

第1章 金属素地上の塗装の膜厚管理

黒木 裕志郎*

1. 概要

膜厚計は大きく分けて、破壊式と非破壊式に分けられ、さらに乾燥・硬化前に測定するものと乾燥・硬化後に測定するものに大別される。ここでは、乾燥後に現場塗装において汎用的に用いられる非破壊式を中心を見てみたい。

大別すると3種類で、磁気誘導式(電磁誘導や電磁式もあるが、磁気誘導が最新式で概して精度も高い)、渦電流式、これに超音波式が加わる。超音波式は主として、金属以外の素地(プラスチック、コンクリート、木材など)の上の塗膜を対象として適用される。この第1章では、金属素地上の塗膜・皮膜を測定するための磁気誘導式と渦電流式を考えてみたい。

(1) 磁気誘導膜厚計

5.5.6. 測定法 7C に規定されており、鉄や鋼といった磁性金属素地上の非磁性塗膜の厚さを測定する非破壊試験である。原理としては、強磁性の素地に電磁石が近接する時に磁場中で起こる電流の変化を測定して膜厚に換算する。1999年版JISでは、方法No.6Aで「電磁誘導」という言葉が使われていて、その中で、「試験場所で作動させるたびに、また少なくとも1時間に1回適切に作動していることを確認するために装置の校正を行う」という細かな規定がされていた。

* くろき ゆうしろう コーテック㈱
カスタマーサポート部

電磁誘導膜厚計と磁気誘導膜厚計では、JISの規定内容やメーカーの取扱説明書の測定手順はかなり異なるので、事前の確認をしたい。

- 1) JIS K5400-1-7 1999年版における「電磁誘導原理の膜厚計」の測定手順の概要
 - ① 試験場所において装置を作動させるたびにまた使用中頻繁に適切に作動していることを確認するために装置の校正を行う。
 - ② 既知の一定厚さの校正標準は、フォイルあるいはシムの形で、または公的に認定された標準に基づく指定値の塗装標準板として入手できる。校正用フォイルはキズが付きやすくしばしば交換しなければならない。
 - ③ 校正用塗装標準板の素材金属の表面および磁気的性質は(測定対象の)試験片(被塗物)と類似したものでなければならない。
- 2) JIS K5600-1-7 2014年版における「磁気誘導式膜厚計」の測定手順の概要
細かな規定は省略され、事前に行うこととしては、メーカーの取扱説明書に従って確認(Verification: 参照標準を使用し、使用者が行う測定器具精度の点検)を行い、測定手順も同様にメーカーの取扱説明書に従うようにというあっさりした内容になった。代表的な磁気誘導式膜厚計のメーカーの取扱説明書によれば以下のように測定手順としての調整(Adjustment: 測定器具の読み取り値を参照標準の厚さに一致させるために値を変更する行為)が定められている。

- ① 0点(素地)調整。素地の性質を補正するのに適し、ほとんどのケースでこれにより精度は確保される。未塗装の素地上で強制的に "0" に調整する。
- ② 1点調整。既知の厚みで1点調整をする。素地表面が粗面である場合の補正に適する。具体的には粗面の未塗装面にフォイルを置き、フォイルの厚みに対し膜厚計の表示値を強制的に合わせ調整する。
- ③ 2点調整。既知の厚みを持つ2つの厚みが異なるフォイルを用意してこの2点で調整する。ほとんどのケースでこの調整は不要である。

このように磁気誘導式膜厚計では、JIS K5400-1-7 1999年版が念頭に置く「電磁誘導原理の膜厚計」に比べて、現場の準備作業は大幅に軽減される。

1999年版のJISが「電磁誘導原理の膜厚計」に対して、これほどまでに神経質に使用者に対して確認するように求めた背景には、電磁誘導もしくは電磁式は素地や塗膜と接する先端部分が摩耗して特性が変化しやすいという問題がある(写真-1参照)。これは現場での運用にあたり大きな問題である。

これに対して磁気誘導式は安定して高い磁力が得られる希土類磁石を応用しているため、先端をルビーやセラミックスで保護することができるようになったことが大きい(第1図参照)。長く膜厚計の大きな課題であった先端摩耗の課題解消へ大きく前進した。

(2) 湧電流膜厚計

5.5.7. 測定法7Dに規定されており、非磁性金属素地上の非導電性塗膜の厚さを測定する非破壊試験である。原理としては導電性素地中の湧電流によって生じた磁場の変化から膜厚に変換するものである。



第1図 磁気誘導式膜厚計のプローブ先端のルビーチップ(例)

注 ルビーやサファイアはダイヤモンドに次ぐ硬さを持つ鉱物で、しかもレコード針にも使用されているような潤滑性に優れる(滑りが良くキズを付けにくい)という特性を持つ。

(3) 補足

なお、JIS K5600-1-7では、用語についても明確な定義がされているので、その一部を紹介する。これまで使用者が「校正」と考え実施してきたものが、実は「確認」であったという事例が増えている。また逆に、「校正をしていれば安心して使える」と考えてしまい、使用者自身が行うべき「確認」がおろそかになっている事例も大変多いので注意したい。

1) 校正(Calibration)

たどることができる校正標準で測定機器を測定し、その精度が公称値の範囲内にあることを証明するための、管理され、文書化されたプロセス。

なお、校正標準は、測定結果の不確かさが測定器具の公称制度より小さいものである。

2) 確認(Verification)

参照標準を使用し、使用者が行う測定器具精度の点検。

3) 参照標準(Reference standard)

使用者が、測定器具の精度を確認するための既知の厚さを持つ板。

4) 調整(Adjustment)

測定器具の読み取値を参照標準の厚さに一致させるため、膜厚既知の金属板(あるいはフォイルやシム)の値に変更する行為。

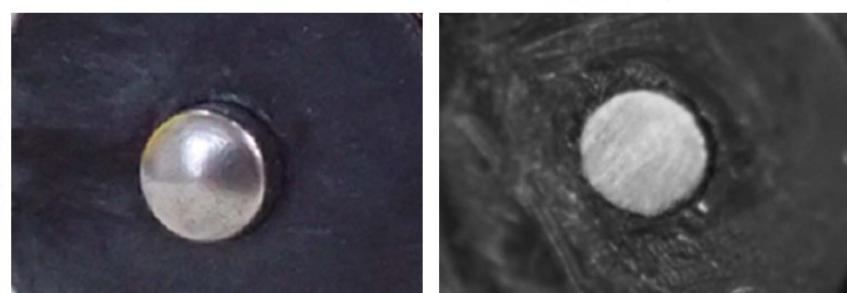


写真-1
従来型の電磁誘導原理の膜厚計で半年間の使用負荷を再現した試験例(左:初期状態、右:試験後)

5) 精度 (Accuracy)

測定器具を参照標準を使用して測定した測定値と、参照標準の厚さとの差。

2. 精度を維持するために使用者が行わなければならないこと

ここでは、写真-2 の磁気誘導式膜厚計を例に説明したい。この膜厚計は以下の規格に適合している。

ISO 2178/2360/2808, ISO 19840, JIS K5600-1-7 : 2014 (ISO 2808 が原規格)

American Society for Testing and Materials : ASTM B244/B499/D1186/D1400/D7091/E376/G12

British Standards : BS 93900-C5, Australian Standards : AS 2331.1.4, AS 3894.3-B

SSPC-PA2, US Navy NAVSEA PPI 63101-000, US Navy NAVSEA 009-32 など

(1) 校正と確認

JIS K5600-1-7 塗料一般試験方法 第1部：通則 第7節：膜厚の規定が、2014年に改定され(基となる ISO 2808 は 2007年に改定された第4版)，校正・確認・調整が明確に定義されたので、確認しておきたい。

1) 校正 /calibration…メーカーで実施

「たどりができる校正標準で、測定機器を測定し、その精度が公称値の範囲内にあることを証明するための、管理され、文書化されたプロセス」と定義された。「校正標準は測定結

果の不確かさが膜厚計(測定器具)の公称精度より小さいもの」が要件として示されている。最新の膜厚計の公称精度は大変向上しているので、たとえ校正証明書が添付されていても、膜厚計より精度が劣るシムやフォイルで校正することはできないので注意したい。

初期校正は、「膜厚計の製造メーカーまたは資格のある試験所が行うこと」と指示されたが、膜厚計の機器の中でも、本膜厚計のような電子機器の場合には、校正時に専用の装置を用いて特性調整を行うため、製造メーカーでないと適切な校正・再校正はできない。定期的な特性調整を行わず累積させてしまうと故障の原因となるので注意が必要だ。

2) 確認 /verification

「参照標準を使用し、使用者が行う膜厚計(測定器具)精度の点検」と定義された。使用者が日々の測定作業において実施しなければならない項目である。参照標準/verification standard は、「上塗を施してある既知の膜厚の塗板または既知の厚さの金属板が用いられる」と明記されている。プラスチック製のフォイルやシムではないので注意いただきたい。金属板の上の塗膜を測定する膜厚計の場合には、校正された塗り板となる。

なお、磁気法(電磁誘導・磁気誘導・渦電流膜厚計など)の項には、「読み取りに先立って確認が必要」と記されているので、測定を開始される前に塗り板を用いて精度の確認を必ず実施いただきたい。

本膜厚計のメーカーでも、上記の規定に合った校正証明書付の Coated Metal Plates/ 塗り板を用意している(写真-3 参照)。



写真-2 磁気誘導式膜厚計の例



写真-3 校正証明書付塗り板のセット(例)

〈シム(フォイル)について〉

旧 JIS である JIS K5600-1-7 1999 版では、塗り板(旧 JIS では塗装標準板と称していた)のほかに、シム(フォイル)を校正標準として用いることを認めていた。しかし、次のように記されている。

「校正用フォイルは、一般に適切なプラスチック材料で作られている。これらはキズが付きやすく、そのためしばしば交換しなければならない」。したがって、校正用のフォイルは、自動的に 1 年間は有効だと考えることは間違っているということになる。「しばしば交換しなければならない」ものだという認識に改める必要がある。

3) 調整 /adjust

「膜厚計(測定器具)の読み取り値を参考標準の厚さに一致させるため、膜厚既知の金属板の値に変更する行為」と定義された。

本膜厚計では、まずほとんどのケースにおいて、実際に測定する対象品の素地(塗装前の状態)でゼロ点を合わせることで、初期の精度が得られると説明している。一般的にはこの調整作業は、いわゆる 0 点(素地調整)のみで十分な精度が得られる。調整が必要な代表的ケースとしては、下地がブラスト加工などをした粗面である場合がある。これについては次項で詳しく説明する。

3. 実際の測定手順(例)

(1) ブラスト面などの粗面上の塗膜

1) 粗面上の膜厚測定の問題点

全ての膜厚計は、素地の材質や表面の状態に影響を受ける。ISO 19840, ASTM D7091 およ

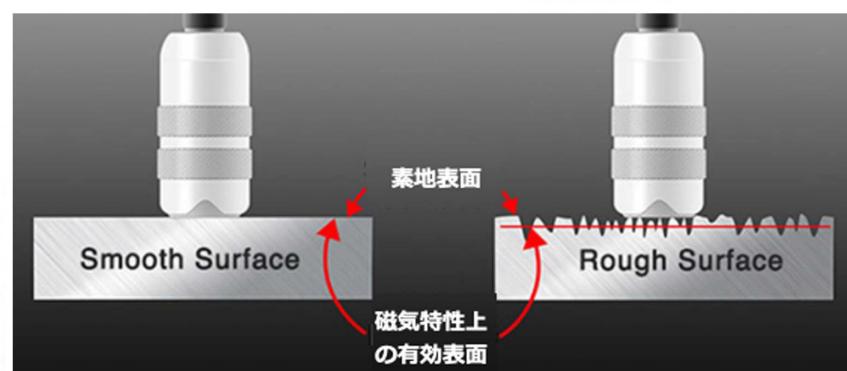
び SSPC-PA 2 は、機器のタイプと測定条件に応じて、いくつかの類似した解決策を提案している。その 1 つの選択肢は、塗装されていない金属素地上で膜厚計の読み取り値がゼロになることを確認し、必要に応じてゼロ点調整(素地調整)を行うことである。金属表面が比較的に滑らかな場合も含めて、本膜厚計メーカーも適切な精度を得るために、この方法を行なうように推奨している。

しかし、第 2 図に示すような明らかな粗面の場合には的確な対応策が必要になる。一般的には、塗膜の厚さは粗い表面の最も高い「ピーク」から測定し、ピークの上がどれだけ塗膜で覆われているかを確認すべきだと考えられている。そうしないと、塗膜表面から粗面のピークが頭を出してしまう恐れがある。膜厚計は、何も調整を行わない場合には、第 2 図の右側のように素地の表面に粗さがある場合、粗さプロファイルの最も高い山と最も深い谷の間に位置する「有効磁気特性上の表面」から膜厚を測定してしまう。

このままだとゼロ点はブラストの山のピークより下に位置してしまうため、ピークの上の覆う塗膜の厚さを測定することはできず、ピークを覆う厚さより厚めの値が表示されてしまうことになる。

2) 粗面用の 1 点調整

この場合、適切な選択肢は、第 3 図のようにプローブと素地表面の間に、予想される塗膜の厚さに近い、校正により厚みが既知であるプラスチックシム(フォイル)を置き、シム(フォイル)の厚さに 1 点調整をすることが有効である。この方法は、ブラストの山のピークを覆う



第 2 図
磁気特性上の有効表面
の位置の違い

塗膜の厚みを最もよく再現する。

なお、ゼロ点調整ではなく1点調整を行うことを注記しておく。フォイルは、想定される膜厚に近いものを選択するのが原則。

ここで使用する校正証明書付シム(フォイル)を本膜厚計のメーカーも用意しているので写真-4に例示する。なお、シム(フォイル)はあくまで調整用で、確認/verificationに用いることはJIS/ISOの規定に沿っていないので注意したい。

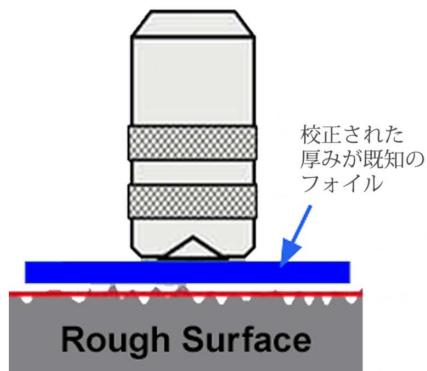
なお、既述のように、「フォイルは、キズが付きやすく、そのためしばしば交換しなければならない」ものであり、キズが付いたり、折り目が付いたものをそのまま使うことはできない。

3) 粗面を再現した適切なサンプルがない場合

どうしても塗装物のプラスチックされた素地がない場合には、ISO 19840に準拠したゼロ・オフセット機能を使用するという方法がある。本膜厚計ではプラスチックの表面粗さに応じて、プリセットされたゼロ・オフセット値を利用することができる。その手順を以下に示す。

写真-4に示すISOプラスチック比較板を使って、測定対象の表面粗さを評価する。ISOプラスチック比較板は以下の4段階の粗さで構成されており、以下のように評価する。

- 粗いほうから1番目未満2番目以上の粗さ…粗(Coarse)
- 2番目未満3番目以上の粗さ…中(Medium)
- 3番目未満4番目以上の粗さ…細(Fine)



第3図 粗面の場合の1点調整

上記のISO/JISに規定された3段階に合わせてプリセット値が決められている。なお、プリセット値は使用者が任意の値を入力して使用することも可能である。

(2) エッジ部や細い部分の塗膜

SSPC PA-2ではエッジ、穴の近くでは最低2.5cm以上離して測定すべきと規定している。一般に第4、5図のように、膜厚計はエッジ部近傍では精度が大きく低下しやすい。

もちろん、SSPC PA-2の規定のようにエッジ部の測定を避けるという割り切り方もあるが、エッジ部や細い管部分などの膜厚不足から錆が発生しやすいなどのトラブルも多い。このような部位では、第6図の指向性の高いマイクロプローブを用いることで適切な膜厚測定が実現できる。本膜厚計では、最大1,150 μmの膜厚を測定することができる先端形状が異なる3種類(ストレート、90°、45°)のプローブが用意されている。通常直径φ2mmのワイヤ上の

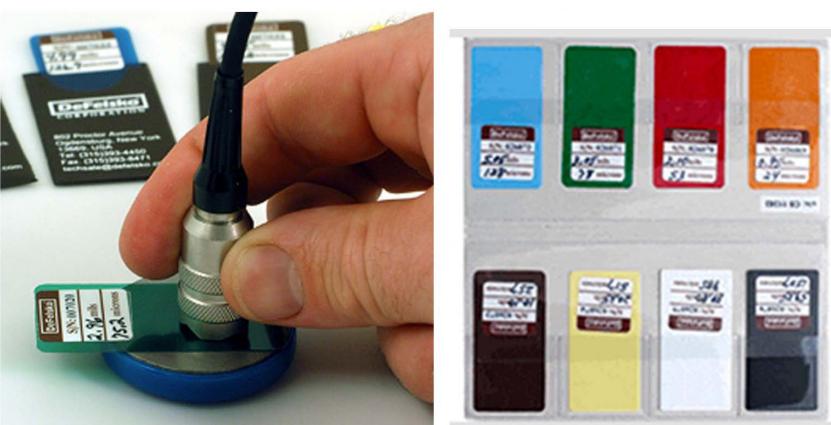
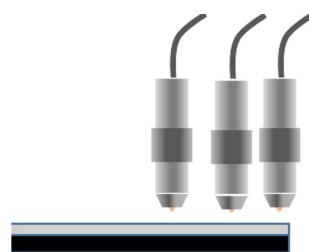
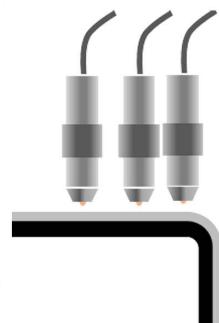


写真-4
校正証明書付フォイル
(シム)の例

第4図
エッジ部の影響(標準
プローブ使用時)



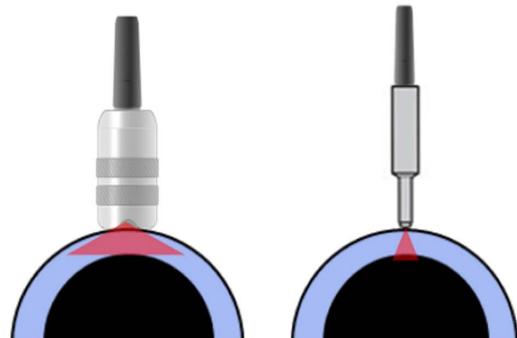
第5図
R部の影響(標準プローブ
使用時)



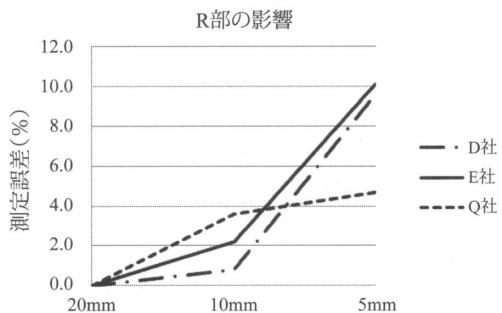
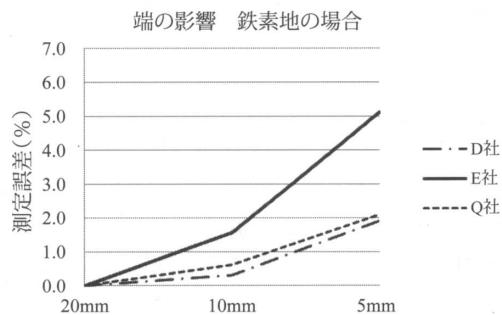
塗膜まで測定が可能であるので、端部の測定にも適する。第7図に先端形状を例示するストレート形状では、小さい径の測定対象物に対して、図の右側に例示するV溝付きクイッククリースアダプターを利用して最適な測定角度を確保し、定圧プローブとして利用することができる。

たとえば、写真-5のようなワイヤなどの細い製品における膜厚測定の手順は以下の通りとなる。

調整と呼ばれる塗装していないワイヤ上でゼロ点(素地)調整を行い、その後は、塗装された同一特性(素材、直徑などが同一)のワイヤ

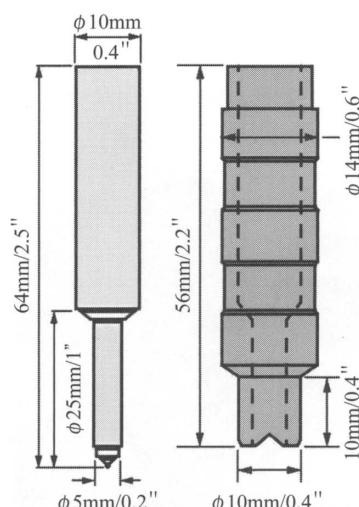


第6図 特性の違い(左:標準、右:マイクロプローブ)



で測定する。測定にかかる時間と手間を省くために、バッチ機能を用いると便利である。これを用いるとワイヤの直徑ごとに1つずつ調整条件を保存することもできる。

統計的管理のために、測定中に読み取回数、平均値、標準偏差、最小値と最大値を継続的に表示することができる。また、Hi/Lo機能により、上限値と下限値を設定することができ、測定値



第7図 マイクロプローブ(ストレート型)の先端
形状の例

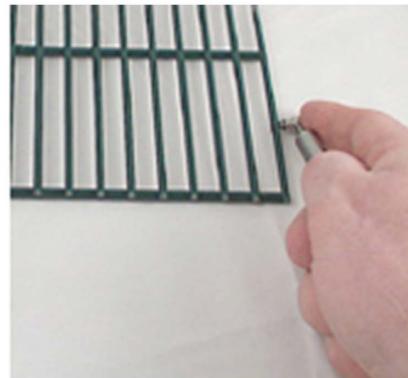
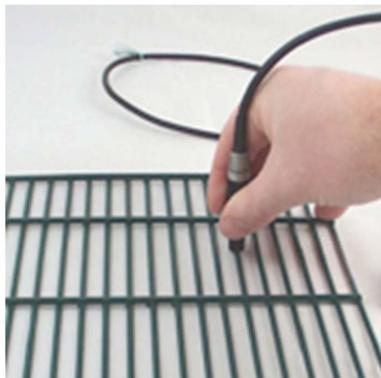


写真-5
マイクロプローブを用いてワイヤ上の膜厚を測定している様子(左:ストレート型マイクロプローブを使用した測定例, 右:先端45°のマイクロプローブを使用した測定例)

が指定した上限値を超えた場合、音声と画像で作業者に警告を発する。

(3) 鉄素地上の亜鉛メッキの厚みの測定

メーカーの取扱説明書の指示に従うことになるが、以下は磁気誘導式の本膜厚計のおける標準的な手順になる。

1) 準備段階

- ① 膜厚計はJIS/ISOが定めているように、参考標準(Reference Standard)(JIS K5600-1-7 3.17 参照標準:上塗りを施してある既知の膜厚の塗り板)を使用して定期的に精度を確認(Verification)する。
- ② 試験面にゴミ、グリース、酸化物、腐食生成物がないことを確認する。
- ③ 測定点は、塗膜の明らかなピークや不規則性を避けるように選択する。
- ④ 適切な平均膜厚を得るために、十分な回数の読み取りを行う必要がある。

2) 測定手順

- ① 基材の状態(質量、金属、粗さ、温度、曲率など)の影響を補正するために、亜鉛メッキが施される前の基材/部品でゼロ点を確認し、ズレている場合にはゼロ点調整を行う。
- ② 亜鉛メッキが施される前の基材/部品の上に厚みが信頼できる方法で確認されている(校正証明書付)シム(フォイル)を置き、これを測定して精度を確認する(ゼロ点調整の適否の確認)。
- ③ 亜鉛メッキが施された製品を測定する。膜厚計の値は、亜鉛メッキの厚さを示す。

なお、鉄の上に亜鉛メッキが施されていて、さらにその上に塗装がされているケースでは、

最終の塗膜の上からプローブを当てて、塗膜の膜厚のみならず、亜鉛メッキの厚みも同時に測定できるプローブもある(写真-6参照)。

4. 統計機能

たとえば、「鋼道路橋防食便覧」((公社)日本道路協会刊)や造船におけるPSPCと呼ばれるIMO塗装性能基準には、それぞれ統計的な手法を用いた膜厚管理が示されている。これらの膜厚管理は、本膜厚計の統計機能で対応することで効率的な管理が可能になる。

(1) 「鋼道路橋防食便覧」の例

- ① 測定ロットは、塗装系別、塗り付け方法別、部材の種類別に設定する必要がある。
- ② 1ロットの大きさは200~500m²程度とし、1ロット当たりの測定数は25点以上とする。
- ③ 各点の測定は5回行い、その平均値をその点の測定値とする。

これらの測定はスキャン機能を使うことで極めて効率的に実施できる。スキャン機能ではプローブ先端を塗膜に当てたままなぞるように動



写真-6 塗膜と亜鉛メッキの厚みをそれぞれ表示するプローブ



写真-7 左から第
14-a図、第14-b
図、第14-c図

かすることで、分速180回以上という速度で測定できる。

ここでは3つあるスキャンモードのうち Limited Count Average(測定回数の限定機能)を選択し、測定回数を5に設定することで、自動的に5回だけ読み取りを行いその平均値を表示するようになる。

たとえば、「鋼道路橋防食便覧」では、次のような管理基準も示されている。

- ① ロットの塗膜厚平均値は、目標塗膜厚合計値の90%以上であること。
- ② 測定値の分布の標準偏差は、目標塗膜厚合計値の20%を超えないこと。
- ③ ただし、標準偏差が20%を超えた場合、測定値の平均値が、目標塗膜厚合計値より

大きい場合は合格とする。

このような一見複雑な管理基準も、膜厚計に用意されている統計機能を利用して効率的に処理できる。たとえば150μmを目標膜厚として統計機能の利用方法を確認してみる。

- ① スキャン機能を使い同じ測定点で連続5回測定を行う。所要時間5秒程度である(写真-7 第14-a図参照)。
- ② 平均を見ると156.4μmで、目標塗膜厚150μm × 90% (=135μm)以上であることが確認できた(写真-7 第14-b図参照)。
- ③ 標準偏差は10.17μmである(写真-7 第14-c図参照)。150μm × 20% (=30μm)以内なので、こちらも合格である。

なお、測定点ごとの5回の測定結果はサブバッチに格納し、それを統合するバッチ全体の



写真-8 90/10 ルールの設定画面例

注 NDFT(公称乾燥膜厚)を320(μm)、その何%の値が公称乾燥膜厚(NDFT)以上でならなければならないかの欄に90(%),そして、残りの10%は公称乾燥膜厚の何%を下回ってはならないかの欄に90(%)を入力した例。



写真-9 結果の表示例

注 N緑色の✓印は90/10のどちらの基準も満たしていることを示している。



写真-10 水中測定が可能な長いケーブル付プローブの例

統計数字を確認することで、各測定点も、また25個集めた1ロットにおいても、基準を満たしているかどうかを確認することができる。

(2) PSPC と呼ばれる IMO 塗装性能基準における 90/10 ルール

たとえば、エポキシベースでは、NDFT (Nominal Dry Film Thickness) といわれる公称乾燥膜厚は 320 μm で、90/10 ルールの適用が規定されている。

90/10 ルールとは、

- ① 全ての測定点において、その 90% の値は公称乾燥膜厚 (NDFT) 以上であり、
- ② なおかつ、残りの 10% の測定点の値は、公称乾燥膜厚の 90% を下回らないことを指す。

この場合には、統計機能の中の「New 90/10」を利用することになる(写真-8, 9 参照)。

測定エリアごとにバッチを分けて保存すると、後で集計する際に楽である。本膜厚計では、1,000 個のバッチが用意されている。

5. 水中の測定

本膜厚計のボディー部は IP65 の防塵・防水性を持つため、雨中での測定でも全く問題はない。本体を水中に没して計測することはできないが、プローブは可能になっている。たとえば本体は船上にあって、プローブは水深のあるよ



写真-11 厚膜用プローブの例

うな船底部の膜厚の測定も可能である。

水中測定が可能な鉄素地用の標準プローブでは水深 75m まで、非鉄素地用では水深 15m まで測定可能である(写真-10 参照)。

6. 厚膜への対応

厚膜への対応性も向上している。鉄素地用としては 0~13mm, 0~25mm, 0~38mm, 0~63.5mm という厚膜用のプローブが用意され、非鉄金属素地用としては、0~13mm, 0~63.5mm 用のプローブが用意されるようになった(写真-11 参照)。

7. 錆厚の測定

「鋼道路橋防食便覧」(日本道路協会刊)には、錆厚さの指標値として「電磁膜厚計」によって計測した値を用いることが記載されている。現在の JIS K5600-1-7 では、5.5.6. 測定法 C に電磁膜厚計という用語ではなく、「磁気誘導膜厚」が用いられているのでこれに基づいて紹介する。

錆は主に非磁性体である。あらかじめ異物や浮き錆を除去した錆の上から、磁気誘導式膜厚計を用いて測定すると、錆の下にある、まだ腐食されていない強固である鉄素地(磁性面)までの厚みを表示する。複数回測定して、平均値を取ることにより適切な錆厚の管理が可能になる。