

レーザ粉体肉盛溶接のインプロセスモニタリングによる品質評価（第1報）

奥田 誠（情報・生産技術部 システム技術グループ）
福山 遼（情報・生産技術部 加工評価グループ）

1. はじめに

近年、レーザ粉体肉盛溶接（LMD）は産業界での利用が増加している。LMD はレーザで粉末を溶融・凝固させ、必要な部位に機能性材料を付加することが可能である。しかし、加工結果の品質に影響を与える様々な加工因子が存在するため、安定的に品質の良い加工を行うことは困難である。そこで、品質を管理するために断面観察のような破壊検査が有効であるが、検査したものを製品として扱えなくなるため全数検査は実施できない。そこで、加工中にモニタリングを行うインプロセスモニタリングが求められている。これは、加工結果に影響を与えるデータを加工しながら即座に解析することで、非破壊で全数検査の品質管理が可能となる。

これまで、レーザ重ね溶接を対象として、加工中の発光強度から品質の良否判定を行い、不良の場合はその原因の推定を行うシステムを開発してきた¹⁾²⁾。

本報では、LMD を対象として、加工結果に影響を与えるセンシングを行い、モニタリングデータから品質の良否判定を行うシステムを開発中であるため、その途中経過を報告する。

2. LMD とレーザ重ね溶接の違い

これまでレーザ重ね溶接を対象として、発光強度の特徴量を用いて良否判定を行った。しかし、LMD は、レーザ重ね溶接のキーホール型とは加工現象が異なる熱伝導型であり、これらの特徴の違いを表 1 と図 1 に示す。発光強度への影響が、キーホール型と比較すると熱伝導型は金属蒸発が少ないため低くなる。このことから、発光強度の特徴量のみでは品質の良否判定は難しいと推測されるため、他のデータをモニタリングすることを検討し、溶融池の画像を用いることとした。

表 1 熱伝導型とキーホール型の比較

比較項目	熱伝導型 (LMD)	キーホール型 (レーザ重ね溶接)
パワー密度	低い $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 程度	高い 10^6 W/cm^2 程度
熱吸収 メカニズム	表面加熱 (放射・伝導)	内部加熱(蒸発・キーホール吸収)
キーホール形成	なし	あり
溶込形状	浅く広い	深く狭い
スパッタ・欠陥 リスク	低い	高い(気孔、ブローホールの原因)
溶接安定性	高い	不安定になりやすい
典型的な用途	薄板溶接、精密部品、 LMD など	厚板溶接、バッテリーモジュール等
発光強度への影響	低い(金属蒸発が少ないため)	高い(金属蒸発による強い発光)

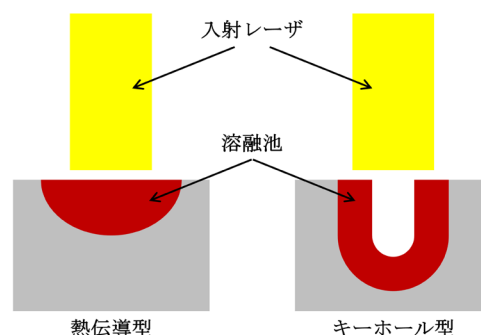


図 1 熱伝導型とキーホール型の断面イメージ

3. 溶融池撮影システムの構築

撮影用カメラの性能は、加工現象の速さを考慮して高 FPS である表 2 に示す製品を選定した。本所での実験では LMD の加工速度は最大で 30mm/s 程度であるため、300fps で撮影できたとすれば、加工距離 0.1mm 毎に撮影が可能であるため、十分な分解能で撮影が可能である。図 2 に示した LMD 装置の LMD 加工ヘッド部分に図 3 のような治具を取り付けて設置することを想定している。

表 2 選定したカメラの仕様

項目	内容
型番	STC-MCS43U3V
有効画素数	最大 720(H) x 540(V)
フレームレート	最大 527.1 fps
露光時間	1 μs ~ 16.777 s
ゲイン	0 ~ 19.2 dB
インターフェース	USB3.0 Super speed

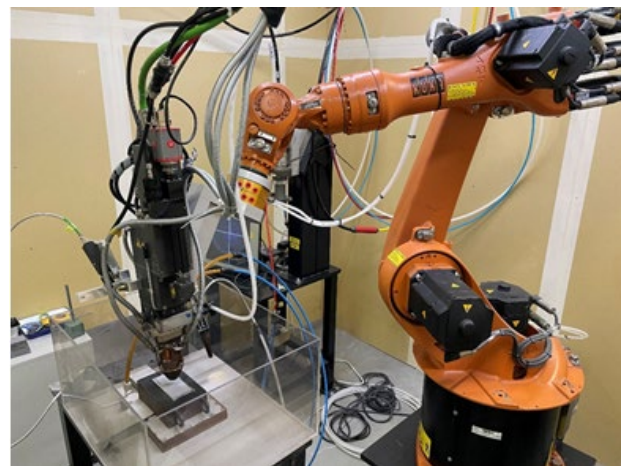


図 2 LMD 装置

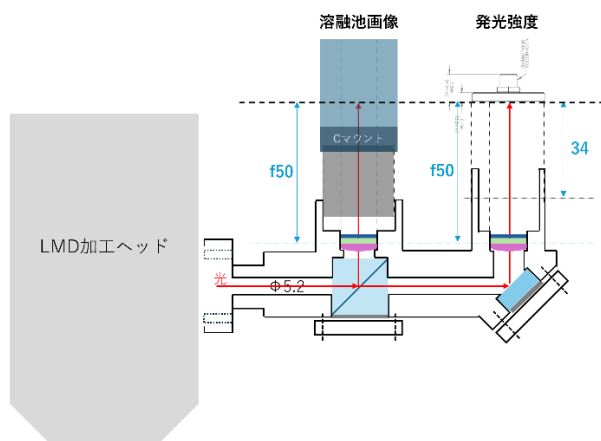
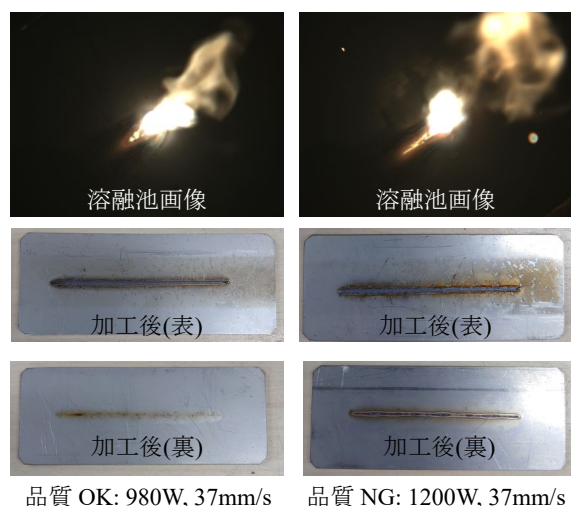


図 3 カメラ取り付け治具の設計図の例

4. レーザ重ね溶接での実験結果と考察

レーザ溶接ヘッドに対してカメラを設置し、キーホールが下板の裏面まで貫通していないか否かで判定した品質 OK と NG の加工条件にて実験を行った。溶融池の撮影画像の一部分と、加工品の表裏の写真を図 4 に示す。出力が 980W で加工速度が 37mm/s では品質 OK となり、裏面まで貫通していないことが図 4 から明らかである。一方、出力が 1200W では品質 NG となり、加工後の裏面を貫通していることが分かる。

これらの加工時の溶融池画像を比べてみると、品質 OK と NG となる実験条件で違いがあることが分かる。まずは溶融池の長さの違いが見られる。品質 OK と比較して品質 NG の方が長い尾をひく溶融池を形成している。これは、品質 NG の方が、入熱量が大きくなるため、熱がこもりやすいからと考えられる。また、煙（ブルーム）の発生状況が異なる。画像からは少し読み取りにくいですが、品質 NG の方が大きく、また上の方へ上がりやすい傾向があった。さらに、発光度合は品質 OK の方が強いように見える。これは、品質 NG では下板を貫通しており下からも光が漏れるが、品質 OK では非貫通であることで溶融池に光が集中するためと考えられる。



品質 OK: 980W, 37mm/s 品質 NG: 1200W, 37mm/s

図 4 レーザ重ね溶接での溶融池と加工後の画像

5. おわりに

LMD に対して依頼試験や受託研究につながる溶融池の観察システムを開発中であり、そのために最大 527.1fps で画像を撮影可能なカメラを採用した。その画像から特徴量を抽出し、発光強度の解析結果と組み合わせることで、レーザ加工における品質の良否判定の精度向上を目的として取り組んでいる。

今回は試験的にレーザ溶接ヘッドにカメラを設置してレーザ重ね溶接の実験を行い、溶融池の発光具合や大きさおよびブルームの発生状況を画像から読み取れることを確認した。これによって、LMD での溶融池画像を撮影する見込みが立つことを確認できた。

今後 LMD 加工ヘッドに取り付ける治具を開発してカメラを設置し、溶融池の撮影画像から品質 OK/NG の違いを特徴量として抽出し、良否判定の精度向上に取り組む。

【参考文献】

1. 森清和, 石川毅, 薩田寿隆, 奥田誠, 福山遼, 中村紀夫:機械学習によるレーザ溶接モニタリング技術, レーザ加工学会誌, 28(2), 99-105 (2021)
2. 福山遼, 奥田誠:KISTEC 研究報告 2024, 機械学習を用いたレーザ溶接における溶け込み深さの予測とブローホール検出モデルの構築, 31-33(2024)