

レーザ誘起蛍光法 (LIF 法) によるピストンの油膜挙動の解析

三田修三, 斎藤昭則

Analysis of Piston Oil Film Behavior by Using Laser Induced Fluorescence Method

Shuzou Sanda, Akinori Saito

要 旨

往復動型内燃機関の摩擦損失およびオイル消費低減には、ピストンとシリンダ間の油膜挙動解明が重要である。レーザ誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence Method …LIF法) は、油膜挙動解析の新しい方法で、近年注目されている。

この研究では、実働運転時を考慮してLIF法を詳細に検討し、蛍光剤の適切な選択と光ファイバの使用により高精度の油膜厚さ計測を実現した。さらに、観測点をピストンの軸方向に走査する新しい計測法 (Scanning-LIF法) を開発した。この方法により、シリンダ上に観測点を固定した従来の計測法では得られない、ピス

トン軸方向の油膜分布の時間変化を観測することが可能になった。

開発した計測システムを用いて、機関運転条件およびピストンリング諸元が油膜挙動に与える影響を調べた。その結果、燃焼運転時にはトップリングの油膜がスターベーション状態にあること、圧縮上死点付近でピストンスラップが発生し、反側圧力側スカート部の油膜が破断すること、オイルリングの諸元 (張力、プロフィール) により、サードランドに蓄積するオイルの量が変化すること等がわかった。

Abstract

Analysis of the oil film behavior between a piston and a cylinder liner is of great importance for reducing the friction loss and oil consumption in reciprocating engines. Laser-induced-fluorescence (LIF) technique has recently attracted much attention as a new method for the analysis.

In this study, an advanced LIF method has been developed, in which an observed point is scanned using fiber optics and a rotating polygonal mirror. This 'Scanning-LIF' system has made it possible to observe changes in the piston axial oil film distribution during the operation. The accuracy of the system in measuring oil film thickness has been improved by using the optimal fluorescent dye.

Characteristics of the oil film behavior were clarified in relation to operating conditions and piston ring specifications as follows;

- (1) Starvation frequently occurs in the top-ring oil film during the firing operation.
- (2) Oil volume on the piston third land increases with the decrease in the tangential force of the oil ring and flattening of its profile.
- (3) Oil film rupture often occurs in the piston skirt area just before the top dead center due to the piston slap motion.

キーワード

トライボロジ, エンジン, ピストン, ピストンリング, 潤滑, 光学計測, レーザ, オイル消費

1. まえがき

自動車用内燃機関においては、排出ガスの浄化と共に燃費向上とオイル消費低減が差し迫った課題となっている。燃費向上の最も有効な方法は摩擦損失の低減であるが、往復動型機関の摩擦損失のうち約30～40%はピストンとシリンダ間の摺動部に起因する¹⁾。また、オイル消費の大半はクランクケースのオイルがピストン・シリンダ間を通過して燃焼室内に入り、高温にさらされて蒸発するいわゆるオイル上りに起因すると言われている^{2, 3)}。したがって、実働運転時におけるピストンとシリンダ間の油膜挙動を解明することは、摩擦損失低減ならびにオイル消費低減の両面から極めて重要である。

従来、ピストン周辺における油膜挙動の実験的解析としては、直接ピストンまたはリングに取り付けた小型微小変位計による計測例^{3～7)}がある。しかしながら、微小変位計の出力はセンサの温度特性、動特性および分解能に影響を受けるため、実働状態での計測精度に限界があった。これに対し、近年新しい方法としてレーザ誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence 以下LIF法) が注目されている^{8～15)}。これは、蛍光物質を含む油膜に短波長レーザを照射したとき誘起される蛍光強度から油膜厚さを求める方法である。この計測法は、動的追従性に優れ、レーザビーム径に相当する高い空間分解能を有する。しかし、従来のLIF法^{8～15)}では、ライナ上に被測定点を固定するため、ピストン上の油膜厚さについては特定のクランク角における値に限定される。また、実働運転時における計測精度も十分とは言えなかった。

著者らは、これらの課題を解決しうる計測法の検討を行った。まず最適な蛍光剤の種類および濃度を選定することにより、実働運転時の計測精度を従来法より大幅に向上させた。さらに、光ファイバおよびダイクロミックミラーを活用して入射と受光を同軸化し、観測点を自由に移動計測できるシステム (同軸法) とした。この二つの改良に基づき、ピストン摺動方向に観測点を走査させ、摺動方向の油膜分布の時間変化を把握できる新しい計測法、Scanning-LIF法を開発した^{16, 17)}。

この研究報告では、開発した新しいLIF計測法と、計測した実働時の油膜挙動の解析結果について述べる。

2. レーザ誘起蛍光法 (LIF法) による油膜計測システム

2.1 測定原理

レーザ誘起蛍光法 (LIF法) の測定原理をFig. 1に示す。一定濃度の蛍光物質が含まれる油膜に短波長レーザ光を直角に照射したとき、油膜が吸収する全光量は、次式で与えられる⁹⁾。

$$I_0 \{ 1 - \exp(-ECt) \} (1 + r_1) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

I_0 ; 入射レーザの強度

E ; 油中における光の吸収係数

C ; 蛍光剤濃度

t ; 油膜厚さ

r_1 ; 金属面の反射率

この光によって誘起される全蛍光強度は、

$$F_q I_0 \{ 1 - \exp(-ECt) \} (1 + r_1) \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

F_q ; 蛍光剤の発光効率

となる。入射レーザ光の波長をカットする光学フィルタと集光レンズを介してこの蛍光を光電子増倍管 (PMT) に導いたとき、実際にPMTの計測する蛍光強度は

$$(S_r / 4\pi) F_i F_f F_q I_0 \{ 1 - \exp(-ECt) \} (1 + r_1) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

F_f ; フィルタの透過率

F_i ; 集光レンズの透過率

S_r ; 集光レンズが油膜発光部を見込む立体角

である。 $ECt \ll 1$ 、すなわち蛍光剤濃度 C と油膜厚さ t が十分小さい範囲では

$$1 - \exp(-ECt) \approx ECt \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

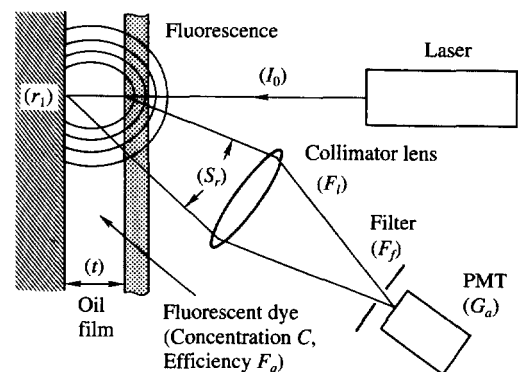


Fig. 1 Schematic view of Laser induced fluorescence method.

であるから、PMTの出力 S と油膜厚さ l は次のように比例する。

$$S = K l \quad \cdots \cdots (5)$$

$$K = (S_r / 4\pi) F_l F_f F_q I_0 (1 + r_1) ECG_a \quad \cdots \cdots (6)$$

G_a ; PMTのゲイン (出力電圧/入力光強度)

K がこの計測システム全体のゲインである。式(6)右辺の各因子のうち、蛍光の発光効率 F_q 以外は光学系および測定系を固定すれば一定となる。そこで、既知の厚さの油膜を計測して K の値を求め、式(5)を用いれば実測したPMT出力を油膜厚さに換算できる。この方法で、計測系におけるPMT出力 S と油膜厚さ l との直線性も検定できる。

しかしながら、 F_q は照射条件に依存する。たとえば、レーザを油膜の一点に照射し続けると、局所的に F_q が減少して蛍光強度が低下する。これをブリーチ効果 (Bleach Effect) と呼ぶ。計測例をFig. 2に示す。本解析で選定した蛍光剤の場合、ブリーチ効果による蛍光強度の減衰は入射光強度の削減により抑制できること、蛍光剤の濃度には無関係であることがわかった。そこで、レーザを走査しながら照射した時の蛍光強度の減

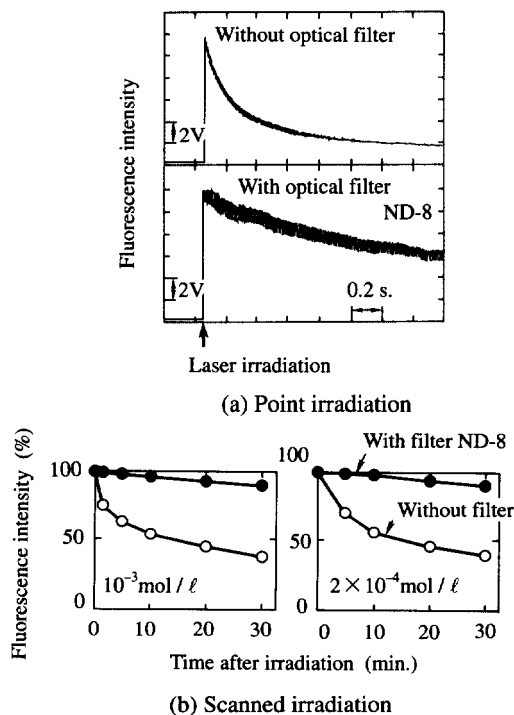


Fig. 2 Bleach effect.

衰が1時間で5%以下になるように、入射レーザ光を光学フィルタで減光した。

2.2 固定観測点LIF法

LIF法を用いてピストンとシリンダ間の油膜厚さを計測するシステムをFig. 3に示す。

(a) 従来法

Fig. 3 (a) は、これまでに報告されたLIF法の一例である。これはガラス製シリンダライナの外部から油膜に直角にレーザを照射し、励起された蛍光強度を別の角度から集光して計測する方法である⁹⁾。この方法では計測のたびにレーザ光の照射点と計測系の光軸を厳密にあわせる必要があり、計測中機関の振動等で光軸がずれるとデータに影響をおよぼす¹²⁾。

(b) 本方法 (同軸法)

本解析では、Fig. 3 (b) に示すように光ファイバとダイクロイックミラーを用いて従来法の欠点を次のように克服した。まず、入射レーザを光ファイバとコリメータヘッドを介して被測定部に照射し、同一のレンズとファイバで、励起された蛍光を受光する。ついで、蛍光と入射レーザとをダイクロイックミラーで分離し、蛍光だけをPMTに導いて計測する。同様の方法は、ご

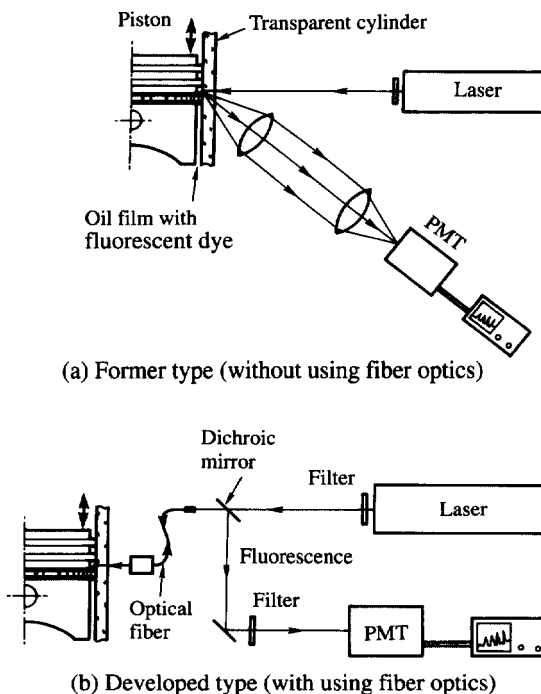


Fig. 3 Fixed point LIF method.

く最近 Richardsonら¹⁴⁾, Shaw IIら¹⁵⁾ によっても報告された。Shaw IIらは、同心型二重光ファイバにより照射と受光を同軸化した。この同軸法では、コリメータヘッド部またはファイバ先端部のみを被測定点近傍に設置すればよく、その他の光学系は、一度組めばその後変更を要しない。したがって操作が簡便で、測定部位の変更も容易である。また、振動等の影響を受けにくく、測定データの精度が向上する。さらにこの同軸法は、次のScanning-LIF法を可能にした。

2. 3 Scanning-LIF法

前述のようにレーザ照射系と受光系を同軸にすると、被測定点の移動が容易になる。これを利用して、Fig. 4に示すScanning-LIF法を考案した。コリメータヘッドから出たレーザ光を高速回転するポリゴンミラーに照射し、透明シリンダを介してピストンの摺動方向に走査する。励起された蛍光は、照射レーザと同一経路をコリメータヘッドまで戻り、ダイクロイックミラーおよびシャープカットフィルタで蛍光波長成分のみ分離され、PMTで計測される。このように被測定点をピストン摺動方向に走査 (Scan) するのが本方法の特徴である。走査速度をピストン速度に対して十分に速く設定すれば、一回の入射光走査で得られる蛍光強度の波形は、瞬時のピストン摺動方向の油膜分布を示す。したがってこの波形を各走査ごとに時系列的に比較すれば、油膜分布の時間変化をとらえることができる。機関回転速度が高く、一回の走査の間のピストン移動量が無視できない場合は、これをポリゴンミラーの回転速度と機関回転速度とから計算し、データの解析に際して考慮した。

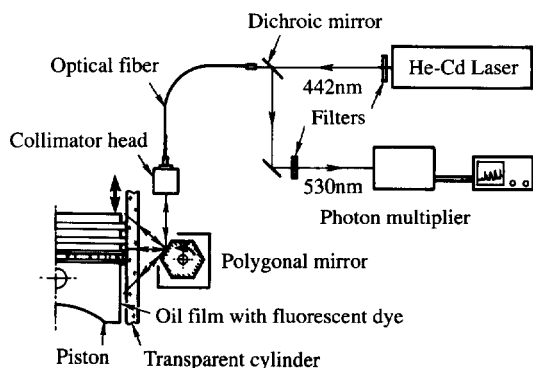


Fig. 4 Scanning-LIF method.

3. 精度検定

3. 1 レーザおよび蛍光剤の選定

検定および計測に先立つ予備実験によって、光源には安定性の良いHe-Cdレーザ (波長442nm, 90mW) を選定した。蛍光剤については、最大吸収波長が442nm (レーザ波長) 付近にあり、最大発光波長が500nm付近にある3種類 (Table 1) を検討し、エンジン油と最も混合しやすいCoumarin-6を選定した。

Coumarin-6を直接エンジン油に溶解するのは困難なため、溶剤 (ジクロロメタン) に溶解した後、エンジン油 (SG級市販品) と混合した。

Coumarin-6の分子構造および吸収・発光波長特性をFig. 5に示す。ダイクロイックミラーとしては、レーザ光の波長 (442nm) を透過し、蛍光の最大波長分布付近を反射する波長特性のものを選定した。また、PMTの直前には530±10nmのシャープカットフィルタを挿入した。

3. 2 精度検定法と検討項目

計測精度をFig. 6に示す方法で検討した。10μm以下の検定には、Fig. 6 (a) に示すようにブロックゲージ上

Table 1 Fluorescent dyes.

Dye	Maximum adsorption	Maximum radiation
Coumarin 6(※)	458nm	497nm
Coumarin 7	437	488
Coumarin 337	443	488

(※) Selected

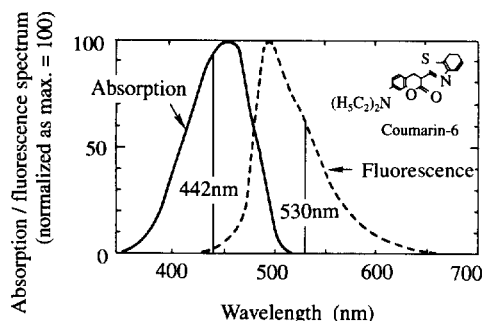


Fig. 5 Characteristics of dye Coumarin-6.

にニッケルメッキで約 $2\mu\text{m}$ ごとの段差をつけた試作検定器を用いた。この検定器とオプティカルフラットとの間に作った階段状油膜についてScanning計測を行った。 $10\mu\text{m}$ 以上の検定には、Fig. 6 (b) に示すようにマイクロメータヘッドを用いて油膜を調節し、約 $200\mu\text{m}$ までの直線性を調べた。実働運転条件を考慮し、以下の要因が計測出力の直線性および動特性におよぼす影響を調べた。

- (1) 蛍光剤濃度 (2) 油温 (3) 油の酸化(変色)
(4) 金属面の反射率

また、Scanning-LIF法の計測精度におよぼす次の要因の影響についても調べた。

- (5) 走査速度 (6) レーザ入射角

3.3 検定結果

(1) 蛍光剤濃度の設定

蛍光剤濃度を変えたときの検定結果をFig. 7に示す。濃度 $8 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ 以下では、スカート部の油膜厚さに相当する約 $70\mu\text{m}$ まで良好な直線性を示した。これ以上に濃度が高くなると、油膜の厚い領域で直線性が失われた。これは油膜自身による入射光吸収の影響が現れ、近似式(4)が成り立たなくなったためと考えられる⁹⁾。一方、計測系におけるノイズの影響を防ぐためには直線性を有する範囲で十分な蛍光強度が得られるのが望ましい。以上の点から、Coumarin-6の濃度は $4 \sim 8 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ (約 $0.14 \sim 0.28 \text{ g/l}$) とするのが適当であるこ

とがわかった。本解析では $7 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ に設定した。

(2) 油温の影響

検定器をホットプレートで下から加熱したときのブロック側面温度と蛍光出力の関係を、各油膜厚さについてFig. 8に示す。温度は油膜の約 0.5 mm 下のブロック側面に熱電対を接着して測定した。ブロック温度が 160°C になると、蛍光出力は室温のときの約65%に低下したが、油膜厚さと出力との直線関係はこの温度でもほぼ維持されることがわかった。

(3) 油の酸化(変色)の影響

蛍光剤を混合した後大気中で空気を注入しながら 150°C に加熱し2～12時間酸化させた油の蛍光出力変化を調べた。黒変して不透明になった12時間酸化後の油でも、蛍光出力は酸化前とほとんど変わらなかった。

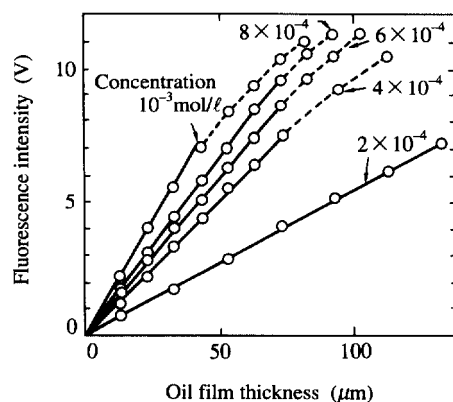


Fig. 7 Influence of dye concentration on fluorescence.

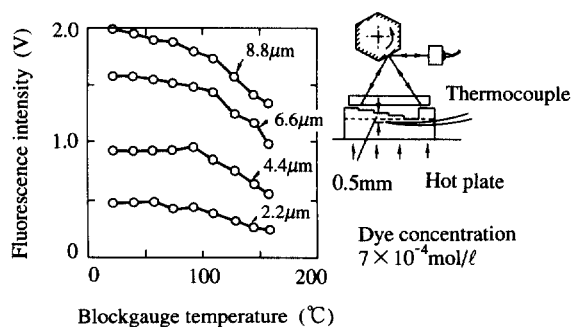


Fig. 8 Influence of oil film temperature.

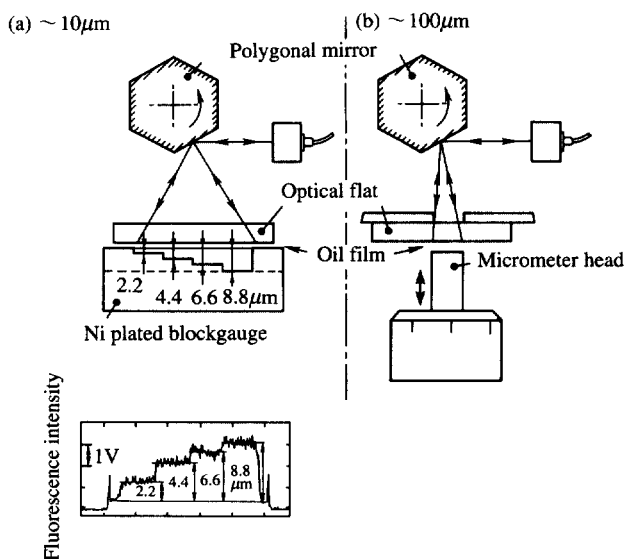


Fig. 6 Method of calibration.

したがって油の変質の影響は無視できると考えられる。

(4) 金属面の反射率の影響

マイクロメータヘッドに金属光沢面、黒色面およびリン酸塩皮膜処理されたセカンドリングを接着し、蛍光強度を測定した結果をFig. 9に示す。黒色面では、同じ油膜厚さにおける出力が光沢面の半以下に、リン酸塩皮膜では60%程度に低下した。したがって蛍光出力から油膜厚さへの換算に際しては、表面の反射率を考慮しなければならない。実機計測では、アルミピストン本体および他のリング表面に比べて反射率の低いセカンドリング面については、プロフィール形状が変化しない程度に研磨し金属光沢面とした。また、ピストン面上に設けた深さが既知の凹部で実測された波形から各部位の油膜厚さを換算した。

(5) 光走査速度の影響

ポリゴンミラーの回転速度を変えて入射光の走査速度が蛍光強度におよぼす影響を調べた。測定面上での光走査速度が5～20m/sの範囲では、蛍光強度は変化しないことがわかった。また、走査速度を20m/sとしたときの検定波形から、本測定系は約4kHz以上の応答性を有すると考えられる。

(6) レーザ入射角の影響

Scanning計測では、走査線の端部でレーザの入射角が小さくなり、蛍光を見こむ立体角 S_r が減少して出力が低下する(式(5))。この影響をFig. 10に示す。走査線の端部ほど蛍光強度は低下し、入射角が直角から約25°傾くと約半分になった。そこで、Scanning-LIF法では、油膜厚さ分布を求める際に入射角による出力低下分の補正を行った。

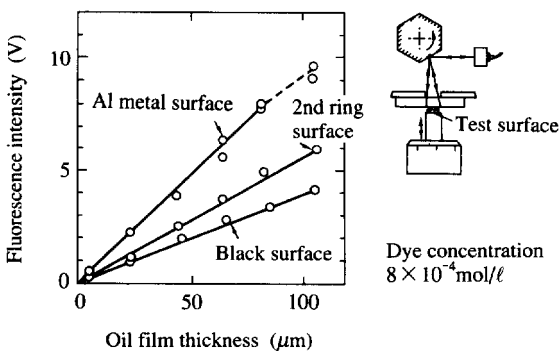


Fig. 9 Influence of surface reflectivity.

4. 結果

4.1 供試機関と試験条件

供試機関は、空冷・対向型2気筒火花点火機関(内径72mm×行程73mm)の1気筒を厚さ10mmのガラスシリンダに変更したものである。オイルにはSG級市販油を4ℓ用い、ピストン下方よりオイルジェットで供給した。蛍光剤(Coumarin-6)はオイル4ℓに約1g混合した(濃度 $7 \times 10^{-4} \text{ mol/ℓ}$)。またジェット直前で油温を測定した。

4.2 固定観測点LIF法による計測結果

固定観測点LIF法による計測結果をFig. 11, 12に示す。被測定点は、圧縮TDC後クランク角90°における反側圧側または側圧側のトップリング中央である。

Fig. 11は、モータリング時の圧縮行程におけるトッ

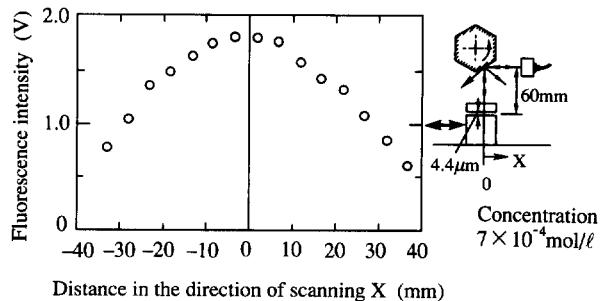


Fig. 10 Influence of irradiation angle.

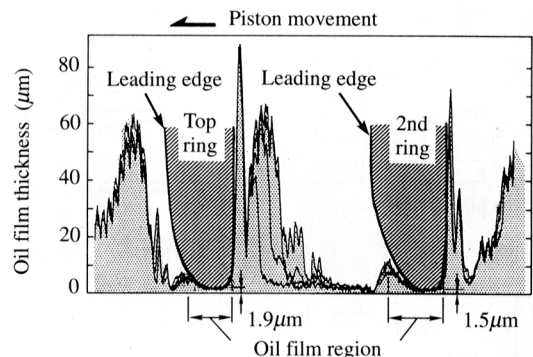


Fig. 11 Oil film thickness adjacent to top and second rings measured by fixed point LIF method.

プおよびセカンドリング周辺の計測結果である。図中には蛍光強度の測定波形を油膜厚さに換算したものと、別に触針式あらさ計で測定した各リングのプロファイルを同一スケールで重ね書きした。この二つから、リング滑り面の油膜形成領域 (Oil Film Region) を図のように判断できる。このデータではトップおよびセカンドリング共に油膜は前縁 (Leading Edge) からは形成されていない、いわゆるスターベーションの状態にあることを示している。このように、リング滑り面の油膜形成領域とスターベーションの発生状況が固定観測点LIF法により観測された。

Fig. 12は、圧縮～膨張行程におけるピストンスカート部反側圧側および側圧側の計測結果である。図中A点からB点の間で反側圧力側の油膜厚さは増大し、激しく変動しているのに対し、側圧力側の油膜厚さは約 $15\mu\text{m}$ 減少している。このデータから、A点からB点の間ではピストンが側圧力側に寄っていることが推察される。しかしながら、反側圧側におけるデータの激しい変動の原因は、この固定観測点LIF法の計測結果だけからでは不明である。

4.3 Scanning-LIF法による計測結果

Scanning-LIF法の計測結果をFig. 13, 14に示す。被測定部は、反側圧力側および側圧力側のピストンピン

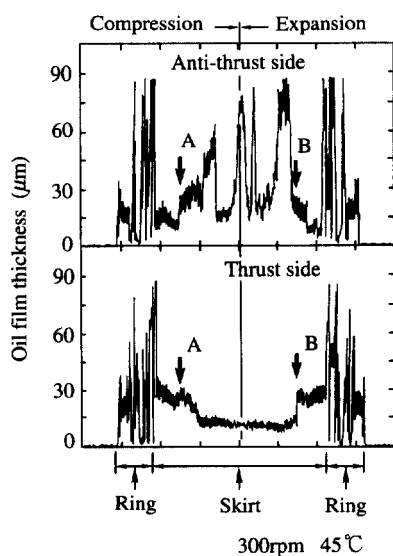


Fig. 12 Oil film thickness in piston skirt area measured by fixed point LIF method.

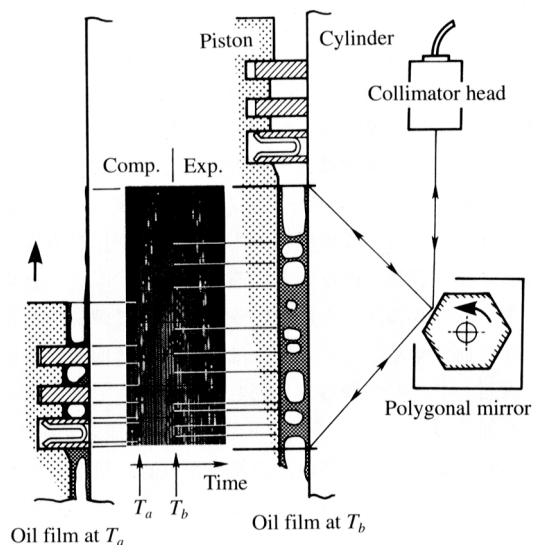


Fig. 13 Oil film behavior observed by Scanning-LIF method.

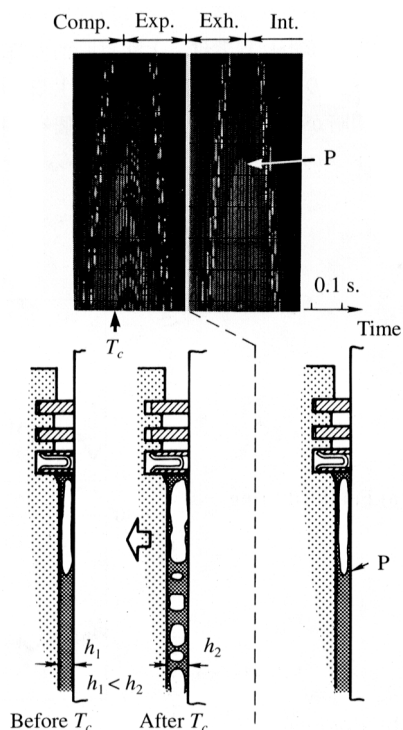


Fig. 14 Oil film behavior in piston skirt area observed by Scanning-LIF method.

に直角方向である。

Fig. 13は、圧縮～膨張行程における反側圧力側の油膜厚さをScanning-LIF法で計測した結果（中央写真）と、対応する油膜状態の推定図（両側）を示す。中央写真の縦方向の輝線は、一回の入射光走査で計測されたPMTの出力をオシロスコープの輝度変調端子に入力したものである。この輝線一本がピストン摺動方向の油膜分布を表し、明るいところほど油膜が厚いことを示す。信号処理回路を用いて一走査ごとに輝線を右に平行移動させることにより、油膜分布の時間変化が同一画面上で把握できるようにした。時刻 T_a ではピストン上部（リングおよびランド部）の油膜測定結果が、時刻 T_b ではスカート部の測定結果が写真にはそれぞれとらえられている。写真全体では、上に凸の放物線を描く破線状の明暗部がリング・ランド部に相当し、その下側全体がスカート部に相当する。

Fig. 14は、反側圧力側における1サイクルの計測結果（上一写真）と、対応するスカート部の油膜状態の推定図（下）である。機関回転速度は300rpm、一走査におけるピストン移動量はクランク角に換算して約 4° である。圧縮～膨張行程では、上死点直前の時刻 T_c を境にスカート部の蛍光出力に急に明暗が生じ、膨張行程の間この明暗が持続している。また、個々の明暗の境界はピストンの動きにほぼ一致していることから、

これは気液界面であり、油膜中に気泡が発生してピストンと共に移動していると考えられる。これは固定観測点LIF法（Fig. 12）では、激しい出力変動として観測されたものである。以上の結果から、 T_c においてピストンが側圧力側に動いたために反側圧力側の油膜が逆スクイズにより急拡大して破断し、気泡が発生したことが推察される。

一方、排気～吸気行程では T_c のような不連続変化は見られない。ただし、ピストンの動きとほぼ一致して移動する比較的明瞭な明るさの境界（図中P点）が観測された。これはスカート部の油膜上端と推察される。

4. 4 運転条件およびピストンリング諸元が油膜挙動に与える影響

以上のように開発したLIF法を用い、実働状態の機関において運転条件およびピストンリングの諸元が油膜挙動におよぼす影響を調べた¹⁷⁾。

計測に用いたのは試験用単気筒火花点火機関（内径86mm×行程86mm）である。まず、径4mmのサファイアガラス窓を設けたライナを用い、固定観測点LIF法により燃焼運転時とモータリング時の油膜挙動を比較した。Fig. 15に、燃焼（全負荷）運転時とモータリング時における膨張行程でのリング・ランド部の油膜形成状態を示す。スカート部からオイルリング付近までの油膜厚さは両者で大差ないのに対し、セカンドおよ

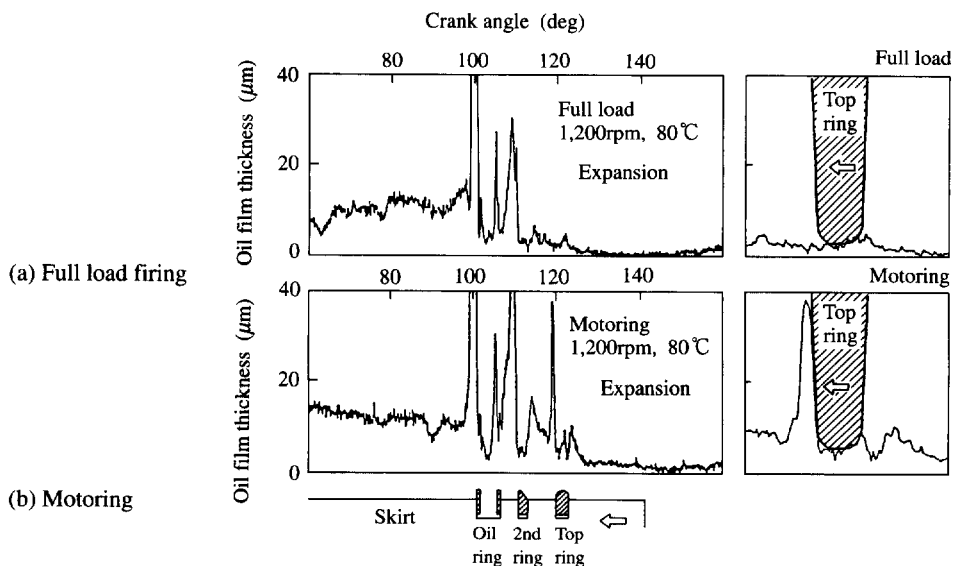


Fig. 15 Effect of operating condition on oil film distribution.

びトップリング付近の油膜厚さは燃焼運転時の方がかなり小さい。特にトップリングは、燃焼運転時のみスターベーション状態にあることがわかった。原因として、燃焼圧によりリング背圧が増加したこと、シリンダ上部が燃焼で高温になり、掻き残されたオイルが蒸発したこと等が考えられる。

次に、全ガラス製シリンダを用い、オイルリングの張力とプロフィール形状がモータリング時におけるリング・ランド部の油膜厚さ分布におよぼす影響について Scanning-LIF法で調べた結果を示す。ここでリング張力とは、自由形状でボア内径より大きい径のリングをボアに挿入したとき円周方向（接線方向）に生じる力である。ボア半径が一定であれば、リングが挿入された状態でボア面を垂直に押しつける力（面圧）はリング張力に比例する。また、プロフィール形状とはリングの滑り方向の面形状である。

Fig. 16は、オイルリング張力を、標準品（b）を基準に約半分に減少させた場合（a）、約1.4倍に増加させた場合（c）の吸気行程における側圧力側の油膜厚さ分布の変化を比較したものである。この図では一走査間のピストン移動量を考慮し、真横の線上に同一時刻の油膜厚さ分布が現れるように、傾斜した線上に測定波形をプロットした。オイルリング張力の小さいときには、ピストンの下降に伴い（図の手前から奥へ）、セカンドリングとオイルリングの間（サードランド）にオイルが蓄積されていく様子がとらえられている。これはオイルリングの掻き落とし効果が低下したことを示す。これに対し、張力を増した場合には、油膜分布は標準の場合と大差ない。

Fig. 17に、リング張力が各ランド部油量におよぼす影響を示す。横軸は標準を1としたリング張力の相対値、縦軸はFig. 16の油膜厚さ分布を円周方向に一樣と仮定して、波形から積分により求めた行程中央部における各ランド部の平均油量である。この図から、標準品の張力はオイル掻き落とし効果を損なわない範囲で低い値であることがわかった。

Fig. 18に、オイルリングプロフィール形状の影響を示す。横軸は標準を1としたバレル高さ（図中E）の相対値、縦軸はFig. 17と同様に求めた各ランド部の平均油量である。バレル高さが低い、すなわちプロフィールが平坦になるとサードランドの油量が約2倍に増大した。バレル高さの高い場合も、ややサードランドの油量が増大した。

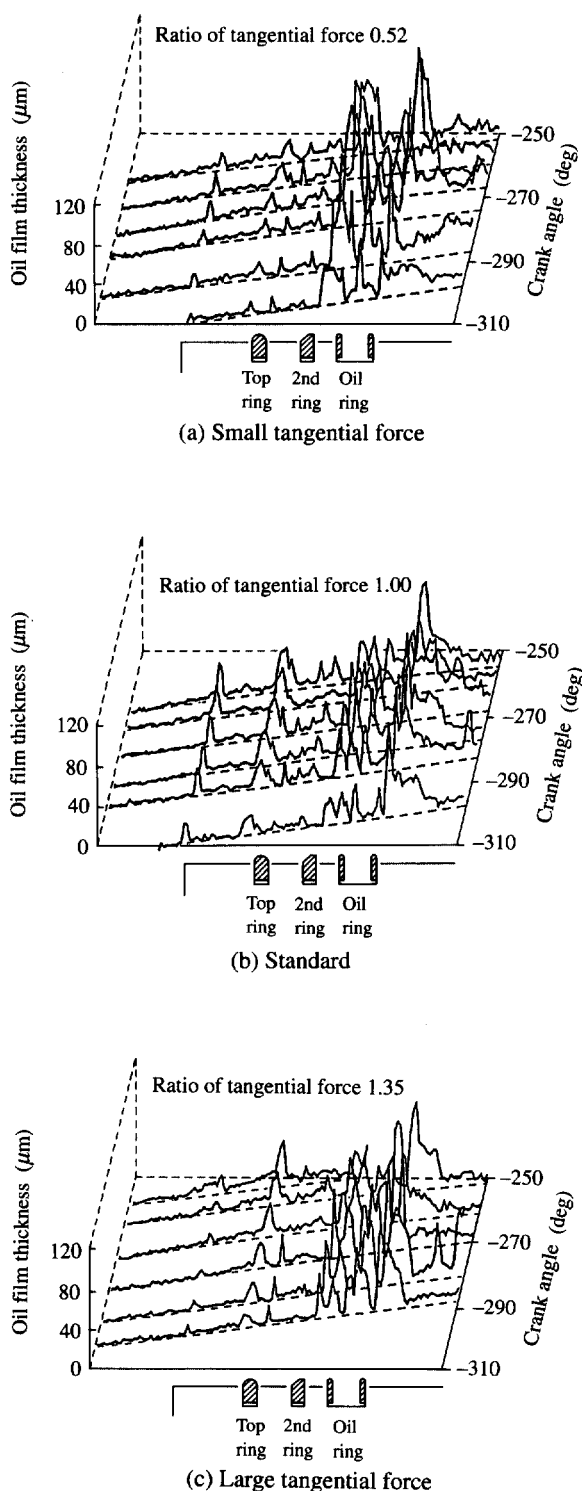


Fig. 16 Effect of tangential force of oil control rings on oil film behavior.

以上の結果は、標準オイルリングの張力およびバレル高さがオイル掻き落とし効果の点で適正な値であることを示している。実際には本解析で検討していないトップおよびセカンドリング諸元も含めて、リング列全体について摩擦とオイル消費低減策を検討する必要があるが、その際Scanning-LIF法の油膜挙動計測結果が活用できるものと考えられる。

4.5 今後の課題

(1) 空間分解能

本計測で用いたレーザのビーム径は0.1mmである。一方、オイルリングサイドレール（以下サイドレール）の幅は0.6mmであるから、最小油膜厚さの計測は原理

的に可能である。しかし、面圧が他の圧力リングより1桁以上大きく、予測では最も薄いはずのサイドレールの油膜厚さは、今回開発したLIF法ではたとえばFig. 15のように最も厚く計測された。この原因として、サイドレール近傍には常に多くのオイルが蓄積しており（油膜厚さで約120 μm ）、サイドレールで急激に減少するために、0.1mmのビーム径では空間分解能が不足していることが考えられる。空間分解能の向上対策はレーザビーム径を縮小することである。また、Scanning-LIF法では走査線の末端でビーム径が増大し、空間分解能が低下するので、計測精度向上には走査によるビーム径の変化を最小限とするような光学系の開発が必要である。

(2) 油膜厚さのゼロ点について

LIF法では、油膜厚さの絶対値を求めるには、実際の被計測体での油膜厚さゼロに対する出力を求める必要がある。しかし、固定観測点LIF法では現在のところ信頼できるゼロ点決定法が得られていない。本解析では、トップランド上方に掻き残された油膜厚さを2 μm と仮定したが、妥当性は疑問である。これに対し、Scanning-LIF法では、走査線上の一方所に黒色無反射部を設け、その位置における出力をゼロ点とみなせばよい。本解析ではシリンダ上方にこのような無反射部分を設け、油膜厚さのゼロ点として絶対値を求めた。したがって、Scanning-LIF法は油膜厚さゼロ点の評価においても固定観測点LIF法より優位である。

Fig. 17 Effect of tangential force of oil control rings on oil volume between rings.

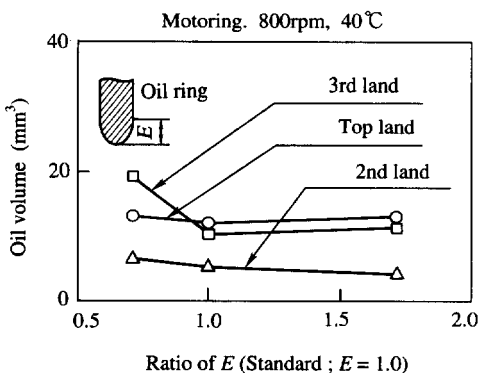


Fig. 18 Effect of surface profile of oil control rings on oil volume between rings.

5. まとめ

実働運転時のピストン・シリンダ間の油膜挙動解析を目的として、以下のようなレーザ誘起蛍光法（LIF法）による計測システムを開発した。

(1) 蛍光剤としてCoumarin-6を選定し、ピストン・シリンダ間の油膜計測に最適な濃度の設定を行った。また、実働条件を考慮して計測精度を詳細に検討した結果、油温および酸化の影響は小さいが、表面の反射率および入射光角度の影響は無視できないことがわかった。

(2) 光ファイバとダイクロイックミラーを活用して入射レーザ光と同一経路で蛍光を受光し、操作性を向上させると共に、振動等による精度低下を克服した。

(3) 被測定点を回転ミラーで走査し、ピストン摺動方向の油膜分布の時間変化を把握する新しい計測法

(Scanning-LIF法) を開発した。

この計測法により、以下の知見を得た。

(4) 燃焼運転時にはトップリングがスターベーション状態になっていることがわかった。

(5) 反側圧力側スカート部で、圧縮上死点直後に油膜破断による気泡の発生を観測した。これはピストンスラップによる反側圧力側スカート部すきまの急拡大 (逆スクイズ) が原因と思われる。

(6) オイルリングの張力およびプロフィール形状の違いがランド部の油膜分布におよぼす影響を明らかにした。

開発した解析法は、実働状態におけるピストン油膜挙動の解明を飛躍的に進展させ、摩擦損失とオイル消費低減の指針を得る一助になるものと考ええる。

最後に本解析を共同で実施し、実機におけるデータを提供していただいたトヨタ自動車第4パワートレイン部許斐敏明博士および同社第11研究部村上元一氏に深甚なる謝意を表します。また、同所機械3部志村好男主任研究員、野田卓主任研究員はじめ関係各位に多大なご協力を頂きました。

参 考 文 献

- 1) 松本清 : 日本機械学会誌, **79**-694(1976), 870
- 2) 川本淳一, 山本匡吾, 伊藤明生, 花岡正紀 : 潤滑, **22**-11 (1977), 705
- 3) 川本淳一, 山本匡吾, 伊藤明生, 花岡正紀 : 潤滑, **22**-12 (1977), 788
- 4) Noda, T., Yamamoto, M., Ohmiya, Y. and Kawamoto, J. : SAE Tech. pap. Ser., No.892104, (1989), 10p.
- 5) Myers, J. E., Borman, G. L. and Myers, P. S. : SAE Tech. pap. Ser., No.900813, (1990), 28p.
- 6) Hamilton, G. M. and Moore, S. L. : Proc. I. Mech. E., **188**-20/74 (1974), 253
- 7) 新啓一郎, 立石幸雄 : 日本機械学会講演論文集, **820**-5 (1978), 80
- 8) Ting, L. L. : Trans. ASME Ser. F, **102**-2(1980), 165

- 9) Hoult, D. P., Lux, J. P., Wong, V. W. and Billian, S. A. : SAE Tech. pap. Ser., No.881587, (1988), 9p.
- 10) Wong, V. W. and Hoult, D. P. : SAE Tech. pap. Ser., No.910741, (1991), 14p.
- 11) Hoult, D. P., Wong, V. W. and Azzola, J. H. : SAE Tech. pap. Ser., No.910742, (1991), 7p.
- 12) Lux, J. P., Hoult, D. P. and Olechowski, M. J. : J. STLE, **47**-5(1991), 353
- 13) Hoult, D. P. and Takiguchi, M. : Tribol. Trans., **34**-3(1991), 440
- 14) Richardson, D. E. and Borman, G. L. : SAE Tech. pap. Ser., No.912388, (1991), 32p.
- 15) Shaw II B. T., Hoult, D. P. and Wong, V. W. : SAE Tech. pap. Ser., No.920651, (1992), 10p.
- 16) 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
- 17) 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



三田修三 Shuzou Sanda

生年 : 1956年。

所属 : トライボロジー研究室。

分野 : エンジン・駆動系の摩擦, 潤滑に関する研究。

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。
工学博士。



斎藤昭則 Akinori Saito

生年 : 1948年。

所属 : 燃料制御研究室。

分野 : 燃料噴射, 燃料蒸発に関する研究。

学会等 : 日本機械学会, 自動車技術会, 計測自動制御学会会員。

1988年 I Class Tanasawa Award 受賞。