

● 技術解説

溶射技術とそのプラント設備への適用 ＜プラントライフサイクルエンジニアリングシリーズ＞

Thermal spraying and its application for the plant installations ＜ Plant Life-cycle Engineering Series ＞

中野 光一* (九州工業大学 大学院 生命体工学研究科)

Kouich Nakano (Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division)

溶射技術は、耐摩耗性、耐熱性、耐食性、電気絶縁性、光学的特性など様々なニーズに合った機能を選択でき、さらに表面のみの改質でバルク材を使用するよりもはるかに経済的な施工法であり、プラント設備の長寿命化や使用条件の苛酷化等への要求から急速に脚光を浴びるようになってきている。本稿では、プラントエンジニアとして知っておくべき溶射技術の概要を述べるとともに、ガスフレーム式粉末溶射装置を用いた検討事例について紹介する。

The thermal sprayed surface has a multifunctional capability like as abrasion resistance, heat resistance, corrosion resistance, electric insulation, and optical characteristic etc. that we can select for our needs. Additionally, the thermal spraying is more economic execution method that uses only surface not bulk for property modification. Thermal spraying appears before the footlights rapidly for the requirements of making plant installations life longer and of satisfying severe service conditions. In this paper, the outline of the thermal spraying, that we should know as plant engineers, are described at first. And then, the investigation examples using thermal spraying equipment of gas-flame-powder type are introduced.

1. はじめに

材料の表面処理技術には、各種メッキや塗装に代表される表面被覆法や、浸炭・窒化処理、紫外線処理、レーザによる表面焼き入れ等などの表面改質法、加工硬化を利用した表面加工法をはじめ様々な方法が考案・実用化されてきている。溶射法は、燃焼又は電気エネルギーを用いて溶射材料を溶融又は半溶融状態にした粒子を母材に吹き付けて皮膜を形成する方法であり、溶融成膜法に分類されている。

また、溶射は、耐摩耗性、耐熱性、耐食性、電気絶縁性、光学的特性など構造材料に付加的に要求される様々なニーズに合った溶射材料を選択でき、しかも表面のみの成膜でバルク材を使用するよりもはるかに経済的な施工法である。さらに、溶射技術はプラント設備の新規建設時のみではなく、既設プラント設備のメンテナンス技術としても長寿命化や使用条件の苛酷化等への要求から急速に脚光を浴び、多用されるようになってきている。

本稿では、プラントエンジニアとして知っておくべき溶射技術の概要を述べるとともに、ガスフレーム式粉末溶射装置を用いた検討事例について紹介する。

2. 溶射の概要

2.1 溶射の歴史

溶射の原理は、1906年にスイスのワーターマン氏が考案したといわれており、その後、1909年にスイスのDr.M.U.Schoop氏がアトマイザー法による溶射装置を開発し、特許を取得している。我が国では、1919年に江澤謙二郎氏がDr.M.U.Schoop氏から特許の使用権を輸入し、実用に供したのが国内では最初であると言われている。1921年に江澤氏は電気式メタリコン装置「電熔型金属噴射機」を開発し、「電気溶融法による噴射鍍金法」として特許(特許No.131674号)を取得している。

1922年以降、アメリカでは防錆溶射よりも耐摩耗肉盛溶射が盛んに行われたのに対して、ヨーロッパの各国では防錆溶射が盛んに行われた。

我が国では、1957年に日本溶射協会「(現)一般社団法人溶射学会」が創立され、現在、溶射技術の発展における中心的な役割を担っている。

2.2 溶射の適用分野

溶射は様々な産業分野に適用されてきており、溶射皮膜には、耐食性、耐酸化性、耐高温腐食性、耐摩耗性、耐フレティング性、耐焼付性、滑り性、グリップ性、耐異物付着性、耐熱性、耐熱衝撃性、絶縁性、耐プラズマ・エロージョン性、離型性など様々な特性や機能が要求される。ここでは、溶射皮膜に要求される耐食性、耐摩耗性、耐熱性の3特性に着目し、溶射の耐食性・耐摩耗性・耐熱性改善適用事例を表1に示す。

* 現:技術本部 企画開発部 Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division

表1 溶射の耐食性・耐摩耗性・耐熱性改善適用事例

| No. | 適用産業分野 / 機器 |
|--------------|--|
| <耐食性改善適用事例> | |
| 1 | <一般鉄鋼構造物>橋梁、水門、通信鉄橋、水管橋、取水装置、貯水槽、下水道マンホール類、構脚基礎鋼、吸排気筒、建築物支柱、門扉、手摺、吸排送風機、温水槽、遠心分離機、道路標示版、鉄製煙突 |
| 2 | <石油・化学>石油掘削構造物、脱塩槽、蒸留塔、熱交換器、ガス吸収塔、排水処理塔、重合反応槽、攪拌槽、LPG・アンモニア・各種溶剤等貯槽類、流動床コンベアー、石油化学品製造機器、サイクロン、ホッパー |
| 3 | <繊維機器>乾燥釜、染色槽、乾燥ロール、巻取ロール、糸道ガイド類 |
| 4 | <電気機器>無線塔、パラボラアンテナ、コンピュータボックス、シャーシ、電熱ヒータ、コンデンサー、キュービクル、吸排換気装置、発電ボイラー類 |
| 5 | <船舶・車両機器>排気・吸気筒、カスケードタンク、薬品輸送タンク、船留金具、窓枠、給水車、ガソリンローリータンク、薬品用コンテナタンク、車両シャーシ、排気マフラー |
| 6 | <ゴミ焼却機器>塩素回収反応塔、熱回収熱管、吸排送風機、焼却炉、煙突、サイクロン、ダンパー類 |
| 7 | <食品機器>フィルタープレス、攪拌機、厨房洗浄機、飲料用貯槽、香料アルコール焙煎器、温水槽、飲料用反応槽、電磁調理器類、殺菌加熱槽、遠心分離機、ロール類 |
| 8 | <製紙機器>木釜、乾湿ロール類、反応槽類、印刷ロール、巻取ガイドロール類 |
| 9 | <上下水処理機器>スクリーンプンプ、ケーシング、熱処理塔、コンベアー架台、浄水層、貯槽 |
| <耐摩耗性改善適用事例> | |
| 1 | <一般産業機械>建材ボード穴あけドリル、高圧ブランジヤ、冷間プレス用金型、メカニカルシール、ピストンロッド、コンピュータ用摺動部品、ポンプ用スリーブ・カラー、信線機用ガイドロール 他 |
| 2 | <鉄鋼>連続焼鈍炉用ハースロール、溶融アルミメッキ用ポットロール、マッドガン・ノズル、テンションロール、誘導加熱ロール、溶融垂鉛メッキ浴用ロール 他 |
| 3 | <製紙機器>ヤンキードライヤロール、ワインダドラムドローロール、グロスカレンダーロール、マシンカレンダーロール、リファイナーディスク |
| 4 | <非鉄>熱延用ロール、冷延用ロール |
| 5 | <繊維機器>クリンパロール、各種ロール |
| 6 | <プラスチック機器>押出スクリー、各種ロール |
| <耐熱性改善適用事例> | |
| 1 | <火力発電プラント>ガスタービン用動静翼、ガスタービン用燃焼器、ライナー、ボイラー用バーナー、デフューザ 他 |
| 2 | <ガラス工業>熱処理用ロール 他 |

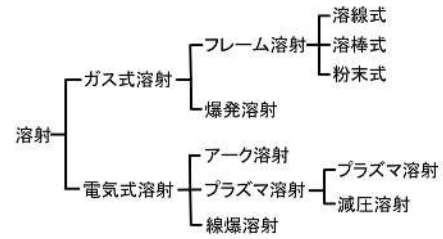


図1 溶射法の分類

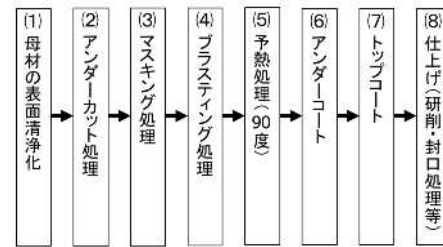


図2 標準的なガスフレーム溶射の施工フロー

2.3 溶射法の分類

材料の表面を被覆（コーティング）する技術には、塗装法、メッキ法、溶射法、化学的蒸着法（CVD: Chemical Vapor Deposition）、物理的蒸着法（PVD: Physical Vapor Deposition）などがあり、溶射法は、エネルギー源や溶射材料の形態により、図1に示すように分類されている。

2.4 溶射材料

溶射材料の形態としては、線材、棒材、粉末に大別され、溶射材料の材質としては、アルミナ、ジルコニア、チタニア、ガラス等のセラミック系、亜鉛、アルミニウム、ステンレス、チタン、ニッケル合金等の金属系、ポリエチレン、ナイロン等の高分子材料系に分類される。

2.5 溶射施工の施工フロー

溶射施工の工程は、溶射法の種類や母材や溶射材料の種類等によって異なってくる。ここでは、比較的低温で施工される標準的なガスフレーム溶射の施工フローを図2に示す。母材の表面清浄化は、油脂類を含む不純物の除去を目的に実施される。溶射施工で実施されるアンダーカット処理は、溶射皮膜の剥離強度を高めるために表面を局部的に凸凹（0.5~1.0mm）にする処理であり、溶接用語で用いられる溶接止端部の表面欠陥とは異なる。

マスキングは、ブラスト処理を行わない部分を遮蔽する

ために行う。ブラスト処理は、サンドブラストやスチールショットブラストが適用される。予熱はフレーム溶射の場合には約90℃で実施されるが、高温プラズマ溶射の場合には、約350~400℃で行われる。アンダーコート（下地盛り溶射）に続いて、トップコート（上盛り溶射）が施工される。最終段階で、研磨・研削および封口処理等が実施される。封口処理は溶射皮膜の開口気孔に封口剤を浸透させて気孔を充填し、溶射皮膜の化学的・物理的性質を改善するために実施される。

2.6 溶射皮膜の生成機構と接合強度

燃焼ガスや圧縮空気等によりトーチ先端から放出される溶融あるいは半溶融状態にある溶射粒子は、母材に吹き付けられる間、気体分子からファンデルワールス力を受けるが、溶射粒子同士の衝突により溶融粒子が接触あるいは合体すると、十分に冷却するまでの間、溶融粒子間で拡散が起こる。溶融した球形の溶射粒子が母材表面に到着し、円錐状に凝固してスプラットを形成して、堆積する過程は、H.Hermann³⁾らによって検討されている。

高温プラズマ溶射の場合には、予熱温度も350~400℃と高いため、溶射後にフェーシング処理（溶融処理）を行うと、母材と溶射粒子間に合金化や金属間化合物の生成も認められている。一方、溶射前のプラスティング処理により下地となる母材表面は粗く凸凹に仕上げられており、ここに溶射粒子が埋め込まれていく事になり、アンカー効果（投錨効果）により、溶射皮膜のせん断強度は高くなる。

2.7 各種溶射製品の試験方法

日本産業規格（JIS）に従った各種溶射製品の試験項目を表2に示す。また、各種溶射製品の試験項目の試験方法は、表3に従った方法により実施される。

表2 各種溶射製品の試験項目

| No. | 試験項目 | 亜鉛 溶射製品試験 方法 (JISH8301) (*)1 | 鉛 溶射製品試験 方法 (JISH8302) (*)2 | アルミニウム 溶射製品試験 方法 (JISH8303) (*)3 | 肉盛り 溶射製品試験 方法 (JISH8304) (*)4 | 自溶合金 溶射製品試験 方法 (JISH8305) (*)5 | セラミック 溶射製品 試験 方法 (JISH8306) (*)6 |
|-----|----------|--|---|--|---|--|---|
| 1 | 外形試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 2 | 付着量試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 3 | 膜厚試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 4 | 均一性試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 5 | 耐食試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 6 | 密着性試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 7 | 表面粗さ試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 8 | 純度試験 | | ○ | | | | |
| 9 | 有孔度試験 | | | ○ | | | ○ |
| 10 | 溶射材料分析試験 | | | | ○ | ○ | |
| 11 | 引張試験 | | | | ○ | ○ | |
| 12 | 表面硬さ試験 | | | | ○ | ○ | ○ |
| 13 | 粒子間結合度試験 | | | | ○ | ○ | |
| 14 | 耐薬品性試験 | | | | ○ | ○ | |
| 15 | 耐熱性試験 | | | | ○ | ○ | |
| 16 | かさ比重試験 | | | | ○ | | |
| 17 | 熱衝撃試験 | | | | | | ○ |

(*)1 JISH8300へ統合 (*2) 1994年7月廃止 (*3) JISH8300へ統合
 (*4) JISH8302へ統合 (*5) JISH8303へ統合 (*6) JISH8304へ統合

表3 各種溶射製品の試験項目の試験方法

| No. | 試験項目 | 試験方法 |
|-----|----------|---|
| 1 | 外形試験 | 肉眼観察により実施される。 |
| 2 | 付着量試験 | 重量測定法、塩化アンチモン試験法、水酸化ナトリウム試験法等により実施される。 |
| 3 | 膜厚試験 | 顕微鏡測定法、マイクロメータ測定法、膜厚計測定法等により実施される。 |
| 4 | 均一性試験 | 統制試験法等により実施される。 |
| 5 | 耐食試験 | 浸漬試験法等により実施される。 |
| 6 | 密着性試験 | 曲げ試験法、ケイ酸試験法、打撃試験法（ハンマ試験法、落下球試験法）、付着力試験法、加熱剥離試験法等により実施される。 |
| 7 | 表面粗さ試験 | 比較試験法等により実施される。 |
| 8 | 純度試験 | 化学分析法等により実施される。 |
| 9 | 有孔度試験 | フェロキシル試験法、高圧放射線試験法等により実施される。 |
| 10 | 溶射材料分析試験 | 原料の成分分析法等により実施される。 |
| 11 | 引張試験 | 引張強度測定により実施される。 |
| 12 | 表面硬さ試験 | ブリネル硬さ試験法、ロックウェル硬さ試験法、携帯用ショア硬さ計、微小硬さ試験法（JISZ2251）等により実施される。 |
| 13 | 粒子間結合度試験 | プラスチック試験法等により実施される。 |
| 14 | 耐薬品性試験 | 浸漬試験法等により実施される。 |
| 15 | 耐熱性試験 | 加熱試験法等により実施される。 |
| 16 | かさ比重試験 | 飽水法等により実施される。 |
| 17 | 熱衝撃試験 | 水冷法等により実施される。 |

3. 溶射に関連する法規/規格・団体・資格

3.1 溶射に関連する法規/規格

溶射に関する主な日本産業規格としては、表4に示すような規格があげられる。

3.2 溶射に関連する各種団体

溶射に関連する団体としては、以下に示すような学術団体、工業会、資格認定団体等があげられる。

(1) 一般社団法人日本溶射学会（旧）日本溶射協会

日本溶射学会は溶射に関する理論ならびに工業の発展を図ることを目的に1957年に「日本溶射協会」として設立され、その後、2010年7月に一般社団法人となり、同年12月には「日本溶射学会」と名称を変更している。学術論文誌の発行、全国講演大会の開催、各支部における研究会活動、さらに溶射管理士認定活動や日本工業標準（JIS）制定に対する協力活動など溶射分野におけるさまざまな活動を通して、溶射の学術および技術の発展と大学・研究所など学術分野と溶射関連産業界、さらに海外との技術的・人的交流の促進を進めている。⁴⁾日本溶射学会は日本学術会議登録学術団体

表4 溶射に関する主な日本産業規格

| JIS No | 規格名 |
|------------------|---------------------|
| JIS H8260 (2007) | 溶射用粉末材料 |
| JIS H8261 (2007) | 溶射用の線材、棒材及びコード材 |
| JIS H8300 (2005) | 亜鉛・アルミニウム及びそれら合金の溶射 |
| JIS H8302 (2010) | 肉盛り溶射（鋼） |
| JIS H8303 (2010) | 自溶合金溶射 |
| JIS H8304 (2007) | セラミック溶射 |
| JIS H8306 (2009) | サーメット溶射 |
| JIS H8402 (2004) | 溶射皮膜の引張密着強さ試験方法 |
| JIS H9302 (2007) | セラミック溶射作業標準 |

である。

(2) 日本溶射工業会

日本溶射工業会は1958年に発足して現在に至っており、産業機器の高性能化や省エネ環境保全に貢献することをスローガンとして掲げ、溶射技術の利用をあらゆる産業界に普及拡大させることを目的としている。溶射JISと国際規格（ISO）との整合化に伴い、全会員が溶射JISに規定された品質保証が行えるよう、設備の充実、品質管理システムの整備、従業員の教育並びに技術水準の向上にも勤めている。⁵⁾

(3) 福岡県職業能力開発協会

溶射技能士試験の実施機関で、過去に出題された技能検定の問題等を確認できる。⁶⁾

3.3 溶射に関連する資格

(1) 溶射技能士

溶射技能士とは、国家資格である技能検定制度の一種で、都道府県知事（問題作成等は中央職業能力開発協会、試験の実施等は都道府県職業能力開発協会）が実施する、溶射に関する学科及び実技試験に合格した者をいう。なお職業能力開発促進法により、溶射技能士資格を持っていないものが溶射技能士と称することは禁じられている。⁷⁾

溶射技能士の資格は、①防食溶射作業、および②肉盛り溶射作業の2種目が設定されている。

(2) 溶射管理士

溶射管理士の資格は、一般社団法人日本溶射学会の認定資格で、①防食溶射管理士、②セラミック溶射管理士、③金属溶射管理士、④サーメット溶射管理士の4種類の資格が設定されている。さらに、上記4種目のすべての管理士を取得した者は上級溶射管理士の資格が認定される。また、基礎科目を受講し、認定試験に合格した者は準溶射管理士に認定される。日本溶射学会が講習会および認定試験を実施している。

4. 溶射装置及び溶射関連材料販売企業・溶射施工企業

4.1 溶射装置及び溶射関連材料販売企業

日本溶射工業会に所属する国内の溶射装置及び溶射関連材料販売企業としては、一例として、表5に示すような企業があげられる。

表5 国内の溶射装置及び溶射関連材料販売企業

| No. | 企業名 | URL (Home Page) |
|-----|---------------------------------|---|
| 1 | アルミニウム線材株式会社 | http://group.nikkeikin.co.jp/awr/ |
| 2 | エリコンメテコジャパン株式会社 | https://www.erlikon.com/metco/jp/ |
| 3 | ジンクエクスセル株式会社 | http://www.zinc-excel.co.jp/ |
| 4 | 株式会社靱屋 | http://www.hisagoya.com/ |
| 5 | ユテクジャパン株式会社 | http://www.eutectic.co.jp/ |
| 6 | 株式会社エーシーエム | http://acmcorp.co.jp/ |
| 7 | 株式会社ニューメタルズエンド ケミカルスコポーレーション | http://www.newmetals.co.jp/ |
| 8 | パウレックス株式会社 | http://powlex.jp/ |
| 9 | 株式会社不二製作所 | http://www.fujimfg.co.jp/ |
| 10 | 株式会社アルミネ | https://www.almine.co.jp/ |
| 11 | 株式会社精本エンジニアリング | https://www.kakimotoeng.co.jp/ |
| 12 | 株式会社クリスタル | http://crystal-ltd.com/ |
| 13 | コーケン・テクノ株式会社 | http://www.coaken-techno.co.jp/ |
| 14 | 三興物産株式会社 | http://www.sanko-stellite.co.jp/ |
| 15 | 株式会社フジインコーポレーテッド | http://www.fujiminc.co.jp/ |
| 16 | 吉川工業株式会社表面処理事業部 | http://www.ykc.co.jp/ |
| 17 | 厚地鉄工株式会社 | http://www.tsuchi-ascon.co.jp/ |
| 18 | 株式会社澤村溶射センター | http://yosha.jp/ |
| 19 | 志田インターナショナル株式会社 | http://homepage3.nifty.com/shida-international/ |
| 20 | 山中産業株式会社 | http://www.yamanaka.co.jp/ |
| 21 | 株式会社クリスタル | http://crystal-ltd.com/ |
| 22 | 九溶技研株式会社 | http://www.tsaip.com/ |

表6 海外の溶射装置及び溶射関連材料販売企業

| No. | 企業名【代理店】 | URL (Home Page) |
|-----|--|-------------------------------------|
| 1 | Alloys International, Inc. 【代理店: 三井物産工作機械㈱】 | https://alloysintl.com |
| 2 | Bay State Surface Technologies, Inc. 【代理店: 溶射技研㈱】 | https://www.baystatesurfacetech.com |
| 3 | Deloro Stellite 【代理店: 三興物産㈱】 | https://www.deloro.com |
| 4 | Eutectic Castolin 【代理店: 日本ユテク㈱】 | https://www.castolin.com |
| 5 | Hermann C Starck Inc. 【代理店: ヘルマン シェスターク ファーイスト㈱】 | https://www.hcstarck.com |
| 6 | Hoganas Sweeden Int. 【代理店: ホガナス スウェーデン㈱】 | https://www.hoganas.com |
| 7 | Metallisation Limited 【代理店: 瀬澤村溶射センター】 | https://www.metallisation.com |
| 8 | Norton Company 【代理店: ノートン㈱】 | https://www.nortonabrasives.com |
| 9 | Sulzer Meteco Japan Inc. 【代理店: スルザーメテコジャパン㈱】 | http://www.sulzer-metco-japan.co.jp |
| 10 | Union Carbide Corporation 【代理店: ユニオンカーバイド工業㈱】 | http://www.unioncarbide.com |

表7 西日本地域における溶射施工企業

| No. | 企業名 | URL (Home Page) |
|-----|-----------------|----------------------------------|
| 1 | 石川金属工業株式会社 | http://www.isikawa-k.co.jp/ |
| 2 | エアロテック株式会社 | http://aerotec.jp/ |
| 3 | 株式会社沖縄神洋ペイント | http://www.okinawashinyo-p.jp/ |
| 4 | 三喜工業株式会社 | http://sankiindustry.co.jp/ |
| 5 | 株式会社白浜工業 | http://www.shirahama-k.jp/ |
| 6 | 第一化工株式会社 | http://www.daiichi-kk.com/ |
| 7 | 中国メタリコン工業株式会社 | http://chu-meta.co.jp/ |
| 8 | 東京メタリコン株式会社(長崎) | http://www.tokymetallikon.co.jp/ |
| 9 | 有限会社 橋口製作所 | http://www.hasi-ss.jp/ |
| 10 | 株式会社フジコー | http://www.kfjc.co.jp/ |
| 11 | 株式会社ウイル | http://www.will-ok.com/ |
| 12 | 株式会社カワテツ | http://www.kawatetsu.net/ |
| 13 | 倉敷ボーリング機工株式会社 | http://www.kbknet.co.jp/ |
| 14 | 株式会社ジェネシス | https://genesis-tottori.com/ |
| 15 | 新栄防蝕株式会社 | http://shineiboushoku.com/ |
| 16 | ダイクレ興産株式会社 | http://daikure-kousan.co.jp/ |
| 17 | 株式会社津田洗工業 | http://www.tsuda-co.biz-web.jp/ |
| 18 | トーカロ株式会社(福岡県) | https://www.tocalo.co.jp/ |
| 19 | 富士岐工業株式会社 | http://www.fjk-kk.co.jp/ |
| 20 | 株式会社萬代 | http://mandai.mandai-group.jp/ |

海外の溶射装置及び溶射関連材料販売企業としては、表6に示すような企業があげられる。

4.2 溶射施工企業

日本溶射工業会に所属する西日本地域における溶射施工企業としては、一例として、表7に示すような企業があげられる。

5. 溶射施工検討事例

種々のプラント設備において、特殊な耐摩耗性、耐熱性、耐食性、電気絶縁性、光学的特性などが要求される部位には、それぞれの要求特性に応じた溶射施工が施工され、プラント設備の高性能化や長寿命化に役立てられている。高性能化を志向する溶射施工は新規のプラント建設時に適用される場合が多いが、長寿命化を志向する場合には、既設のプラント設備においてもプラント設備の定期検査等の休止時期を利用して適用されている。また、溶射装置の中には、大型の高温プラズマ溶射装置などで工場内での施工に限られる場合もある一方、可搬式のガスフレーム式粉末溶射装置は、軽量で現地での施工に適したものもある。そこで、今回、既設プラント設備への耐食性等の付与を主目的として、ガスフレーム式粉末溶射装置を用いた溶射条件の検討を目的として、溶射施工試験を行ったので以下に紹介する。

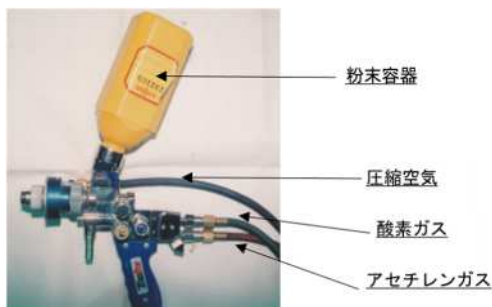
5.1 溶射施工試験方法

(1) 溶射装置

溶射施工試験に使用した溶射装置は、アセチレン-酸素を燃焼ガスとして用い、圧縮エアのジェット効果を利用した高速ガス溶射装置で、ユテクジャパン株式会社製のTeroDyn System 2000を用いた。図3にTeroDyn System 2000のトーチ部を示す。



(a) トーチ先端部分分解後外観



(b) 溶射粉末容器設置後

図3 TeroDyn System 2000のトーチ部

(2) 溶射材料

溶射施工試験に使用した溶射材料は、ユテクジャパン株式会社製の溶射粉末29220 (AL-Powder) および29230 (Zn-Powder) で、溶射粉末の粒度は、いずれも120 μ m以下とした。溶射材料の化学組成は、表8に示す通りである。

(3) 母材の材質及び寸法

母材の材質は、JISG3101一般構造用圧延鋼材のSS400とし、板材の寸法は幅100mm、長さ100mm、厚さ6mmとした。アルミ系および亜鉛系等の溶射材料毎に各6枚の試験材を準備した。

(4) 母材の下地処理

母材の下地処理は、溶射前に、スチールショットブラスト (粒度：#14~20, ブラスト圧力：7kgf/cm²) を実施し、溶射材料の粒度分布を考慮して、目標とする最大粗さを R_{max} ($\approx R_y$) = 50 μ mとした。

(5) 溶射施工試験条件

ボンドコート、セラミック、アルミニウム、亜鉛、セルフボンドといった溶射材料メーカーが製造・販売している溶射材料毎に適正溶射速度を検討するために、まず、溶射皮膜の外観試験による予備試験を実施した。続いて、耐食性の付与を主目的として、アルミ系および亜鉛系の溶射施工試験を、溶射面が地面に垂直となるように固定して実施した。予熱温度は50 $^{\circ}$ C~100 $^{\circ}$ Cとし、溶射後、溶射皮膜の付着量、JISH8401に従ってマイクロメータを用いて測定した平均膜厚をもとに、平均見かけ密度、気孔率等の検討を行った。アルミ系および亜鉛系の溶射試験条件は表9に示す通りとした。

(6) 表面粗さ測定方法

溶射前の母材の下地処理としてスチールショットブラストを実施したブラスト面、アルミニウムおよび亜鉛溶射を実施したそれぞれの溶射施工面の表面粗さを小坂研究所製 (SE-3C型) の表面粗さ計を用いて測定した。表面粗さは、中心線平均粗さ R_a および最大粗さ R_{max} ($\approx R_y$) で評価した。

表8 溶射材料の化学組成

| 溶射材料 | 化学組成 (%) | | | | | | |
|-------------------|----------|------|------|------------|------------|------------|------|
| | Al | Zn | Si | Pb | Fe | Cd | Cu |
| 29220 (AL-Powder) | Bal. | — | 0.04 | — | 0.12 | — | 0.00 |
| 29230 (Zn-Powder) | — | Bal. | — | 0.001 3 | 0.000 2 | 0.000 2 | — |

表9 アルミ系および亜鉛系の溶射試験条件

| | アルミ系 | 亜鉛系 |
|--------------------------------|--------------|-------------|
| ノズル | RL210 | LT250 |
| ロト・ジェット | 60 | 20 |
| モジュールアダプタ | Red/Yellow | Red/Yellow |
| Tバルブ | 5(縦) / 10(横) | 5(縦) / 5(横) |
| 酸素ガス圧力 (kg/cm ²) | 3.5 | 3.5 |
| 酸素ガス流量 (L/min.) | 40 | 28 |
| アセチレンガス圧力(kg/cm ²) | 0.8 | 0.8 |
| アセチレンガス流量(L/min.) | 60 | 30 |

(7) 溶射皮膜の密着性試験方法

アルミ溶射皮膜の密着性試験は JISH8663 の 8 (JISH8300 に統合) に、亜鉛溶射皮膜の密着性試験は JISH8661 の 7 (JISH8300 に統合) にそれぞれ規定されているケイ線試験法に従って実施した。ケイ線試験法は、図4に示す針状引カキ具 (先端30度鋭角の鋼) で2本の平行線傷を素地に達するまで入れ、この平行線の間皮膜の剥離状態を観察した。ただし、平行線間隔は膜厚の10倍とした。

5.2 溶射試験結果および考察

(1) 各溶射材料の適正溶射速度

溶射材料が異なれば、密度、融点、比熱、熱容量、熱伝導率などの物理的性質が異なるため、当然、重力や風等の影響を受け、溶射面に垂直なノズルを平行に移動させても均一な溶射皮膜が得られるとは限らない。従って、実施前に、適正溶射速度の確認を行っておく必要がある。

予備的な外観試験により、母材との溶射距離を100mmとして、溶射トーチを縦方向 (上下方向) および横方向 (左右方向) に移動させた場合の適正溶射速度を各溶射材料に検討した。各溶射材料における適正溶射速度の目安を表10に示す。

(2) アルミ系および亜鉛系溶射皮膜の溶射試験結果

スチールショットブラストを行った下地処理材の外観を図5に示す。下地処理材の表面は、最大粗さが R_{max} ($\approx R_y$) = 40~50 μ mの均一な凹凸を示した。この下地処理材を用いたアルミニウムおよび亜鉛溶射皮膜の外観を図6に示す。外観上は、ふくれ、割れ、き裂、焼け、ピンホール、気泡、溶滓やスパッタの付着、変色等の有害な欠陥は見当たらず、良好な溶射表面を示した。

各6枚の試験材を用いたアルミ系および亜鉛系の溶射試験結果を表11および表12に示す。データのばらつきは、溶射条件や作業者の技量、溶射材料の物性 (密度差) 等複数の要因に依存すると考えられる。

アルミニウム溶射皮膜の膜厚と見かけ密度の関係を図7に、亜鉛溶射皮膜の膜厚と見かけ密度の関係を図8にそれぞれ示す。いずれの皮膜の見かけ密度も、

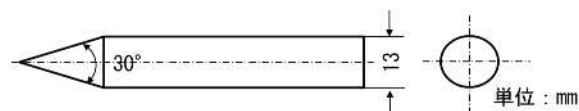


図4 針状引カキ具

表10 各溶射材料における適正溶射速度の目安

| 溶射材料 | 縦方向 (cm/sec) | 横方向 (cm/sec) |
|---|--------------|--------------|
| ボンドコート (下地用: Ni+Al) | 33~36 | 26~29 |
| セラミックコート (Al ₂ O ₃ 系) | 25~27 | 21~24 |
| アルミニウムコート (Al系) | 28~34 | 28~33 |
| 亜鉛コート (Zn系) | 32~35 | 30~34 |
| セルフボンドコート (Ni系) | 25~28 | 18~21 |

内部気孔の存在により、それぞれの元素の真密度より低い値を示しているが、今回の溶射施工試験条件の範囲において、アルミニウム溶射の場合、膜厚約 220 μm のとき、最大見かけ密度 2.45 g/cm^3 を示した。また、亜鉛溶射の場合、膜厚約 130 μm のとき、最大見かけ密度 6.42 g/cm^3 を示した。

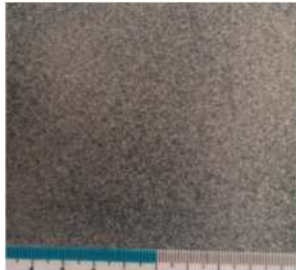
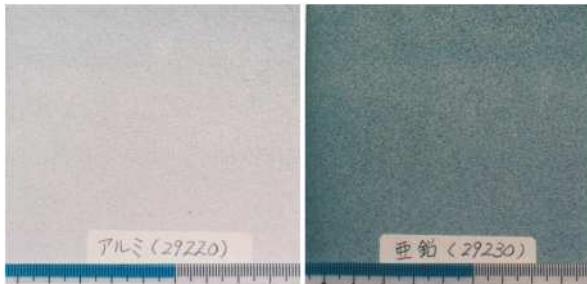


図5 下地処理材の外観



(a) Al 溶射皮膜 (b) Zn 溶射皮膜
図6 アルミニウムおよび亜鉛溶射皮膜の外観

表11 アルミ系溶射試験結果

| アルミ系 | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 予熱温度 (°C) | 52 ~ 82 |
| 溶射時間 (秒) | 13.1~14.6 (縦) / 11.6~12.5 (横) |
| 溶射速度 (cm/sec) | 31.2~33.6 (縦) / 28.1~31.3 (横) |
| 母材重量 (プラスト後) (g) | 425.3 ~ 433.2 |
| 母材重量 (溶射後) (g) | 430.4 ~ 438.6 |
| 付着量 (g) | 5.0 ~ 5.7 |
| 単位面積当たり付着量 (g/m^2) | 500 ~ 570 |
| 溶着速度 (kg/hour) | 0.590 ~ 0.814 |
| 下地処理後母材板厚 (mm) | 5.63 ~ 5.80 |
| 溶射後母材板厚 (mm) | 5.83 ~ 6.01 |
| 膜厚 (μm) | 210 ~ 240 |
| 見かけ密度 (g/cm^3) | 2.34 ~ 2.50 |
| 気孔率 (%) | 7.75 ~ 13.7 |

表12 亜鉛系溶射試験結果

| 亜鉛系 | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 予熱温度 (°C) | 51 ~ 73 |
| 溶射時間 (秒) | 12.2~14.9 (縦) / 8.78~11.3 (横) |
| 溶射速度 (cm/sec) | 33.8~40.2 (縦) / 27.6~31.3 (横) |
| 母材重量 (プラスト後) (g) | 424.5 ~ 428.1 |
| 母材重量 (溶射後) (g) | 432.2 ~ 435.9 |
| 付着量 (g) | 7.2 ~ 8.6 |
| 単位面積当たり付着量 (g/m^2) | 720 ~ 855 |
| 溶着速度 (kg/hour) | 1.17 ~ 1.31 |
| 下地処理後母材板厚 (mm) | 5.67 ~ 5.75 |
| 溶射後母材板厚 (mm) | 5.78 ~ 5.87 |
| 膜厚 (μm) | 120 ~ 150 |
| 見かけ密度 (g/cm^3) | 5.36 ~ 6.5 |
| 気孔率 (%) | 8.84 ~ 24.7 |

(3) 溶射皮膜の表面粗さ測定結果

アルミニウムおよび亜鉛溶射施工面およびプラスト面の表面粗さ測定結果を表13に示す。また、表面粗さ測定チャートを図9に示す。母材のプラスト面の表面粗さに対して、アルミニウムおよび亜鉛溶射施工面の表面粗さは、中心線平均粗さ Ra および最大粗さ Rmax とともに約 2 倍の値を示した。また、亜鉛溶射施工面の表面粗さはアルミニウム溶射施工面の表面粗さよりも低い値を示した。これは、亜鉛の融点 (420°C) や比熱 (0.389 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$) は、アルミニウムの融点 (660°C) や比熱 (0.905 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$) と比べると低い値を示しており、熱による変形能が相対的に大きくなるためと考えられる。

(4) 溶射皮膜の密着性試験結果

溶射皮膜の密着性試験に用いた針状引カキ具外観を図10に示す。また、図11に密着性試験後の試験片外観を示す。アルミニウム溶射皮膜の膜厚は 220 μm で、ケイ線間隔は 2.2mm とし、亜鉛溶射皮膜の膜厚は 150 μm で、ケイ線間隔は 1.5mm とした。いずれの場合においても、ケイ線間における皮膜の剥離は認められず、良好な密着性を示した。

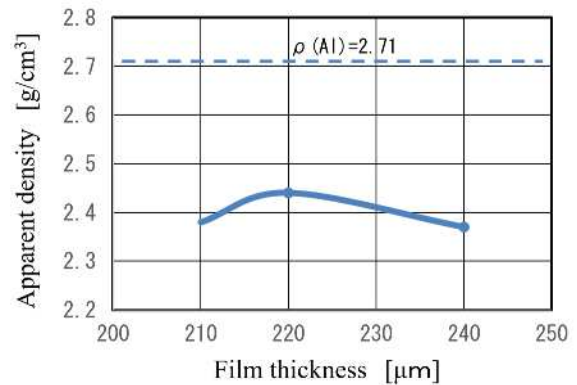


図7 アルミニウム溶射皮膜の膜厚と見かけ密度の関係

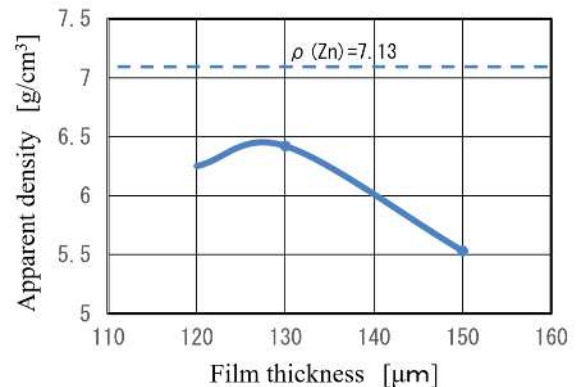


図8 亜鉛溶射皮膜の膜厚と見かけ密度の関係

表13 アルミニウムおよび亜鉛溶射施工面および
ブラスト面の表面粗さ測定結果

| 測定面 | Ra (μm) | Rmax (μm) |
|-------------|---------|-----------|
| ブラスト面 | 6.5 | 40 ~ 50 |
| アルミニウム溶射施工面 | 18 | 80 ~ 100 |
| 亜鉛溶射施工面 | 16 | 60 ~ 80 |

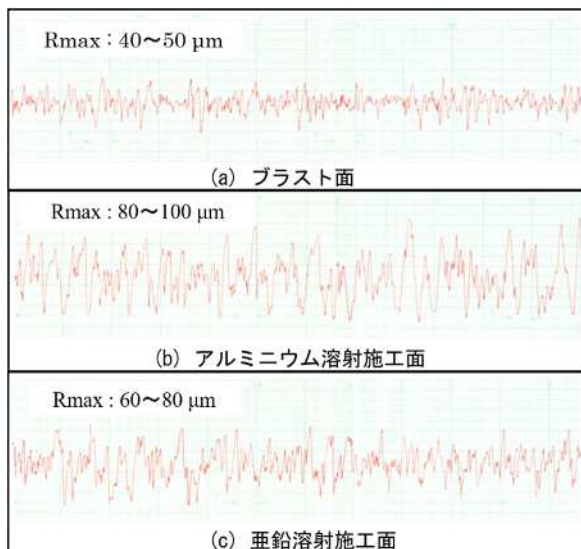


図9 表面粗さ測定チャート



図10 針状引力キ具外観

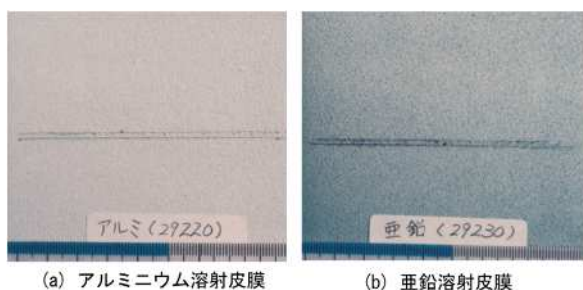


図11 密着性試験後の試験片外観

5.3 溶射施工試験のまとめ

ガスフレーム式粉末溶射装置を用いて実施した溶射施工試験により、各溶射材料における適正溶射速度の目安や、アルミ系および亜鉛系溶射皮膜の膜厚と見かけ密度の関係、アルミニウムおよび亜鉛溶射施工面およびブラスト面の表面粗さ等に関する検討を行い、種々の知見を得た。また、溶射皮膜の密着性試験により、溶射皮膜の剥離はなく、十分な密着性を確認した。実施工においては、事前に施工条件を十分に確認しておくことが肝要であり、品質保証の観点からは、有資格者である溶射技能士による施工、有資格者である溶射管理士による管理や検査が必要と考える。

6. おわりに

溶射技術は、耐摩耗性、耐熱性、耐食性、電気絶縁性、光学的特性など様々なニーズに合った機能を表面のみの改質で利用でき、しかもバルク材を使用するよりもはるかに経済的な施工法であり、プラント設備の長寿命化や使用条件の苛酷化等への要求から急速に脚光を浴びるようになってきている。そして、今後のプラント業界においては、プラントライフサイクルエンジニアリングを発展させていくために、溶射施工を正しく評価できる有資格プラントエンジニアの育成はますます必要になってくると考えられる。

本稿では、プラントエンジニアとして知っておくと役に立つ溶射技術の概要を述べるとともに、プラント設備の補修に際し、何らかの参考となるようガスフレーム式粉末溶射装置を用いた検討事例について紹介した。読者の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば、溶射の原理、溶射工学便覧、pp.3-8、(2010)
- 2) 例えば、溶射皮膜の機能を利用した応用例、溶射工学便覧、pp.827-832、(2010)
- 3) Thermal Spraying, H. Hermann, Science, Nov. pp.84-91, (1988)
- 4) 例えば、<http://www.jtss.or.jp/>, 1st, Dec., 2020
- 5) 例えば、<http://www.jtsa.jp/>, 1st, Dec., 2020
- 6) 例えば、<https://www.fukuoka-noukai.or.jp/>, 1st, Dec., 2020
- 7) 例えば、https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/jinzaikaihatsu/ability_skill/ginoukentei/index.html 1st, Dec., 2020