

ワイヤ供給レーザクラディングによる金型製造加工技術の研究

北海道立総合研究機構 産業技術研究本部 工業試験場
研究主任 櫻庭 洋平
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015219)

キーワード：レーザクラディング，傾斜角，加工姿勢

1. 研究の目的と背景

自動車部品の生産に不可欠な各種の金型には，製作期間や修理期間の短縮，耐久性の向上や長寿命化が常に求められている．金型の溶接補修や設計変更レーザクラディング加工を用いると，必要な範囲のみを溶融させ最小限の入熱量で加工できるため，TIG 溶接などよりも母材希釈や溶接変形が抑制され良好な品質が得られる．

レーザクラディングの溶加材には，粉体状，ワイヤ状などいくつかの形状が用いられる．溶加材にワイヤを使用する（以下：ワイヤ供給式）レーザクラディングは，溶加材が連続体であるためガス巻込みなどの欠陥が少ない，ワイヤ自体の予熱が可能で余盛量やビード品質が向上するなど，粉体材料と比べた優位性がある．しかし，ワイヤ供給式は一部の例外¹⁾を除けばレーザとワイヤの同軸供給が不可能であり，加工経路に対するレーザとワイヤの位置関係（以下：ワイヤ配置）で溶込状態が変化するため，内部欠陥の増加や積層そのものの不具合（以下：異方性）が生じる可能性がある²⁾．

レーザクラディングで均質かつ良好な加工を行う場合，加工姿勢は下向姿勢のみで行うのが最良となる．しかし，金型には複雑な起伏や傾斜面があり，またレーザとワイヤが金型の起伏と干渉する箇所も多いため，ポジション等で金型の姿勢を細かく制御しても下向姿勢のみで全体を加工するのは極めて難しい．このため，ワイヤ供給式を金型の肉盛溶接で活用するには，加工条件を最適化することで異方性を解消または減少させ，適用範囲を広げることが必要である．

筆者らはこれまで，ワイヤの供給方向の違いや，加工面の傾斜角の違いによる，内部欠陥やビード形状の異方性を評価し，溶込状態の分析から内部欠陥や形状不整を低減する方法について研究に取り組んできた．本研究では，ワイヤ供給式をアルミダイカスト金型の溶接補修に適用するため，合金工具鋼 SKD61 を対象に，クラディング加工時の予熱・後熱の有無，加工面の傾斜角，加工姿勢の違い（以下：加工条件）による内部欠陥や材料組織（以下：加工品質）への影響を比較し，加工条件の影響を最小限に抑えて加工品質を平準化する方法について検討した．

2. 実験方法

2・1 予熱・後熱の有無による影響と対策

SKD61 は焼入性の良好な材料で，溶接時の余熱で空冷でも容易に焼入が進む．しかし，焼入硬度が 52HRC～

54HRC と高い³⁾ため，溶接部の残留応力で割れが生じやすい．この対策として，一般に SKD61 の溶接時にはマルテンサイト変態点+50K 程度（598K 以上⁴⁾の予熱・後熱が加えられるが，レーザ溶接による微細クラックの補修や摩耗エッジの再生では健全部の寸法変化を抑えるなどの理由から予熱・後熱を省略する 경우가多々ある．しかし，このときの加工品質は加工領域が不定形かつ微細なため定量化が難しく，予熱・後熱を省略したことの影響についても不明な点が多い．

そこで本研究では，SKD61 のレーザクラディングにおける予熱・後熱の影響を把握するため，溶込状態の違いや内部欠陥の残存量を測定し，それぞれワイヤ溶着量に対する内部欠陥の体積比（以下：空隙率）が一定値以下になるレーザ出力を求めた．また，空隙率が同程度の状態で材料組織と硬さ分布を測定し，両者の違いと原因を確認した．図 1 に実験装置の外観を，表 1 に主要な実験装置の諸元をそれぞれ示す．

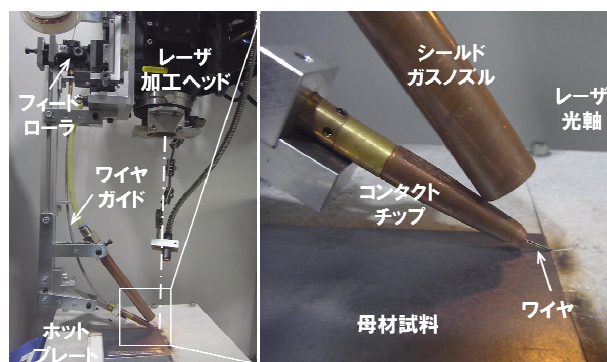


図 1 実験装置外観（左：全体写真 右：加工点拡大）

表 1 実験装置諸元

レーザ	IPG Photonics YLS-2000
種類 (波長)	Yb-ファイバレーザ ($\lambda=1070\text{nm}$)
集光レンズ	F300
スポット径 (mm)	$\phi 0.3$ (焦点)
	$\phi 2.4$ (加工点・+Z)
ワイヤ供給装置	新規製作
モータ種類	ステッピングモータ
ワイヤ径 (mm)	$\phi 0.8$
試料加熱装置	IKA C-MAG HP7
ヒータ容量 (W)	1000
最高温度 (K)	773 (加熱面)

レーザは最大 2kW の Yb-ファイバレーザ ($\lambda=1070\text{nm}$) を使用し，F300 レンズでスポット径 $\phi 0.3\text{mm}$ に集光した．実験では試料の上側に焦点を外し

(プラスデフォーカス), 加工点のスポット径を $\phi 2.4\text{mm}$ (ワイヤ直径の3倍) に拡大して使用した. ワイヤの供給にはsteppingモータ駆動の供給装置を新たに製作し, レーザ加工ヘッド (以下: ヘッド) の側面に設置して, 加工経路の走査に合わせてワイヤを供給した. また, 母材試料の予熱・後熱には最大容量 1000W のホットプレートを使用し, 加熱面上に設けた位置決めガイドに合わせて試料を置き, 温度を保持しながら加工を行った.

実験は, 最初に1パスあたりの余盛量やビード形状を把握するため, 母材試料上にビードを1パス作製し, 溶融部や熱影響部の幅や深さ (以下: 断面寸法) を測定して, レーザ出力や予熱・後熱の有無による違いや傾向を比較した. 図2に, 1パスビードの外観と断面寸法の測定箇所を示す.

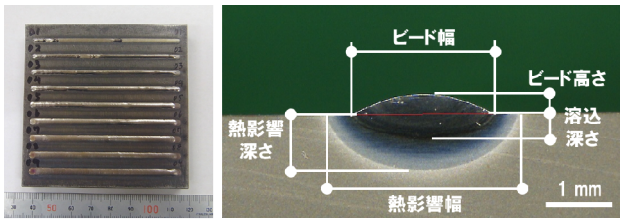


図2 1パスビードの外観・断面測定箇所
(左: 加工試料外観 右: 寸法測定箇所)

次に, 図3のとおり4層18パスの積層ビードし, 任意の20mm区間の空隙率をX線CTシステムで測定した. また, ビード表面から深さ方向の硬さ分布をビッカース硬さ試験機で測定し, 顕微鏡観察した材料組織と照合することで違いや傾向を比較した. 表2に, 使用した評価試験装置をそれぞれ示す.

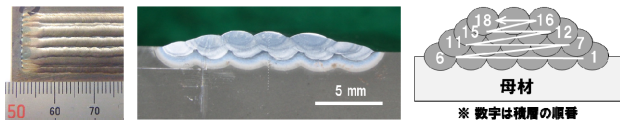


図3 積層ビードの外観と断面形状
(左: 外観 中央: 断面写真 右: 積層の順番)

表2 評価試験装置

測定項目	測定装置	型番
		島津製作所(株)
ビード内空隙率	マイクロフォーカス X線CTシステム	inspeXio SMX-225CT (検出部) ポリウムグラフィックス(株) VGStudio MAX 2.2 (欠陥解析)
断面硬さ分布	ビッカース硬さ試験機	(株)アカシ MVK-H1
断面組織	実体顕微鏡	OLYMPUS(株) SZX16
	金属顕微鏡	" GX71

実験では, レーザ出力と予熱・後熱の有無を比較条件とし, 溶接速度やワイヤ供給速度, ビード間隔は一定とした. 表3に実験条件を, 表4に母材とワイヤの組成をそれぞれ示す. なお, 実験時の予熱・後熱温度や後熱時間は, SKD61の一般的な予熱・後熱条件の範囲⁵⁾から, 温度623Kおよび後熱1時間を採用することとした.

表3 予熱・後熱の影響評価実験条件

項目	比較条件
レーザ出力 (W)	500 - 1200 (100W 間隔)
予熱・後熱	あり (予熱: 623K + 後熱: 623K・1時間)
	なし
溶接速度 (mm/min)	300
ワイヤ供給速度 (")	450
ワイヤ径 (mm)	0.8
ビード重なり率 (%)	0

表4 実験材料

溶接材料	化学成分								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	V
ワイヤ DIN8555 X25CrMo5-4 (愛知産業・GS-3)	0.25	0.5	0.7	-	-	5.0	4.0	0.6	-
母材 SKD61 (JIS)	0.40	1.0	0.4	0.03	0.02	5.2	1.3	-	1.0

隣接するビードとビードの間隔について, 既往の研究⁶⁾でビードの重なり具合と空隙率の関係を比較したところ, ビード幅を40%以上重ねた場合 (重なり率40%) およびビードを重ねずに並べた場合 (重なり率0%) に空隙率が低下し, 重なり率20%付近で空隙率が増加することが確認された (図4). これをもとに, 本研究ではビードの重なり率を0%に固定して実験を行った.

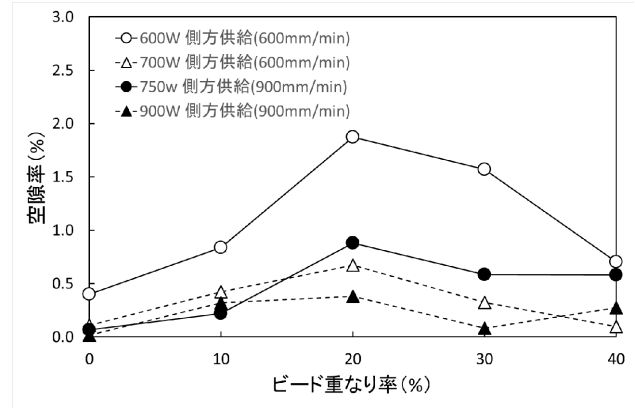


図4 ビードの重なり率と空隙率の関係

2・2 加工面の傾斜角および加工姿勢の影響と対策

既往の研究⁷⁾から, 傾斜面上に鉛直方向からクラッディング加工 (以下: 鉛直加工) を行った場合, 傾斜面上側のエネルギー密度が下側よりも高くなることから, 図5のように傾斜角が増加するほどビードの位置が照射位置の上側に移動することがわかっている. これにより, 図6のように積層ビードの形状不整が生じ, 融合不良面が多数生じて空隙率が増加する.

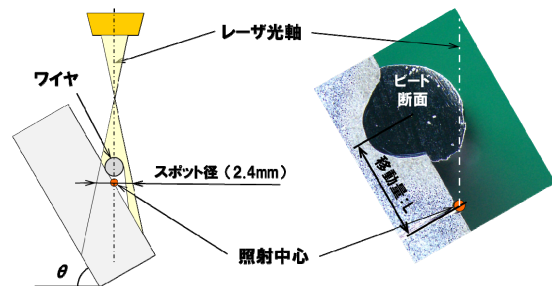


図5 レーザ照射位置とビード位置の関係

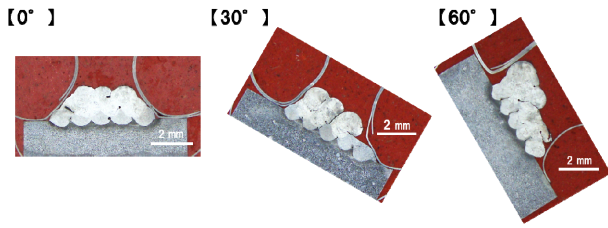


図6 傾斜面積層ビードの形状不整

筆者らはこれまで、ビード位置の移動量の分だけ加工経路を下方にオフセットさせるなど、鉛直加工の品質改善手法を提案してきた。本研究では、傾斜面の法線方向からの加工（以下：法線加工）を対象に加え、積層ビードの形状、溶込状態、空隙率を測定して鉛直加工との違いを比較した。図7に、それぞれの加工姿勢を示す。

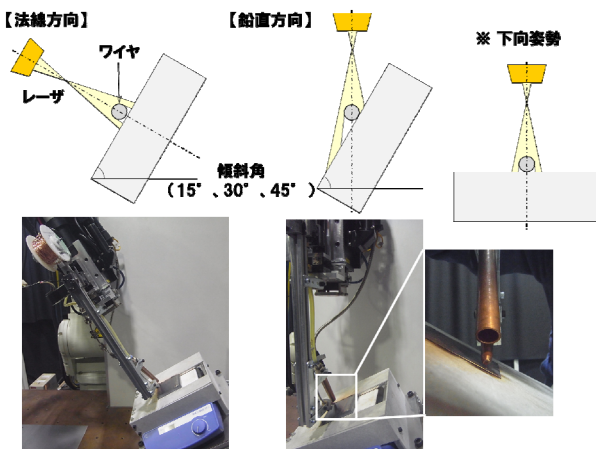


図7 傾斜面クラディングの加工姿勢

実験方法は、前項2-1と同様加工姿勢や傾斜角ごとの1パスビード断面の幅や深さを比較し、これを元に4層18パスの積層ビードを作製した。断面寸法の測定箇所と空隙率の測定範囲は前項と同じとした。実験条件は表5のとおりとし、評価試験装置と実験材料も前項と同様とした。

表5 実験条件（溶接姿勢・傾斜角の影響評価）

項目	比較条件
レーザ出力 (W)	500 - 1000 (100W 間隔)
加工姿勢	法線方向, 鉛直下向
試料傾斜角 (deg)	15, 30, 45
溶接速度 (mm/min)	300
ワイヤ供給速度 (")	450
ワイヤ径 (mm)	0.8
ビード重なり率 (%)	0
予熱・後熱	予熱: 623K + 後熱: 623K・1時間

3. 実験結果と考察

3・1 予熱・後熱の有無による影響と対策

予熱・後熱の有無によるビード断面寸法の違いについて、レーザ出力ごとの測定結果を図8（溶込深さ、ビード幅）、図9（熱影響深さ・熱影響幅）に示す。

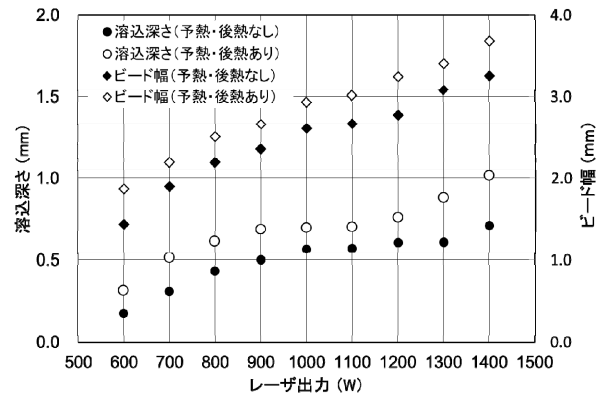


図8 予熱・後熱の有無とビード形状の関係（溶込深さ，ビード幅）

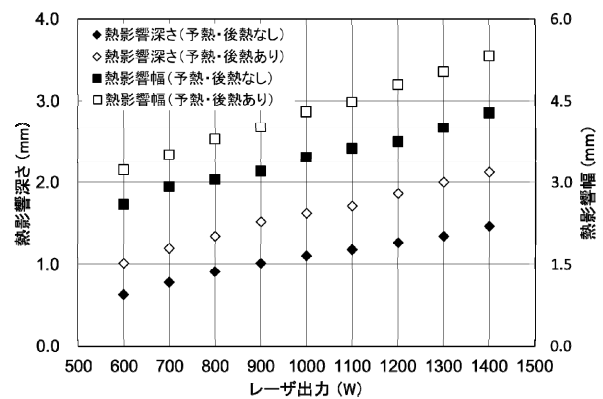


図9 予熱・後熱の有無とビード形状の関係（熱影響深さ，熱影響幅）

図8、図9のとおり、予熱・後熱なしの断面寸法は予熱・後熱ありと比べ、ビード幅13%、溶込深さ29%、熱影響深さ33%、熱影響幅20%減少し、深さ方向の減少率が幅方向と比べて増加した。

この原因について、レーザからの入熱は母材表面で吸収された熱エネルギーが、熱伝導により加工点から均等に拡散する。深さ方向の各点における熱量は、予熱の分とレーザからの熱伝導分の合計になるため、予熱分の熱量差に比例して溶込深さや熱影響深さが減少したと考えられる。これに対し、幅方向では熱量自体は深さ方向と変わらないが、ビード幅がレーザのスポット径で限定されるため、レーザ出力の増加に対してビード幅や熱影響幅が増加しにくくなる。これにより、予熱による深さ方向の減少率が幅方向と比べて増加したと考えられる。

次に、レーザ出力ごとの予熱・後熱の有無と空隙率の関係を、図10に示す。

図10のとおり、空隙率が0.1%以下となるレーザ出力は、予熱・後熱ありの場合700W以上、なしの場合1100W以上となり、空隙率を同等にするには50%以上のレーザ出力増加が必要となった。

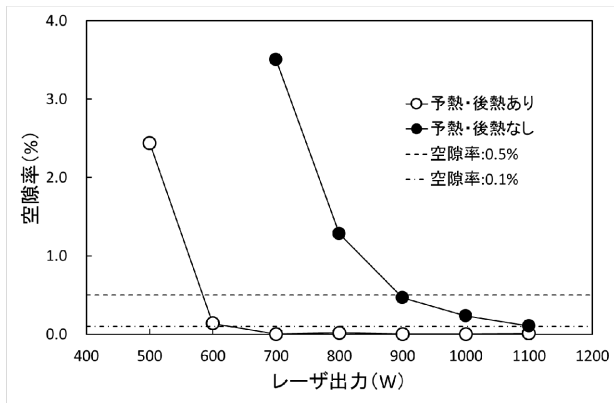


図 10 予熱・後熟の有無と空隙率の関係

これをもとに、空隙率 0.1%が得られた予熱・後熟ありの 700W と予熱・後熟なしの 1100W で、断面の硬さ分布や断面組織を比較した。図 11 と図 12 に硬さ分布を、図 13 と図 14 に硬さの測定位置をそれぞれ示す。

最終層ビードの上端(A)と下端(B)から硬さを測定したところ、図 11、図 12 のとおり溶融部には有意な違いは見られなかったが、熱影響部では予熱・後熟ありの場合溶融部直下で約 680HV まで硬化した後、母材の直前で 400HV 以下まで徐々に軟化することが確認された。これに対し、予熱・後熟なしでは溶融部直下の顕著な硬化は見られなかった。

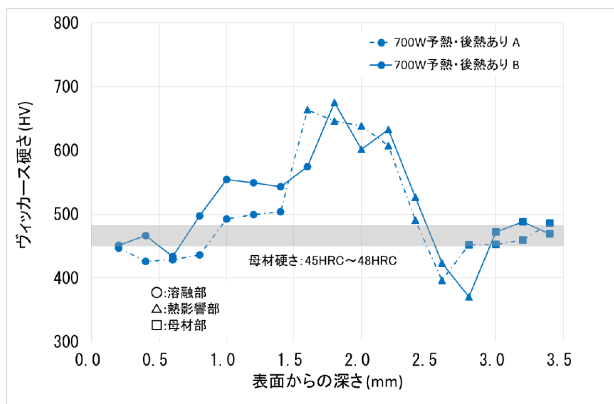


図 11 積層ビードの硬さ分布 (予熱・後熟あり, 700W)

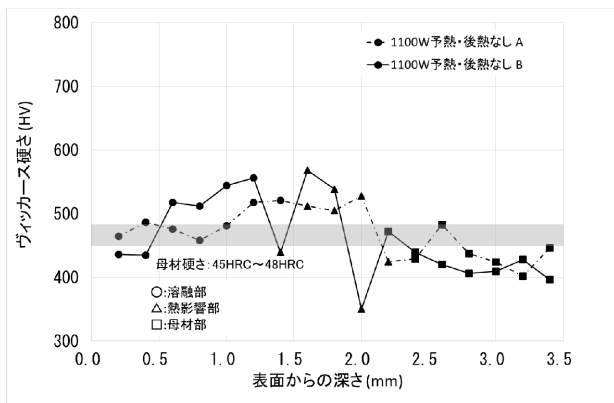


図 12 積層ビードの硬さ分布 (予熱・後熟なし, 1100W)

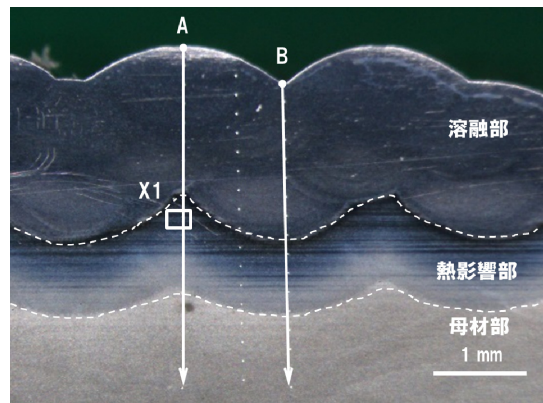


図 13 積層ビードの硬さ測定位置 (予熱・後熟あり, 700W)

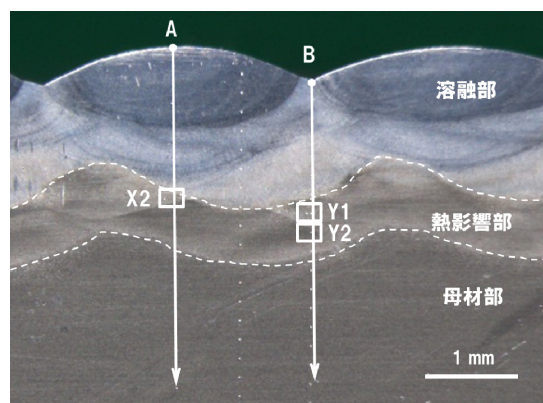


図 14 積層ビードの硬さ測定位置 (予熱・後熟なし, 1100W)

この原因について、図 15 に溶融部直下の材料組織 X1 (646HV) と X2 (512HV) をそれぞれ示す。

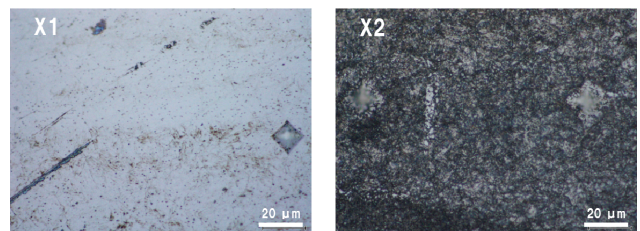


図 15 溶融部直下の材料組織の比較

図 15 のとおり、X1 では母材の焼戻組織を腐食した際に黒色化する⁸⁾パーライト組織が無くなり、また結晶境界に無数の粒状炭化物が析出し、母材と異なる組織に変化した。これに対し、X2 では母材とほぼ同様の組織が確認され、これにより両者の硬さに違いが生じたと考えられる。

次に、測定箇所による硬さの違いを確認したところ、予熱・後熟ありでは溶融部・熱影響部とも有意な違いは見られなかったが、予熱・後熟なしでは測定箇所 B の熱影響部のみ溶融部直下に約 130HV 軟化する部分が見られ、熱影響部の中で硬さが不均質になることが確認された。

この原因について、図 16 に軟化部 Y1 (439HV) と軟化が見られなかった部分 Y2 (568HV) の材料組織を示す。

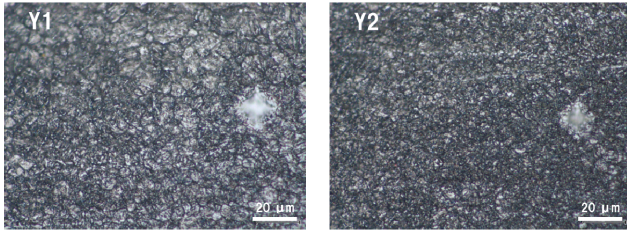


図 16 軟化部と非軟化部の材料組織比較

図 16 のとおり、軟化部 Y1 では Y2 と比べ結晶粒の粗大化など、焼鈍と見られる材料組織の変化が確認され、これにより局所的な軟化部が生じたと考えられる。

軟化部が生じた原因について、熱影響部内の発生箇所を調べたところ、図 17 のように 2 層目以降の熱影響部境界付近に発生していることが確認された。

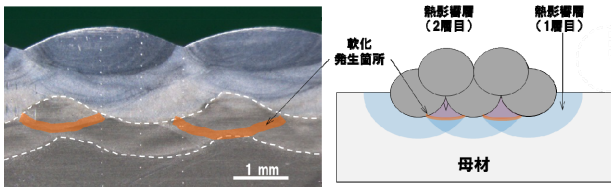


図 17 熱影響層の軟化部発生箇所

これについて、予熱・後熱なしの場合熱影響部が常に常温付近まで冷却されるため、ビード 1 層目で焼鈍などの組織変化が生じなかった部分が 2 層目以降の入熱で変化し、熱影響を上げずる形で局所的な軟化部が生じたと考えられる。これに対し予熱・後熱ありの場合、ビード 1 層目で形成された熱影響部が常にマルテンサイト変態温度以上に保持されるため、2 層目以降の熱影響が相対的に低下し、局所的な組織変化が生じなかったと考えられる。

3・2 加工面の傾斜角および加工姿勢の影響と対策

傾斜角ごとのビード断面形状について、図 18 に鉛直加工と法線加工のビード幅の比較を示す。

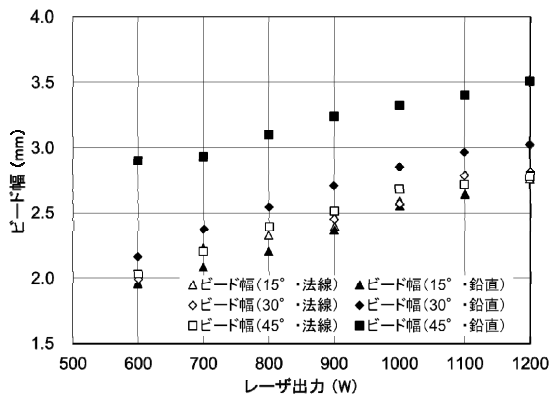


図 18 傾斜角・加工姿勢とビード幅の関係

図 18 のとおり、鉛直加工では傾斜角の増加と共にビード幅も拡大し、傾斜角 15°~45°の間で平均 35%増加した。

これに対し、法線加工では傾斜角によるビード幅の増加が確認されなかった。この原因について、図 19 のとおり法線加工の加工点スポット径は傾斜角に影響されず下向姿勢と等しいのに対し、鉛直加工では表 6 のとおり傾斜角の増加とともに照射範囲も拡大する。鉛直加工の照射範囲は、傾斜角 45°で法線加工の 1.42 倍に増加しており、これによりビード幅も拡大したと考えられる。

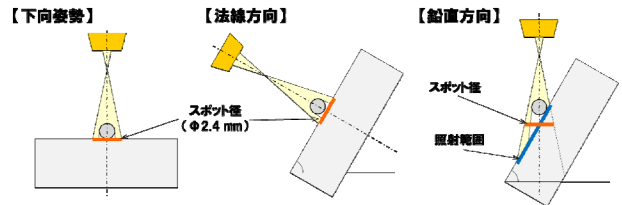


図 19 レーザ照射範囲と加工点スポット径の関係

表 6 傾斜角ごとのレーザ照射範囲の比較

傾斜角 (deg)	スポット径 (mm)	レーザ照射面積 (mm ²)		
		下向姿勢	法線加工	鉛直加工
0			4.52	4.52
15			4.68	4.68
30	2.4	4.52	4.52	5.23
45			6.41	9.10
60			9.10	18.0
75			18.0	3.98

このときの積層ビードは、図 20 のとおり法線加工では外観・断面形状ともに下向姿勢に近い形状が得られたのに対し、鉛直加工では図 21 のとおり傾斜に沿ったビードの下垂や融合不良箇所が増加し、外観品質も低下した。

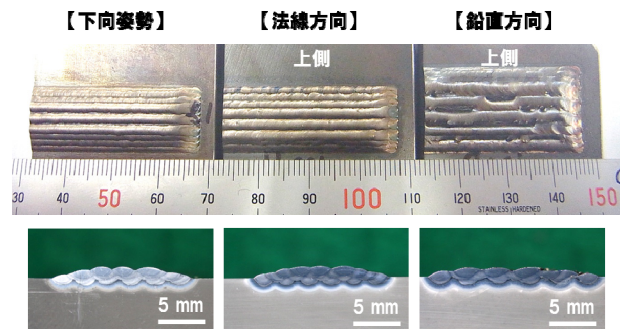


図 20 積層ビードの形状比較 (900W, 45°)

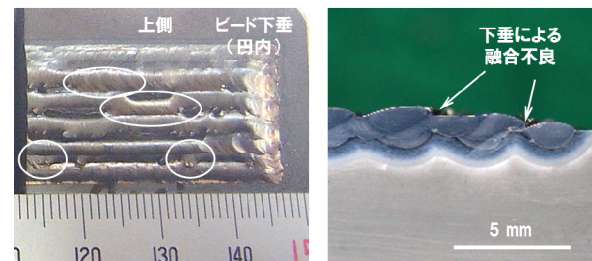


図 21 ビードの下垂 (鉛直加工, 900W, 45°)

次に、傾斜角と空隙率の関係について、図 22 と図 23 に法線加工と鉛直加工の測定結果を、表 7 に空隙率 0.1% 以下となるレーザー出力をそれぞれ示す。

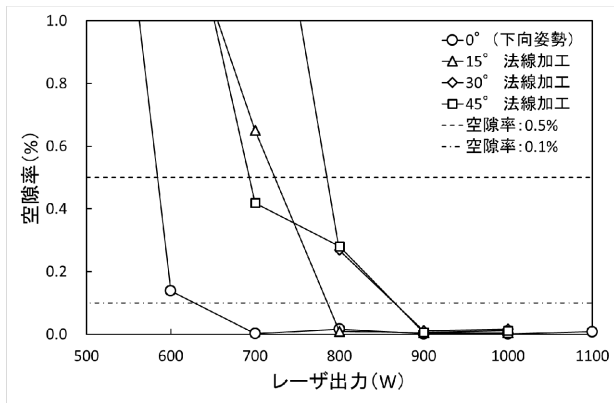


図 22 加工面傾斜角と空隙率の関係（法線加工）

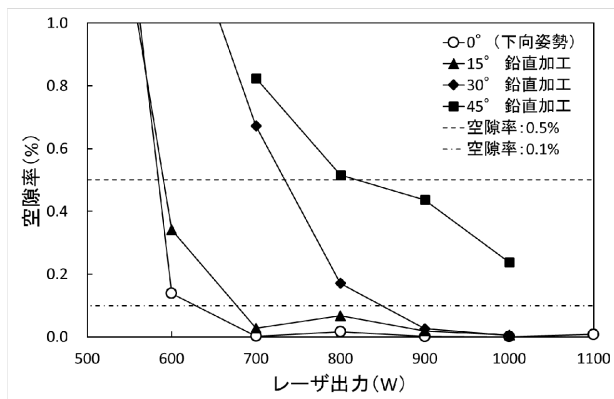


図 23 加工面傾斜角と空隙率の関係（鉛直加工）

表 7 空隙率 0.1%となるレーザー出力

傾斜角 (deg)	レーザー出力 (W)	
	鉛直加工	法線加工
0	700	700
15	700	800
30	900	900
45	Failure	900

図 22, 図 23 のとおり, 傾斜面での空隙率は法線加工・鉛直加工ともに下向姿勢より増加し, 表 7 のとおり空隙率 0.1%以下とするのに必要なレーザー出力は下向姿勢の 700W から 15~30%増加した. また, 鉛直加工では空隙率 0.1%以下となるレーザー出力が傾斜角 30°で 900W, 傾斜角 45°では 0.1%に達しなかったのに対し, 法線加工では傾斜角 15°と 30°で 800W, 傾斜角 45°で 900W となり, 鉛直加工では法線加工よりも高出力のレーザー照射が必要となることを確認した.

4. 結言

本研究では, ワイヤ供給式レーザークラディング加工を金型の溶接補修に適用するため, SKD61 によるクラディング加工時の予熱・後熱の有無, 加工面の傾斜角, 加工姿勢による加工品質への影響を比較し, 加工品質の平準化に必要となる以下の知見が得られた.

- (1) 予熱・後熱の有無によるビード品質への影響について, 予熱・後熱なしの場合, ビードの幅方向で 13~20%, 深さ方向で約 30%減少し, 空隙率を同等にするために 50%以上のレーザー出力増加が必要なことを確認した.
- (2) 予熱・後熱の有無による材料組織と硬さ分布への影響について, 予熱・後熱ありでは熱影響部の焼戻組織の消失や粒状炭化物の析出により, 硬さが最大約 680HV まで増加した. これに対し, 予熱・後熱なしでは硬さの増加は確認されなかったが, 熱影響部の中に軟化部が生じ組織が不均質になることを確認した.
- (3) 傾斜面にビードを積層した場合, 同程度の空隙率まで低下させるのに, 下向姿勢と比べて入熱量を 15~30%増加させる必要があることを確認した. また, 法線加工では傾斜角によるビード形状の変化が少ないのに対し, 鉛直加工では傾斜角の増加とともにビード幅の拡大や溶融部の下垂が生じ, 空隙率を同等にするレーザー出力も法線加工と比べて増加した.
- (4) (1)~(3)から, ワイヤ供給レーザークラディングにおける加工品質の平準化には, ①予熱・後熱の有無で適切なレーザー出力に調整する, ②ポジション等で下向姿勢の範囲を広げる, ③傾斜角と加工姿勢に応じてレーザー出力を 15~30%増加させる, ④傾斜面では最大限法線加工を採用することが必要と考えられる.

謝 辞

本研究は, 公益財団法人天田財団の平成 27 年度一般研究開発助成 (AF-2015219) を受けて実施しました. また, 使用したファイバーレーザー加工溶接装置・実体顕微鏡・金属顕微鏡は独立行政法人科学技術振興機構の地域産学官共同研究拠点整備事業により, X 線 CT システムは経済産業省北海道地域イノベーション創出協働体形成事業により整備されました. ここに深く感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 坪田秀峰・石出孝・渡辺眞生・赤羽崇: 三菱重工技報, 42-2 (2005), 86-89.
- 2) 櫻庭洋平・鈴木逸人・安田星季・戸羽篤也: 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.316(2017), 60-64.
- 3) (社) 日本熱処理技術協会: 熱処理ガイドブック, (2013), 202-219.
- 4) 日原政彦・鈴木裕: 機械構造用鋼・工具鋼大全, 日刊工業新聞社・技術大全シリーズ, (2017), 293-302.
- 5) (財) 素材センター: 金型技術シリーズ 2 ダイカスト金型, (2001), 278-283.
- 6) 櫻庭洋平・鈴木逸人・安田星季・戸羽篤也: 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.316(2017), 64.
- 7) 櫻庭洋平・鈴木逸人・安田星季・戸羽篤也: 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.316(2017), 65-67.
- 8) 材料技術教育研究会: 金属組織の現出と試料作製の基本, 大河出版, (2015), 74-75.