

# 卒業論文要旨

## 渦電流法を用いた板材裏面と相手面間の膜厚測定

システム工学群

医工先進検査システム研究室 1210029 岩佐侑弥

### 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、ピストンとシリンダ、ジャーナル軸受や斜板ポンプ等の潤滑面では、膜厚や油膜破断割合についての個別のその場観測が、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個別検知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、これは実機で使用する非透光性摺動面には適用できないといった問題をかかえている。

そこで本研究では、非透光性の一般的な潤滑面への適用を考え、膜厚の他に油膜破断や摩耗粉の噛み込みに対する検出感度が高い超音波法と、油膜破断や摩耗粉の噛み込みの影響を受けない渦電流法を併用した、新しい潤滑状態評価法の可能性を検討している。

超音波探触子と渦流探触子は、ともに、潤滑面の裏面に設置して用いるため、特に渦電流法では、磁束の浸透深さの関係から、適用できる軸受の厚さは1mm以下と極めて薄くなり、より厚い軸受にも適用できる探触子の開発が望まれていた。そのためには、大径でコイルの巻き数を大きくする必要があるが、エンジンやポンプ等の実際の摺動面への設置を考えると、プローブ径はできるだけ小さくすることが望ましい。

ここでは、外径5mmの円筒状探触子中心に直径2.5mmのフェライトを挿入した超小型渦流探触子を試作し、その基礎特性を把握するとともに、ステンレスならびにS45C製の板材裏面と相手面間の膜厚（隙間）測定の可能性を検討した。

### 2. 膜厚（隙間）の測定原理

図1に示すように本測定法では、例えば玉軸受を例にとると、外輪外周に設置した渦流探触子により発生する磁束が外輪内周に漏れた、裏面漏洩磁束 $\phi_1$ を利用することになる。

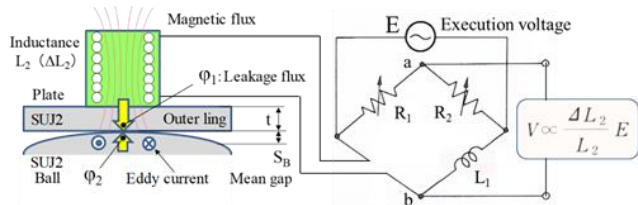


Fig.1 Schematic view of eddy current evaluation principle

探触子中のコイルに交流電流を流すことで発生する交流磁場により、探触子と接する導電性の外輪（高炭素クロム軸受鋼：SUJ2）の外表面には外部交流磁場を打ち消す向きの渦電流が誘起される。外輪の表面より深い部分では、外部交流磁場と誘起された渦電流が作る磁場との合成磁場に応じた渦電流が流れ、渦電流の強度が外表面よりも小さくなる表皮

効果が現れる（雨宮，1991）。深さ方向にこれが繰り返されるため、渦電流強度は外輪厚さ方向へ指数関数的に減少しながら外輪軌道面に至り、前述の裏面漏洩磁束 $\phi_1$ が発生する（ラディスラフ他，2005）。

軸受中の玉が裏面の漏れ磁束影響範囲に近づき隙間が狭くなると、玉側に渦電流が発生し、それに伴って誘起される2次的な磁束 $\phi_2$ によりコイル部のインダクタンスが $L_2$ から $(L_2 + \Delta L_2)$ に変化して、ブリッジ回路のa, b端子間の電圧がVから $(V + \Delta V)$ に変わる。 $L_2$ は、玉と外輪との平均隙間に依存して変化するため、電圧変化 $\Delta V$ （または電圧V）の観測により、平均隙間の測定が可能になる。

### 3. 渦電流法での裏面膜厚（隙間）測定の例

図2は裏面隙間と出力電圧の基礎的關係を調べるための実験装置の模式図である。ここでは、厚さtのSUJ2平板と1インチのSUJ2球との間の最小隙間 $S_0$ を0～最大100 $\mu\text{m}$ の範囲で変化させた場合の渦流探傷器の出力電圧Vとの関係を求める。用いた渦流探触子の外径は19mm、周波数帯域は100Hz～20kHzであり、SUJ2平板の表面に直接固定した。

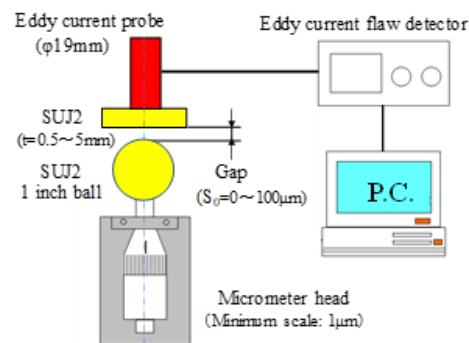


Fig. 2 Eddy current gap measurement equipment.

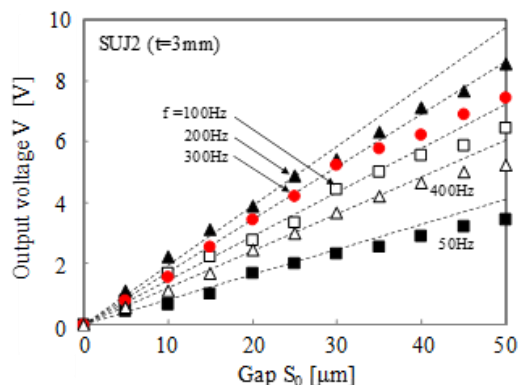


Fig.3 Relation between gap and output voltage

図3は、各隙間 $S_0$ での出力電圧と、両平板が接触状態( $S_0=0$ )にあるときの出力電圧との差を、厚さ $t=3\text{mm}$ のSUJ2平板について調べた結果である。図中のパラメータは探触子コイルの励磁周波数 $f$ である。どの周波数においても出力電圧 $V$ は隙間 $S_0$ にほぼ比例して増大するが、その感度は50Hz~400Hzまでは増加し、それ以上の周波数になると逆に低下する。

#### 4. 超小型渦流探触子の基本特性

以上述べたように、SUJ2の場合、3mmの厚さであっても板裏面の膜厚(隙間)測定が可能となるが、使用した探触子の外径は19mmと大きく、また、実用面を考えると、比透磁率が大きな炭素鋼(例えばS45C)への適用を考える必要がある。線径0.5mmのコイルを使用した、外径5mmの円筒状探触子の中心に直径2.5mmの穴をも設けた、超小型渦流探触子端面の直径方向の磁束密度分布は、図4のようになる。

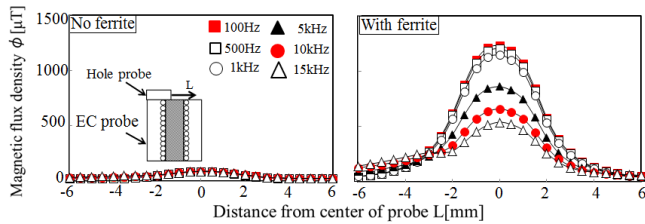


Fig. 4 Magnetic flux density distribution of EC probe

(a)はフェライトを挿入しない場合、(b)はフェライト挿入時であるが、ともに、コイル中心での磁束密度 $\phi$ が最も高く、半径方向に正規分布状に低下する。そして、最大の磁束密度は、フェライト無しに比べてフェライト挿入の場合に、当然高くなる。また、磁束密度は、コイルの励磁周波数 $f$ により異なっており、フェライト無しで $f_{\max}=15\text{kHz}$ 、有では $f_{\max}=100\text{Hz}$ で最も高くなる。

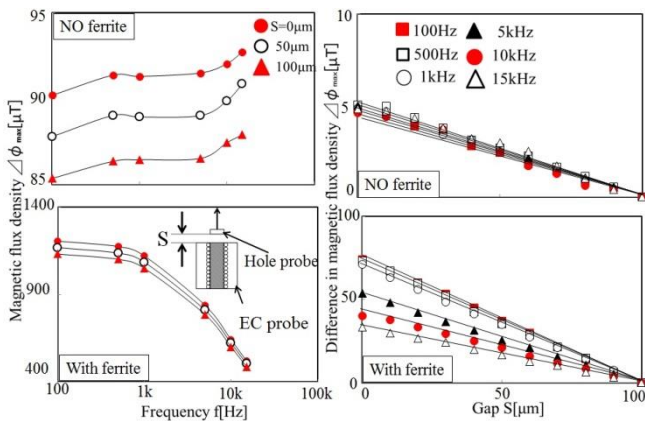


Fig. 5 Influence of excitation frequency gap

図5左側には、上記の磁束密度が最大( $\phi_{\max}$ )となる位置(コイル中心)において、ホールプローブを上昇させ、探触子端面との距離 $S$ を増大させた場合の $\phi_{\max}$ の変化と、探触子の励磁周波数 $f$ との関係を示してある。 $\phi_{\max}$ が最大値をとる周波数は、距離 $L$ によらずほぼ同じで、フェライト無しでは $f_{\max} \approx 15\text{kHz}$ 、挿入時には $f_{\max} \approx 100\text{Hz}$ となる。

一方、距離 $L$ を増大させた場合の $\phi_{\max}$ の変化は、同図右側に示すように、距離 $L$ とともに単調に減少する。また、フェライト挿入の効果は、の比較から明らかである。

#### 5. ステンレス板裏面での漏れ磁束密度分布

図6には、板厚5mmのステンレス板に設置した探触子で

の、裏面漏れ磁束密度分布の観測結果を示す。(a)のフェライト無しの場合、どの位置、どの周波数においても、漏れ磁束は観測されない。これに対し、フェライト挿入探触子では漏れ磁束が観測され、磁束密度 $\phi$ は、探触子中心で最も高く、離れるにしたがって徐々に低下し、ほぼガウス分布状に変化する。そして、最大の漏れ磁束は、励磁周波数 $f=500\text{Hz}$ で発生している。

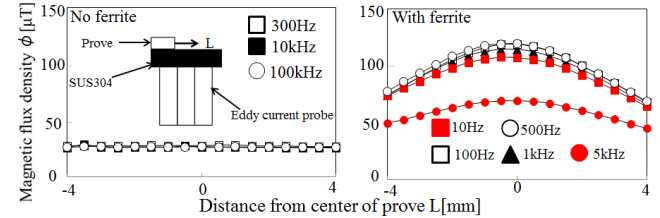


Fig.6 Leakage flux on the back of stainless plate

図7左側には、探触子中心軸上での磁束密度 $\phi_{\max}$ と探触子の励磁周波数 $f$ との関係を、ホールプローブと板裏面間の距離 $S$ をパラメータとして示してある。 $\phi_{\max}$ が最大値となる周波数は、距離 $S$ によらずほぼ $f_{\max} \approx 500\text{Hz}$ である。また、同図右側の図から明らかなように、 $\phi_{\max}$ は、距離 $S$ とともに単調に減少する。

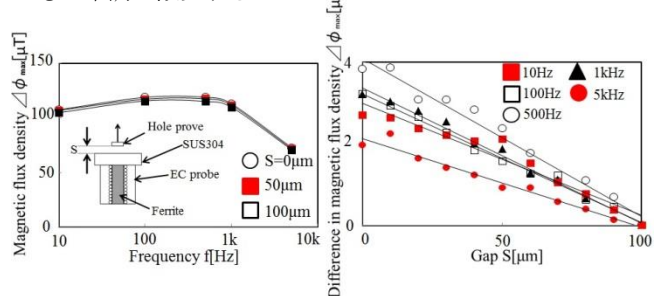


Fig.7 Influence of excitation frequency and gap

#### 6. 板材裏面と相手面間の膜厚(隙間)測定

図8左には、厚さ5mmのステンレス平板裏面と相手材となるS45C平板との間の膜厚(隙間) $S$ と、渦流探傷器の出力電圧 $V$ との関係を示してある。いずれの励磁周波数においても、膜厚の増加に伴い電圧 $V$ も増大しており、最大感度は、 $f=1\text{kHz}$ で得られている。

同図右側には、平板を3mm厚さのS45Cに変更した場合の結果を示してあるが、 $f=9\text{kHz}$ 付近で、膜厚 $S$ に対する有意な電圧変化が観測されており、本探触子が、実用面での使用の可能性が明らかにされた。

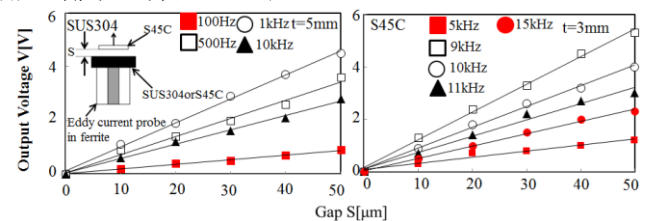


Fig.8 Relation between gap and output voltage

#### 7. 結言

フェライト挿入型超小型渦流探触子の基礎特性ならびに、探触子を取り付けた鋼板裏面と相手鋼板間の膜厚(隙間)測定の可能性を検討した。その結果、同探触子によるステンレスならびにS45C鋼板裏面の膜厚測定の可能性を明らかにすることができた。

#### 参考文献

- 1) 雨宮好文, センサ入門, (1991), p.90, オーム社