

レーザアシスト Ar-GMA 溶接における 適正レーザ照射条件の明確化と機械学習を応用した 適正条件提案システムの構築

国立研究開発法人 物質・材料研究機構
構造材料研究拠点 溶接・接合技術グループ
主任研究員 北野 萌一
(平成 29 年度 奨励研究助成 A (若手研究者) AF-2017237)

キーワード：レーザアシスト Ar-GMA 溶接，溶接プロセス安定化，機械学習

1. 研究の目的と背景

溶接ワイヤを送給し、ワイヤ先端と母材の間でアーク放電を発生させてワイヤと母材を溶融して接合する消耗電極式溶接(Gas Metal Arc 溶接: 以下、GMA 溶接)は構造物製作において広く利用されている。鋼系材料の溶接ワイヤを用いた GMA 溶接では、溶接部の靱性向上の観点から純 Ar ガスをシールドガスとして吹付けながら溶接を行うことが有効である。しかし純 Ar シールドガスを用いると、ワイヤ先端部に長く伸びた溶融金属液柱(図 1)が生じ、溶接プロセスが不安定になるという問題がある。そのため、純 Ar シールドガスを用いた GMA 溶接(以下、Ar-GMA 溶接)は実用化されてこなかった。

近年、著者の研究グループでは溶接プロセス不安定化の原因となる金属液柱を定期的に照射するレーザにより切断することで、安定した Ar-GMA 溶接を可能にするレーザアシスト Ar-GMA 溶接プロセスを提案してきた¹⁾。これまでの検討から、レーザアシスト Ar-GMA 溶接プロセスにおいて、金属液中を適切に切断し、安定した溶接プロセスを実現するためには、レーザの照射位置が重要であり、溶接ワイヤが加熱により溶融して細径化する領域(以下、ワイヤ溶融-未溶融境界)の近傍とする必要があることがわかっていく。このワイヤ溶融-未溶融境界の位置は溶接電流や溶接電圧等の溶接条件により変化する。そのため、各種溶接条件におけるワイヤ溶融-未溶融境界位置を特定するためには、レーザ光源を使用した高速度カメラ観察が必要となる。しかし、適用する全溶接条件に対してワイヤ溶融-未溶融境界の位置を評価することは現実的でない。

そこで、本研究では、鋼系溶接ワイヤを用いた際のレーザアシスト Ar-GMA プロセスにおける適正レーザ照射位置提案システムの構築を目指した基礎的検討として、機械学習を活用した 550 MPa 級鋼用ソリッドワイヤ(ワイヤ径: 1.2 mm)におけるワイヤ溶融-未溶融境界位置予測式構築に関する検討を行う。具体的にはまず、種々の溶接条件におけるワイヤ溶融-未溶融境界の位置を取得し溶接条件とワイヤ溶融-未溶融境界位置の関係データベース構築する。さらに未知の溶接条件におけるワイヤ溶融-未溶融境界位置を推定するために、著者が提案した入出力関係のデー

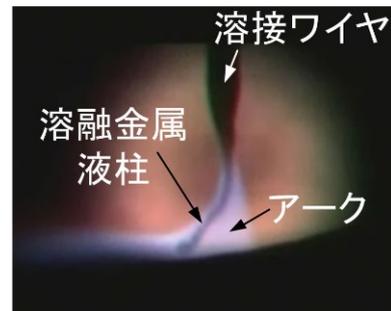


図 1 純 Ar シールドガスで生じる溶融金属液柱。

タベースから、入出力間の関係を、入力因子の影響がわかりやすい数式として自動導出可能な LSRF5 法²⁾(Least squares assisted rule extraction method from facts Version 5)を用いて、溶接条件とワイヤ溶融-未溶融境界位置の関係に関する予測式を作成する。その後、溶接条件とワイヤ溶融-未溶融境界位置の関係について考察するとともに、未知の溶接条件におけるワイヤ溶融-未溶融境界位置の推定を行う。

2. 実験およびデータベース構築方法

2.1 実験方法

SM490 鋼上に 550 MPa 級鋼用ソリッドワイヤ(ワイヤ径: 1.2 mm)を用いて Ar-GMA ビードオンプレート溶接を行った。溶接電源としては定電圧特性電源を用いた。溶接条件は表 1 に示すように、ワイヤ送給速度の設定値を 3 段階に変更し、それぞれのワイヤ送給速度において 4 段階のチップ-母材間電圧(溶接電圧)に変更した。チップ-母材間距離はすべての溶接条件において 25 mm で一定とした。ワイヤの溶融挙動は高速度カメラによりフレームレート 5000 frame/s にて 1 秒間撮影した。さらに、高速度カメラによる撮影中のワイヤ送給速度、溶接電流、チップ-母材間電圧を計測した。表 1 には計測時間内のワイヤ送給速度、溶接電流、チップ-母材間電圧の平均値を示している。

2.2 ワイヤ溶融-未溶融境界位置評価方法

図 2 に 2.1 節で得られた高速度カメラ画像の一例を示

表 1 溶接条件.

条件 No.	ワイヤ送給速度 (設定値) (m/min)	平均ワイヤ送給速度 (計測値) (m/min)	平均溶接電流 (A)	平均チップ-母材間電圧 (V)
1	6.5	6.16	233	31.2
2	6.5	6.19	258	34.0
3	6.5	6.20	278	35.6
4	6.5	6.22	288	38.1
5	9.5	8.99	285	33.5
6	9.5	9.03	295	35.3
7	9.5	9.06	331	37.3
8	9.5	9.10	362	39.6
9	12.5	11.92	358	36.9
10	12.5	11.95	385	39.3
11	12.5	11.94	436	41.1
12	12.5	11.97	475	43.3



図 2 Ar-GMA プロセスの高速度カメラ観察結果例.

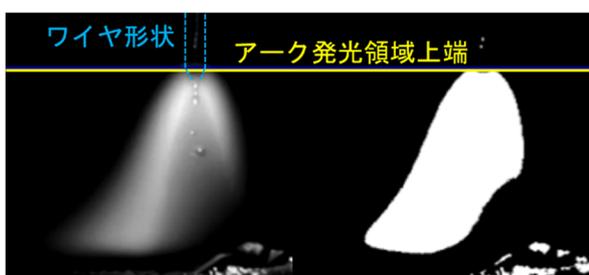


図 3 高速度カメラ画像の二値化処理例.

す。この図より、ワイヤ溶融-未溶融境界の高さ方向位置はアーク発光領域上端高さとはほぼ一致していることがわかる。他の取得画像でも同一の傾向であった。そこで、本検討では全ての撮影画像を Otsu 法により二値化し、SM490 鋼上面を原点としたときのアーク発光領域の上端高さ座標をワイヤ溶融-未溶融境界位置として取得した。

図 3 に高速度カメラ画像と Otsu 法により二値化した結果の一例を示す。この図に示す通り、二値化処理により得られるアーク発光領域の上端はワイヤ溶融-未溶融境界位置に対応した位置となっている。各溶接条件において、二値化処理により安定してアーク発光領域上端座標が取得

可能であることを確認した。

2・3 LSRF5 法によるワイヤ溶融-未溶融境界位置予測モデル構築方法

2・3・1 LSRF5 法の概要

LSRF5 法は構成を工夫したニューラルネットワークによる学習(RF5 法³⁾)と最小二乗近似を組み合わせることで入出力関係のデータベースから、入出力関係を、入力因子の影響がわかりやすい数式として導出する方法である。

まず、RF 法では、 n 種類の入力 x_i ($i = 1, \dots, n$)からなる n 次元入力ベクトル \mathbf{x} に対する出力 y の関係が、

$$y = \sum_{j=1}^h c_j \prod_{i=1}^n x_i^{w_{ji}} + c_0 \quad (1)$$

の多項式であると仮定する。ここで、 h : 整数、 w_{ji} 、 c_j 、 c_0 : 実数である。式(1)は、等価な変形を行うことで、 w_{ji} を入力層と隠れ層のニューロン間の重み、 c_j を隠れ層と出力層のニューロン間の重み、 c_0 を出力層のバイアスとした際の入力層[入力: $\ln \mathbf{x}$]-隠れ層[ニューロン数: h 、伝達関数: $f(z) = \exp(z)$]-出力層[出力: y] からなる 3 層フィードフォワードニューラルネットワークの定義式である以下の式へと変形することができる。

$$y = \sum_{j=1}^h c_j \exp\left(\sum_{i=1}^n w_{ji} \ln(x_i)\right) + c_0 \quad (2)$$

RF5 法では予め h を定めた上で、データベースにおける入出力関係を近似するために式(2)のニューラルネットワークを最適化し、未知数 w_{ji} 、 c_j 、 c_0 を決定して、式(1)の多項式を決定する。ニューラルネットワークの最適化にはバックプロパゲーション法やその改良手法⁴⁾が用いられる。

LSRF 法は、式(1)の指数 w_{ji} が実数という制約のみで探索されるため、入力因子の影響が明確とは言い難い関係式が得られるという問題を解決するために提案された手法である²⁾。LSRF5 法では RF5 法により未知数 w_{ji} 、 c_j 、 c_0 を定めた後に、入力因子の影響をより明確にするため、 w_{ji} を有理数や任意の小数点以下の桁数を持つ実数である w'_{ji} に近似する。その時、入出力データベースにおける入出力関係を精度良く近似するための c_j 、 c_0 も変化するため、入出力関係が、

$$y = \sum_{j=1}^h c'_j \prod_{i=1}^n x_i^{w'_{ji}} + c'_0 \quad (3)$$

に従うものとして、 c'_j 、 c'_0 を最小二乗近似により決定する。以上の手順により、入出力関係を入力因子の影響がわかりやすい多項式として表現することができる。

2・3・2 ワイヤ溶融-未溶融境界位置予測式構築方法

式(1)の n を 3 とし、入力ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) =$ (平均ワイヤ送給速度 WFS (m/min)、平均溶接電流 I (A)、平均アーク電圧 V (V))であると、出力 y をワイヤ溶融-未溶融境

界高さ方向位置 y_m (mm)とする。この時、式(1)~(3)は、以下となる。

$$y_m = \sum_{i=1}^h c_j WFS^{w_{j1}} I^{w_{j2}} V^{w_{j3}} + c_0 \quad (4)$$

$$y = \sum_{j=1}^h c_j \exp(w_{j1} \ln WFS + w_{j2} \ln I + w_{j3} \ln V) + c_0 \quad (5)$$

$$y_m = \sum_{i=1}^h c'_j WFS^{w'_{j1}} I^{w'_{j2}} V^{w'_{j3}} + c'_0 \quad (6)$$

2・2節で構築する溶接条件とワイヤ溶融-未溶融境界位置のデータベースに対応した式(4)~(6)における未知数を2・3・1項のLSRF5法により定めることで、平均ワイヤ送給速度 WFS 、平均溶接電流 I 、平均アーク電圧 V に対するワイヤ溶融-未溶融境界位置 y_m の予測式を得ることができる。

本検討では溶接条件とワイヤ溶融-未溶融境界位置の関係について考察を容易にするために、式(4)~(6)の h は1(作成されるモデルにおいて変数が含まれる項を1項)とした。また、変数項が十分に0に近い値の場合、ワイヤ溶融-未溶融境界位置も0に近づくと仮定して、 $c_0, c'_0 = 0$ で固定した。さらに、 w_{ji} の小数点第3位を四捨五入することで w'_{ji} に近似した。

3. 結果と考察

3・1 ワイヤ溶融-未溶融境界位置評価結果

2・2節で示した方法によるワイヤ溶融-未溶融境界位置評価結果の例として条件No.3、6、9における撮影期間中の高さ方向のアーク発光領域上端座標履歴を図4に示す。この図に示す通り、撮影期間中のアーク発光領域上端座標は安定してほぼ一定の値であった。他の条件でも同一の傾向であった。全条件のアーク発光領域上端座標の撮影期間内平均値をワイヤ送給速度で整理したものを図5に示す。この図に示す通り、本研究の溶接条件では、アーク発光領域上端座標は、約7~22mmの範囲で大きく変化していた。

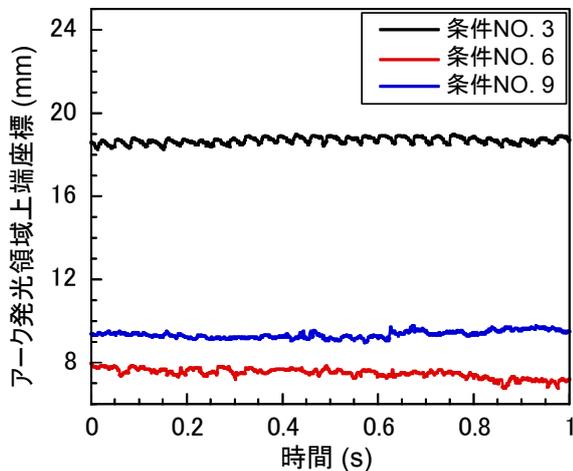


図4 アーク発光領域上端座標履歴。

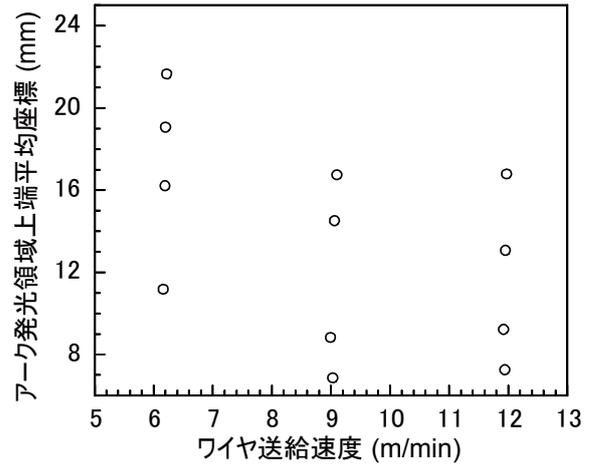


図5 全溶接条件におけるアーク発光領域上端座標とワイヤ送給速度の関係。

3・2 ワイヤ溶融-未溶融境界位置評価結果

図5に示したアーク発光領域上端座標の撮影期間中平均値を高さ方向のワイヤ溶融-未溶融境界位置 y_m として用いた際の、2・3節に示した方法で得られたワイヤ溶融-未溶融境界位置予測式を以下に示す。

$$y_m = 1.26 \times 10^{-4} \frac{I^{2.15} V^{1.12}}{WFS^{2.28}} \quad (7)$$

全ての条件におけるアーク発光領域上端座標の平均値(ワイヤ溶融-未溶融境界位置)と式(7)から予測されるワイヤ溶融-未溶融境界位置および両値の差の絶対値を表2に示す。また、条件No.3、6、9における撮影期間中のアーク発光領域上端座標履歴と式(7)から計算される y_m を併せて図6に示す。表2および図6より、式(7)は溶接条件とワイヤ溶融-未溶融境界位置の関係を誤差2mm以下で再現することができていることがわかる。

式(7)は、ワイヤ溶融-未溶融境界位置が溶接電流の約2乗、アーク電圧の約1乗に比例し、ワイヤ送給速度の約2乗に反比例することを示している。この傾向は、図7(a)に

表2 ワイヤ溶融-未溶融境界平均位置および予測位置。

条件No.	ワイヤ溶融-未溶融境界平均位置 (mm)	ワイヤ溶融-未溶融境界予測位置 (mm)	予測誤差 (mm)
1	11.18	11.55	0.37
2	16.22	15.68	0.54
3	19.07	19.23	0.15
4	21.66	22.41	0.75
5	8.83	9.20	0.37
6	6.87	8.13	1.25
7	14.51	12.51	2.00
8	16.75	15.98	0.77
9	9.22	9.72	0.49
10	13.07	13.38	0.31
11	7.26	7.81	0.55
12	16.79	17.02	0.23

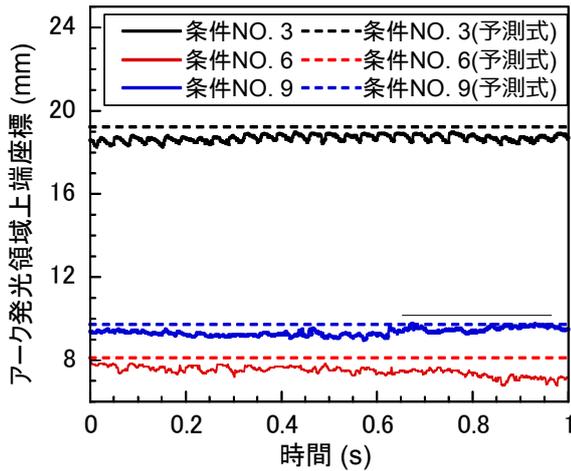


図6 アーク発光領域上端座標履歴とワイヤ溶融-未溶融境界予測位置の関係

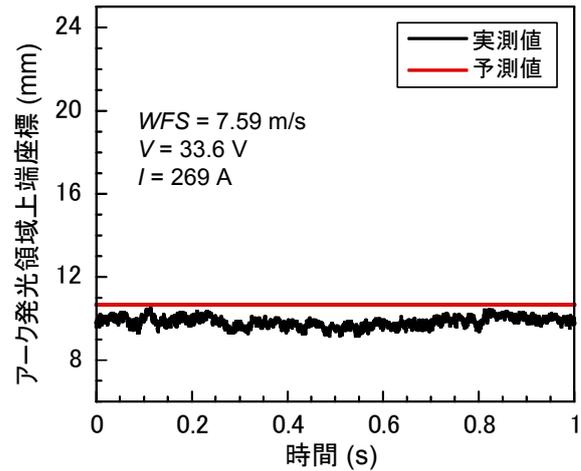


図8 予測式の構築に使用しなかった溶接条件におけるワイヤ溶融-未溶融境界位置の実測値と予測値の比較.

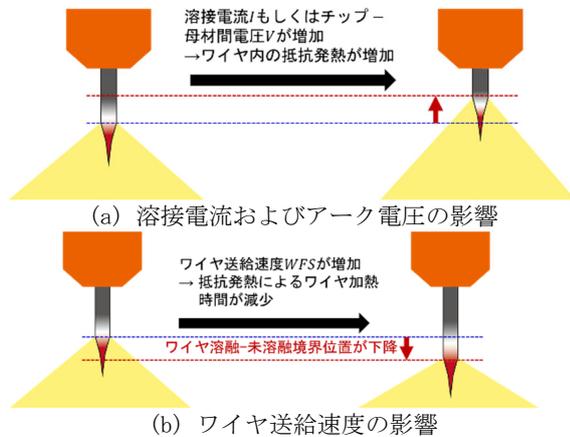


図7 ワイヤ溶融-未溶融境界位置に及ぼす溶接条件の影響

示す様に、溶接電流およびアーク電圧が大きくなると、ワイヤ突出し部における抵抗発熱が大きくなり、ワイヤが早期に溶融するためにワイヤ溶融-未溶融境界位置が上昇することを表している。また、図7(b)に示す様に、ワイヤ送給速度が大きくなると、チップからある突出し長さに達する時間が短くなり、抵抗発熱によるワイヤ加熱時間が短くなるために、ワイヤ溶融-未溶融境界位置が下降することを表している。

3・3 予測式の構築に使用しなかった溶接条件におけるワイヤ溶融-未溶融境界位置の予測

図8に、予測式の構築に使用しなかった溶接条件としてワイヤ送給速度、溶接電流、チップ-母材間電圧がそれぞれ、7.59 m/min、269 A、33.6 Vとした場合のアーク発光領域の上端座標と、式(7)から得られるワイヤ溶融-未溶融境界位置の予測結果を併せて示す。この図に示す通り、ワイヤ溶融-未溶融境界位置の実測値と式(7)から得られる推定値の誤差は約1 mmより小さい値である。この誤差はワイヤ径とほぼ同程度あり、十分に適正レーザー照射位置と見なせる予測を行えているといえる。

4. 結論

本研究では、溶接条件とワイヤ溶融-未溶融境界位置の関係をデータベース化し、LSRF5法によりワイヤ溶融-未溶融境界位置予測式を構築した。本研究の予測式を用いることで、550 MPa級鋼用ソリッドワイヤ(ワイヤ径: 1.2 mm)を使用したレーザーアシスト Ar-GMA 溶接での適正レーザー照射位置を提案できる。得られた結論を以下に示す。

- (1) 各種溶接条件におけるワイヤ溶融-未溶融境界位置に対応するアーク発光領域上端位置を二値化処理により収集した。高速度カメラ観察期間内でアーク発光領域上端座標は安定してほぼ一定の値を示した。
- (2) 本研究で採用した溶接条件範囲内で平均アーク発光領域上端座標は約7~22 mmの範囲で大きく変化した。
- (3) LSRF5法により溶接条件に応じたワイヤ溶融-未溶融境界位置予測式を構築した。予測結果の最大誤差は2 mmであった。
- (4) ワイヤ溶融-未溶融境界位置予測式の構築に使用しなかった溶接条件において、予測式によりワイヤ溶融-未溶融境界位置の予測を行った結果、誤差約1 mmの精度で予測できた。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団 奨励研究助成 A (若手研究者) の支援のもと実施された。ここに深く謝意を表明する。

参考文献

- 1) T. Nakamura: Quar. J. JWS, 33-2 (2015), 63s.
- 2) H. Kitano and T. Nakamura: Welding Letters, 36-4 (2018), 5WL.
- 3) K. Saito and R. Nakano: Proc of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence, (1997), 1078.
- 4) David E. Rumelhart, Geoffrey E. Hinton and Ronald J. Williams: Nature, 323 (1986), 533.