

超音波法と渦流法による潤滑状態評価

Evaluation of lubrication condition with ultrasonic and eddy current method

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 1225021 窪川 悠也

1. 諸言

機械装置の軸受面における潤滑状態のその場観測は、機器の安全性確保の観点から重要視されるようになってきた。例えば、斜板ポンプ等の面接触をする潤滑面では、膜厚や油膜破断割合の特定等が、ハブベアリング等の集中接触をする潤滑面では荷重や異物の混入の検知等が重要な課題となる。

これらの測定法としては、例えばレーザー誘起蛍光法があげられるが、これは実機で使用される非透光性軸受には適用できないといった問題をかかえている。そこで本報では非透光性の一般的な潤滑面への適用を考え、超音波法と渦流法を併用した潤滑状態評価法の可能性を検討した。

2. 測定原理

図1に超音波法での潤滑状態の評価原理を示す。圧電素子で発生した超音波は潤滑油との境界面において透過波と反射波に分かれる。この潤滑面からの反射波の振幅（エコー高さ h ）は、音波の伝搬経路での各物質（鋼や油、気泡等）の音響的な性質や、薄い油膜部での多重反射で生じる位相に影響されるため、油膜厚さや油膜破断率（気泡含有率）の評価に利用できる可能性がある。ここでは、2面が空気で隔てられている状態で観測されるエコー高さ h_0 で規格化したエコー比 $H = h/h_0$ を評価指標とする。

図2には、上記超音波探触子と、渦流探触子を組み合わせた複合探触子を示す。渦流探触子内のコイルに交流電圧を印加することにより誘起された磁束の一部が、例えば玉軸受外輪内面に漏れることにより、相手面側の玉表面に渦電流が発生する。それに伴って生じた二次的な磁束が上記のコイル部での磁束を打ち消す方向に作用してインダクタンスを変化させるため、ブリッジ回路の極間電圧 V が変化する。この V の変化 ΔV は前記漏れ磁束の影響範囲での平均膜厚に依存するため、 ΔV により例えば膜厚の測定が可能になる。

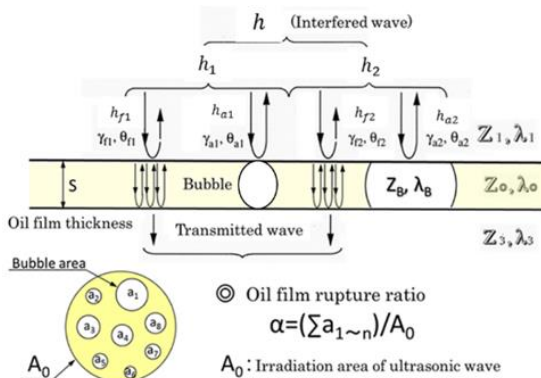


Fig.1 Measurement principle of ultrasonic method

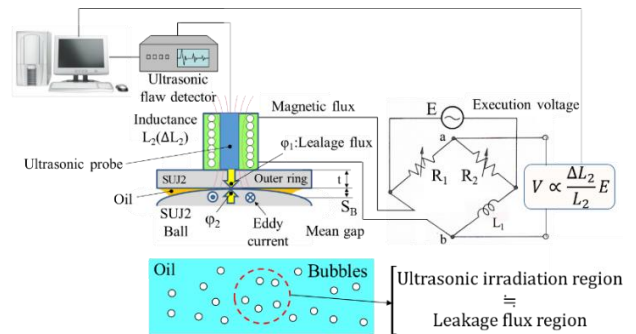


Fig.2 Combination of ultrasonic and eddy current method

3. 超音波法による油膜破断率推定

図3に、鋼製潤滑面間の膜厚や油膜破断率 $\alpha = A/A_0$ （ A ：油膜破断面積、 A_0 ：超音波照射面積）とエコー比 H の関係の計算結果を示す。ある膜厚 S での H は、 α の増大とともに大きくなり、 $H=1$ （乾燥状態）に近づく。

図4(a)には膜厚を $2\mu\text{m}$ とし、 α を変えた場合の H を周波数 f を変化させて計算した結果を示す。エコー比 H は、 α の増大とともに高くなり、 $\alpha=1.0$ で $H=1$ となる。そして、ある α での H は f の減少とともに低下し、 $f=0\text{Hz}$ の切片での H の値は、 α そのものと一致する。これは、 $f=0\text{Hz}$ 近くの極低周波数での油中波長が通常の膜厚に比べて極めて長く、2面が同材質の場合、油膜部に入射した超音波は全て相手面に透過するためであり、そこからの反射エコー高さは、膜厚に関係なく油膜破断割合にのみ依存した変化を示す。

しかし、このような極低周波数の探触子の振動子の径は、 $\phi 100\text{mm}$ 以上と極めて大きくなり、また極長波の波となるため、振動子へのパルス電圧印加後の減衰途中の波と、その波よりはるかにエネルギーが低く極小のエコー高さとなる潤滑面からの反射波が重なるため、観測波形からの反射波の検出が極めて難しくなる。したがって、上記手法での α の推定は実際には難しいので、 α の推定のためには油膜破断に影響されない膜厚推定法の検討が重要となる。

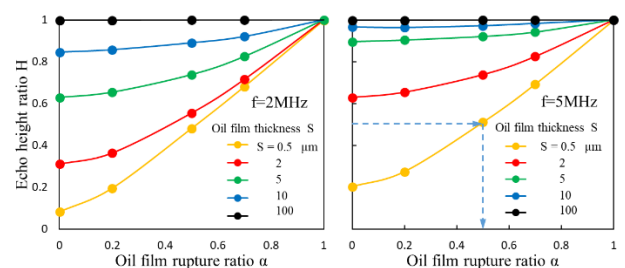
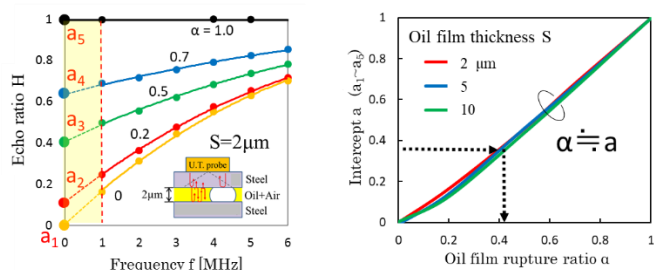


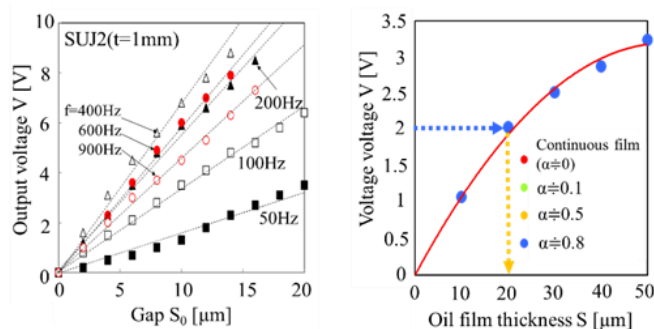
Fig.3 Relationship between H and α



(a) Calculation result (b) Behavior of intercept
Fig.4 Behavior of H due to frequency change

4. 渦流法による膜厚測定

図5は、厚さ1mmのSUJ2平板裏面と1インチ鋼球間の最小隙間 S_0 （空気が介在）と渦流探傷器の出力電圧 V の関係を示す。 V は膜厚に比例して増加するが、増加の仕方（感度）は励磁周波数 f で異なり、最適周波数が存在する（この場合400Hz）。同図(b)に示すように、出力電圧と膜厚との関係は油膜破断率 α の影響を受けないため、出力電圧 V の測定値から油膜破断を含む領域での平均膜厚 S の推定が可能になる。



(a) Optimal excitation frequency (b) Influence of α
Fig.5 Film thickness measured by eddy current

5. 複合探触子による深溝玉軸受の潤滑評価の可能性

深溝玉軸受の潤滑状態評価を、超音波・渦流複合探触子を用いて行った例を図6、7に示す。図6上段は、十分な量の給油がある場合と、給油量が少なく油不足が発生している場合の H と ΔV の各波形の代表例である。超音波照射領域内の油の量が不十分になると油膜破断領域が増大するため H は高く現れる。一方、渦電流の場合、油と空気はともに非導電性物質であるため、 ΔV は給油状態の影響を受けない。なお、実動軸受での給油状態評価をそのような波形1つ1つの観測により行うことは難しいが、同図下段のように ΔV と H の関係にプロットすることで、容易に評価することができる。

潤滑状態を悪化させる摩耗粉の噛み込みの影響を図7に示す。実験では厚さ5 μm 程度の鉄系摩耗粉を潤滑油に3.2wt%の割合で混入させた油、1.2ccを噴射により外輪の内面に供給している。

摩耗粉の噛み込みにより固体接触面積が大きくなるため、玉側への音波の透過割合が増えて反射波の H は低下する。一方、外輪裏面への漏れ磁束影響範囲での平均膜厚は厚く、摩耗粉の噛み込みの影響をほとんど受けないため、 ΔV の挙動は噛み込みの前後でほぼ一致する。

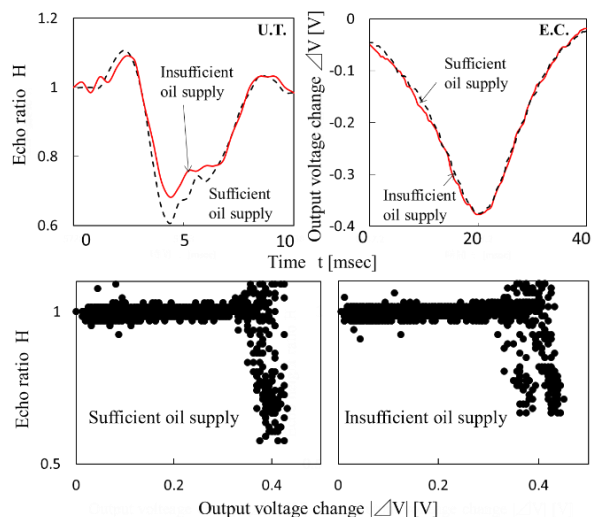


Fig.6 Influence of oil supply on H and ΔV

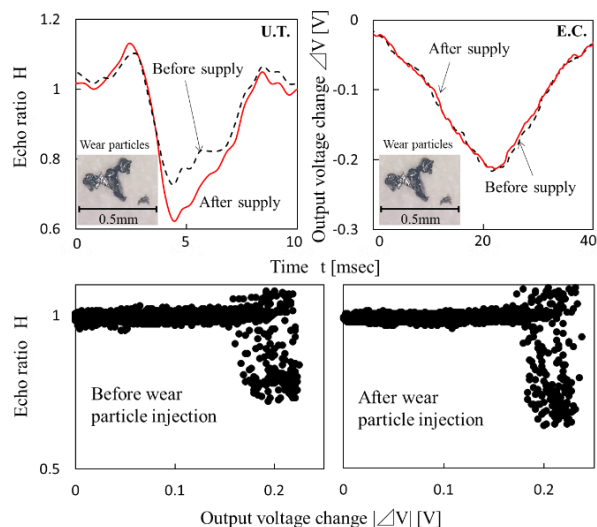


Fig.7 Lubrication condition before and after injection of wear particles

6. 結言

超音波法と渦流法の併用による潤滑状態の評価の可能性を検討した結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 超音波法で得られた既知の膜厚でのエコー比 H の観測結果から油膜破断率 α の推定が可能になる。
- 2) 極低周波数でのエコー比 H は膜厚 S に依らず油膜破断率 α そのものを示す。
- 3) 複合探触子の使用で、膜厚や荷重の測定、さらには油膜破断や異物の噛み込みの独立した検知が可能になる。

文献

- 1) 竹内彰敏, 渦電流法による深溝玉軸受の支持荷重測定に関する実験的試み, 日本機械学会論文集, 2019