

鋼構造物の金属溶射による防食

— 高速道路橋などへの応用が広がる防食溶射技術 —

一般社団法人 日本溶射学会事務局長 上野和夫

1. 鋼構造物の金属溶射による防食作用と応用の現状

社会におけるインフラの基盤である鋼構造物は幅広くかつ多様な用途で用いられているが、水と酸素のある環境ではいわゆる“さび”が発生し、放置しておくとも腐食が進行し、倒壊などの危険性を常にはらんでいる。

とくに腐食促進物質 (NO_x ・ SO_x ・塵あい) などが多い工業地帯、海上あるいは、その近辺の塩を含む湿環境下では急速な腐食の進行がみられる。それゆえさまざまな防食の手法が適用されるが、とくに激しい腐食環境において数10年以上の長期防食機能を維持できる表面処理法として、近年盛んに亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金などの金属を溶射法によりコーティングする手法が各方面で信頼を得て、利用される事例が増えている。

これらの溶射法は、“防食溶射法”として知られている。亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金溶射による防錆作用メカニズムは図-1に示すように、おおきくは3つの作用による。

①耐食機能による保護作用

自然の中性環境において亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金溶射皮膜が多用されている最大の理由は、これら金属皮膜の自然電極電位が鉄より卑で、イオンとなって溶出しやすいが、腐食生成物などで覆われて腐食速度が比較的小さくなることに起因している。これは、雨水、炭酸ガス、酸素などの影響をうけて薄膜状態の塩基性炭酸塩に属する化合物を生成し、その後の腐食を抑制する保護皮膜となっている。

②環境遮断作用

溶射皮膜の気孔中に滲入した水分は溶射皮膜金属と反応して水酸化物・酸化物を生成する。金属が化合物になることで体積膨張し、気孔内部がふさがれてしまう。このような自己封孔作用によって、

溶射皮膜は環境遮断作用をしめし、基材にまで水が浸透することを防いで錆を防ぐ。

③電気化学的防食作用 (犠牲陽極作用)

亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金を鉄鋼などの表面に被覆して、基材まで達する傷が入ったとしても、電気化学的な作用により亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金が溶出し、鉄の腐食を防止することができる (犠牲陽極作用)。防食溶射法は多様な鋼構造物に应用されている。亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金系以外の防食溶射を含めて鋼構造物への主な用途は以下のとおりである。

- 1) 橋梁、水門、水管橋、オフショア風力発電鉄塔、沖合石油リグなど大型構造物
- 2) アンテナ塔、表示板、パラポラアンテナ鉄塔など情報通信関係構造物
- 3) アンモニアタンク、硫酸プラントなど化学プラント、連続亜鉛メッキ炉など製鉄関連構造物

施工例として写真-1に沖縄県宮古島と伊良部島を結ぶ伊良部大橋を示す。アルミニウム・マグネシウム合金 (AlMg5) 溶射 $150\mu\text{m}$ 以上が施工された。海上の厳しい環境の中の橋梁であることもあり、溶射後エポキシ樹脂塗装と最外層にはフッ素系ペイントが塗装された。

2. 溶射の原理と溶射法の特徴

溶射法の原理は、「溶融状態に加熱した溶射材料粒子を基材表面に吹き付け皮膜とする表面改質技術の一種」と言える。溶射の「溶」は前段の溶融させることを意味し、「射」は後段の吹き付け (投射、スプレー) に相当する。

したがって良い溶射皮膜を作るには十分な溶融状態を作るための高温状態と、吹き付けるための高速状態が必要となる。

図-2に溶射の原理を示す¹⁾。粉末あるいはワイヤーや棒で供給される溶射原

料を溶融するための高温域は可燃ガスの燃焼や電気放電などにより実現され、ここで溶融された溶射粒子は高速ガス流により加速されて基材に衝突し、瞬時に凝固して皮膜が形成されるわけである。通常、 $100\sim 300\mu\text{m}$ 厚さの膜が基材上に製膜される。

溶射法の特徴は以下の通りである。

- ①溶射材料の選択範囲が広い：溶射材料として金属、合金、セラミックス、サーメット、ガラス、プラスチック、またそれらを混合したものを溶

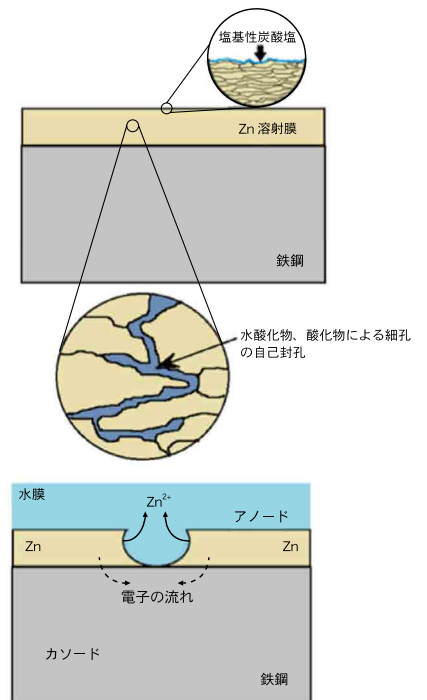


図-1 亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金溶射による防錆作用メカニズム



出典：防食溶射協同組合パンフレット

写真-1 伊良部大橋 (沖縄県宮古島市)

射することができる。また溶射材料も溶射法に応じて粉末をはじめ、ワイヤーや棒などさまざまな形状で利用される。

- ② 基材材質の選択範囲が広い：金属、セラミックスから、木材、布、紙などの有機材料までほとんどあらゆる材料に皮膜形成できる。これはCVD法などと異なり基材自体を加熱する必要がないこと、またメッキ法のように液体に浸漬する必要がないことによる。
- ③ 皮膜形成速度が高い：CVDやPVDに比較して大幅に皮膜速度が高い。アルミニウムや亜鉛などの金属コーティングでは時間当たり5～20kgの材料が膜として加工される。厚さが100 μmの皮膜であれば1時間で溶射できる面積は5～10㎡ほどの広さになるわけで、溶射法が短時間でいかに大面積をコーティングできるか理解できる。
- ④ 溶射加工寸法に制限がない：溶融メッキのように特定の大きさの亜鉛浴槽の中で処理を行う必要がないので、広い面積の基材に対して皮膜を形成することができる。製鉄用大型ロール類から瀬戸大橋クラスの橋梁まで大型構造物に溶射は適用されている。
- ⑤ 現場施工が可能：電源や燃焼ガスおよび圧縮空気さえ用意できればほとんどの溶射加工は溶射する対象物が設置されている現場で作業が可能である。例えば橋梁補修、石油プラント補修などへの防食溶射では、解体して溶射工場に移動させる必要がなく、そのままの状態に必要な箇所に溶射加工が可能である。

- ⑥ ドライプロセスであり、環境への負担が小さい：環境への配慮が最近特に重要視されるようになってきているが、有毒な液体を使いつつプロセス後の後処理コストが必要なメッキ法に比較すると溶射は環境への有害な影響の少ないプロセスである。

一方、溶射法は金属を溶融して、噴射された金属溶融液滴が基材上で急速に冷却、凝固するため、高速成膜である反面、その皮膜内の金属組織は液滴の衝突により扁平化したラメラ組織が積層された構造をもち、しばしば冷却粒子間の間隙が残り、あるいは空気の巻き込みなど、気孔を多く含む組織である。そのため、長

期の防食のためにはそれらの気孔を穴埋めするための“封孔処理”がなされる。防食溶射膜のように、皮膜内部での金属表面酸化による自己封孔の作用をもつものもある。また冷却に伴う収縮に起因した残留応力が残る。

3. 防食溶射の実際（溶射プロセス）

溶射法は表面処理法の一つであるが、とくに施工上重要な点は溶射された皮膜が長期間基材の上に強固に付着し続けることで、このために特に溶射前処理としての基材の清浄化と粗面化が重要である。溶射成膜までのプロセスを模式的に示したのが、図-3である¹⁾。

前処理として、残留しているスケール(酸化物)、さび、ペイント、残留溶射膜などをブラスト処理などで除き、次に粗面化のために必要な粒度の研削材を用いて再びブラスト処理がなされ、鋭角的な角をもったグリットを高速で基材に衝突させ、部分的に基材金属が突出したような構造を持つ粗面を形成する必要がある。亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金溶射には高温の火炎(フレイム)を利

用した溶線式ガスフレイム溶射法、あるいはアーク放電(スパーク)を利用したアーク溶射法が利用され、供給される溶射材料の形状はワイヤー状となる。これらの溶射材料はJIS H 8261に規定されている。

写真-2に現場での溶線式ガスフレイム溶射法による施工の様子を示す。溶射作業員によるハンドワークでなされる場合もあるし、大面積の平坦な面への溶射では自動機が利用される場合もある。

鋼構造物の防食溶射では次のような判断基準で溶射材料が選択されている。図-4のイメージ図で示す通り、基本的には飛来塩分量を基準に材料の選択がなされる²⁾。

- ① 一般環境：海岸から5 km以上離れた地域、田園、山間部では主に亜鉛(Zn99.99)、亜鉛・アルミニウム合金(ZnAl15)が溶射される。
- ② やや厳しい環境：飛来塩分の影響がある地域、自動車排気ガスの影響のある地域、あるいは工業地帯などの環境では、亜鉛・アルミニウム合金(ZnAl15)、アルミニウム(A199.5)、アルミニウム・マグ

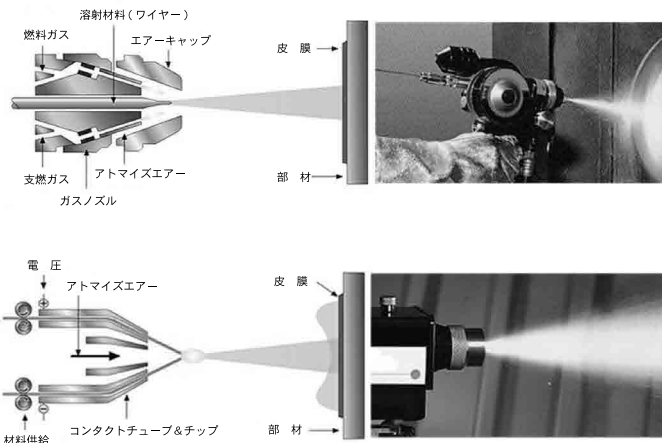
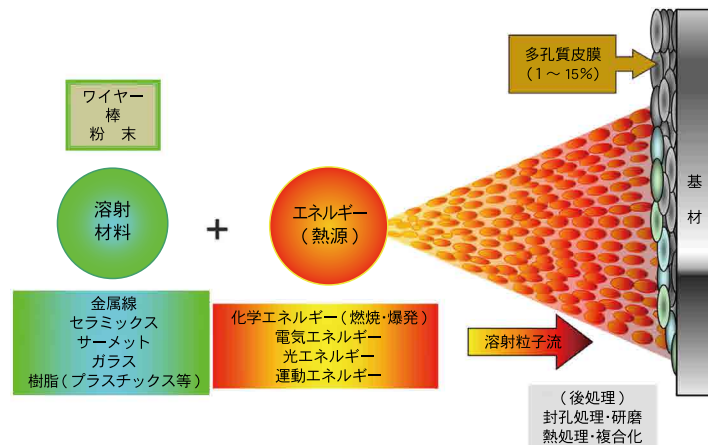


図-2 溶射法の原理と実際の溶射施工状況(上：溶線式ガスフレイム溶射、下：アーク式溶射)

ネシウム合金 (AlMg5) が溶射される。

③ 厳しい環境：飛来塩分の影響が強い海浜部（あるいは海岸から1 km 以内）、海上、高温多湿地域などでは、アルミニウム (A199.5)、アルミニウム・マグネシウム合金 (AlMg5) が溶射される。

防食溶射の施工プロセスおよび品質管理については、現在日本工業標準として JIS H 8300「亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金溶射」が制定されている。材料、プロセス、検査法などについて標準的な手法や注意点が記載されており、参考になると思われる。なお本 JIS は対応する ISO 2063 が近年改正されたばかりであり、(一社)日本溶射学会では現在改正のための作業を始めているところである。2020 年内に改正版が制定されるべく、現在鋭意検討している。

4. 防食溶射のための設計への配慮

長期的な防食機能の発揮のためには、鋼構造自体の設計段階において腐食を極力抑え、かつ溶射施工により防食を行うという前提での構造設計が望ましい。ISO 2063 にはいくつかの実例について、設計上の配慮事項が列挙されている³⁾。いくつかの設計例と説明を以下に示す。

- ① 背中合わせの隅が用いられるとき、あるいは補剛材がどちらかの側の上に短い間隔で隙間埋め溶接される箇所ので生じる隙間および間隙は保護するのが困難なので避けるべきである。
- ② 重ね継手が連続的で平滑な溶接により封じられてない限り、重ね継手よりも突き合わせ継手を優先的に用いるべきである。

- ③ 隅は四角いままよりも、より防食しやすいので丸めておくべきである。
- ④ より大きい面積において防食膜を均一にするために、また鋭い端部では皮膜厚さを確保することが難しい点を克服するために、端部を丸めておくことが望ましい。また鋭角的な端部にある皮膜は、損傷をより受けやすい。注意点として、例えば圧延鋼におけるような端部が大面積になり、腐食雰囲気中に曝される場合には、一般的にアルミニウムよりも亜鉛皮膜が採用される。亜鉛の方が鉄や鋼に対してカソード保護作用が優れているからである。
- ⑤ 出口のない隙間、狭い間隙、重なり点での溝、および水平な板表面は湿気の残留や前処理グリットを含む汚染物の残留から生じる腐食に曝されやすい。可能であるならば、排水穴を適当な数だけ適当な場所に設けて、湿気を排気し流しだすことができるようにすべきである。
- ⑥ 溶接によって接合される重なり箇所の表面は、ブラストグリットが入り

工程	中和処理	脱脂処理	脱スケール処理	粗面化処理
略図	塩化物もしくは硫化物 酸化スケール	油脂類	脱スケール ショット ブラスト	粗面化
対象	母材孔食 堆積物 塩化物 硫化物 アルカリ物 複合物 その他	油脂類 付着物 塗膜 油脂 その他	スケール	粗面
方法	薬液による中和 高圧ジェット 温水 蒸気水洗など	溶剤による トリクレン アセトン など	機械的方式による酸化物除去 サンドブラスト ウォーターブラスト 超高压ジェットブラスト など	サンドブラスト 機械加工 ねじ切り 溝切り ローレット

図-3 溶射前処理の流れ



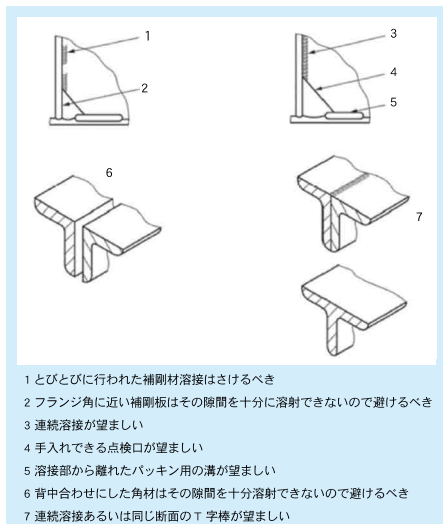
写真-2 溶線式ガスフレーム溶射法による防食溶射現場

腐食環境分類と溶射材料 <飛来塩分量を主たる指標として腐食環境を分類する>

一般環境	やや厳しい環境	厳しい環境
飛来塩分の影響を受けず自動車の排気ガスや工場の煤煙を強く受けない田園、山間部。海岸から5 km 以上	飛来塩分の影響を受け、自動車の排気ガスや工場の煤煙を強く受ける都市部、工業地帯など。海岸から1~5 km 以内	潮風が強く、飛来塩分の影響を強く受ける海上、海浜地区および高温多湿帯など。海上、海岸から1 km 以内
← 一般環境		塩害環境 →
溶射金属材料	溶射金属材料	溶射金属材料
亜鉛 亜鉛・アルミニウム合金	亜鉛・アルミニウム合金 アルミニウム アルミニウム・マグネシウム合金	アルミニウム アルミニウム・マグネシウム合金

出典：防食溶射協同組合パンフレット

図-4 腐食環境分類と溶射材料



出典：ISO 2063-1

図-5 狭い隙間と割れ目に対する設計指針

込み、また湿気が未防食面に侵入するのを防ぐために、溶接継目（シーム）によって完全に封じておかなばならない。

具体的な設計事例と注意点として狭い隙間と割れ目に対する設計指針を図-5に示す。

5. 防食溶射の市場動向

溶射を仕事とする企業者の団体である日本溶射工業会は2019年創立60周年を迎えられたが、同工業会に係る防食溶射企業30社が結集して2000年に防食溶射協同組合が発足した。福岡北九州高速道路公社から発注を受けた福岡都市高速5号線の防食溶射施工が発端とのことである。同協同組合においては2018年までに受注工事実績として、施工面積が約90万㎡となっている。図-6に防食溶射協同組合の施工実績を示す⁴⁾。また実績材料別の施工例は以下の通りである。

- ①亜鉛・アルミニウム合金 (ZnAl15)
 溶射…福岡都市高速5号線、圏央道久喜白岡ジャンクション (JCT)、同桶川JCT、外環高谷JCTなど
- ②アルミニウム溶射 (Al99.5) …宇部小野田湾岸道路、愛知県中部国際空港連絡橋、大阪府深井高架橋、京都府舞夢みなど大橋、富山県新湊大橋など
- ③アルミニウム・マグネシウム合金溶射 (AlMg5) …沖繩県伊良部大橋、京都府大山崎JCT、名神高槻JCT、阪神高速海老江JCTなど

以上のように、2005年12月発刊の「鋼道路橋塗装・防食便覧」(社)日本道路協会編に正式に鋼橋の防食法として「溶

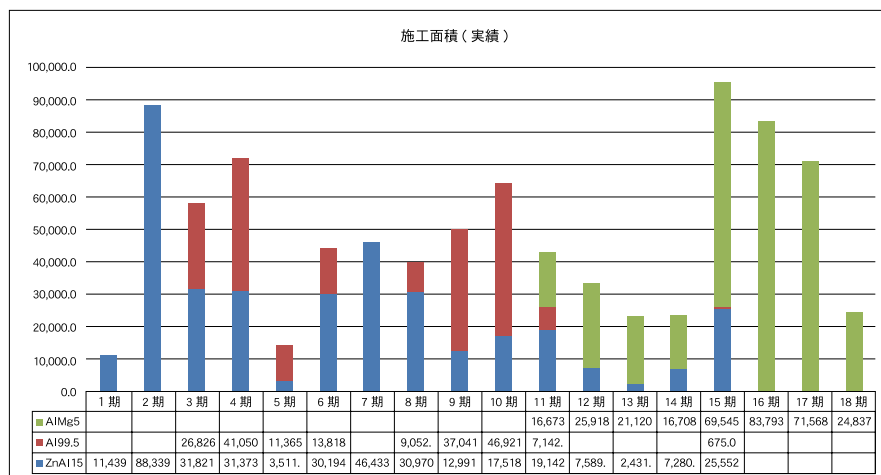


図-6 防食溶射協同組合の施工実績

射法」が採用されたことから鋼製橋梁の防食法として一般に広く認知され採用されやすくなったため公共工事における施工実績も増加し、最近では大面積防食溶射の施工が増えている。今後も交通インフラである橋梁や高速道路の長寿命化による安全安心の確保と、メンテナンス費の低減を目的とした防食溶射が利用されるものと期待される。

海洋構造物ではアルミニウム・マグネシウム合金溶射が多数の実績を有している。1984年頃から北海の海底石油掘削基地の大型鋼構造物の防食用に多量に使用されており、ノルウェーだけでも14基、約400,000㎡、英国側を含めると1,000,000㎡近い施工実績がある。

被覆金属として亜鉛 (Zn99.99)、アルミニウム (Al99.5) も施工されているが、アルミニウム・マグネシウム合金 (AlMg5) が圧倒的に多く、溶射法としてはフレーム溶射よりアーク溶射による施工が主流を占めている⁵⁾。

一方、民生用途に近い応用として上水道鉄管の防食溶射施工例がある。某社の「ダクタイル鉄管」は、鉄管外面には亜鉛合金溶射を施工し、その上に封孔処理した耐食層を形成したもので、部分的に鉄部が露出しても耐食層の自己防食により防食機能を維持するもので、山地を除く国土の95%で100年以上の期待ができる防食設計がなされている。現在わが国には莫大な量の水道管が日本国内に敷設されているが、老朽化がすすみ交換をする必要があるものの、自治体の予算不足のためにその更新は遅れがちである。防食設計された水道管は100年の寿命が見込めることで、初期投資は高くても長

期の寿命は自治体にとって有利である。今後の普及が期待される。

6. おわりに

亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金溶射による防食手法はその長期の防食機能が注目され、高速道路などの鋼橋や海洋構造物への応用が近年普及しつつある。特に高速道路などではメンテナンスのために交通をストップさせることを極力避けたいことから、施工後30年あるいはそれ以上の長期間にわたり大規模な修繕なく継続して利用できることは施主側にとって大きな利点となっている。今後とも腐食性環境に置かれた大型鉄鋼構造物の防食のためにますますその用途は拡大するものと期待される。

本稿をまとめるに際し、資料の提供や内容の確認で防食溶射協同組合理事である高木一生氏 (株)三興防蝕社長) にたいへんお世話になった。ここに記して感謝申し上げる。

【参考資料】

- 1) 上野和夫、溶射技術入門 (三訂版)、(社)日本溶射学会刊、2017
- 2) 防食溶射協同組合パンフレット
- 3) ISO 2063-1, Thermal spraying-Zinc, aluminium and their alloys. Part1: Design considerations and quality requirements for corrosion protection systems, 2017.
- 4) 防食溶射協同組合データ
- 5) 原田、高谷、溶射技術、Vol.21、No.4、40(2002)