

# 塗膜の厚さの測定

## その2. 厚さ測定法

西支部 小林義和

監修 技術顧問 吉田豊彦

前回は“塗膜の厚さ”は塗膜の性能や寿命にとってどんな意味をもっているのかを主に記しました。今回はそのような塗膜の厚さの測定は実際にはどんな方法で行われているのかを紹介します。厚さの測定とは長さの測定です。長さの測定は mm から m 程度の我々にとって身近な程度の長さなら、普通は、ものさし、ノギス、巻き尺など、簡単な道具で測れますが（それでも正確に測定をしようと思うと大変やっかいです。）その範囲を越えた km 以上や mm 以下となると物差しと肉眼では役にたちません。特別な道具や方法が必要になります。

因みに長さの単位の基準はごぞんじでしょうか。最近、話題になっているトレーサビリティにも関係のあることです。SI 単位では長さの基本量はメートルです。1880 年代から 1960 年まではメートル原器（日本にある原器の番号は 22 です）でしたが、1960 年にメートルの基準は光の波長に変わりました。

“メートルは、クリプトン 86 の原子の準位  $2p_{10}$  と  $5d_5$  との間の遷移に対応する光の真空の下における波長の 1 650 763.73 倍に等しい長さ”と決められています。鈍く光る金属製の物差しが、嚴重に温度、湿度も管理されて幾重にもなったデシケーターの中に重々しく鎮座しているというイメージに比べるとクリプトン 86 の原子の……というのは遠い宇宙のことでピンと来にくいのですが。

### 1. 塗膜厚測定法のいろいろ

さて、塗膜の厚さはたいていの場合、せいぜい数  $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}\text{mm}$ ) から数 mm までで、精度も有効桁数が 3 ケタ位あれば用が足ります。と言うと割に簡単なようですが、そこにはまたそれなりの問題点があります。

塗膜も素地表面も均一なものではない方が普通ですし、素地の性質も絶縁体、常磁性体、緻密、多孔性な

どいろいろです。塗膜自体、外力に応じて複雑な挙動をする粘弾性体ですし、現場的な塗装作業管理ではまだ乾燥していない塗布直後の塗液の厚さが知りたい場合もあります。したがって、塗液、塗膜の厚さ測定法もいろいろな方法が考案され、使われています。その各種の方法の一覧を紹介しましょう。

つぎの表（表 2）は ISO 2808 塗料—膜厚の測定（1997 年 9 月 15 日に改正されたばかりです）によるもので 10 法が記されています。

JIS(K5400-1990 塗料一般試験方法) の塗料層の厚さの測定には

ロータリー型ウェットフィルム膜厚計

くし型ウェットフィルム膜厚計

塗膜の厚さの測定には

電磁式膜厚計

渦電流式膜厚計

外側マイクロメーター

が記されている他、7.2 隠ぺい率では質量法による塗布量の測定を記してあります。次節では JIS の方法を解説しましょう。

### 2. 塗液、塗膜の厚さの測定の実際

#### 2.1 ウェットフィルムの膜厚計。

くし型ウェットフィルム膜厚計が代表的です。

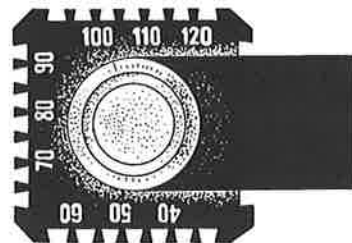


図-1 くし型ウェットフィルムの膜厚計の一例

表-2 塗膜厚測定法 (ISO 2808 による)

No	適用	代表的な機器・精度	備考
方法 1 液膜の厚さ	A.くしゲージ B.ホイールゲージ C.質量測定 塗装直後の液膜厚さの測定	偏り: $\pm 2.5\% + 1 \mu\text{m}$ 再現性: $\pm 15 \mu\text{m}$	結果は、液膜の厚さの近似的な値を示す。実験室及び現場で使える。 C法は乾燥膜厚の測定にも使えるが、実験室での測定である。
方法 2 乾燥塗膜の質量と面積の比からの乾燥塗膜厚さの算出	検出子を用いるには柔らかすぎない皮膜に用いる	精確とは言えない	平均膜厚が指定の範囲に入っているかどうかを示す。 膜は損傷をうけない
方法 3 機械的接触による機器を用いる乾燥塗膜厚さの測定	A.マイクロメーター法 試験板か、平な塗装面に適用 B.ダイヤルゲージ法 試験板か、塗装面で平であるか、一方法だけに湾曲している	偏り: $\pm 2 \mu\text{m}$ 再現性: $\pm 30\%$ (膜厚が薄いとき) 20% (膜厚が厚いとき) 再現性: $\pm 10\%$ 下限: $2 \mu\text{m}$	塗膜はマイクロメーターではさんだとき、押し込みがないような固さであること。 膜厚ははがされたもの以外では $25 \mu\text{m}$ 以上であること。 ゲージまたは測定器の接触子を下げたとき、塗膜に侵入しないようにかたい塗膜であること。
方法 4 プロフィロメーター法による乾燥膜厚の測定	平面である塗面に対する参照法 (レフェリー) として推奨される	再現性: $\pm 10\%$ 下限: $2 \mu\text{m}$	プロファイル追跡機器の接触子が、塗膜に侵入しないようにかたい塗膜であること。 塗膜は試験によって損傷をうける。
方法 5 顕微鏡法による乾燥膜厚の測定	A.断面の顕微鏡観察 例えばグリットプラストした面のようにプロフィールが一様でない被塗物に塗装したものの参照法として推奨される	偏り: $2 \mu\text{m}$ 再現性: $\pm 10\%$	被塗物を切断して樹脂に包埋する。 塗膜は試験によって損傷をうける。
	B.くさび型カット法 もろい、あるいは砕けやすい塗膜には適用できない A法もB法も、多層系塗膜の個々の層の厚さの測定に利用できる	再現性: $\pm 10\%$ 下限: $2 \mu\text{m}$	膜をカットするのに特殊な切断器か、ペイントボーラーが必要である。 塗膜は試験によって損傷をうける。
	C.表面プロフィール測定法 透明な塗膜で、被塗物からきれいにはがすことができるような塗膜に利用できる	再現性: $\pm 10\%$	塗膜のプロフィールを試験するには特殊な顕微鏡を用いる。 (スプリットビーム顕微鏡) 塗膜は試験によって損傷をうけずに測定できる。
方法 6 磁気的方法	強磁性金属を被塗物とする対象 A.誘導磁気則による	偏り: $\pm 2\% + 1 \mu\text{m}$ 再現性: $\pm 10\%$	塗膜はプローブの圧力に十分耐えるようなかたいもの。 現場でも使える。
	B.常磁性プルオフ則による	偏り: $\pm 5\% + 1 \mu\text{m}$	
方法 7 渦電流法	非磁性金属被塗物に用いる	偏り: $\pm 2\% + 1 \mu\text{m}$ 再現性: $\pm 10\%$	機器は渦電流の原理によって操作する。 塗膜はプローブの圧力に十分耐えるようなかたいもの。 現場でも使える。
方法 8 非接触法	機器が塗膜に接触することがないように測定したい場合に用いる 平らな塗装面に適用する	再現性: $\pm 10\%$	機器はβ線後方散乱 (方法No. 8A) 又は蛍光Z線 (方法No. 8B) によって作動する。 塗膜は正確な測定ができる程度に均一なもの。
方法 9 質量 (溶解) 法	グリットプラスト鋼板のようにプロフィールが複雑な場合の塗膜及び被塗物がポリマーの場合は塗料溶剤によって侵されない場合に適用できる		塗膜を被塗物に溶解しないような溶剤に溶解して測定する。塗膜の質量を密度と面積で除すと平均膜厚が得られる。
方法 10 プラストした鋼材に塗った乾燥塗膜の厚さの測定	ラフな (プラスト処理した) 表面の強磁性金属被塗物上の乾燥塗膜に適用する		誘導磁気による測定。 現場でも使える。 場合によっては方法No. 5Aまたは方法No. 9も使用できる。

1) 偏りは機器メーカーの情報による。

辺部に連続した数個の凹凸部のある板で、四辺形のものが一般的に用いられています。各辺の中間部の凸部が両端の凸部より内側に作られていて、それぞれの凸部に、両端の凸部を結んだ線からの距離が表示、刻印されています。辺の両端が素地に接するように押しつけた時、塗料の付着した位置の最大の数値が塗料層の厚さを示します。原理図を図-2に示します。

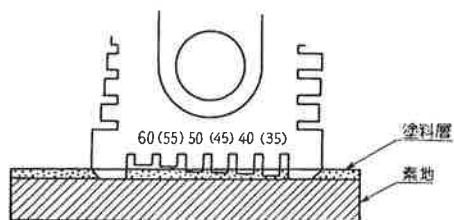


図-2 くし型ウェットフィルム膜厚計の原理図

図-2の場合、塗料は35  $\mu\text{m}$ の歯から50  $\mu\text{m}$ の歯の部分まで付着しているので、塗膜厚は50  $\mu\text{m}$ 以上、55  $\mu\text{m}$ 未満と推定できます。

測定にあたって注意する点は、測定対象物の塗料層に対して垂直になるように軽く当てる、パイプの内外面などの曲面を測定する場合は、円周線方向と直角の線上で測る、両端の凸部の間にある素地の面が平滑なことを確認するなどです。

塗装して乾燥する前のウェットフィルムには通常溶剤が含まれています。ウェット膜厚はこの溶剤も含んだ塗料の厚さも測定しているので、塗装後速やかに測定をしないと測定値がバラツク原因になります。

## 2.2 塗膜用膜厚計。

乾燥して固化した塗膜（ドライ）の膜厚測定には、接触式の膜厚計が多く用いられます。鉄のような磁性体には永久磁石式または電磁式膜厚計。アルミニウムや銅または真鍮など非鉄系金属の他、磁石につかない一部のステンレスには、渦電流式膜厚計が適しています。これらは標準の厚さを持つ標準厚板で測定器をその都度校正して相対値を測定するものです。これに対して、マイクロメータや顕微鏡を用いれば、絶対値の測定が可能になります。非金属物体用には、超音波式の膜厚計があります。

金属用膜厚計のうち代表的なのが、電磁式膜厚計です。鉄素地（フェライト系ステンレス鋼を含む）の上に塗った非磁性塗膜の厚さを、交流回路によってプローブに交番磁界を発生させ、鉄素地との距離によって生じる電流の変化を塗膜厚に変換して測定します。装置の一例を図-3に、原理図を図-4に示します。

素地板にプローブを当ててゼロ調整をした後、素地板の上に標準厚板を載せ、指示値に合わせてキャリブレーション（調整）します。標準厚板1種だけを使う1点調整のもの他、2種または3種の標準厚板で2点または3点の調整をするものがあります。1点調整のものは調整点から離れた値における精度が低下するのに対して、調整点の多いものは精度が向上します。近年はマイクロコンピュータを組み込んで、データの記録はもちろん、統計計算値も出力する測定器が増えています。

ゼロ調整をする際の素地板は、測定しようとする被塗物と同じ形状、材質及び厚さのもので、皮膜を施していないものを用いないと正しい測定値がえられません。被膜の施していないものが入手できないときは、その一部分を完全にはくりして素地面を露出させる必要があります。標準厚板のうち、50  $\mu\text{m}$ 以下の薄いものは変形しやすいので、精度維持のために定期的に更新が必要です。

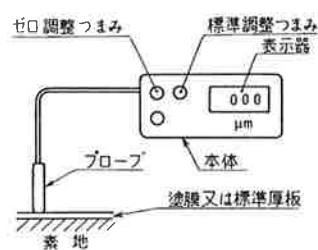


図-3 電磁式膜厚計の一例

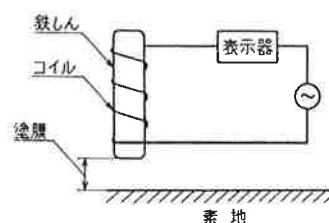


図-4 電磁膜厚計の原理図

### 3. 本当の厚さは？（凹凸面上の塗膜厚）

以上は平滑な面の上での厚さの測定の話です。正確に言えば、平滑と言っても、実用されている被塗物表面で完全に平滑なものはずありませんから、凸凹の程度の問題です。図-5~7 は鋼板（図-6）、アルミニウム（図-6）の表面のプロフィールです。1)

縦軸のスケールは横軸の 1600 倍にしてありますから、実際はずっと緩やかなものですが、それにしても完全にフラットなものではありません。

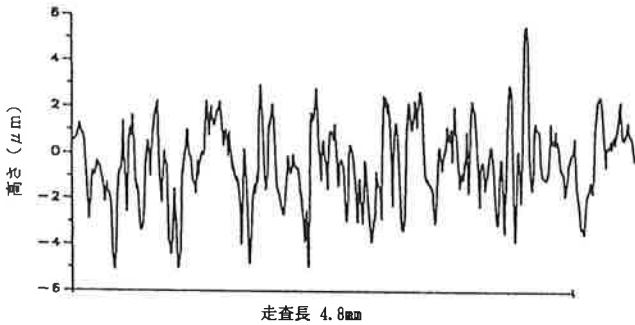


図-5 鋼板表面のプロフィール

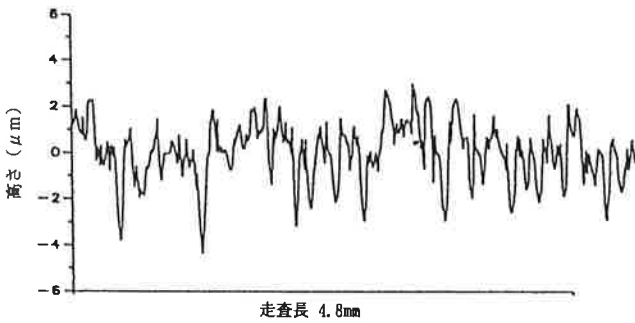


図-6 アルミウム表面のプロフィール

塗膜表面はどうでしょうか。塗液は塗装後、流動して平滑になろうとします。しかし一方、塗液表面での溶剤の蒸発のゆらぎに伴う表面張力の不均一から塗液層内に渦流動が発生し、まだ相当に溶剤を含んだ状態で粘度の上昇によって塗膜内流動が停止すればゆず肌のような不均一膜厚を発生することは随分以前から知られています。ゆず肌の例を図-7、8<sup>2)</sup>に示します。

（この図は縦軸の単位がマイクロメートル、横軸が mil というややこしい図ですが、ご容赦ください）素地表面に較べて波長も波高も大きくなっていることが

わかります。

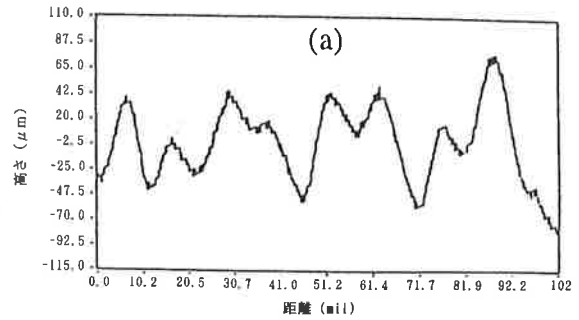


図-7 ゆず肌表面のプロフィール (例1)

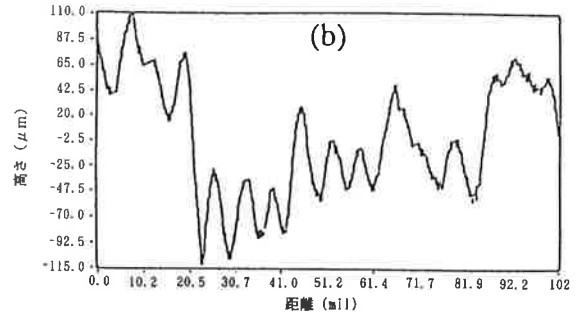


図-8 ゆず肌表面のプロフィール (例2)

このような凸凹の程度を比較する一方法としては、フラクタル次元があります。図-9<sup>2)</sup>は曲線の曲がり具合とそのフラクタル次元の例です。1本の線ですから今までのトポロジーの次元は全て1ですがフラクタル次元で表せば、複雑さが明瞭にわかります。

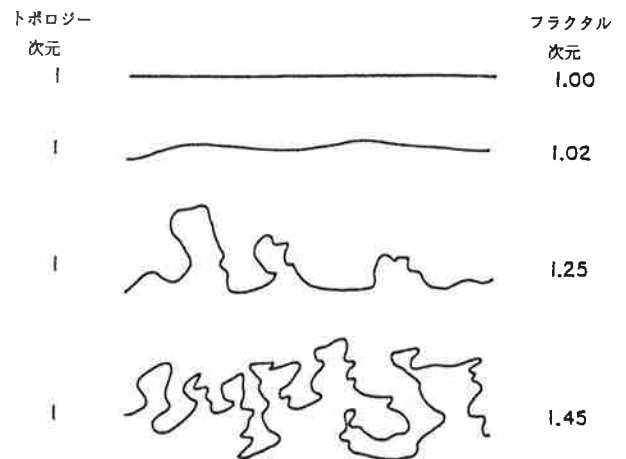


図-9 いろいろなプロフィールのフラクタル次元

余談ですが、表面の形状が、そこに接触する液滴よ

りも小さい凹凸があるとき、液滴の接触角は平らな面で測定した接触角が  $90^\circ$  よりも小さいときは小さくなり、（濡れやすくなり）、逆に平らな面への接触角が  $90^\circ$  より大きい液滴は接触角が大きく（濡れにくく）なります。図-10 はフラクタル次元 2.29 のアルキルケテンダイマーの表面の水滴（直径約 2mm）の写真で、接触角  $174^\circ$  という超撥水性を示しています。<sup>3)</sup>

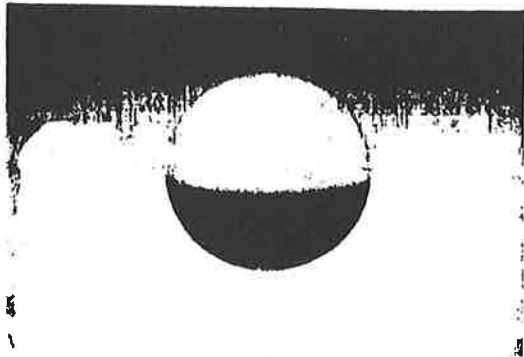


図-10 疎水性フラクタル表面上の水滴

上の例は特殊な例で、従来一般には素地面が凸凹していると塗膜の素地への付着がよくなると言われています。たしかに被塗物と塗膜の接触面積が大きくなれば、（見かけの単位面積あたりの）剥離に要する仕事量は大きくなるでしょう。しかし、投錨降下と言われるような充填による効果があるかどうかは疑問です。たこ壺のような穴を塗液が空気と置換して満たし得るか、その後の乾燥収縮をどのように補って壁面からの剥離などを起こさないでいられるか、困難な問題です。

実際の塗装にあたっては、被塗面にミルスケールや汚れや油や異物がついていたり、さびていたりしますから、それらをおとして清浄な面にしなければなりません。この塗装前処理としてよく用いられるのがブラスト処理です。この処理は砂やスラグなどを高圧で吹き付けるのですから、当然、それを受ける表面は凹凸になります。図-11 は ISO 8501-1 によるものでブラストした表面の一例です。

このような表面の粗さの表し方としてよく使われるのは触針式表面粗さ計（ISO 8503-4, JIS B0651）の

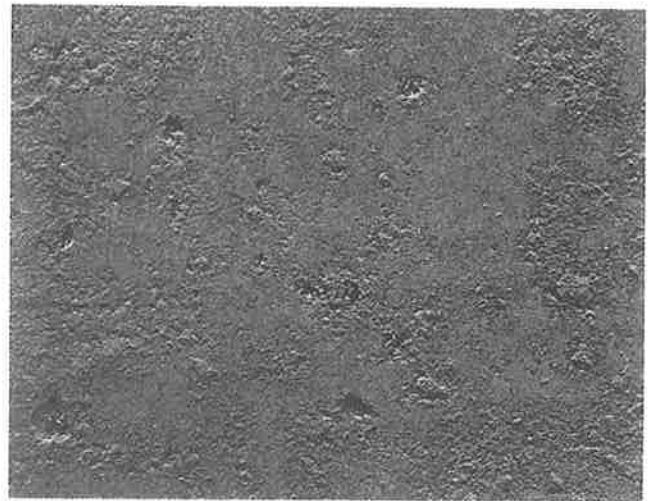


図-11 ブラストした素地面の例

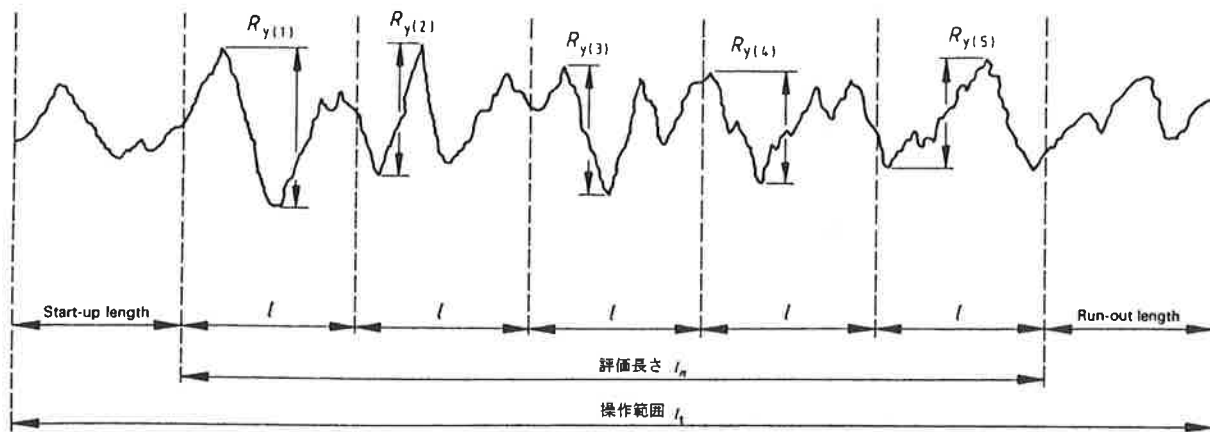
ような粗さ計です。これでトレースしたブラストした表面の一例を図-12 に示します。

触針の先端のダイヤモンドの半径は  $5 \pm 1 \mu\text{m}$  ですからそれより細かい凹凸には追従できません。表面の凹凸の程度を示すには表 3<sup>4)</sup> のようにいろいろなパラメーターがあります。

これらのパラメーターの定義と算出のしかたについては JIS B 0601 を参照してください。

このような表面に塗装したとして、その塗膜の膜厚は平滑な表面の上の一様な厚さの塗膜の場合とは異なって一つの数値では表せません。当然、分布、バラツキのある数値になります。塗布した質量から換算したにしても、電磁式膜厚計で測ったにしても、平均値の推定と考えられます。

塗膜の厚さを測る目的は、主として、塗られた塗膜が所期の性能を発揮するのに十分な厚さをもっているかどうかということですから、極端に単純化すれば色とつやと保護機能を保つのに必要なだけの厚さがあるかどうかということです。色やつやについては十分に下地を隠蔽しているかどうかでチェックできますから大きな問題はありませんが、保護機能を直接にチェックすることは、簡単ではありません。塗膜の一番薄いところがウイークポイントになって、そこから塗膜下腐食が広がってゆくとしたら、チェックすべきは平均厚



$$R_{y5} = \frac{R_{y(1)} + R_{y(2)} + R_{y(3)} + R_{y(4)} + R_{y(5)}}{5}$$

$l$  = サンプルング長さ

図-12 代表的なブラスト面のプロフィール

項目 国名	1 中心粗さ 線平均	2 最大高さ	3 十点粗さ 平均	4 方根粗さ 自乗平均	5 中心線の 深さ	6 相対長さ 負荷	7 局所的 平均山頂 間隔	8 凸凹間 隔平均	各国の規格
日本	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$						JIS B 0601-1982
アメリカ	$R_a^*$								ANSI B 46.1-1978
イギリス	$R_a$		$R_z$						BS 1134-1972
イタリア	$R_a$	$R_{max}$ ( $R_{tm}$ )	$R_z$	RMS		$t$	$S_m$		UNI 3963 Part 2-1978
インド	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$						IS 3073-1967
オーストラリア	$R_a$			$R_v$					AS 1965-1977
オランダ	$R_a$								NEN 3631-1977 3632-1974
カナダ	$R_a^*$								CSA B 95-1962
スウェーデン	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$			$t_p$	$S$		SMS 671-1975 673-1975
ソ連	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$			$t_p$	$S$	$S_m$	GOST 2789-73-1974
ドイツ	$R_a$	$R_t$ ( $R_{max}$ )	$R_z$		$R_p$	$t_p$	$A_r$		DIN 4762 Blatt 1-1960, 4767-1970, 4768 Teil 1 -1978, 4768 Blatt 1-1978
フランス	$R_a$	$R_t$ ( $R_{max}$ )			$R_p$	( $T'_n$ ) <sub>G</sub>	$A_R$		NF E 05-015-1972
フィンランド	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$						SFS 2038-1969
ポーランド	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$			$N_L$			PN-73/M-04250-1974 /M-04251-1974
ISO	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$						R 468-1966

\* 以前は AA 又は CLA で表した。

表3 各国規格におけるあらさのパラメーター

さではなくて、最低厚さということになります。

通常は素地面の粗さを一定に管理し、その上に塗装した塗膜の厚さは(1)単位面積あたりの塗料使用量で管理するか、あるいは(2)電磁式その他の膜厚計で測定する、ということにして、その膜厚の管理基準値は経験的に決めているようです。このとき、膜厚計の校正は平らな面で行います。プラスチック面で校正したときは再現性もないし、正確な推定値も与えない<sup>56)</sup>。いずれにしてもそのときの測定法を詳細に記録しておくことが必要で、測定条件が違えば結果も違うと報告されています。

前記の表-2 ISO 2808 (塗膜の厚さの測定) にも方法 10 プラスチックした鋼板表面の乾燥塗膜の厚さの測定

という項目がありますが、この内容はほぼ上記のことと同じです。

この節で書きたかったことは、プラスチック面のように細かい凹凸のある面に塗装された塗膜の厚さを問題にする場合は、平滑な面に一様な厚さに塗られた塗膜の厚さを測定した場合のような特定の絶対値は得られない。測定方法まで詳細に取り決めた上で、目安として考えるべきだ、ということです。

今回は塗膜厚測定入門とでもいうような内容ですが、塗膜は薄膜であるだけに、膜厚に関わる問題は重要です。膜厚と塗膜の性能とは深く関わっています。塗膜形成過程での条件によって塗膜の厚さの分布にはゆず肌のような不均一性がでてくることがありますし、被塗物の形状によっては、粘度と表面張力のバランスから角の膜厚が薄くなる端末効果 (edge effect) があるとその部分の耐食性が低下します。また、ISO でも挙げてありましたが、プラスチック面のように素地に凹凸があるときの膜厚とはなにを測っているのか、というようにたくさん問題があります。適切な方法で正確な膜厚を測定することは、塗料・塗装の技術によっては大変重要であることを改めて認識したいと思います。

## 引用文献

- 1) M. Osterhold : "Characterization of surface structures by mechanical and optical Fourier spectra", Progress Org. Coatings, 27, (1996)195
- 2) T. Provder and B. Kunz : "Application of profilometry and fractal analysis to the characterization of coatings surface roughness", Progress org. Coatings, 27, (1996)219
- 3) 恩田智彦 : 高分子, 44, 744(1995)
- 4) JIS B 0601-1982 "表面粗さの定義と表示"
- 5) R. R. Bishop, M. Camina and M. McKenzie : "Measurement of paint thickness over blast cleaned steel", JOCCA, 67, (1984), 149
- 6) M. McKenzie : "The calibration of induction paint-thickness-gauges for measurements over blast cleaned steel", JOCCA, 70, (1987), 354