

ワイヤ供給レーザークラディングにおける加工姿勢の影響

櫻庭 洋平, 鈴木 逸人, 安田 星季, 戸羽 篤也

Influence of the Processing Posture in Wire Supply Laser Cladding

Yohei SAKURABA, Hayato SUZUKI, Seiki YASUDA, Atsuya TOBA

抄 録

レーザークラディング加工は、プラズマ粉体肉盛など他のクラディング技術と比べ入熱量が少ないため、高品質な表面改質が可能となる。また、加工時にワイヤ状の溶加材を使用することで、粉末材料よりも溶加材を安定供給することができる。

本研究では、ワイヤ供給方式によるレーザークラディング加工の優位性に着目し、金型など複雑な起伏を有する製品への適用可能性について検討した。実験では炭素鋼の平板上にステンレス製ワイヤの供給方向や加工面の角度を変えたクラディング加工を行い、加工姿勢がビード内の空隙率や溶込状態に及ぼす影響を把握し、その改善方法を見出した。

キーワード：レーザークラディング，積層ビード，ワイヤ供給方向，傾斜角，空隙率

Abstract

Laser cladding process can make high-quality surface modification, rather than the other cladding method such as powder plasma cladding process, by supplying smaller heat input. And when we use wire-shaped filler material in case of cladding process, we can get the stable supply of filler material rather than powder-shaped material.

In this study, we focused the superiority of wire supply laser cladding and confirming the possibility to use the products having the complicated ups and downs such as the die. We experimented the cladding test on the flat plate of carbon steel, changed to the supply direction of stainless steel wire and the inclination angle of processing surface, and investigated the influence to porosity rate and penetration of laminated bead, and found the improvement method.

KEY-WORDS : Laser Cladding, Laminated Bead, Wire Supply Direction, Inclination Angle, Porosity Rate

1. はじめに

機械部品の冶金的接合法には、溶接、ろう付など部品同士を接合する方法や、めっき、クラディング加工など母材の表面に溶加材を被覆させる方法がある。

レーザークラディング加工は、被覆層の肉厚がめっき処理や溶射よりも厚く結合力も大きい、プラズマ粉体肉盛より微細かつ入熱量が少ない、母材の溶融時間が短いなどの品質面や作業性の優位性がある。このため、熱ひずみや組織変化など熱影響の低減や、加工時間の短縮が期待される。

レーザークラディングの溶加材には、一般的に材料組成の

調整が容易な粉体供給式が使用される。しかし、材料粉末を混合したシールドガス（以下キャリアガス）を用いるため、金型の部分肉盛など複雑な起伏を有する製品にはガス流が乱れて使用できない。

これに対し、ワイヤ供給式のレーザークラディングでは、ワイヤ状の溶加材をモータ等の機械的動力で加工点に送るため、製品形状の影響を受けず安定した材料供給が可能となるなどの優位性がある。しかし、ワイヤ供給式では加工の向きとワイヤの位置関係により溶込状態や空隙の発生量が変わるなど、ビード品質への影響（以下異方性）が生じることが予想され、実用化には異方性の影響と対策について事前に検

事業名：経常研究

課題名：線材供給によるレーザークラディング技術の研究

討する必要がある。

そこで本研究では、ワイヤ供給式レーザークラディング加工を金型など複雑な起伏を有する製品の補修や部分強化などに適用する可能性を探るため、溶接性の良好な炭素鋼とステンレス溶加材によるクラディング加工実験を行い、ワイヤの供給方向や加工面の傾斜角によるビード品質の異方性を評価した。また、異方性対策の基礎実験として、異方性の原因推定をもとに改良した加工条件で確認実験を行い、改善の要点について検討した。

2. レーザクラディング加工

2.1 レーザクラディング加工の概要

レーザークラディング加工は、エネルギー密度の高いレーザー光で母材を溶融させ、そこに溶加材を供給して表面を被覆する肉盛り加工法である。特長として、めっき処理や溶射など母材の溶融を伴わない物理的な結合と比べ、母材と溶加材の融合により結合力の大きい肉厚な被覆層が得られる。

クラディング加工では母材の溶融を伴うため、熱ひずみや熱影響部の組織変化が生じる。しかし、レーザーを熱源とすることで、加工点の熱エネルギー密度をプラズマ放電などの数百倍に高められ、必要最小限の範囲に入熱を集中させることができる。このため、金型表面の補修再生やエンジンバルブのシール部など、熱影響部の精度が要求される製品で、高品質かつひずみの少ない肉盛り加工が可能となる。

2.2 溶加材供給方式の相違点

レーザークラディングの溶加材には、粉体状かワイヤ状のものが使用される。粉体供給式¹⁾は、溶融池にキャリアガスを供給し、溶融池と粉末を融合させる方法であり、粉末の配合比を変えることで異種材料接合や傾斜組成が可能のため、近年ではレーザークラディングの代表的手法となっている。

しかし、粉体供給式は、金型の凹凸など起伏の大きい場所ではキャリアガスが乱れ、入熱量と溶加材のバランスが崩れてビード品質が低下する。

これに対し、ワイヤ供給式は加工ヘッドに設けたワイヤ供給機構からモータなどにより溶加材が供給されるため、製品の起伏などの影響は生じない。また、溶加材の予熱が可能のため、入熱条件の細かな制御による品質面における優位性を有する²⁾が、材料組成の調整がワイヤの種類で限定される。

次に、加工品質の相違点として、粉体供給式は溶加材がレーザー光軸の外周からほぼ均等に供給されるため、レーザーを前後左右どの方向に走査させてもビード品質に異方性は生じない。これに対しワイヤ供給式の場合、溶加材をレーザーの同軸上に配置できないため、レーザーとワイヤの配置が一定の場合、走査方向に対し全ての方向からワイヤが供給される(図1)。溶融池の形状は走査方向に対し縦横比が大きく、深さも場所

ごとで異なるため³⁾、レーザー出力やワイヤ供給速度が同じでもワイヤの供給方向で溶込状態が変化し、空隙や融合不良など異方性の原因となる(図2)。

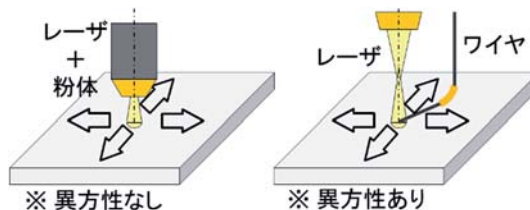


図1 走査方向とワイヤ供給方向の関係

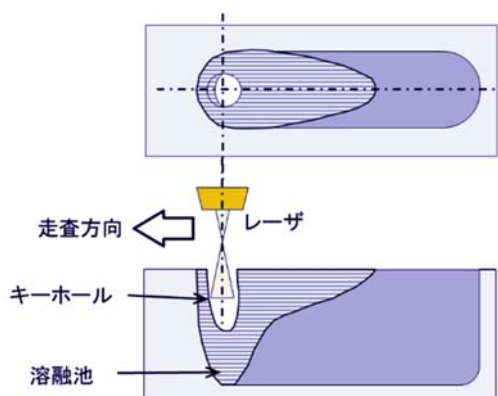


図2 レーザ溶接時の溶融池形状

2.3 ワイヤ供給方向の影響

ワイヤ供給方向に起因する異方性については、加工ヘッドの回転やポジション等による加工対象の回転により、最良品質が得られる加工条件(以下適正条件)を維持する方法が考えられる。しかし、金型など複雑な起伏を有する製品では、設備の大型化や予熱装置との接続性などの理由から対応が難しい。また、加工ヘッドを回転させる方法は、加工ヘッドに可とう性が乏しいレーザー伝送ファイバが接続されるため、360°任意の回転は構造上困難である。このため、ワイヤ供給方向による異方性の定量的な把握と対策が必要となる。

2.4 加工面の傾斜角の影響

金型など起伏の多い製品では、傾斜面への肉盛り加工が多くなる。傾斜面ではレーザー光が斜めから入射するため、熱エネルギーの分布が均一ではなくなり、垂直方向からレーザー照射した場合と溶融池やビード形状が変化する。また、溶融池や溶加材が傾斜面の下方に流れるため、ビード形状の安定化が難しい。このため、前述のとおりポジションが使用できない状況では、傾斜角による異方性の対策が必要となる。

3. 実験方法

3.1 ワイヤ供給方向の影響比較

ワイヤ供給方向について、実用段階では加工面の曲率など

に応じてワイヤ供給方向を連続的に変更するため、ビード進行方向に対して360°あらゆる方向について、ビード品質の異方性やワイヤ供給方向の限界角度を把握する必要がある。

本稿では、肉盛り加工部の品質へのワイヤ供給方向の影響を把握するため、レーザ走査方向の前方、90°側方、後方からワイヤを供給して積層ビードを作製し、積層の可否や空隙の発生傾向を比較した(図3)。その後、これらの溶込状態などから空隙率変化の原因を推定し、改良した加工条件で試験片を製作し、その効果を確認した。

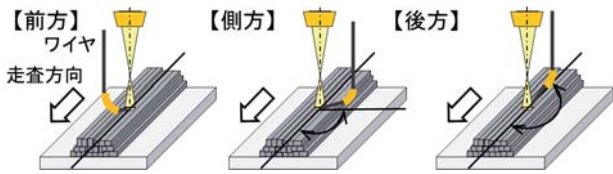


図3 ワイヤ供給方向

実験は、表1に示す条件でレーザ出力やワイヤ供給速度を変えたビードを1パス作製し、ビード断面の幅と高さ、溶込幅と溶込深さを測定して、積層に最低限必要なレーザ出力(以下最小出力)やレーザ出力ごとのビード間隔を、ワイヤ供給方向ごとに評価した(図4)。

表1 実験条件

材料(母材)	
材質(-)	SS400
寸法(mm)	80x80x10
材料(ワイヤ)	
材質(-)	SUS308
直径(mm)	0.6
レーザ	
種類(-)	Ytterbiumファイバーレーザ
波長(nm)	1070
集光レンズ(-)	F150
走査速度(mm/min)	300
焦点径(mm)	1.5
出力(W)	400 - 900
加工条件	
ワイヤ供給速度(mm/min)	600,900

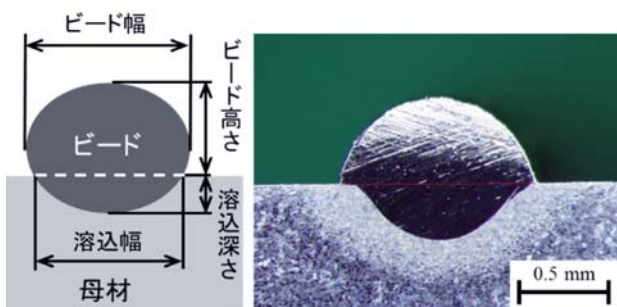


図4 断面寸法の測定箇所

次に、最小出力以上のレーザ出力で3層12パス、全長70mmの積層ビードを作製し(図5)、加工条件ごとの積層可否を確認した。また、ビードに含まれる空隙の体積や形状をX線CT装置(以下CT装置)で測定し、空隙率の比較や積層の良否判別に使用した。

実験装置はIPG Photonics製Ytterbiumファイバーレーザ: YLS-2000を使用し、レーザ加工機に図6のワイヤ供給機構を設置してワイヤを供給した。

レーザ出力は、ワイヤ供給速度600mm/minでは300~800W、900mm/minでは400~900Wとし、それぞれ50W間隔で設定した。また、レーザの照射位置は、隣接するビード同士が重なる谷の部分(以下ビードの谷間)を照射の中心とし、この点を中心に焦点の直径が1.5mmになるよう光学系を配置した(図7)。

空隙率の測定には島津製作所製CT装置: inspeXio225を使用し、積層ビードの長さ30mmに含まれる $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 以上の空隙を検出し、ビードの体積から空隙率を算出した。

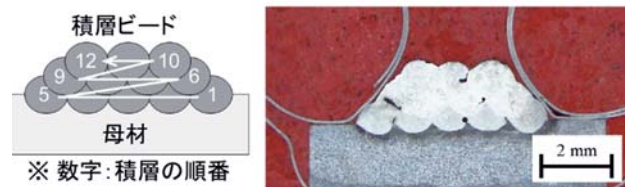


図5 ビードの積層状態



図6 ワイヤ供給機構

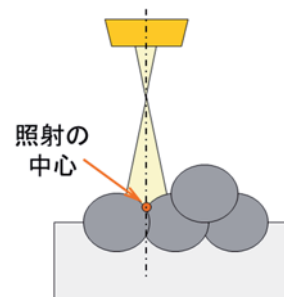


図7 積層ビードへのレーザ照射位置

ビードの積層可否の判別は、ワイヤが熔融池から外れる、母材とワイヤが溶着して加工が継続不能になるなどの不具合が、同じ加工条件で12パス積層するまでに3回連続で発生し

た場合を積層不能とした。また、12パス積層できたビードについても、CT測定時に表面から内部まで連続した融合不良(図8)が全域で観察されたものは不良ビードと判別し、それ以外のビードを良好と判別した。

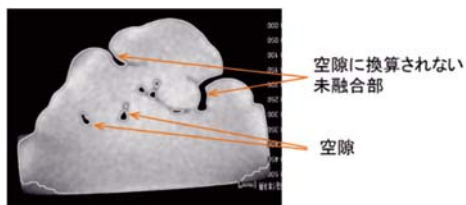


図8 ビード表面と繋がった融合不良部

3.2 傾斜角の影響比較

傾斜角の影響を比較するため、平板を水平方向に対して15°, 30°, 45°, 60°に傾けて設置し(図9)、ワイヤ前方供給でビードを積層し、肉盛加工の可否やビードの断面形状、空隙率の違いを比較した。その後、空隙率を低減する加工条件を確認した。

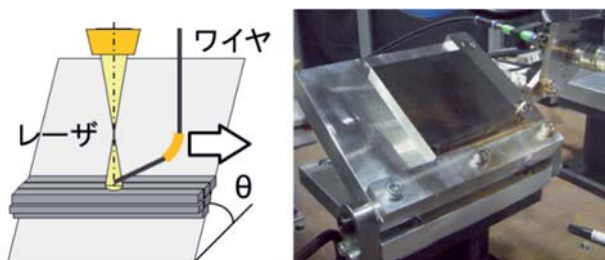


図9 傾斜面へのビード積層

実験は、前項と同様に1パスビードの断面形状から傾斜角ごとに最小出力と積層ピッチを求め、3層12パスの積層ビードの空隙率を測定し、その後改良を加えた加工条件の空隙率低減効果を確認した。

傾斜角以外の実験条件は表1のとおりとし、実験装置やレーザーの照射位置、測定項目については、ワイヤ供給方向の実験と同じ条件で行った。

なお、傾斜面の断面形状は、図4と同様平置きした状態で測定した。また、積層時のビード間隔も、傾斜面に沿って並行移動させた距離とした。

4. 結果と考察

4.1 ワイヤ供給方向の影響比較

4.1.1 1パスビードの形状

図10と図11に、ワイヤ供給方向ごとのレーザー出力とビード幅及び溶込幅の関係を示す。ワイヤを後方から供給した条件では、レーザー出力や供給速度に関わらず、レーザー照射の直後にワイヤが溶融池の後端と溶着し、ビードの形成が不能となった。

ビード幅は、いずれのワイヤの供給方向や供給速度でも、レーザー出力の増加とともに直線的に増加したが、溶込幅は400W未満の低出力域ではビード幅の1/2~1/5と小さく、400W以上になるとビード幅とほぼ同じ幅まで増加した。

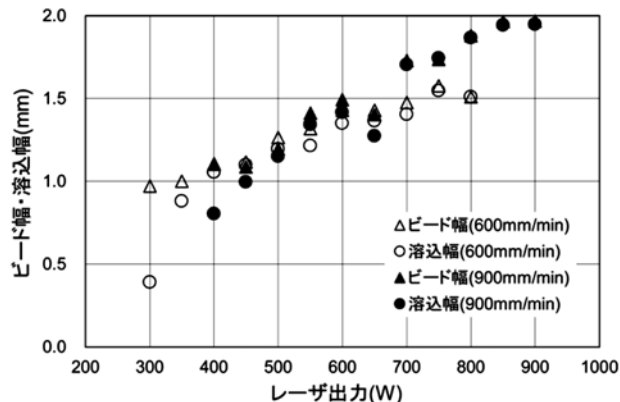


図10 レーザ出力とビード幅・溶込幅の関係(前方供給)

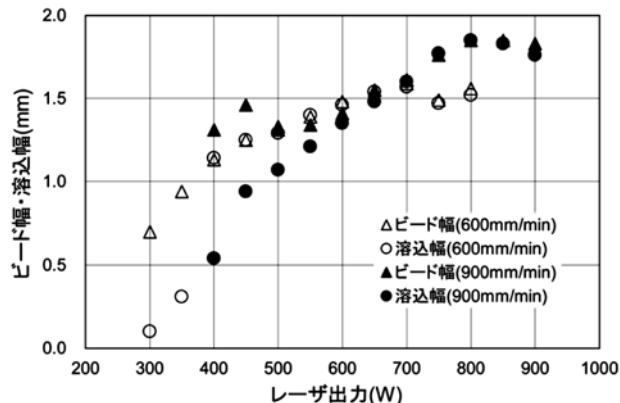


図11 レーザ出力とビード幅・溶込幅の関係(側方供給)

図12のように、溶込量が不足してビード幅が溶込幅より大きくなる場合、ビードの間隔をビード幅と等しく密に並べても消せないすき間が残る。このすき間を残さないためには、最低でもビード幅と溶込幅が等しくなるだけのレーザー出力が必要となる。

しかし、実際の加工ではレーザー出力を高めても溶融して流れたワイヤでビード両端に未融合界面が残る場合が確認され、レーザー出力だけで確実にビード幅と溶込幅を完全に同じくすることはできなかった(図13)。

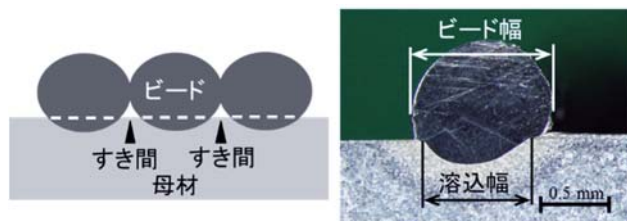


図12 ビード幅過大時の積層状態

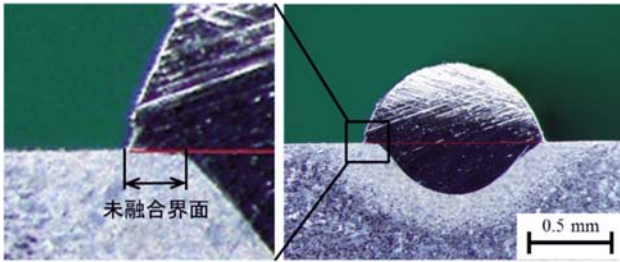


図13 ビード端部の未融合界面

このため本稿では、溶込幅がビード幅の90%以上となった時点のレーザー出力を最小出力とし、積層時に溶込幅の10%分ビードを重ね、先行ビードの未融合界面周辺を再び溶融させることで、未融合界面を消すこととした。表2に、加工条件ごとの最小出力を示す。なお、前方供給と側方供給とで最小出力が異なる場合、同じレーザー出力でビード品質を比較するため、レーザー出力が大きい方を最小出力として採用した。

表2 加工条件ごとの最小出力

ワイヤ供給速度 (mm/min)	最小出力(W)		採用値
	前方供給	側方供給	
600	400	400	400
900	450	600	600

4.1.2 ワイヤ後方供給の溶着原因

ワイヤの後方供給時のみ母材とワイヤが溶着する原因について、ワイヤ供給式では母材とワイヤが溶融池を介して接触するため、両者の間には溶融池の粘性以外の力は発生しない。しかし、実際の加工では前方供給や側方供給でも母材がワイヤに押されており、全てのワイヤ供給方向で母材とワイヤの溶着が生じていたと考えられる。

これをもとにワイヤの溶着挙動を推定すると、図14のとおり前方供給ではワイヤがレーザー中心より前方で溶着するため、一時的に溶着しても直後にレーザーが溶着部に近づいて来るため再溶融されやすい。また、側方供給もワイヤの約半分はレーザーの中心より前方にあるため、前方供給より少ないがワイヤの温度が上昇する可能性があり、溶着後に再溶融したと考えられる。

これに対し後方供給の場合、溶着する場所が常にレーザーの後方になるため、一度溶着するとワイヤの温度が上昇する要素がなく、溶着部の再溶融は起こらなかったと考えられる。

なお、レーザー走査方向に対し90°~270°の範囲では、ワイヤ溶着後にレーザーが離れる側に動くため、180°後方以外でも溶着の発生が予想される。このため、斜め後方からのワイヤ供給で限界角度を拡大するには、レーザー中心より前方寄りの位置を狙ってワイヤを供給するなど、ワイヤ供給機構を改良する必要があると考えられる。

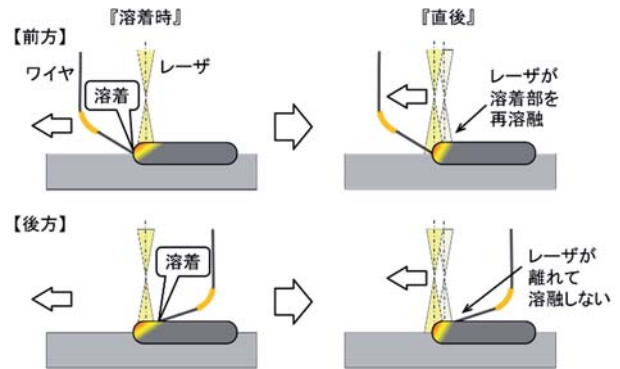


図14 ワイヤ溶着挙動の対比モデル

4.1.3 積層ビードの空隙率比較

4.1.1項の最小出力を含む、数種類のレーザー出力で積層ビードを作製し、積層の可否や融合状態の確認による良否判別を行った(表3)。

表3 積層ビードの品質確認

ワイヤ供給速度 (mm/min)	レーザー出力(W)	積層可否	
		前方供給	側方供給
600	400	△	×
	500	○	△
	600	○	○
	700	○	○
	800	—	○
900	600	○	×
	750	○	○
	900	○	○

凡例 ○:積層可能 △:不良ビード(融合不良多発) ×:積層不能

表3のとおり、最小出力では積層不能や不良ビードが発生し良好な積層ビードが得られないため、レーザー出力を最小出力より20~30%高めることで良好な積層ビードが得られた。また、前方供給で良好な積層ビードが得られても、同条件の側方供給では不良ビードとなる場合が確認された。なお、空隙の発生箇所はビードとビードの境界周辺に集中しており、ビード内部の空隙はCT測定では確認されなかった。

次に、良好な積層ビードの空隙率を測定し、ワイヤ供給方向と空隙率の関係と比較した(図15)。

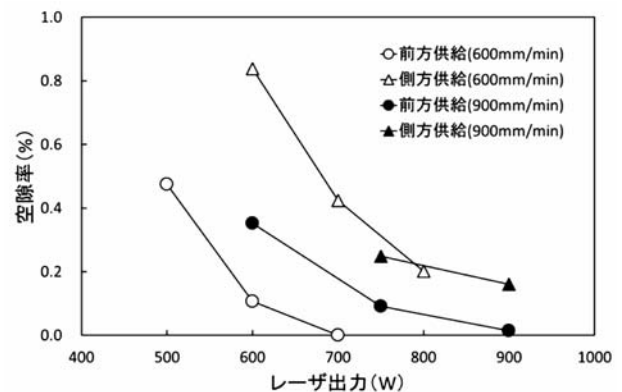


図15 レーザ出力と空隙率の関係

その結果、積層ビードの空隙率は全ての条件でレーザー出力の増加とともに減少し、ワイヤ前方供給では600W-600mm/min、750W-900mm/minで空隙率約0.1%、700W-600mm/min、900W-900mm/minではほぼ0%に低減された。これに対し、ワイヤ側方供給の空隙率は前方供給よりも多くなり、前方供給で空隙率約0.1%が得られたときのレーザー出力を20~30%増加させても、約0.2%の空隙が残った。

側方供給の空隙率が多くなった原因について、側方供給のビード両端の未融合部の幅が小刻みに変動する、レーザー出力が同じ場合に側方供給の溶込が浅くなるなど、ビード形状の違いが確認されたが、空隙率の増加と直結する挙動は確認されず、今後の課題として残った。

4.1.4 側方供給の空隙率低減

側方供給の空隙率低下について、図15のとおりレーザー出力を高めることで欠陥周辺を広く囲って長時間溶融させることは、効果的な方法のひとつとなる。しかし、この方法は入熱量が増え溶融池が拡大するため、母材の希釈や材料組織の変化、熱ひずみの増大などが懸念され好ましい方法ではない。

そこで本研究では、側方供給の空隙率を前方供給と同等のレーザー出力で低下させる方法として、隣接するビード間の重なり率を最適化して空隙を減らす方法を検討した(図16)。

実験は、ビードの重ね幅が溶込幅の0~40%になるようビード間隔を変えて、このときの空隙率や溶込状態を比較した。

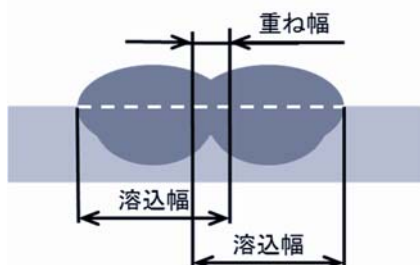


図16 隣接ビードの溶込幅と重ね幅の関係

その結果、図17のとおり空隙率は全てのレーザー出力やワイヤ供給速度において、重なり率0%~20%にかけて増加し、重なり率20%以降では減少に転じた。このため、ほぼ全ての加工条件で、重なり率0%のときに最小の空隙率となった。

この原因について、ビード断面の溶込状態を確認したところ、重なり率0%では図18のとおり、上層ビードの溶融領域が2つ下の層まで達していた(▲部)。しかし、重なり率20%以上では溶融領域が2層下まで到達せず、隣接ビードの境界が残されていた。また、重なり率が高くなるほど、隣接ビードどうしの融合範囲が拡大していた。

前述のとおり、空隙がビードの境界に集中することから、空隙率の低下には、ビードを重ねる際に境界周辺を再溶融させ、残った空隙を除去する方法が効果的と考えられる。図18

のとおり、重なり率が高いほど上層ビードの溶融領域が下層に届かなくなるため、重なり率20%では上層ビードからの再溶融が起こらず、また重なり率40%と比べ隣接ビード同士の融合範囲も少ないため、効果的に空隙を除去できなかったと考えられる。

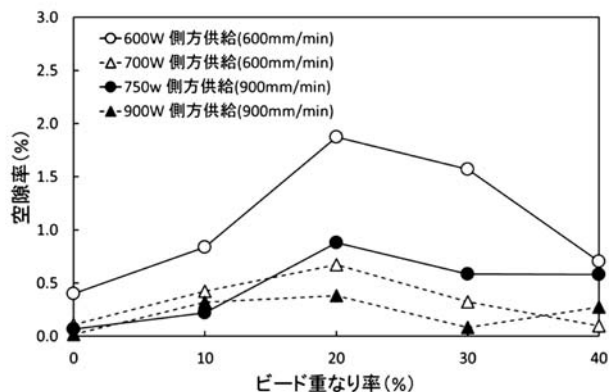


図17 ビードの重なり率と空隙率の関係(側方供給)

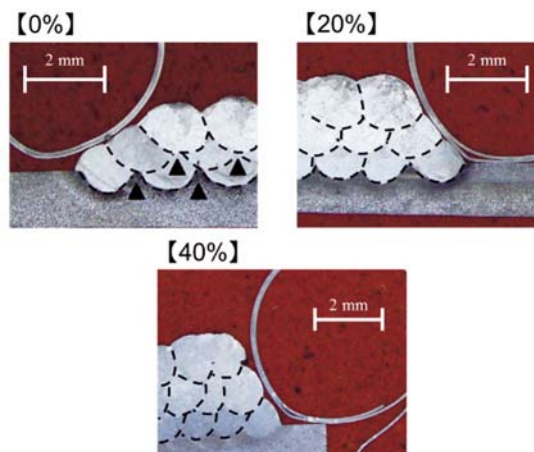


図18 ビードの重なり率と空隙率の関係

4.2 加工面の傾斜角

4.2.1 1パスビードの形状

傾斜面上でのビードの形状について、図19と図20に傾斜角と溶込幅の関係を、図21に断面形状をそれぞれ示す。

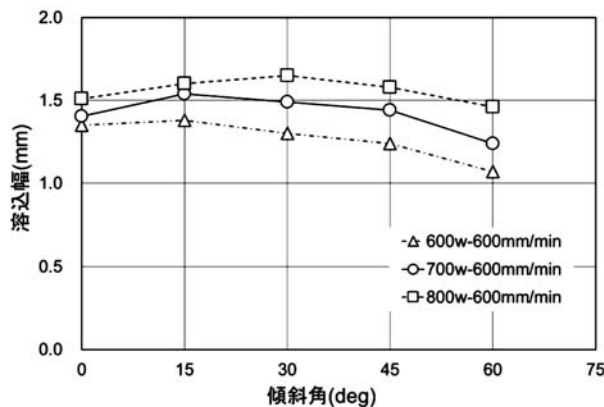


図19 傾斜角と溶込幅の関係(ワイヤ600mm/min)

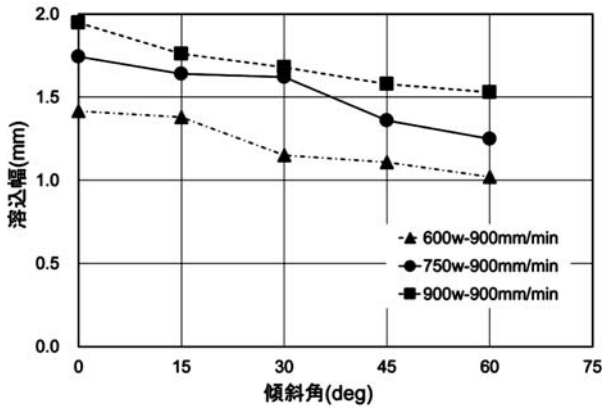


図20 傾斜角と溶込幅の関係 (ワイヤ900mm/min)

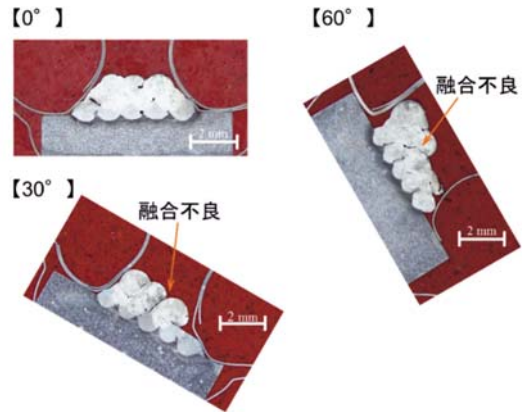


図22 傾斜面での積層ビード断面

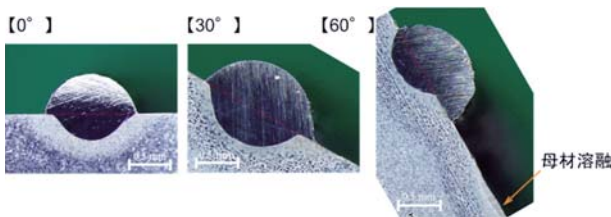


図21 傾斜面での断面形状比較

図19, 図20のとおり, 600W-600mm/minの0°~30°間で, 傾斜0°と比べ最大10%程度のビード幅増加が確認されたが, それ以外の加工条件では傾斜角の増加とともにビード幅が減少する傾向を示し, 傾斜0°と比べ5~25%の減少が確認された。また, 図21のとおり, ビード端部の未融合界面が傾斜0°ではビード両端にほぼ均等に発生したのに対し, 傾斜面では未融合界面がビードの下側に偏る傾向が確認された。

4.2.2 積層ビードの品質

4.2.1項で求めたビード形状をもとに, 傾斜面上に積層ビードを作製し, 傾斜0°で空隙率がほぼ0%となった700W-600mm/minと900W-900mm/minの条件で試験を行い, 断面状態や空隙率を評価した。

積層ビードの断面状態について, 図22のとおり傾斜角が増すほど, 傾斜方向の上側(以下上側)にビードが集中して形状が不定形となり, 700W-600mm/minの傾斜30°, 45°では溶融池からワイヤが脱落し積層自体が不能となった(図23)。また, ビード間の融合不良界面が, 傾斜0°では断面全体にほぼ均等に発生するのに対し, 傾斜面では傾斜方向の下側(以下下側)に集中して発生することが確認された。

次に空隙率について, ワイヤ600mm/minでは15°で約0.7%, 30°, 45°の積層不能など, 全ての角度で空隙率が増加した。

これに対しワイヤ900mm/minでは, 15°, 30°の低角度域では0°の空隙率とほぼ同等だが, 45°では0.25%, 60°では0.4%前後まで空隙率が増加した。

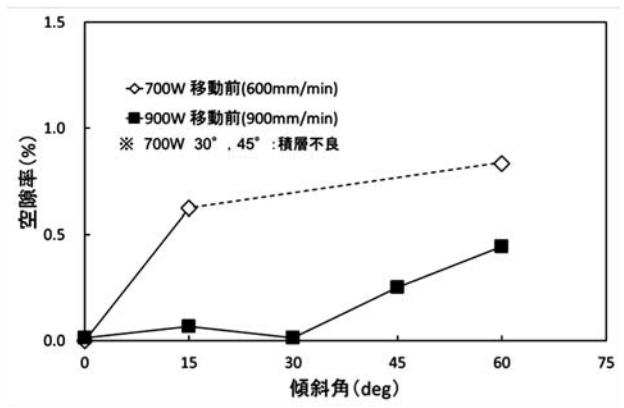


図23 傾斜角と空隙率の関係

4.2.3 ビード形状・空隙率変化の原因

加工面の傾斜により, 断面形状や融合不良の発生箇所に偏りが生じた原因について, 加工点周辺のエネルギー密度分布から原因推定を行った。

傾斜面へのレーザー照射では, 図24のとおり照射中心での焦点径がφ1.5mmとなるように, 加工ヘッドと照射中心の距離を調節している。焦点径は傾斜面上側では小さく, 下側では大きくなるため, 傾斜面上端と下端とでエネルギー密度に差が生じる。本研究で使用したレーザー光学系の場合, 上端と下端の理論上のエネルギー密度差は, 傾斜30°で約1.2倍, 傾斜60°で約1.7倍となる(表4)。

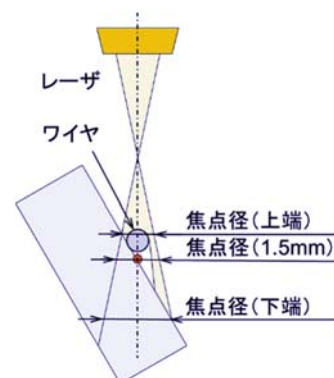


図24 傾斜面でのレーザー照射状況

表4 傾斜角とエネルギー密度の関係

傾斜角 (deg)	焦点径 (mm)	エネルギー密度比(理論値)			
		中心	上端	下端	上端/下端
0		1	1	1	1.00
15		1	1.04	0.96	1.08
30	1.5	1	1.09	0.92	1.18
45		1	1.15	0.86	1.34
60		1	1.27	0.76	1.67

ビードの積層時には、エネルギー密度の高い上側が先に溶融するため、溶けたワイヤが上側の溶融池に引っ張られる形で融合し、これによりビードが上側に偏ると考えられる。また、ビード下側の融合不良については、下側ではエネルギー密度が低いため、上側と比べ溶融の開始が遅れやすく、母材とワイヤが十分に融合しなかったものと考えられる。

傾斜面でのビードの偏りを抑制し、ビード形状を制御するには、レーザーの狙い位置と実際にビードが形成される場所との関係を把握し、それに応じて加工経路を修正する必要がある。そこで、レーザーの照射中心とビード中心の距離Lを測定し、傾斜角と距離Lの関係と比較した(図25)。

その結果、傾斜15°~30°の距離Lは0.3~0.4mmで推移するが、それ以降は角度の増加とともに距離Lも増加し、傾斜60°では照射中心から1.2~1.4mm離れた場所にビードが形成されることが確認された。(図26)

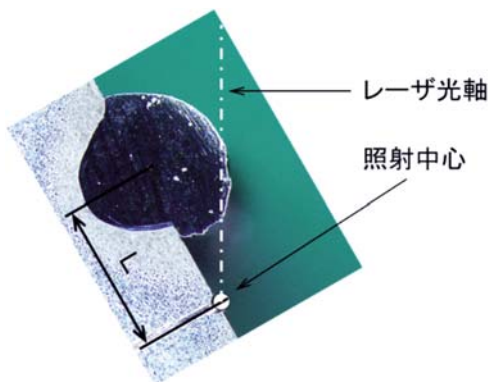


図25 レーザ照射中心とビード中心の距離

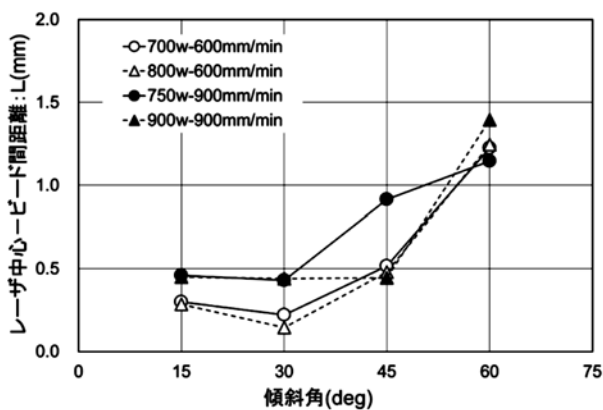


図26 レーザ照射中心からのビード距離

次に、積層時のレーザー照射位置を、図27のとおりビードの谷間から傾斜面に沿って距離Lだけ下方に移動させ、移動前の積層ビードと断面形状を比較した(図28)。

その結果、傾斜15°~45°ではビード位置を移動したことにより断面形状がほぼ左右対称になり、傾斜面上側への偏りがほぼ解消された。また、融合不良が多数発生した700W-600mm/minの傾斜30°と45°においても、CT測定で融合不良面の減少が確認され、積層できない状態が解消された。一方、傾斜60°のビード形状について、傾斜面の下側が重力で流れるため、700W-600mm/min、900W-900mm/minともに形状の制御は困難であった。しかし、傾斜面上側の形状や融合不良面の削減については改善が見られた。

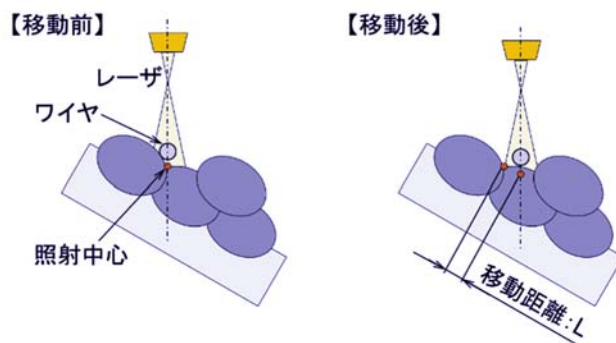


図27 レーザの照射中心とビード中心の距離

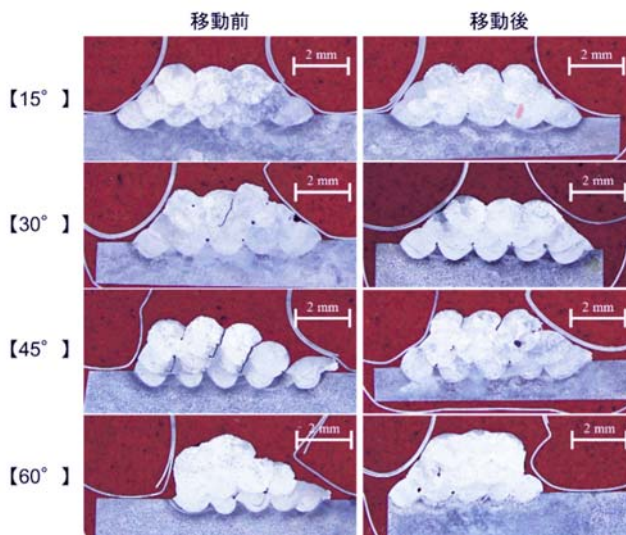


図28 照射位置移動前後のビード形状比較 (700W 600mm/min)

次に空隙率について、傾斜15~30°の範囲では700W-600mm/min、900W-900mm/minとも移動前と同等から減少傾向が見られるものの、傾斜45°~60°では空隙率が増加する場合も確認され、照射位置の移動による明確な改善効果は得られなかった(図29)。

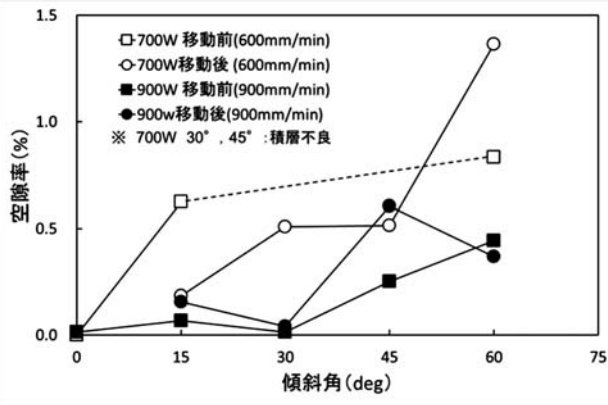


図29 照射位置の移動と空隙率の関係

この原因について、ビード断面の上層ビードと下層ビードの位置関係を比べたところ、照射位置の移動前は上層ビードが下層ビードの谷間のほぼ中央に形成されるのに対し、移動後は上層ビードの中心が下層ビードの谷間より下側に移動し、その分空隙が残りやすいビード谷間の溶込が浅くなっていた(図30)。このため、移動距離Lが溶込幅より大きい傾斜45°～60°では、移動前より多くの空隙が残ったと考えられる。

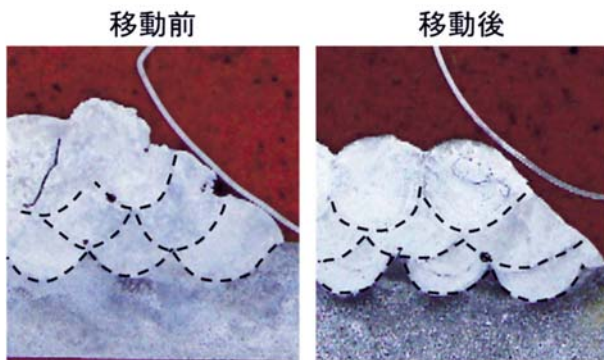


図30 照射位置とビード形成位置の比較 (700W 600mm/min)

以上のことから、傾斜の大きな加工面でビード形状の制御と空隙率の低下を両立させるには、照射位置の移動に合わせて溶融池を拡大し、空隙が集中する下層ビードの谷間を再溶融させる必要がある。図31のとおり、ワイヤ600mm/minのレーザー出力を800Wに高め溶融池を拡大したところ、傾斜15°～60°間の空隙率が0.5%以内に低減され、特に移動距離Lの大きい傾斜45°～60°では空隙率が1/2～1/5に低下した。

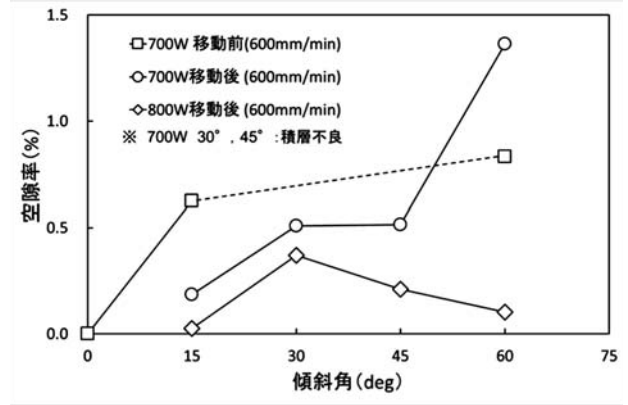


図31 レーザ出力による傾斜面ビードの空隙率低減 (600mm/min)

5. おわりに

金型など複雑な起伏を有する製品へのワイヤ供給式レーザークラディング加工の適用可能性を調べるため、炭素鋼材にステンレスワイヤを溶融積層肉盛りする実験を行い、ワイヤの供給方向が積層の可否や空隙率に大きく影響することを確認した。また、レーザー出力の増加やビード重なり率の調整により、側方供給の条件でも空隙率の少ない前方供給方式と同等の品質を得る改善方法を見出した。

次に、加工面の傾斜と空隙率の関係を調べ、傾斜角の増加に伴う積層ビードの偏りや、パス間の融合不良の偏在を確認した。さらに、この現象について、傾斜面上のエネルギー密度差に着目してその原因を推定し、傾斜角に応じてレーザーの照射位置と出力を修正することでビードの形状不整や融合不良を解消し、かつ傾斜15°～60°の空隙率を低減する方法を確認した。

本研究により、ワイヤ供給式レーザークラディング加工を金型など複雑形状に適用するための技術的課題に関する知見が得られた。今後は、実際の金型を想定した製品形状や材質などに関する加工条件等の研究を進め、自動車部品用金型の肉盛り再生などへの実用化を目指す。

謝辞

本研究は、公益財団法人JKAの平成27年度JKA公設工業試験研究所等における共同研究補助事業を受けて実施しました。

また、本研究で使用したファイバーレーザー加工溶接装置・試料埋込装置・実体顕微鏡は国立研究開発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。

記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 塚本雅裕：3Dプリンターと金属の積層造形，溶接学会誌 Vol.83 No.4, pp.24-27, (2014)
- 2) 大西輝政・川人洋介・水谷正海・片山聖二：高出力・高輝度レーザーによる高張力鋼厚板のホットワイヤ併用突合せ溶接法，溶接学会論文集 第29巻 第1号, pp.41-47, (2011)
- 3) 新井武二：レーザー加工の基礎工学 改訂版，丸善，pp.381-383, (2013)