

超音波法による油膜厚さ測定

トライボロジー研究室 古川 由容

1. 緒言

我々の日常生活を支える種々の機械には、多くの駆動部分で潤滑部品が使用されている。昨今の傾向として、機械の高効率・高信頼性・低環境負荷が求められ、これらを達成するため潤滑部品のトライボロジー、すなわち摩擦・摩耗・潤滑の制御技術が期待されている。例えば自動車用ガソリンエンジンに使用されるピストンリングの厚さは 1.2mm 程度と薄く、これとシリンダとの間に形成される油膜の厚さを、摺動面に何の加工も施さずに測定することは難しい。本研究では、リング背面に貼り付けた小型の超音波探触子により油膜厚さの測定を試みている^{1,2,3)}。しかし、1.2mm と幅の狭いリングでは、波の伝波経路での音波の拡散により、リング側面やエッジ、更には探触子背面部からの様々な反射が、観測すべき波形に影響を及ぼすことが懸念される。そこで、それらの影響を極力抑えた PZT のコンポジット素子を専用に開発し、それをリング背面に直接貼り付ける構造の探触子を構成して、油膜厚さの測定を行った。本報では、1.2mm 幅のリング単体と、それにオイルリングを組み合わせたときの油膜形成状態の違いを、エンジンの始動や停止時での極低いすべり速度条件下において計測し、そのとき測定された摩擦との関係から、ピストンリングの潤滑状態を総合的に評価することを試みている。

測定原理ならびに実験装置

図 1 に膜厚の測定原理を示した。ピストンリング内面から照射された超音波は、その波長よりも薄い油膜中で多重反射し、リング表面からの第一反射波と干渉する。この干渉の影響を受け、観測すべき第一反射波の波高値 h は、膜厚 L に依存して変化する。このため、その波のエコー高さ h を測定することにより膜厚 L を推定できる。

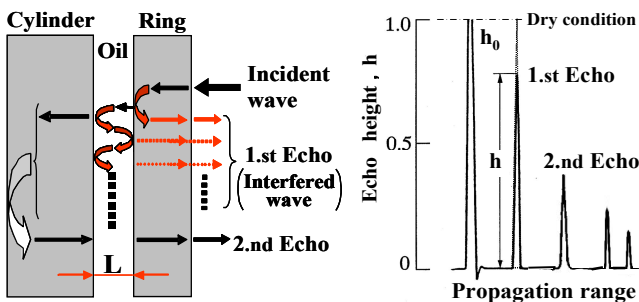


図 1 油膜厚さの測定原理

実験で使用したピストンリング・シリンダの主要寸法ならびに材質は表 1 に示す通りである。なお、トップリング先端には $5\mu\text{m}$ 程度のクラウニングが施してある。また、オイルリングは、一般のガソリンエンジン用の 3 ピース型の組み合わせリングを使用している。

そして超音波探触子は、トップリング内側表面に沿うような変形が可能なコンポジット素子を使用し、リング内周面に密着させて貼り付けている。

表 1 試験片ならびに超音波探触子の仕様

	Top ring	Cylinder	Probe (PZT)	
Outer diameter	86mm	96mm	Frequency	5MHz
Inner diameter	80mm	86mm	Band	Wide
Width	1.2mm	- - -	length	3.0mm
Materials	SWOSC-V	S45C	width	1.2mm
Tension	6.0±1N	- - -	Thickness	0.5mm

図 2 に、マイクロメータヘッドを用いてピストンリング先端の膜厚を調整できる膜厚較正器⁴⁾により較正した、エコー高さ比 $H(=h/h_0 \times 100, \% : h_0$ は乾燥時エコー高さ) と油膜厚さ L との関係を示した。膜厚 L の減少に伴って H は低下し、特に膜厚が $5\mu\text{m}$ 以下の領域では、急激な H の低下が認められ、薄膜領域での膜厚測定に適していることが分かる。また実験前と後の較正曲線がほぼ一致したことから、実験中のなじみはほとんど無かったと判断できる。なお、図におけるマイナスの油膜厚さは、リングが相手面と接触した後、さらにマイクロメータヘッドを押し込んだ時の読みである。

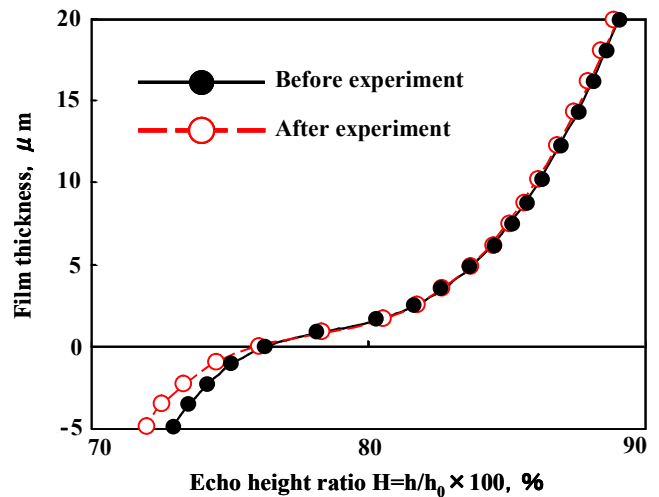


図 2 較正曲線の例

図 3 は摺動実験装置の概略であるが、本装置の場合、ピストンが固定され、代わりにリニアモータで駆動されるシリンダが摺動する構造となっている。先に較正を行ったピストンリングをピストンに取り付け、ポンプで油を供給しながら摺動させたときの膜厚を測定する。そして、ピストン固定用の梁に設置した歪ゲージにより測定された、リングとシリンダ間の摩擦の挙動を併せて検討し、ピストンリングの潤滑状態を評価することになる。

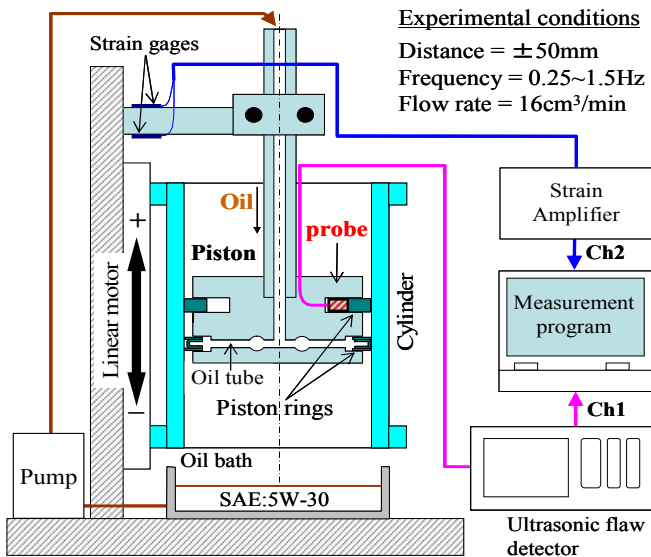


図3 ピストンリング膜厚試験機

3. トップリング単独での油膜形成状態と摩擦

図4に、探触子を貼り付けたトップリングを、円周方向に 0° 、 90° 、 180° 、 270° 回転させて測定した、油膜の挙動を示してある。膜厚はシリンダ行程中央の最大すべり速度付近で厚く、すべり速度がほぼ0となる上・下死点付近で薄くなる、一般的な挙動を示している。しかし、後者の近傍では、固体接触が生じることによる、固体接触部での荷重支持割合 W_s の増加が認められる。

この W_s は、固体接触開始点でのエコー高さ比 H_0 と、混合潤滑下で観測されるエコー高さ比 H との差 $\Delta H (= H - H_0)$ を、全支持荷重を固体接触部で支持するときに観察されるエコー高さ比 H_s からの減少量 $(H_s - H_0)$ で除することにより定義した。したがって $W_s = \Delta H / (H_s - H_0)$ である。 W_s ならびに L の挙動は、円周方向に異なっているため、ピストンリングの潤滑状態を評価する場合には、円周方向に平均化した油膜厚さを用いることが望ましい。

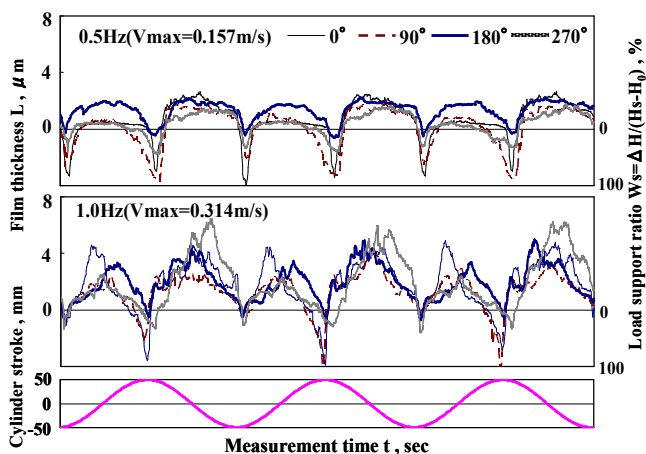


図4 膜厚挙動の測定例

図5には、円周方向に平均化した油膜厚さの挙動を摩擦力と共に示してある。摺動速度が比較的高い 1.5Hz では $7\sim 8\ \mu\text{m}$ の油膜が形成される。一方、 0.25Hz ではシリンダの行程の比較的広い領域にわたって混合潤滑状態($L < 0\ \mu\text{m}$)にあり、過酷な潤滑により摩擦力も多少大きく現れている。

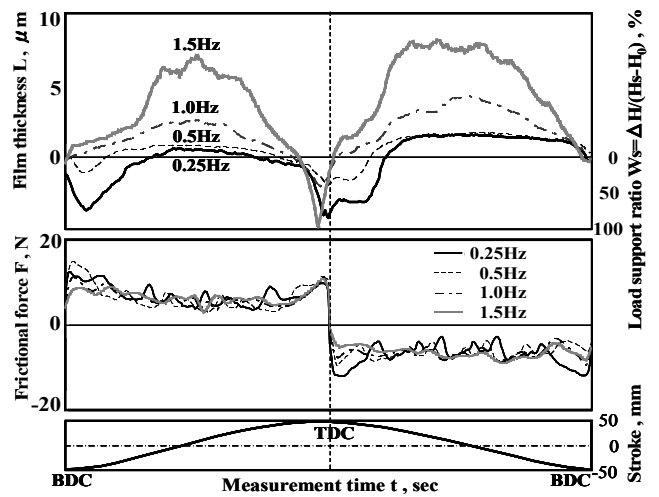


図5 トップリングの膜厚挙動および摩擦力

4. オイルリングを併用した場合の潤滑特性

図6は、オイルリングを併用した場合の結果であり、形成される油膜の厚さは、図5のトップリングのみの場合より明らかに薄く、特に 0.5Hz 以下では、全行程で混合潤滑状態にある。なお、混合潤滑下での荷重支持割合 W_s は油膜の形成具合と連続的な関係にあり、このような過酷な領域でも、油膜の効果が健在であることが分かる。

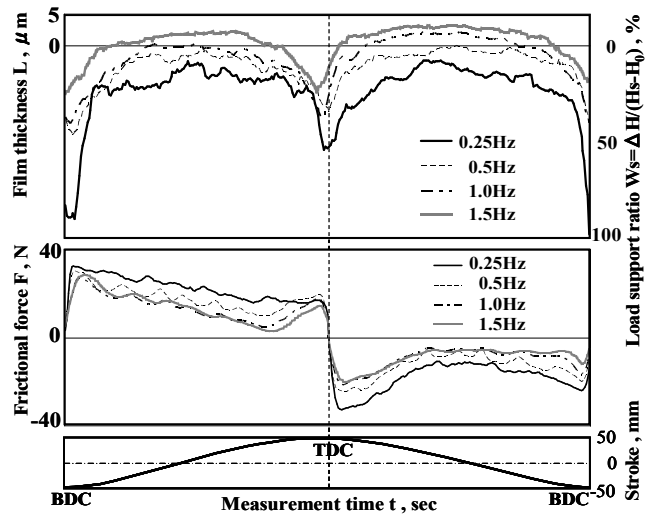


図5 オイルリング追加時の膜厚挙動および摩擦力

5. 結言

通常のガソリンエンジンに実際に使用されている 1.2mm 幅のピストンリングの油膜厚さを、超音波法を用いて測定し、低すべり速度での膜厚測定ならびに、固体接触部での荷重支持割合の推定が実際に可能であることを明らかにした。

文献

- (1) トライボロジー会議予稿集、(2003)、203。
- (2) トライボロジー会議予稿集、(2002)、71。
- (3) 日本設計工学会平成16年度春季研究発表講演会講演論文集、(2004)、107。
- (4) 日本設計工学会平成17年度春季研究発表講演会講演論文集、(2005)、95。