

卒業論文要旨

超音波法による油膜厚さ測定のための校正曲線

システム工学群

医工先進検査システム研究室 1230136 原 祐大

1. 緒言

近年の自動車用エンジンの潤滑面のように、頻繁に起動や停止が繰り返される過酷な摺動面が、微量な低粘度油で潤滑される機会が増えている。そこでの潤滑状態の把握には、実際のエンジン材料（例えば鋼）への適用が可能で、取扱いと評価が簡単な簡易的潤滑評価技術の開発が重要となる。

本研究では、ピストンリング先端の油膜形成状態や、各リング間のシリンダ壁面に付着した油膜挙動を、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反射強度（エコー高さ）の観測結果から評価する潤滑診断技術について検討してきた。その結果、リング幅両端付近で観測されるエコー高さは、超音波照射領域内でのリング先端油膜部とシリンダ付着油膜部の双方の影響を受けることが確認されていた。

リング幅外側での付着膜の厚さとその分布は、リング先端への潤滑油の導入の仕方に強く影響するため、上述した双方の影響が含まれるエコー高さ分布を基に、リング幅両端付近での付着膜厚さの分布を推定する必要がある。ここでは、ピストンリング先端膜厚と各リング間でのシリンダ付着膜厚を感度良く推定するための校正曲線に加え、リング幅両端付近での付着膜厚さ推定のための基礎的事項の検討を行った。

2. 超音波法によるリング先端膜厚と付着膜厚の測定原理

図1にリング先端膜厚と付着膜厚の測定原理と校正曲線を示す。例えばシリンダ外壁面からピストンリングとの間の油膜に入射された縦波のパルス超音波は油膜間で多重反射をして反射エコーを形成する。このエコー高さが膜厚に依存するため、リング先端膜厚の推定が可能となる。またシリンダ内面に付着した油膜に超音波が照射された場合には、油より音響インピーダンス $Z (= \rho C : \rho$ は密度, C は音速) が著しく低い空気との間での多重反射となるため、観測されるエコー高さは図中の破線のように膜厚と共に低下し、リングとは逆の傾向を示す校正曲線となる。

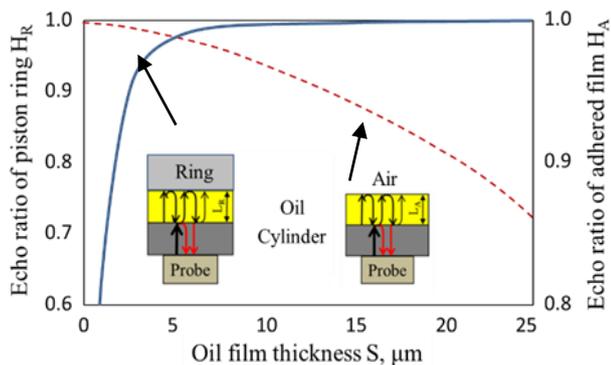


Fig.1 Relationship between echo ratio and film thickness.

3. ピストン系の潤滑状態の超音波観測

図2に実験装置を示す。この実験では、シリンダ内径とピストンストロークが 86mm のエンジンを用い、モータリングにより摺動するピストン系の潤滑状態を、シリンダ（厚さ 4mm）外壁のウォータージャケット内に設置した点集束型縦波探触子（公称中心周波数 10MHz）を用いて観測した。

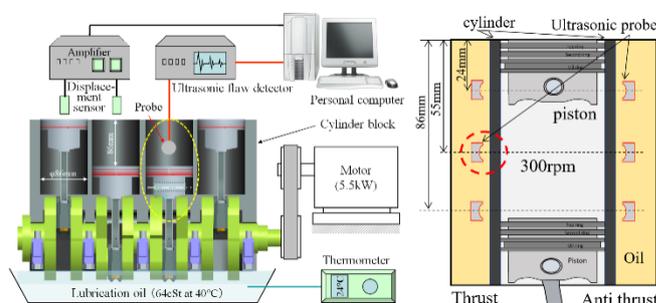


Fig.2 Observation equipment of piston system lubrication

図3にエコー高さの観測例（300rpm、シリンダブロック上端面から 55mm 位置）を示す。図では、以下の校正実験と整合させるため、ピストン系を横向きにして示してある。各ピストンリング先端の薄膜部でのエコー高さ（図3左に示す潤滑面からの第一反射波）は急激に低下するが、各リング間のシリンダ内面からのエコー高さは高い値を維持し、薄い油膜の付着を示している。また、リング幅両端部近傍のエコーは正規分布的な変化をしており、リング先端膜とシリンダ付着膜の双方の影響を受けることを示唆している。

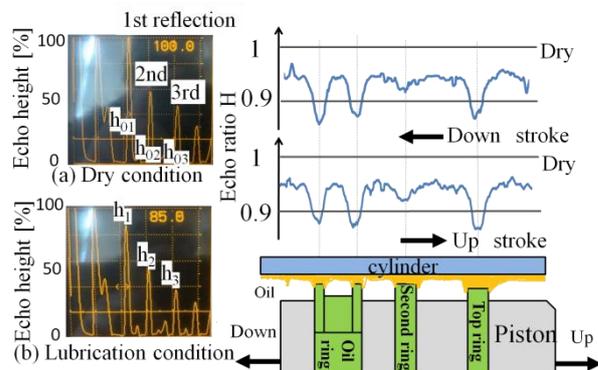


Fig.3 Observation example of piston system lubrication condition.

4. ピストンリング先端膜厚の校正曲線

図4に校正実験装置を示す。第一から第三反射波におけるリング先端膜厚とエコー高さの関係を求める。実験装置はシリンダ壁面を模した固定試験片に対し、ピストンリング先端との間隔をマイクロメーターヘッドにより1μm単位で調節できるようにしてある。探触子にはエンジン実験（図2、3）

で使用した 10MHz 縦波探触子を用いた。

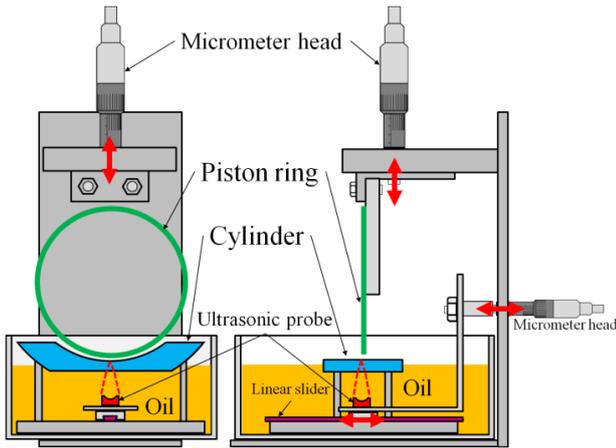


Fig.4 Ring film calibration equipment.

図5にトップリングとオイルリング先端膜厚の較正曲線を示す。リング幅 (1.2mm) が超音波の照射領域 (約 1mm) より広いトップリングでのエコー比 H は、シリンダ壁 (厚さ 4mm) 内での第一、二、三反射波で異なるものの、膜厚に対する変化割合はほぼ同じである。例えば第一反射波での較正曲線により推定した、図3のトップリングの先端膜厚は、 $7\mu\text{m}$ 程度であった。

5. シリンダ附着膜の較正曲線の例と膜厚変化時のエコー

図6に各反射波の附着膜厚較正曲線を示す。いずれの反射波でも油中波長の $1/4$ の膜厚まではエコー比が減少傾向にあるが、その後上昇傾向へと移行する。特に第二反射波と第三反射波でエコー比の変化が大きく、感度良く膜厚変化を観測できる。例えば $Rq = 0.93\mu\text{m}$ の粗さをもつシリンダ壁からの第一反射波 (8MHz : 10MHz 探触子での反射波中心周波数) を較正曲線として推定した、図3のトップリングとセカンドリング間のシリンダは附着膜の平均膜厚は $20\mu\text{m}$ 程度であった。ところで上記の第二、第三反射が附着膜厚の変動に対しても高い感度を有するか、 0.03ml の油をシリンダ状固定試験片の超音波領域上に滴下して調べた結果を図7に示す。時間と共に滴下油の平均膜厚は約 $700\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ と変化するが、その過程での H の変化は、やはり第二、第三反射波が大きく現れている。

6. リング先端部だけに油膜が形成される場合のエコー

図3で示したように、リング両端近傍での観測エコーはリング先端膜厚とシリンダ附着膜の両方の影響を受ける。図8上段は、リング先端部だけに油膜を形成させ、それ以外を乾燥状態としたトップリング/シリンダ系により観測したリング幅方向のエコー比挙動であり、リング幅中央で最小値をもつ正規分布に似た形状となる。そして各膜厚でのリング幅中央値で規格化した下段図に見られるように、リング幅方向での H の増減の仕方は、リング先端膜厚によらない。このことは、リング幅中央での H から推定したリング先端膜厚に対するエコー比分布と、実際に観測されるエコー比挙動 (先端+附着膜) の違いから、リング幅両端近傍での附着膜に対するエコー比分布を推定できる可能性を示唆している。

7. 結言

以上述べたように、リング先端膜厚と附着膜厚それぞれの較正において適した反射波の存在と、リング幅両端近傍でのリング先端膜厚とシリンダ附着膜の情報の分離の可能性が明らかになった。

参考文献

(1)堀江拓海：超音波法での壁面附着膜厚測定，2021.9，p.34

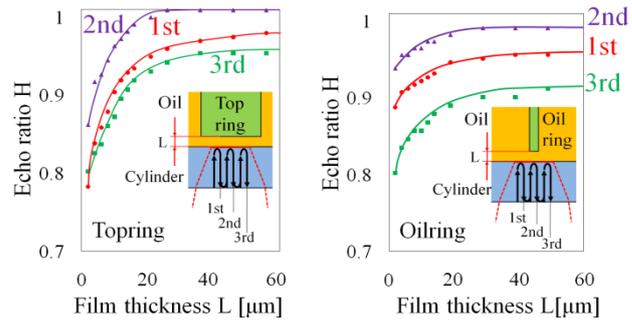


Fig.5 Relationship between ring film echo ratio and film thickness

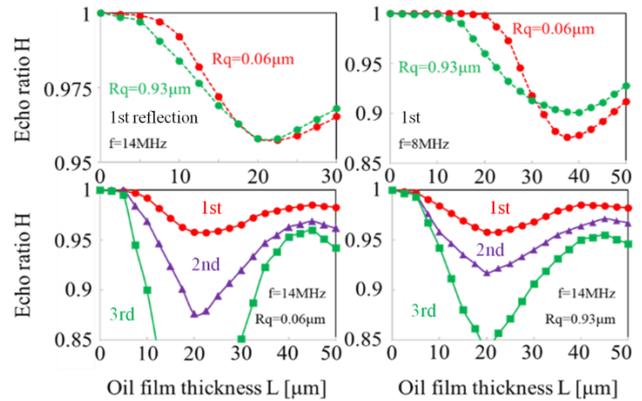


Fig.6 Relationship between adhesion film echo ratio and film thickness

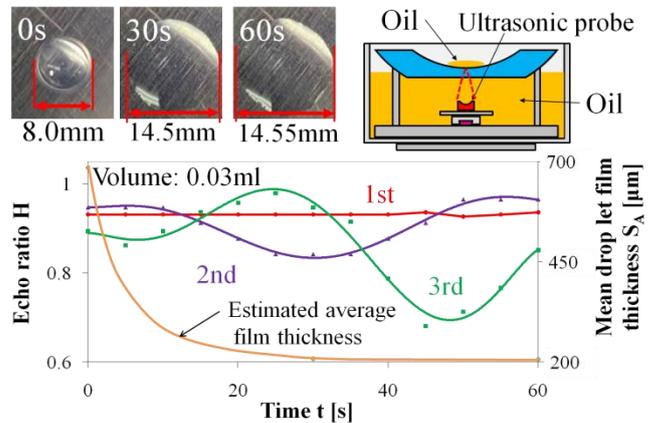


Fig.7 Oil diffusion and changes of echo ratio

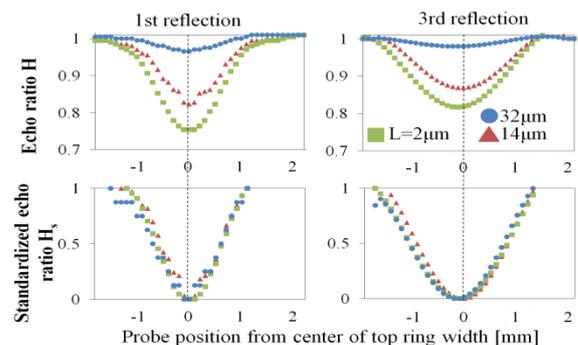


Fig.8 Echoes near ring edge at different film thicknesses