

1. アドミッタンスゲージとは

非破壊・接触式の静電容量式膜厚計「アドミッタンスゲージ」は、試験片が金属などの導電体に塗布された、0.1mm以下の薄板にアルマイト被膜、塗装、各種高分子によるコーティングの膜厚が測定できるのは、米国ストランド社の「ストランドゲージ」が定評であり、アルマイト、アルミ缶業界に広く普及しています。しかし、「ストランドゲージ」の表示はアナログ式のメーターで、膜厚目盛は対数目盛のために目盛はリニアではなく、メーターの針の読み取りに個人誤差が生じるという課題がありました。またデータを読み取り、記録表への転記で誤記入などが発生し、データの信頼性が乏しくなることが指摘されています。

そこで弊社に、読み取りに個人差のないデジタル表示への製作要望があり、「アドミッタンスゲージ」を開発しました。デジタル表示なのでデータは読み取り誤差がなく、パソコンのExcelに自動入力され正確に処理ができます。1991年1月の販売開始以来、改良・改善を重ね完成度の高い膜厚計との定評を頂いております。

弊社膜厚計「アドミッタンスゲージ」は、非破壊・接触式の「静電容量式膜厚計」で、金属などの導電体に塗布された絶縁物の厚みを測定します。試験片の材質や板厚の影響を受けず、しかも表面の粗さが大きくても、金属の厚みが0.1mm以下の薄板や波打ちした板でも、電極として導電性ゴム電極（φ9.4mm）を使用することで、ゴムの持つ柔軟性との相乗効果で平均値が得られ、誤差を最小減にした測定装置です。

測定周波数は10KHz±0.5%、測定電圧1.0Vに制御した4端子法で、ケーブル抵抗や電圧降下の影響を低減する測定方式のため、直線性及び再現性が格段と向上しました。測定にあたっては、「導電性ゴム電極」を塗膜などの絶縁物と「試験片の素地」を対極としてワニ口クリップで通電させて測定します。本方式による膜厚計は世界でストランド社と弊社の2社のみです。

また、新たにプラスチック製外筒のφ9.4mmのハンドプローブと、金属製外筒のφ2.0mm、φ3.5mm、φ9.4mmを開発しました。測定対象は、薄平板膜厚のみでなく、試験片の金属部と通電できれば、測定板厚に関係なく、湾曲面等であっても測定が可能です。

プラスチック製外筒は、渦電流式プローブとよく似た構造で、導電性ゴム電極が内蔵スプリングで数ミリ飛出しております。外筒の先端に3か所の突起物と導電性ゴム電極とが平行になるように、プローブを試験片に押し付けて測定します。

金属製外筒は、導電性ゴム電極とスプリングが 15mm 近く露出しており、導電性ゴム電極を直接試験片と接触させて測定します。そのため、狭く複雑な形状でも測定できますが、試験片とゴム電極の接触面が、不安定になりやすくプラスチック製外筒と比べて、測定値の変動幅が大きくなります。試験片形状に対応可能であれば、安定性を確保するには、オプションの簡易治具をご使用ください。また、膜厚計用試験スタンドにハンドプローブと専用治具を用いることで、さらに再現性良く測定できます。

2. 測定原理

静電容量式膜厚計「アドミッタンスゲージ」の静電容量の原理は、平行板コンデンサーの測定となり、導電性ゴム電極と素地金属間に誘電体の塗膜などがつまっているとき、距離 $d = 1 \mu\text{m}$ とする。

$$\text{pF} = \text{Er} \times \text{E}_0 \times \text{S} / d \quad \dots \dots \dots (1)$$

pF : 求める静電容量

Er : 比誘電率 4.525 *1

*1 アドミッタンスゲージ初期設定値

E₀ : 真空中の誘電率 8.854184

塗膜の平均的な誘電率であって

S : 電極面積 [mm²]

標準板を作成して校正してください。

d : 距離 1 [μm]

容量より膜厚を求める式 $\mu\text{m} = \text{Er} \times \text{E}_0 \times \text{S} / \text{pF} \quad \dots \dots \dots (2)$

膜厚から電圧を求める式 $\text{V} = \text{Er} \times \text{E}_0 \times \text{S} / (\mu\text{m} \times \text{K}_2) \quad \dots \dots \dots (3)$

$$\text{K}_2 = \phi 2.0, \phi 3.5\text{mm} : 100, \phi 9.4\text{mm} : 1,000$$

上記式より、電極径 $\phi 2.0\text{mm}$ 、 $\phi 3.5\text{mm}$ 、 $\phi 9.4\text{mm}$ の測定範囲と容量対膜厚の関係を図 1、電圧対膜厚の関係を図 2 に示します。

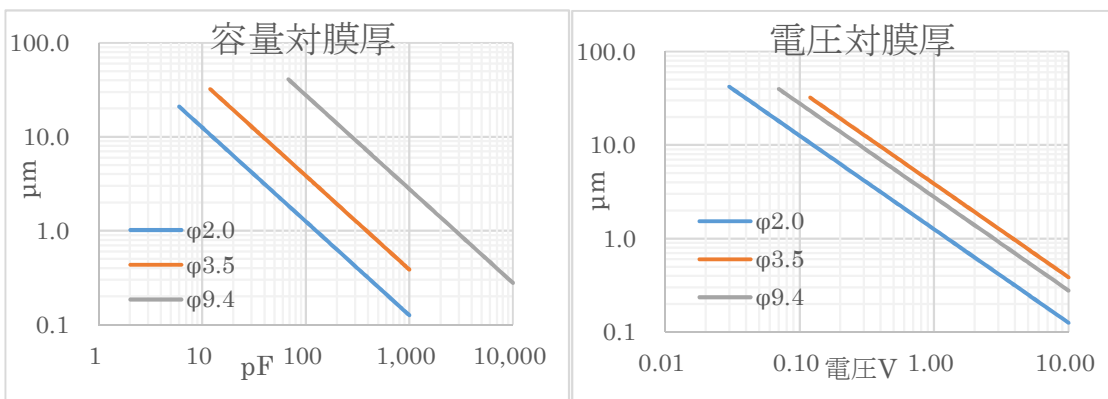


図 1

図 2

標準プローブ $\phi 9.4\text{mm}$ の誘電率 E_r を 2.0、3.0、4.525、6.0、8.0、10 と変更したときの容量対膜厚の関係を図 3、電圧対膜厚の関係を図 4 に示します。図 3、図 4 より誘電率 E_r を変更すると容量対膜厚特性と電圧対膜厚の関係は平行関係です。

標準プローブ $\phi 9.4\text{mm}$ 、 E_r 4.525 の $10\ \mu\text{m}$ 以下の詳細な膜厚対電圧の関係を表 1 に示します。

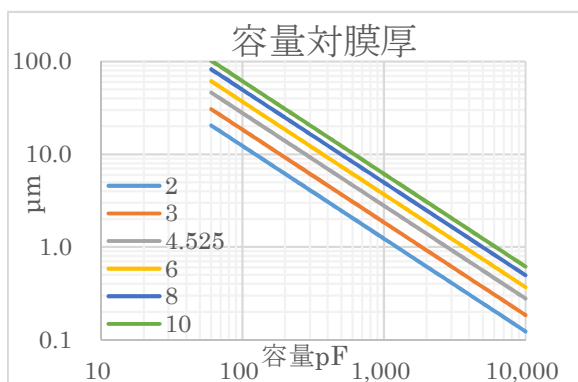


図 3 $\phi 9.4\text{mm}$ プローブ

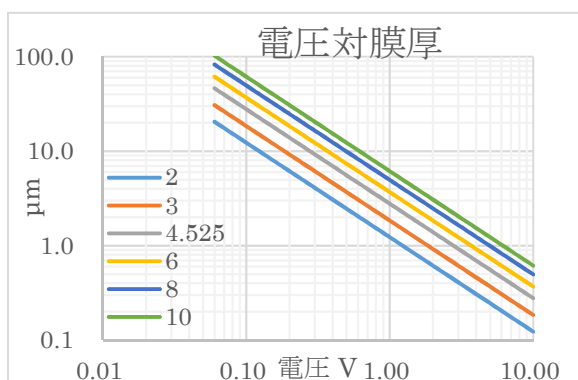


図 4 $\phi 9.4\text{mm}$ プローブ

$\phi 9.4\text{mm}$ $E_r = 4.525$

膜厚 μm	電圧 V
10.00	0.2780
9.00	0.3089
8.00	0.3476
7.00	0.3972
6.00	0.4634
5.00	0.5561
4.00	0.6951
3.00	0.9268
2.00	1.3902
1.00	2.7804
0.90	3.0894
0.80	3.4755
0.70	3.9721
0.60	4.6341
0.50	5.5609
0.40	6.9511
0.30	9.2681
0.20	13.9022
0.10	27.8044

最大測定電圧: 10 V
表 1

図 1~4 と表 1 より膜厚が 1 桁低くなると電圧は反比例して 1 桁高くなります。また、薄膜ほど高感度になります。標準プローブを使用した疑似コンデンサーの試験でも、最終桁の変動はありますが、ほぼ同様なデータを確認できます。薄膜になるほど誤差は少なく $0.30\ \mu\text{m}$ では $\pm 0.01\ \mu\text{m}$ 、最高膜厚 $40\ \mu\text{m}$ では $\pm 0.07\ \mu\text{m}$ (最大 $\pm 0.5\%$ 以内) の直線性があります。再現性としては、 $\pm 0.02\ \mu\text{m}$ の性能を誇る膜厚計です。

3. 塗膜の測定

試験片材質がアルミニウムや銅の薄板 0.1mm 以下に、塗付 $10\ \mu\text{m}$ 以下で表面が波打

ちした、乾燥塗膜の膜厚を測定するには、非破壊、接触式の「静電容量式膜厚計」が最適といわれています。他の非破壊式においては、

「光学式膜厚計」は透明試験片には対応できるが着色試験片には対応できません。

「レーザー膜厚計」はピンポイント測定となり、測定数を増やしその平均値をとる測定が必要であり、また試験片の凹凸による乱反射があると測定できません。

「蛍光 X 線分析器」は測定面積が大きく波打つ試験片にも強いが、金属を対象にしており塗膜は対象外のようなようです。

破壊式では試験片を切断して断面を「走査型電子顕微鏡(SEM)」で撮影する方法があります。試験片カットに、物理的損傷等を全く伴うことなく鏡面仕上げが可能な装置、クロスセクション・ポリシャ(CP加工)を用いれば、SEM 測定の可能性はあるようですが、いずれも波打ちした薄板測定には課題があるようです。

弊社接触式「静電容量式膜厚計アドミッタンスゲージ」と類似した「誘電率測定」には JIS・ASTM 規格がありますが、いずれも膜厚を測定するものではありません。JIS 規格などの誘電率測定方法は、マイクロメーターで、試験片の厚みを測定しておきその容量測定から逆算して誘電率を求めます。塗膜の誘電率測定は公的機関などに測定を依頼しますが、試料として塗料 100%の均一なシートの製作は難しく、また塗膜シートを金属電極に挟み込んで測定するために、塗膜シートの破損やクラック発性により測定が困難で、塗膜シートの誘電率測定は非現実的です。

アドミッタンスゲージは、弊社独自の静電容量式膜厚測定方式であるため、JIS 規格はありません。アドミッタンスゲージは、静電容量式膜厚計の原理より、膜厚を測定する場合、「塗料の種類」ごとに標準板を作成する必要があります。

4. 塗膜の標準板作成

静電容量式膜厚計「アドミッタンスゲージ」には、「塗料の種類」ごとに誘電率設定をしないと、正確な測定ができないため、標準板を付属しておりません。参考までに標準板の作成方法を記載します。

4-1. 質量法(μm)による標準板作成 (JIS 抜粋)

JISK5600-1-7:2014 塗料一般試験方法の 5 乾燥膜厚の測定 5.3 質量法 5.3.1 原理より質量法は、未塗装試験片と塗装試験片との質量の差を、密度及び塗装された面積で除すことにより、乾燥膜厚 t_d (μm) を求める。

$$t_d = m - m_0 / A \times \rho_0 \dots \dots \dots (4)$$

- ここに、
 m_0 : 未塗装試料の質量 (g)
 m : 塗装試料の質量 (g)
 A : 塗装された表面領域の面積 (m²)
 ρ_0 : 塗膜の乾燥密度 (g/mL)

注記 1 塗料の乾燥塗膜密度は、ISO 3233 に従って決定する。

ISO 3233 は、アルキメデスの原理により ρ_0 を求めるようになっております。正確に求めるには、例えば、天秤メーカーの(株)エーアンドデー社の比重測定キット AD-1653 と(株)島津製作所の比重測定キット SMK-401/301 など測定できるようです。キットには測定に必要な機材が揃っており、マニュアル通りに操作すると、 ρ_0 を自動演算します。詳細は、インターネットで天秤の取扱説明書をダウンロードするか、メーカーにお問い合わせください。

4-2. 重量法(g/m²)による標準板作成

A) 乾燥塗膜 g/m² の作成 (アドミッタンスゲージの基準)

素地面積 1m×1m の乾燥塗膜の塗付量を求める

$$g/m^2 = (m - m_0) \times A \dots \dots \dots (5) \text{ 式}$$

- m_0 : 未塗装素地の質量 (g)
 m : 塗装素地の質量 (g)
 A : 素地の面積 (m²) : 1m×1m = 1

B) 乾燥塗膜 g/100cm² の作成

素地面積 10cm×10cm の乾燥塗膜の塗付量を求める

$$g/100cm^2 = (m - m_0) \times A \dots \dots \dots (6) \text{ 式}$$

- m_0 : 未塗装素地の質量 (g)
 m : 塗装素地の質量 (g)
 A : 素地の面積 (cm²) : 10cm×10cm = 100cm²

C) 乾燥塗膜 mg/dm² の作成

素地面積 10cm×10cm の乾燥塗膜の塗付量を求める

$$mg/dm^2 = (m - m_0) \times A \dots \dots \dots (7) \text{ 式}$$

- m_0 : 未塗装素地の質量 (mg)
 m : 塗装素地の質量 (mg)
 A : 素地の面積 (dm²) : 10cm×10cm = 100cm²

アドミッタンスゲージでは、

- A) の g/m² を基準として製作しております。
 B) で標準板を作成した場合、1/0.01 = 100 となり、測定値を 100 倍します。

C) で標準板を作成した場合、 $\text{mg} / \text{dm}^2 = 0.001 / 0.01 = 0.1$ となり、測定値を 10 倍します。

標準板は、塗料購入先メーカーに作成を依頼されるのが合理的だと思います。

5. アルマイト被膜測定

アルマイトの測定は、測定が簡単、小型軽量、低価格な、渦電流式膜厚計による非破壊・接触式測定が普及しています。

渦電流方式は、フェライトコアに誘導コイルを巻き、50KHz～2MHz の高周波を流し、プローブを試験片に近づけるとアルミ板に高周波渦電流が発生します。

このとき、渦電流の大きさは試験片との距離によって変化するので、誘導コイルのインピーダンスを測定し、アルマイト被膜厚に換算する測定法です。誘導コイル磁界は試験片に対して直交方向に渦電流を発生させます。

測定にあたっては、試験片の材質の違い、厚さ、突起物の付近、湾曲部、あるいは端部に近づくほど渦電流が阻害されることによる測定誤差が大きくなります。さらに、外形 $\phi 0.3\text{mm}$ 以下の接触ピン電極が、試験片の表面荒さや手振れにより、同一場所を測定したつもりでも、測定ポイントが変化するので再現性が悪くなり、薄膜ほど測定誤差が大きくなる傾向があります。

静電容量式膜厚計「アドミッタンスゲージ」は、アルマイト表面が多孔質被膜(ポーラス)になっているため内部構造に空気が混入し、空気の比誘電率 $\text{Er}=1.0006$ とアルマイトの複合誘電体であり、誘電率が一定せず、アルマイトの測定には実用的ではないと考えていました。

しかし、アルミ合金 ADC12 のリン酸アルマイト被膜 $4\sim 8\mu\text{m}$ 付近(測定箇所により管理目標値が異なる)の膜厚を、電極面積 $\phi 9.4\text{mm}$ のプラスチック製ハンドプローブを用い、渦電流式膜厚計とアドミッタンスゲージとの比較試験を行った結果、渦電流式膜厚計で測定回数 20 回の測定に対して、アドミッタンスゲージの測定においては 2～3 回の測定と同じ結果が得られました。本結果は点測定による渦電流方式に対してアドミッタンスゲージは面での測定であるため、その優位性が立証されました。ただし、アドミッタンスゲージによる測定は $2\mu\text{m}$ 以上の被膜に限定されます。

アドミッタンスゲージの測定周波数は $10\text{KHz}\pm 0.5\%$ 、測定電圧 1.0V に制御した 4 端子法で、ケーブル抵抗や電圧降下の影響を低減する測定方式のため、直線性及び再現性が格段と向上しています。また電極間の電気力線の膨らみに起因するエッジ効果の影

響は、ガード電極なしでも、最大膜厚測定範囲 $40\mu\text{m}$ 以内の距離では無視できるので、試験片端部より 5mm 以内でも正確な測定ができます。導電性ゴムは柔軟性があり、試験片の波打ちを吸収する効果と、電極面積が大きく測定の平均値を表示するため、誤差要因の影響を最小限に低減した、高精度と高い再現性の良い測定ができます。そのため渦電流式膜厚計より、作業効率が格段に良くなる結果となりました。

6. アルマイト被膜の標準板作成

静電容量式膜厚計「アドミッタンスゲージ」は、アルマイト被膜用の標準板を付属しておりません。

アルマイト被膜の誘電率設定は困難を要するために、アルマイト被膜を渦電流式膜厚計で測定した、平均膜厚 μm を校正値として入力します。

渦電流式膜厚計によるアルマイト厚さを測定する方法は、試験片の材質と板厚により測定値が変化しますので、試験片と同じ材質で寸法 $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ 厚み $1.5\sim 2.0\text{mm}$ の中心部に約 $\phi 12\text{mm}$ の円形を描きます。円形内を渦電流式膜厚計で 20 か所以上測定した、平均値を既知標準板の数値とします。測定に当たっては、円形の外周線は線の厚みによる誤差発生要因となりますので必ず $\phi 12\text{mm}$ 内で測定するように注意してください。

正確な管理用標準板および校正用標準板をご希望の場合は、渦電流式厚さ試験法、JIS H 8680-2:1998 付属書に基づいた、試験片製作メーカーと最寄りの公的試験機関(走査型電子顕微鏡 SEM と渦電流式膜厚計を保有しているところ)にお問い合わせください。

<正確な標準版作成に当たっては以下の a~e にご留意ください>

- a) 素地材質 : A1050P。(または、試験片と同一材質)
- b) 寸法および形状 : $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ 、厚さ $1.5\sim 2.0\text{mm}$ とし、表面粗さは 0.1Ra 以下。
- c) 試験片製作メーカーの一例紹介 : (株) スタンダードテストピース
素地材質、表面処理条件、アルマイトの種類、被膜厚などの打ち合わせが必要です。
- d) 管理用アルマイト標準板 (走査型電子顕微鏡 SEM 断面測定)。
- e) 校正用アルマイト標準板 (d の標準板を渦電流式膜厚計で校正した測定)。
などのトレーサビリティの標準板ができます。

