

修士論文要旨

超音波法によるジャーナル軸受の潤滑評価

Evaluation of lubrication condition in journal bearing with ultrasonic 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 1225020 國則 慶太郎

1. 緒言

近年、地球温暖化による環境破壊が大きな問題になっており、その背景から省エネ・高効率化を目的とした潤滑油の低粘度化が推し進められている。しかし、摺動部では低粘度油の使用によって固体接触が起きやすくなり、焼付き等の表面損傷のリスクが高くなっている。今後、更に過酷になる運転条件においても安全な運転を確保するためには、摺動部の潤滑状態を定量的に評価し、設計に反映させなければならない。

本研究で用いる超音波法による潤滑診断では、潤滑面の状態を損なうことなく軸受の潤滑状態を連続的に評価することができる。本報では、軸継手を介して回転する軸に周期的な変動荷重が作用する場合の、軸受内での油膜挙動を超音波法により観測した結果を基に、ジャーナル軸受の潤滑状態の評価を試みている。

2. 超音波法の測定原理

超音波は異なる媒質の境界面で透過する波と反射する波に分かれる。潤滑面に入射した波は薄い油膜内で多重反射を起こし、それらの波は軸受裏面で反射した波と干渉する。その結果、探傷器上では油膜の影響を反映したエコー波形が形成される。この波の波高値（エコー高さ h ）は潤滑部の膜厚に依存して変化するため、予め図1のような膜厚 S とエコー高さ h との関係（校正曲線）を求めておけば、運転中に観測されるエコー高さから膜厚を推定できる。

なお、図1では実験結果を無次元膜厚（膜厚 S を軸と軸受の半径隙間 C_r で規格化）とエコー比（観測されるエコー高さ h を乾燥時（2面間が空気の状態）のエコー高さ h_0 で規格化）の関係で示してある。

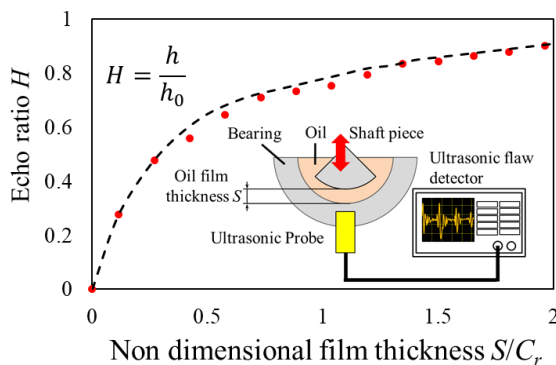


Fig.1 Calibration device and calibration curve

3. 一方向変動荷重を受けるジャーナル軸受の潤滑評価

図2に本研究で用いた実験装置の概略を示す。軸の回転によってカム部に接するバネが伸縮し、周期的に変動する軸荷重が負荷される。これらの荷重はカム部側方の左右の軸受で

支持されている。各軸受には荷重負荷方向から $\pm 45^\circ$ の位置に2MHzの超音波探触子を取り付けて摺動面の油膜挙動を観測した。なお、本実験で使用した左軸受の幅径比 L/D （ L は軸受幅、 D は軸受内径）は2.4、右軸受の幅径比は1.5である。また、それぞれの軸受に負荷される荷重は図3のようになり、右側軸受に作用する荷重が少し大きい。

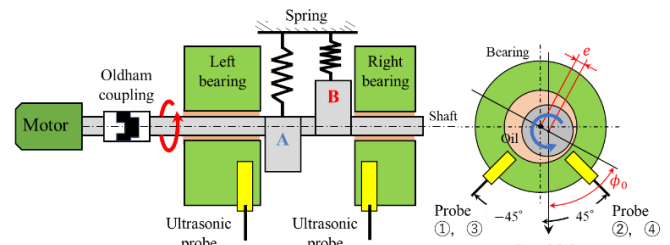


Fig.2 Outline of experimental equipment

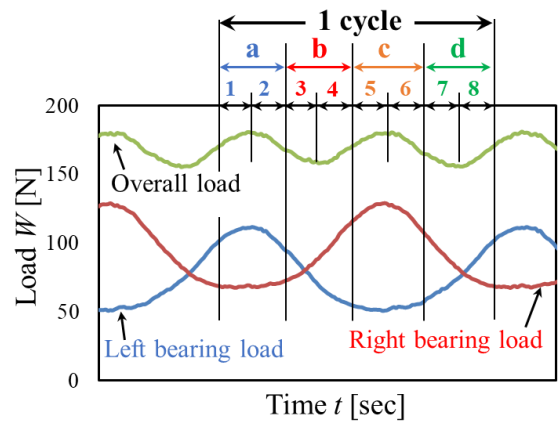


Fig.3 Periodic load acting on journal bearing

図4には左軸受の各探触子で測定した100rpmでの油膜挙動の観測例を、図5には各回転速度における左・右軸受内の軸心の軌跡を示してある。軸受中心と軸中心との相対位置の関係は、偏心量 e （それら中心のずれ量）と偏心角 ϕ_0 （負荷方向と偏心方向とのなす角）で表すことができる。図5では偏心量 e を半径隙間 C_r で無次元化した偏心率 $\varepsilon (=e/C_r)$ を用いた。

全体的には、軸心は低回転の場合に偏心率が $\varepsilon = 1$ 付近で大きく振れ回すが、高回転になると軸心の振れ回りは小さくなり円弧を描きながら軸受中心（ $\varepsilon = 0$ ）に近づく傾向を示している。

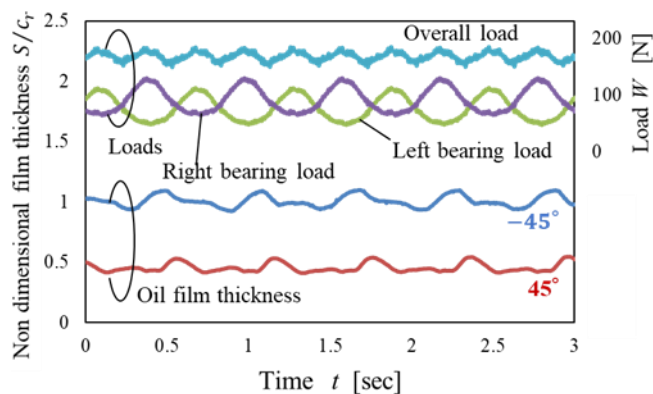


Fig.4 Observation example of film behavior
(Left bearing, 100rpm)

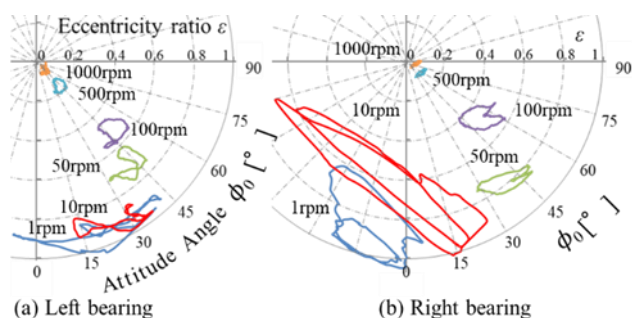


Fig.5 Journal center orbit

$N=10\text{rpm}$ の場合の右軸受は、ほぼ流体潤滑下にあると考えられるが、探触子④の位置 ($\theta = 45^\circ$) では、発生する負圧がキャビテーションの発生圧を下回り、広領域での油膜破断が生じているため、エコーは大きな変化を示す。このため、軸の大きな振れ回りが発生しているかのように現れたものと考えられる。 $N=1\text{rpm}$ でも同じことが言えるが、低回転では荷重の多くを固体接触部で支持しており、流体膜部での発生圧が低下して油膜破断領域が狭くなるため、エコー比は 10rpm のように大きな値を取らなくなる。ところで、左軸受は右軸受に比べて軸受幅が長く、支持すべき荷重も低い。したがって、発生する圧力が低くなるため、同じ探触子位置④でも、右軸受のような油膜破断に繋がらなかったと判断される。

ところで、周期的変動荷重下での軸の挙動を理解するには、左右軸受内での軸心挙動の相関がひとつの重要な指標となる。例えば、理想的な平行モードでの振れ回りは正の高い相関を示し、逆に高い負の相関の場合にはコンカルモード的な振れ回りになる。図6には、左右軸受について得られた、偏心角 ϕ (ϕ_L, ϕ_R) の相関 r_ϕ と、偏心率 ε ($\varepsilon_L, \varepsilon_R$) の相関 r_ε との関係を示してある。なお、 r_ϕ, r_ε は、軸の1回転を8等分した各区間での平均的な相関として定めた。

回転速度が低い $N=1\text{rpm}$ での結果は、固体接触や多少の油膜破断の発生を右軸受のセンサのひとつが検知していたこともあり、パラレル的な軸の振れ回りを示す $r_\phi=r_\varepsilon=1.0$ 付近以外のモードが観測されている。しかし、回転数が高くなると全荷重は流体膜で支持され、軸と軸受間の最小膜厚位置が $\theta = 45^\circ$ より大きくなり、探触子④で観測される H は、そこでの膜厚だけで決まるようになる。したがって例えば $N=1000\text{rpm}$ での結果に示すように左右の軸心挙動は正の高い相関になり、パラレルモードが支配的な振れ回りを示すようになる。このようなパラレル的な振れ回りには、例えばモーターや軸継手の質量や、負荷に伴う軸の曲がり等が影響していると考えられる。

1回転あたりでの左右軸受内の軸心挙動の相関の総和平均

を、回転速度 N を変化させて求めた結果を図7に示してある。縦軸は先に示した平均化のための各分割区間での偏心角 ϕ と偏心率 ε に対する各相関 ($r_1 \sim r_8$) の総和平均である。グラフ内では各回転速度につき3周期分のデータを取り、その誤差をエラーバーで示してある。全体的な相関の傾向としては、偏心率の相関 r_ε の場合、混合潤滑領域での運転と考えられる $1 \sim 20\text{rpm}$ の結果を除いて、1に近い高い相関を示している。これに対し、偏心角の相関 r_ϕ の総和平均はその半分程度と低く、軸の振れ方が左右軸受で異なっていると推測される。

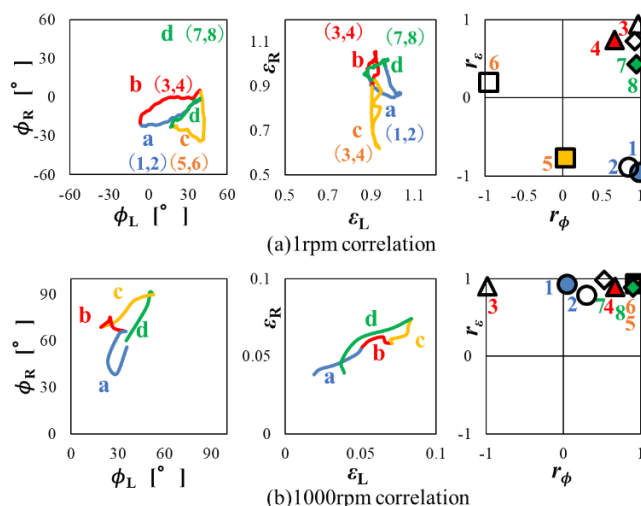


Fig.6 Correlation of journal center behavior (ε, ϕ)
in left and right bearings

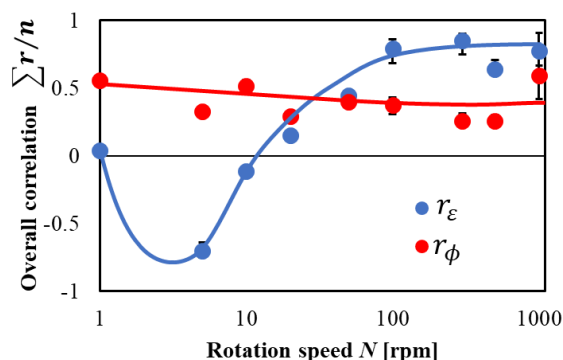


Fig.7 Overall correlation with rotation speed

4. 結言

超音波法により、変動荷重を受けるジャーナル軸受の摺動面の潤滑状態と軸挙動を観測した。

- (1) 回転速度が低い場合、軸と軸受間の油膜厚さが混合潤滑に移行する程度に薄くなり、摺動部で発生する負圧がキャビテーションの発生圧を下回り易くなる。特に $N=10\text{rpm}$ では油膜破断とみられるエコー比の急変動が発生し、左右軸受内の相関は低下する。
- (2) 回転速度が高くなると全荷重は流体膜で支持されるようになるため、左右の軸受内の軸挙動の相関は正の高い値を示し、パラレルモードでの振れ回りが支配的となる。

5. 参考文献

- (1) Akitoshi Takeuchi "Investigation on lubrication condition of piston pin in real engine block with ultrasonic technique", *Lubrication Science* 2011; 23:331-336