

大型部材製造のための直流パルス溶接プロセスを用いたWAAMによる高速造形技術の研究

松田 和貴

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

1 はじめに

ワイヤーク積層造形 (Wire arc additive manufacturing: WAAM) は既存のアーク溶接技術を活用した低コストな積層造形技術であり、大型かつ曲面形状を有する船舶部材への適用が期待されている。従来のCMTなどのワイヤ送給制御方式の溶接プロセスは高精度造形に適するが、大型造形では溶着量が不足し、造形速度に課題がある。一方、CO₂溶接は高溶着速度での溶接施工が可能であるが、スラグやスパッタの発生が多く品質面に懸念がある。著者らは過去にCO₂溶接による積層造形を検討したが、造形速度は最大2.6 kg/h程度に留まり、また、造形壁には多量のスラグ生成が確認され、高速造形には不向きと判断された。

本研究では、直流パルスマグ溶接を用いて、低スパッタ・低スラグかつ高速造形を両立するプロセスの確立をめざす。

2 研究方法

造船業において使用される部材は厚鋼板が多く、積層造形部材においても20 mm程度の板厚が求められる場合が多い。WAAMにおける積層材の厚みは溶接ビード幅と等しいため、通常~10 mm程度である。その場合、1層当たりのパス数が多くなり、始末端の数が増えることで、融合不良などの溶接欠陥が生じる可能性が高くな

る。これを解決するため、本研究では、積層時にウィービングを適用し、ビード幅の拡大と、安定的な積層の両立を図った。

供試材はマグ溶接用ソリッドワイヤSE-A50S (JIS Z3312 YGW15)であり、ワイヤ径は1.2 mmである。基板は板厚9 mmのSS400鋼板 (JIS G 3101)を用いた。溶接電源はダイヘン製の直流パルスマグ溶接電源P500L IIを用い、DCパルスモードでアーク溶接を実施した。シールドガスはAr+20%CO₂で、ガス流量は20 L/minとした。積層試験は溶接長150 mmとし、10層の積層を実施した。放射温度計によりビード長さ中央位置における積層材最上層の表面温度を測定し、積層パス間の冷却温度を200℃以下に管理した。また、KEYENCE製の3D形状測定機LJ-V7000を用いて各層の中央断面プロフィールを測定した。また、積層後は長さ中央で試験体を切断し、マクロ観察による欠陥の有無の確認とナイタル腐食を施した後、ミクロ組織を観察した。実施した積層試験の条件一覧を表1に示す。条件A1, A2ではウィービング有無での積層材の変化を検証した。続いて、B1~B4では、ウィービングを適用し、単位長さ当たりの溶着量を一定とし、造形速度を振って積層試験を実施した。

3 主な研究成果

表1に示した条件A1およびA2の積層材の外観写真

表1 積層試験条件

ID	Current [A]	Voltage [V]	Travel speed [cm/min]	Torch manipulation	Wire feed rate [m/min]	Deposition rate [kg/h]	Deposition weight/weld length [kg/m]
A1	200	24.5	30	Stringer	6.7	3.6	20
A2				Weaving			
B1	200	24.5	15	Weaving	6.7	3.6	39
B2	250	26.0	20		8.5	4.5	
B3	300	28.0	25		11.0	5.9	
B4	350	31.0	30		13.2	7.0	

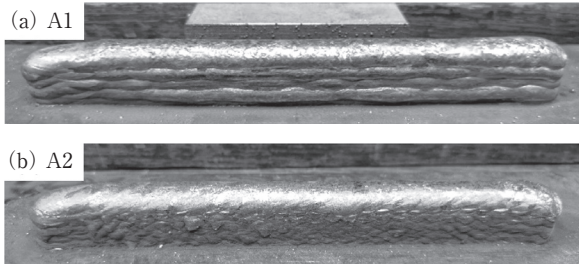
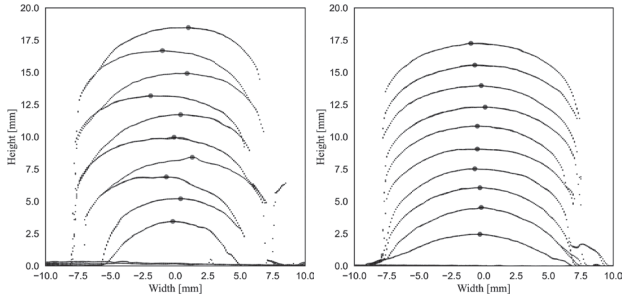


図1 積層材の外観写真 (a : A1 stringer, b : A2 weaving)



(a) A1(Stringer) (b) A2(Weaving)

図2 中央断面プロファイル (ID : A1, A2)

を図1に示す。ウィービングの適用により、A2ではA1と比較して側面の凹凸が低減していることが確認できる。各パスの形状測定結果から作成した中央断面プロファイルを図2に示す。直線にビードを積層した場合、図2(a)に示すように各層のビード頂点の位置が左右にぶれて不安定な形状となる傾向が見られる。一方、ウィービングを適用した場合には、(b)に示すようにビードが扁平化し、安定した積層が形成されていることが分かる。

続いて、中央部の断面観察写真を図3に示す。断面写真においても(b)A2では、(a)A1と比較して積層材側面の凹凸が小さいことが確認できる。ミクロ組織の観察結果として、A1では(c)に示すように粒径が不揃いで粗大なフェライトが多く存在する領域が散見された。一方、A2ではこの領域は少なく、(d)に示すような微細なフェライトが観察された。これらの微細化されたフェライトは、後続の積層パスによる再熱により $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ 変態が生じた結果と考えられる。

A1では積層形状が不安定であるため、再熱による変態が生じない領域が各所に存在したと推測される。一方、A2ではウィービングにより積層形状が安定し、再熱領域も均一に分布した結果、ほとんどの領域でフェライトの微細化が達成されたものと考えられる。以上より、ウィービングは積層形状の安定化のみならず、ミクロ組織の均質化、および微細化にも寄与することが確認された。

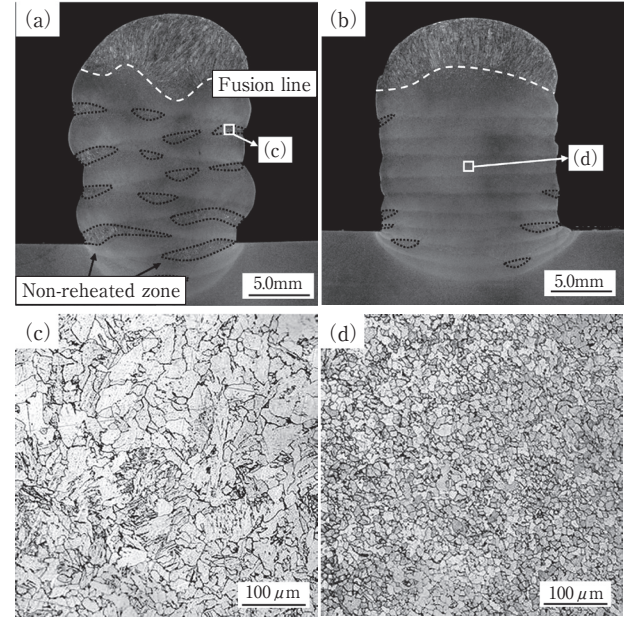


図3 断面検鏡写真 (a : A1 stringer, b : A2 weaving)

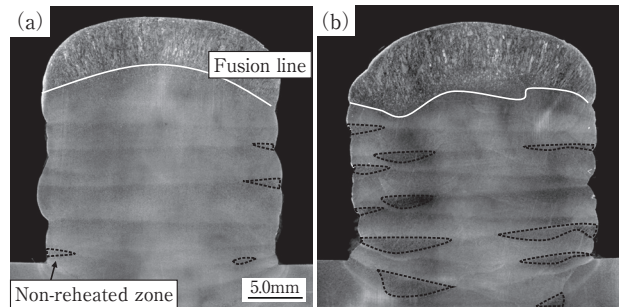


図4 断面検鏡写真 (a : C1 3.6kg/h, b : C4 7.0kg/h)

表1に示した条件C1~C₄で積層試験を実施した結果のうち、C1およびC₄の断面写真を図4に示す。いずれの条件でも、安定した積層材が作製された。しかし、ミクロ組織の観察により、造形速度が大きいほど、図4中の点線で囲んだ領域で示す粗大なミクロ組織の領域が多く存在することが確認された。これは、本試験ではウィービング周波数を一定としたため、トーチ移動速度が速いほど、左右に振動するトーチの経路に疎な領域が拡大し、その部分への再熱が不十分となったためであると考えられる。ウィービング周波数の増加は正味のトーチ移動速度の増加を招き、ハンピングが生じやすくなるため、ミクロ組織が機械的性質に及ぼす影響を検証しつつ、積層条件を決定する必要があると考えられる。

4 おわりに (今後の展望)

直流パルス溶接とウィービングを用いることで、最大7.0kg/hの造形速度を実現した。今後は冷却時間短縮のための冷却手法について検討予定である。