レーザ肉盛条件の事前予測手法に関する研究

西海綾人* 谷内大世* 藤井要* 舟田義則**

金型補修への適用で注目されているレーザ肉盛技術は、同じ肉盛条件であっても基材形状や加工位置に よって肉盛サイズがばらつくという問題がある。この原因として、基材形状や加工位置によって加工部周 辺の温度分布が変化することが考えられる。そのため、補修対象の金型に基づく肉盛条件へ調整が不可欠 であるが、従来では技能者の勘と経験によって行われており、補修失敗の原因の一つとなっていた。そこ で本研究では、形状や位置に基づく温度変化を熱伝導解析により調査し、適切なレーザ光調整率を予測す る数式モデルを導出した。さらに、実際の肉盛実験を行い、調整率の精度を検証した結果、目標の肉盛サ イズに対して±10%以内の精度で肉盛できることを明らかにした。この手法により、勘と経験に依存しな い精度の高い条件の調整が可能であることが示された。

キーワード:レーザ肉盛,金型補修,条件予測,熱伝導解析

Study on Prediction of Cladding Conditions in Laser Metal Deposition

SAIKAI Ayahito, YACHI Taisei, FUJII Kaname and FUNADA Yoshinori

Laser metal deposition technology, which has attracted attention for its application in mold repair, has a problem in that the cladding size varies depending on the substrate shape and processing position, even under identical conditions. This variation is likely due to changes in the temperature distribution around the processing area. Therefore, it is essential to adjust the cladding conditions based on the specific mold being repaired, whereas traditionally, these adjustments have been made based on the intuition and experience of technicians, causing repair failures. In this study, thermal conduction analysis was used to investigate the temperature changes based on shape and position, and a mathematical model was developed to predict appropriate predict laser power adjustment rates. Verification experiments revealed that cladding could be achieved within $\pm 10\%$ of the target size. This method demonstrated the feasibility of achieving highly accurate condition adjustments without relying on intuition and experience.

Keywords: laser metal deposition, mold repair, predict optimal cladding conditions, thermal conduction analysis

1. 緒 言

積層造形法は、CADモデルの断面形状を下から順に 高さ方向に造形する加工法である。中でもレーザ肉盛 技術ともよばれている指向性エネルギー堆積法は、熱 源と材料の供給を同一のノズルから行う構造である。 ノズルを任意の位置に動かし、平面以外にも造形が可 能であることから、従来の粉末床溶融結合方式では困 難な現存部品の表面へ肉盛造形が可能である。そのた め、コーティングによる製品の付加価値向上や補修技 術へ適用が検討されており¹⁾、特にコスト効果が高い 金型補修が注目されている。一方、多種多様な形状の 基材に対して造形を行うレーザ肉盛技術では、適切な

*機械金属部 **企画指導部/機械金属部

肉盛条件の導出が困難である。これは,基材形状が違 えば,加工部周辺の熱のこもりやすさが異なり,レー ザ出力など条件が同じであっても加工部の昇温状態が 変化するからである。この温度の違いによって,材料 粉末あるいは基材の溶融程度が変化し,肉盛過多や過 少,基材の過剰溶融などが発生する。そこで,造形を 行う前には,使用する材料粉末や基材ごとに事前の試 し加工を行い,条件の当たり付けを行う。このとき, 金型補修においては,摩耗損耗の程度やその位置,金 型の形状などを忠実に再現する必要があり,これを準 備することはコスト面で現実的ではない。そのため, 実際には補修対象とは形状が異なる角ブロック上で条 件出しのための事前実験を行い,その結果を熟練者の 経験や勘によって調整していることが現実であり,こ



図2 条件予測システム

れが金型補修の失敗原因の一つとなっている。

そこで本研究では,試し加工の結果を基に,基材形 状の影響を考慮し,金型補修に適切な肉盛条件を予測 する手法について検討した。

2. レーザ肉盛条件の決定プロセス

金型補修におけるレーザ肉盛条件決定のプロセスを 図1に示す。試し加工ブロックに肉盛条件である粉末 供給量,走査速度,レーザ光出力を変えながら,単ビ ードの造形を行い,金型補修に必要な肉盛高さ,幅, 溶け込み深さを得るための条件を探索する。そして, 決められた条件の内,レーザ光出力のみを調整して, 試しブロックでの肉盛状態を補修対象の金型で再現す る。レーザ肉盛では,加工部の温度が重要であり,レ ーザ光出力による調整が最も直接的で簡便であること がその理由である。この調整について,従来では熟練 者の勘などによる経験的かつ定性的な導出手法であっ たが、本研究では数値解析を活用し,理論的かつ定量 的な導出手法の確立を目指した。

3. 基材形状の違いによる加工部温度への影響 3. 1 熱伝導解析による加工部温度の推定

加工部温度について,二色温度計や赤外線カメラ, 高速度カメラなどを用いて実測することは,膨大な時 間が必要となることから,本研究では,有限要素法に よる熱源移動をともなう熱伝導解析を用いて温度の算 出を行った。解析は,溶接シミュレーションプログラ



図3 シミュレーションによる加工部温度解析例



(1)基材の幅

:0.3~1.0mm[0.1毎],~2.0mm[0.2毎], 2.5mm, 3.0mm (2)基材の厚み

:0.3~1.0mm[0.1毎],~2.0mm[0.2毎], 2.5mm, 3.0mm (3)端部からの距離(レーザ走査線までの幅方向の距離) :0~0.5mm[0.05毎],~ 1.0mm[0.1毎], 1.5mm

図4 基材形状および加工位置の条件

	表1 解析条件
レーザ光出力	90, 120, 150, 180 W
走査速度	10 mm/sec
レーザ集光径	0.3 mm
基材材種	SKD11
密度	7.72 g/cm ³
比熱	461 J/kg • K
熱伝導率	29.3 W/m • K
レーザ吸収率	24.5%

ム(QuickWelder, (株)計算力学研究センター)にて行っ た。図3に基材に対してレーザ光のみを照射し,走査 した解析例を示す。この時,レーザの走査線上の最高 温度を加工部温度とした。調査を行う基材形状および 加工位置に関する条件を図4に示す。モデル形状はブ ロック角材とし, (1)基材の幅,(2)基材の厚み, (3) 端部から加工部までの距離をそれぞれ変更し調査を行 った。解析条件を表1に示す。レーザ光出力のみを90 Wから180 Wまで30 W毎に変化させ,走査速度を10





mm/secで一定とし,粉末材料の供給を伴わない,0.3 mmの集光径のレーザ掃引のみで実施した。材質は SKD11相当とし,レーザ吸収率は24.5%にて実施した。

3.2 レーザ光出力と加工部温度の関係

図5に結果を示す。(1)基材の幅を変化させた場合に ついて,幅が広い基材では加工部温度への影響は見ら れなかった。しかし,2.5 mmより幅が狭くなると影響 を受け始め,狭いほどより激しく温度が上昇する傾向 となった。(2)基材の厚みと(3)加工位置も同様であり, 厚い基材では加工部温度への影響はなく,2.5 mm以下





の厚みの基材では、薄いほどより激しく温度が上昇し た。加工位置については壁面から遠い位置では影響は ないが、壁面と加工部の距離が1.0 mmより近くなると 影響が生じ、近づくほど強くなっている。これらの結 果について、レーザ光出力と加工部の室温からの温度 上昇の関係を整理した結果を図6に示す。全ての条件 においてレーザ光出力と加工部温度はほぼ0点を通る 線形な関係を示した。試し加工ブロックで決定された レーザ光出力と、金型上で試し加工ブロックと同じ加 工部温度となるように調整を行ったレーザ光出力の関



(c) 端部から加工部までの距離

図8 パラメータ毎の予測結果

係について考える(図7)。レーザ光出力がP1の時の加工 部温度をTm1とし、金型形状に応じて調整を行ったレ ーザ光出力をP2とする。同様にレーザ光出力がP3の時 の加工部温度をTm2とし、調整後のレーザ光出力をP4 とする。この時、図6の結果より、P1:P2 = P3:P4と なることが分かる。この関係より,事前実験で決定さ れたレーザ光出力から,金型補修に適したレーザ光出 力への調整率は,基材の幅,厚み,加工位置が決まれ ば,レーザ光出力に関係なく,一意であると言える。

4. 予測手法の確立

4.1 レーザ光出力調整率予測式の導出

基材の幅,厚み,加工位置を入力パラメータとして, レーザ光出力調整率を出力する予測モデルを検討した。 図7で示したように,試し加工にて決定されたレーザ 光出力をP₁,この時の加工部温度をTmとし,予測した い金型(パラメータを変更した基材)上で加工部温度が Tmとなる時のレーザ光出力をP₂とする時,レーザ光調 整率αを次の式で定義する。

$$\alpha = \frac{P_2}{P_1}$$

そして,αと基材の幅,基材の厚み,加工位置のそ れぞれの関係を整理した結果を図8に示す。

(1)基材の幅を変化させた場合,広い幅ではレーザ光 出力の調整は不要だが,2.5 mmより狭い幅では調整が 必要であり,その調整率は狭くなるほど100%から大き く減少することが分かる。(2)基材の厚みと(3)加工位 置も同様であり,厚い基材では調整は不要だが,2.5 mm以下の厚みから調整が必要となり,その調整率は 薄くなるほど100%から大きく減少することが分かる。 加工位置については壁面から遠い位置では調整は不要 であるが,加工部が壁面から0.6 mmより近い位置では 調整が必要であり,近くなるほど調整率が100%から大 きく減少することが分かる。

これらの関係を最小二乗法に基づいて近似した式を 次に示す。

まな症がん(mm)の時	$\alpha = \frac{496.3}{1000}$
∞"η™""0(IIIII)",	$\alpha = \frac{1}{511.5 + 956.3e^{-3.1b}}$
基材厚みが <i>t</i> (mm)の時,	$\alpha = \frac{161.7}{170 + 343.58e^{-3.3t}}$
加工位置が <i>x</i> (mm)の時,	$\alpha = \frac{70}{70.2 + 56.8e^{-7.5x}}$

これらの式を用いることにより,基材幅や基材厚み, 加工位置を入力パラメータとしてレーザ光出力の調整 率を算出することが可能であり,これらをレーザ光出 力調整率のモデル式とした。

4.2 予測手法の精度検証

モデル式の有効性検証のため、実際にレーザ肉盛加 工を行った。条件出しブロック上での加工結果を、基 材の形状や加工位置を変更しても再現できるか検証し た。検証では条件出しブロック上の肉盛サイズ(ビード 高さ、ビード幅、溶け込み深さ)を目標値とし、基材形 状を変更したブロック上の肉盛と比較した。表2に本 研究で使用したレーザ肉盛装置(ALPION、(株)村谷機 械製作所)の仕様を、基材形状を図9に示す。条件出し ブロックは、幅50.0 mm、厚み25.0 mm、奥行き40.0

表2 レーザ肉盛装置の仕様				
波長	975 nm			
最大出力	300 W (50 W×6)			
集光径	0.28 mm			
形態	マルチビーム式(6本)			

mmの基材を使用し、端部から加工部までの距離を3.0 mm、レーザ光出力を120 Wとし、これらを基準条件と した。これに対し、以下の3つの条件で基材形状や加 工位置を変更し、それぞれの調整率に基づいたレーザ 光出力で実験を行った。変更する項目以外の条件はす べて固定とした。

- (1) 幅の変更: 基材の幅を1.0 mmに変更
- (2) 厚みの変更: 基材の厚みを0.5 mmに変更
- (3) 加工位置の変更:端部から加工部までの距離を0.15 mmに変更

各条件でのレーザ光出力は予測式に基づき,(1)幅の 変更では107 W,(2)厚みの変更では87 W,(3)加工位置 の変更では94 Wとした。これらの条件で得られた肉盛 サイズの測定結果および基準条件の肉盛サイズ(目標 値)との比較結果を表3に示す。結果,おおよそ全ての



図9 検証用基材形状

		жу простишить	1/1		
	条件出しブロック形状 (基準条件)	モデル式による調整後の条件にて加工			
出力	120W	107W	87W	94W	
基材条件	基準	(1) 幅1.0mm	(2) 厚み0.5mm	(3) 加工位置 0.15mm	
外観	切断位置 ————————————————————————————————————	1.0mm 1.0mm	t0.5mm 1mm	9.15mm 1 1mm	
断面	高さ↓ 溶込◆ 基材				
高さ (造形精度)	121 (目標値)	127µm (105%)	142µm (117%)	130µm (107%)	
幅 (造形精度)	397µm(目標値)	368µm (93%)	363µm (91%)	424µm (107%)	
溶込み深さ (造形精度)	86µm(目標値)	77µm (90%)	92µm (107%)	88µm (102%)	

表3 精度評価結果

項目で目標値に対して±10%以内で肉盛が形成された。 金型補修において,±10%以内であれば過不足なく補 修が可能な範囲であり、レーザ光出力の調整が適切で あったといえる。

また、厚みを変更した条件の肉盛高さについて、試 し加工の結果と比較して+17%と比較的高い値となった。 レーザ肉盛加工において、肉盛高さは供給される粉末 量の影響が大きい²⁾。そのため、+17%となった原因と して、粉末供給量の安定性の問題であると考えられる。 一方、肉盛幅および溶け込み深さは目標値に対して± 10%以内で形成されていたことから、両者の加工部温 度は同程度であり、レーザ光出力の調整は適切であっ たと判断できる。

5. 結 言

本研究では,熱伝導解析を用いて,レーザ肉盛にお ける適切な肉盛条件を予測するシステムを確立した。 また,以下の結果が得られた。

(1) 加工部温度に影響を与える基材形状の条件として, 以下の3点を明らかにした。

- ・基材の幅が2.5 mm以下である場合
- ・基材の厚みが2.5 mm以下である場合
- ・加工部の位置が端部から1mm以下である場合
- これらは、レーザ光集光径が0.3 mm, 走査速度が10 mm/secの条件下で得られた結果である。
- (2) 基材の幅,基材の厚み,端部から加工部までの距離を入力パラメータとして,金型形状に応じたレー ザ光出力の調整率を算出する数式モデルを導出した。
- (3) 実際の肉盛実験を行い,調整率の精度を検証した 結果,目標の肉盛サイズに対して±10%以内の 精度で肉盛できることを明らかにした。

参考文献

- Petruse, Radu Emanuil, and Mihai-Ciprian Langa. Enhancing metal forging tools and moulds: Advanced repairs and optimisation using directed energy deposition hybrid manufacturing. Appl. Sci. 2024, vol.14, no.2, p. 567-594.
- 2) 舟田義則、山下順広、左今佑、塚本雅裕. 直噴型マルチビ ーム式レーザコーティング技術の開発とビード形成特性. スマートプロセス学会誌. 2019, vol. 8, no. 1, p. 19-24.