

# ランダムフォレストを用いた LMD 時における投入粉末の歩留りにおよぼす影響度に関する研究

福山 遼(情報・生産技術部 加工評価グループ)

中村 紀夫(情報・生産技術部 システム技術グループ)

## 1. はじめに

レーザー粉末肉盛溶接 (Laser metal deposition; LMD) はレーザー照射により形成される溶融部に金属粉末を投入し、肉盛溶接を行うことで金属積層造形、あるいは部分的な機能性付与 (Laser cladding) が可能な近年注目の技術である。この LMD 加工時に投入する粉末は非常に高価であり、加工条件によっては投入粉末が溶融池に入らなかったものやスパッタとして外に飛び出すものがあり、全ての粉末が溶着されるわけではない。また、使用した粉末は酸化や塵の付着により再利用できないため、粉末の溶着率 (歩留り) が加工コストに直結している。

しかしながら、LMD の加工条件にはレーザー出力、レーザー走査速度、粉末供給量等の複雑で様々な組合せがあり、これらの加工条件が歩留りに及ぼす因子であるか明らかではない。

そこで、機械学習のアルゴリズムの一つであるランダムフォレストを用いて様々な加工条件から歩留りにおよぼす重要度の導出を試みた。ランダムフォレストはアンサンブル学習の一つで学習用データから多数の決定木を作成し、その決定木による予測値の平均から最終的な予測値を導出する。さらに、ランダムフォレストでは予測に用いられる各説明変数の重要度がどの程度なのかを導出できる特徴がある。

本研究では、ランダムフォレストを用いて LMD における多種類の説明変数から歩留りを予測するモデルを構築した。そして、説明変数の重要度の導出により歩留りの予測精度を向上させる因子の探索を目的とした。また、加工現象を踏まえた複合説明変数を加えることで予測精度を向上させ、検討を行った。

## 2. 実験及び結果

本研究で用いた LMD 装置はレーザー発振器 (TRUMPF 製: TruDisk3006)、ロボット (KUKA 製: KR C4)、粉末供給装置 (GTV 製: GTV PF 2/2) の構成となっている。発振器から出たレーザー光 (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、母材表面を溶融する。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造形する。

まず、LMD による歩留りの実データとして 391 サンプル取得した。LMD の積層条件と説明変数名を表 1 に示す。レーザー出力、レーザー走査速度、粉末供給量は表 1 に示す範囲内の乱数で行った。また、層数は 3 層盛 (1 層目 5 パス、2 層目 4 パス、3 層目 3 パス) と 2 層盛 (1 層目 5 パス、2 層目 4 パス) の 2 種類、粉末は Co 基のステライト 4 種類、基材は SCM440、S45C の 2 種類で行った。その他の積層条件は固定とした。また、放射温度計によりレーザー加工点の温度測定を行った。測定箇所は最終パスの加工直前の基材温度と平均溶融池温度である。

次に歩留りの測定方法について説明する。LMD 前後の基材の重さより、肉盛された重さの実測値  $W_m$  (gf) を測定した。肉盛重さの理論値  $W_t$  (gf) は、 $L$  を総ビード長さ (mm)、 $v$  を走査速度 (mm/s)、 $p$  を粉末供給量 (gf/s) として、式(1)のように定義し、歩留り  $N$  (%) は、 $W_m$  を  $W_t$  で除した値とした。

$$W_t = (L \cdot p) / v \quad (1)$$

機械学習のライブラリは Python で使用可能な scikit-learn. ensemble の RandomForestRegressor (以下ランダムフォレストと記す) を用いた。実験で得た 391 のデータの事前処理として、数値データ以外の基材の種類や粉末の種類などの連続量ではないカテゴリーデータはダミー変数として 0、1 に変換した。これらの前処理したデータを学習用と評価用として 8 対 2 に分割した。ランダムフォレストのハイパーパラメータは決定木を 5000 本、層の最大深さを 30 層とした。枝分かれの際の判断基準として平均二乗誤差 (Mean Squared Error; MSE) で学習させ、予測精度は平均絶対誤差 (Mean Absolute Error; MAE) で評価し、各説明変数の重要度を導出した。

加工条件のみで予測を行った場合、評価用データでの予測精度の指標である MAE は 0.032 であった。レーザー出力と走査速度の重要度が高いことから、単位長さあたりの入熱量 (HF) の計算値と加工現象で重要な因子である温度の実験値を新たに説明変数に加えると、MAE は 0.028 に向上した。このときの重要度は入熱量 (HF)、レーザー出力 (Pw)、溶融池温度 (Mpt)、基材温度 (Pass\_temp) の順で高い。これら 4 つの説明変数から表 1 の下部に示す新たな 4 つの複合説明変数を加えたところ、図 1 の相関図に示すように予測と実際の結果が一致する 45 度線上に集まっていることがわかり、MAE は 0.026 とさらに向上した。このとき、

表1 LMDの積層条件と説明変数名

項目	説明変数名	条件
レーザー出力 kW	Pw	1.2~3
レーザー走査速度 mm/s	Velo	3~28
層間垂直移動距離 mm	Pz	0.5~1.5
粉末供給量 g/min	P_feed	7.5~23.8
層数とパス数	pass_seq	2層9パス, 3層12パス
ステイライト粉末の種類	Powder_ID	1, 6, 12, 12H
基材(予熱無の室温)	Work_ID	SCM440, S45C
スポット径 mm	-	φ4(固定)
シールドガス流量 ℓ/min	-	23(固定)
キャリアガス流量 ℓ/min	-	2.1(固定)
ラップ幅 mm	-	2(固定)
1パスの長さ mm	-	50(固定)
最終パス基材温度 °C	Pass_temp	実験値
最終パス平均熔融池温度 °C	Mpt	実験値
単位長さあたりの入熱量 J/mm	HF	計算値
熔融池温度/入熱量 °C/(J/mm)	Mpt/HF	計算値
基材温度/入熱量 °C/(J/mm)	Pt/HF	計算値
熔融池温度レーザー出力 °C/W	Mpt/Pw	計算値
基材温度レーザー出力 °C/W	Pt/Pw	計算値

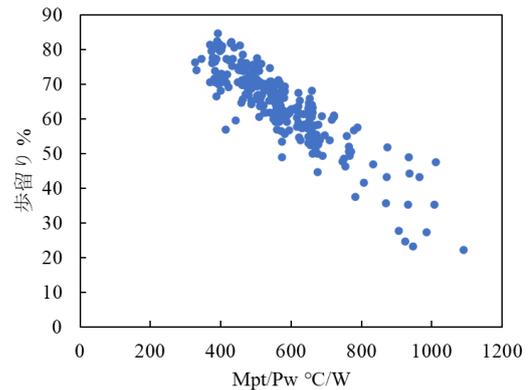


図3 熔融池温度/レーザー出力 (Mpt/Pw) と歩留りの関係

各説明変数の重要度は図2に示すように熔融池温度/レーザー出力 (Mpt/Pw) が最も高い。このMpt/Pwと歩留りの関係を図3に示すと、Mpt/Pwが低いほど歩留りが高い負の線形関係が見られた。この相関関係より、粉末を効率的に熔融する一因はレーザー出力が高いときであり、そのとき熔融粉末は多くなるため熱エネルギーが粉末に奪われ熔融池温度が減少する。したがって、Mpt/Pwの意味するところは単位時間あたりに熔融池に投入される熱量と、熔融池温度の低さ、つまり粉末が熔融するために使用された熱量との比であり、熱効率を意味していると考えられる。

また、2番目に高い重要度はレーザー出力 (Pw) であり、上位の各説明変数の重要度にも多く内包されている。このPw増加に伴う加工現象として、熔融池サイズが大きくなるのが想定され、粉末の集束径が同じであれば熔融池に投入されやすくなると考えられる。そのうえ、本研究で使用したレーザーのビームプロファイルはガウス分布である。したがって、照射されたレーザーは端部になるほどパワーが弱くなるため、端部付近に投入された粉末は未熔融になりやすい。しかし、Pwが高出力時には低出力時に比べ有効パワー密度が大きくなり、端部付近に投入された粉末も熔融されやすくなると考えられる。

### 3. おわりに

ランダムフォレストを用いてLMD時における投入粉末の歩留りを予測するモデルを構築した。加工現象を踏まえ複合説明変数を用いて構築したモデルの予測精度は94.8% (MAE2.6%) であった。最も高い重要度を得たMpt/Pwは熱効率を意味していると推察され、歩留りとの線形関係が見られた。この線形性が予測精度に大きく寄与していると考えられる。また、歩留りにおよぼす上位の重要度にはレーザー出力 (Pw) が内包される熔融池温度/レーザー出力 (Mpt/Pw) や入熱量 (HF) であり、熔融池サイズの大小に直結する変数が重要と考えられる。

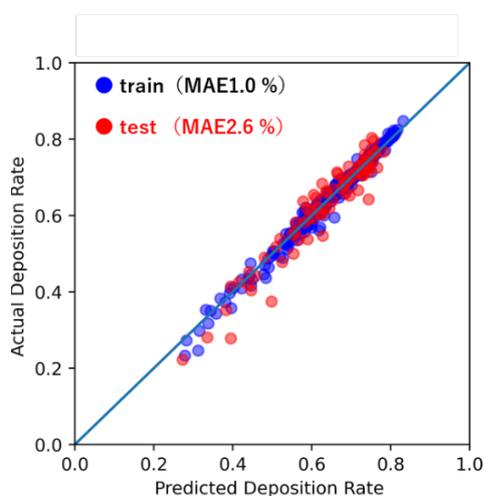


図1 予測と実際の結果の相関図

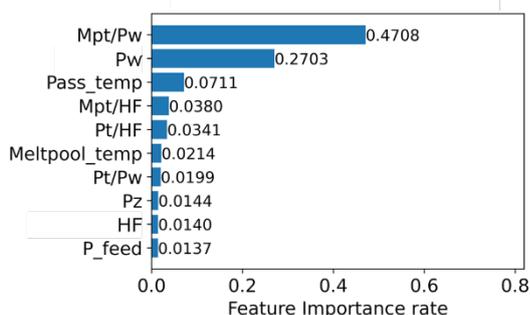


図2 各説明変数の重要度