

卒業論文要旨

シリンダ外壁面からの超音波入射によるピストン系の油膜挙動観測

システム工学群

極限ナノプロセス・トライボロジー研究室 1190143 福嶋 拓己

1. 緒言

近年の自動車エンジンでは、燃費の向上と廃棄エミッションの低減のために、ピストンリングの薄幅化や低張力化が進んでおり、リングの気密性の低下やオイル消費量の増大などの二次的な問題が発生している。また、潤滑面は少量の低粘度油で潤滑される傾向にあることに加え、アイドリングストップの採用により、起動と停止を繰り返す機会が増え、極低速の過酷な潤滑下での、安全で安心な運転を保証する技術の開発が課題となっている。

そのためには、極低速での油膜形成・破断状態のその場観測、特に、油膜厚さやその分布、そして油膜破断に繋がる空洞の成長過程等の重要な情報の把握が必須となる。

本研究では、シリンダ外壁面から潤滑面に向けて入射させた縦波超音波の、潤滑面からの反射強度の観測を基に、ピストン系の油膜挙動の評価を試みている。ここでは、極低速域で潤滑される、トップリングとセカンドリングの油膜形成状態や、それらリング周辺のシリンダ壁面に付着した油の挙動の観測結果について述べる。

2. 油膜挙動の観測原理

図 1 に、膜厚や油膜破断等の油膜挙動の観測原理を示す。シリンダ外壁面から入射した超音波は内壁面に達し、その一部はシリンダの音響インピーダンス (Z_1) と相手媒質 (油: Z_0 , 気泡: Z_B) に応じて反射し、残りはピストンリング方向に伝搬する。連続油膜部 (膜厚 L) では油膜内で多重反射が生じ、その都度、シリンダ内壁面から探触子側へと伝搬するが、油膜破断部 (気泡を含む) では、ほぼ、シリンダ内壁面からの反射のみになる。

超音波照射領域内での各反射波の合成波が探傷器で観測する波になるため、その波高値は、膜厚 L や油膜破断 (気泡混入) 率に応じて変動する。しかし、それら 2 つの影響を独立して定量的に抽出することは難しいため、ここでは、波高値 (エコー高さ h) の変化を基にした、油膜挙動の定性評価に止める。ちなみに、ピストンリングとシリンダ間が薄い連続油膜であればエコーは低下するが、油膜の破断率が増すに従い逆に増加する。また、リング以外の位置では、厚い油膜の付着箇所ではエコーは低下するが、付着膜が薄くなり乾燥状態に近づくると高くなる。

3. 実験装置と観測位置

図 2 に、実験装置を示す。実際のエンジンではピストンが移動するが、ここでは、シリンダ (内径 86mm) の外壁面からピストンリングの潤滑挙動を定点観測する目的で、シリンダ摺動型の装置を用いている。ピストンを固定するコラムと、装着したシリンダを上下に摺動させるリニアモータ、そして、局所水浸型の超音波観測部からなる。実験には、水浸型の点焦点探触子 (中心周波数は約 10MHz) を用いており、水を内包するゴム膜とシリンダ外壁に塗布した油膜を介して、シリンダ内に超音波を伝搬している。

油膜挙動の定点観測位置は、各リングの幅中心を含み、合計 41 点 (18.75mm 範囲) の観測であり、高さ方向の移動は Z ステージにより行った。このため、後に示す観測結果は、観測開始からの経過時間が異なる各測定位置での結果のまとめとなっている。ちなみに、各位置での潤滑状態は、時間が経過してもほとんど変化しないことを、別実験で確認している。

また、潤滑油は、装置下の油槽からポンプでオイルリングのスペーサ部へと供給される。使用したオイルは、SAE:10W-30 であり、供給量 Q は、 $4.8\text{cm}^3/\text{min}$ とした。

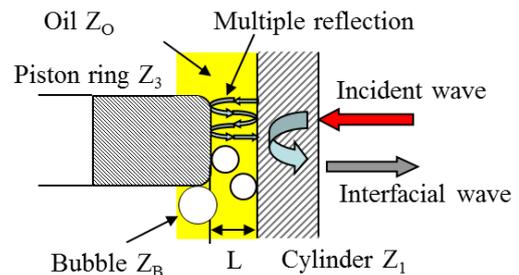


Fig.1 Observation principle

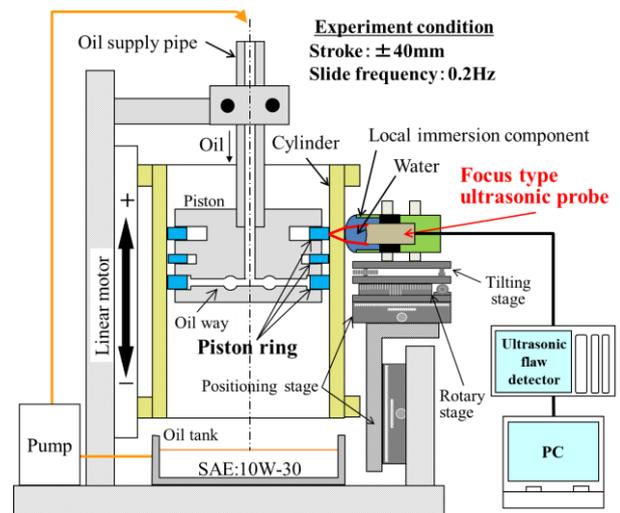


Fig.2 Experimental equipment

4. 油膜挙動の 2 次元分布

図 3 に、トップリング合口と反対位置での挙動を示すが、各リング間のシリンダ壁面には、油膜の付着 (低輝度の箇所) が認められる。また、シリンダとのなじみが進行したリング部でもあり、シリンダの上・下死点近傍での膜厚の減少 (低輝度) も観測される。さらに、リング上下の油膜破断状態は、リングによりほぼ完全に隔離され、本実験の範囲では、リング幅を貫くことはなかった。

図 4 に、探触子の周波数 10MHz におけるエコー高さ比と油膜厚さの関係を示す。リング膜厚は理論値、付着膜厚は実験値よりエコー高さ比から膜厚に変換する。ここで、リング膜厚はエコー高さ比が大きくなると厚くなり、付着膜厚はエコー高さ比が大きくなると薄くなる。

図 5 に、リング幅中央膜とリング周辺付着膜の油膜形成状態の理想モデル図を示す。上昇行程を実線、下降行程を破線で表す。シリンダの上昇行程 (a→c) では左側下モデル図のように、リング下側では油の流入がリングでせき止められて付着膜は厚くなる。また、リング上側では流れ圧力が負圧となってキャビティが発生することにより急激な変化が起きて付着膜は薄くなる。下降行程 (c→e) では左側上モデル図のように、上昇行程とは真逆の現象となる。リング付近の付着膜が薄膜であってもリング幅中央膜が保持されていれば、適切な潤滑状態といえる。しかし、リング付近付着膜が薄膜かつリング幅中央膜も薄膜の状態は危険である。その危険な状態を判断できるのが右側図の指標である。

図 6 に、セカンドリング幅中央膜 (図 3 の③位置) とセカンドリング周辺付着膜 (図 3 の②と④) の油膜厚挙動を示す。測定結果②, ③, ④ (細線) の全体傾向から a,b,c,d,e 部の膜厚値をとって平均化した値 (太線) に基づいて評価する。上昇行程および下降行程において、リング上側②で $5\mu\text{m}$ 程度膜厚変動が生じて、リング中央③の膜厚は保持されている。また、リング下側④は厚膜で膜厚変動が小さいため供給量が多すぎるが、潤滑状態としては正常である。

図 7 に、トップリング下側の付着膜 (図 3 の①位置) とセカンドリング上側の付着膜 (図 3 の②) の油膜厚挙動を示す。図 5 のような理想的な油膜形成状態におけるトップリング下側の付着膜を横軸、セカンドリング上側の付着膜を縦軸とし相関を表すと右下図となる。上昇行程でリング下側①は厚くなり、リング上側②は薄くなる。また、下降行程でリング下側①は薄くなり、リング上側②は厚くなる。右側図の指標では負の相関を示し、リング間においても連続油膜によって流体潤滑が確認できる。

5. 結言

以上述べたように、ピストンリング部の膜厚およびその上下位置のシリンダ壁面への油膜の付着や破断の様子等、極低速で過酷な潤滑下にある摺動面の油膜挙動を調べるための測定法としての、超音波法の有効性を確認できた。

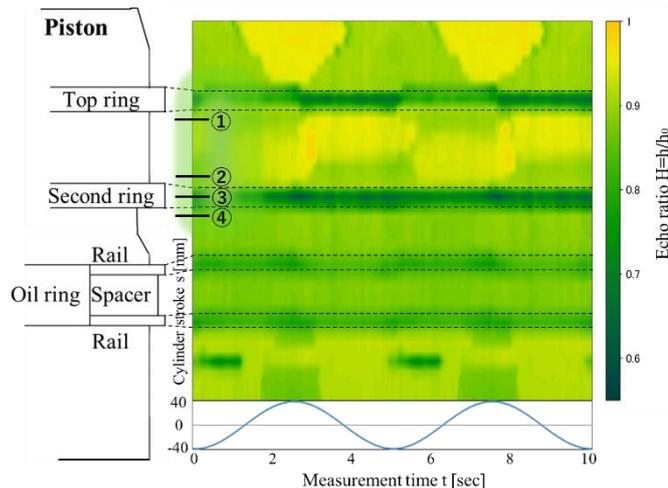


Fig.3 Oil film behavior for position

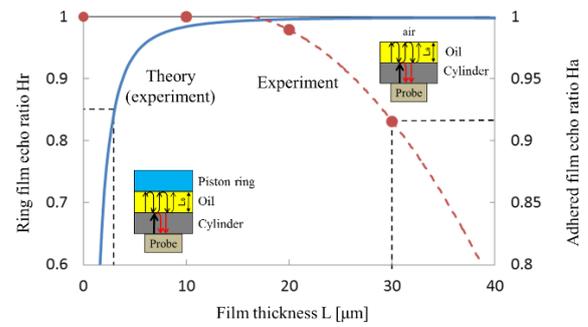


Fig.4 Relationship between echo height ratio and film thickness

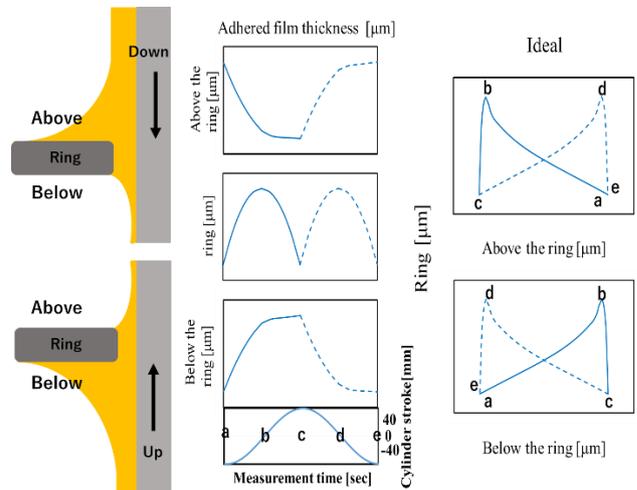


Fig.5 Ideal oil film thickness behavior

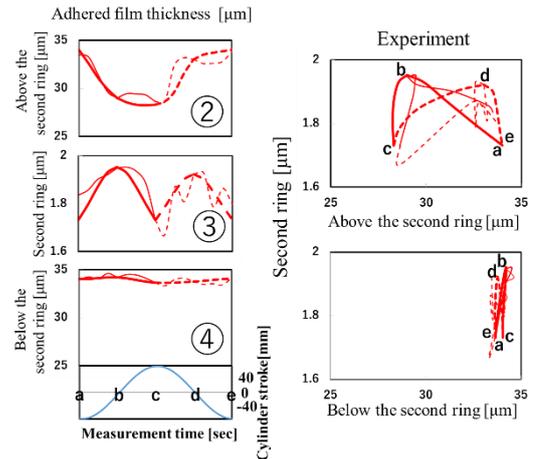


Fig.6 Second ring film thickness and peripheral film thickness

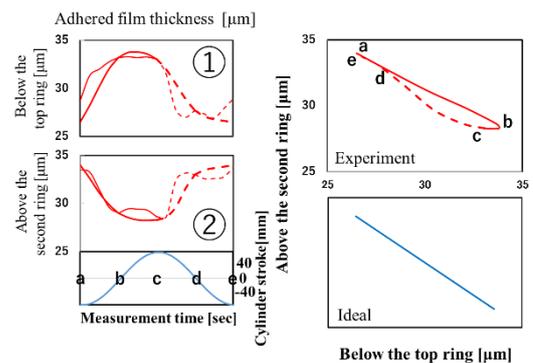


Fig.7 Adhered film thickness between top ring and second ring