

## レーザー溶接時の熱・流体挙動観察によるシールドガス供給機構の適正化

櫻庭 洋平, 安田 星季, 三戸 正道, 田中 大之  
宮腰 康樹, 中嶋 快雄, 保科 秀夫

### Adjustment of Shielding-Gas Feed Mechanism by Observing Thermal and Fluid Behavior of Laser Welding

Yohei SAKURABA, Seiki YASUDA, Masamichi MITO, Hiroyuki TANAKA  
Yasuki MIYAKOSHI, Yoshio NAKAJIMA, Hideo HOSHINA

#### 抄 録

レーザー溶接は溶接速度が速く熱ひずみが小さいため、溶接時間の短縮や仕上げ作業の簡略化に役立つ。しかし、他の溶接法と比べシールドガスの消費量が多いため、ガス供給条件の適正化が加工コスト削減に向けた課題となっている。

本研究では、シールドガスの酸化保護機能・レーザー誘起プルーム除去機能の向上とガス消費量の低減を目的とした。最初にレーザー溶接時のシールドガス流れ・溶接ビード温度の観察と、溶接ビードの外観・断面形状・空孔欠陥の計測を行い、ガス供給条件と溶接品質の関係を評価した。その結果、酸化保護とプルーム除去が両立する適正流速の範囲が、ガスノズルから溶接部までの距離が離れるほど減少することを確認した。次に、この結果をもとにガス供給システムをガスの機能ごとに分岐することで、酸化保護能力が改善された。また、プルーム除去側のノズル形状を改良することでプルーム除去能力が改善されることも確認した。

**キーワード：**レーザー溶接, シールドガス, 酸化保護, プルーム除去

#### Abstract

Because of the high speed welding and the small welding distortion, laser welding is effective to shorten the welding time and to improve simplification of the finishing work. However, adjustment of shielding-gas supply conditions is very important problem to reduce the processing cost of laser welding, because the shielding-gas consumption in laser welding is larger than the other welding methods.

In this study, we targeted to progress the functions of oxidation protection and removing plume inducement to laser, and to reduce the shielding-gas consumption. At first, we evaluated the relations between the shielding-gas supply conditions and the welding quality, by watching the shielding-gas flow and the temperature of welding beads at the time of laser welding, and measuring appearance, profiles, voids of welding beads. As a result, we confirmed that the range of appropriate velocity of flow both the oxidation protection and the removing plume was decreased to separate the shielding-gas nozzle from welding point. Then, the ability of oxidation protection was improved by branching the shielding-gas supply between oxidation protection and removing plume. And then, the ability of removing plume was improved by reforming the shape of removing plume nozzle.

**KEY-WORDS :** Laser Welding, Shielding-Gas, Oxidation Protection, Removing Plume

---

事業名：職員研究奨励事業（提案部門 シーズ探索型）

課題名：熱・流体可視化技術に基づいたレーザー溶接用シールドガスノズルの設計評価技術の開発

## 1. はじめに

機械部品の生産現場では常に効率化が求められており、溶接工程においても例外ではない。しかし、溶接工程は溶接法により部品に要求される加工精度が変わり、また溶接部の仕上がりや熱ひずみの状態で仕上げ工数が増減するため、溶接時間だけでなく前後工程を含めた総合的な効率の改善が重要となる。

溶接工程の効率化策として、溶接速度が速く熱ひずみの小さなレーザー溶接の活用が期待されているが、高額な装置に加え溶接部品の精度確保の難しさやシールドガス（以下ガス）使用量の多さなど特有の課題も少なくないため、その効果を発揮させるのは難しい。このため、これまで経験によるところの大きかった溶接品質について、その影響要因を明確化し、溶接条件や装置の適正化に繋げることが重要となる。

本研究は、レーザー溶接の運用コストを削減する技術課題の中からシールドガス供給条件の適正化を研究対象とし、シールドガスに要求されるビードの酸化保護能力およびブルーム除去能力の向上と、これらの能力を最小限のガス消費量で満足させるための効率化を目的とした。実験では、レーザー溶接時のガス流れ挙動の観察を利用した酸化保護能力およびブルーム除去能力の評価と、ビード表面の熱挙動が外観品質や断面品質に及ぼす影響の評価を行った。また、これらをもとにガス供給システムやガスノズル形状を改良し、シールドガスの能力向上やガス消費量の低減を行った。

## 2. レーザ溶接の理論

### 2.1 レーザ溶接の特徴

図1に、レーザー溶接などの高エネルギー密度の溶接と、アーク溶接などの低エネルギー密度の溶接との溶接状態の違いを示す。レーザー溶接は、溶接部の熱エネルギー密度が $1.0\text{kW}/\text{mm}^2$ 以上とアーク溶接などより数100~1,000倍高いため、図1の右図のとおり溶接材料が瞬間的に蒸発してキーホールを形成する。これにより溶融池の奥にレーザー光が到達するようになり、深さ方向に集中して溶融が進むことから、溶込みが深く幅の小さな溶接ビード（以下ビード）が形成される。これに対し熱エネルギー密度の低い溶接法では、溶接材料が蒸発しないため徐々に熱が伝わり、浅くて幅広な熱伝導型の溶融が進む。

これらの特徴から、レーザー溶接では溶込み深さに対するビードの体積や総入熱量が小さくなるため、同じ溶込み深さを得るために必要な溶接パスの繰り返し数が減少し溶接時間が短縮される、ひずみの縮小により仕上げ工程が短縮されるなど様々なメリットにつながる。

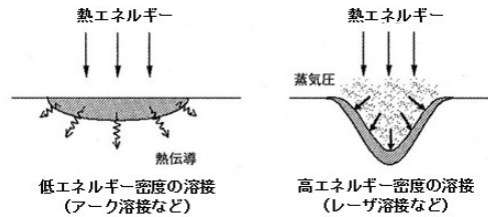


図1 深溶込みビードの形成原理

### 2.2 レーザ溶接におけるシールドガスの機能と課題

#### 2.2.1 ビードの酸化保護機能

レーザー溶接に限らず、溶接で加熱され溶融したビードが周辺の空気に触れると、空気中の酸素や水蒸気などと材料が反応し、ビードの脆化や耐食性の低下などの不具合を引き起こす。そのため溶接時にはそれぞれの材料に適合したガスを供給し、ビードが再凝固し十分に冷却されるまでビードの周辺を保護する必要がある。

レーザー溶接時のガス消費量が、一般にMAG溶接やTIG溶接などより多くなる原因は、レーザー溶接の特徴である溶接速度の速さによるものである。このことについて、図2にMAG溶接などのガス供給範囲を、図3にレーザー溶接のガス供給範囲をそれぞれ示す。

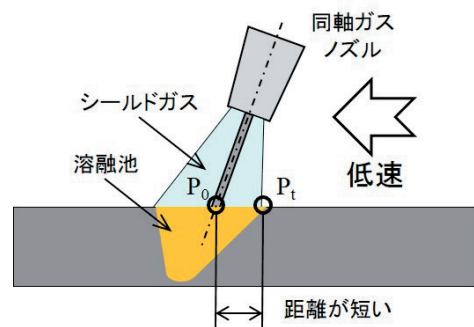


図2 MAG溶接などのガス供給範囲

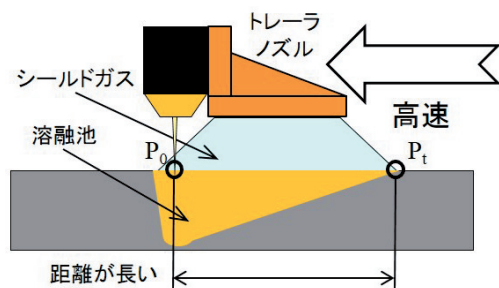


図3 レーザ溶接のガス供給範囲

図2のとおり、MAG溶接やTIG溶接の溶接速度は5～10 mm/s程度であり、ある時刻( $t_0$ )の加工点( $P_0$ )から $t$ 秒後の加工点( $P_t$ )までの距離が短いほど母材や固定治具を通じて熱が拡散する。このため、溶接速度が遅い場合には加工点に近い位置でも既に温度が低下していることから、同軸ガスノズルなど加工点付近の比較的狭い範囲のガス供給でも良好な酸化保護が可能となる。

これに対し、レーザ溶接の溶接速度はMAG溶接などよりも10倍以上高速で、 $P_0$ から $P_t$ までの距離が長いから、ビードも冷却されていない。ビードが冷却されるまでシールドするためには、図3のようなトレーラノズルやサイドガスノズルなどを使用し、ビード後方の広範囲にガスを供給する必要があるため、必然的にガスの消費量が増加する。

### 2.2.2 レーザ誘起プルームの除去機能

シールドガスに要求されるレーザ溶接特有の機能として、レーザ誘起プルーム（以下プルーム）の除去がある。プルームとは溶接材料の蒸発で発生した金属蒸気のこと、高密度な熱エネルギーで溶接材料を瞬間的に蒸発させて深溶込みを得るレーザ溶接では避けられない副生成物である。

加工点から発生したプルームはビードの上方に噴出し、その一部はレーザ光の光路上に滞留する。シールドガスによるプルーム除去が不十分な場合、プルームが後から来たレーザ光を吸収し、図4のとおりレーザ光路が激しく発光する。このとき、加工点に到達するエネルギーが減少するため、溶接中に溶込み深さが逐次変動し、溶接能力が著しく不安定になる<sup>1)</sup>。また、ビーム形状が乱れることでビードの凹凸や幅が不定期に変動し、ビードの外観にも悪影響を及ぼす。

このため、レーザ溶接では他の溶接法にはないプルーム除去用のガスも必要となり、ガス消費量を増大させる一因となっている。



図4 レーザ光路上のプルーム（円内）

## 3. 実験方法

### 3.1 実験項目

実験は、最初にレーザ溶接時のガス流れ状態を観察し、プルームの除去能力を評価した。また、ビード表面の酸化や欠損の状態を観察し、酸化保護能力を評価した。また同時に、ビード表面温度の計測、断面形状と空孔欠陥の計測を行い、表面温度と外観・断面品質との関連性について評価した。

次に、評価結果をもとにガス供給機構に改良を加え、加工点とノズル口との距離（以下ノズル距離）を大きくとった場合の酸化保護能力とプルーム除去能力の改善実験を行った。

### 3.2 観察・計測方法

ガス流れ状態の観察には高速度カメラ（フレーム数：5,000 フレーム/s）を使用し、プルームの滞留時間の計測とスパッタ（溶接部から飛散した熔融金属）の挙動観察を行った。また、ビード表面の温度計測には放射式サーモビューア（フレーム数：60 フレーム/s）を使用し、ビード表面の最高温度を計測した。図5に計測装置の配置を示す。

ビード表面の外観観察は、表面酸化の進行による発色の変化や欠損などビード形状の乱れの有無を確認した。また、ビード断面形状の計測は、図6のとおりビードの表面（ $Z=0.0$  mm）と中層（ $Z=1.0$  mm）のビード幅を実体顕微鏡で計測した。



図5 高速度カメラ・サーモビューア観測系

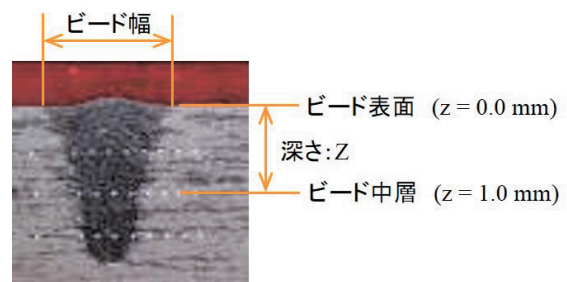


図6 ビード断面の計測位置

### 3.3 実験条件

本研究ではSUS430（75mm×25mm×10mm）を溶接材料に使用し、図7のとおりフライス加工で仕上げた試験片の上面にビードオンプレート溶接を行った。表1にレーザー溶接の諸条件を示す。

シールドガスには純度：99.99<sub>vol</sub>%のアルゴンガスを使用し、これをビードの後方にレーザー光路と30°の角度で配置したサイドガスノズルから供給した。実験におけるガス供給条件は、図8および表2のとおりとした。

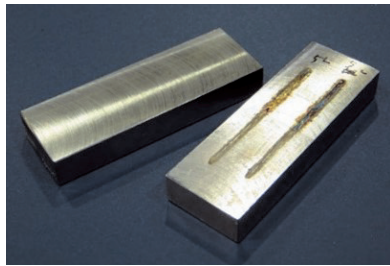


図7 試験片外観（SUS430）

表1 レーザ溶接条件

レーザー種類	Ytterbiumファイバーレーザー
波長(nm)	1,070
焦点径(mm)	0.30
焦点位置(mm)	0.0(材料表面)
レーザー出力(W)	2,000
溶接速度(mm/s)	50.0

図8 ガス供給実験概念図

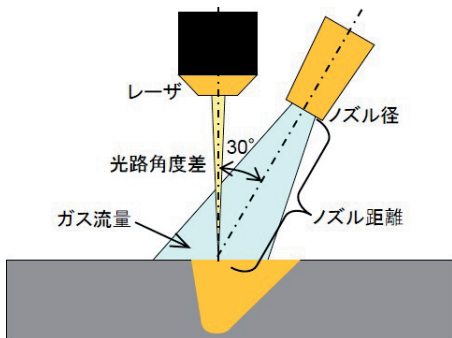


表2 ガス供給実験パラメータ

ガス種類	Ar
ガス流量(L/min)	5 ~ 50
ノズル径(mm)	φ2, φ4, φ8, 楕円(4×2)
加工点ーノズル距離(mm)	20, 50, 80

### 3.4 評価方法

#### 3.4.1 酸化保護能力

酸化保護能力の評価方法について、本来ならばビード表面の溶存酸素濃度を測定するのが適切だが、複雑な凹凸があるビード表面を同じ条件で機械的に抽出することは難しく、また高精度な仕上げ面を前提とした蛍光X線分析などの成分分析も、凹凸でX線などが乱反射するため正確な測定が困難である。このため本研究では、代替手段として表面酸化によるビードの発色を評価に利用することとした。

評価にはビード表面の観察結果を使用し、ビードの発色とビード欠損の有無により、表3のとおり外観品質を5段階に分類した。

判定の段階分けは、金属光沢ビードを得るために要する後工程の作業量で分類し、判定Vは清掃程度で金属光沢ビードが得られ、判定IVでは酸洗浄を行えば金属光沢が得られるものとした。また、判定IIIのテンパーカラービードはカラーステンレスと同じ原理<sup>2)</sup>の発色であるため、発色そのものが問題となる場合以外は仕上げ不要となる。判定IIおよび判定Iは酸化保護が全く働かない状態で、IIは仕上げ研磨、Iはビードの補修溶接がそれぞれ必須となるものとした。

また、スパッタ等の飛散状態の観察結果を使用して、ビード欠損が生じた原因の確認と分析を行った。

表3 ビード外観品質の判定基準

判定	V	IV	III	II	I
判定基準	金属光沢	酸洗浄後金属光沢	テンパーカラー	黒色酸化	ビード欠損
	← 良好				不良 →

#### 3.4.2 プルーム除去能力

プルーム除去能力の評価方法について、プルームによりレーザー光路が図4のように激しく発光した場合、プルームが除去されず光路上に滞留し続けているものと判断できる。

このため評価にはプルーム滞留時間の計測結果を使用し、溶接時間（1.0s）のうちプルームによる光路の発光時間が短いガス供給条件ほどプルーム除去能力が良好と評価した。

#### 3.4.3 ビード表面温度と外観・断面品質との関連

ビード表面温度と外観・断面品質の関連評価には、ビード表面の最高温度・断面ビード幅・穿孔欠陥の体積と分布の計測結果を使用した。これらの計測結果を3.4.1の外観判定結果と重ね合わせることで、外観品質を介して相互の関連性の有無を評価し、原因についての分析を行った。

## 4. 結果と考察

### 4.1 その場観察によるガス供給能力の評価

#### 4.1.1 酸化保護能力

シールドガスによる酸化保護能力とブルーム除去能力について、表2の条件でガス供給実験を行い、これをガス流量とノズル径から導出したガス平均流速（以下流速）との関係で整理した。図9に、ノズル距離ごとにガス平均流速と外観品質の関係を示す。

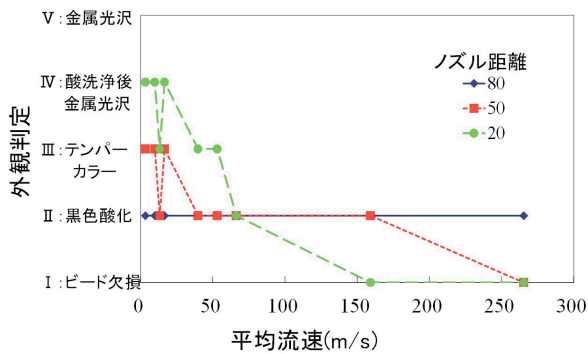


図9 ガス平均流速と外観品質の関係

図9のとおり、ノズル距離が近いほど外観品質が良好となる一般的な傾向が確認されたが、流速と外観品質の関係については、ノズル距離20mmや50mmでは流速の増加とともに金属光沢ビードから欠損ビードまで徐々に低下するのに対し、ノズル距離80mmでは流速による変動が確認されなかった。

ノズル距離や流速の増加とともに外観品質が低下する原因について考察した結果、以下のことが考えられる。

- ・今回使用したノズルでは、ノズル径が最も大きいφ8mmのノズルでも、流速4.5m/s以上でレイノルズ数： $Re > 2,300$ の遷移領域となり、実験時のガス流れはほぼ全て乱流域となる。
- ・このため、ガス供給時に周辺の空気の巻き込みが避けられず、レイノルズ数が等しい場合はノズル距離が長いほど、また高流速でレイノルズ数が大きいほど巻き込まれる空気の量が増え、その分アルゴンガスの濃度が低下した。

また、ノズル距離が近い場合にのみビード欠損が生じる原因について考察した結果、以下のことが考えられる。

- ・高流速時のガス流れ観察画像をノズル距離ごとに分析した結果、ノズル距離20mmや50mmでは図10のようにスパッタが加工点の前方に流されガウジング（型彫り）加工に近い状態となったが、ノズル距離80mmでは高流速時でもスパッタの挙動に明確な違いは見られなかった。

- ・このことから、高流速かつノズル距離が近い場合には、不活性ガスによるシールド効果や冷却効果が得られる前に溶融池が吹き飛ばされ、ビードが欠損した。これに対しノズル距離が遠い場合には、加工点近傍で流速が低下するためビードの欠損に至らなかった。



図10 高流速時のスパッタ挙動

#### 4.1.2 プルーム除去能力

図11に、ノズル距離ごとにガス平均流速とブルーム除去能力の関係と比較した結果を示す。この結果から、全てのノズル距離において、流速10m/s以上でブルームの滞留時間を溶接時間の20%となる0.2秒未満に、流速50m/s以上では滞留時間をほぼ0秒とすることができた。

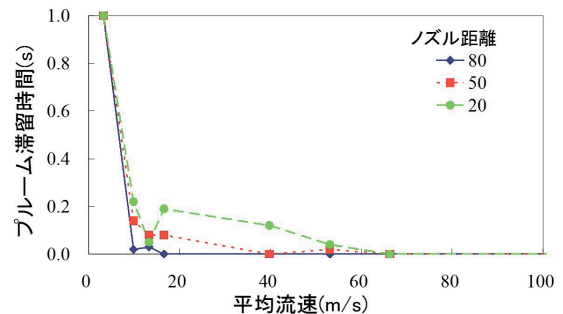


図11 ガス平均流速とブルーム除去能力の関係

この結果から、レーザ光路上のブルーム除去には一定以上の流速で、連続的にガスを供給することが効果的であると考えられる。

#### 4.1.3 温度状態と外観・断面品質の関係

放射式サーモピュアによるビード温度の計測結果について、ビードの外観品質で分類した結果を図12に示す。

使用したサーモピュアでは、フレーム数や解像度の制約から溶融池と母材との反射率の変化を完全に追従できず、計測値は全てSUS430の融点（1,750K前後）を下回り正確な温度は得られなかった。しかし、図12のとおり判定ⅢおよびⅣの酸化保護が良好なビードは、黒色酸化した判定Ⅱのビードと比べ40%ほど温度が低く検出されており、定性的な傾向では

あるが外観品質との関係を把握することができた。

なお、黒色酸化ビードが他のビードより高い温度を示した原因として、シールドが良好ではない分、反応する酸素による発熱が多くなったことが考えられる。

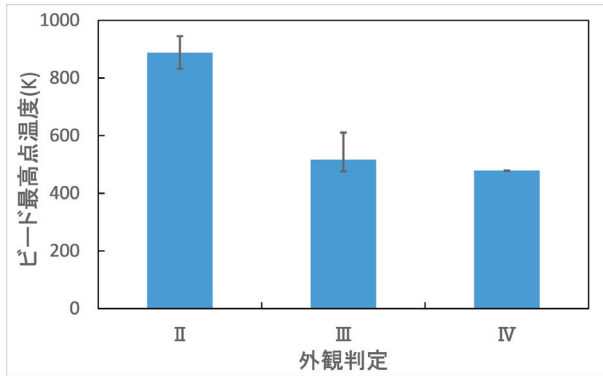


図12 外観品質とビード温度の関係 (参考値)

次に、ビード断面の形状について、表面と中層のビード幅を外観品質で分類した結果を図13および図14に示す。

図13のとおり、外観品質が良好なビードは表面のビード幅が拡大し、判定IVのビードでは判定IIのビードより20%程度拡大した。一方、中層のビード幅には変化が見られず、全体としては図14のとおり徐々にワインカップ状の断面形状に近づくことが確認された。

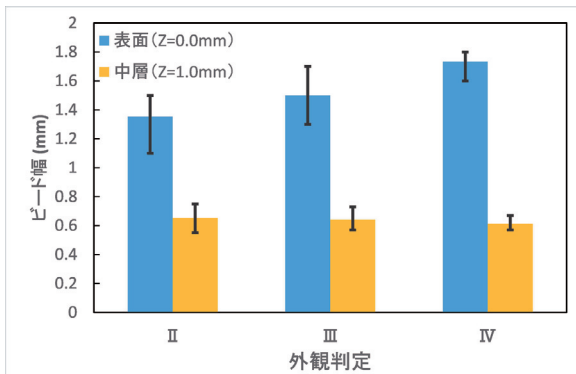


図13 外観品質とビード幅の関係



図14 ビードの断面形状 (左から判定II・III・IV)

断面形状とビード温度の関係について、外観品質を介して考察した結果、以下のことが考えられる。

- 酸化保護が不十分で外観品質が劣るビードは、酸化による発熱反応で温度が上昇し、これにより溶融するビードの体積も増すことが予想される。
- しかし、断面形状の計測結果では、酸化反応が少なく外観品質が良好なビードほど幅広となり、ビードの体積も拡大している。
- これらのことから、ビード温度と断面形状との直接的な関係は小さい。

#### 4.2 ガス流れの分析による供給機構の改良

4.1.1および4.1.2の結果から、酸化保護とブルーム除去の両方が良好となるガス供給条件について検討した。図15に、外観品質がテンパーカラー以上で、かつ溶接時間の80%以上に相当する0.8秒以上の時間でブルームが除去されたガス供給条件の範囲を示す。

図15のとおり、機能が両立する適正流速の範囲は、ノズル距離20mmでは流速10~60m/sと広範囲だが、ノズル距離50mmでは流速10~20m/sの範囲に限定され、ノズル距離80mmでは適正な範囲が得られなかった。

実際の溶接作用では、適正流速の範囲が広いほど溶接速度や溶接姿勢の変化や作業環境周辺の外乱に対する余裕を大きく取ることができるため、良好かつ安定したレーザ溶接を行うにはノズル距離を極力短くし、かつブルームを十分除去できる程度の低流速でガス供給するのが望ましいと言える。しかし、ノズル距離が短いほど部品の凹凸や周囲の治具類と干渉しやすくなるため、作業姿勢の制約や溶接プログラムの複雑化などに繋がり作業性が低下する。このため、少しでもノズル距離を拡大し、そのうえでガス消費量を抑えつつシールドガスの能力を改善させることができれば、レーザ溶接の実用性向上に貢献することができる。

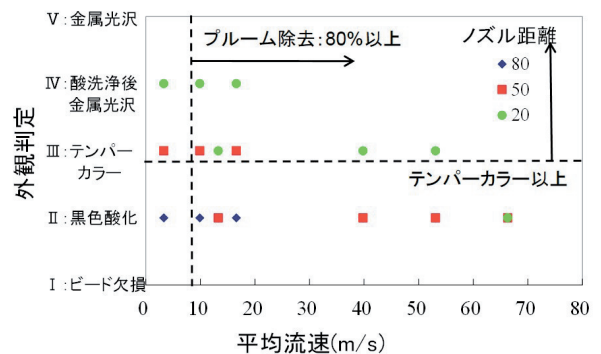


図15 酸化保護とブルーム除去の両立範囲

そこで、先の実験結果とその時のガス流れ状態を分析し、これをもとにガス供給機構に改良を加えることで、シールドガスの機能向上やガス使用量の適正化を行った。

#### 4.2.1 ガス供給システムの分岐による外観品質の向上

ノズル距離が長い場合に酸化保護機能とブルーム除去機能の両立が困難な原因について検討するため、表4および図16のとおり、個々の機能に要求されるシールドガス供給条件を整理した。

表4 シールドガス機能ごとの要求内容

シールドガス機能		酸化保護機能 (酸化反応防止、ビードの冷却)	ブルーム除去機能 (ブルームの物理的除去)
要求項目	供給位置	加工点～ビード後方	レーザ光路
	流れ方向	—	レーザ光路と交叉
	ガス流速	低速 (周辺の酸素巻き込み抑制)	一定以上の流速

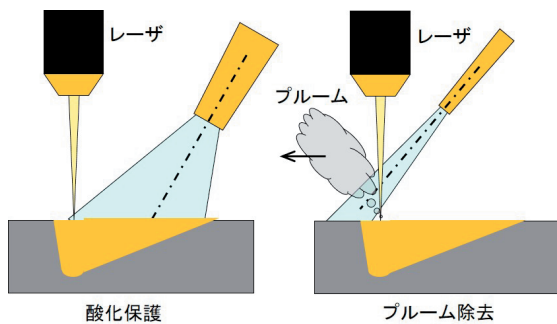


図16 ガス供給範囲の違い

表4および図16のとおり、酸化保護では加工点から後方の広範囲に、周辺の酸素を巻き込まない低流速のガス供給が求められる。これに対しブルーム除去では、レーザ光路と交叉する位置に、一定以上の流速で物理的な力を持たせたガス供給が求められ、両者の供給範囲や適正流速は大きく異なる。このためノズル距離が長い場合には、酸化保護優先のガス供給条件だと加工点近傍までブルーム除去に必要な流速を維持できず、またブルーム除去を優先させガス流速を速くすると、レイノルズ数も大きくなり酸素の巻き込みが増えるため、機能を両立させるのが困難だと考えられる。

そこで対策として、図17のようにガスノズルを酸化保護用とブルーム除去用とでシステムを分岐し、それぞれの機能ごとに適切な条件でガス供給することとした。

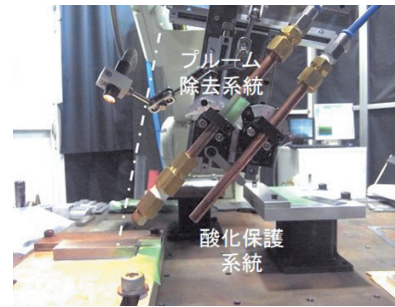


図17 機能ごとのガス供給システム分岐

表5 システム分岐によるガス供給の改善

ガス供給機構	ノズル距離	シールドガス流量(L/min)			ブルーム滞留時間(s)	外観判定
		ブルーム除去	酸化保護	合計		
1系統	80	50	-	50	0.00	II
2系統	80	10	30	40	0.09	III
		10	40	50	0.02	III

その結果、システム分岐前には黒色酸化ビードしか得られなかったノズル距離80mmにおいて、表5のとおりガス使用量を40～50L/minの同程度に維持したまま、ビードの酸化状態をテンパーカラービードに改善し、また0.9秒以上にわたり滞留したブルームを除去することができた。

#### 4.2.2 ノズル形状の改良によるブルーム除去能力の向上

4.2.1のとおり、機能ごとのシステム分岐により酸化保護能力を向上させることができたが、口径や流速が異なるノズルを近接させたことで双方のガス流れが干渉し、システム分岐前と比べノズル距離20mmと50mmのガス供給条件でブルーム除去能力が大きく低下した。

この原因について、このときのブルーム挙動を高速カメラで観察したところ、図18のとおりブルームがガスで一度分断され、その後ビードの横方向から回り込んだブルームが光路上に再度侵入していることが確認された。

そこで対策として、図19のようにブルーム除去側のノズル形状を2mm×4mmの楕円形に変更し、ビード横方向のガス散布範囲を広げ横方向から回り込むブルームを除去することとした。



図18 ブルームの分断(円内)と再侵入

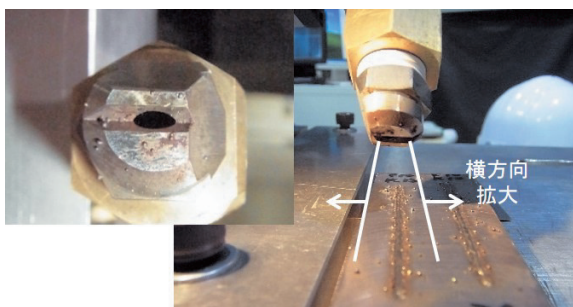


図19 楕円形のブルーム除去ノズル

その結果、φ 4 mmの円形ノズルではブルームの再侵入を避けなかった条件において、表6 および表7のとおりガス使用量や酸化保護能力を維持したまま、ブルームの滞留時間を0.1秒以下に抑えることができた。

表6 ノズル形状の改良によるガス供給の改善

(ノズル距離 20mm)

ノズル形状	ノズル距離	シールドガス流量(L/min)			ブルーム滞留時間(s)	外観判定
		ブルーム除去	酸化保護	合計		
円形(φ4)	20	15	15	30	0.30	Ⅳ
楕円(2×4)	20	10	20	30	0.02	Ⅳ

表7 ノズル形状の改良によるガス供給の改善

(ノズル距離 50 mm)

ノズル形状	ノズル距離	シールドガス流量(L/min)			ブルーム滞留時間(s)	外観判定
		ブルーム除去	酸化保護	合計		
円形(φ4)	50	10	20	30	0.63	Ⅲ
楕円(2×4)	50	10	20	30	0.09	Ⅲ

## 5. おわりに

レーザ溶接時の熱・流体挙動とビード品質との関連性を評価し、効果的な酸化保護とブルーム除去が可能なガス供給条件を抽出することができた。また、得られた適切なガス供給条件を満足させるような、ガス供給システムやガスノズル形状の改良にも繋げることができた。

今後は、レーザ溶接の導入企業や導入検討企業に対し、より効果的なガス供給条件を抽出し設定する技術などを支援して、レーザ溶接の効率的な運用やレーザ溶接部品の品質向上の支援に繋げていく。

## 謝辞

本研究で使用したファイバーレーザ加工溶接装置・試料埋込装置・実体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研究

開発環境支援事業により、それぞれ整備されました。記して感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 川人洋介・木下圭介・松本直幸・水谷正海・片山聖二, 高出力ファイバーレーザによるステンレス鋼溶接時のレーザ誘起ブルームの高速観察および分光分析, 溶接学会論文集, 第25巻 第3号 pp.455-460, (2007)
- 2) 川村伊知良, ステンレス鋼の溶接部のテンパーカラーについて, Newびいど No.5 pp.12, (2003)