

PS-21 レーザ・アークハイブリッド溶接による 片側完全溶込み T 継手の溶接条件導出

産業システム系 * 津村 秀一

1. はじめに

片側からの1パスの溶接で完全溶込みを達成する片側完全溶込み T 継手について、誤差や外乱の影響を受けにくい性質（頑健性）に着目した技術開発手法である品質工学を活用し、溶接条件導出実験を行った。本報ではこの結果について報告する。なお、得られた継手の継手性能が良好であることは既に報告を行っている¹⁾。

ハイブリッド溶接法はレーザー熱源とアーク熱源を併用するために溶接プロセスが複雑で、安定して溶接施工を行うための適切な溶接条件の導出が困難である。とくに厚板の T 継手を対象とした溶接条件導出については、ほとんど報告されていないのが現状である。また船体建造工程に片側完全溶込み T 継手を適用するには、研究室レベルの継手製作（溶接長 100mm～300mm）にとどまらず、実際の造船所の工程ラインにおいても安定して溶接施工できる裏付けがある方が望ましい。このためには、少なくとも実際の船体建造工程で利用するための溶接施工法承認試験が実施される溶接長（通常 1,000mm）に渡って安定した溶接施工が可能であることの確認が必要である。

一方、品質工学は効率的な技術開発を志向しており、直交表と呼ばれる実験計画表を利用することで合理的に実験条件を低減することが可能である。したがって、設定変数が多いハイブリッド溶接の溶接条件導出に品質工学を活用することは、極めて効果的であると期待される。

2. 1 制御因子と誤差因子

実験に取り上げる要素（例えば、電流、部材寸法など）のうち、設計や製造段階で設定値として制御可能なものを制御因子（例えば、電流、電圧など）と呼び、設計や製造段階で考慮、または制御できないような不確定な変動をもつ要素を誤差因子（例えば、部材寸法のばらつき等）と呼ぶ。

品質工学では積極的に誤差因子を実験に取り入れ、誤差因子の影響を受けても実験結果がばらつかないよう制御因子の水準（条件）を選択することで、設計開発工程の下流工程にあたる製造工程やユーザー使用環境下での不具合を未然に防ぐ技術開発を目指している。

2. 2 直交表

ハイブリッド溶接の溶接現象はレーザー熱源とアーク熱源を併用するため溶接条件の設定変数が多く存在する。従って制御因子の効果を検討するために、全ての組合せについて実

験を繰り返すことは多大な労力を要する。

直交表とは、任意の2つの制御因子について、その積和が0となるように工夫された表であり²⁾。合理的に実験回数を低減することが可能である。例えば図-1に示すような4つの制御因子に対してそれぞれ3水準（3条件）ずつ実験を行う場合、逐次実験（全ての組合せを総当たりに行う実験）では $3^4=81$ 通りの実験を行う必要があるが、L9直交表と呼ばれる直交表を用いてデータ整理を行うことで、実験を9通りに減らすことが可能となる。

なお、本研究では L9 直交表と L18 直交表を使用した実験を実施した。

総当たりの組合せ (3 ⁴ 通り)					直交表の組合せ (9通り)				
N	制御因子				N	制御因子			
	レーザー出力	アーク電流	アーク電圧	溶接速度		レーザー出力	アーク電流	アーク電圧	溶接速度
1	水準1	水準1	水準1	水準1	1	水準1	水準1	水準1	水準1
2	水準1	水準2	水準2	水準2	2	水準1	水準2	水準2	水準2
3	水準1	水準3	水準3	水準3	3	水準1	水準3	水準3	水準3
4	水準2	水準1	水準1	水準2	4	水準2	水準1	水準3	水準2
5	水準2	水準2	水準1	水準3	5	水準2	水準2	水準1	水準3
6	水準2	水準3	水準2	水準1	6	水準2	水準3	水準2	水準1
7	水準3	水準1	水準2	水準3	7	水準3	水準1	水準2	水準3
8	水準3	水準2	水準1	水準1	8	水準3	水準2	水準1	水準1
9	水準3	水準3	水準3	水準2	9	水準3	水準3	水準3	水準2

図-1 逐次実験と直交表 (L9 直交表) の比較

2. 3 品質工学における評価尺度 (SN 比)

2.1 節で述べたように、品質工学は誤差や外乱に影響を受けにくい頑健な技術開発を行うことを志向した手法であり、誤差や外乱の影響を積極的に実験に取り入れている。実験データの評価尺度には図-2に示す「SN 比」と称される指標が用いられる。想定した機能（図-2では荷重-変位関係）の傾きが大きいほど、実験に取り入れた誤差因子に対してばらつきが小さいものほど、大きな SN 比を与える。

なお、SN 比にはいくつか種類があり、また計算方法についても数種類提案がなされている。図-2はあくまで SN 比の考え方を示した模式図でことに注意を要する。

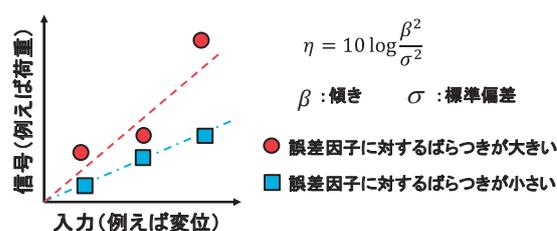


図-2 SN 比の模式図

3. L18 直交表を用いた溶接条件導出実験

適切な溶接条件導出のためには、種々のパラメータを考慮する必要がある。本研究では、各種パラメータを表-1に示す制御因子及び誤差因子に設定し、制御因子をL18直交表に割り付けて誤差因子を組み合わせた実験を行ない、最適条件を検討した。その他の溶接条件は表-2に示す一定値として施工した。

表-1 制御因子、誤差因子

制御因子	水準数
レーザーパワー	2
溶接電流	3
溶接電圧	3
ディフォーカス距離, D_f	3
アーク狙い角度, θ_A	3
レーザー狙い角度, θ_L	3
アーク前進角, θ_p	3
レーザー後退角, θ_d	3
誤差因子	水準数
突出し長, d	2
レーザー狙い位置高さ, H_L	2
アーク狙い位置と立板の距離, D_{AW}	2

(参照)

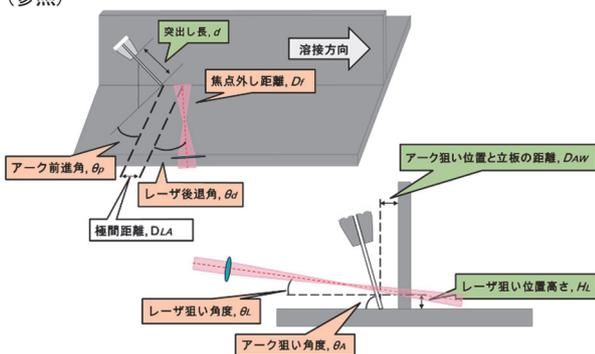


表-2 その他の溶接条件

ギャップ (mm)	0.05 以下
溶接速度 (mm/min)	1,000
レーザー狙い位置とアーク狙い位置の距離 (mm)	3

4. L9 直交表を用いた追加実験

上記の溶接施工条件探索実験の結果、ビード外観は良好でも、図3に例示するように内部に融合不良が生じた。

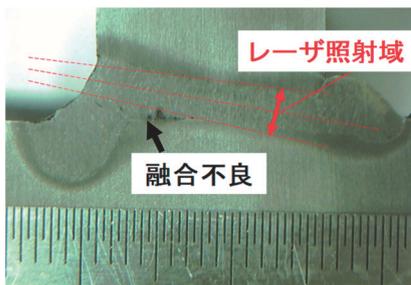
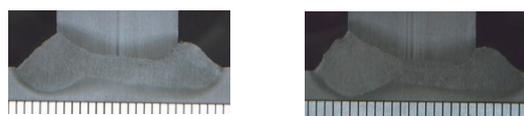


図-3 融合不良が生じた断面マクロ

そこで、レーザー照射域内に主板と立板の境界面が位置するようにレーザー狙い角度を低角度に、焦点はずし距離を大きくとりレーザー照射域を拡大することで融合不良を防止することを考えた。具体的には、先の一連の施工条件探索実験で良好なビード外観が得られた条件は固定し、焦点はずし距離を15mmから20mmに変更して固定条件に加えた。一方、レーザー狙い角度 θ_L 及びレーザー後退角 θ_d を制御条件に、レーザー狙い位置高さ H_L を誤差因子として、再度溶接条件を検討した。なお、焦点はずし距離を20mmと設定するとレーザービームのパワー密度(単位面積当たりのレーザー出力)が低下するため立板を貫通できないことが懸念されたため溶接速度も制御因子に加えた。これらの制御因子をL9直交表に割り付け、誤差因子を組み合わせた実験を行ない、最適条件を検討した。以上の結果、ビード外観が良好で内部欠陥も無い継手が得られる溶接条件を導出した。同定した溶接条件の一部を表-3に、断面マクロを図-4にそれぞれ示す。なお、溶接電流及び電圧を微調整することで、ギャップ1.5mmまで健全な継手を製作できることを確認している。

表-3 導出された溶接条件

溶接速度 (mm/min):	900
レーザーパワー (kW):	20
溶接電流 (A):	425
溶接電圧 (V):	27.3



(ア) 誤差因子1 (イ) 誤差因子2

図-4 断面マクロの例

5. まとめ

本報では片側からの1パスの溶接で完全溶込みを達成する片側完全溶込みT継手について、頑健性に着目した技術開発手法である品質工学を活用し、溶接条件導出実験を行った。

その結果、レーザー狙い位置高さに対して頑健性を有する溶接条件を得ることが可能であった。

謝辞

本研究の実施に際しては公益財団法人日本財団、一般財団法人日本造船技術研究センター、並びに一般財団法人日本船舶技術研究協会より多大なる協力を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- Gotoh, K. and Tsumura, S.: Fatigue Strength and Angular Distortion of the Full-penetration Tee Type Joint Fabricated by One-side Single-Pass Laser-Arc Hybrid Welding, Proceedings of OMAE 2016, OMAE2016-54173
- 菅民郎: 例題とExcel演習で学ぶ 実験計画法とタグチメソッド, オーム社, 2016.