

超音波法によるピストン潤滑状態の評価

トライボロジー研究室 大滝 尊之

1. 緒言

自動車の燃費向上が重要性を増す中で、エンジン内の摩擦損失を低減させるため、潤滑状態を改善する多くの試みが行われている。その中で、例えば近年の燃費改善の要となっている潤滑油の低粘度化や、アイドルストップにより潤滑状態がこれまでより更に厳しくなる物も多く、油膜が保持され難い状態での摺動が頻繁に起こりえると考えられる。そこで、摩擦損失低減とエンジン保護のために、超音波法を用いた潤滑状態の評価を考える。

本研究では、これまで特にピストンリングの潤滑状態の評価を行ってきた一方、一般的に、一般的に二重円筒構造であるピストンピンとピンボス部は運転中には良好な潤滑状態であると考えられていることもあり、研究報告は超音波法以外の方法を含め皆無に近い。しかし、近年の低燃費化に伴いエンジン内の潤滑状態はピンボス部を含めて厳しくなっているため、検討の必要がある。ここではその第一段階として定常的な運転状態でのピストンピンとピンボス部の潤滑状態を超音波法を用いて調べた結果について述べる。

2. ピストンピンと超音波探触子

本研究に用いたのは図1に示す、2000cc 4気筒エンジンのピストン(外径86mm)のピン・ボス部(直径は22mm)であり、ピストンピンとの半径隙間は約 $4.5\mu\text{m}$ 前後である。ボス部には油孔や油溝が設けられている他、図2に示すような粗さを持っているため、ピストンピン外周面とボス部が接触している場合でも平均で $0.5\mu\text{m}$ 程度の油膜が存在していると考えられる。また、ボス内面の軸方向のうねりも $0.3\mu\text{m}$ 程度存在するため、接触時の膜厚はさらに $0.15\mu\text{m}$ 程度厚くなると推定される。

測定には直径5mm、中心周波数5MHzの超音波を送受信可能な探触子を用いており、図3のようにくさび構造によりピストンピン内面(内径12.5mm, $R_a = 0.19\mu\text{m}$, $R_z = 0.90\mu\text{m}$)に圧接させ固定をしている。探触子から送信された超音波は、ピストンピン内周面と外周面において反射されるが、このうちの外周面からの反射波の波高値を測定することによりピンボス部との膜厚を推定することができる。このとき探触子の超音波照射領域は、ピストンピン表面で約5mm(ピン中心に対する円周方向での照射角度で約26度)であり、そこからの反射波のエコー高さは、音軸中心だけでなくその近傍の膜厚の影響も受ける。ピストンピン内周面からの超音波の反射波と油膜部からの反射波は完全に分離されているので、油膜部の影響のみを測定することができる。

今回の実験では図1(c)に示すように、ピストン頭頂部を鉛直下向きにしたときの上方を 0° とし、反時計回りに角度をとり示すこととする。

3. 静止状態での膜厚推定

最初に、超音波法によるピストンピンとボス部油膜厚さ測

定の精度を知るために静止状態での測定を行った。ピストン頭頂部を下向きにした状態でピストンピンがゆっくりと回転できるようにしたコンロッドを固定し、鉛直下方向へ10Nの荷重をかけ、超音波探触子の角度位置(したがってピストンピン)を10度ずつ回転させたときに測定された油膜部の反射エコー高さ H から式(1)の関係を用いて推定した膜厚の分布を図4に示す。それぞれ Z は各媒質の音響インピーダ

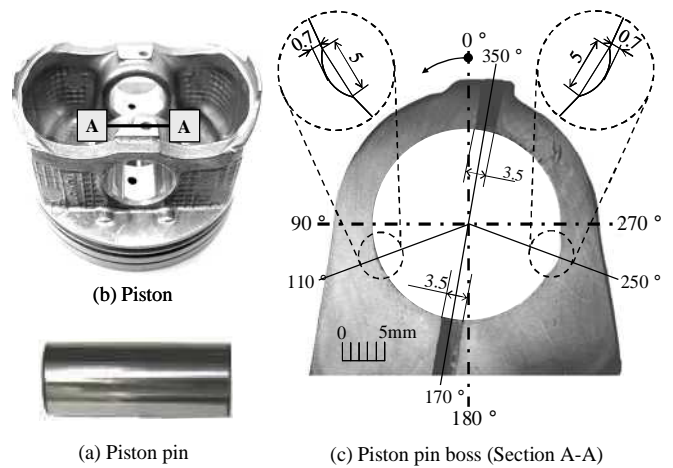


図1 ピストンとピン、ピンボス部詳細

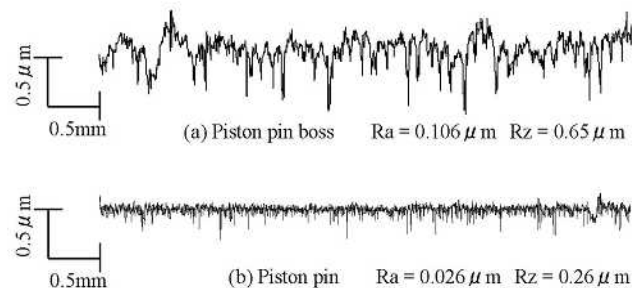


図2 軸方向での表面粗さ

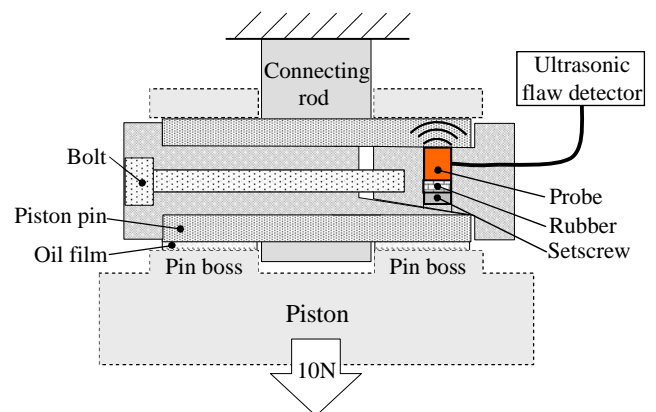


図3 実験装置

ンス、 L は油膜厚さ、 λ は超音波の油中波長である。また、添え字の 1、2、3 はそれぞれ鋼、鉱物油、アルミを示す。なお、エコー高さ比 H は、超音波探触子を装着したピストンピンをボス部から抜き出し、ピストンピン外周面を乾燥状態にしたときの超音波の波高値を基準値 h_0 として測定された反射波高値 h を標準化したものである。図中には、ピンボス間の半径隙間を $Cr=4, 4.5, 5$ とし、幾何形状から計算した、方向の膜厚分布も併せて示した。

$$L = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{H^2 \left(\frac{z_1 + 1}{z_3} \right)^2 - \left(\frac{z_1 - 1}{z_3} \right)^2}{\left(\frac{z_1 - z_2}{z_2 - z_3} \right)^2 - H^2 \left(\frac{z_1 + z_1}{z_2 - z_3} \right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \dots (1)$$

測定されたエコー高さ比 H から推定された膜厚と幾何形状から求めた計算膜厚は (a) ~ (d) 部を除きほぼ一致しており、ピストンピンとボス部における膜厚を精度よく測定できていると考えられる。部分的に非常に高い膜厚を示している箇所があるが、これらは前述した油孔や油溝の位置 (a) ~ (d) と一致している。以上の結果から、これらのことから超音波法を用いてピストンピンとピンボス部の油膜厚さを測定することが可能であることがわかった。

4. 摺動時の膜厚と軸の挙動

次に、シリンダブロック中で摺動している際のピンボス部の膜厚推定を行った。測定の前に予備的な運転をし、全体に潤滑油が行き渡るようにしてから測定を開始した。今回の実験では、油孔や油溝の影響を受けにくい ≈ 30 度と 300 度のふたつの角度 (図 6 中のピンボス部図を参照) についての測定を 100rpm 下で行った膜厚推定の結果を図 5 に示す。上昇行程 (BDC \rightarrow TDC) では図 6 の説明図中に示すように、ピストンピンには上方右側への力のため厚膜になるのに対し、下降行程 (TDC \rightarrow BDC) では下方右側への力のために、薄膜になる傾向を示す。特に、右側に位置する探触子 (≈ 30 度) で測定される膜厚は、上記の作用のために ≈ 300 度の場合より薄い膜厚となる等、これらの二箇所の膜厚から計算されたピストンピン軸心の軌跡を図 6 に示す。これは測定対象のピストンが上死点にあるときから 1 周期分の挙動であり、軌跡中の番号は図中の説明図に示すピストンピン位置に対応している。図においては、 $x=y=0$ がボスの中心を表しているので、ピストンピンは全体的に右方向へ偏った状態で運転されていることが分かる。これは前述したピストンの上昇と下降行程において、コンロッドによりピストンピンにかかる力の方向と一致する。

なお紙面上の都合で示していないが、起動時の膜厚は図 5 より $1.5 \mu\text{m}$ 程度薄く、最小膜厚部では固体接触が生じている可能性が高くなっていった。定常状態では良好な潤滑が行われるピストンピンであっても、起動時には過酷な潤滑状態を経験しているものと推定される。

5. 結言

超音波法によりピストンピンボス部の油膜形成状態 (膜厚) やピン軸心の軌跡を調べた結果、定常的な油膜が形成される場合のそれらの挙動は一般的なものであり、十分な厚さの油

膜で潤滑されていることが明らかになった。

文献

- 1) 大滝, 竹内, 戸田, 寺田 : 日本設計工学会 四国支部講演論文集 (2008-03), 31
- 2) 山本美明 : 超音波基礎工学, 日刊工業新聞社 (1981), 67

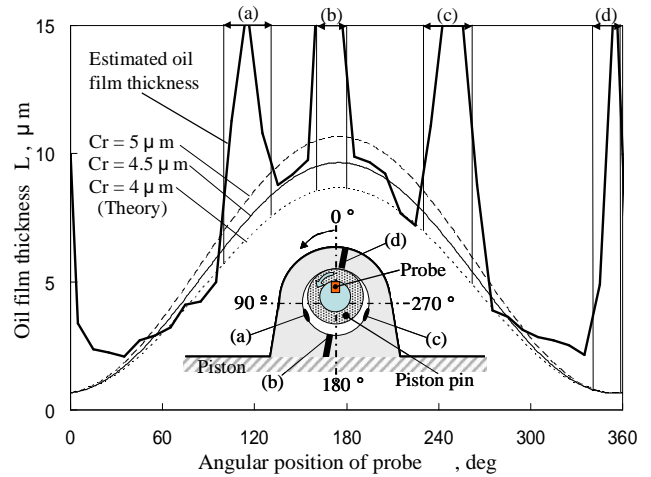


図 4 角位置と推定膜厚 L

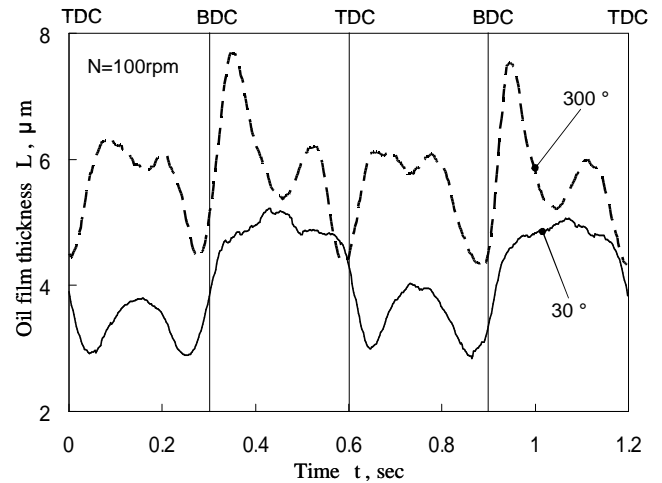


図 5 摺動時の膜厚 L

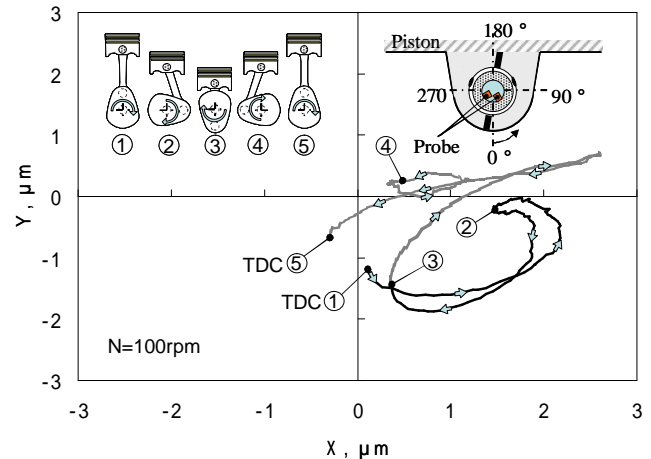


図 6 ピストンピン軸心の軌跡