

溶射皮膜膜厚分布と封孔剤必要量

I. 目的

防錆溶射皮膜の皮膜厚さ分布を測定し、その結果を用いて封孔剤塗布量を算定する。

II. 溶射皮膜膜厚測定

溶射仕様: ① 1m * 1m角3.2mm厚さSS400板をISO2 1/2に準拠してブラスト(研削材: スチールグリッド)し、Sm/Rz<4、Rz>40の粗面を形成。

② Zn/Al擬合金アーク溶射

溶射皮膜品質目標

項目	目標値
目標膜厚 μm	100
最低膜厚 μm	70
目標膜厚以上の確率 %	90<

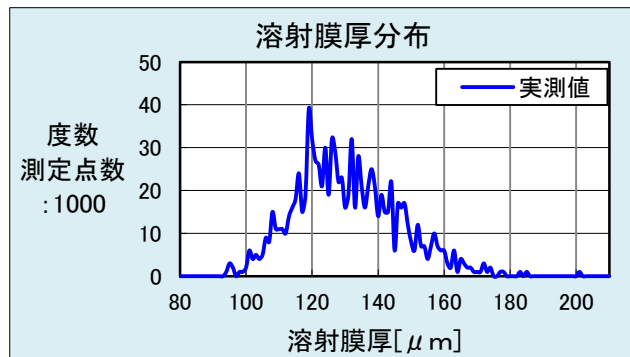
溶射作業は熟練者が実施しており、得られた溶射皮膜品質(特に、厚みの標準偏差)は、標準的作業者より良いものであろうと考える。

溶射後の膜厚測定結果

1m*1m溶射板の全面をほぼ均等に1,000ヶ所を、電磁式デジタル膜厚計により測定。

項目	目標値	実測値
目標膜厚 μm	100	
平均膜厚 μm		130.6
最低膜厚 μm	70	94.0
最高膜厚 μm		201.0
目標膜厚以上の確率 %	90<	99.2
標準偏差		15.69

但し、溶射直後、#100サンドペーパーにて軽研磨し、微小突起を除去した後に膜厚を測定。IV-2.参照



III. 溶射皮膜膜厚測定結果からの纏め

正規分布による近似

溶射皮膜膜厚実測値は正規分布に近いので、正規分布近似を求めると、下記の如く膜厚平均値 131.0 μm の場合には、標準偏差 15.69 でほぼ近似できることが判明。

標準偏差 15.69 の場合 σ 15.69

標準偏差	皮膜厚	確立密度	1000度数
-5 σ	53	0.0000	0.00
-4 σ	68	0.0000	0.01
-3 σ	84	0.0003	0.28
-2 σ	100	0.0034	3.44
-1 σ	115	0.0154	15.42
0 σ	131	0.0254	25.42
1 σ	147	0.0154	15.42
2 σ	162	0.0034	3.44
3 σ	178	0.0003	0.28
4 σ	194	0.0000	0.01
5 σ	209	0.0000	0.00

1000ヶ所測定で度数=1となる膜厚は

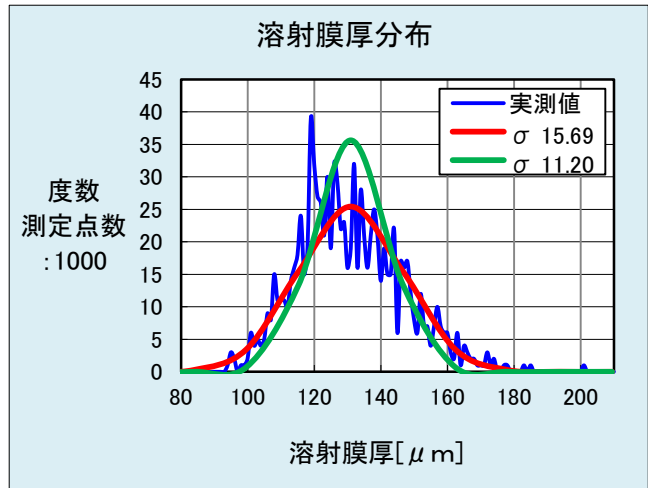
2.54 σ	170.9	0.0010	1.01
-2.54 σ	91.1	0.0010	1.01
凹凸差	79.7	0.0001	0.12

標準偏差 11.20 の場合 σ 11.20

標準偏差	皮膜厚	確立密度	1000度数
-5 σ	53	0.0000	0.00
-4 σ	68	0.0000	0.00
-3 σ	84	0.0000	0.01
-2 σ	100	0.0007	0.70
-1 σ	115	0.0133	13.35
0 σ	131	0.0356	35.62
1 σ	147	0.0133	13.35
2 σ	162	0.0007	0.70
3 σ	178	0.0000	0.01
4 σ	194	0.0000	0.00
5 σ	209	0.0000	0.00

1000ヶ所測定で度数=1となる膜厚は

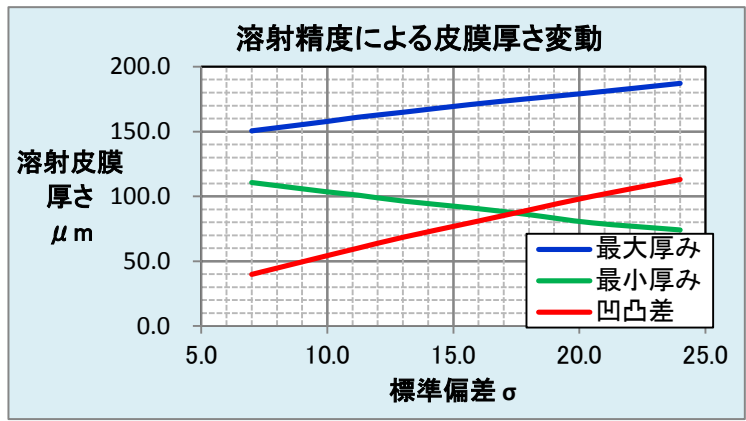
1.92 σ	161.1	0.0010	0.96
-1.92 σ	100.9	0.0010	0.96
凹凸差	60.3	0.0000	0.00



正規分布における標準偏差値と凹凸差との関係

平均値を 131 μmとし、溶射板で1000点の厚み測定時に1ヶ所のみ、凹凸の最大最小皮膜厚さが検出される溶射皮膜仕様は、上記正規分布を用いた計算により求められ、標準偏差に対応した凹凸の最大最小塗膜厚さは下表の如くとなる。

標準偏差	最大厚みに対応する偏り U_i	膜厚 μm		
		最大	最小	凹凸差
26.00	3.84	190.0	70.0	120
24.00	3.60	187.1	74.1	113
20.50	3.20	180.0	79.6	100
18.00	2.85	175.4	85.9	89
15.69	2.54	170.9	91.1	80
13.00	2.18	164.9	96.4	68
11.20	1.92	161.0	101.0	60
10.00	1.73	157.8	103.5	54
7.00	1.27	150.5	110.7	40



溶射皮膜品質をII項目標値を凹凸差 80 μmで達成させる場合

項目	目標値	実測目標
目標膜厚 μm	100	
平均膜厚 μm		120
最低膜厚 μm	70	80
最高膜厚 μm		160
目標膜厚以上の確率 %	90<	90
標準偏差		15.69

最低膜厚70 μmをキープさせる場合には平均膜厚は131-(90.8-70)=110 μmとなるが、この時の90%以上の膜厚は90 μmとなり、100 μm以上の膜厚確率90%以上が達成できない。

よって、目標膜厚以上の確率90%<を満足させることをベースとして計算する。

片側P/2=10%残存は正規分布でU=1.28、よって平均膜厚から1.28*σ=20 μmを差し引いた厚みが90%以上の膜厚であるので、この膜厚に20 μmを足した値が平均膜厚となる。他の凹凸膜厚数値はこれをベースに計算。

溶射皮膜品質をⅡ項目標値を守り、凹凸差を変化させた場合の溶射皮膜

平均皮膜厚を131 μmと設定した場合には、下表の通り、Ⅱ項目標値を大幅に上回る品質となるため、目標皮膜厚の確率を90%<となる皮膜厚を100 μmとして、それぞれの皮膜凹凸における平均皮膜厚の最適値を求めると下表下段の如くとなる。

凹凸差 μm		60	80	100	120
平均膜厚131 μm 時の計算値	平均膜厚 μm	131.0	131.0	131.0	131.0
	最大膜厚 μm	161.0	170.9	180.0	190.0
	最小膜厚 μm	101.0	91.1	79.6	70.0
	σ	11.20	15.69	20.50	26.00
	偏りUi	1.92	2.54	3.20	3.84
Ⅱ項目標値への対応					
目標膜厚の確率90%<となる膜厚 μm		116.7 過剰	110.9 過剰	104.8 過剰	97.7 ×
最低膜厚 μm		101.0 過剰	91.1 過剰	79.6 OK	70.0 OK
平均膜厚の最適 化	平均膜厚 μm	114.3	120.1	126.2	133.3
	最大膜厚 μm	144.3	160.1	176.2	193.3
	最小膜厚 μm	84.3	80.1	76.2	73.3
	Ⅱ項目標値への対応				
目標膜厚の確率90%<となる膜厚 μm		100.0 OK	100.0 OK	100.0 OK	100.0 OK
最低膜厚 μm		84.3 過剰	80.1 OK	76.2 OK	73.3 OK

IV. 溶射皮膜封孔/塗装に必要となる封孔剤量

溶射皮膜の封孔剤塗布必要量は

1. 溶射皮膜中の気孔率
2. 溶射皮膜の凹凸差
3. 防錆性・意匠性
4. 作業ロス

によって大きく影響されるので、個々項目毎に以下の如く解析する。

1. 溶射皮膜気孔の封孔

溶射皮膜には無数の気孔があり、その気孔率は溶射方法・基材・作業条件等により大幅に変化し、1~20%程度と言われている。

溶射方法による気孔率は、概ねHVOF溶射で1vol%、プラズマ溶射で3vol%、アーク・フレーム溶射で10~20vol%程度と言われている。

無機系封孔剤ハニエイトのクリア成分は、これらの気孔全て(電子顕微鏡観察では40nm気孔への浸透は確認済み)に浸透し硬化します。

顔料は粒径制約で浸透できないので、着色系を塗布した場合は、溶射皮膜表面に着色塗膜が形成されます。

そこで、溶射皮膜の平均厚みと気孔率によるハニエイト浸透量を求めると下表の如くとなる。

本資料はアーク・フレームによる防錆防食溶射を対象としているので、気孔率は10vol%、20vol%と設定。

溶射皮膜の 平均厚み μm	気孔率 vol%	ハニエイト浸 透量g/m ²	気孔率 vol%	ハニエイト浸 透量g/m ²
100	10	11.2	20	22.4
200	10	22.4	20	44.8
300	10	33.6	20	67.2

ハニエイト(クリア)比重
: 1.12

$$\text{ハニエイト浸透量} = \text{皮膜厚み } \mu\text{m} * \text{気孔率vol\%} * \text{ハニエイト比重} / 100$$

2. 溶射皮膜の凹凸を埋めるために必要な封孔剤量

最小皮膜厚さ等が規定された溶射作業において、その規定値を保持すべく作業が実施されると、上記Ⅱ、Ⅲで記述した如き、溶射皮膜には凹凸分布が発生する。

この凹凸は溶射直後に被膜上に存在する微小な突起を#100程度のサントペーパーで軽研磨した後に残る凹凸を意味する。この突起が残存すると、3.意匠性付与の封孔塗膜表面にまで突起が残る防錆上の工事瑕疵に至ることがある。

この凹凸を埋めるに必要な封孔剤量は、凹凸差の50%厚み塗膜形成に必要な封孔剤量と同一であることより

$$\text{封孔剤量g/m}^2 = \text{凹凸差 } \mu\text{m} * 0.5 * \text{ハニエイト比重} * \frac{2.0}{\text{固化時の体積収縮}}$$

固化時の体積収縮：

封孔剤が硬化し固化する際には、鋼面への塗装の如く、塗膜表面が固定されなく自由表面をもっている場合には、固化による収縮は1/2であることより、固化した際の必要容積の2倍量の液体が必要となる。

なお、微細孔に浸透した封孔剤が固化する際は、自由表面は細孔上部の液表面しかなく、他の細孔内壁面は固定化されていて、上記の如き体積収縮は起こっていないと考えている。

よって、溶射皮膜凹凸差による封孔剤必要量は下表の通りとなる。

皮膜凹凸差 μm	40	60	80	100	120	パージエイト(カラー)比重 : 1.40
封孔剤必要量 g/m^2	56.0	84.0	112.0	140.0	168.0	

3. 溶射皮膜の防錆および意匠性確保上の封孔剤必要量

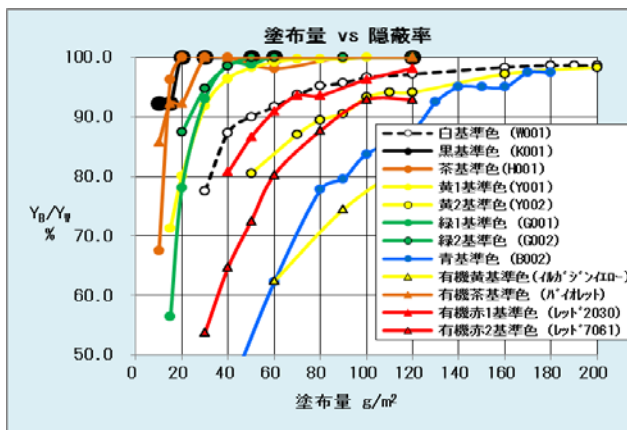
意匠性確保は、塗膜の隠蔽性を確保することが求められるが、塗膜の隠蔽性については、塗料JISにおいて下表の規格がある。

塗料種	試験方法	品質基準
K5659 :2008 鋼構造物用耐候性塗料	JIS K5600-4-1隠ぺい率試験紙法： 白地・黒地の4ヶ所について三刺激値Yを測定し、 Y_B/Y_W の百分率を求める。	白・淡彩は90以上 淡彩とは、白エナメルを主成分として作った塗料の塗膜に現れる、灰色、桃色、クリーム色、うすい緑色、水色などのようにうすい色で、明度Vが6以上9未満のもの。 鮮明な赤及び黄色は50以上 その他の色は80以上
K5658 :2002 建築用ふっ素樹脂塗料		白・淡彩は90以上 他色の規定なし
K5656 :2003 建築用ポリウレタン樹脂塗料		白・淡彩は90以上 他色の規定なし

D&Dが規定している淡色は、Nグループは明度6.0以上、他の色は明度7以上・彩度4以下なので微妙に違うものの淡彩と同じと考えることはできる。

一方、パージエイトHS-100基準色について塗布量と三刺激値の測定データから、下記の如く青系以外は60 g/m^2 以上の塗布量で、塗膜の隠蔽性は塗料JIS品質基準を満足しうる。

塗料JIS隠蔽性基準	測定データに基づく判断
白・淡彩は90以上	① 白は60 g/m^2 塗布で、 $Y_B/Y_W > 90$ を確保し、青以外の無機顔料系は白以上の隠蔽率を持っていることより、青系以外の淡彩色は60 g/m^2 塗布で、JIS基準を満足し得る。 ② 青は120 g/m^2 塗布で、隠蔽率87.8%であることより、青系淡彩色は、120 g/m^2 塗布が無難と考える。
鮮明な赤および黄色は50以上	① 有機顔料系において、60 g/m^2 以上であればJIS基準を満足し得る。
その他の色は80以上	① 青系以外は、60 g/m^2 以上でJIS基準を満足し得る。 ② 青系は120 g/m^2 以上が必要と考えられ、塗布量低減には色彩毎の評価が必要。



防錆性は塗布作業におけるピンホール発生を防ぐことで問題ない(塗膜厚みによる耐用年数への影響はある)ことより、上記塗膜隠蔽性から60g/m²塗布を最少塗布量とする。

4. 防錆防食溶射における封孔剤必要量

上記1.2.3.を総合的に考慮し、皮膜品質目標をⅡ②とした場合の封孔剤必要量を求めると

項目	目標値
目標膜厚 μm	100
最低膜厚 μm	70
目標膜厚以上の確率 %	90<

	溶射皮膜品質			
	良好	標準	やや良くない	
溶射皮膜の品質				上記Ⅲの溶射結果を標準と設定
皮膜の気孔率 vol%	20	20	20	
皮膜厚み 凹凸差 μm	60	80	100	
100 μm < %	90	90	90	
平均厚み μm	114	120	126	
最大厚み μm	144	160	176	
最小厚み μm	84	80	76	
封孔剤必要量 g/m ²				
溶射皮膜封孔	25.5	26.9	28.2	クリアベース
皮膜凹凸埋め	80.0	110.0	140.0	カラーベース
意匠性塗膜	60.0	60.0	60.0	カラーベース
上記合計	165.5	196.9	228.2	
作業ロス(刷毛・ローラー)	10%として			
封孔剤必要量	182.1	216.6	251.0	

