

# シリンダ壁面の超音波膜厚測定

## Measurement of oil film thickness on cylinder wall surface with ultrasonic wave

知能機械工学コース

医工先進検査システム研究室 1235090 福岡拓己

### 1. 諸言

例えば、HV 車の普及やアイドリングストップの採用により、近年のエンジンは頻繁な起動と停止の繰り返しを強いられており、そのような極低速下でのピストンリング先端油膜の確保が重要視されている。一方で、ピストンリングの薄幅化や低張力化に伴うオイル消費量の増大も重要な問題であり、上記のリング先端膜厚に影響を与えない範囲でシリンダ壁面への付着油膜を薄くすることが望まれる。

本研究では、縦波パルス超音波を用いて、摺動状態でのリング先端膜厚やシリンダ壁面の付着膜厚の挙動を連続的に測定することにより、少量の潤滑油での安全な運転確保に向けた簡便な評価法を検討してきた。その過程で、潤滑面からの超音波の反射特性が表面粗さの影響を受けることが明らかになっていたが、この影響については、十分な検討がなされていないままであった。

ここでは、粗さの異なる試験片表面での付着膜厚とそこでの反射エコー高さの関係を調べるとともに、粗さ面での超音波の反射や透過、そして付着膜内での減衰の影響を考慮して、付着膜部からの反射エコー高さの簡単な試算を行い、実測したエコー高さの傾向と比較検討する。

加えて、前述した極低速下で潤滑されるピストン系における、シリンダ壁面での付着膜挙動に対する給油量の影響を、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エコー高さ変化を基に検討した。

### 2. 反射エコー高さに及ぼす壁面粗さの影響

図 1 に付着膜厚測定原理を示す。鋼板裏面から入射した超音波の一部は付着膜側に透過し、波長に比べて薄い付着膜（厚さ  $L$ ）内で多重反射する。そして、油膜部から鋼板側への透過波と、鋼板表面（油との界面）での反射波との干渉波（観測波）の波高値（エコー高さ  $h$ ）が付着膜厚さに依存するため、 $h$  により膜厚  $L$  の測定が可能になる。その際、同図右に示すように、粗さ面での散乱減衰の影響を受け、粗い面ほど減衰の度合いは大きくなる。

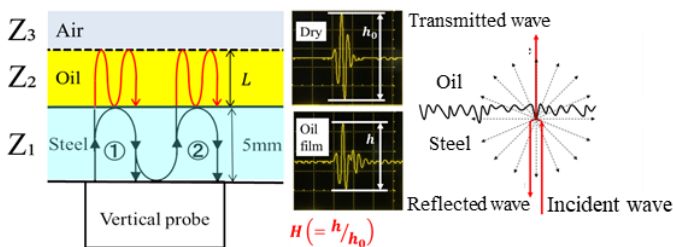


Fig.1 Film thickness measurement principle

図 1 のように超音波探触子を背面に装着したステンレス製試験片は、3 個のマイクロメータヘッドで支持され、試験面の水平が出せる構造となっている。その試験片支持台は、

精密電子天秤（最小目盛：0.001g）上に設置されており、本実験での付着膜の厚さは、試験面上の液体の重量から算出している。使用した液体は無水エタノールで、その密度は  $0.79\text{g/cm}^3$ 、縦波音速は  $1240\text{m/s}$  であり、実験では、エタノールの蒸発による付着膜厚の減少過程における反射エコー高さの変化を観測した。

なお、試験片の表面粗さは、図 2 に示す 2 種類 ( $R_q=0.06\mu\text{m}$ ,  $0.93\mu\text{m}$ ) とした。いずれの試験片でも、粗さの確率密度分布はガウス分布に近い面（ゆがみ度  $R_{sk}\approx 0$ 、とがり度  $R_{ku}\approx 3$ ）を有している。

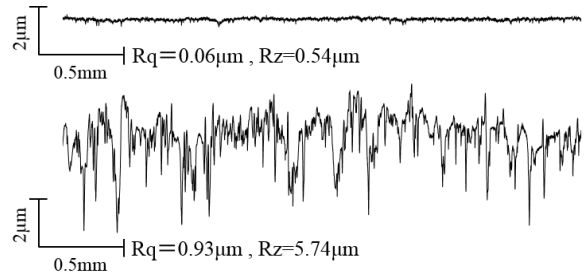


Fig.2 Surface roughness on stainless steel plate

図 3 には、それら 2 種類の表面粗さを持つ各試験片（ステンレス鋼板）での結果を示すが、ここでの油膜厚さ  $L$  は粗さ平均線からの膜厚となる。どの粗さ面についても、高周波の超音波（反射波の中心周波数は  $f_0=14\text{MHz}$ ）を用いた場合のエコー比  $H$ （乾燥面でのエコー高さ  $h_0$  で規格化）が薄膜から低下を示し、また、粗い面の方がその傾向が強く現れている。

そして、膜厚  $L$  が油中波長  $\lambda$  の  $1/4$  近くで、有意なエコー比の低下が観測されている。その他、ステンレス鋼中での反射回数  $n$  が多い波では膜厚に対する  $H$  の変化割合が大きい傾向も認められる。

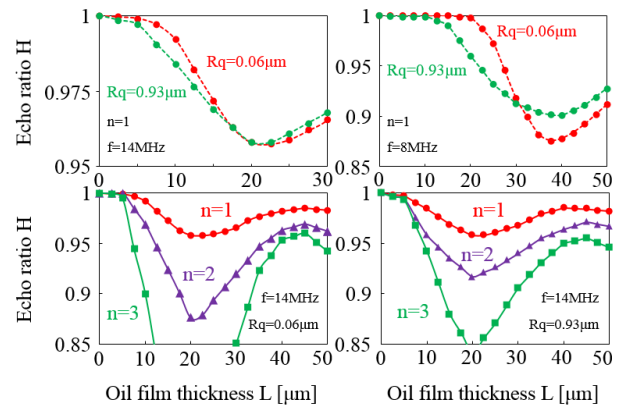


Fig.3 Relationship between echo ratio  $H$  and oil film thickness  $L$  [ $R_q=0.06, 0.93\mu\text{m}$ ]

### 3. 粗さの影響を考慮したエコー比Hの試算例

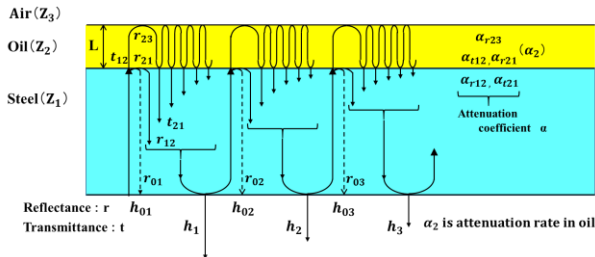


Fig.4 Ultrasonic behavior in thin adherent film

付着膜部での超音波の反射や透過は、概略、図4のようになる。鋼板と付着膜境界での反射や透過は、多重反射波を含め、鋼板の粗さによる減衰の影響を受ける<sup>(1)</sup>。その他、付着膜中や空気との界面での減衰も影響する。

これらの影響を考慮して試算した付着膜厚さ  $L$  とエコー比  $H$  の関係を図5に示す。なお、ここでの  $H$  は、付着膜からの反射エコー高さ  $h$  を、各面粗さ  $R_q$ 、鋼中反射回数  $n$  毎の乾燥時 ( $L=0\mu\text{m}$ ) エコー高さ  $h_0$  で規格した値である。また、二乗平均平方根粗さ  $R_q$  としては、 $0.06\mu\text{m}$ ,  $0.93\mu\text{m}$  を仮定し、超音波周波数  $f$  は、 $8\text{MHz}$ ,  $14\text{MHz}$  とした。

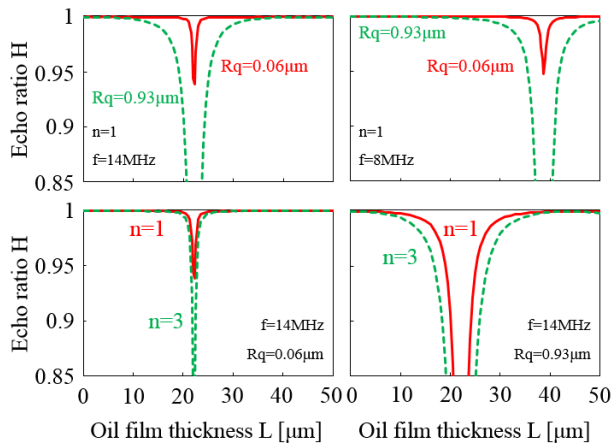


Fig.5 Estimation result of echo ratio considering influence of surface roughness [ $R_q=0.06, 0.93\mu\text{m}$ ]

上段の図には異なる表面粗さ  $R_q$  を有する面での周波数  $f$  の影響を示してある。ただし、鋼板中での反射回数は  $n=1$  (したがって第1反射波)である。エコー比  $H$  が各周波数での油中波長の  $1/4$  となる膜厚付近で急激な低下を示し、高周波ほど薄膜領域での感度が高いこと等は粗さに依らず共通しており、図3の実験結果とも一致した傾向にある。また、粗い面であるほどそこでの減衰が大きくなるため、薄膜からエコー比  $H$  の低下が顕著になることも、実験結果と一致する。

一方、下段の図には鋼板中での反射回数  $n$  の影響を示してあるが、付着膜内での多重反射を多く経験する複数回反射 ( $n=3$ ) の場合の  $H$  は、膜厚の影響を受け易く、大きく変化している。

### 4. シリンダ壁面付着膜の形成状態評価

実験装置を図6に示す。実際のエンジンではピストンが移動するが、ここでは、ピストンを固定し、シリンダ(内径  $86\text{mm}$ )を往復させるシリンダ摺動型の装置を用いている。実験には、水浸型の点焦点探触子(中心周波数は  $20\text{MHz}$ )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させている。

シリンダ内面の付着膜の観測は、上記探触子を固定したZステージを移動(ピストン上部から  $18.75\text{mm}$  の範囲の41点)させて行っている。なお、使用した潤滑油は  $\text{SAE:10W-30}$  であり、給油量  $Q$  は  $2.0$  と  $0.8\text{cm}^3/\text{min}$  とした。

図7には、測定されたシリンダ摺動面からの反射エコー高さ  $h$  を図3のような較正曲線を用いて、膜厚変換した結果を示してある。図には、リング部(白く抜けている範囲)以外のシリンダ壁面に付着している油の膜厚挙動に注目した結果を示した。給油量  $Q$  が少ない場合 ( $Q=0.8\text{cm}^3/\text{min}$ )、特にシリンダ上昇工程では、トップリング入口付近まで薄膜領域が延びており、リング先端に油が供給され難い状態にある可能性が高い。

### 5. 結言

超音波付着膜厚測定における壁面粗さの影響を検討した結果、粗い面、高周波超音波、複数回反射の場合に、薄膜状態からの膜厚測定の可能性が高くなることが明らかになった。

### 参考文献

- (1) Z. Wang, X. Cui, H. Ma, Y. Kang, Z. Deng : Effect of Surface Roughness on Ultrasonic Testing of Back-Surface Micro-Cracks, Applied Sciences 2018, 8, 1233

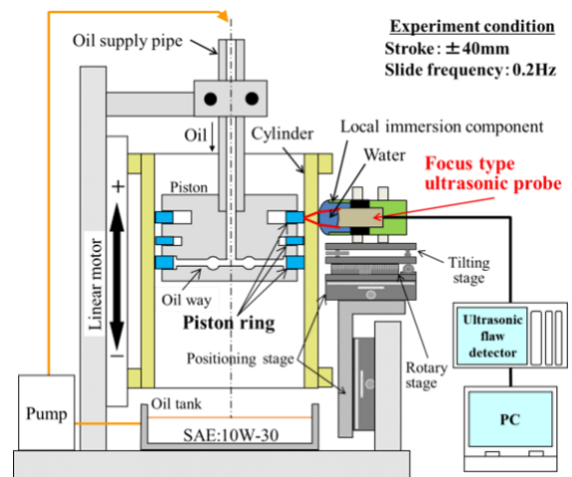


Fig.6 Experimental equipment

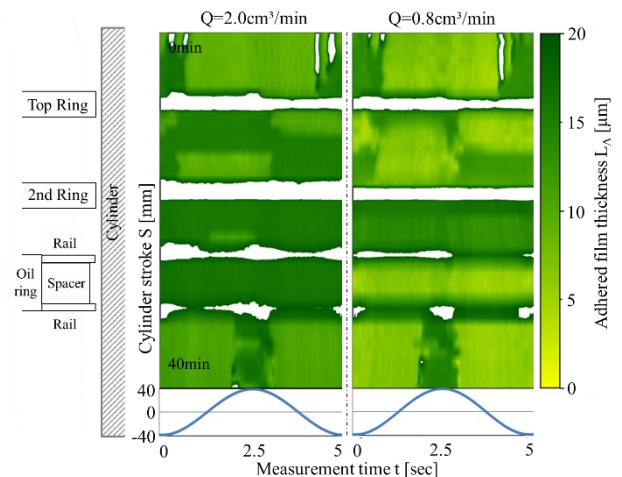


Fig.7 Distribution of adhered film thickness