

修士論文要旨

垂直ならびに斜角型超音波探触子を用いた付着油膜厚さ測定

Measurement of adhered oil-film thickness using vertical or angle ultrasonic probes

知能機械システム工学コース

医工先進検査システム研究室 1225014 金田 紘樹

1. 諸言

近年、二酸化炭素排出量の削減が問題となっている。中でも自動車による排ガスの問題は深刻であり、燃費改善が大きな課題となっている。

燃費改善にはピストン部分の摩擦低減が重要となり、そのために、ピストンリングの低張力化や潤滑油の低粘度化などがなされているが、気密性の低下や固体接触の発生等により正常な潤滑が妨げられ、かえって潤滑状態の悪化を招くこともある。

常に安定した潤滑状態を保つためには、運転状態にあるシリンダ壁面に付着する油膜の厚さや油量のその場観測が必要となる。しかし、実際の非透光性材料に対して連続的にそれらを観測できる実用的な計測技術は、現状では開発されていない。

本研究では、超音波法を用いて壁面に付着する油膜の厚さを定量的に測定できる観測技術の確立を目指している。

2. 実験装置・方法

本研究では、超音波を測定対象物に対して垂直に入射させる垂直法と、角度を持たせて入射させる斜角法の二種類を用いて行った。実験装置の概略を図1に示す。鋼板をエンジンシリンダの壁面と見立てて板の下面から超音波を入射させ、上面で反射されて返ってきた波を測定する。この際、板上が乾燥状態にある場合の反射波を基準とし、上面に油を滴下して作成した薄い油膜部からの反射波と比較検討をした。

図2には斜角法において、二つの探触子間距離 S を増加させた場合の受信波のピーク値変化を示す。送信波が鋼板上面で反射され、下面に戻るまでを鋼中一回反射とすると、この点で反射エコー高さ h はピークを示す。さらに S を大きくすると、 h は主ビームの反射回数 n に応じたピークを示すようになる。実験ではこれらのピーク位置を測定点と定めた。

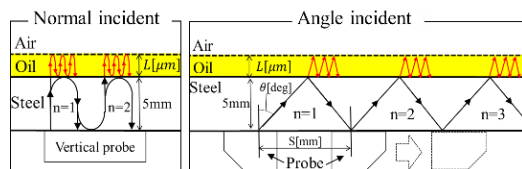


Fig.1 Ultrasonic process

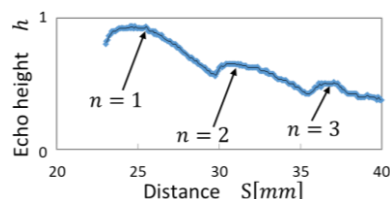


Fig.2 Change in echo height h by distance S

付着油膜厚さの評価方法を図3に示す。このとき実験に用いた垂直探触子の周波数を表1に、斜角探触子の仕様については表2に示す。まず測定された波の振幅をエコー高さ h とする。ここでは、観測されるエコー高さ h を、上面が乾燥状態にあるときのエコー高さ h_0 で規格化したエコー高さ比 $H(=h/h_0)$ により付着油膜厚さを評価する。

また、付着膜(Wet 面)からの反射波形を FFT 解析し、パワースペクトルと位相を求め、油膜がない(Dry 状態)場合のそれらとの差で決まるパワー面積差 ΔS と位相差 $|\Delta\phi|$ (Dry と Wet の各中心周波数での位相の差)についても併せて検討した。

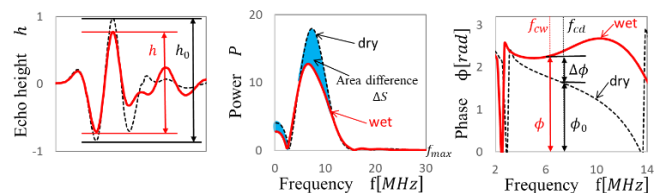


Fig.3 Evaluation method in this report

ところで、垂直法、斜角法の双方において、周波数を高くすることにより油中波長が短くなるため、付着膜の膜厚変化に対して敏感になると期待できる。また、斜角法においては、入射角 θ を変大きくすることによって油中伝播距離が増大するため、位相や減衰の影響を受け易くなる。さらに、縦波と横波入射の違いによる鋼と油の境界面でのモード変換の有無も、付着膜部からの波高値に影響を与えられられる。

Table.1 Vertical probe frequency

Nominal center frequency f [MHz]			
2	5	10	20

Table.2 Measurement condition in angle probe use

		Nominal center frequency f [MHz]				
		2	10	20		
Incident angle θ [deg]	20	—	○	—	—	—
	45	○	○	○	○	—
	70	—	○	—	○	○

3. 実験結果・考察

垂直法における膜厚とエコー高さ比や位相差に対する実験値と理論的な傾向を比較した結果をそれぞれ図4、5に示す。

図4に示すように、入射波の周波数を変化させ、エコー高さ比 H の変化を調べたところ、付着膜厚さ L の増大に伴っ

て特に $L > 15\mu\text{m}$ の領域での H が減少しており、例えば、20MHzにおいては、膜厚が油中波長の1/4程度となる $L = 20\mu\text{m}$ での H が急激な低下を示している。位相差 $|\Delta\phi|$ については、油膜厚さの増大に応じて $|\Delta\phi|$ が大きくなる傾向にあり、また、エコー高さと同様に高周波の場合ほど、膜厚変化に対する感度が高くなる傾向を示している。ただし、膜厚に対する各指標の変化の仕方は異なり、位相差の方が薄膜領域から、膜厚変化に対する有意な差を示しており、付着膜測定には有効であることが分かる。

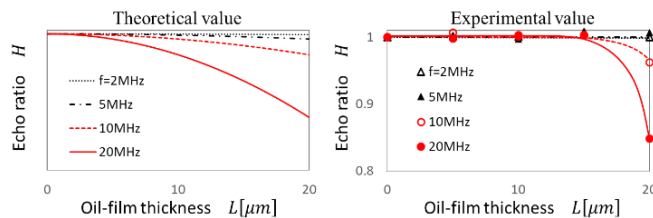


Fig.4 Echo ratio H in vertical method

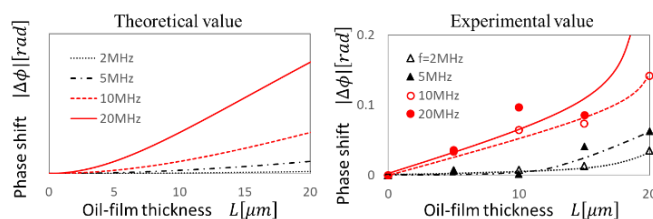


Fig.5 Phase shift $|\Delta\phi|$ in vertical method

次に、パワー面積差 ΔS について比較した結果を図6に示す。全体の傾向としては膜厚の増加により値が増大し、高周波を用いるとより感度が高まる傾向にあるとのおう、位相差とほぼ同様の結果を示しており、特に薄膜での測定への期待できる。

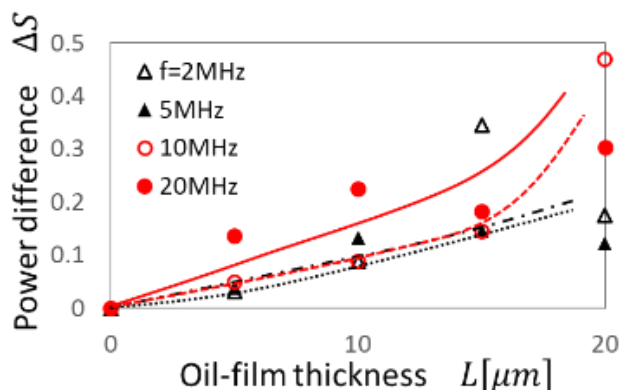


Fig.6 Power difference ΔS in vertical method

これまでの結果から、薄膜の測定には高周波の探触子を用い、位相差、またはパワー面積差を用いることが好ましいと考えられる。しかし、実際の運転での使用を考慮すると、波形の周波数分析を基にしたそれらの指標より、波形そのもので決定されるエコー高さ比 H での評価が簡素であり、むしろ望ましい。そのためには、薄膜領域でも有意な H 変化が得られる測定方法が求められる。そこで本研究では、油中での伝播距離を長くして、位相や減衰の影響を受け易くすることを目的とし、斜角法の適用を考えた。

斜角法におけるエコー高さ比の測定結果を図7に示す。例えば、探触子から鋼中へ縦波を入射させる角度 θ を固定して周波数 f を変化させた(a)の図では、20MHzの場合に膜厚に対して H が減少し易い傾向が認められる。

(b)の図は $f = 20\text{MHz}$ と固定して、鋼中への縦波の入射角を $\theta = 45^\circ, 70^\circ$ 変化させた場合の結果であり、わずかではあるが、 $\theta = 70^\circ$ での H が減少し易い傾向にある。

(c)の図は $f = 20\text{MHz}$ 、 $\theta = 70^\circ$ に固定した場合の、探触子から鋼中への入射波の種類(縦波、横波)の影響であるが、全体的な傾向としては横波入射の方が、感度が高くなるように見える。また、薄膜領域でも有意な H の低下が観測されている。

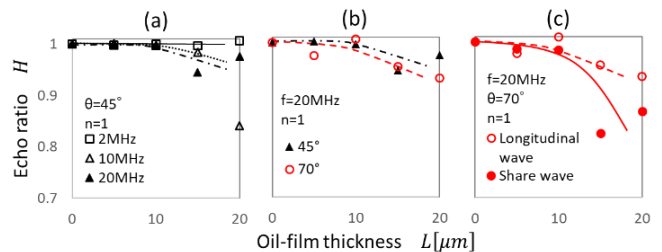


Fig.7 Changing H in angle incident method

ところで、以上述べたことは、鋼板上面での1回目反射波($n=1$)での結果についてであるが、油中での伝播距離の増大(位相と減衰の増大)効果と、鋼と油間でのモード変換の効果は、共に反射回数が多い(例えば $n=2$)法が得られ易いと考えられる。図8は図7(c)と同じ条件において測定された $n=2$ での結果であるが、 $L=5\mu\text{m}$ の薄膜領域から $L=20\mu\text{m}$ まで、連続的に H は低下しており、膜厚に対する感度も図7(c)の結果より多少高く現れている。また、縦波入射の場合においては $L \geq 20\mu\text{m}$ の、シリンダ壁面への付着膜としてはかなり厚い膜厚領域であっても、 H による膜厚測定が可能なが示されている。

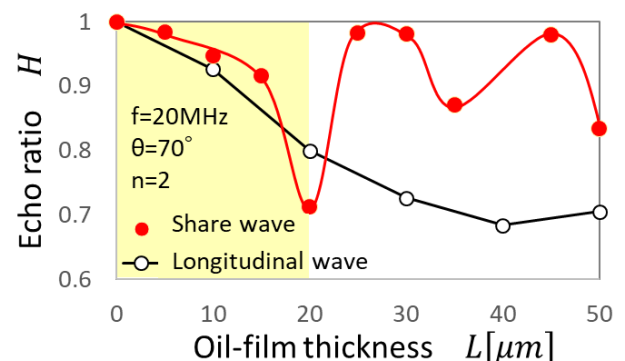


Fig.8 Optimal condition

4. 結言

垂直法、斜角法の双方において、周波数を高くし、油中波長を短くすることで膜厚に対する感度が向上した。

また、斜角法において、入射角 θ を大きくして油中伝播距離を増大させると、反射エコーは低下し易くなる。なお、横波で入射させることで鋼と油の境界面でモード変換させることができ、薄膜測定に対する感度の向上につながる可能性が得られた。

文献

- (1) T. Reddyhoff, S. Kasolang, R.S. Dwyer-Joyce, B.W. Drinkwater, "The Phase Shift of an Ultrasonic Pulse at an Oil Layer and Determination of Film Thickness", ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology, Vol 208-210, No219(6) (1994-1996), p.387-400