

卒業論文要旨

ジャーナル軸受の超音波潤滑評価の試み

システム工学群

医工先進検査システム研究室 1190138 平井克佳

1. 諸言

省エネルギー・省資源化にともない、例えば自動車用エンジンでは、微量な低粘度油で潤滑される摺動面が増えている。また、ハイブリッド車の普及やアイドルストップ機能の採用で、頻繁な起動や停止が繰り返されるようになり、過酷な潤滑を強いられる摺動面が多くなってきた。そこでの安全な運転を保障するためには、実際のエンジン材料（例えば鋼）への適用が可能で、取扱いと評価が簡便な潤滑診断技術の開発が課題となる。

従来、ピストン（リング）とシリンダ間のようなエンジン系摺動面での潤滑評価は、主に透光性材料を用いて行われてきた。しかし、得られた結果から、例えば表面の濡れ性、粗さやなじみ（濡れ性も変化する）等の影響が含まれる実際の摺動面での潤滑特性を正しく推測することは難しい。

本研究では、簡便な潤滑診断技術としての超音波法の可能性を検討している¹⁾。ここでは、エンジンのコンロッド大端部にあるジャーナル軸受とクランクピン間の潤滑診断を目的として試作した、軸挿入型超音波探触子を用い、静荷重下で運転するジャーナル軸受の、円周ならびに軸方向での潤滑状態（膜厚を含む）について検討した結果について述べる。

2. 潤滑評価原理

図1に実験装置の概略を示す。本実験では、中心周波数2MHzの軸挿入型縦波超音波探触子を用いた。例えば、軸内に挿入された探触子から入射された超音波の一部は、図2中央に例示するように、軸内周との間にある伝搬剤（油）を介して軸側へと伝わる。軸中を伝播した波の一部は薄い潤滑膜内で多重反射を繰り返し、その合成波が、軸と伝搬剤を介して探触子へと戻り、図2右側のエコーを形成する。反射エコーの振幅（エコー高さ h ）は薄膜であるほど低くなる。

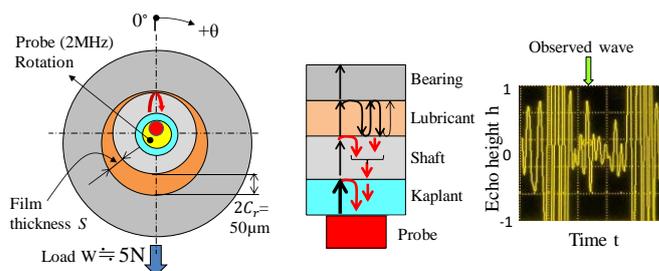


Fig.2 Probes and measurement positions

また、軸と軸受が接触する混合潤滑状態になると、固体接触領域の真実接触点を通じて軸受側に透過する超音波の量が増すため、固体接触部での荷重支持割合が大きくなるほど、反射波のエコー高さは低下する。

ところで、本装置では、探触子を軸方向に移動させて、軸受の幅方向での潤滑状態の違いを評価することも可能である。ここでは、軸受幅(27mm)の幅中央、ならびにその左側3mm、6mm、そして軸受端に近い9mmでの円周方向の潤滑評価（膜厚を含む）を、軸回転数と軸受荷重を変化させて調べた。

3. 較正曲線

軸と軸受の隙間を潤滑油で満たした状態で、軸受に $W=5N$ の極めて軽い荷重を負荷した後、それらを静止させたまま、軸内の探触子を $\theta=0^\circ\sim 360^\circ$ まで回転させ、軸受幅の各位置（幅方向位置）での θ と h の関係を求めた。

軸と軸受間がドライな（潤滑膜無し）状態でのエコー高さ h_0 で規格化したエコー比 $H(=h/h_0)$ と θ の関係の例は、図3左のようになる。各 θ での H は、幅方向位置によって多少異なっているが、 $\theta=0^\circ$ の固体接触位置から $\theta=180^\circ$ の最大膜厚位置に近づくに従い増加し、 $\theta=360^\circ$ に向けて減少する傾向を示している。

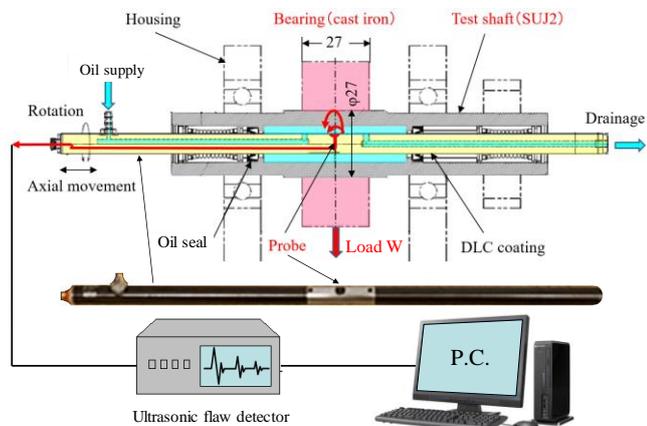


Fig.1 Experimental equipment

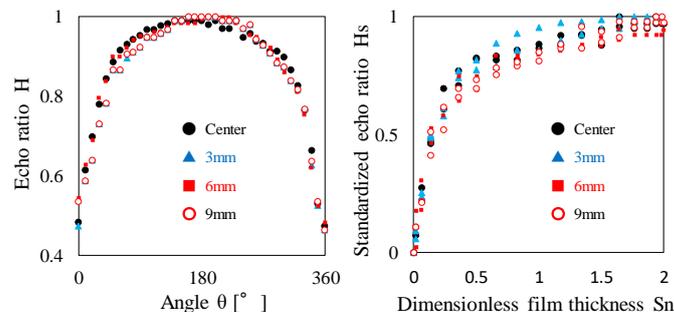


Fig.3 Angle θ and echo ratio H , Standardized calibration curves

これらの結果を H の最大変動幅 ($\theta=0^\circ$ と $\theta=180^\circ$ での H の差) を 1 とするよう標準化した標準エコー比 H_s (以下エコー比と呼ぶ) と、軸と軸受の幾何学的な隙間 $S=C_r(1-\cos\theta)$ を軸受の半径隙間 ($C_r=40\mu\text{m}$) で規格化した無次元膜厚 S_n との関係に整理し直したものが同図右側である。ここでは、各幅方向位置での較正曲線が多少異なるため、エコー高さから膜厚への変換は、それぞれの幅方向位置での較正曲線を用いて行った。

4. 各幅位置での潤滑状態評価

図 4 左は、エンジンの起動や停止を想定した極低速 ($N=5\text{rpm}$, $W=600\text{N}$) 下での、軸受幅中央における円周方向のエコー比 H_s の挙動である。本実験条件では発生する油膜圧力が低いため、荷重の大部分を軸と軸受の固体接触部で支持しなければならず、円周方向への軸受隙間が急激に減少することにより、 H_s は W の増荷に伴い荷重方向 ($\theta=0^\circ$) に向けて急速に低下する。図の $H_s \leq 0$ の領域が、そのような固体接触を伴う混合潤滑領域であり、そこでの H_s が低い (負の値) ほど、固体接触部での支持荷重割合が大きいことを示している。

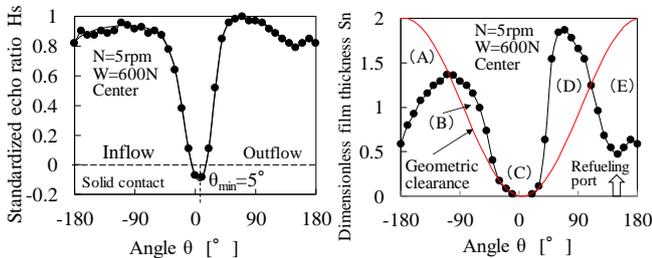


Fig.4 H_s and S_n in circumferential (5rpm,600N, Center)

同図右には、図 3 の較正曲線を用いて標準エコー比 H_s を無次元膜厚 S_n に変換した結果を示してある。なお、図中には軸と軸受の幾何的の形状から決まる隙間 (膜厚) 変化も併せて示した。

得られた無次元膜厚と幾何隙間との比較から、(A) 流入側 ($-180 \sim 0^\circ$) の上流 ($-180 \sim 90^\circ$ 付近) では無次元膜厚の方が低い値を示すこと、(B) それより下流域 ($-90 \sim 0^\circ$ 付近) になると、逆に少し高い値を示すようになり、(C) 最小膜厚近傍 (この場合は 0° 付近) では両者はほぼ一致するようになることが分かる。一方、(D) 流出側 ($0 \sim 180^\circ$) の初期領域 ($40 \sim 90^\circ$ 付近) では、幾何隙間に比べて著しく厚い無次元膜厚が推定されるが、(E) それ以降 ($90 \sim 180^\circ$) になると流入側上流の(A)と同じように幾何隙間より薄い推定膜厚となる。

これらに関しては、(E)領域にある給油口部での潤滑油の攪拌により発生した微小気泡 (H_s が低下) が、(A)の厚膜領域でも影響し、異常な膜厚推定値が現れた。(B)の薄膜化領域に入ると気泡の合体による油膜破断や軸受外への排出により、 S_n は幾何隙間よりわずかに高くはなるものの、徐々に 2 面間が潤滑油で満たされるため幾何隙間と同じ膜厚に近づき、2 面が潤滑油で満たされる(C)の極薄膜 (一部固体接触) 領域では、幾何隙間と同じ推定膜厚となる。しかし、潤滑油の流出方向に膜厚が厚くなる(D)領域では、潤滑油の不足による油膜破断 (キャビテーション) が大きな領域で発生するため、油膜に入射された音波の反射が著しくなり、 S_n は異常に高い値を示したものと考えられる。そして、給油口位置に近づくに従って油膜破断領域が減少し、 S_n は再び低下する。図 5 は、超音波観測位置を軸方向に移動 (中央から 6mm, 9mm 軸受端側) させた場合の膜厚推定結果である。

給油口から離れた 6mm 位置になると、流入側での油膜破断 (微小気泡を含む) 領域が狭くなるため、幾何隙間と S_n は一致する傾向を示すが、潤滑油が十分に供給され難い軸受の端部に近い 9mm での S_n は、(A)や(E)のように幾何隙間より低い値となる。

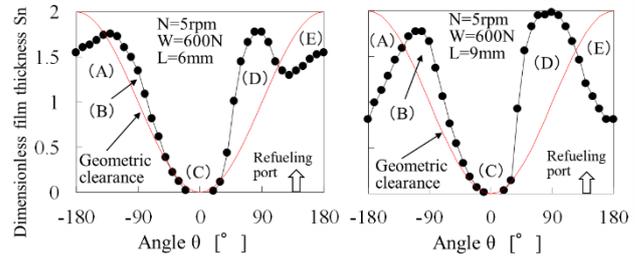


Fig.5 S_n in circumferential (100rpm,600N, 6 and 9mm)

上述の結果は 5rpm と低回転であり、給油口からの潤滑油の供給が十分であったとは言い難い。図 6 には、その 20 倍の $N=100\text{rpm}$ での結果を示してある。荷重 W と測定位置 L は同じであるが、高回転数の場合には低回転で見られた(A)と(B)の領域はほとんど認められず、流入側の広い領域にわたって幾何隙間とほぼ一致している。

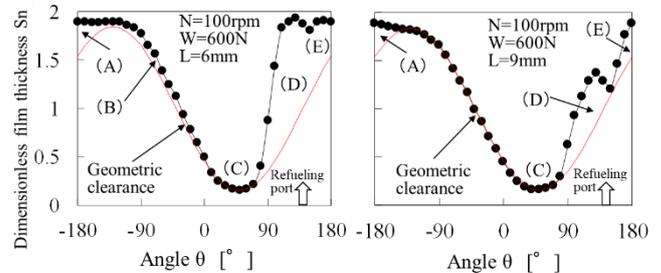


Fig.6 S_n in circumferential (5rpm,600N, 6 and 9mm)

図 7 の荷重の影響実験 (測定位置は $L=3\text{mm}$) においても、ほぼ同様の流入側の結果となっている。ちなみに、 $W=200\text{N}$ の軽荷重実験での最小膜厚は、 $W=600\text{N}$ より厚く現れており、一般的な軸受特性を反映する結果が得られている。

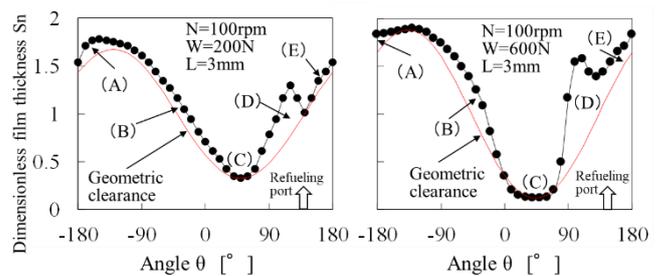


Fig.7 S_n in circumferential (100rpm,3mm, 200 and 600N)

5. 結言

軸挿入型探触子を用いて推定した無次元膜厚 S_n の挙動には、微小な気泡や油膜破断の影響が強く現れる領域が存在するものの、十分な油の供給がある場合には、圧力が発生する先ずばまり状の領域が、連続的な油膜で満たされている可能性が高いことが明らかになった。

参考文献

- 1) 竹内彰敏, 転がり軸受面での供給不足と枯渇過程の超音波観測, 機論 C 編, Vol.78, No.795 (2012), p.3776-3786.