

アルミニウム溶射における溶射工法による付着塩分特性の検討

INVESTIGATION OF ADHESION SALT CONTENT CHARACTERISTICS BY THERMAL SPRAYING METHOD IN THERMAL SPRAYED ALUMINUM COATING

○桑名 弘暁^{*1} 新免 謙一^{*2} 蓮池 里菜^{*3} 麻生 稔彦^{*4}
Hiroaki KUWANA^{*1} Kenichi SHINMEN^{*2} Rina HASUIKE^{*3} Toshihiko ASO^{*4}

ABSTRACT The effect of the selection of the thermal sprayed aluminum coating method, which is used as a corrosion prevention measure for steel bridges, on the corrosion resistance of the coating is not well understood. In this study, we observed the surface characteristics of the sprayed coating formed by gas flame spraying method and arc spraying method, which are among the thermal sprayed aluminum coating methods, and compared the amount of adhesion salts deposition under high salinity environment.

Keywords: アルミニウム溶射, ガスフレーム式溶射, アーク式溶射, 付着塩分量
Thermal sprayed aluminum coating, Gas flame spray, Arc spray, Adhesion salts

1. はじめに

鋼橋の防食方法のうち、沿岸部など特に厳しい腐食環境下においては金属溶射が採用されることが多くなっている[1]。金属溶射に用いられる溶射金属には亜鉛やアルミニウムなど犠牲防食効果を持つ金属が用いられており、その中でもアルミニウム溶射は厳しい塩分環境においても耐食性に優れることから日本でも多く適用されているが、近年アルミニウム溶射を施された鋼橋においても部分的な劣化が確認されるようになった[2]。アルミニウム溶射を含む金属溶射被膜の耐食性については促進試験や大気暴露試験にて長期防食性能が確認されているものの[3~7]、アルミニウム溶射が鋼橋へ適用されてか

らの歴史は浅いため、実橋での劣化においては環境や施工方法など種々の要因が想定され不明な点も多く、維持管理技術も十分に確立されていない。鋼橋へのアルミニウム溶射工法として、大型構造物に対する施工性より主にガスフレーム式溶射法またはアーク式溶射法が用いられている。工法は施工効率や施工条件により選定されており、工法の選定により皮膜特性に差が生じることは確認されているものの[8]、皮膜の防食性能に与える影響についての知見は十分に得られてはいない。

本検討では、アルミニウム溶射のガスフレーム式溶射法とアーク式溶射法による溶射皮膜表面性状について、皮膜損傷に大きく影響する塩分に対しその付着特性に着目した。実橋梁において、橋梁形式・建設時期・防錆仕様が同様に、溶射工法の違いのある2橋の付着塩分量を計測し比較を行った。また、溶射工法別の試験片を作成し、表面性状の観察および高塩分環境下における塩分付着量の比較を行い、工法による塩分付着特性を検討した。

2. 実橋調査

2.1 橋梁概要

実橋調査は、瀬戸内海の河口部に建設され、建設後約18年が経過した鋼少数鉸橋の2つ橋

^{*1} 第1種正会員

UBE マシナリー株式会社 橋梁・鉄構事業部
(〒755-8633 山口県宇部市大字小串字沖の山1980)

^{*2} 株式会社新免鉄工所

(〒555-0013 大阪市西淀川区千舟3-9-7)

^{*3} 第2種正会員

博士(工学) 山口大学大学院創成科学研究科助教

(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

^{*4} 第2種正会員

博士(工学) 山口大学大学院創成科学研究科教授

(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

表1 建設当時の防錆仕様

対象	工程	塗料名	色	使用量 (g/m ²)	工法	皮膜厚 (μm)
橋梁1	素地調整	プラスト処理: ISO Sa3.0	—			
	金属溶射	Al>99.70(%)	—		ガスフレーム式溶射法 (自動溶射)	160
	封孔処理(1層目)	封孔処理(無機系)	Clear	200	スプレー	—
	封孔処理(2層目)	封孔処理(無機系)	Clear	200	スプレー	—
橋梁2	素地調整	プラスト処理: ISO Sa3.0	—			
	金属溶射	Al>99.70(%)	—		アーク式溶射法 (自動溶射)	160
	封孔処理(1層目)	封孔処理(無機系)	Clear	200	スプレー	—
	封孔処理(2層目)	封孔処理(無機系)	Clear	200	スプレー	—



図1 架け違い部概要

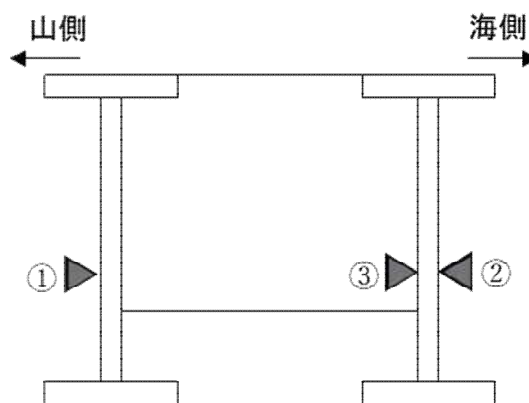


図2 付着塩分計測結果

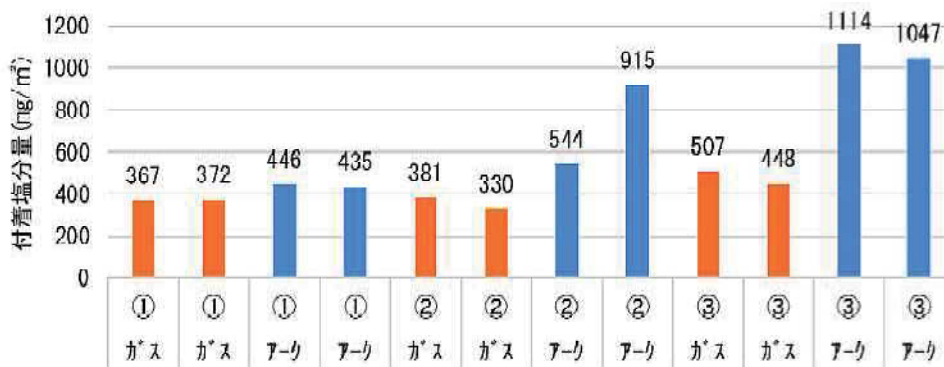


図3 付着塩分計測結果

梁の架け違い部を対象に行った。対象橋梁は2橋ともに、アルミニウム溶射被膜(目標膜厚160μm以上)の上にはけい素系化合物を主成分とする無機系樹脂塗料にて封孔処理されており、上塗り塗装等は行われていない橋梁である。アルミニウム溶射工法はそれぞれ、橋梁1はガスフレーム式溶射工法、橋梁2はアーク式溶射工法を採用しており、大部分を自動溶射にて施工されている。対象橋梁の建設当時の防錆仕様を表1

に示す。

2.2 付着塩分量計測方法

対象橋梁の架け違い部(ガスフレーム式溶射法およびアーク式溶射法の工法境部、図1)における付着塩分量を計測した。計測箇所は雨による洗い流し効果が期待できる少数鉸桁橋の外側(①山側・②海側)のウェブおよび、洗い流し効果が期待できない内側(③海側)のウェブ位置で計測した。計測箇所を図2に示す。付着塩分量計測は表

面塩分計 (SNA-3000 サンコウ電子研究所製) を使用し、1箇所あたり2回の計測を行った。

2.3 付着塩分量計測結果

付着塩分計測結果を図3に示す。ガスフレーム式溶射橋梁、アーク式溶射橋梁ともに、桁外側と比較して水洗い効果の期待できない桁内側において高い付着塩分量であった。計測箇所別の比較において、全ての箇所でガスフレーム式溶射法橋梁と比較してアーク式溶射法橋梁で付着塩分量が大きい。特に水洗い効果が期待できない桁内側③において、ガスフレーム式溶射法橋梁は付着塩分量が500mg/m²程度であるのに対し、アーク式溶射法橋梁は付着塩分量が1000mg/m²を超え、2倍以上の付着塩分量である。

3. 試験片観察

3.1 試験片概要

アルミニウム溶射の工法別の表面性状を観察するため、表面にガスフレーム式溶射法およびアーク式溶射法によりアルミニウム溶射 (目標膜厚160μm) を施した試験片を作成した。試験片は150×75×3.2mmのSS400とした。手溶射、溶射ガンの離隔300mm、下向き鉛直方向の施工条件にてガスフレーム式溶射法およびアーク式溶射法それぞれの試験片を作成した。また、溶射表面に封孔処理 (無機系, Hiクリヤー) を施した試験片も作成し、封孔処理の有無による影響も検討することとした。試験片概要を表2に示す。

表2 試験片概要

No.	仕様	素地調整程度	施工方法	封孔処理	目標膜厚(μm)	計測膜厚(μm)
1	アルミニウム溶射 Al>99.7%	ISO Sa3	ガスフレーム式溶射法	なし	160	203
2						215
3				あり(無機系)	160	253
4						240
5			アーク式溶射法	なし	160	195
6						252
7				あり(無機系)	160	248
8						263

表3 表面粗さ測定結果

No.	施工方法	封孔処理	Sq[μm]	Sku	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]	Sdq	Sdr[%]
1	ガスフレーム式溶射法	なし	25.3	2.9	98.6	71.0	169.7	20.4	9.2	390.0
2			29.9	2.7	97.8	87.5	185.2	24.0	9.4	395.4
3		あり(無機系)	15.3	3.5	87.6	75.7	163.3	11.8	5.3	205.3
4			18.5	2.9	72.4	71.8	144.3	15.1	5.1	212.1
5	アーク式溶射法	なし	29.4	3.4	127.9	91.6	219.4	23.1	9.0	353.1
6			29.3	3.4	108.2	119.2	227.3	22.7	8.6	330.1
7		あり(無機系)	30.7	3.5	118.7	104.4	223.2	23.7	10.6	359.3
8			26.6	4.3	169.5	106.6	276.1	20.2	10.7	352.4

Sq(μm) : 二乗平均平方根高さ/平均面からの距離の標準偏差に相当

Sku : クルトシス(尖り度)/高さ分布の鋭さ

Sp(μm) : 最大山高さ/表面の平均面からの高さの最大値の絶対値

Sv(μm) : 最大谷高さ/表面の平均面からの高さの最小値の絶対値

Sz(μm) : 最大高さ/表面の最も高い点から最も低い点までの距離

Sa(μm) : 算術平均高さ/表面の平均面に対して、各点の高さの差の絶対値の平均

Sdq : 二乗平均平方根傾斜/定義領域のすべての点における傾斜の二乗平均平方根により算出されるパラメータ

Sdr(%) : 界面展開面積比/定義領域の展開面積(表面積)が、定義領域の面積に対してどれだけ増大しているか

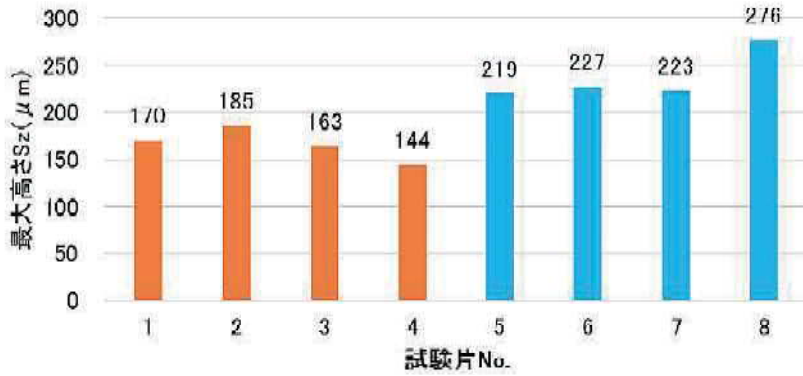


図4 試験片表面最大高さ Sz

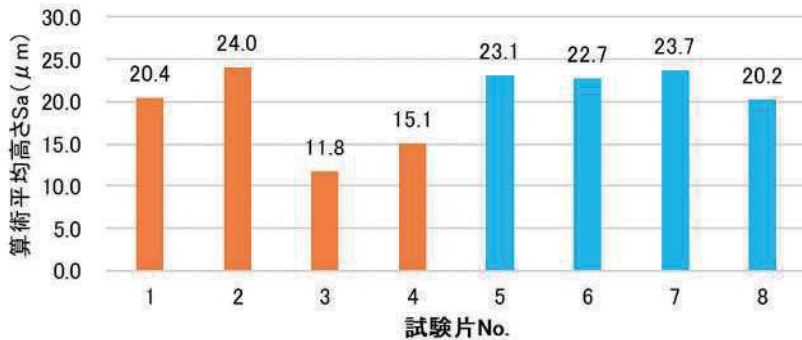


図5 試験片表面算術平均高さ Sa

3.2 試験片表面観察

ガスフレーム式溶射法およびアーク式溶射法による表面凹凸の差異および、封孔処理の有無による表面形状の変化をレーザー顕微鏡 (LEXT OLS5100-EAT) により観察した。観察範囲は試験片中央部 (5 mm×5mm) の範囲とした。表面粗さの測定結果を表3に示す。

試験片毎の皮膜表面の最大高さ (Sz) 比較を図4に示す。アーク式溶射法では219~276 μmと全て200 μm以上であるのに対し、ガスフレーム式溶射法は144~185 μmと全て200 μmを下回った。算術平均高さ (Sa) の比較を図5に示す。アーク (封孔処理なし・あり) およびガスフレーム (封孔処理なし) は20 μm以上を示したが、ガスフレーム (封孔処理あり) のみ20 μmを下回った。封孔処理はアーク式溶射法の場合は表面粗度の変化の有無は確認できなかったが、ガスフレーム式溶射法の場合に表面粗度を低下させる効果があると推定できる。

4. 試験片付着塩分量計測

4.1 計測方法

表面観察を行った試験片に対し、複合サイクル

試験にて人工的に塩分を付着させ、付着塩分量を計測した。

複合サイクル試験はJIS H 8502 (めっきの耐食性試験方法/中性塩水噴霧サイクル試験方法) に基づき、塩水噴霧 (2時間)、乾燥 (4時間)、湿潤 (2時間) を1サイクルとし、30サイクル (240時間) 実施した。複合サイクル試験後、試験片の中央付近に対し、表面塩分計 (SNA-3000 サンコウ電子研究所製) を使用して付着塩分量を計測した。

4.2 計測結果

複合サイクル試験前後の試験片写真を図6に、試験片の付着塩分量をそれぞれ表4に示す。外観において、ガスフレーム式溶射法およびアーク式溶射工法ともに、封孔処理を施した試験片において試験前後で明確な変化は見られなかったが、封孔処理を施していない試験片では全体的に暗めの色に変色していた。全ての試験片において付着塩分量は計測器の測定限界である1999mg/m²を示した一方、付着塩分量と比例関係にある電気伝導率 (ms/cm) ではガスフレーム式溶射法が0.55~0.66ms/cmであるのに対し、アーク式溶射法が0.92~2.02ms/cmと大きな値を示し、アーク式溶射法










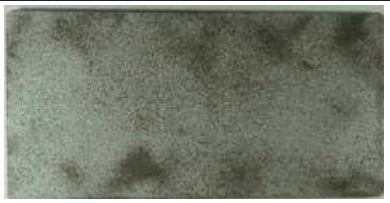






No.	施工方法	封孔処理	複合サイクル試験前	複合サイクル試験後
1	ガスフ レーム 式溶射法	なし		
2				
3		あり (無機系)		
4				
5	アーク 式溶射法	なし		
6				
7	アーク 式溶射法	あり (無機系)		
8				

図6 試験片写真

表4 試験片付着塩分量

No.	施工方法	封孔処理	付着塩分量(mg/m ²)	電気伝導率(ms/cm)
1	ガスフレーム式溶射法	なし	1999	0.62
2			1999	0.55
3		あり(無機系)	1999	0.65
4			1999	0.66
5	アーク式溶射法	なし	1999	1.90
6			1999	0.92
7		あり(無機系)	1999	1.96
8			1999	2.02

がより大きな付着塩分であることが推定できる。また、封孔処理の有無による付着塩分量の差について、明確な傾向はみられない。

5. まとめ

本検討の溶射工法別溶射皮膜の比較により、以下の知見を得た。

- 1) 実橋梁の付着塩分計測により、雨水による水洗い効果が期待できる桁外側および水洗い効果が期待できない桁内側双方ともに、アーク式溶射法の橋梁がガスフレーム式溶射法の橋梁に対して付着塩分が大きいことを確認できた。特に水洗い効果が期待できない桁内側において、ガスフレーム式溶射法橋梁は付着塩分量が500mg/m²程度であるのに対し、アーク式溶射法橋梁は付着塩分量が1000mg/m²を超える値であり、2倍以上の付着塩分が確認された。
- 2) 溶射試験片皮膜の表面観察により、ガスフレーム式溶射法と比較しアーク式溶射法が高い粗度を示した。アーク式溶射法は封孔処理の有無において表面粗度には明確な差が確認できなかったが、ガスフレーム式溶射法については封孔処理なし試験片と比較して封孔処理有り試験片が低い表面粗度を示した。このことより、ガスフレーム式溶射法に比べてアーク式溶射法は表面粗度が大きくなること、アーク式溶射法は封孔処理により表面粗度が低下しないことが想定されるため、より塩分が付着しやすい表面形状であることが推察される。
- 3) 複合サイクル試験を実施した試験片の付着塩分計測においても、実橋梁の付着塩分計測と同様にアーク式溶射法がガスフレーム式溶射法より高い電気伝導率であり、高い付着

塩分量であることが推察される。

6. 参考文献

- [1] 赤沼正信, 黒田清一: 鋼橋の防食溶射技術, 高温学会誌, Vol. 34, No. 6, pp. 271-276, 2008. 11
- [2] 土木学会: 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策, 2019.
- [3] 伊藤義人, 金仁泰, 肥田達久, 坪内佐織: 鋼橋防食に用いられる金属皮膜の腐食劣化評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 1059-1067, 2005
- [4] 伊藤義人, 肥田達久, 金仁泰: 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回年次学術講演会概要集, pp. 189-190, 2004
- [5] 中野敦, 押川渡, 米沢昇, 森田千尋, 白井敬大: 人工海水を用いた腐食環境下におけるZn-30mass%Al 溶射皮膜の大気暴露特性, 鋼構造論文集, Vol. 27, No. 106, pp. 51-60, 2020
- [6] 貝沼重信, 郭小竜, 小林淳二, 武藤和好, 宮田弘和: NaCl による高腐食性環境におけるAl-5Mg 合金溶射皮膜の耐食・防食特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol. 72, No. 3, pp. 440-452, 2016
- [7] 貝沼重信, 藤本拓史, 杜錦軒, 楊沐野, 武藤和好, 宮田弘和: Al-5Mg 合金溶射と重防食塗装の取合部における耐食・防食特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 2, pp. 496-511, 2017.
- [8] 川口保幸, 宮崎文宏, 山崎正文, 山形幸彦, 小林希, 村岡克紀: Al-5Mg 溶射皮膜に及ぼす溶射粒子の温度と速度の影響, 日本溶射学会誌 溶射, 54 巻 1 号, pp. 1-7, 2017