

# PHASCOPE PMP10 DUPLEX を用いた二重皮膜 ( Duplex Coating ) の測定

## J L Saénz-Diez Muro (Fischer Instruments, Spain)

### 要 約

本報告では duplex coating 即ち鉄素地の上に、中間層として非鉄金属層、その上を絶縁性の非鉄系の被覆層が覆っている皮膜の膜厚測定について述べる。この新システムは可搬型でかつ簡単な操作で双方の皮膜の厚さを同時に、正確かつ非破壊的に測定することが可能である。

### PHASCOPE PMP10 の原理と操作方法

本機の目的とするところは、金属皮膜の測定と同時に検出端子を交換式にすることで、より広範囲な測定を可能にするような、可搬式かつ実用的な装置を提供することである。これは位相感度の高い渦電流法の特徴を利用する方法である。

本方法の利点は、他の方法と比べ実質的に試料の曲率、表面粗さ及び素地金属の性質による影響が少ない、という点である。本方法は感度が高く、離間補償や周波数選択が可能なので測定対象の厚さ範囲を広くとることができる。

典型的な応用分野を図 1 ~ 図 4 に示す。図 1 は Zn-Fe、Ni-Fe、Cu-Fe その他の金属及び / または磁性物質素地上の金属被覆の測定を示している。本装置は銅-真鍮及び銅-青銅にも適用が可能 ( Phascope ESD20-Zn ) である。

図 2 はプリント基板に使われている銅-エポキシのような非導電性物質上の金属皮膜の測定 ( ESD20-Cu ) である。図 3 はプリント基板上にある銅の厚さの穴あき測定 ( ESL080-Cu、ESL080HF )、図 4 は極小の測定範囲を測定するために設計した特別の探触子である ( ESD2.4 Zn/Fe 1.25 MHz )。ラッカー-亜鉛-鉄やラッカー-銅-エポキシのように導電性皮膜が更にラッカーなどの非導電性皮膜に覆われていたり、対象皮膜に直接触れることができなかったり、非接触測定が要求されたりする場合は離間補償測定が必要となる。

図 5 に可変周波数を使用した場合の効果を示す。適切な周波数の探触子ひとつを選ぶだけで対象物の全膜厚範囲がカバーできる。例えば ESD20-Cu 60kHz and 240kHz では 1-270  $\mu\text{m}$  である。

探触子 ESG20 付き Phascope PMP10 Duplex では Duplex 皮膜の測定ができる。図 6 は位相感受性探触子と電磁誘導の組合せである。図 7 に Duplex 皮膜測定法の原理を示す。

UNE EN ISO 2178 にもとづく電磁誘導法は、鋼板上のラッカー塗装の全膜厚測定法として工業部門で数十年にわたり使用されている。これは簡単、迅速かつ安価なため、リン酸亜鉛処理した鋼板に塗装されているラッカー塗膜の測定には最適である。

亜鉛めっき鋼板は耐食性向上のため永年にわたり使用されてきているが、亜鉛めっき皮膜は非磁性であるため、電磁誘導法では（ラッカー膜と）同じように測定される。

しかし実際面では問題がある。鋼板上の亜鉛めっき皮膜厚はサプライヤーによって差があり、ロット毎に差がある場合さえある。生産工程における鋼板の物理的変形量や表面不均一を除くための研磨などにより変化するのかも知れない。

全膜厚の測定値から一定の値（例えば  $7 \mu\text{m}$ ）を差し引いて、亜鉛めっき厚のバラツキを補正するやり方を見ることがあるが、これはラッカー塗膜の膜厚値に誤差をもたらすもとなる。このようなところで PMP10D を使用するのは一つの適用例であろう。

そこで亜鉛めっき膜厚に関係なく、ラッカー膜厚を正しく測定するにはどうすればよいかという問題が生じる。電磁誘導法では非鉄皮膜全体を測定することしか出来ない。それゆえ次の方法としては、ラッカー皮膜だけを亜鉛皮膜厚と独立して測定するか、ラッカー皮膜と独立に亜鉛皮膜厚を測定するかのどちらかである。PMP10D では UNE EN ISO21968 にもとづく位相感受性過電流法により後者を選択している。前者の方法は亜鉛めっき皮膜厚が薄いものには適用できない。

### インピーダンス平面法

この測定法はピックアップコイルのインピーダンス変化に基づくものである。図 8 はインピーダンスの変化で、膜厚の代わりとなるものである。図 9 は銅に対する導電率の変化、銅の皮膜厚と周波数の変化の影響を示している。一方、図 10 は亜鉛に対する導電率、Zn/Fe 皮膜厚の変化および周波数の影響を示している。

性能は実験で得られたインピーダンス平面上の曲線より得た。それらは

- ・探触子のピックアップコイルのオーム抵抗値とインピーダンス、すなわち実軸と虚軸は X と Y のカウント率に対応する（選択可）
- ・導電率変数（Ti, Zn, Al....Cu）， $f = 60\text{kHz}$ .
- ・亜鉛皮膜厚変数(Zn-Fe)， $f=60\text{kHz}$ .
- ・導電率変数(Ti, Zn, Al ....Cu),  $f=1,250\text{ kHz}$ .
- ・亜鉛皮膜変数(Zn-Fe),  $f=1,250\text{kHz}$ .

導電率、皮膜厚さ、基質物質および周波数はそれぞれの曲線に影響を及ぼし、相角度とインピーダンスの増幅率に影響する。

### 電磁誘導法

本測定法の基本を図 11 に示す。励起電流  $I$  は低周波の磁場を発生する。その強度は測定器の探

触子先端と基質物質表面までの距離により異なる。磁場は測定コイルで測定する。測定された信号は測定機器内で探触子の特性より得た出力関数により皮膜厚に変換される。この方法は測距法として知られている。出力は対象が非鉄物質でなければ皮膜物質とは無関係に得られる。

### 位相感受性渦電流法を利用した二重皮膜測定探触子の設計

図 12 に二重皮膜測定用探触子のデザインを示す。位相感受性渦電流測定法の原理は図 13 に示す。励起電流  $I$  は  $1 \text{ MHz}$  以上の周波数の磁場を発生し、電気的には導電体である非鉄の皮膜中および導電性のものであれば基質中にも渦電流を発生する。これらの渦電流は、その大きさは皮膜物質の導電性に依存するが、元の場に対抗した磁場を発生し、減衰時に 2 次コイルにより測定される。このコイルからの信号  $U$  は探触子特性に従った出力信号となり皮膜厚に変換されて読みとられる。この方法により皮膜物質の質量も測定できる。皮膜厚さに対応する読みが既知の物質の膜厚換算式により皮膜厚に換算される。

位相感受性渦電流法の特色を図 14 に示す。本法の特長は浮いたままで金属皮膜厚の測定の可能性があるということである。つまり探触子先端と皮膜表面との間に非導電性物質（即ち空気）があっても測定ができる。これは探触子の測定信号  $U$  の位相位置を、距離に依存する信号強度の替わりに用いて皮膜厚を計算することにより可能となる。この方法を用いることで、試料の表面粗さと形状の影響を減らすことが出来る。

図 15 の亜鉛めっき鋼のインピーダンス平面は Zn-Fe の離間した場合の特性を示している。亜鉛皮膜厚が増加すると信号の角度と增幅率が変化するが、離間させた場合は増幅率のみが生じている。

### 測定に影響を与える要因

測定に最も強い影響を及ぼす要因は鋼板の透磁性である。これは相感受性測定法のみならず、電磁誘導法の結果にも影響を及ぼす。異なる種類の鋼板を用いた比較試験の経験によると、電磁誘導法では平均的な透磁性の鋼板及び両極端の差のある鋼板で較正した後の測定で約  $\pm 0.5\text{--}1 \mu\text{m}$  の誤差を生ずる。相感受性測定法ではこの誤差はもっと大きく最大  $\pm 1.5 \mu\text{m}$  になる。この値は膜厚が  $20 \mu\text{m}$  位の時の値である。この誤差の大きさであっても PMP10D を使えば、従来の電磁誘導法によりトータルの膜厚を測定後、単純に一定値を差し引いて塗膜厚を求めるより正確である。

透磁性の影響の方が支配的であるため、導電性は事実上測定値に影響を及ぼすことはない。また測定値はメタリックラッカー中のアルミニウムスパングルの影響も受けない。探触子 ESG20 を使えば最小厚さが少なくとも  $0.5 \text{ mm}$  あれば鋼板の厚さの変動が測定値に著しい影響を与えることはない。

湾曲したものに対するガイドラインとしては、平鋼板で較正したのち半径  $11\text{mm}$  の曲面を測定

した時のラッカー塗膜厚の誤差は約 10%、亜鉛めっき膜厚の誤差は約 5%である。湾曲が大きくなるに従い誤差も大きくなる。

図 16 に粗さの影響を示す。電磁誘導法では粗さと測定器の距離は直接的に影響がある。一方、相感受性法では粗さの影響は図 17 に示すように本質的に小さい。表 1 に Phascope 10 duplex による二重被覆膜厚測定法の可能性と制約を示す。

### 謝辞

著者は共同研究者の Hans Peter Volmar of Helmut-Fisher GmbH & Co KG(Sindelfingen, Germany) に本報告の鉄系基質上の亜鉛めっき皮膜厚測定に関する技術の部分のご協力を頂いたことに感謝します。

Table 1: Phascope PM10 duplex による二重皮膜測定の可能性と限界

非鉄系皮膜のタイプ	測定可否	コメント
電気亜鉛	Yes	他の非鉄系物質との比較用に
溶融亜鉛めっき (明瞭な拡散帯なし)	Yes	亜鉛皮膜の導電性はガルバニールと同程度
ガルファン (断続的な溶融工程のあるZn-Al 皮膜)	Yes	亜鉛皮膜の導電性はガルバニールと同程度
溶融アルミニウム	Yes	皮膜の導電性はガルバニール皮膜より高い
溶融亜鉛めっき (明瞭な拡散領域あり)	No	Zn + ZnFe の結合 亜鉛及び亜鉛類似の表示が出る
ガルバニール (光沢の異なる溶融亜鉛めっき)	No	拡散ゾーンがあるため偽表示が出る
ZnFe	(No)	導電性小 鉄濃度変動の影響は未確認
ZnNi	No	導電性小 ニッケル濃度変動の影響は未確認
すずめっき (ブリキ)	No	はっきりした Sn-Fe 拡散皮膜



Figure 1 金属及び / または磁性基材上の  
金属皮膜の測定



Figure 2 Cu-エポキシのような非電導性物質上の  
金属皮膜の測定



Figure 3 プリント基板上の銅の厚さの  
穴空き試験



Figure 4 微小範囲測定用の探触子

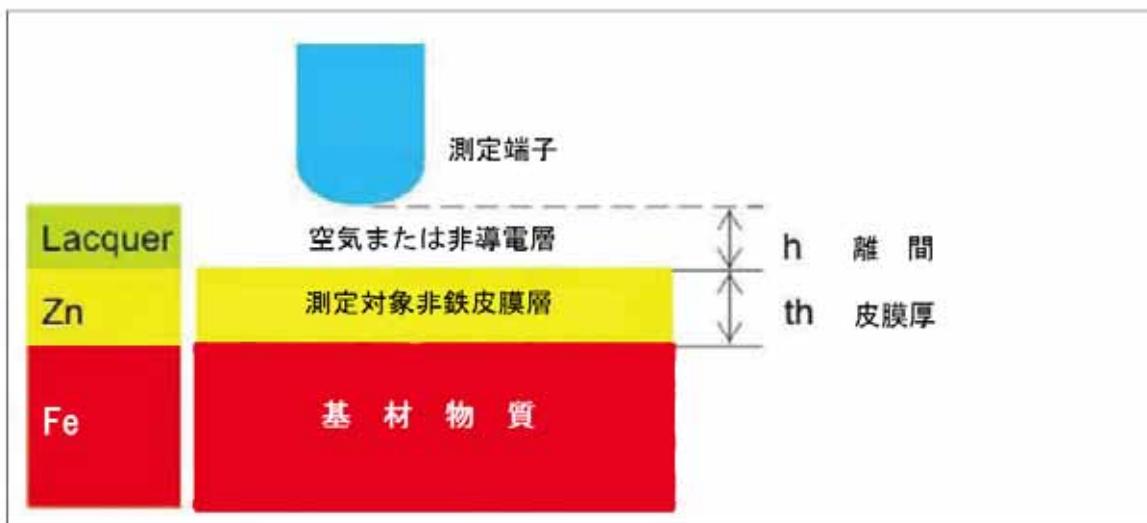


Figure 5 可変周波数使用の効果

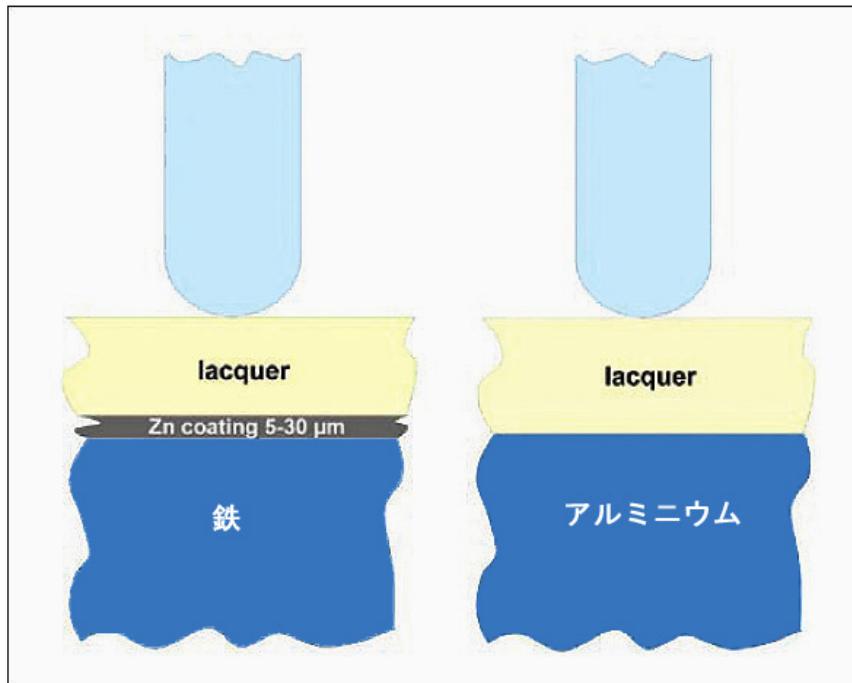


Figure 6 相感受性探触子と磁気誘導法との組合せ

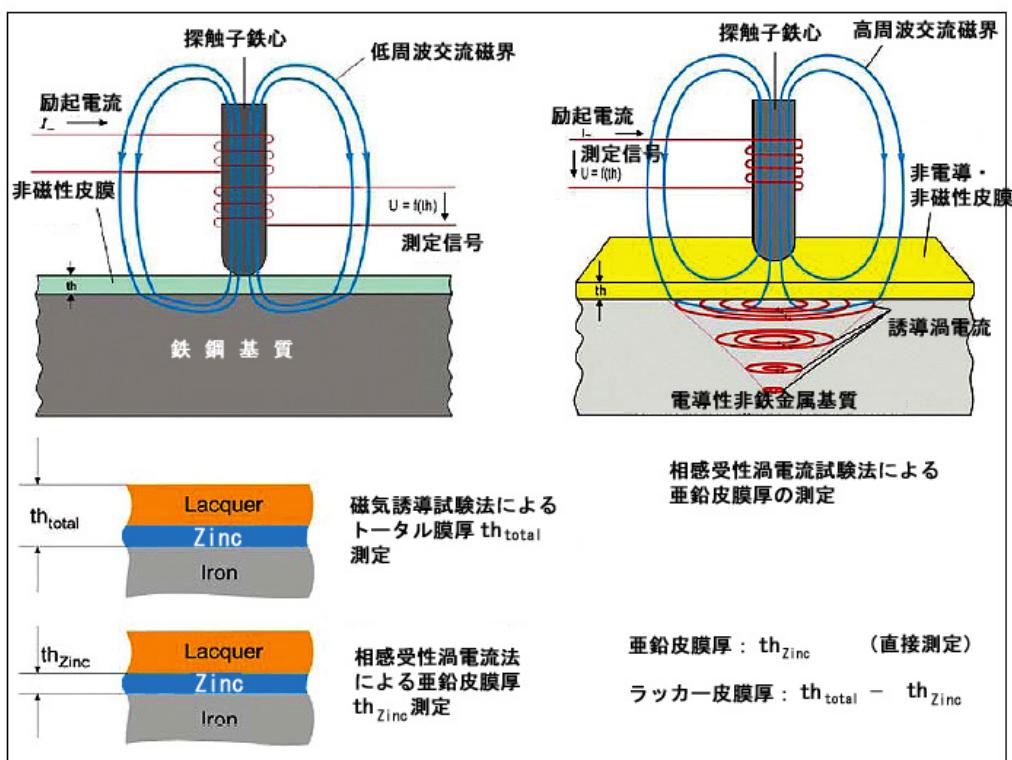


Figure 7 Duplex 膜厚測定法の原理

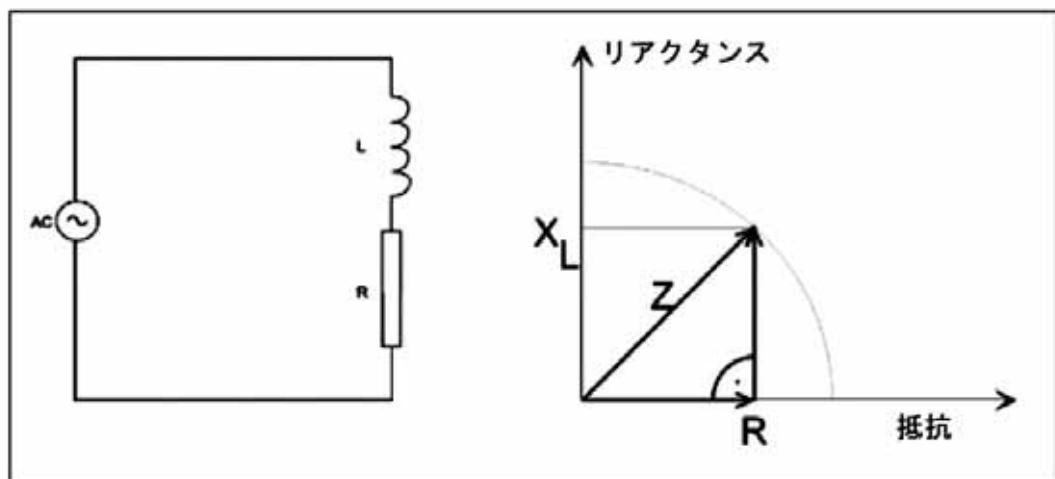


Figure 8 インピーダンス変化 実験回路とスミス

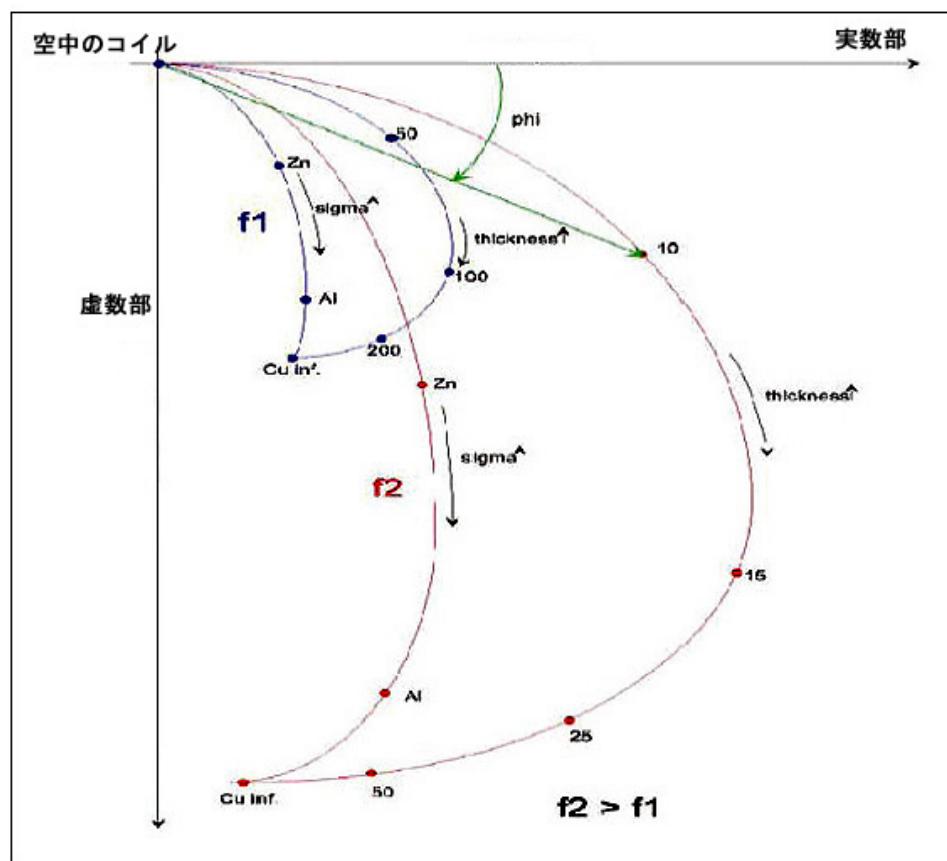


Figure 9 導電率の変化、銅の膜厚変化と周波数の影響

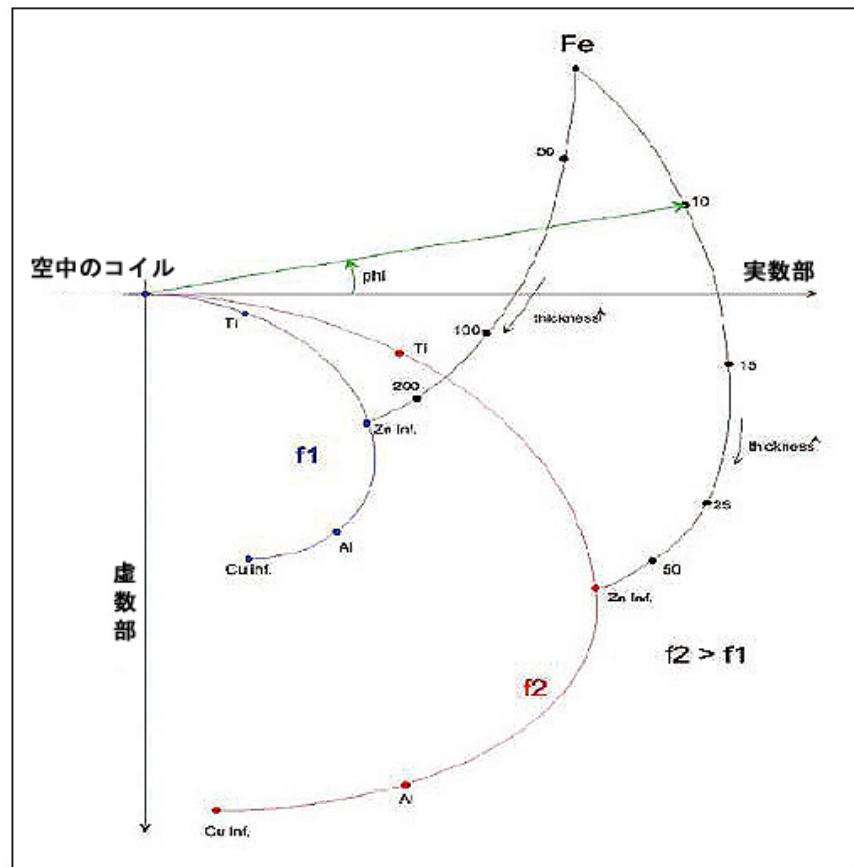


Figure 10 導電率の変化、Zn-Fe 皮膜厚と周波数の影響

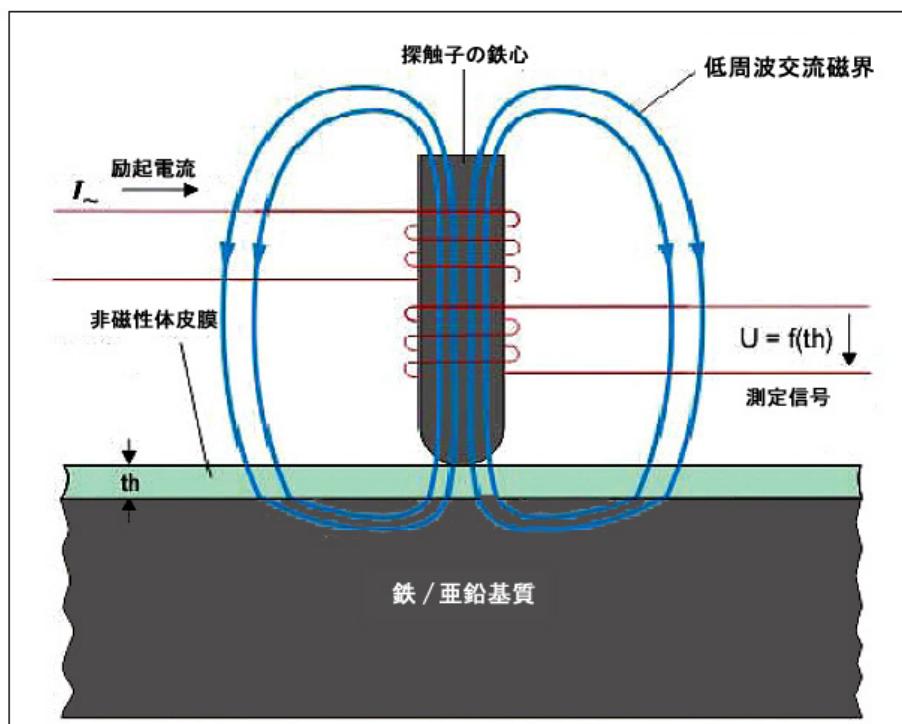


Figure 11 磁気誘導法の基本原理

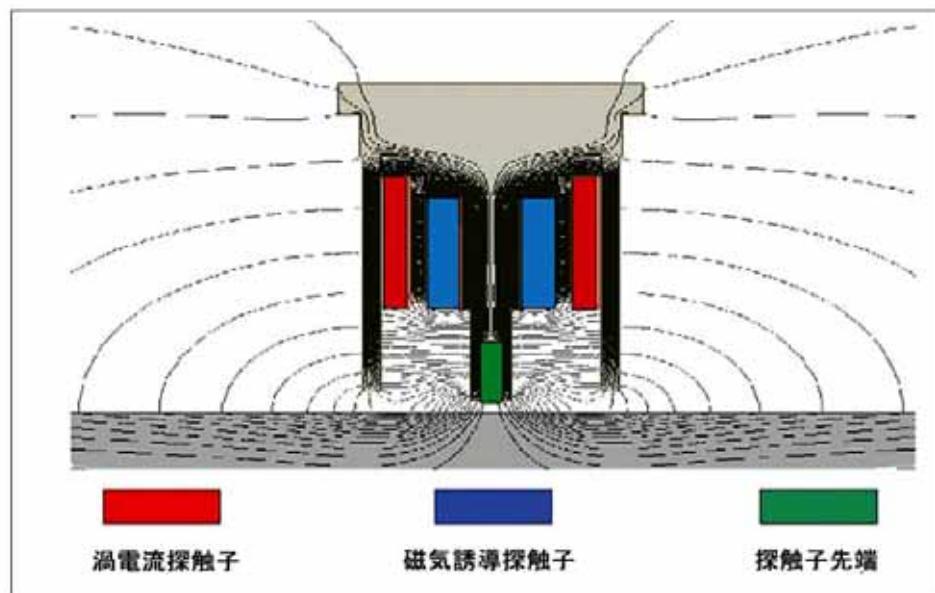


Figure 12 Duplex 測定法の図面

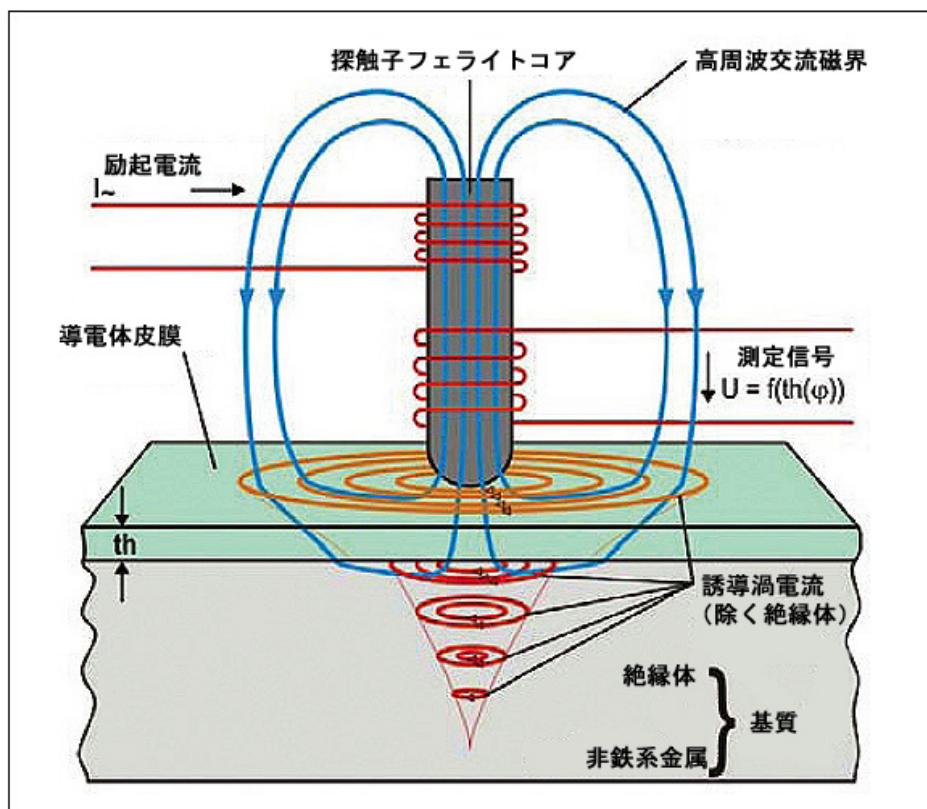


Figure 13 相感受性渦電流測定法の基本原理

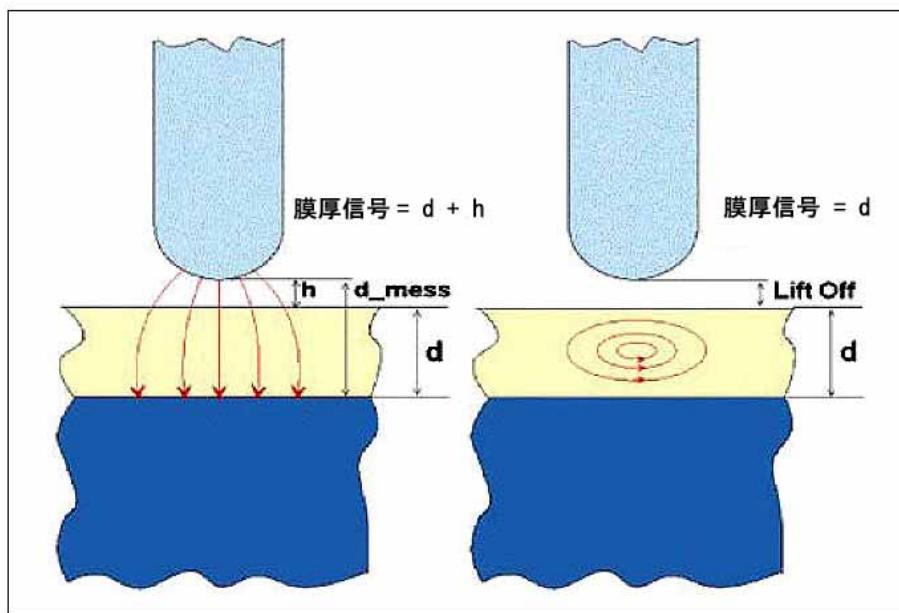


Figure 14 相感受性渦電流法の特色

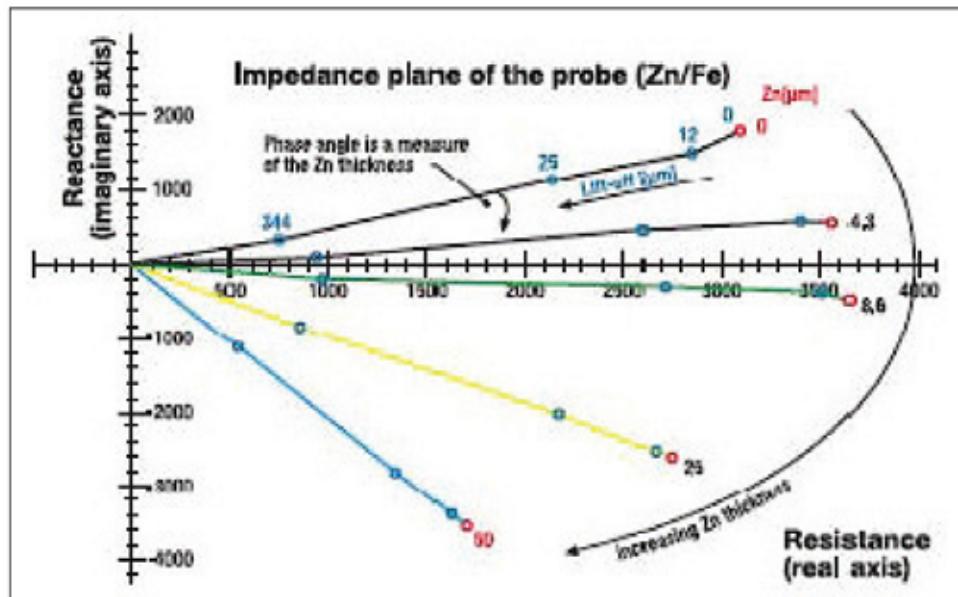


Figure 15 Impedance plane for a zinc coating on steel, demonstrating lift-off characteristic for zinc-iron.

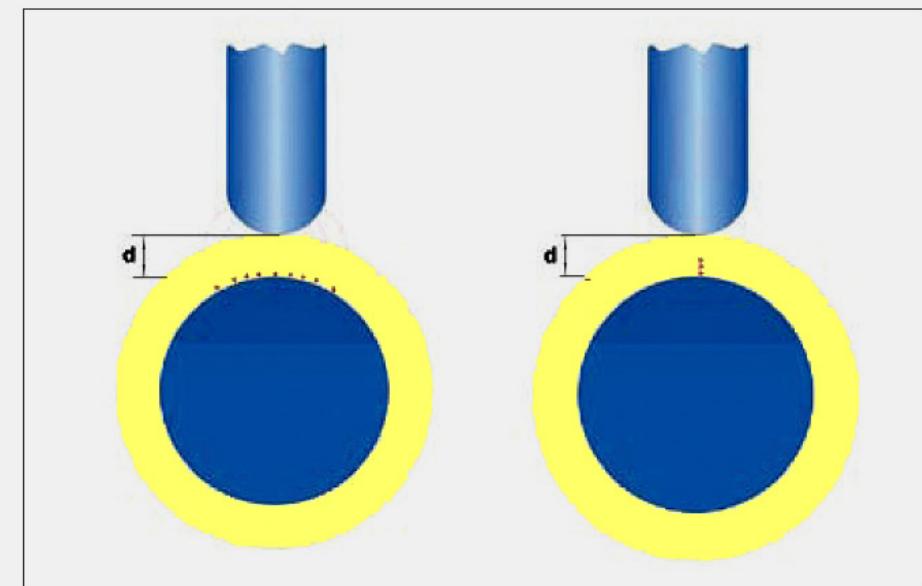


Figure 16 粗さの影響

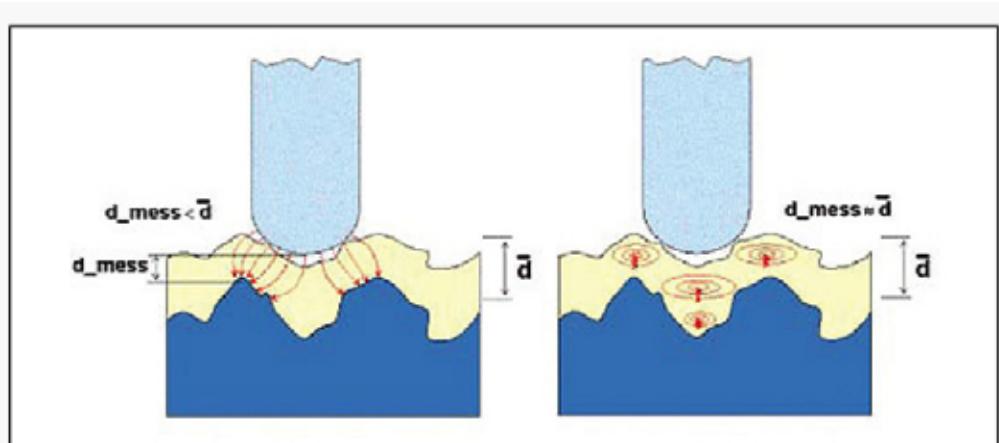


Figure 17 相感受性法では粗さの影響が軽減される