

## 溶射封孔の耐用年数について

### I. 溶射皮膜および封孔・塗装の仕様

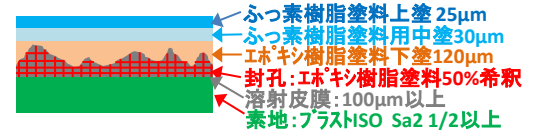
溶射皮膜の封孔剤および塗料塗布量は

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

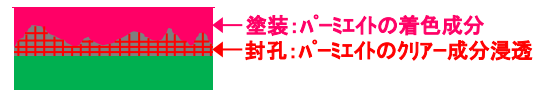
によって大きく影響されるが、鋼道路橋塗装防食便覧においては右図の仕様例が記載されており、溶射皮膜の封孔後に3層の塗装となっている。

一方、無機系封孔剤パーミットは、右図の通り、着色系を塗布することにより、クリア成分のみが溶射皮膜の細孔へ浸透・硬化して細孔を塞ぎ、皮膜上に残った着色液が硬化することで根付の塗膜を形成する。

鋼道路橋塗装防食便覧Ⅱ-40の仕様例



パーミットによる封孔塗装



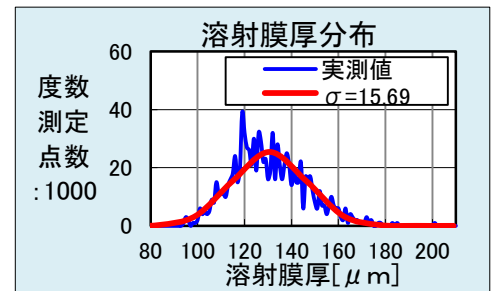
但し、パーミットによる封孔塗装における封孔剤使用量については、気孔率・溶射皮膜の凹凸が大きな影響を持つので、以下に、これらの定量的解析を踏まえた適正使用量について検討する。

#### 1. 溶射皮膜の凹凸

1m \* 1m角3.2mm厚さSS400板をISO2 1/2に準拠してプラスト(研削材: スチールグリット)してSm/Rz<4、Rz>40の粗面を形成し、熟練の溶射技術者に下表の目標値を設定してZn/Al擬合金アーク溶射を行って頂いた結果、下表の右項の結果を得た。

項目	目標値	実測値
目標膜厚 μm	100	
平均膜厚 μm		131
最低膜厚 μm	70	94
最高膜厚 μm		201
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サント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。



この結果は、上グラフの如く標準偏差15.69の正規分布にほぼ合致しているが、これをベースとして凹凸差大小による溶射皮膜特性を算定すると下表の如くとなる。

標準偏差	11.20	15.69	20.50
最大厚みに対応する偏り $U_i$ ( $\sigma=U_i$ で、測定1点/1000点の外れありを意味している)	1.92	2.54	3.20
において			
最大皮膜厚み μm	144	160	176
最小皮膜厚み μm	84	80	76
皮膜凹凸差 μm	60	80	100
皮膜厚み平均 μm	114	120	126

#### 2. 溶射皮膜の気孔率と封孔剤使用量

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が、本検討はアーク・フレーム溶射による防錆防食溶射(気孔率は10~20vol%程度)を対象としているので、気孔率としては最大の20vol%を設定する。

そこで、溶射皮膜の平均厚みと気孔率によるパーミット浸透量を求めると下表の如くとなる。

$$\text{パーミット浸透量} = \text{皮膜厚み } \mu\text{m} * \text{気孔率vol\%}$$

溶射皮膜の 平均厚み $\mu\text{m}$	気孔率 vol%	ハ°-ミエト浸透 量 $\text{g}/\text{m}^2$
130	20	29.1

HS-100クリアー比重: 1.12

皮膜厚み平均を130  $\mu\text{m}$ と設定した理由は下記5.を参照願う。

### 3. 溶射皮膜の凹凸を埋めるために必要な封孔剤量

この凹凸を埋めるに必要な封孔剤量は、最大凹凸差の50%の凹凸を埋める必要があることより

$$\text{封孔剤量} \text{g}/\text{m}^2 = \text{凹凸差} \mu\text{m} * 0.5 * \text{ハ°-ミエト比重} * 2.0$$

最後尾の2.0は硬化時の体積収縮による塗布量増大率

HS-100クリアー比重: 1.40

となり、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 $\mu\text{m}$	40	60	80	100	120
封孔剤必要量 $\text{g}/\text{m}^2$	56.0	84.0	112.0	140.0	168.0

### 4. 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 鋼構造物用耐候 :2008 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、 YB/YWの百分率 を求める。	白・淡彩は90以上 淡彩とは、白エナルを主成分として 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 建築用ふっ素樹 :2002 脂塗料		白・淡彩は90以上 他色の規定なし
K5656 建築用ポリウレタン樹 :2003 脂塗料		白・淡彩は90以上 他色の規定なし

一方、ハ°-ミエト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 $\text{g}/\text{m}^2$ 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ことより、60 $\text{g}/\text{m}^2$ を上塗り必要量と設定する。

### 5. 防錆防食溶射における封孔剤必要量

上記1~4を総合的に考慮し、皮膜品質目標を下表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 $\mu\text{m}$	100
最低膜厚 $\mu\text{m}$	70
目標膜厚以上の確率 %	90<

	溶射皮膜品質		
	良好	標準的	やや良くない
溶射皮膜の品質			
皮膜の気孔率 vol%	20	20	20
皮膜厚み 凹凸差 $\mu\text{m}$	60	80	100
100 $\mu\text{m}$ < %	90	90	90
平均厚み $\mu\text{m}$	114	120	126
最大厚み $\mu\text{m}$	144	160	176
最小厚み $\mu\text{m}$	84	80	76
封孔剤必要量 $\text{g}/\text{m}^2$			
溶射皮膜封孔	25.5	26.9	28.3
皮膜凹凸埋め	80.0	110.0	140.0
意匠性塗膜	60.0	60.0	60.0
上記合計	165.5	196.9	228.3
作業ロス(刷毛・ローラー)	10%として		
封孔剤必要量	182.1	216.6	251.1

上記1.の溶射結果を標準と設定

クリアーベース  
カラーベース  
カラーベース

## II. 防食維持耐用年数の算定

### 1. 溶射皮膜の耐用年数の考え方

溶射皮膜の損耗速度は、暴露環境、皮膜組成、皮膜の緻密性、封孔性能等により大きく変動するが、

本検討は鋼構造物に対する防錆防食溶射であり、使われる溶射金属は、一般的に海上鋼構造物においてはAl、他の鋼構造物においてはZn、Zn/Al合金等が使われているが、一般的な金属の腐食速度は下記の如くであると言われており、基材および環境によって大きく変わっている。

	腐食速度 g/m <sup>2</sup> ・年			出典
	都市工業地帯	臨海地帯	田園地帯	
0.2%炭素鋼	96.0			「腐食反応とその制御(HHユーク)」 Page134
亜鉛	41.4	12.6	8.1	
アルミニウム	2.0	1.7	0.2	
普通炭素鋼	137.7		74.8	「防錆防食技術総覧」Page100
亜鉛めっき	34.0	13.0	10.0	「鋼構造物の溶融亜鉛めっきQ&A」Page7

一方、亜鉛と亜鉛・アルミ合金との腐食速度データ、更には溶射皮膜の腐食速度について纏められた文献は少なく、且つ封孔処理がされた系でのデータは殆どないが、下表の文献等から

- 1) Znのみに比して、Alを添加した場合はめっきにおいてその腐食速度は約20%程度まで大きく低減できている。；下表文献の1～3
- 2) 溶射皮膜は、その気孔を封孔することにより被腐食面積を大きく低減できることから、腐食速度を大きく低減できるはず。

平均100μm厚さの溶射皮膜1m<sup>2</sup>(Rz=20.0μm、Sm=100.0)において、気孔率が20%、気孔の平均径が5μmの場合

		被腐食面積 m <sup>2</sup>		
		皮膜表面	気孔壁面	合計
溶射皮膜	封孔なし	2.15	101.91	104.06
	封孔処理	1.72	0.00	1.72
亜鉛めっき		1.00	0.00	1.00

但し、亜鉛めっきに比べて封孔処理しても被腐食面積は増大する。

- 3) 下表文献4におけるZn/Al合金めっきの腐食速度を20とすると、無封孔のZn/Alの腐食速度は約5～10倍となり、細孔の存在が腐食速度に大きく影響していることが理解できる。
- 4) 下記文献5は、溶射皮膜は封孔処理により腐食速度は無封孔の約50%に低減すると提示している。

但し、無封孔溶射皮膜の腐食速度が亜鉛めっきに比べて小さいことには疑問が残る。

文献5は、MS工法における評価結果であり塗料希釈型封孔剤を使用しているため、細孔の完全封孔はできていないはずであり、完全な封孔により更に腐食速度は低減できるはず。

溶融亜鉛めっきの腐食速度を100として取り纏め:数字が小さいほど腐食速度は小	溶融めっき		溶射			
	Zn	ZnAl合金	Zn/Al (50:50)		Al	ZnAl合金 (50:50)
			無封孔	封孔	無封孔	無封孔
1 塩水噴霧試験 高沢麻佳ほか: 海岸地帯における亜鉛アルミニウム合金めっき鋼の耐食性に関する一考察、Zairyo-to-Kankyo,40,470-477,(1991)	100	6 Zn:Al=70:30				
2 塩水噴霧試験 JFEホームページ提示値	100	18 Zn:Al=45:55				
3 大気暴露試験8年:工業都市地域 鉄鋼連盟:亜鉛系めっき鋼板ご使用の手引きH26/2改訂版	100	23 Zn:Al=45:55				
4 塩水噴霧試験 100μm厚さの耐用年数Min値 伊藤義人ほか:鋼橋に用いられる金属防食被膜の腐食耐久性に関する基礎的研究、土木学会第59回年次学術講演会(H16.9)、100μm耐用年数のMin値引用	100 4		200 2		31 13	100 4
5 キヤス試験 鋼橋の常温金属溶射設計・施工マニュアル(案)2001/4 Page29::土木構造物常温溶射研究会	100		69	34	33	

また、「重防食塗料ガイドブック第3版」Page159において、無機ジンクリッチペイント塗膜の厳しい腐食環境に暴露した場合の寿命は15年であると記述されているが、これは亜鉛の腐食速度と比較するとほぼ同じ腐食速度であることが分かる。

ジンクリッチ塗膜厚さ75 $\mu$ mであるので、これを全て亜鉛であると設定して、腐食速度を求めてみると  

$$75/1000 * 7.21/15 = 36.1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$$
 となり、上表の亜鉛めっき：都市工業地帯の腐食速度とほぼ同じである。

上記より、本検討においては、完全封孔されたZn/Al溶射皮膜の腐食速度は、

- ① 無封孔においては、熔融亜鉛めっきの2倍の腐食速度；文献4引用
- ② 完全封孔処理により、腐食速度は無封孔時の50%に低減

を採用し、結果として熔融亜鉛めっきおよび無機系ジンクリッチペイント塗膜と同等と設定する。

## 2. 封孔/塗装塗膜の耐用年数の考え方

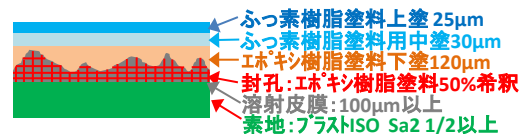
塗装の耐用年数については、日本塗料工業会「重防食塗料ガイドブック」Page154～168において、紫外線による塗膜の消耗速度から耐用年数を算出する手法が提案されており、その考え方をベースとして、C5系等各種有機塗装系およびパージエイト塗装系について「塗装の耐用年数算定根拠」において、それらの耐用年数を算定しています。

なお、「塗装の耐用年数算定根拠」は、鋼、亜鉛めっき等微細孔がない基材への表面付着を基本としている所謂塗装についての耐用年数であることより、パージエイト塗膜は30年超（現時点の技術では60 $\mu$ m厚さ塗膜では50年程度で微小クラック発生）にて目視では確認できない微小クラックを発生する恐れがあるので、34 $\mu$ m以上厚さの塗膜については耐用年数はMax30年と設定しています。

一方、パージエイトの溶射封孔塗膜は、溶射皮膜への根付塗膜となることにより、塗装塗膜のような微小クラックを100年以上にわたり発生することがないことを確認している（溶射皮膜の可撓性によるであろうと推察）ことから、「塗装の耐用年数算定根拠」にて設定した紫外線による劣化速度 0.9 $\mu$ m/年をベースとして耐用年数を算定する。

## 3. 溶射封孔の防食維持耐用年数算定の考え方

上記 I において記述した様に、溶射皮膜には凹凸があるため、塗装塗膜表面から鋼基材までの塗装塗膜と溶射皮膜の配分は場所によって異なり、塗装塗膜と溶射皮膜の劣化速度が異なることにより、場所によって耐用年数が異なることになる。



そこで、本検討においては、溶射皮膜の凹凸を80 $\mu$ mと設定し、溶射皮膜の最大厚さ部160 $\mu$ m、最小厚さ部80 $\mu$ m、平均厚さ120 $\mu$ mにおける耐用年数を算定すると、各部位の溶射皮膜および塗装塗膜（塗料種毎）の厚さは下表の通りとなる。

鋼道路橋塗装防食便覧Ⅱ-40の仕様例

	厚さ $\mu$ m		
溶射皮膜	160	120	80
エポキシ樹脂下塗	80	120	160
ふっ素樹脂用中塗	30	30	30
ふっ素樹脂	25	25	25
合計	295	295	295

パージエイトによる封孔塗装

	厚さ $\mu$ m		
溶射皮膜	160	120	80
パージエイト凹凸埋め	15	55	95
意匠性塗膜	30	30	30
合計	205	205	205



#### 4. 溶射封孔の防食維持耐用年数算定

各仕様の耐用年数を算定すると

- 1) 鋼道路橋塗装防食便覧Ⅱ-40の仕様例においては、下塗り・中塗り塗装の劣化速度が大きいため、溶射皮膜凹部の耐用が短期化し、且つ平均としても短期耐用。
- 2) パーミイ封孔は、パーミイの劣化速度が溶射皮膜より小さいため溶射皮膜凸部の耐用が短期化するが、平均として長期耐用可能。

鋼道路橋塗装防食便覧Ⅱ-40の仕様例

		溶射皮膜厚さ	Max.	Ave.	Min.	算定根拠等	
皮膜・塗膜仕様	溶射皮膜	μm	160	120	80	Zn/Al擬合金	
	エポキシ樹脂下塗り	μm	80	120	160		
	ふっ素樹脂用中塗り	μm	30	30	30		
	ふっ素樹脂	μm	25	25	25		
	合計	μm	295	295	295		
						塗装塗膜厚さは塗布バラツキ考慮し0.8掛け	
耐用年数	溶射皮膜	Y	17.0	12.7	8.5	無機系ゾンクリッチペイント耐用年数ベース 75 μm/15Y*補正0.53	
	エポキシ樹脂下塗り	Y	3.4	5.1	6.8		劣化速度 10.0 μm/Y*補正0.53
	ふっ素樹脂用中塗り	Y	1.3	1.3	1.3		劣化速度 10.0 μm/Y*補正0.53
	ふっ素樹脂	Y	10.6	10.6	10.6		劣化速度 1.0 μm/Y*補正0.53
	ふっ素補正	Y	5.0	5.0	5.0		5 Y
合計	Y	37.3	34.7	32.2			

溶射皮膜厚さのMax.及びMin.は、出現確率が1/1000と極小さく設定しており、出現確率を各々5%とすると、Max.は148 μm、Min.は103 μmとなる。

#### パーミイによる封孔塗装

		溶射皮膜厚さ	Max.	Ave.	Min.	算定根拠等	
皮膜・塗膜仕様	溶射皮膜	μm	160	120	80	Zn/Al	
	パーミイ凹凸埋め	μm	15	55	95		
	意匠性塗膜	μm	30	30	30		
	合計	μm	205	205	205		
						塗装塗膜厚さは塗布バラツキ考慮し0.8掛け	
耐用年数	溶射皮膜	Y	17.0	12.7	8.5	無機系ゾンクリッチペイント耐用年数ベース 75 μm/15Y*補正0.53	
	パーミイ凹凸埋め	Y	13.3	48.9	84.4		劣化速度 0.9 μm/Y
	意匠性塗膜	Y	14.1	14.1	14.1		劣化速度 0.9 μm/Y
	合計	Y	44.4	75.7	107.0		

溶射皮膜厚さのMax.及びMin.は、出現確率が1/1000と極小さく設定しており、出現確率を各々5%とすると、Max.は148 μm、Min.は92 μmとなる。

よって、出現確率を5%とした場合の耐用年数を算定すると下表の通りとなり、凸部の耐用年数は10年程度延長する。

		溶射皮膜厚さ	Max.	Ave.	Min.	算定根拠等	
皮膜・塗膜仕様	溶射皮膜	μm	148	120	92	Zn/Al	
	パーミイ凹凸埋め	μm	27	55	83		
	意匠性塗膜	μm	30	30	30		
	合計	μm	205	205	205		
	パーミイ塗布量	g/m <sup>2</sup>		217			溶射皮膜封孔 27 g/m <sup>2</sup> 作業ロス 20 g/m <sup>2</sup> 含む
耐用年数	溶射皮膜	Y	15.7	12.7	9.8	無機系ゾンクリッチペイント耐用年数ベース 75 μm/15Y*補正0.53	
	パーミイ凹凸埋め	Y	24.0	48.9	73.8		劣化速度 0.9 μm/Y
	意匠性塗膜	Y	14.1	14.1	14.1		劣化速度 0.9 μm/Y
	合計	Y	53.8	75.7	97.7		

### Ⅲ. ハーミット封孔において100年防食維持耐用とするには

#### 1. 溶射皮膜を厚くすることにより、凸部出現率5%において100年対応

溶射皮膜平均厚さを560  $\mu\text{m}$ 程度とすることにより100年対応は可能なれど、**施工費が非常に高くなるので現実的ではない。**

溶射皮膜厚さ		Max.	Ave.	Min.	算定根拠等
皮膜・塗膜仕様	溶射皮膜 $\mu\text{m}$	584	556	528	Zn/Al 塗装塗膜厚さは塗布バラツキ考慮し0.8掛け
	ハーミット凹凸埋め $\mu\text{m}$	27	55	83	
	意匠性塗膜 $\mu\text{m}$	30	30	30	
	合計 $\mu\text{m}$	641	641	641	
耐用年数	溶射皮膜 Y	61.9	58.9	56.0	無機系ゾクリッチペイント耐用年数ベース 75 $\mu\text{m}/15\text{Y}$ *補正0.53 劣化速度 0.9 $\mu\text{m}/\text{Y}$
	ハーミット凹凸埋め Y	24.0	48.9	73.8	
	意匠性塗膜 Y	14.1	14.1	14.1	
	合計 Y	100.0	121.9	143.9	

#### 施工費の概算

	一般的仕様		100年対応仕様	
溶射平均厚さ	120 $\mu\text{m}$		560 $\mu\text{m}$	
	工程仕様	m2単価	工程仕様	m2単価
溶射用プラスト	1回	1,600	1回	1,600
溶射	120 $\mu\text{m}$ * 1回	10,000	120 $\mu\text{m}$ * 5回	50,000
封孔	110 g/m2* 2回	6,000	110 g/m2* 2回	6,000
工事費合計		17,600		57,600

#### 2. 溶射は変えず封孔剤塗布量の増加による100年対応

ハーミット塗布量を約2倍(440g/m<sup>2</sup>)とすることにより対応可能。**塗膜厚さが110  $\mu\text{m}$ 増加するだけであり、施工費のアップは30%程度。**

溶射皮膜厚さ		Max.	Ave.	Min.	算定根拠等
皮膜・塗膜仕様	溶射皮膜 $\mu\text{m}$	148	120	92	Zn/Al 塗装塗膜厚さは塗布バラツキ考慮し0.8掛け
	ハーミット凹凸埋め $\mu\text{m}$	27	55	83	
	意匠性塗膜 $\mu\text{m}$	130	130	130	
	合計 $\mu\text{m}$	305	305	305	
	ハーミット塗布量 g/m <sup>2</sup>		437		
耐用年数	溶射皮膜 Y	15.7	12.7	9.8	無機系ゾクリッチペイント耐用年数ベース 75 $\mu\text{m}/15\text{Y}$ *補正0.53 劣化速度 0.9 $\mu\text{m}/\text{Y}$
	ハーミット凹凸埋め Y	24.0	48.9	73.8	
	意匠性塗膜 Y	61.2	61.2	61.2	
	合計 Y	100.9	122.8	144.8	

#### 施工費の概算

	一般的仕様		100年対応仕様	
溶射平均厚さ	120 $\mu\text{m}$		120 $\mu\text{m}$	
	工程仕様	m2単価	工程仕様	m2単価
溶射用プラスト	1回	1,600	1回	1,600
溶射	120 $\mu\text{m}$ * 1回	10,000	120 $\mu\text{m}$ * 1回	10,000
封孔	110 g/m2* 2回	6,000	110 g/m2* 4回	12,000
工事費合計		17,600		23,600

3. Zn/Al擬合金溶射からZn/Al合金溶射へ変更し、封孔剤塗布量の調整による100年対応  
 II-1の文献4によればZn/Al擬合金溶射よりZn/Al合金溶射とすれば腐食速度は50%に低下するとのことであるので(封孔処理)、これを是として評価試行。

ハ-ミエト塗布量を約1.6倍(360g/m<sup>2</sup>)とすることにより対応可能。塗膜厚さが70 μm増加するだけであり、**施工費のアップは30%程度**。

溶射皮膜厚さ		Max.	Ave.	Min.	算定根拠等
皮膜・塗膜仕様	溶射皮膜 μm	148	120	92	Zn/Al合金
	ハ-ミエト 凹凸埋め μm	27	55	83	
	意匠性塗膜 μm	96	96	96	塗装塗膜厚さは塗布バラツキ考慮し0.8掛け
	合計 μm	271	271	271	
	ハ-ミエト塗布量 g/m <sup>2</sup>		362		溶射皮膜封孔 27 g/m <sup>2</sup> 作業ロス 33 g/m <sup>2</sup> 含む
耐用年数	溶射皮膜 Y	31.4	25.4	19.5	無機系ゾクリッチペイント耐用年数ベース 37.5 μm/15Y*補正0.53
	ハ-ミエト 凹凸埋め Y	24.0	48.9	73.8	劣化速度 0.9 μm/Y
	意匠性塗膜 Y	45.2	45.2	45.2	劣化速度 0.9 μm/Y
	合計 Y	100.6	119.5	138.5	

#### 施工費の概算

溶射平均厚さ	一般的仕様		100年対応仕様	
	工程仕様	m <sup>2</sup> 単価	工程仕様	m <sup>2</sup> 単価
120 μm			120 μm	
溶射用プラスト	1回	1,600	1回	1,600
溶射	120 μm * 1回	10,000	120 μm * 1回	11,000
封孔	110 g/m <sup>2</sup> * 2回	6,000	120 g/m <sup>2</sup> * 3回	8,900
工事費合計		17,600		21,500