



M. Yamamoto

## 高出力半導体レーザーとホットワイヤ法とを組み合わせた高能率マルチマテリアル AM 技術の開発

山本 元道\*

### 1. まえがき

一般的な金属粉末を用いた AM (アディティブ・マニュファクチャリング) 技術では種々の可能性が検討されており、一部の高価な材料を用いた小型製品製造には既に適用され始めている<sup>1~10)</sup>。一方、低施工能率、金属粉末の低い溶着効率、欠陥生成リスク、金属粉末の価格、厚肉製品や大型製品への適用が困難などの問題を有しており、今後の一般製品製造への広がりのある適用拡大は困難な状況にある。さらに、高出力・高品質化および低価格化の著しい近赤外領域波長のファイバーレーザーが一般に用いられているが、Al 合金や Cu 合金などの材料では固相での吸収率が低く、当該材料の AM 技術はグリーンレーザーやブルーレーザーを用いて検討されている。また、アーク熱源 (TIG 溶接、MIG 溶接など) を用いた AM 技術も一部開発・実用化されており、施工能率向上、ワイヤ材料の適用などのメリットが得られているものの、スパッタ・ヒュームの発生、アーク現象・入熱制御の困難さ、適用ワイヤの制約、酸化・窒化などの問題を抱えている<sup>11~15)</sup>。

著者らは長年、ホットワイヤ法とレーザー熱源とを組み合わせた溶接・接合技術の開発を行ってきた<sup>16~21)</sup>。ホットワイヤ法では、ワイヤをジュール発熱によって通電加熱し、融点直下まで効率的に温度を上昇させた添加材料を供給できる。また、製品の目的に応じた専用のワイヤはもとより、一般の多種多様な金属ワイヤのほぼ全てが使用可能であり大幅な製造コストの低減が期待できる。半導体レーザーはファイバーレーザーなどと異なり、ビーム品質は劣るものの、比較的容易に任意のスポット形状を形成でき、そのスポット内のエネルギー分布も制御が容易である。ホットワイヤ法と半導体レーザー熱源とを組み合わせることで、低入熱、高能率な積層造形が可能になると考えられる。さらに、スパッタ・ヒュームの発生や酸化・窒化も大幅に抑制でき、溶着効率はほぼ 100%であるため、現状の AM 手法に比べて 10 倍以上の施工能率が期待できる。本特徴を積極的に活用することで、現在は鋳造や切削、小型部品の組み合わせでのみ製造可能で、既存 AM 技術では製造困難である厚肉・大型部品の製造が可能になる。

本報では、高出力半導体レーザーとホットワイヤ法を組み合わせた AM 技術を用い、種々のワイヤでの施工現象観察、適正条件導出を実施した結果について報告する。さら

に本プロセスを用い、オーステナイト系ステンレス鋼上に 5000 系アルミニウム合金を積層造形する異材 AM について検討した結果についても報告する。

### 2. 供試材料および実験条件

#### 2.1 供試材料

供試ワイヤには、SUS308L (直径 1.2mm)、Inconel625 (直径 1.2mm)、A5356WY (直径 1.2mm)、NCU-M (直径 1.2mm) を用いた。母材には、板厚 9~24mm の 400~490MPa 級鋼板 (SUS308L, SUS630, NCU-M 用)、板厚 20mm の A5083O (A5356WY 用) を供試した。

#### 2.2 実験条件

図 1 に、実験システムの外観を示す。熱源には、定格出力 6kW の半導体レーザーを用いた。施工中は、高速度カメラを用いて溶融池形成およびホットワイヤ送給状況を観察した。レーザー照明 (808nm) とバンドパスフィルタを用い、溶接方向前方 (溶融前方) から撮影した。レーザーヘッドおよびワイヤトーチは固定し、試験片をスライダに設置した治具に固定して移動させた。シールドには Ar ガスを用いた。

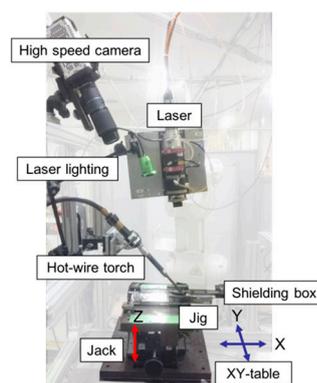


図 1 実験システム外観

図 2 に施工条件の概要図を、施工条件を表 1 に示す。矩形レーザースポットを適用し、長辺がビード幅方向になるように照射した。スポット形状は 1.6×11mm を基本とし、積層幅制御確認のために 2×3mm および 1.6×6mm と変化させての実験も実施した。レーザー出力、施工速度、ワイヤ送給速度を種々変化させて、施工安定性、積層体形状への

\* 広島大学大学院 先進理工学系科学研究科 教授

影響を調査した。ワイヤは施工方向前方から挿入し、挿入角度は45°とした。ワイヤ電流は、後述の適正加熱電流実験および推定から得られた結果をもとに、ワイヤ種類とワイヤ送給速度に応じた適正值を設定した。

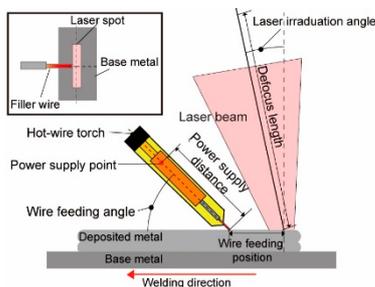


図2 施工条件の概要図

表1 施工条件

Number of layers	1~15
Laser spot size, mm	2×3, 1.6×6, 1.6×11
Laser irradiating angle, deg.	5, 10
Laser power, kW	1.875~6.0
Defocus amount, mm	0
Process speed, m/min	0.1~0.6
Wire feeding speed, m/min	1~20
Wire feeding rate	2.5~40
Wire current, A	0~364
Wire feeding angle, deg.	45
Shielding gas (Ar), l/min	5~30

### 2.3 評価方法

作製した積層体に、ワイヤの飛び出しや形状の不連続が見られるものは外観評価を×とし、外観の良好な積層体(●)のみ断面形状とうの評価を実施した。

各種パラメータの影響調査や適正条件の導出には、3層の積層体を用いた。長さ125mmの積層体を形成し、施工開始位置から40mm, 60mm, 80mmの3断面を観察した。図3に断面形状の評価法を示す。最大高さ(Maximum height)、有効高さ(Effective height)、有効幅(Effective width)を計測し、ニアネットシェイプ率(Near net shape rate)を最終的な評価パラメータとして採用した。

3層の積層体形成で導出した適正条件を用い、11~15層の積層体を作製し、積層体長さ方向から試験片を切り出して、引張試験を実施した。

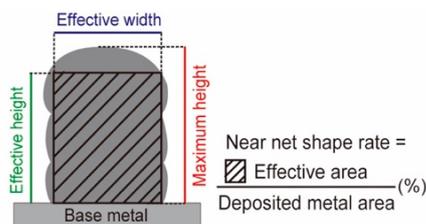


図3 断面形状評価法

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 適正ワイヤ電流の計測および計算

4種類の各ワイヤを用い、5~20m/min (NCU-Mの場合2.5~10m/min)の各ワイヤ送給速度での適正電流を計測した。図4に、各ワイヤでの計測結果を●印で示す。レーザを照射せず、通電したワイヤのみを母材表面に送給し、各ワイヤ送給速度においてワイヤ先端が溶融池直下まで適正に加熱できた(ワイヤの溶断および突きが生じない)電流を適正值とした。電気抵抗値が大きく異なる4種類の各ワイヤで、5~20m/min (NCU-Mの場合2.5~10m/min)の幅広いワイヤ送給速度範囲での適正電流を得ることができた。

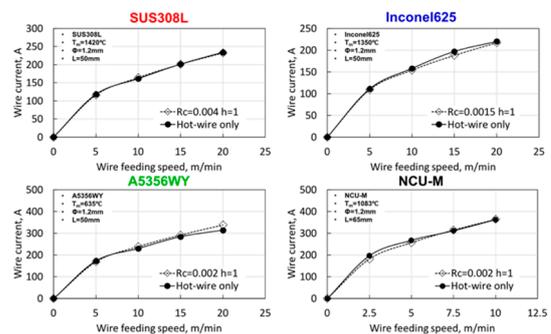


図4 適正ワイヤ電流計測結果および計算結果

ワイヤの加熱・送給時の温度分布を推定する簡易手法を検討した。ワイヤの通電領域を0.1mmに分割し、「電気抵抗によるジュール発熱」、「ワイヤ周辺への放熱」、「ワイヤとコンタクトチップの接触抵抗によるジュール発熱」を考慮して、分割した0.1mmごとの温度上昇(ΔT)を計算する。通電領域端(ワイヤ先端)での温度が、各ワイヤの融点近傍となる電流値を算出した。計算には、接触抵抗、ならびに温度依存を考慮した電気抵抗率、比熱、比重を用いた。計算結果を、図4中に◇印で示す。電気抵抗値が大きく異なる4種類の各ワイヤで、5~20m/min (NCU-Mの場合2.5~10m/min)の幅広いワイヤ送給速度範囲での適正電流を制度良く推定できている。

### 3.2 SUS308L ワイヤでの検討

SUS308L ワイヤを用いて、各パラメータが施工現象および積層体形状に及ぼす影響を調査し、適正施工条件の導出を行った。施工条件を表2に示す。ワイヤ送給比(ワイヤ送給速度/施工速度)、施工速度、レーザ出力の3パラメータに注目し、それぞれ他の2パラメータを固定した状態で変化させた。

各パラメータの影響の検討前に、施工可能(外観試験で不良の無い良好な積層体外観が得られる)範囲を調査した結果を図5に示す。ワイヤ送給比を固定(単位長さあたりの積層量を固定)した場合の各施工速度において、また施工速度を固定した場合の各ワイヤ送給比において、施工可能なレーザ出力最小値を得ることができた。

表2 SUS308L ワイヤでの施工条件

Wire feeding rate	20			20	20	30	40
Wire feeding speed, m/min	6	8	10	6	6	9	12
Wire current, A	123	141	160	123~125	123	151	176
Process speed, m/min	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3		
Laser power, kW	5.5			3.3	4.0	5.0	5.5

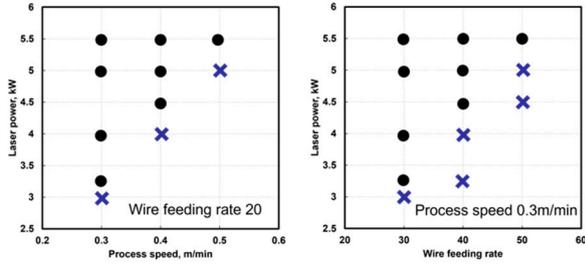


図5 施工可能範囲調査結果

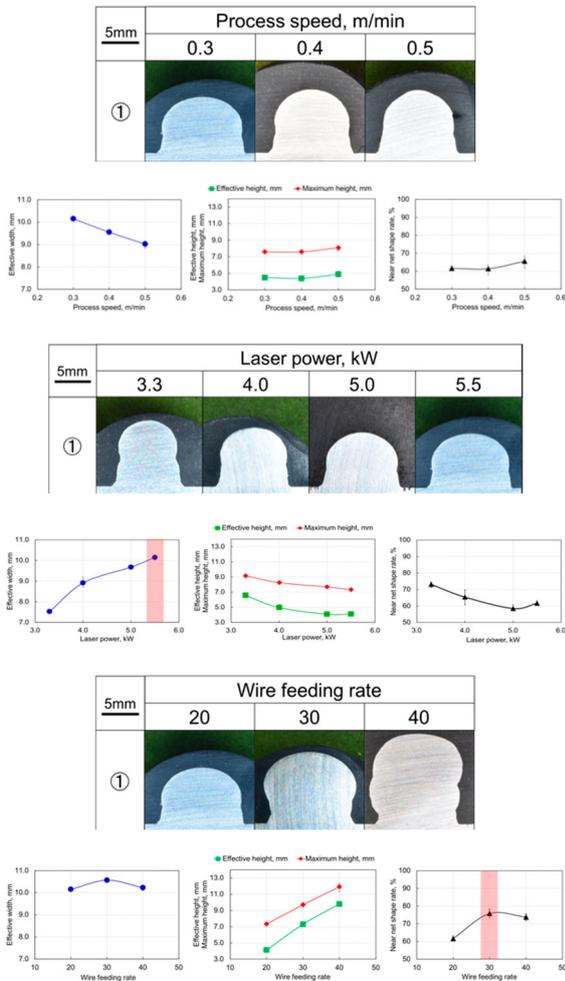


図6 積層体断面写真および断面形状計測結果

3パラメータそれぞれを変化させた場合の、積層体断面写真および断面形状計測結果を図6に示す。断面計測は先

に述べたように3箇所で行い、平均値を計測結果として用いた。断面写真は、施工開始位置から40mmのものである。施工速度を上昇させると、単位長さあたりへの入熱が低下するため、積層体幅が小さくなる一方、単位長さあたりへの溶着量(ワイヤ送給比)は変化しないため積層高さは増加している。レーザパワーを上昇させると、単位長さあたりへの入熱が増加するため、積層体幅が大きくなる一方、単位長さあたりへの溶着量(ワイヤ送給比)は変化しないため積層高さは低下している。単位長さあたりへの入熱量を変化させずにワイヤ送給比を上昇させると、単位長さあたりへの溶着量が増加するため、積層幅はほぼ一定のまま、積層高さが大きくなっている。しかしながら、送給比40まで上昇させると、幅方向に膨らむ形状となってしまう、ニアネットシェイプ率は低下し始めるようである。図7に、レーザ出力5.5kWで施工速度とワイヤ送給比を変化させた場合のニアネットシェイプ率の計測結果を示す。施工速度0.36m/min、ワイヤ送給比33.3の条件において、ニアネットシェイプ率80%の結果が得られた。

上述の適正条件を用い、15層の大型積層体を作製し、当該積層体から試験片を切り出して引張試験を実施した。作製した大型積層体の外観および断面写真と形状計測結果を、図8に示す。外観および断面に欠陥は認められず、ニアネットシェイプ率83%の良好な積層体を得ることができた。引張試験結果から、供試ワイヤのカタログ値と同程度の引張強さ(558MPa)および伸び(49%)を得ることができた。

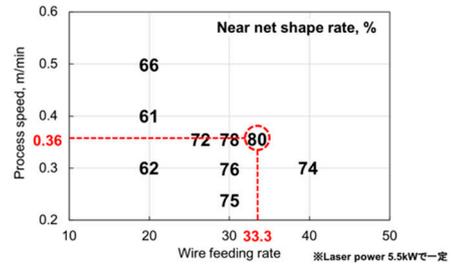


図7 適正施工条件の導出結果

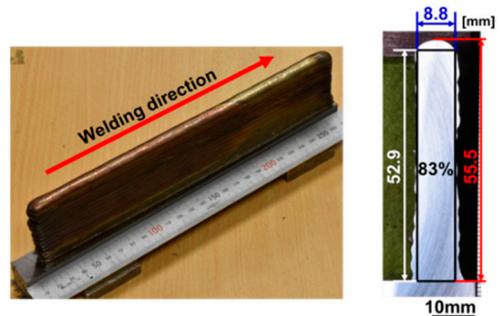


図8 大型積層体施工結果

### 3.3 レーザスポット幅の影響検討 (SUS308L ワイヤ)

SUS308Lワイヤを用い、レーザスポット幅を変化させ、施工結果に及ぼす影響を調査した。図9に、レーザスポット幅3mm, 6mm, 11mmそれぞれでの積層体断面写真および断面形状計測結果を示す。レーザスポット幅が変化しても、上述の基礎検討結果と同様の傾向を示している。それぞれのレーザスポット幅において、適正施工条件を用いることで、ニアネットシェイプ率 80%程度を得ることができている。また図10に示すように、本プロセスでは、レーザスポット幅と形成される積層体の有効幅にほぼ1:1の関係が認められ、効率的に積層体形状を変化させることが可能である。

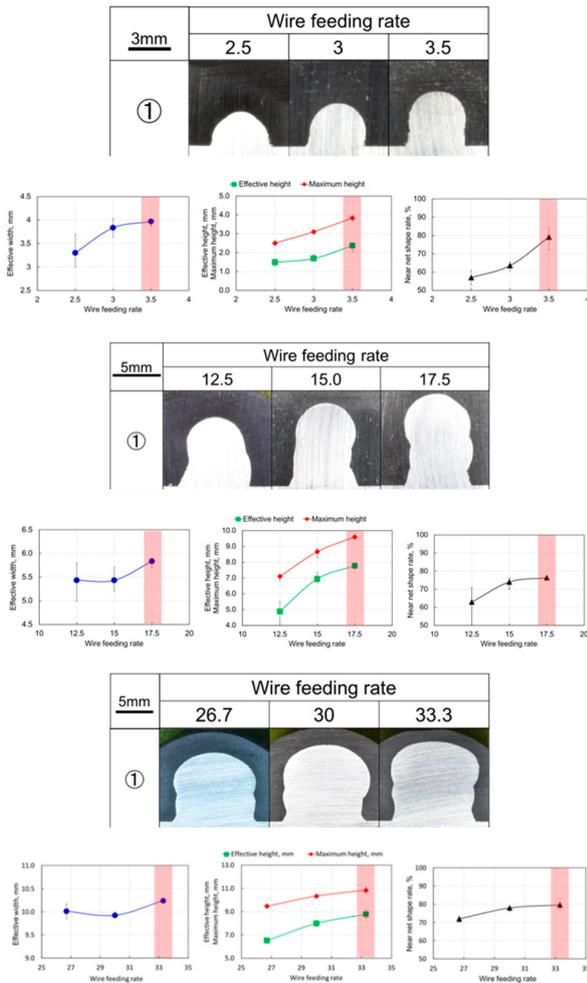


図9 レーザスポット幅の影響

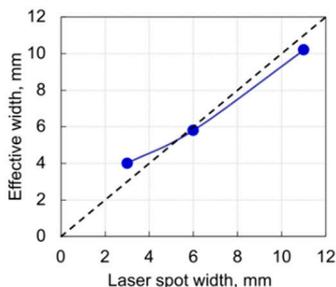


図10 レーザスポット幅と有効幅との関係

### 3.4 Inconel625 ワイヤでの検討

SUS308Lワイヤの場合と同様に、ワイヤ送給比、施工速度、レーザ出力の3パラメータに注目し、それぞれ他の2パラメータを固定した状態で変化させた。施工条件を表3に示す。Inconel625ワイヤの場合でも、施工速度、レーザ出力、ワイヤ送給比が積層体形状に及ぼす影響は、SUS308Lと同様であった。ニアネットシェイプ率 80%を超える適正施工条件を得ることができた。

表3 INCONEL625 ワイヤでの施工条件

Wire feeding rate	30			40		
Wire feeding speed, m/min	12	15	18	15	20	10
Wire current, A	64	184	202	183~185	209~211	150
Process speed, m/min	0.4	0.5	0.6	0.5		0.5
Laser power, kW	6.0		5.0	5.5	6.0	6.0

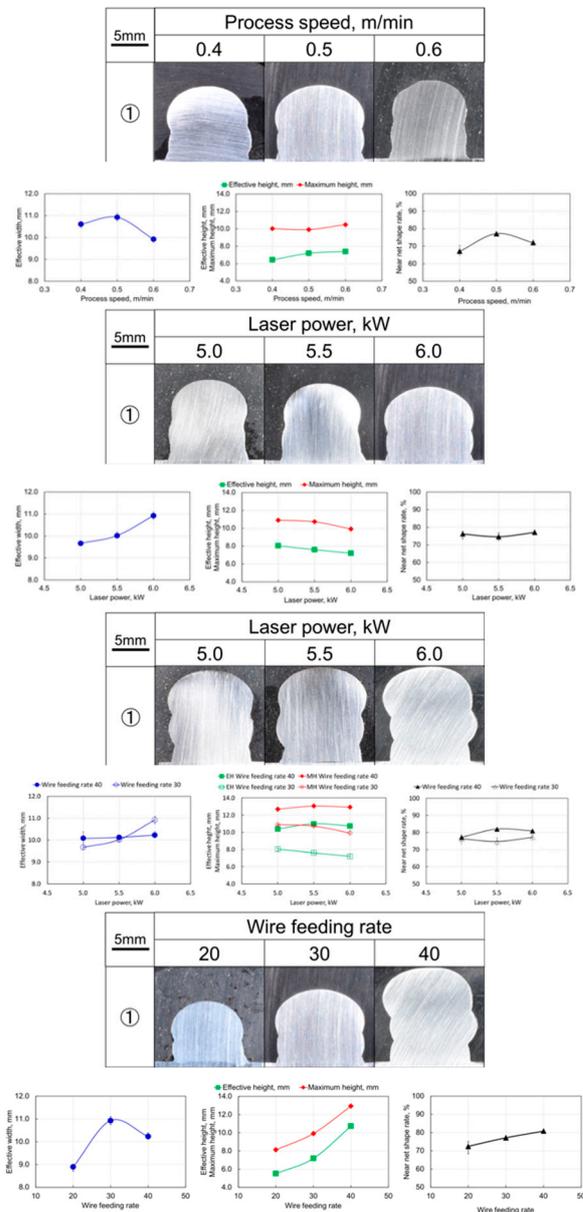


図11 INCONEL625 断面写真および断面形状計測結果

### 3.5 A5356WY ワイヤでの検討

他のワイヤと同様に、ワイヤ送給比、施工速度、レーザ出力の3パラメータに注目し、それぞれ他の2パラメータを固定した状態で変化させた。施工条件を表4に示す。A5356WY ワイヤの場合でも、施工速度、レーザ出力、ワイヤ送給比が積層体形状に及ぼす影響は、他のワイヤと同様であった。断面写真を見ると、他のワイヤに比べて形状が崩れている様子が観察される。このため、ニアネットシェイプ率は最大で70%となり、他のワイヤに比べて若干低下した。これは、A5356WY ワイヤの融点が低く、表面張力が小さいためであると考えられる。

表4 A5356WY ワイヤでの施工条件

Wire feeding rate	30			20	30	40
Wire feeding speed, m/min	12	15	18	15	10	20
Wire current, A	212	239	268	239	212	239
Process speed, m/min	0.4	0.5	0.6	0.5		0.3
Laser power, kW	6.0			5.0	5.5	6.0

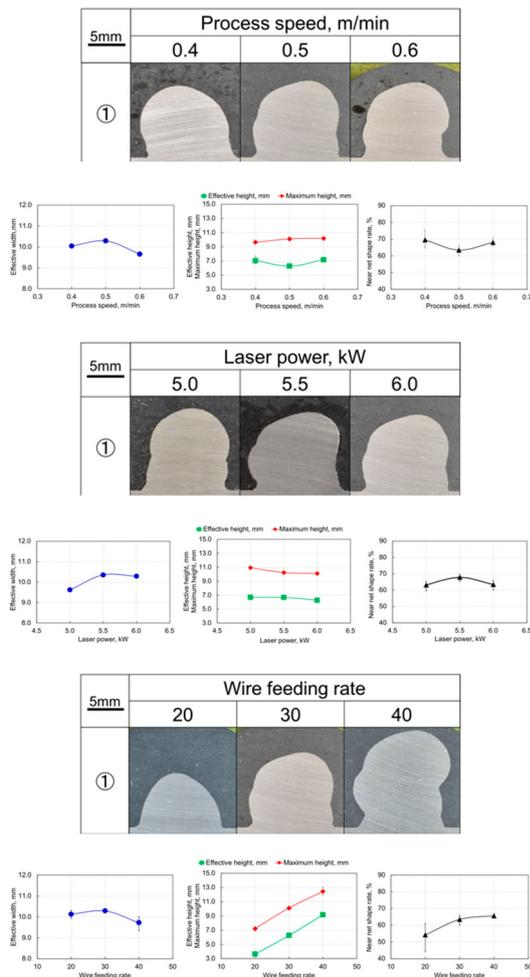


図12 A5356WY 断面写真および断面形状計測結果

### 4. SUS304/A5183 異材 AM の検討

基材にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を、積層材料にはアルミニウム合金 A5183WY ソリッドワイヤ

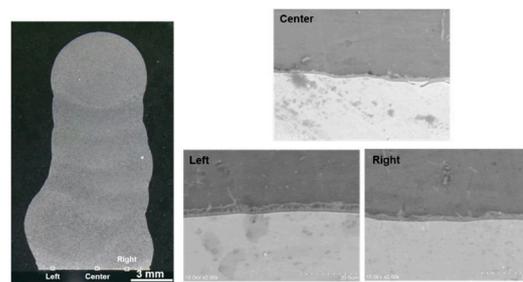
を供試した。フラックスを基材上に塗布する場合1層目から、1層目にフラックスコートワイヤ (FCW) を使用する場合には2層目から供試 A5183WY ソリッドワイヤを積層した。

種々の検討から導出した適正条件 (表5参照) を適用し、9層の積層体をそれぞれの方法で作製した。それぞれの断面写真、および SUS304 基材と初層との界面3箇所 (左右両端部および中央部) の SEM 写真を図13に示す。フラックスを基材上に事前に塗布し、初層から A5183WY ワイヤを積層する場合も、FCW を初層に適用し、2層目から A5183WY ワイヤを積層する場合のどちらでも、金属間化合物 (IMC) 層の厚さは2~3 μm 程度と非常に薄く抑制されており、幅方向両端部から中央部まで IMC 層厚さはほぼ均一にであった。

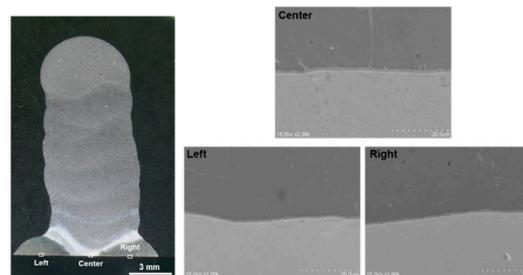
作製したそれぞれの多層造形体から、接合界面が中央となるように引張試験片を5体ずつ切り出して引張試験を行った。フラックス塗布による造形体では平均 127.2 N/mm<sup>2</sup> (最大 151.2 N/mm<sup>2</sup>)、FCW による造形体では平均 129.6 N/mm<sup>2</sup> (最大 163.9 N/mm<sup>2</sup>) の引張強さであった。類似の研究 (22) での結果と比較すると、ばらつきはあるものの、平均で 125 N/mm<sup>2</sup> を超える非常に高い引張強さを得ることができた。

表5 SUS304/A5183WY 異材 AM 施工条件

Layer	(a)		(b)	
	1	2~9	1	2~9
Laser power, kW	2.3	2.2~2.5	4.3	2.2~2.4
Spot shape, mm	2.5×5.0	2.5×5.0	2.5×5.0	2.5×5.0
Defocus length, mm	+10	0	+25	0
Process speed, m/min	0.72	0.5	0.72	0.5
Wire feeding, m/min	8	5	8	5
Hot-wire current, A	163	99	190	99
Wire	A5183WY		FCW A5183WY	



(a) フラックス塗布による方法



(b) FCW を用いる方法

図13 積層体断面写真および界面観察結果

## 5. まとめ

6kW 高出力半導体レーザとホットワイヤとを組み合わせ、効能率かつ高施工裕度な AM 技術の確立を目指し、4 種類のワイヤ (SUS308L, Inconel625, A5356WY, NCU-M) を用いての検討を行った。さらに、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) 基材上に 5000 系アルミニウム合金 (A5183WY) を積層造形する異材 AM についても検討した。得られた成果の概要を以下に示す。

- (1) 4 種類のワイヤそれぞれにおいて、ワイヤ送給速度 5~20m/min (NCU-M の場合 2.5~10m/min) の広い範囲での適正加熱電流を実験的に得ることができた。また、ワイヤ温度分布の簡易推定手法を提案し、適正加熱電流の推定をおこなったところ、4 種類のワイヤ全てにおいて実験結果を精度良く推定することができた。
- (2) SUS308L ワイヤおよび幅 11mm のレーザスポットを用いた検討結果から、施工速度およびワイヤ送給比 (ワイヤ送給速度/施工速度) を大きく変化させた場合の施工可能レーザ出力の下限値を得ることができた。
- (3) 3 種類のワイヤ (SUS308L, Inconel625, A5356WY) および幅 11mm のレーザスポットを用いた 3 層施工による検討結果から、施工速度、レーザ出力、ワイヤ送給比の 3 パラメータが積層体形状に及ぼす影響を把握し、適正施工条件を得ることができた。SUS308L および Inconel625 ワイヤでは約 80%、A5356WY ワイヤでは約 70% のニアネットシェイプ率を達成することができた。
- (4) SUS308L および A5356WY ワイヤを用いた大型積層体を作製し、当該積層体から切り出した試験片による引張試験から、各ワイヤのカタログ値と同程度の引張強度および破断伸びを得ることができた。
- (5) フラックスならびに FCW を効果的に活用することで、SUS304 基材上への A5183WY ワイヤの積層造形を実現できた。断面観察結果から IMC の生成を効果的に抑制できていること、当該積層体から切り出した試験片による引張試験から高強度な接合界面が得られていることがわかった。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Deb Roy, T. Wei, H.L. Zuback, J.S. Mukherjee, T. Elmer, J.W. Milewski, J.O. Beese, A.M. Wilson-Heid, A. De, A. Zhang, Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties. Prog. Mater. Sci. 2018, 92, 112-224.
- 2) Milewski, J.O. Additive Manufacturing of Metals; Springer Series in Materials Science; Berlin / Heidelberg, Germany, 2017; Volume 258, pp. 7-33.
- 3) J.O. Milewski. Additive manufacturing of metals, Springer series in materials science, 258(2017), 7-33.
- 4) W.E. Frazier. Metal Additive Manufacturing: A Review, ASM International, 23(2014), 1917-1928.
- 5) V. Schultz, T. Seefeld, and F. Vollertsen. Gap bridging ability in laser beam welding of thin aluminum sheets, Physics Procedia, 56(2014), 545-553.
- 6) R. Suzuki, Engineering Data sheet, J.JWS, 75-6(2005), 459.
- 7) A. Bandyopadhyay and S. Bose. Additive Manufacturing, CRC Press, Florida, 2015.
- 8) I. Gibson, D.W. Rosen, and B. Stucker. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, Berlin, 2009.
- 9) C. Tutor. Additive Manufacturing: analysis of the economic context and evaluation of the indoor air quality, with a Total Quality Management approach, Department of Economics, Society, Politics, University of Urbino, 2018.
- 10) S.A.M. Tofail, E.P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L.O. Donoghue, and C. Charitidis. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, Materials Today, 21(2018), 22-37.
- 11) G.H. Gong, J.J. Ye, Y.M. Chi, Z.H. Zhao, Z.F. Wang, et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: Journal of Materials Research and Technology, 15(2021), 855-884.
- 12) C.L. Tan, F. Weng, S. Sui, Y.X. Chew, and G.J. Bi. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key aeroengine materials, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 170(2021), 103804.
- 13) K. Moeinfar, F. Khodabakhshi, S.F. Kashani-bozorg, M. Mohammadi, and A.P. Gerlich. A review on metallurgical aspects of laser additive manufacturing (LAM): Stainless steels, nickel superalloys, and titanium alloys, 16(2022), 1029- 1068.
- 14) M.M. Ruthandi. High-efficiency and High-quality Laser Welding of Difficult-to-weld Materials, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama university, 2019.
- 15) H.S. Prasad, F. Brueckner, J. Volpp, and A.F.H. Kaplan. Laser metal deposition of copper on diverse metals using green laser sources, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107(2020), 1559-1568.
- 16) K. Shinozaki, M. Yamamoto, Y. Nagamitsu, T. Uchida, K. Mitsuhashi, T. Nagashima, T. Kanazawa, and H. Arashin. Melting Phenomenon during Ultra- High-Speed GTA Welding Method using Pulse-heated Hot-wire, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 27(2009), 22-26.

- 17) K. Shinozaki, M. Yamamoto, K. Mitsuhashi, T. Nagashima, T. Kanazawa, and H. Arashin. Bead formation and wire temperature distribution during Ultra-High-Speed GTA Welding using pulse-heated hot-wire, *welding in the world*, 55(2011), 12-18.
- 18) M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Kadoi, D. Fujita, T. Inoue, M. Fukahori, and Y. Kitahara. Development of Hot-wire Laser Welding Method for Lap Joint of Steel Sheet with Wide Gap, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 29(2011), 58-61.
- 19) R. Phaoniam, K. Shinozaki, M. Yamamoto, K. Kadoi, S. Tsuchiya, and A. Nishijima. Development of a highly efficient hot-wire laser hybrid process for narrow-gap welding—welding phenomena and their adequate conditions, *Welding in the World*, 57(2013), 607-613.
- 20) K. Kadoi, K. Shinozaki, M. Yamamoto, K. Owaki, K. Inose, and D. Takayanagi. Development of High-efficiency / High-quality Hot-wire Laser Fillet Welding Process, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 29(2011), 62-65.
- 21) M. Todo, K. Shinozaki, M. Yamamoto, K. Kadoi, M. Yamamoto, R. Phaoniam, and T. Okagaito. Hot-wire Laser Welding Process Using Laser Diode for Large-Diameter Pipe with Narrow Gap Joint. *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 33(2015), 107-110.
- 22) M. A. Karim, S. Jadhav, R. Kannan, D. Pierce, Y. Lee, P. Nandwana and D. B. Kim: Investigating stainless steel/aluminum bimetallic structures fabricated by cold metal transfer (CMT)-based wire-arc directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, Vol. 81, (2024), 104015.