溶射鋼材の諸性質と利用の現状

三 上 尚 人*

Properties and Recent Application of Thermal Sprayed Steel

Naoto MIKAMI*

鋼材または鋼構造物を防食するために行う溶射の前処理の重要性を述べ、溶射鋼材の耐食性を主とした諸性質と利用の現状について紹介する。

1. はじめに

金属溶射法として一般に行われているのは、溶射ガンとよばれるノズルに一定速度で金属線を送り、そこで溶融させ圧縮ガスで熔融状微粒子にして被溶射体に吹きつけ、皮膜を形成させる方法である。金属線を溶融させるにはガスの燃焼熱による方式と、2本の金属線を用いてその間に発生する電気アークによる方式とがあり、それぞれガス溶線式溶射、電気アーク式溶射とよばれている。

溶射の主な目的は防食、機械部品の肉盛および補修、表面硬化、装飾等である。構造用鋼材を対象にして行う溶射はそのほとんどが防食を目的とし、金属線はアルミニウムまたは亜鉛を用いるのが一般的である。

すなわちアルミニウムまたは亜鉛の溶射皮膜で鋼面を被覆し、腐食環境から遮断することによって鋼材を防食するのである。溶射したままの皮膜には空孔が存在し、完全な環境遮断は期し難いので樹脂を浸透させて空孔を埋め（これを封孔処理という）耐食性を向上させる。

ここでは、鋼材または鋼構造物にアルミニウム溶射等を行う際の前処理の重要性を述べ、溶射鋼材の耐食性を主とした諸性質と利用の現状について紹介する。なお、本文中で溶射鋼材の腐食量と

として示される数字は全て溶射皮膜の腐食量の意味であり素地鋼材のそれではない。

2. 溶射の特徴

溶射には次のような特徴があり鋼材または鋼構造物に適用しやすい方法である。

(1) 部材の大きさに制限なく溶射できる。

すでに述べたように、溶射は塗装と似て溶射ガンを用い、熔融金属を被溶射体に吹きつけて行う。このため溶融めっきのように溶融槽の大きさで部材が制限を受けることがない。

(2) 工場でも現場でも溶射できる。

最も一般的なガス溶線式溶射設備は基本的には溶射ガン、金属線の送り装置およびガス供給装置とからなる。これらの装置を適当に構成すれば、工場用の自動溶射設備とすることも可搬式の現場溶射設備とすることもできる。

(3) 被溶射体は溶射による変質・変形を起さない。

たとえば熔融アルミニウム粒子が積層して皮膜を形成する間の素地鋼材の温度上昇はおおよそ100℃であり、このような温度では鉄とアルミニウムは合金を生成することも鋼材の強度を低下させることもない。

(4) 広範囲の材料に溶射できる。

上で述べたように溶射による鋼材への熱影響は

* 住友金属工業(株) 中央技術研究所
〒660 尼崎市西長洲本通1-3
☎06-401-6201

*Sumitomo Metal Industries, Ltd.
Central Research Laboratories
3, Nishinagasu-hondori 1-chome, Amagasaki-shi,
Hyogo 660

無視できるので普通鋼はもちろん、高張力鋼にも適用することができる。

(5) 皮膜厚さは自由に決めることができる。

吹きつけ1回当たりの皮膜厚さは、主として溶射ガンの金属線を溶融する能力と溶射ガンを移動させる速度によって決まるから、吹きつけ回数を選ぶことによって皮膜厚さを決めることができる。

(6) 溶射表面は塗装下地として適している。

溶射表面は凹凸があるため塗膜がよく密着する。また大気中ではアルミニウムや亜鉛は腐食しにくいので塗膜を長持ちさせるのに効果がある。

3. 溶射の前処理

溶射皮膜を素地に強固に密着させることにより、溶射鋼材として良好な性質を得ることができる。そのためには素地表面をブラストによって適切に粗面化し、清浄かつ活性化することが重要である。

亜鉛やアルミニウムの溶射作業標準（JIS H 9300，同9301）では、ブラスト材はとがって角張ったものでなければならないとしている。これは、溶射のための粗面は単に凹凸があるというだけでは不十分であって、溶射皮膜の“ひっかかり”になるようなパターンが十分な密度で生じていることを必要とし、そのような粗面はとがって角張ったブラスト材によって得られるからである。

適切に粗面化された被溶射体に向けて吹きつけ

られたアルミニウムや亜鉛の溶融粒子は，“ひっかかり”に食い込んで溶着し、その後には到着する溶融粒子はお互いに複雑にからみ合って積層し、ある値の密着力をもった皮膜を形成する。溶射皮膜の“ひっかかり”のある粗面への密着は機械的投錨効果による密着とよばれている。

図1はアルミニウムと亜鉛の溶射皮膜の密着力を示したものである。アルミニウム溶射皮膜の密着力は前処理条件の影響を受けやすいので、亜鉛のそれに比較して広い範囲の値をとる。アルミニウム溶射皮膜の良好な密着力を得るためには、ブラスト材を選択し、使用限度を管理して磨滅したものを使わないようにする。

またブラストを行ってから溶射するまでの時間と、それらを行うときの気象（主として気温と相対湿度）を考慮して、粗面が活性である間に溶射を完了させる。必要ならば素地を予熱して溶融粒子が素地によくぬれて“ひっかかり”のすみずみまで食い込むようにする。

4. 耐食性

4-1 海水に対する耐食性

日本のように長い海岸線で囲まれた国土では、重要な構造物の多くは海岸に立地し、今後も増加するものと思われる。この場合、海水の腐食作用を受けることは不可避であって防食は重要課題で

図1 アルミニウムと亜鉛の溶射皮膜の密着力

表1 AWSでの長期(19年間)腐食試験結果

溶射金属	封孔処理	下地鋼材の腐食, 防食に必要な皮膜厚		摘 要
		海水中	大気中(海洋, 工業地帯)	
Al	あり	なし 80~150 μm	なし 80~150 μm	・封孔処理が有効 ・Al溶射皮膜は厚くないほうが良い(<460 μm) ・Al溶射皮膜に犠牲陽極効果あり ・Zn, Al溶射は鋼構造物の防食方法として有効
	なし	なし 80~150 μm	なし 80~150 μm	
Zn	あり		80~150 μm	
	なし	なし 300 μm	230 μm

清浄地域：小樽，仙台，長野，松山，松江，宮崎の平均

汚染地域：新潟，東京，名古屋，尼崎，和歌山，小倉の平均

図5 溶射鋼材の全国各地における大気暴露試験結果 (5年間)

密着するうに、次に述べる理由により塗膜寿命が大幅に長くなるので塗装下地として適している。

すなわち塗膜はもともと透水性，通気性を有し，また時間の経過にともなって劣化する。このために鋼材は塗膜下で腐食が進行して塗膜のふくれ，さびの発生がみられるようになる。塗膜が物理的に損傷すれば当然さびが発生する。鋼材の腐食は，このようなさびの発生点を中心にして周囲に広がることにより進行する。

鋼材が腐食すると多孔質のさびが多量に発生し，体積増加のため塗膜がふくれたりはく離して塗膜の劣化は加速される。塗膜の寿命とは，最初のさびが現われるまでであるとする考え方があるのはこのためである。溶射鋼材は大気中での腐食がきわめて緩慢であるので，裸鋼材のように腐食することによって塗膜の劣化を加速することがない。したがって，溶射鋼材上の塗膜は図6に示すように10年以上経過しても変化は小さく，塗膜本来の寿命が発揮される³⁾。

5. 犠牲陽極効果

アルミニウムや亜鉛のように，鋼に対して腐食電池列が卑な金属を鋼材に電氣的に接触させ，ガルバニ電池作用で腐食溶解させることにより鋼材を防食する方法がある。このような目的に使用されるアルミニウムや亜鉛を犠牲陽極といい，実際は防食効果を向上させるため，これらの合金（たとえばIn，Snなどを少量添加したAl-Zn合金）が使用される。

アルミニウム溶射鋼材は人工海水中で図7に示すように，裸鋼材に対して100～200mv卑な電位を示し，亜鉛溶射鋼材はさらに卑で裸鋼材との電位差は大きい。このように導電性液体中で鋼材に対して電位が卑で，かつ防食に必要な分極を与えることができるアルミニウムや亜鉛の溶射皮膜には，犠牲陽極としての効果がある。

したがって，たとえ溶射皮膜に欠陥が生じて下地鋼材が露出しても，周囲のアルミニウムや亜鉛

図7 人工海水中における溶射鋼材および裸鋼材の自然電極電位の経時変化 (室温)

図6

溶射鋼材の耐候性 (尼崎)

が溶解して露出鋼面を防食する。図8は溶射皮膜に欠陥がある状態を模擬した試験片を、食塩水中に浸せきして局部電位を測定した結果である。試験片は450mm×450mmのアルミニウム溶射鋼板の中央に150mm×150mmの露出鋼面^{かんこう}を設けてある。図中の数字は飽和甘汞電極を照合電極として測定した局部電位をmV単位（マイナス符号は省略）で表わしたものであって曲線は等電位線である。

露出鋼面の中央の電位は-824mVであり、この環境中での鋼の腐食電位はおよそ-670mVであるから約150mV陰分極されている。このことは犠牲陽極効果が露出鋼面の中央にまで及んでいることを示し、露出鋼面のいずれの部分にも腐食が生じていないという観察事実と対応する。

このようにアルミニウムや亜鉛の溶射皮膜に導電性液体中で犠牲陽極効果がある点は、欠陥が生じると直ちに下地鋼材の腐食がはじまる一般の塗膜に対し一つの特長になっている。ただし溶射皮膜の犠牲陽極効果がどのような環境中でどの範囲におよび、またそのとき犠牲陽極として露出鋼面の防食に寄与する溶射皮膜の範囲と溶解量についてはよく知られていない。

いずれにしても溶射による鋼材の防食は本来、健全な溶射皮膜の環境遮断効果に期待すべきものである。

図8 裸鋼面（SS41）とアルミ溶射面が共存する試験片の食塩水中での局部電位（Cl⁻ 19500ppm、電導度5000Ω/cm、室温浸せき6ヵ月後）

6. アルミニウムの pH による影響

アルミニウムの耐食性はその表面に存在する強力な酸化皮膜に依存する。この酸化皮膜は二重構造をしており、外界に接する多孔層と金属アルミニウムに接する緻密度の高いバリア（barrier）層とからなる。

耐食性に寄与するのは主としてバリア層であって、厚さ約1nm（10⁻⁹m）程度の不定形のアルミナ（Al₂O₃）であるとされている。この薄い層は機械的に除去されると、環境中の酸素によって短時間のうちに修復されるため、アルミニウムの腐食は進行しない。酸化皮膜が安定して存在しえないpH域ではアルミニウムは腐食する。

溶射皮膜はアルミニウム粒が積層したものであるから、pHによる影響は基本的には上で述べたアルミニウムと同じである。HClとNaOHで調整したいろいろなpH値の溶液中でアルミニウム溶射皮膜は図9に示す耐食域があり、それ以外の酸性域、アルカリ性域ではそれぞれAl³⁺、AlO₂⁻となり、ともに水素を発生させて溶解する。封孔処理をすると腐食量は低減する。腐食形態は酸性域では均一腐食であるのに対しアルカリ性域では虫食い状の局部腐食である。

図9 アルミ溶射皮膜の各種pH水溶液中での腐食量（120時間浸せき試験片の減量を平均したもの）

7. 加工性

鋼材を構造物に組立てた後で溶射を行う場合には加工性はあまり問題ではなく、むしろ前処理と溶射をいかに十分に管理された条件下で行うかを問題にすべきであろう。あらかじめ溶射皮膜で被覆した鋼材を取扱う場合には加工性について知っておく必要がある。ここではアルミニウム溶射鋼板の加工性の例について述べる。

アルミニウム溶射鋼板は表 2⁹⁾に示すように板厚の 8 倍の半径で 180° 曲げが可能である。ソーシャを用いる切断は裸鋼板と同等に行うことができる。また通常の取扱いで受けると考えられる程度の衝撃や圧縮に耐える。アルミニウム溶射皮膜上から溶接を行うことは困難である。

これはアルミニウムの酸素との親和力が強いために、本来ならばスラグとなるべき金属が溶着金属中に残留して硬度を上昇させたり、溶射皮膜と溶着金属の境界付近に Fe-Al 固溶体相を生成させることなどが原因と考えられている。

片面溶射鋼板の裸面から行うガス溶断は裸鋼板とほぼ同等に行うことができる。しかし溶射面から行うガス溶断は予熱炎と切断酸素によって生成する高融点のアルミニウム酸化物が酸素と鋼の反応を妨げるので、切断速度と切断面品質が低下する。したがって溶接、溶断時にはアルミニウムの影響を除くために溶射皮膜を必要幅だけ除去するのが原則であり溶接後、補修溶射する。

アルミニウム溶射鋼板を構造物に組立てる際の施工上の留意点は、溶射皮膜の保護と治具等の取付方法であるとされ、次のような対策が示されて

いる⁶⁾

- (1) アルミニウム溶射皮膜は素地に達しないあて^{きず}疵、こすり疵等では耐食性は何ら問題はないが疵は少ないことが望ましい。そこで運搬時には吊金具、ワイヤ等が直接溶射皮膜に接触しないようにする。また重ね吊りは行わない。溶射面上に工具や資材を置く場合には木材等を介して置く。
- (2) 治具等を溶接によって取付けるときは溶射皮膜を除去する。この部分は補修溶射を行う必要があるので、経済性を考慮すれば治具の取付数はできるかぎり少なくする必要がある。アルミニウム溶射皮膜を除去するには砥粒が^とあらく、結合度の弱い砥石を回転数の高いグラインダーに組合せて用いると能率がよい。溶接時のスパッタに対しては石綿シートで溶射面を保護する。

8. 利用の現状

アルミニウム溶射鋼板を使って水門 (17m×10m) を組立てた場合の試算によると、防食のための初期コストは補修溶射費も含めて塗装 (エポキシ樹脂塗料) の約 1.3 倍になるが、塗装は 5 年毎に全面塗り替えが必要になるのに対し、溶射は何もなくてよいので、15 年間で防食のための総経費を比較すると、結局、溶射は塗装の約 40% ですむとしている⁷⁾。

大型鋼構造物を組立てた後で亜鉛溶射を行うと、防食のための初期経費は塗装の約 2.4 倍になるが、15 年間の総経費は約 50% であるという試算もある。このように溶射による防食を塗装と比較すると、長期間では経済的であることが認められるようになり、大型鋼構造物 (橋梁、閘門、発電所水槽、

表 2 アルミ溶射鋼板の加工性 (SM50, 板厚 12mm)

試験項目	条 件	評価	皮 膜 状 況	塩水噴霧試験
180° 曲げ	R = 1.8 t	△	亀裂発生	赤錆発生
	3.5 t	○	} 小さな亀裂発生	} 3400 時間で異常なし
	5.5 t	○		
	8 t	◎	異常なし	
切 断	ソーシャリング	◎		
		◎		
衝 撃	ハンマーテスト JISH 0401 デュボン 1 kg-m	◎		
		◎		
圧 縮	局 部 30 kg/mm ²	○	金属光沢の圧痕	

t: 板厚, R: 曲げ半径

発電所高压管、河川用曳船等)に対する溶射の適用が世界的に増加しているという。

わが国におけるアルミニウム溶射鋼材の利用例として橋梁、石油タンク、水管橋、水門、下水道管、地熱発電所サイレンサー、カーテンウォール等がある。

大気中では溶射皮膜上の塗膜寿命が大幅に延長されることを先に述べた。この特長を生かしてノルウェーでは新しい橋梁の防食は全て溶射+塗装で行うようであると報じられており⁸⁾、わが国でも既に関門橋に代表されるいくつかの鋼構造物に適用されている。この複合防食システムは没水部や常に飛沫でぬれている部位を除く広い自然環境下で効果があると考えられ、今後の発展が期待される。

9 おわりに

防食のための溶射に関する報文は少なくない。それだけ関心をもたれながら、この防食技術はそれほど普及していないと思うのだから何故だろう。

ていねいな前処理を必要とするのに、粗略な前処理しか行わずに溶射した場合には防食性能が不

十分になりがちであろう。溶射の適用場所や応用方法を誤ってはいけないうのに、それを防ぐ技術情報が欠けているきらいもある。それらの結果として、溶射による防食は十分な信頼を得ていないのかも知れない。塗装に比較して初期コストが高いことも普及をばむ原因のひとつと思われる。

現在は構造物のメンテナンスフリーを志向する時代である。アルミニウムや亜鉛による溶射を十分管理された条件下で行い、正しく用いれば、この動向に沿うのにどのように役に立つかということの一部を述べた。

参 考 文 献

- 1) American Welding Society: AWS C2. 14-74
- 2) 世界長大橋防食技術調査団: JSSC, 9, No. 85. (1973)
- 3) 三好, 佐武, 永田, 川崎: 住友金属, 26, No. 2 (1974)
- 4) 三上, 西原, 中村, 伊豆原: 日本鉄鋼協会 第103回講演大会講演概要集(Ⅱ)
- 5) 佐武: 高温学会誌, 2, No. 6 (1976)
- 6) 木村, 鈴木: PETROTECH, 4, No. 6 (1981)
- 7) 住友金属工業㈱技術資料
- 8) 長坂: 防錆管理, No. 9 (1980)

第11回金属表面技術国際会議開催のお知らせ——INTERFINISH '84——

<主催> International Union for Electrodeposition and Surface Finishing

<期間> 昭和59年10月21日～26日

<場所> イスラエル, イェルサレム

<開催団体> イスラエル金属表面技術協会
(The Metal Finishing Society of Israel)

<発表論文募集> テーマ

1. Surface Treatment
2. Electroplating
3. Electroless and Chemical Coating
4. Metal Spraying
5. Organic Coating
6. Ceramic Coating

7. Vacuum Deposition

8. Thin and Thick Film Coating

9. Anodic Processes

10. Environmental Control

11. Test Methods

12. Coatings for Electronics and Optics

<論文要旨締切日> 昭和58年10月31日

<詳細問合先> INTERFINISH '84 Secretariat

P. O. Box 29313, 61292 Tel-Aviv,
Israel

☎: 03-654541, ☎: Telex: 033-554

<1st サークュラー> 希望者は金表事務局へお申込み下さい。