

マルチビーム式レーザ加工における 温度場解析と材料組織制御

國峯 崇裕

金沢大学 理工研究域 機械工学系

1 はじめに

マルチビーム式レーザ指向性エネルギー堆積法 (Laser Directed Energy Deposition : L-DED) では、図 1 (a) に示すように、6本のレーザを斜めに照射して1点に集光し、レーザ集光位置に形成される熔融池に金属粉末を垂直に投入することにより積層造形を行う (熔融池型積層造形)^{1),2)}。この方式は基材を熔融させるので、でき上がる積層造形材の微細組織は、一般的にレーザ粉末床熔融結合法 (Laser Powder Bed Fusion : L-PBF) とおおむね同様である。一方、この方式ではレーザ集光位置を基材から上方に離すことで、滞空中で粉末を熔融させた後、基材に積層させることができる (溶射型積層造形)^{2),3)}。この場合、基材の熔融を極力抑えることができ^{2),3)}、また熔融池形成時より高い温度で金属粉末を基材に積層することができる²⁾。

我々のこれまでの実験において、同じレーザ出力、レーザ走査速度の条件において、図 1 に示すレーザ集光位置 $\Delta f = 0$ mm で熔融池を形成してビードを造形する場合 (熔融池型積層造形) と、レーザ集光位置 $\Delta f = 0.5$ mm の条件により滞空中で粉末を熔融させてビード

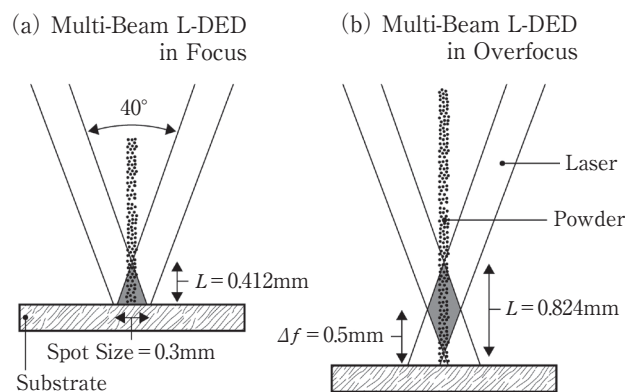


図 1 マルチビーム式レーザ指向性エネルギー堆積法 (L-DED) におけるレーザ集光位置と基材位置を示した模式図²⁾
(a) 熔融池型積層造形, (b) 溶射型積層造形

を造形する場合 (溶射型積層造形) とでは、ビード内の結晶粒成長挙動が異なることを確認している。これらの結晶粒成長の違いには種々の要因が考えられる。本研究では、これらの要因を明らかにするために、まずはレーザ集光位置の変化が基材の加工時の温度勾配に与える影響と、これによってもたらされるビード形状とその微細組織の変化について調査した。

2 研究方法

マルチビームレーザ加工時の基材温度勾配におよぼすレーザ集光位置の変化の影響を調べるため、粉末の投入を行わずにレーザ加工実験を実施した。高速度工具鋼の基材に対して、マルチビーム式L-DED装置でレーザ照射を基材に直接行い、単一ビードの造形を行った。レーザ加工条件は出力60W-300W、走査速度10mm/sとして実施した。レーザ集光位置 $\Delta f = 0$ mm に加えて、レーザ集光位置 $\Delta f = 0.3, 0.5$ mm でビード造形を実施し、このときの基材温度勾配の変化を測定した。基材表面には黒体塗料を塗布し、サーモビューアを用いてレーザ加工時の温度分布測定を行い、レーザ加工によって熔融していない領域のデータのみを使用して基材温度勾配の変化を評価した。

ビードとその周辺の基材の断面に関して、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : SEM) による微細組織の観察と評価を行った。また断面観察で得たビード幅の情報を基にして、サーモビューアで得た温度

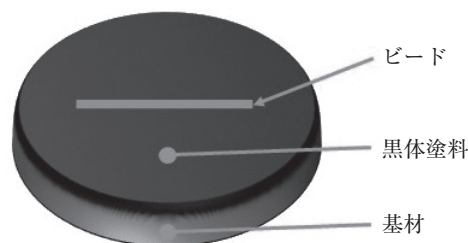


図 2 本研究で使用した温度測定用試料の模式図

分布測定結果のデータ使用範囲を決定した。

3 主な研究成果

図3にレーザー集光位置 $\Delta f = 0$ mmのレーザー加工で形成したビード断面のSEM反射電子組成像を示す。図中の x 方向, y 方向からなる面が基材盤面に対応し, x 方向, y 方向, z 方向はそれぞれレーザー走査方向, 温度勾配評価方向, 基材盤面法線方向である。このような観察結果を基にして, ビード幅を測定した。

図4はレーザー集光位置 $\Delta f = 0$ mmの時のマルチビーム式L-DED加工時における基材表面温度分布である。図中の x 方向, y 方向, z 方向は図3中のそれらと対応している。レーザー加工時の y 方向の温度勾配を評価した結果, 例えばレーザー出力120Wの場合では, 1.15×10^6 K/m ($\Delta f = 0$ mm) 及び 0.85×10^6 K/m ($\Delta f = 0.5$ mm) あった。出力を変化させたときの全体的な傾向として, レーザー集光位置 Δf を0 mmから0.5 mmと変化させることで, 基材盤面方向の温度勾配はゆるやかになる傾向にあることが明らかにされた。

図5はビード内部および近傍の微細組織であり, (a) 未熔融領域, (b) 未熔融領域と熔融凝固領域の界面近傍, (c) 熔融凝固領域である。レーザー熔融凝固領域の組織は炭化物に囲まれたセル状構造から構成されていることが確認され, レーザー出力が高くなると硬度も高くなり, 最高で900HV程度にまで達する。マルチビーム式L-DED加工での出力やレーザー集光位置 Δf 等を精緻に制

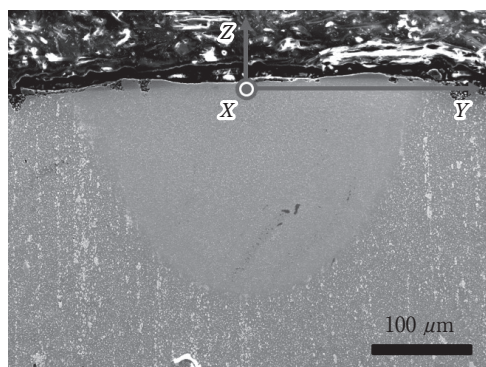


図3 レーザー集光位置 $\Delta f = 0$ mmの時のビード断面のSEM反射電子組成像

御することで, この硬質な熔融凝固領域の硬度や厚さをさらに精密に制御することも可能となる。

4 おわりに

熔融池型積層造形や溶射型積層造形, さらには部分的レーザー焼入れを一台の装置で実現できるマルチビーム式L-DED加工法において, 加工時の温度勾配の違いを明らかにすることは, 精緻な材料組織制御の確立につながり, マルチビーム式L-DED装置の実用性をさらに引き出すことになる。本研究の継続は, マルチビーム式L-DED加工法の産業分野への応用と新たな展開を実現するための基礎的な知見を得ることが期待できる。今回の研究では未熔融領域の温度勾配測定を実施したが, 今後は実験とシミュレーションを併用しながら熔融凝固領域の温度勾配評価にも取り組み, 基礎的な知見を明らかにしていきたい。最後に, 本助成事業に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) K. Asano, M. Tsukamoto, Y. Sechi, Y. Sato, S. Masuno, R. Higashino, T. Hara, M. Sengoku, M. Yoshida : Laser metal deposition of pure copper on stainless steel with blue and IR diode lasers, Optics and Laser Technology, 107 (2018) pp.291-296.
- 2) T. Kunimine, R. Miyazaki, Y. Yamashita, Y. Funada : Effects of laser-beam defocus on microstructural features of compositionally graded WC/Co-alloy composites additively manufactured by multi-beam laser directed energy deposition, Scientific Reports, 10 (2020) 8975, pp.1-11.
- 3) K.A. Iلمان, Y. Yamashita, T. Kunimine : Microstructural and defect characterization in single beads of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy processed by the multi-beam laser directed energy deposition, Journal of Advanced Joining Processes, 11 (2025) 100288, pp.1-12.

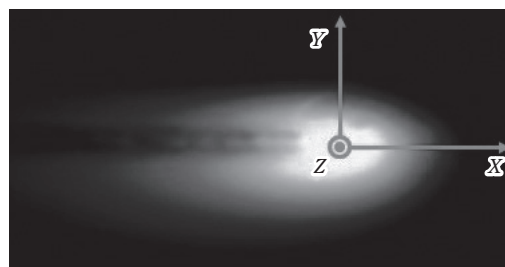


図4 レーザー集光位置 $\Delta f = 0$ mmの時のマルチビーム式L-DED加工時における基材表面温度分布

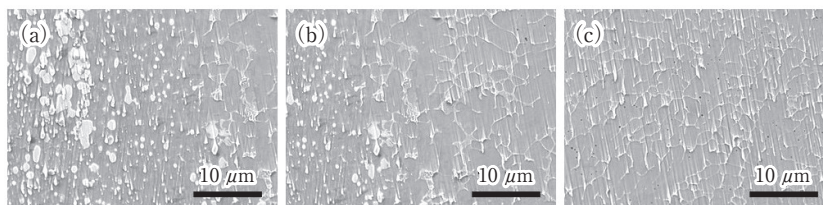


図5 ビード内部および近傍の微細組織
(a) 未熔融領域, (b) 未熔融領域と熔融凝固領域の界面近傍, (c) 熔融凝固領域