

レーザー照射によるレーザー粉体肉盛層の組織制御

福山 遼 (情報・生産技術部 試作加工グループ)

中村 紀夫(情報・生産技術部 システム技術グループ)

薩田 寿隆(情報・生産技術部)

1. はじめに

ものづくりのデジタル化に伴い、3DCAD の設計データを直接入力して部品を得る積層造形技術 (Additive manufacturing) への注目が高まっている。金属材料を用いた積層造形においては、2030 年には造形品の市場規模は約 2 兆円とされており、現在では医療、航空・宇宙、発電などの部品単価が高い分野で社会的実装化が先行している¹⁾。金属積層造形の中でも、レーザー粉体肉盛溶接 (Laser Metal Deposition : LMD) はレーザー照射してできた溶融池に金属粉末を投入し、肉盛溶接を行う加工である。LMD は母材希釈が少なく、低入熱量であり、肉盛厚さを正確に制御できることから、局所的な肉盛層の形成が容易となる²⁾。例えば、安価な低合金鋼に高速度工具鋼等や、耐熱性や耐蝕性などの特性を持つ金属を付着させる等の新たな付加価値をつけることが可能となる³⁾。しかしながら、LMD は良好な品質を得るためのレーザー出力、レーザー走査速度、ビーム径、粉末供給量などの加工条件の選定が難しく、ブローホールや融合不良などの内部欠陥が生じ易い。本プロセスと同じく金属を堆積させる溶射においては、これらの内部欠陥を除去するために別工程で高周波誘導加熱やバーナー加熱等で再溶融処理が行っているが、作業者による技能差あるいは高価な装置の導入が必要となり、技術的あるいはコスト的に問題は多い⁴⁾⁵⁾。そこで、本研究では LMD 後に連続で同一装置を用いたレーザー再溶融処理を試み、内部欠陥の除去できる再溶融処理条件の選定を検討した。

2. 実験方法

本研究で用いた LMD 装置 (TRUMPF 製 : TruDisk3006) の概略を述べる。発振器から発したレーザー光 (ディスクレーザー、波長 1030 nm) は光ファイバーで伝送され、ロボットアーム先端に設けた出射光学系により集光され、対象物の表面を溶融する。粉末は供給装置からアルゴンガスにより搬出され、出射光学系先端のノズル内に設けた出射口から溶融部に供給される。レーザー照射と同期してロボットアームは移動し、目的とする形状の肉盛層を形成する。

粉末は粒径 53~150 μm の高速度工具鋼粉末を用いた。化学成分を表 1 示す。基材は寸法 100×50×10 mm^t の低合金鋼 SCM440 板を用いた。化学成分を表 2 に示す。基材には前処理としてアルミナ粉末によりブラスト処理をした。

表 3 に LMD の積層条件を示す。肉盛高さが異なり、融合不良やブローホールが形成される 3 種類の積層条件を選出した。

表 4 に再溶融処理条件を示す。LMD による肉盛層を造形直後に、LMD と同一の装置で粉末を供給せず、造形された各パスの真上からレーザー照射のみすることにより再溶融処理を行った。レーザーの走査方法は肉盛層造形時と同様であり、出力と走査速度を変化させた。再溶融処理のレーザーのパス数は 5 パスとし、再溶融処理の回数は 5 パスで 1 回と定義し、これを 1、2、4 回繰り返した。

表 1. 高速度工具鋼粉末の化学成分

C	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	Mo
1.4	0.96	0.009	0.003	2.89	7.7	0.41	81.9	1.77	0.03	2.93

表 2. SCM440 の化学成分

C	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
0.41	0.17	0.01	0.005	1.04	0.62	97.39	0.08	0.11	0.17

表 3. LMD の積層条件

conditions	Sample		
	Sample 1 Lack of fusion + Blowhole	Sample 2 Blowhole	Sample 3 Blowhole
Beam diameter mm		φ4	
Overlap width mm		2	
Carrier gas ℓ /min		2.1	
Shield gas ℓ /min		23	
Laser scanning velocity mmr	16	8	16
Powder flow g/min	19.8	15.1	13.5
Laser power kW	1.8	2	1.8
Height mm	3.0	4.7	1.7

表 4. 再溶融処理条件

Beam diameter mm	φ4
Overlap width mm	2
Laser scanning velocity mm/s	2, 4, 8
Laser power kW	1.5, 2, 2.5
Pass	5
Number of times	1, 2, 4

図 1 に放射温度計を用いた溶融池の温度測定の概略図を示す。加工ヘッドに測定温度範囲 140~2000 $^{\circ}\text{C}$ の放射温度計を取り付け、レーザーの焦点位置に集光部を合わせることで、リアルタイムの溶融池温度を測定した。本研究では、再溶融処理における溶融池形成前のパスの直前温度 (以下パス間温度と示す) と溶接品質の関係を調べた。

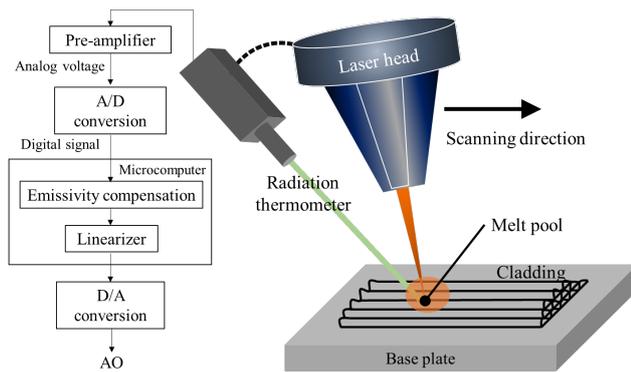


図1. 放射温度計を用いた溶融池の温度測定の概略図

3. 実験結果および考察

図2に再溶融処理前のLMDの断面マクロ組織を示す。Sample 1は入熱不足および粉末供給量過多のため融合不良とブローホールが形成されている。また、Sample 2とSample 3は入熱不足によりブローホールが形成されている。肉盛時に形成されたブローホールは粉末溶融時に予め粉末自身に蓄えられたガスや、外部から混入したガスによる気泡が生じ、自身の浮力によって外部に抜け出る前に溶融池が凝固したためと報告されている^{6)~7)}。従って、ブローホール周辺を溶解し、ガスを肉盛層外へ放出させる再溶融処理は有効と考えられ、本研究ではSample 1~3の肉盛層をその後の再溶融処理により内部欠陥を除去する。

図3に再溶融処理後の代表的な断面マクロ組織を示す。横方向にSample 1~3、縦方向に再溶融処理条件となっており、走査速度は4 mm/sで統一し、出力やパスの繰り返し回数を変えた結果である。

出力が2.5 kWの条件ではSample 1は良好な断面品質を得られたが、高入熱量であるためSample 2、3は外観不良となっており、肉盛高さが低いSample 3は割れている。これは肉盛層が薄いためレーザー照射により肉盛層と共にSCM440母材の一部が溶融し、母材からの希釈により粉末の合金成分量が低下し、割れ感受性が高くなったためだと考えられる⁸⁾。また、Sample 3は体積的には他のSample 1、2に比べ小さく母材希釈の影響が大きく作用するため割れに繋がったと考えられる。

一方で、出力が1.5 kWでは低入熱量の条件であるため、ブローホールや融合不良を再溶融処理によって除去できていない。

今回ベースとしたSample 1~3の肉盛条件においては、出力2 kW、レーザー照射5パス×4回の条件において外観不良や割れに繋がらず、ブローホールや融合不良を除去した良好な品質の断面を得ることができた。

上記の結果より、同一の再溶融処理条件でSample 1~3全て良好となる場合もあるが、出力2.5 kWの条件のようにSample 1のみ良好となる場合もある。この理由として、ベースの肉盛条件により体積が異なるため、熱容量、蓄熱量、放熱量の差により最適な再溶融処理条件が異なると考えられる。従って、ベースの肉盛条件に応じた再溶融処理時の出力、走査速度、パスの繰り返し回数を制御しなければならない。これらの条件は試験片のパス間温度に大きく

影響すると考えられ、パス間温度と溶接品質の関係を調べた。

図4に再溶融処理条件におけるパス間温度と溶接品質の関係を示す。再溶融処理を繰り返すことでパス間温度は増加し、入熱量の大きい再溶融処理条件であればパス間温度の増加幅は大きくなる。断面品質が良好か否かを示す指標としてパス間温度の上昇幅がある。急激な温度上昇では外観不良となり、緩慢な温度上昇ではブローホールや融合不良を解消されていない。良好な断面品質を得るためには、その中間となるパス間温度の上昇幅をレーザー出力および走査速度での制御で調整する必要がある。また、再溶融処理回数の最終回のパス間温度に注目すると、Sample 1（再溶融前の肉盛高さ：3.0 mm）は340~390℃、Sample 2（再溶融前の肉盛高さ：4.7 mm）は390~410℃、Sample 3（再溶融前の肉盛高さ：1.7 mm）は300~390℃で良好な断面品質を得られた。肉盛高さが高くなることで、基材近くにあるブローホールまで再溶融処理による熱が届きにくくなるため、外観不良にならない程度の高いパス間温度が必要となる。

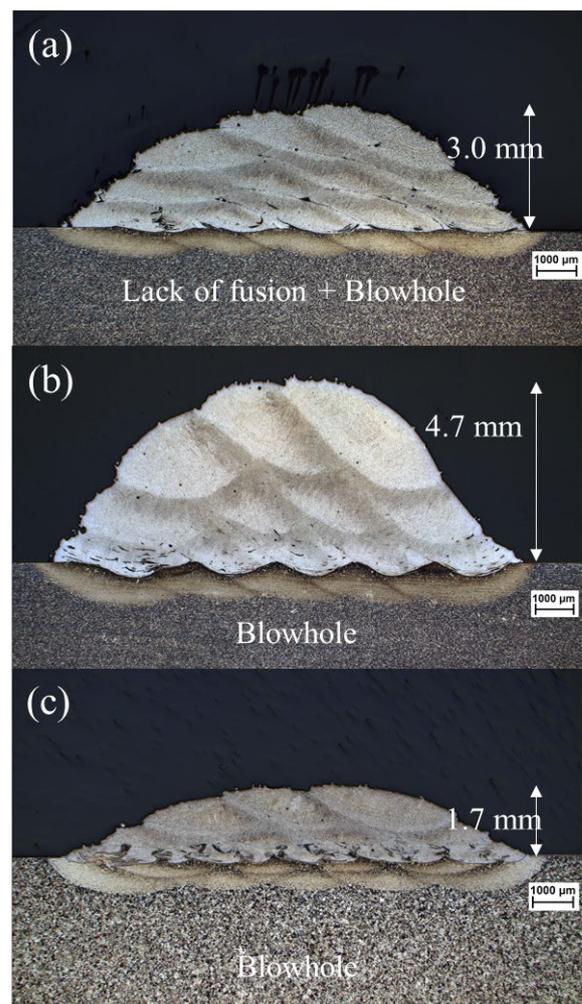


図2. 再溶融処理前のLMDの断面マクロ組織；
(a) Sample 1, (b) Sample 2, (c) Sample 3

4. おわりに

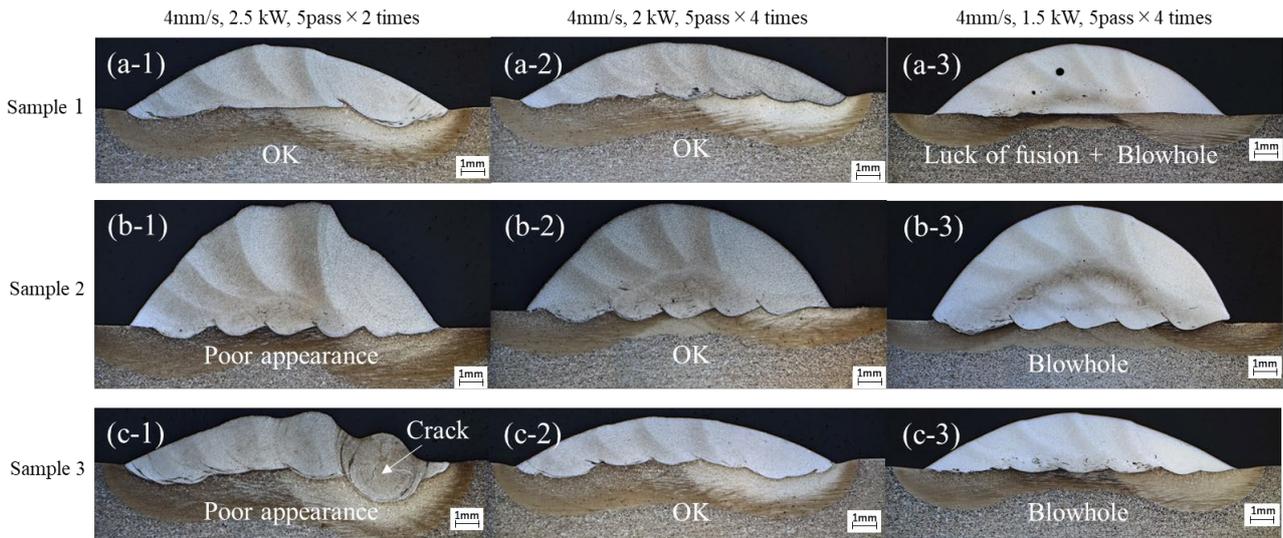


図 3. 再溶融処理後の代表的なマクロ組織

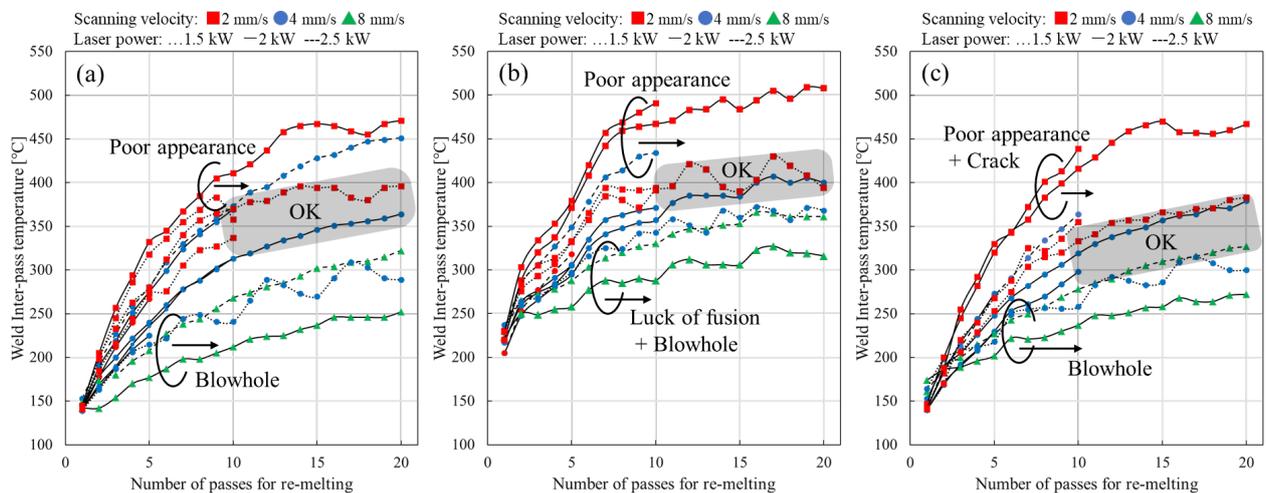


図 4. 再溶融処理条件におけるパス間温度と溶接品質の関係

本研究では、高速度工具鋼粉末を用いた LMD 後に連続で同一装置を用いたレーザ再溶融処理を試み、パス間温度に着目した内部欠陥の除去できる再溶融処理条件の選定について検討した。レーザのパス数および繰り返回数、出力、走査速度が溶接品質に与える影響を評価し、以下の結果を得た。

- (1) 溶接欠陥とならない再溶融時の最適なパス間温度は約 300-400°C にワークが予熱されている条件であった。しかし、肉盛条件により有する熱容量が異なるため、最適な再溶融処理条件が異なる。従って、肉盛条件に応じた再溶融処理時のレーザ走査速度・出力等でパス間温度を制御しなければならない。
- (2) 今回ベースとした肉盛条件では、レーザ出力 2 kW、走査速度は 4 mm/s、レーザ照射 5 パス×4 回の条件において外観不良や割れに繋がらず、ブローホールや融合不良を除去した良好な品質の断面を得ることができた。

【参考文献】

- 1) 井関隆之：金属積層造形プロセス概要，第 3 回 NEDO 『TSC Foresight』セミナー発表資料（2019）。
- 2) 森橋遼，岩崎勇人：Laser Metal Deposition (LMD) による積層・補修技術の開発，溶接学会誌，90，2（2021）177。
- 3) 木寺正晃：レーザを用いた AM 技術，溶接学会誌，89，1（2020）85。
- 4) 曙紘之，伊藤量平，福本昌弘，小茂島潤，清水真佐男：自溶合金溶射部材の疲労特性に及ぼす再溶融処理時間の影響，日本機械学会論文集，70，694（2004）843。
- 5) 園家啓嗣，香川遼太郎，中村正信，永田智司：高周波誘導加熱による自溶合金溶射皮膜の再溶融組織の評価，溶射，49，4（2012）117。
- 6) Shun Izutani et al.: Blowhole Generation Phenomenon and Quality Improvement in GMAW of Galvanized Steel Sheet, Int. J. of Automation Technology, 71, 1（2013）103-104。

- 7) Yimin YUAN : Development of Hybrid Tandem GMAW process, Journal of The Japan Welding Society, 86 (2017) 90-94.
- 8) 岡内宏憲, 才田一幸, 西本和俊 : 690 合金と 316L ステンレス鋼異材多層盛溶接部のマイクロ割れ発生抑制に対する REM 添加効果, 溶接学会論文集, 29, 3 (2011) 228.