とが望ましい。通常、検出信号には10%程度の雑音が含まれているが、信号処理を行うと、溶接線による検出信号の強度変化が10%程度まで検出可能である。言い換えると、電子ビーム径の1/10程度の凹凸(数10 μ m)が実用的な検出限界と考えられる。

次に、X線と反射電子の両方式を比較すると、電子ビーム溶接機では電力用機器が多数使用されているにもかかわらず、X線検出方式の場合、誘導性の雑音は皆無に近い。また、電子ビーム溶接では、金属蒸気やスパッタが大量に発生し、センサを汚染するが、X線検出方式の場合、数100 μ mの厚さまではX線は透過し、また、付着した金属蒸気やスパッタの除去も、センサが小形であるため、容易に行える。一方、反射電子検出方式の場合、金属蒸気の付着により、アンテナの絶縁は容易に破壊されて短絡する。従って、X線検出方式が、数10 μ m以上の凹凸を検出する電子ビーム溶接機の溶接線検出法として、実用上優れていると考えられる。一方、ワークの凹凸が数 μ m以下になると、反射電子、特に2次電子検出法が分解能の点で非常に優れており、ビーム電力の小さい微細加工では金属蒸気等による汚染も少ないので実用的と考えられる。

6. 結 論

X線センサを用いた溶接線検出方式を中心に、反射電子方式との比較、検出信号処理法について述べた。その内容を次に要約する。

(1) X線センサは金属で完全に遮蔽されているため電磁波雑音に強く、小形で、かつ、金属蒸気やスパッタの影響も受けにくいので、非常に実用的である。

(2) 電子ビーム溶接機の溶接線検出装置は高雑音の環境下で使用されるので、高分解能の溶接線検出には、時間平均化による信号処理が極めて有効である。

参 考 文 献

- 1) Y. Arata and M. Tomie; 100kW Class Electron Beam Welding Technology (Report IV)—Fundamental Research on Horizontal Electron Beam Welding—, Trans. JWRI. 9-2 (1980), 15-24.
- 2) S. Sasaki, S. Yasunaga, H. Murakami, K. Hara and M. Hattori; A Compact Electron Beam Welder for Mass Production Lines, IIW Doc. IV-317-82 (1982)
- 3) G. Sayehg, P. Dard and D. Weber; Automatic Alignment of E.B. on Joints Application of Welding Tubes to Tubesheet in Heat Exchangers, Proc. International Conference on Welding Research in the 1980's, A-(8) (1980), 43-48.
- 4) S. Sasaki, H. Murakami, T. Iwami and S. Yasunaga; Automatic Weld-Line Sensing and Work Positioning for Electron Beam Welding, IIW Doc. IV-368-84 (1984)
- 5) 寺田, 稔; 近代電子管工学, 電気書院, (1970), 57.

アーク溶射皮膜の付着力と溶融金属温度の関係*

—アーク溶射法に関する研究(第4報)—

川瀬 良一**, 暮石 正義**

Relation between Adhesion Strength of Arc Sprayed Coating and Fused Metal Temperature

—Study on Arc Spraying (Report 4)—

by Ryoichi Kawase**, and Masayoshi Kureishi**

Adhesion strength of sprayed coating, F, is related to fused metal temperature in arc spraying of aluminium and stainless steel. Fused metal temperatures are estimated at tow stages on the flight process of fused metal. One of them, Tc, is estimated at adhesion stage with a silicone oil calorimeter, and the other, Ti, at fusion stage by the calculation of heat input.

Main results of the study are summarized as follow;

(1) F, Tc and Ti depend on the wire feed speed parameters $v_+/(v_++v_-)$ where v_+ is positive electrode side and v_- is negative. The graphs of F, Tc and Ti versus $v_+/(v_++v_-)$ all exhibit a similar pattern.

* 原稿受付 昭和59年6月16日(昭和60年度春季全国大会論文発表講演)

** 正 員 日立造船(株) Member, Hitachi Zosen Corporation

- (2) F increases with increasing T_c and T_i .
- (3) The maximum F is obtained when heat input per unit wire deposition is maximum.
- (4) The arc spraying condition to obtain the maximum F is estimated by measurement of the heat input parameter [S.S.H.], where [S.S.H.] is calculated from v_+ , v_- and average arc current.

1. 緒 言

アーク溶射において、溶融された金属の温度は溶射皮膜性能、特に皮膜の付着力に大きく影響すると考えられる。

著者らは第3報¹⁾、アルミニウム及びステンレス鋼を溶射材料として、ワイヤ送給速度を変えた場合の溶融金属の温度を推定した。溶融金属温度の推定は Fig. 1²⁾に示す溶融金属の飛行プロセス中の2カ所、すなわち、過程Ⅰ(ワイヤの溶融過程)と過程Ⅳ(溶融金属の附着過程)で行った。前者の温度(以下 T_i とする)は入熱条件から推定し、後者の温度(以下 T_c とする)は熱量計により推定した。これらの温度が正極及び負極ワイヤ送給速度条件によって大きく影響を受けることが確認された。

Fig. 1 Arc spraying process

本研究では、アルミニウム及びステンレス鋼を溶射材料として、ワイヤ送給速度などの溶射条件を変えて、鋼板に溶射し、その皮膜の付着力と前述の溶融金属温度 T_i 及び T_c との関係を検討した。さらに、皮膜の付着力と入熱条件の関係についても考察した。

2. 実験方法

2.1 溶射装置、溶射材料及び溶射条件

Fig. 2 は実験に用いたアーク溶射装置を示したものである。アーク電流とアーク電圧はペン書きオシログラムで測定し、それぞれの平均値を平均アーク電圧 V_{av} 、平均アーク電流 I_{av} とした。

Table 1 は実験に用いた溶射材料を示す。いずれのワイヤも直径 1.6 mm のものを用いた。

Table 2 はアーク溶射条件を示したものである。アルミニウム及びステンレス鋼(SUS 308)を溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} 、正極ワイヤ送給速度 v_+ 及び

Fig. 2 Scheme of arc spraying equipments

Table 1 Spraying materials

Material	Composition
Aluminium (Al)	Pure Al (over 99.7%)
Stainless steel(SUS308)	10~12%Ni, 19~21%Cr

Table 2 Arc spraying condition

Spraying material	Al	SUS 308
V_{av} (V)	25, 30, 35	30, 35, 40
v_+ (m/min)	8	6, 4, 8
v_- (m/min)	3, 6, 8, 12, 16	4, 6, 8, 10, 12, 6
l_s (mm)	100	150

負極ワイヤ送給速度 v_- を変化させた。なお、溶射距離 l_s はアルミニウムの場合 100 mm、ステンレス鋼の場合 150 mm とし、表に示した以外の溶射条件は一定とした。

2.2 溶射皮膜の付着力測定方法

溶射ガンを自走式の台車に搭載して、溶射ガン移動速度と溶射距離を一定にして、皮膜厚が 250~300 μm に

Fig. 3 Method of adhesion test

なるように、 $500 \times 300 \times 4.5$ mm の軟鋼板に直角に溶射した。軟鋼板は表面粗さ $50 \mu\text{m}$ R_z 程度にグリットブラストしたものを使用し、ブラスト処理後4時間以内に溶射を行った。なお、軟鋼板の予熱は行わなかった。

以上の方法で作製した溶射鋼板から、 40×50 mm の小片を数個切り出し、Fig. 3 に示す付着力試験を行った。すなわち、直径 25 mm の円柱型治具をエポキシ樹脂系接着剤で溶射面に接着し、接着剤が固化した後、円柱型治具が破断するまで引張った。破断はすべて溶射皮膜と鋼板の境界で起ったため、その破断応力をもって皮膜の付着力 F とした。

2.3 過程Ⅰにおける熔融金属温度 T_i の推定方法

過程Ⅰにおける熔融金属温度 T_i は直接的に測定できないので、入熱条件から推定した。

Fig. 4 Schematic illustration of arc spraying

Fig. 4 は溶射ガン先端部におけるワイヤの熔融状態を示したものである²⁾。正極及び負極ワイヤを溶融するために⑥及び⑦点近傍に供給される単位重量あたりの全入熱量 Q_i (J/g) は次式で示される¹⁾。

$$Q_i = Q_1 + Q_2$$

$$= V_m \cdot I_{av} / M_w + 2 R I_{av}^2 / M_w \quad \dots\dots(1)$$

ここで

- Q_1 ; 正極及び負極の発熱量 (J/g)
- Q_2 ; ⑥⑦及び⑧⑨間のジュール熱 (J/g)
- V_m ; 熔融の等価電圧 (V)
- M_w ; ワイヤの送給量 (g/s)
- R ; ワイヤ突出し部の電気抵抗 (Ω)

Table 3 Physical properties of spraying materials

Spraying material	Al	SUS308
V_m (V)	11.0	17.25
R (Ω)	1.3×10^{-4}	5.5×10^{-3}
T_m ($^{\circ}\text{C}$)	660	1400
Q_m (J/g)	398	272
T_r ($^{\circ}\text{C}$)	20	20
C_1 (J/g deg)	1.05	0.63
C_2 (J/g deg)	1.13	0.63
P (g/cm ³)	2.7	8.0

また、熔融金属温度 T_i は次式で求められる¹⁾。

$$T_i = T_m + \{Q_i - C_1(T_m - T_r) - Q_m\} / C_2 \quad \dots\dots(2)$$

ここで

- T_m ; 溶射材料の融点 ($^{\circ}\text{C}$)
- C_1 ; 融点以下での溶射材料の平均比熱 (J/g deg)
- C_2 ; 融点以上での溶射材料の平均比熱 (J/g deg)
- T_r ; 溶射前のワイヤ温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- Q_m ; 溶射材料の熔融潜熱 (J/g)

なお、計算に用いた溶射材料(アルミニウム, SUS308)の物性値を Table 3 に示す。

2.4 過程Ⅳにおける熔融金属温度 T_e の推定方法^{*)}

過程Ⅳにおける熔融金属温度 T_e は熱量計によって熔融金属の保有熱量を測定し、その値から推定した。

Fig. 5 Schematic diagram of calorimeter

Fig. 5 は熔融金属の保有熱量を測定するために用いた熱量計の概略を示したものである。熱量計は、“熱吸収材として用いたシリコンオイルを入れる断熱構造の円筒型容器”、“熔融金属を捕集する銅製円筒型容器”、“シリコンオイルをかく拌するかく拌装置”、シリコンオイルの温度とアークによって加熱された圧縮空気流の温度を測定する銅コンスタンタン熱電対(α)と(β)”及び“水冷した円錐状の銅製シェルターと軟鋼製シェルター”からなっている。

以上の熱量計の上方から、溶射距離 $L_s=300$ mm、圧縮空気圧 $P=490$ kPa で、垂直に5秒間溶射した。2つのシェルターを通過した熔融金属は銅製円筒型容器に捕集される。熔融金属の保有熱は、この銅製容器を介してシリコンオイルに伝えられる。シリコンオイルを十分にかく拌しながら、熱電対(α)でシリコンオイル温

*) 推定方法の詳細は文献1)に報告しているので、ここでは簡単に述べた。

度 T_c の経時変化を測定し, 溶融金属によって熱量計に供給された熱 H_c によるシリコンオイル温度上昇 ΔT を求めた. すなわち, H_c は

$$H_c = J \cdot \Delta T \quad \dots\dots(3)$$

となる. また, 溶融金属温度 T_c は

$$T_c = T_m + \{H_c/M - C_1(T_m - T_o) - Q_m\}/C_2 \dots\dots(4)$$

となる. ここで

J ; 熱量計中のシリコンオイルを 1°C 上げるのに必要な熱量 (J/deg)

M ; 捕集された溶融金属量 (g)

3. 実験結果及び考察

3.1 皮膜の付着力と溶融金属温度の関係

皮膜の付着力と過程 I における溶融金属温度 T_i 及び過程 IV における溶融金属温度 T_c の関係について, アルミニウム溶射, ステンレス鋼 (SUS 308) 溶射の順で以下に述べる.

(1) アルミニウム溶射の場合

Fig. 6 はワイヤ送給速度条件 $v_+/(v_+ + v_-)$ を横軸にとった場合の皮膜の付着力 F , 溶融金属温度 T_i 及び T_c を示したものである.

Fig. 6 Condition of wire feed speed versus fused metal temperature and adhesion strength (Al)

F , T_i 及び T_c はワイヤ送給速度条件によって変化し, $v_+/(v_+ + v_-) = 0.4 \sim 0.5$ でいずれも最大となっている*).

以上のことから, 皮膜の付着力に対する溶融金属温度の影響について以下のように考察する.

* T_i と T_c を比較した考察は文献 1) に報告したので, ここでは省略した.

過程 IV, すなわち, 溶融金属の付着過程において, 皮膜の付着力 F と溶融金属温度 T_c がワイヤ送給速度条件に対して, 同様な変化傾向を示したことから, 溶融金属温度 T_c が高くなると皮膜の付着力 F も高くなるといえる. また, 皮膜の付着力 F は過程 I における溶融金属温度 T_i とも, ワイヤ送給速度条件に対して同様な変化傾向を示すことから, 皮膜の付着力 F は過程 I, すなわち, ワイヤの溶融過程における溶融金属温度 T_i によって左右されるといえる. また, T_i は(2)式から判るように, ワイヤの単位重量当たりの全入熱量 Q_i によって左右され, Q_i が高くなれば T_i は高くなるといえる. したがって, Q_i が最大となるワイヤ送給速度条件で溶射した時, 溶融金属温度 T_i と T_c 及び皮膜の付着力 F は最大になると考えられる.

(2) ステンレス鋼 (SUS 308) 溶射の場合

Fig. 7 はアルミニウム溶射の場合 (Fig. 6) と同様に, ワイヤ送給速度条件 $v_+/(v_+ + v_-)$ を横軸にとった場合の皮膜の付着力 F , 溶融金属温度 T_i 及び T_c を示したものである.

Fig. 7 Condition of wire feed speed versus fused metal temperature and adhesion strength (SUS308)

F , T_i 及び T_c はワイヤ送給速度条件によって変化し, $v_+/(v_+ + v_-) = 0.4$ 程度で最大となっている*). このような傾向はアルミニウム溶射の場合とほぼ同様であることから, 皮膜の付着力に対する溶融金属温度の影響についても, アルミニウム溶射の場合と同様に考察される. すなわち, 溶射材料が変わっても, 皮膜の付着力と溶融金属温度の関係は同じ傾向にあると考えられる.

3.2 最大付着力が得られる溶射条件の推定法

前述の皮膜の付着力と溶融金属の関係の検討結果が

ら、ワイヤの単位重量当たりの全入熱量が最大となる入熱条件で溶射した時、熔融金属温度及び皮膜の付着力は最大となることが推測された。本項では、皮膜の付着力と入熱条件の関係についてさらに考察する。

ワイヤを熔融するためにワイヤ先端部に供給される単位重量当たりの全入熱量 Q_i (J/g) は前述の(1)式で示され、次式のようになる。

$$Q_i = V_m \cdot I_{av} / M_w + 2 R I_{av}^2 / M_w \\ = (4\pi D^2 \rho) \{ (V_m \cdot I_{av} + 2 R \cdot I_{av}^2) / (v_+ + v_-) \}$$

ここで

D ; ワイヤ径 (cm)

ρ ; ワイヤの密度 (g/cm³)

上式において、溶射材料が一定であれば、

$$(4\pi D^2 \rho) = \text{constant}$$

となる。したがって、

$$Q_i \propto \{ (V_m \cdot I_{av} + 2 R I_{av}^2) / (v_+ + v_-) \}$$

となる。ここで、右辺を [S.S.H.] 比溶射熱量 (specific spraying heat) とする。 V_m 及び R は溶射材料によって一定値と考えられることから³⁾、 v_+ 、 v_- と I_{av} を推定すれば、[S.S.H.] は計算でき、 Q_i の増減を推定することができる。すなわち [S.S.H.] が大きくなれば、 Q_i は増加し、熔融金属温度 T_i 及び T_e は高くなり、皮膜の付着力も向上すると推定される。

以上の推定をアルミニウム溶射とステンレス鋼 (SUS 308) 溶射の場合で以下に確認する。

(1) アルミニウム溶射の場合

Fig. 8 はアルミニウムを溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} とワイヤ送給速度条件を変化させて溶射した時の Q_i または [S.S.H.] と皮膜の付着力 F の関係を示したものである。 Q_i または [S.S.H.] が増加すれば F は増加する傾向にある。なお、この傾向には多くのばらつきがあるが、この理由としては、熔融金属の形状や速度などの他に要因により⁴⁾、付着力が影響を受けたと考えられる。

Fig. 8 Relation between heat quantity of fused metal and adhesion strength (Al)

(2) ステンレス鋼 (USS308) 溶射の場合

Fig. 9 はステンレス鋼 (SUS 308) を溶射材料として、平均アーク電圧 V_{av} とワイヤ送給速度条件を変化させて溶射した時の Q_i または [S.S.H.] と皮膜の付着力 F の関係を示したものである。アルミニウム溶射の場合と同様に、 Q_i または [S.S.H.] が増加すれば F は増加する傾向にある。この傾向にも多少のばらつきがあるが、その理由は、アルミニウム溶射の場合と同様に、他の要因が付着力に影響したと考えられる。

Fig. 9 Relation between heat quantity of fused metal and adhesion strength (SUS308)

以上のように、アルミニウム溶射またはステンレス鋼 (SUS 308) 溶射の場合でも、[S.S.H.] と皮膜の付着力が比例関係にあることが判った。すなわち、[S.S.H.] が最大となる溶射条件で溶射した時、皮膜の付着力は最大となるといえる。具体的には、 v_+ をある速度で一定にして、 v_- を変化させて溶射した時の I_{av} を測定し、それぞれの [S.S.H.] を計算して、[S.S.H.] が最大となる v_- を選定すれば、皮膜の付着力が最大となる溶射条件を設定することができる。なお、 v_+ は溶射量を左右するため、目標膜厚や被溶射材の形状などから設定される。

4. 結 言

アルミニウムとステンレス鋼を溶射材料として、ワイヤ送給速度などの溶射条件を変えて鋼板に溶射し、その皮膜の付着力と熔融金属温度の関係について検討した。熔融金属温度は熔融金属の飛行プロセス中の2か所、すなわち、ワイヤの熔融過程と熔融金属の付着過程で推定した。前者の温度 (T_i) は入熱条件から推定し、後者の温度 (T_e) は熱量計より推定した。また、皮膜の付着力と入熱条件との関係についても考察した。

得られた主要な事項は以下のとおりである。

- (1) 皮膜の付着力、熔融金属温度 T_i 及び T_e は正極及び負極ワイヤの送給速度条件によって変化し、その変化傾向はいずれも同様な傾向を示す。
- (2) T_i 及び T_e が高くなるにしたがって皮膜の付着力

は高くなる。

(3) T_i が最大となる溶射条件, すなわち, 溶融金属の単位重量当たりの入熱量が最大となるワイヤ送給速度条件で溶射した時, 皮膜の付着力は最大となる。

(4) 以上のことから, 付着力が最大となる溶射条件は正極及び負極ワイヤ送給速度と平均アーク電流から計算できる入熱パラメータ [S.S.H.] が最大となる条件をみ

つけることによって, 設定することができる。

参考文献

- 1) 川瀬, 森石; アーク溶射における溶融金属温度—アーク溶射法に関する研究 (第3報) —, 本誌, 2-3 (1984)
- 2) 川瀬, 森石, 前原; アーク溶射におけるアーク現象とワイヤ溶融—アーク溶射法に関する研究 (第2報), 本誌, 2-2 (1984) 82-87
- 3) 安藤, 長谷川; 溶射アーク現象, 産報 (1976)
- 4) 川瀬, 森石, 峰久; アーク溶射条件と皮膜の付着力との関係—アーク溶射法に関する研究 (第1報) —, 本誌, 1-2 (1983) 119-124

薄鋼板へのレーザビーム溶接法の適用*

益本 功**, 篠田 剛**, 石山 博之***

Application of Laser beam welding to thin steel sheet*

by Isao Masumoto**, Takeshi Shinoda**, and Hiroyuki Ishiyama***

As Laser beam can be focused to pointed area, it is suitable to apply high speed welding of thin sheet metal. This experiment was carried out to know what advantage can be expected by applying Laser beam welding to surface coated steel sheet and austenitic stainless steel.

The results obtained in this report are as follows;

- 1) Steel sheet can be welded with much smaller distortion by Laser beam welding, compared with TIG welding. For coated sheet, Laser beam welding gives less damage to coated layer than that of TIG welding. It is possible to make full penetration weld to use 3-5 times faster speed by Laser beam welding than by TIG welding.
- 2) TIG weld metal of Zn coated sheet shows Zn rich region at surface but Laser weld metal does not.
- 3) Laser beam welded joints of stainless steel show little weld decay tendency, which is almost same level as electron beam welded joint.

1. 緒 言

レーザビームは, 電子ビーム同様スポット径が小さく, アークに比べエネルギー密度が高い。しかし, 真空中の電子ビームで得られる溶接部の深い溶込みに比べ, レーザビームは光エネルギーであり, 板表面の反射等のため溶込みは必ずしも深くない。

深い溶込みを要しない薄板では, レーザビームはアーク溶接法に比べ高速溶接を行うことができる。これによって, 溶接変形量の減少, 表面処理鋼被膜損傷の減少, ステンレス鋼溶接部の粒界腐食 (ウェルド・ディケ

イ) の減少が期待される。

そこで本報告は, 自動車用表面処理薄鋼板のビード溶接をレーザビームを用いて行い, その変形量, 表面被膜への影響を TIG 溶接法と比較したものである。さらに, SUS 304 オーステナイトステンレス鋼溶接部のウェルド・ディケイについてレーザビーム, 電子ビームおよび TIG 溶接法と比較した。

2. 表面処理鋼板のレーザビーム溶接

2.1 実験方法

2.1.1 供試材料およびレーザビーム発生装置

供試鋼板は, 板厚 0.8 mm および 1.6 mm の自動車用冷間圧延鋼板 (JIS-G3141, SPCE) で, これに亜鉛被膜厚さ $4.2 \mu\text{m}$, あるいはジンクリッチプライマ厚さ $12.5 \mu\text{m}$ をそれぞれ塗布した自動車用電気亜鉛メッキおよびジンクリッチプライマ塗布鋼板である。

* 原稿受付 昭和59年5月17日 (昭和60年度 春季 全国大会 論文発表講演)

** 正 員 名古屋大学工学部 Member, Nagoya University

*** 学生員 " 大学院 Student Member, Graduate student of Nagoya University

現トヨタ自動車(株) (Present address: Toyota Motor Co.)