光光度計で排気中のそれを測定する方法である。ただし、報告例は非常に少ない。

(3) 燃料に水素を用いる方法^{10,11)}

燃料に水素を用いると、エンジンの排気ガス中の炭素成分は油消費によるものだけになる。その排気ガスを酸化触媒を通して完全燃焼させ、発生した CO_2 を定量すれば油消費量が求められる。この方法は連続測定が可能であり、応答速度も10秒以

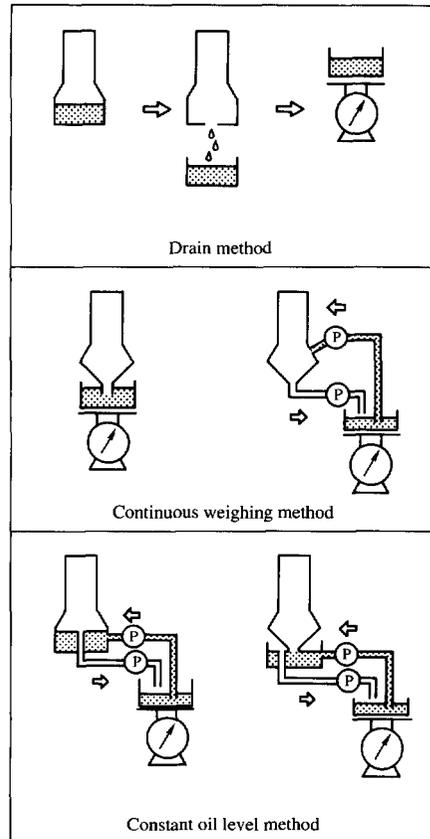


Fig.1 Weighing and Volumetric method for oil consumption measurement.

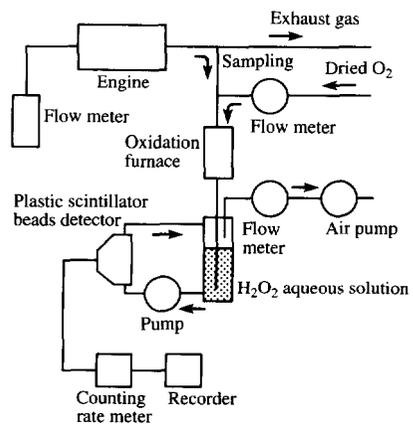


Fig.2 Block diagram of RI tracer method for oil consumption measurement.

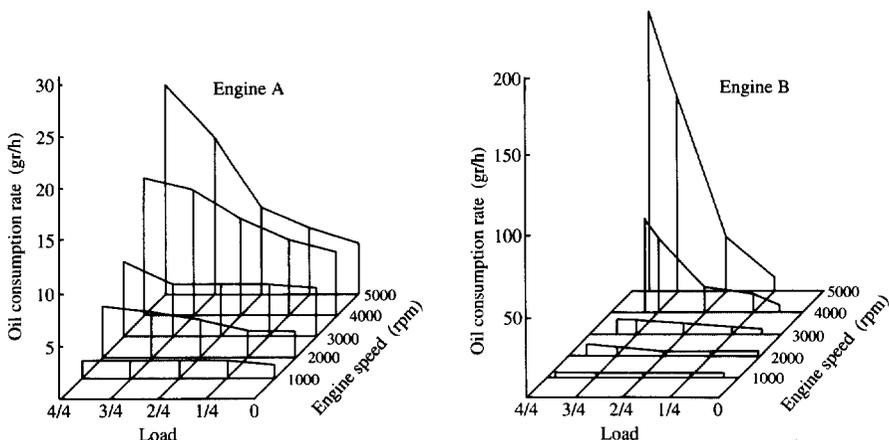


Fig.3 Oil consumption obtained from engine tests.

下と速いので、過渡的な現象も把握できる。ただし、ガソリンと燃焼状態が異なるので、計測上いくつかの注意が必要である。また油中の炭素をトレーサとしているため、RIトレーサ法のような各経路毎の分離測定はできない。

(4) Sストレス法

油中には硫黄 (S) が0.1~1.0wt%含まれており、このSが燃焼すると SO_2 および SO_3 として排出される。Sストレス法はこのS分を定量することによって求める方法である。ただし、市販のガソリンにもSが含まれている (S=0.016wt%) ため、これで運転すると、排気ガス中のS分はガソリンによるものが支配的となる。よって本手法では、燃料にS含有量の極めて少ないプラットフォームガソリン (S=0.00074wt%) または、イソオクタン、トルエン、ノルマルヘキサンの特級試薬を混合したものが用いられる。このSの定量にはバッチ法と連続測定法がある。バッチ法には、 H_2SO_4 として固定された吸収液を、トリンを指示薬として過塩素酸バリウムで滴定する方法¹²⁾、および分光光度滴定装置で測定する方法¹³⁾がある。一方、連続測定法では、排気ガスをFig.5のような方法で直接サンプリングした、NDIR (Non-Dispersive Infrared Analyzer) 法¹⁴⁾やFPD (Flame Photometric Detector) 法¹⁵⁾を油消費計測用に改良した装置で測

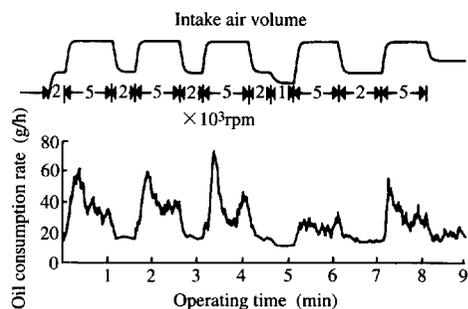


Fig.4 Engine oil consumption during a transient operation.

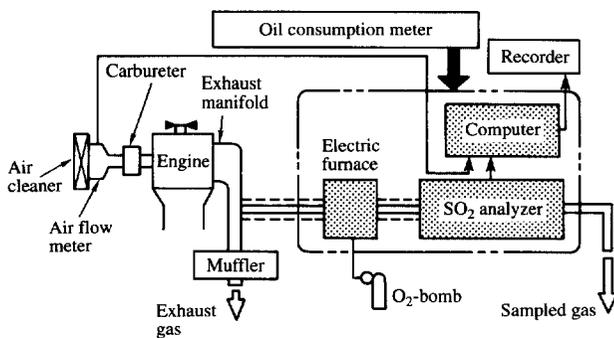


Fig.5 Block diagram of NDIR method for oil consumption measurement.

定する。いずれも重量法に比べて精度は高く、応答性(90% : 2.5秒以下)が良い。したがって過渡状態の現象もよく把握でき、解析実験には有効かつ汎用性の高い手法である。また、最近では波長可変形レーザ分光法を用いた方法¹⁶⁾やヨウ素電解液中に排気ガスを導入し、SO₂との酸化反応を利用する方法¹⁷⁾もある。ただし、本方法は、ガソリンエンジンを対象にしている。ディーゼルエンジンでは、S量が極めて少ない軽油を安価に入手できないため、本方法の適用は現状では困難である。

3. 摩耗計測

エンジンには多くの摺動部があり、この摺動部の耐摩耗性の良否はエンジンの耐久性を直接左右する。したがって、摩耗に係わる問題はエンジンのトライボロジーの中でも重要な事項の一つである。エンジンにおける摩耗には単なる機械的な摺動だけでなく、温度、圧力、湿度、化学的雰囲気、振動など多くの要因が関与している。このため、その現象解明には実機エンジンでの摩耗計測試験が不可欠である。ここでは実機エンジンでの主な摩耗計測・評価法につき紹介する。

3.1 一般的な摩耗計測法

一般的な摩耗計測は、エンジンを所定の条件で長時間運転後分解する方法で行われる。Fig.6にその手順を示す。これらの方法によってエンジン各部品の総合的な評価が簡便にできる。また、他の試験と合わせて評価できる有用な方法であり、現在最も多く利用されている。反面、これらの方法では、評価試験に長時間を要し、運転途中の経過

や過渡現象をとらえることが困難である。

3.2 RIによる摩耗計測法

RIによる摩耗計測法は、特別な場合を除き、対象とする部位に 原子炉による中性子¹⁸⁻²⁰⁾または 高エネルギー加速器(サイクロトロンなど)による荷電粒子²¹⁻²⁵⁾(プロトンやデューテロンなど)を衝撃させ、この時に起こる核反応で生成するRIをトレーサとして利用するものである。すなわち、Fig.7に示すように、放射化部品をエンジンに組み付け、外部に設けた放射線検出器で 摩耗に伴う残留放射能の強度変化、または 潤滑油中に混入する摩耗粉の放射能強度を測定する方法である。いずれの方法も時間に対する摩耗率が求められ、測定感度が高い。このためサブミクロンの摩耗計測が可能であり、非破壊でリアルタイムな計測ができるのが大きな特長といえる。またオートラジオグラフィにより相手側への摩耗粉の移着状況を知ることができる。したがって、RIトレーサ法は、摩耗のメカニズムを知る上で有効な手段となる。材料的にはほとんどの金属に適用できる。また最近ではゴム、プラスチック等への適用も検討²⁶⁾されている。適用例として、著者らが実施したもののなかから、ピストンリング²⁰⁾およびバルブフェース摩耗計測²⁴⁾の測定結果をFig.8およびFig.9に示す。

3.3 その他の検知・評価法

その他エンジンを分解する必要のない摩耗に係わる表面損傷の検知・評価法には次のようなものがある²⁷⁾。

マグネティックチップディテクタによる検知

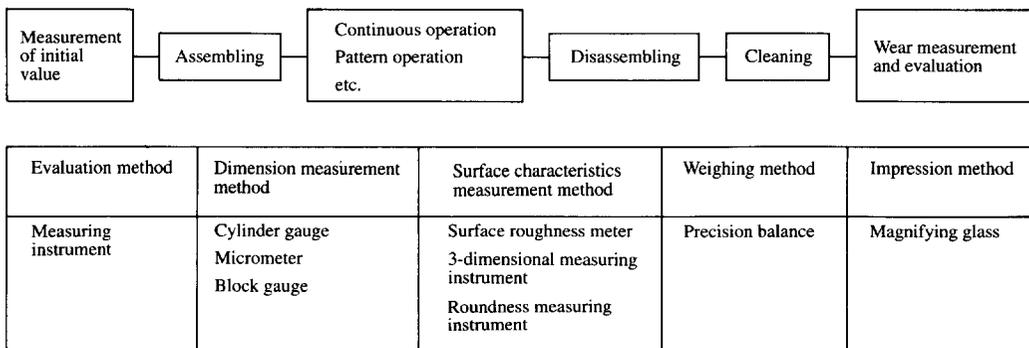
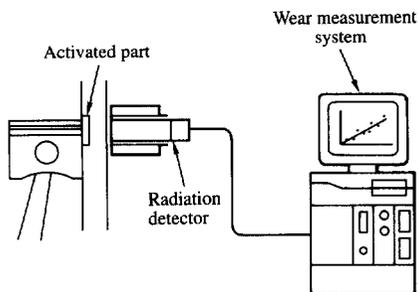
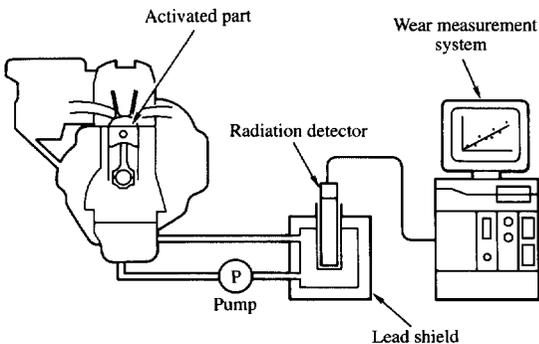


Fig.6 Normal process of wear measurement and evaluation methods.



(a) Thin layer difference method



(b) Flow through method

Fig.7 Tracer method for wear measurement.

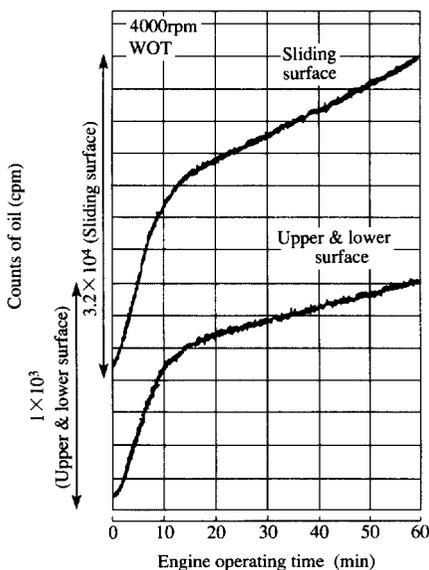


Fig.8 Recording charts of top ring wear by Integration method.

ディテクタの磁石によって吸いつけられた異物を電氣的にとらえ、異常摩耗を検知する方法である。この方法はモニターとしての使用には適しているが、解析実験には適さない。

分光分析による検知^{2,8)}

使用中の油を定期的に採取し、分光分析により含有金属を調べて異常摩耗を検知する方法である。含有成分から摩耗を生じた部品の損傷程度を推定する。この方法は、エンジン部品の総合的な判断

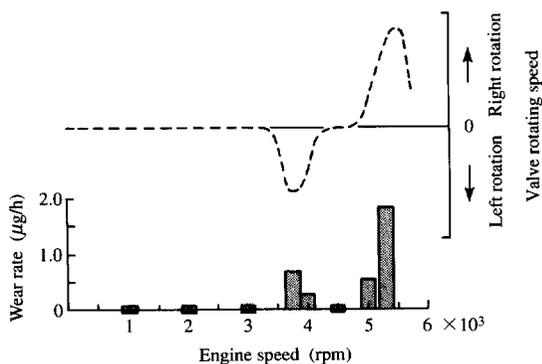


Fig.9 Relation of valve face wear and valve rotation.

をするのに適しているが、同一材質の部品を特定するのは困難である。

フェログラフィーによる検知^{2,9)}

大きな磁場勾配のある磁石上に試料板を置き、採取した油を流下させると、磁性粒子がほぼ大きさの順に帯状に沈着する。この帯の濃度と摩耗粒子の流度分布を透過光と反射光を合わせて用いる2色顕微鏡によって観察し、摩耗の形態などを推定する。

4. 摩擦計測

エンジンの摩擦は、図示仕事と正味仕事の差で定義されており、エンジン本体の摩擦と補機（水

ポンプ、油ポンプなど)の駆動損失から成る。このうち、本体の摩擦が大半を占める。全摩擦の図示仕事に対する割合は、エンジン負荷によって異なり、10~100%になる。したがって、その低減がエンジンの燃料消費改善にとって非常に重要な課題である。

エンジン本体の摩擦をモータリング分解法で計測した例をFig.10³⁰⁾に示す。ピストン部(ピストンおよびリング)の摩擦は全摩擦のほぼ半分で、最も大きな割合を占める。二番目に割合の大きいのは滑り軸受部である。したがって、これらの摩擦がエンジン実働時に計測できれば、燃料消費改善に有効な情報が得られる。以下、それらの摩擦計測装置と計測結果について述べる。

4.1 ピストン部の摩擦

ピストン部の摩擦は、主にリングとシリンダライナ(以下ライナ)およびピストンスカートとライナの摺動部で生ずる。この摩擦は、通常両者の合計として計測され、その計測法には二通りの方法がある。一つは、ライナをシリンダブロックから分離・可動にして、直接ライナに作用する摩擦力を計測する方法である。他は、燃焼室ガス圧力およびコネクティングロッド(以下コンロッド)に作用する力を計測し、往復動慣性力を含めた計算により算出する方法である。一番目の方法として、可動ライナ法と3分力センサ法、二番目の方法として、瞬時IMEP(Instantaneous Indicated Mean Effective Pressure)法がある。以下、各方法について述べる。

可動ライナ法については、古くから多くの研究³¹⁻³⁴⁾がなされている。ライナをダイヤフラムなどで懸架し、シリンダ軸方向力をロードセルで支持して摩擦力を計測する方式が多い。Fig.11³³⁾およびFig.12³³⁾は、それぞれ、典型的な計測装置の一例とその計測結果である。この方法では、スラスト力支持部に作用する摩擦力の混入とライナ支持剛性不足に起因する振動のため、計測誤差が避けられない。スラスト力を静圧軸受で支持することにより、その問題を改善しようとする方法^{34, 35)}もある。

3分力センサ法は上記の二つの誤差要因を解決すべく開発された方法で、Fig.13³⁶⁾にその装置を示す。この方法は、ライナを3分力センサで剛的に支持するもので、スラスト力も同時に計測できる。

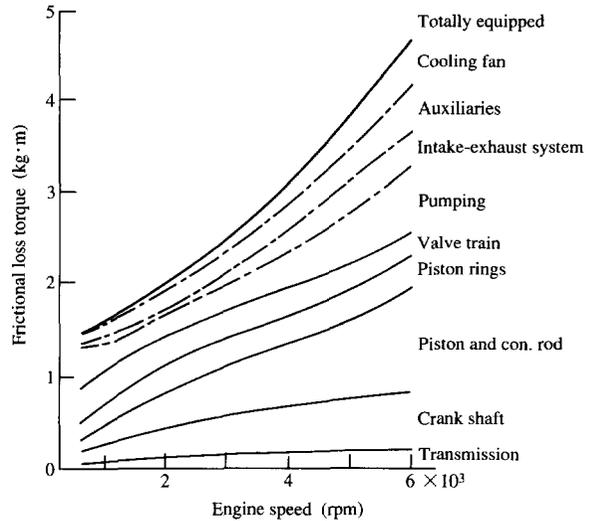
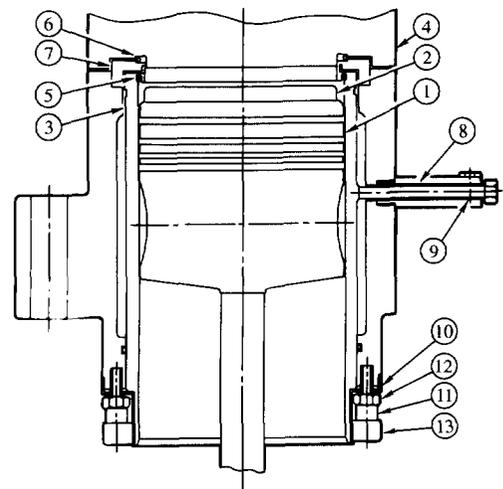
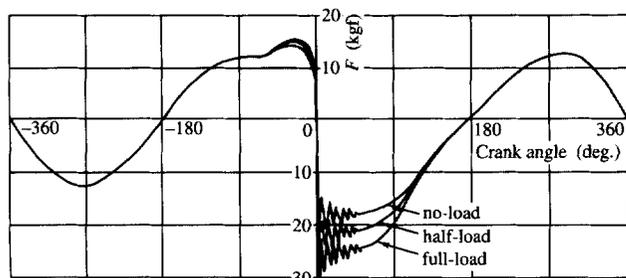


Fig.10 Rate of the frictional loss in an engine.



- | | | |
|----------------------|----------------------------|-------------------|
| 1. Piston | 6. Seal ring | 11. Piezo pickup |
| 2. Relieved top land | 7. O-ring holder | 12. Clamping bolt |
| 3. Cylinder liner | 8. Lateral stopper (bar) | 13. Clamp screw |
| 4. Cylinder head | 9. Elastomer | |
| 5. Gas seal O-ring | 10. Lateral stopper (ring) | |

Fig.11 Measuring device of piston frictional force by movable liner method.



In case of constant cylinder temperature

Fig.12 Effect of load on piston frictional forces at 1000 rpm.

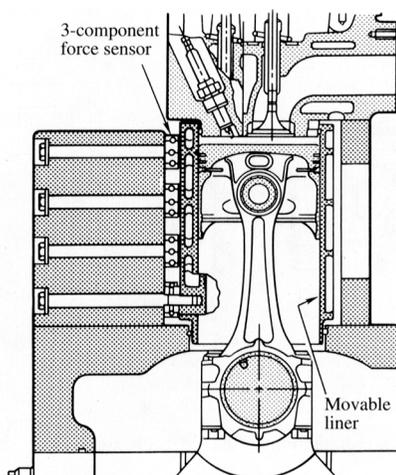
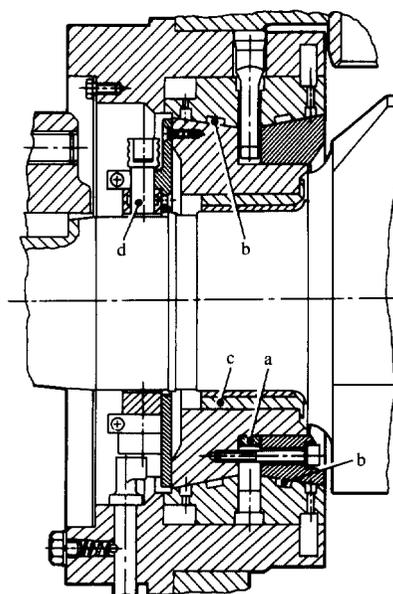


Fig.13 Measuring device of piston frictional force by 3-component force sensor method.

瞬時IMEP法³⁷⁾では、実機のライナ部を改良せずにピストン摩擦力を求めることができる。ただし、そのためには、ガス圧力、コンロッドに作用する力、さらに慣性力を精度良く計測あるいは計算しなければならず、本方法はその点で煩雑な方法である。

4.2 滑り軸受部の摩擦

エンジンの滑り軸受部としては、クランク軸の主軸受、コンロッド大端部軸受、カム軸受などがある。このうち、摩擦が大きいのは、前二者である。コンロッド大端部軸受については、計測の難



a) spacer ring, b) oil pockets, c) sliding-contact bearing, d) capacitive pick-up for paths of displacement

Fig.14 Measuring device of main bearing frictional force using hydrostatic double bearings.

しさからか、摩擦を測った報告例は見られない。主軸受についても数例³⁸⁻⁴¹⁾があるのみである。Fig.14³⁸⁾の装置は、主軸受を静圧軸受で支持し、それに作用する摩擦モーメントを計る方式で、その計測結果の一例をFig.15³⁸⁾に示す。他の装置は支持方法が異なり、ニードル軸受が使われている。

5. 運動部の各種計測

前2~4章で、トライボロジー現象の主な計測法に関して述べた。現象をさらに深く解析するには、各運動部位の温度、変位、加速度、ひずみなどの計測を、これらの計測と合わせて実施することが重要である。

各運動部位からの物理量信号の取り出し方法は、以下の3種類に大きく分けられる。

- (1) 直結方式
リンク機構、板パネ、ピアノ線
- (2) 接触方式
接点式、往復摺動式、回転摺動式(スリップリング)

(3) 非接触方式

電磁式, 無線式 (テレメータ法),
光学式 (レーザ誘起蛍光法)

このうち, リンク機構 (Fig.16^{4,2)}) は, シリンダ内での計測に古くからよく用いられている。一方, レーザを使った光学式計測が最近脚光をあびている。このように, 信号取り出し方法は, 新旧の方法が混在しているのが現状である。

上記計測法のうち, エンジンの主要運動部 (ピストン, コンロッド, クランク軸) の計測に良く用いられる二, 三の例について述べる。

5.1 リンク機構

エンジンのシリンダ内は, 以下の理由により各種計測にとっていちばん厳しい条件にあると言える。ピストン部は, 常時高温にさらされた状態で, 通常数十~100 mmの行程で往復運動し, ガス力と慣性力の和の変動荷重が作用する。したがって, 信号の取り出し方法として, 電氣的ノイズが少なく, 得られる信号の信頼性の高いリンク機構が, およそ30年ほど前からよく使われている。このため, リンク機構を用いた計測については多くの報告^{4,3-4,7)}がある。リンク機構には, Fig.16に示すように二つのタイプがあるが, 計測部位により, その質量と容量の影響が少ない方を使い分ける必要がある。

Fig.17^{4,7)}は, リングの溝内における上下方向の挙動およびピストンランド間圧力を計測し, 油消費に対する影響を見た例である。

Fig.18^{4,5)}は, ピストンの挙動および横方向加速度を直接計測した例であり, 両者に良い相関のあることがわかる。

5.2 テレメータ法

テレメータ (無線テレメータ) の一般的な構成を Fig.19^{4,8)}に, 各種変調方式をTable1に示す。数チャンネルの計測には, 装置の小型化が可能なFM-FM変調方式が適している。送信機の電源には, 水銀電池などの小型電池が使用されているが, その容量はあまり大きくない。それゆえ, 長時間の計測を行う場合には電磁誘導を利用した外部給電方式が適している。ただし, 装置の複雑化は避けられない。

最近の技術としては, ピストンの往復運動を利

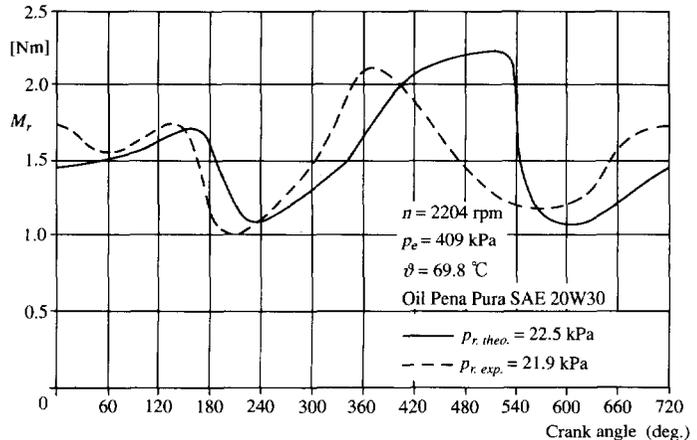


Fig.15 Frictional moment M_r in a main bearing.

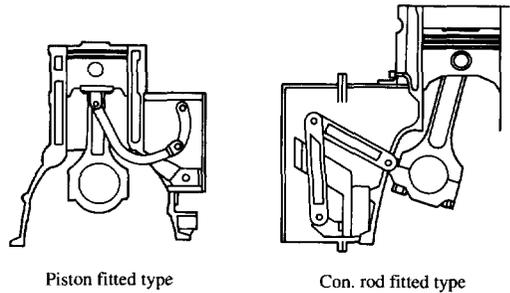


Fig.16 Configuration of linkage mechanism.

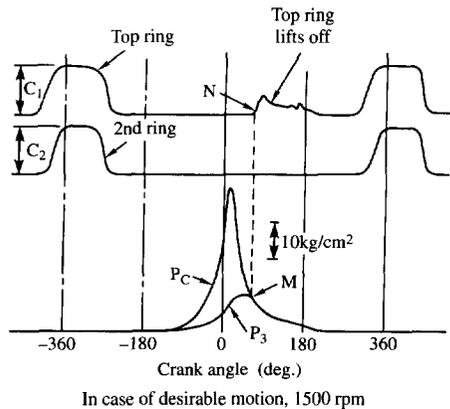


Fig.17 Axial movement of top and 2nd rings and 2nd land pressure P_3 in a gasoline engine under full load.

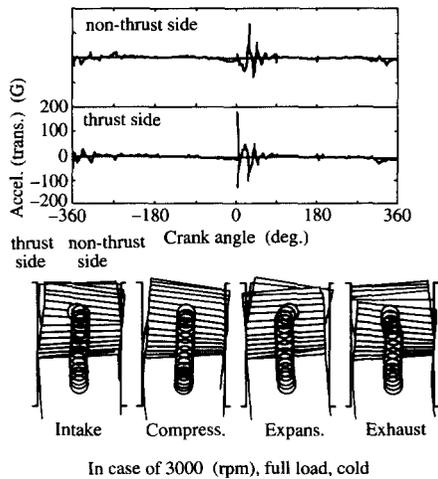


Fig.18 Piston movement in 1.6-liter gasoline engine.
(Upper : transverse acceleration, lower : piston attitude)

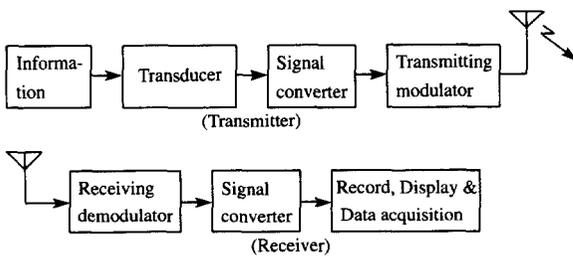


Fig.19 Block diagram of wireless telemeter.

用した自己発電型電源を用いて電力を供給している例⁴⁹⁾や、高精度V-F変換によるPFM (Pulse Frequency Modulation) -FM変調方式を使用した例⁵⁰⁾もある。

テレメータは、最近の電子技術の発達により、小型、高性能のものが市販されるようになったが、エンジン内では上述のように使用環境が厳しいためか、計測例はあまり多くは見られない^{51, 52)}。

5.3 レーザ誘起蛍光法

最近の新しい計測として、レーザ光を使用してリング、ピストンスカートとライナ間の油膜挙動を計測する、いわゆるレーザ誘起蛍光法 (LIF法 : Laser Induced Fluorescence 法) がある。これは、蛍光剤を混ぜた潤滑油中にレーザ光を照射すると、油膜厚さに比例した蛍光強度が励起される原理に基づく方法である。

本方法が、最初にリング摺動部の油膜厚さ計測に適用されたのは古い⁵³⁾が、厚さの定量化が議論されるようになったのはここ数年である⁵⁴⁻⁵⁸⁾。初期の頃は、レーザの投光軸と受光軸が異なる方法が用いられた^{53, 54)}。その後、計測精度を上げるため、光ファイバーを使って両軸を一致させる方法⁵⁵⁻⁵⁸⁾が主流になりつつある。

Fig.20⁵⁷⁾は、光ファイバーを使ったLIF法に、さらにポリゴンミラーを追加してレーザ光を走査する "Scanning-LIF法" と呼ばれる方法である。この方法により、油膜厚さの時間的变化を捉えることができる。計測結果の一例をFig.21⁵⁸⁾に示す。

LIF法は、検定によりミクロン単位の計測が可能のため、今後トライボロジー解析の有力な手段になると思われる。

Table1 Various modulation method of wireless telemeter.

Amplitude modulation (AM)	
Frequency modulation (FM)	
Frequency sharing method	FM-FM
	FM-PM (Phase modulation)
Time sharing method	PAM (Pulse amplitude modulation)-FM
	PWM (Pulse width modulation) -FM
	PPM (Pulse phase modulation) -FM
	PCM (Pulse code modulation) -FM

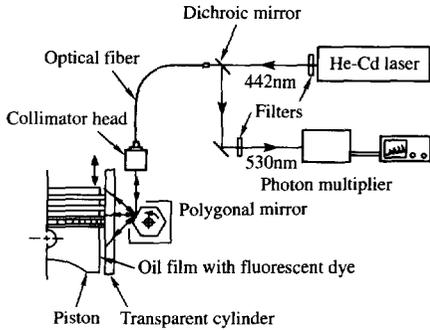


Fig.20 Schematic diagram of Scanning-LIF system.

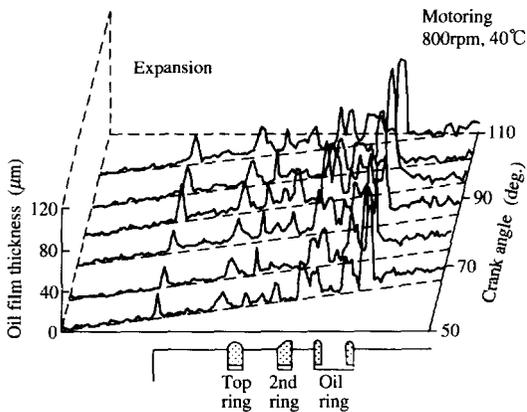


Fig.21 Oil film thickness around piston rings at expansion stroke.

6. おわりに

エンジンはトライボロジー技術のかたまりであると言われており、関係する機械要素における計測技術は多岐にわたっている。本稿では、その中から、筆者らが日頃身近に感じている油消費、摩擦、摩擦の計測法およびトライボロジーの現象解析に必要な運動部位の計測手法につき、概要を述べた。限られた紙面であり通り一遍的な内容になったが、本稿がいくらかでも読者の参考になれば幸いである。

参考文献

1) Bäumlner, H. : ATZ, 67- 9(1965), 309
 2) 古浜庄一：自動車エンジンのトライボロジー, (1972),

329p., ナツメ社

3) Kawamoto, J., Yamamoto, M. and Ito, Y. : SAE Tech. Pap. Ser., No.740543, (1974), 9p.
 4) Dorrin, D. S. and Coles, B. W. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 710141, (1971), 19p.
 5) 川本淳一, 山本匡吾, 伊藤明生, 花岡正紀：潤滑, 22- 12 (1977), 705
 6) 川本淳一, 山本匡吾, 伊藤明生, 花岡正紀：ref. 5), 788
 7) 川本淳一, 山本匡吾：潤滑, 23-3(1977), 277
 8) 川本淳一, 山本匡吾, 山田研一, 川畑孝和：潤滑, 24-1 (1979), 41
 9) Bryan, F. R., Neerman, J. C. and Hinsch, J. E. : SAE Trans., 69(1961), 204
 10) Furuhashi, S. and Himura, M. : J. of ASLE, 34-12(1977), 665
 11) 昼間勝, 古浜庄一：潤滑, 23-8(1978), 40
 12) Probst, A. : SAE Tech. Pap. Ser., No.770065, (1977), 6p.
 13) Hanaoka, M., Ise, A., Nagasaka, N., Osawa, H., Arakawa, Y. and Obata, T. : SAE Tech. Pap. Ser., No.790936, (1979), 8p.
 14) Maeda, Y., Inoue, T., Nakada, M. and Hamada, Y. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 860544, (1986), 6p.
 15) 中島康夫, 長谷好文, 村瀬功, 南部修哉：日本潤滑学会エンジン潤滑シンポジウム予稿集, (1982), 51
 16) Carduner, K. R., Colvin, A. D., Leong, R. Y., Schuetzle, D., Mackay, I., Karecki, D. R. and Schiff, H. I. : Environ. Sci. Technol. : 26-5(1992), 930
 17) Colvin, A. D., Carduner, K. R., Leong, D. Y., Ames, R. and Bissell, H. : SAE Tech. Pap. Ser., No.920655, (1992), 20p.
 18) 大野明, 野尻利明, 丸山修三, 中島康夫：Radioisotopes, 13(1964), 393
 19) 古浜庄一, 秋條捷雄：潤滑, 16-12(1971), 11
 20) 山本匡吾, 川本淳一, 伊藤明生：日本潤滑学会研究発表会予稿集, (1981), 69
 21) Conlon, T. W. : Ind. Lubr. Tribol., 34(1982), 20
 22) Blatthlet, C. C., Sioshansi, P. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 872155, (1987), 10p.
 23) Schneider, E. W., Blossfeld, D. H. and Balnaves, M. A. : SAE Tech. Pap. Ser., No.880672, (1988), 11p.
 24) 山本匡吾, 山田研一, 筒井治, 川本淳一, 前田頼成, 熱海富昭：日本潤滑学会研究発表会予稿集, (1988), 549
 25) 山本匡吾, 川本淳一：トライボロジスト, 35-1(1990), 26
 26) Asher, J., Conlon, T. W., Shea, J. H. and Parker, D. J. : Necl. Instrum. Methods, 178(1980), 293
 27) 八田桂三, 浅沼強, 松本正勝：内燃機関ハンドブック, (1979), 1149p., 朝倉書店
 28) 中村貫一, 樺山薫：潤滑, 17-11(1972), 783
 29) Scott, D. S., Seifert, W. W. and Westcott, V. C. : Sci. Am., 230-5(1974), 88
 30) 松本清：日本機械学会誌, 79-694(1976), 870
 31) Livengood, J. C. and Wallour, C. : NACA Tech. Note 1249,

- (1947)
- 32) Groth, K. : Schiff & Hafen/Kommandobrücke, 29-10(1977), 917
- 33) Furuhashi, S. and Takiguchi, M. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 790855, (1979), 24p.
- 34) Krause, H. H. : Schmieretech. Tribologie, 29-3(1982)
- 35) 北原辰巳, 和栗雄太郎, 副島光洋, 布谷昌俊, 大坪勝 : 第9回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1991), 201
- 36) 伊藤泰志, 許斐敏明, 岩下義博 : 自動車技術会論文集, No.37, (1988), 163
- 37) Uras, H. M. and Patterson, D. J. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 830416, (1983), 14p.
- 38) Thiele, E. : MTZ, 43-6(1982)
- 39) Cerrato, R., Gozzelino, R. and Ricci, R. : IMechE/SAE 1984, C426/84
- 40) Miura, A. and Shiraiishi, K. : SAE Tech. Pap. Ser., No. 890140, (1989), 9p.
- 41) 三原雄司, 瀧口雅章, 古浜庄一 : 日本機械学会講演論文集(Vol.B), No.910-17, (1991), 370
- 42) 山本匡吾, 杉本隆雄, 中田雅彦 : "エンジンドライブ解析に必要な運動部分の計測技術", トライボロジスト, '93年春出版予定
- 43) Westbrook, M. H. and Munro, R. : Trans. of the ASME, 66-DGEP-1, (1966), 8p.
- 44) Laws, A. M., Parker, D. A. and Turner, B. : 14th FISITA Conf., (1971), 29
- 45) 野田卓, 山本匡吾, 筒井治, 川本淳一, 堀孝信, 黒岩實 : 日本機械学会論文集(B編), 55-511(1989), 916
- 46) Noda, T., Yamamoto, M., Ohmiya, Y., Kawamoto, J. and Nakada, M. : SAE Tech. Pap. Ser., No.892104, (1989), 10p.
- 47) Furuhashi, S., Hiruma, M. and Tsuzita, M. : SAE Tech. Pap. Ser., No.790860, (1979), 16p.
- 48) 山内二郎 : 電気計測便覧, (1966), 875, オーム社
- 49) Burrahm, R. : Southwest Res. Inst. pamphlet "Engine Instrumentation"
- 50) 鷲見和正, 荒川英男, 小松原博文 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 842(1984), 223
- 51) Young, R. E. : Ind. Electron., March(1965), 131
- 52) 吉川和男, 名切末晴, 鷲見和正, 荒川英男, 長谷川準三 : 自動車技術会論文集, No.31, (1985), 94
- 53) Ting, L. L. : ASME Tech. Pap. Ser., 79-Lub-2(1979)
- 54) Hoult, D. P., Lux, J. P., Wong, V. W. and Billian, S. A. : SAE Tech. Pap. Ser., No.881587, (1988), 9p.
- 55) Richardson, D. E. and Borman, G. L. : SAE Tech. Pap. Ser., No.912388, (1991), 32p.
- 56) Shaw II, B. T., Hoult, D. P. and Wong, V. W. : SAE Tech. Pap. Ser., No.920651, (1992), 10p.
- 57) 三田修三, 斎藤昭則, 志村好男, 村上元一, 許斐敏明, 野平英隆 : 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1992), 175
- 58) 村上元一, 許斐敏明, 野平英隆, 三田修三, 斎藤昭則, 野田卓 : 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1992), 181

著者紹介



山本匡吾 Masago Yamamoto
 生年：1941年。
 所属：トライボロジ研究室。
 分野：パワートレインのトライボロジ
 計測・解析，理工学へのRI利用。
 学会等：日本トライボロジ学会，日本
 アイソトープ協会会員。



野田卓 Takashi Noda
 生年：1947年。
 所属：トライボロジ研究室。
 分野：パワートレインのトライボロジ
 解析。
 学会等：日本機械学会，自動車技術会
 会員。