

技術資料

Technical Data

ワイヤーク積層造形におけるオーステナイトステンレス鋼の機械的特性におよぼす層間温度の影響

内 真人^{*1}, 高橋茉莉^{*1}, 小柳禎彦^{*2}

Effect of interlayer temperature on mechanical properties of austenitic stainless steel in wire arc additive manufacturing

Masato UCHI, Mari TAKAHASHI and Yoshihiko KOYANAGI

Synopsis

Wire arc additive manufacturing (WAAM) is attracting attention as a high-deposition and cost-effective process for producing large metal components. In this study, WAAM walls were fabricated on base plates using a JIS Z 3321 YS316L solid wire. Interlayer temperature was controlled at three levels in the Cold Metal Transfer (CMT) mode, and a pulsed MIG mode (Puls) was also examined for comparison at an interlayer temperature of ≤ 100 °C. The built specimens were evaluated in terms of appearance, internal infill density by X-ray computed tomography (CT), microstructure by optical microscopy/SEM/EBSD, ferrite number (FN) and Vickers hardness, and tensile properties in both horizontal and vertical directions in the as-built condition and after solution treatment (ST: 1050 °C/2 h/water cooler). All builds were completed without arc instability. CMT produced smoother surfaces than Puls, whereas Puls showed a larger inclination in the width direction. X-ray CT revealed spherical porosity of several hundred micrometers in all conditions; however, the average infill density exceeded 99.9 %, and Puls tended to show lower density than CMT. In the as-built state, lower interlayer temperature increased FN and slightly increased hardness, while after ST the FN and hardness decreased and their interlayer-temperature dependence disappeared. The 0.2 % proof stress tended to be higher at ≤ 100 °C in the as-built condition, but decreased after ST and became insensitive to interlayer temperature with reduced anisotropy. Puls exhibited larger scatter in elongation, likely due to pores acting as fracture initiation sites.

1. 緒言

近年、金属積層造形技術は製造業における革新的手法として急速に普及しつつある¹⁾。金属積層造形法の一つであるワイヤーク積層造形 (Wire Arc Additive Manufacturing : WAAM) は、高い積層速度と比較的低コストな材料および設備構成を特徴とすることから、大型金属部材の製造に適したプロセスとして注目されている²⁾。また、オーステナイト系ステンレス鋼であ

る SUS316L は耐食性と韌性に優れ、造船、化学プラント、エネルギー機器など幅広い分野で利用されており³⁾、WAAMによる高効率な製造方法の確立が期待されている⁴⁾。一方、WAAMは積層中の熱履歴が複雑であるため、層間温度の変動が組織形成や残留応力、ひいては機械的特性に影響をおよぼすことが報告されている^{5), 6)}。層間温度は積層造形における熱蓄積を支配する主要因の一つであり、過度な温度上昇は結晶粒の粗大化や析出物の形成を促進し、材料の強度や延性を低下させる可能性がある。

2026年3月31日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

しかし、WAAMプロセスにおいて、層間温度が機械的特性へおよぼす影響を体系的に評価した研究は十分とはいえず、最適な温度管理指針の確立が求められている。本研究では、YS316LのWAAM造形時における層間温度を複数条件で制御し、得られた造形物の組織観察および機械的特性評価を通じて、層間温度が材料特性におよぼす影響を明らかにすることを目的とする。また、溶着金属の機械的特性も併せて評価することで従来プロセスによる部材とWAAM造形物との比較を行った。

2. 実験方法

2. 1 溶接ワイヤ

本研究で用いた溶接ワイヤの化学組成を Table 1 に示す。供試ワイヤは JIS Z 3321 に規定される YS316L を $\phi 1.2$ まで伸線加工したソリッドワイヤである。YS316L は一般的な SUS316L と化学成分が異なり、Ni を低減し Cr を増加させることで凝固時に数 % 程度の δ フェライトを析出させ、凝固割れの抑制を図っている。

Table 1. Chemical composition of welding wire (mass%).

Wire	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
YS316L	0.02	0.5	1.7	12.2	19.4	2.2	Bal.

2. 2 造形方法

溶接ワイヤを用いて Fig. 1 の模式図のとおり SUS301 のベースプレート上に造形物を作製した。造形条件を Table 2 に示す。造形時には 1 層当たり 7 本の平行パスを積層し最終パス中央部を接触温度計にて測温することにより層間温度を管理した。層間温度は 3 水準とした。造形物の傾斜を抑制するため、各層の積層ごとに Torch 走査方向を反転させた。溶接モードには、送給ワイヤおよび入熱を制御して低入熱施工を可能とする CMT (Cold Metal Transfer) を用いた。加えて比較のため、一般的なパルス MIG モード (Puls) による造形も実施した。なお、Puls 条件の層間温度は ≤ 100 °C のみとした。

Table 2. Building process parameters.

Welding power supply	Fronius TPS 500i
Welding process	CMT, Puls
Wire feed rate	6 m/min
Current	162 A
Arc voltage	13.1 V
Scanning speed	60 cm/min
Shielding gas	98 %Ar + 2 %O ₂
Shielding gas flow rate	15 L/min
Interlayer temperature	≤ 100 °C, 300 °C ~ 400 °C, ≥ 400 °C

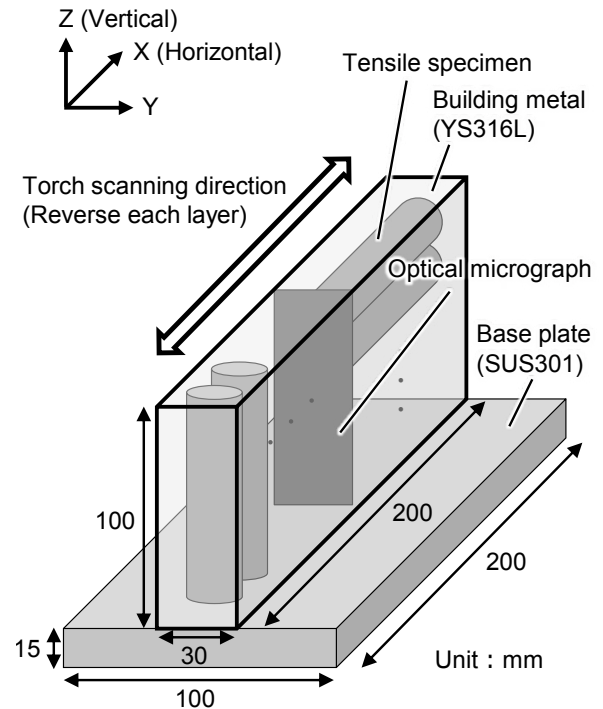


Fig. 1. Building method and specimen sampling location.

2. 3 造形物の特性評価

作製した造形物から組織観察用試験片および引張試験片 (水平・垂直方向) を採取し、造形まま (As built) および溶体化処理 (ST: 1050 °C / 2 h / 水冷) 後の 2 条件の試験片をそれぞれ用意した。組織観察には光学顕微鏡 (OM)、走査電子顕微鏡 (SEM)、電子後方散乱回折 (EBSD) を用いた。組織観察後、ビッカース硬さ試験および磁気誘導法によるフェライト量 (フェライトナンバー: FN) の測定を実施した。磁気誘導法は、フェライト量によって磁気誘導が変化することを利用しており、FN が大きいほど組織中のフェライト量が多いことを示す。引張試験片は、まず $\phi 12 \times 80$ mm に加工し、X 線 CT 装置 (X Seeker 8000) を用いて内部充填率を評価した。その後、JIS Z 3111 Type II A2 形状に加工し JIS Z 2241 に準拠し室温引張試験を実施した。

2. 4 溶着金属の特性評価

溶接ワイヤを用いて JIS Z 3111 に準拠し溶着金属を作製した。作製した溶着金属から JIS Z 3111 Type II A2 に準拠する試験片に加工し室温引張試験を実施した。

3. 結果および考察

3. 1 造形物の外観

Fig. 2 に造形物の外観を示す。いずれの条件において

もアーク切れ等の異常は認められず、所定の形状まで積層が完了した。CMT条件では、層間温度に依らず面だけは認められず、造形面は比較的平滑であった。一方、Puls条件では、幅方向の傾斜が顕著であった。CMTはPuls条件に比べて低入熱で施工可能であるため、造形中の熱蓄積を抑制でき、結果としてビード形成性が向上したと考えられる。

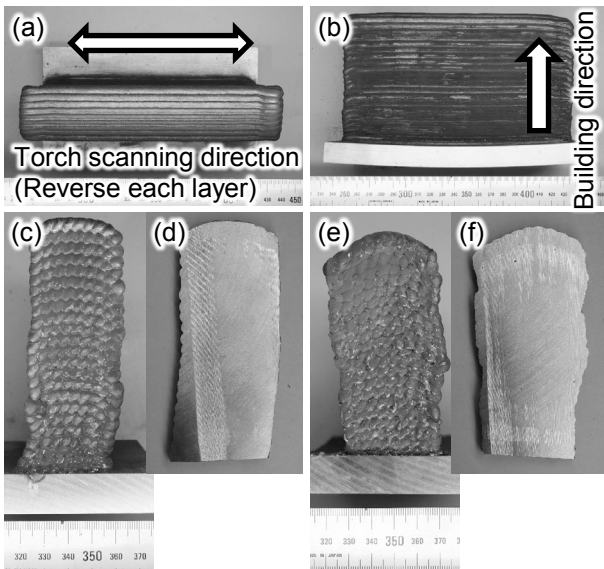


Fig. 2. Appearance of building metal by CMT at an interlayer temperature of ≤ 100 °C (a) Top view, (b) long-side view, (c) short-side view, and (d) central cross-section and those built by puls at an interlayer temperature of ≤ 100 °C (e) short-side view, and (f) central cross-section.

3. 2 造形物の内部充填率

Fig. 3にX線CTによる試験片の撮影像および各条件における平均充填率を示す。いずれの造形物においてもブローホールと考えられる数百 μm の球状空隙が確認された。平均充填率はいずれの造形物においても99.9%を超える高い値を示した。CMT条件では層間温度に依らず同程度であったのに対し、Puls条件ではCMT条件に比べて低い傾向を示した。これは、Puls条件では造形中の溶融池が大きくシールドガスを巻き込みやすいため、ブローホールの発生量が増加した可能性がある。

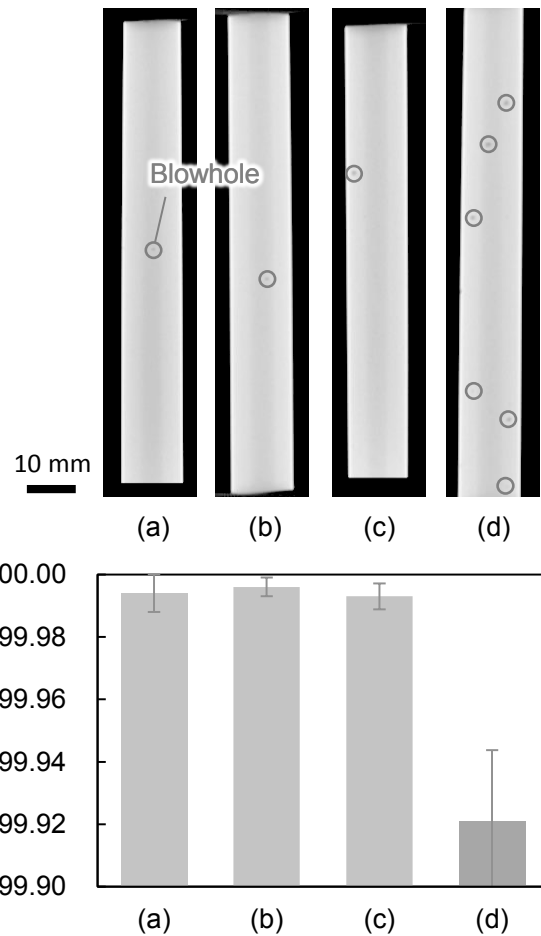


Fig. 3. X-ray CT images of the test specimens and the average infill density for each condition (a) CMT at an interlayer temperature of ≥ 400 °C (b) CMT at an interlayer temperature of 300 °C~400 °C (c) CMT at an interlayer temperature of ≤ 100 °C and (d) Puls at an interlayer temperature of ≤ 100 °C.

3. 3 造形物の金属組織

光学顕微鏡による観察組織をFig. 4に示す。いずれの造形条件においてもAs builtではオーステナイト相を母相とし、バミキュラー δ フェライトおよびレーシー δ フェライトが積層方向に連なった組織を呈した。ST後は島状の δ フェライトが散在する組織であった。Fig. 4の各組織写真には、右上に磁気誘導法で測定したフェライトナンバー(FN)、左上にピッカース硬さ(HV)を併記した。As builtでは層間温度が低いほどFNが増加した。これは層間温度が低いほど凝固時の冷却速度が速くなり、 δ フェライトからオーステナイトへの変態に要する時間が短縮され、 δ フェライトの残留量が増加したためと考えられる。一方、ST後ではAs builtに比べてFNが低く、層間温度の影響は認められなかった。硬さについても、As builtでは層間温度 ≤ 100 °Cでわずかに

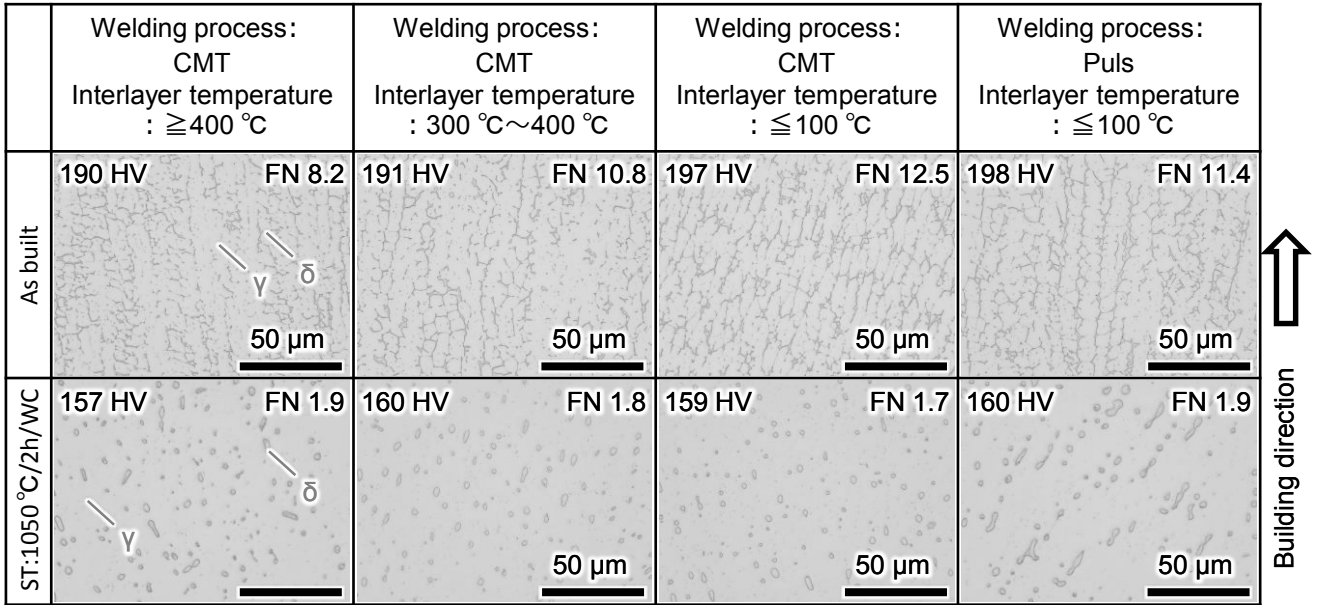


Fig. 4. Optical microscopic images of building metal and ferrite number and hardness.

高い傾向を示したが、ST後ではAs builtに比べて低下し、層間温度による差は認められなかった。

Fig. 5およびFig. 6にSEM観察結果の一例を示す。いずれの造形条件においてもAs builtでは、径1 μm以下の球状粒子が点在していた。SEM-EDSによる定性分析の結果、球状粒子はSi-Mn系酸化物であった。層間温度による析出物の形態および分布の顕著な差は認められなかった。また、特性低下を引き起こすσ相やCr窒化物は確認されなかった。

Fig. 7にEBSD観察結果の一例を示す。いずれの造形条件においても造形物組織は積層方向からやや傾斜して伸長するミリスケールの柱状晶を呈し、層間温度が結晶粒径におよぼす明確な影響は確認されなかった。なお、層間温度 $\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ の条件では、ST後に結晶粒界近傍で部分的な再結晶が認められた。これは、層間温度が低いほど冷却速度が速くなり急冷され、造形中に転位が蓄積しやすくなるためと推察される。

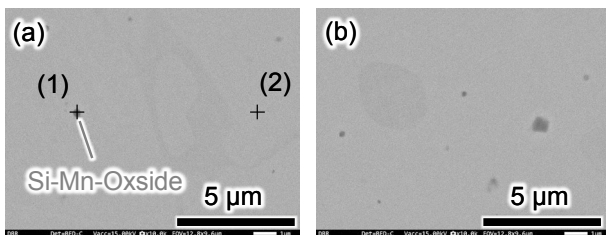


Fig. 5. SEM results of building metal by CMT at an interlayer temperature of $\geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, for (a) As built, (b) After ST.

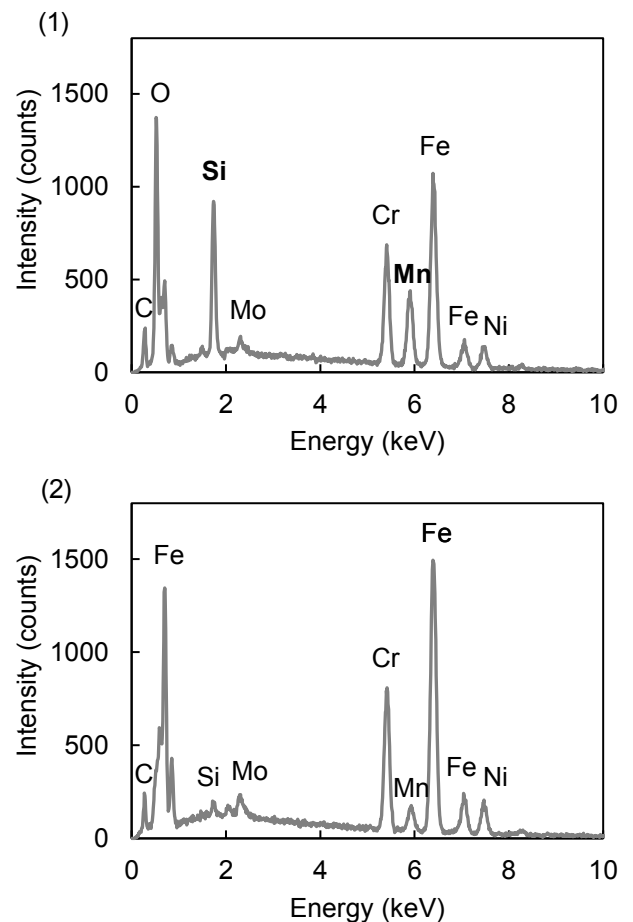


Fig. 6. SEM-EDS results in Fig. 5 of (a).

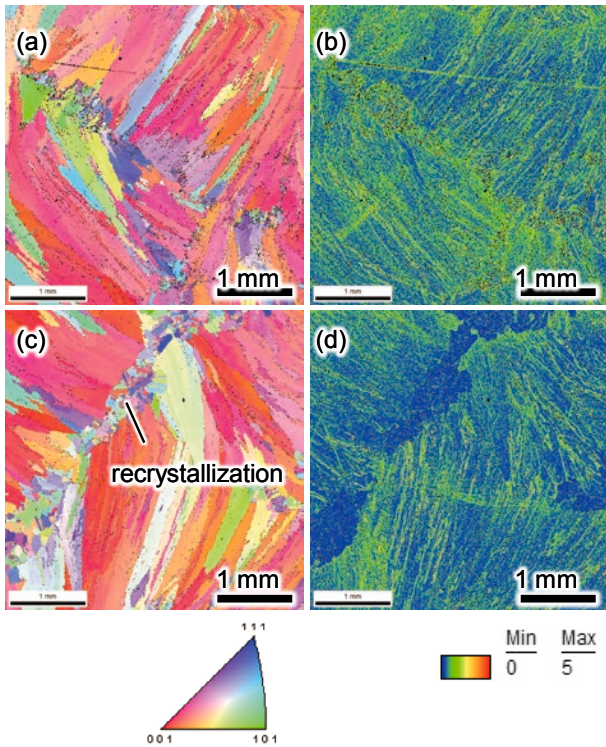


Fig. 7. EBSD IPF maps for (a) as built (c) after ST, and EBSD KAM maps for (b) as built (d) after ST, built by CMT at an interlayer temperature of ≤ 100 °C.

3. 4 造形物の機械的特性

引張試験結果を Table 3 および Fig. 8 に示す。As built では層間温度 ≤ 100 °C の条件で 0.2 % 耐力が高い傾向を示した。一方、ST 後では As built に比べて 0.2 % 耐力が低下し、層間温度による差は認められなかった。これは、As built では造形中に導入される転位等の加工硬化要因で層間温度依存性が生じるのに対し、ST により回

復・再結晶が進行して転位密度が低下し⁷⁾、各条件の差が縮小したためと考えられる。また、As built では垂直方向に比べて水平方向の 0.2 % 耐力が高かったが、ST 後では異方性は小さくなる傾向を示した。これは、As built における δ フェライトの配向性が異方的な変形挙動に寄与し⁶⁾、ST 後に δ フェライトが減少・分断されることで異方性が緩和されたためと推察される。

引張強さは、As built に比べて ST 後で低い傾向を示し、水平方向に比べて垂直方向が低い傾向を示したが、層間温度による明確な差は認められなかった。伸びは As built に比べて ST 後で高い傾向を示し、水平方向に比べて垂直方向が高い傾向を示した。伸びに対する層間温度の影響は限定的であった。絞りについては、本研究範囲では条件間の明確な傾向は認められなかった。

溶着金属の機械的特性は層間温度 ≤ 100 °C の WAAM 造形物と概ね同程度の値を示した。両者の冷却速度が近く、類似の組織形態を呈したことが一因と考えられるが、定量的な検証にはさらなる調査が必要である。

CMT 条件のうち層間温度 ≤ 100 °C では、水平方向・垂直方向ならびに As built / ST 後のいずれにおいても鍛造材規格である ASTM A182 (F316L) の規格値を満足した。

引張強さと伸びの関係を Fig. 9 に示す。Plus 条件では同一条件内であっても伸びに 30 % 以上のばらつきが生じており、CMT 条件に比べて特性のばらつきが大きかった。引張試験後の破面 SEM 観察像を Fig. 10 に示す。いずれの試験片においても、破面はデンプルを伴う延性破面であった。一部の試験片では、造形中に形成されたブローホールに起因すると思われる空隙が破面上に確認された。これらの欠陥は局所的な応力集中を招き、早期破断の要因となった可能性がある。Puls 条件で

Table 3. Tensile properties of building metal.

Welding process	Interlayer temperature	Direction	0.2 % Proof stress (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)		Reduction of area (%)	
			As built	After ST	As built	After ST	As built	After ST	As built	After ST
CMT	≥ 400 °C	Horizontal	360	239	574	507	40	49	63	66
CMT	≥ 400 °C	Vertical	301	233	538	477	52	64	65	67
CMT	300 °C~400 °C	Horizontal	355	237	570	503	42	46	65	64
CMT	300 °C~400 °C	Vertical	303	228	544	481	51	61	65	69
CMT	≤ 100 °C	Horizontal	394	246	571	505	39	50	60	62
CMT	≤ 100 °C	Vertical	338	242	534	493	52	65	51	57
Plus	≤ 100 °C	Horizontal	397	242	575	505	60	62	59	63
Plus	≤ 100 °C	Vertical	345	232	499	459	51	57	56	59
Actual values of deposited metal			401	243	571	507	39	45	64	58
F316L wrought property (ASTM A182)			≥ 170		≥ 485		≥ 30		≥ 50	

はブローホールが多い傾向が認められたため、ばらつきが増大したと考えられる。

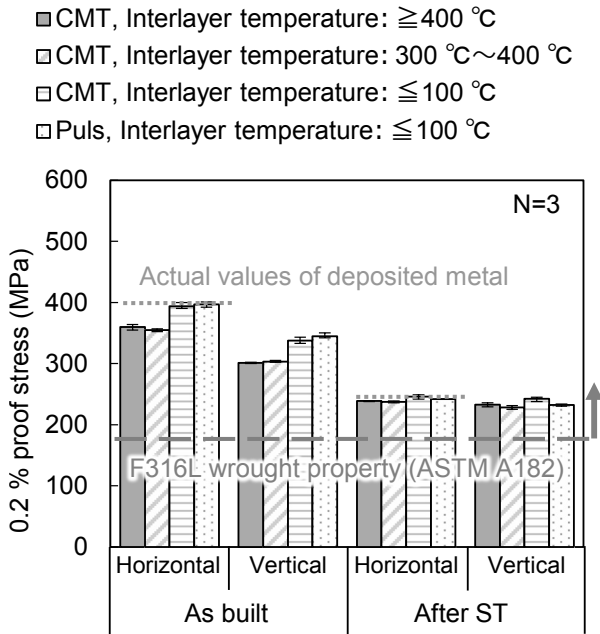


Fig. 8. Effect of Interlayer temperature on 0.2 % proof stress.

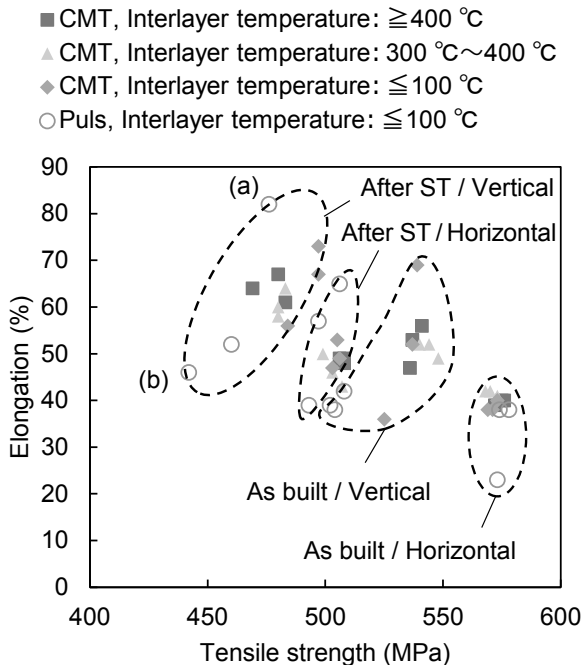


Fig. 9. Relationship between tensile strength and elongation.

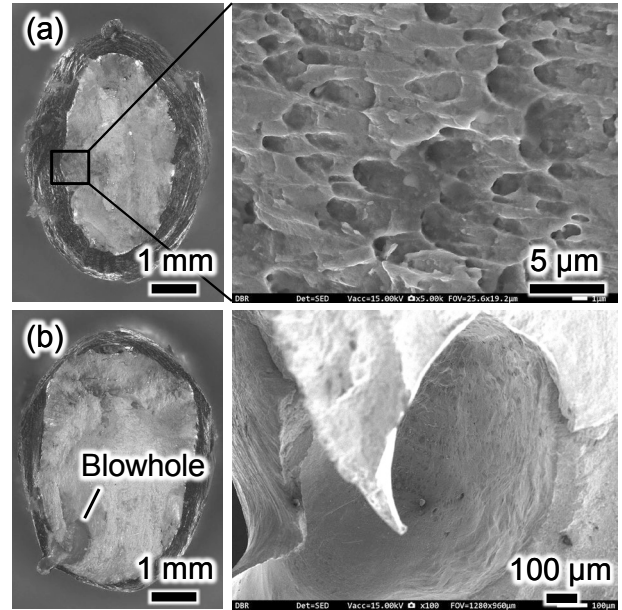


Fig. 10. SEM images of fracture surfaces after tensile testing in Fig. 9 of (a) and (b).

4. 結 言

本研究では、YS316L ソリッドワイヤを用いて WAAM 造形を行い、層間温度を 3 水準で制御した CMT 条件ならびに比較として Puls 条件（層間温度 ≤ 100 °C）について、造形物の外観、内部充填率、金属組織および機械的特性を評価した。得られた知見を以下にまとめる。

- いずれの条件においても造形中にアーク切れ等の異常は認められず、所定形状の造形が可能であった。CMT 条件では層間温度に依らず面だれが抑制され、造形面は比較的平滑であった。一方、Puls 条件では幅方向の傾斜が顕著であり、低入熱で施工可能な CMT は熱蓄積を抑制し、ビード形成性に優れることが示唆された。
- X線 CT により、いずれの条件でも数百 μm 程度の球状欠陥（ブローホール）が確認された。平均充填率は全条件で 99.9 % 超の高い値を示したが、Puls 条件は CMT 条件に比べて低い傾向を示した。これは、Puls 条件では溶融池が大きくシールドガスを巻き込みやすいことに起因する可能性がある。
- 金属組織は、As built ではオーステナイト母相中にバミキュラー/レーシー δ フェライトが積層方向に連なって生成し、層間温度が低いほどフェライトナンバー (FN) が増加した。これは冷却速度の上昇

により $\delta \rightarrow \gamma$ 変態時間が短縮され、 δ フェライトの残留量が増加したためと考えられる。ST後は島状 δ フェライトが散在する組織となり、FNおよび硬さは低下して層間温度依存性は認められなかった。また、SEMでは直径 $1 \mu\text{m}$ 以下の Si-Mn系酸化物が点在したが、層間温度による顕著な差は認められず、 σ 相や Cr窒化物は確認されなかった。EBSDではミリスケールの柱状晶が観察され、結晶粒径に対する層間温度の明確な影響は確認されなかった。なお、層間温度 ≤ 100 ℃条件ではST後に粒界近傍で部分的再結晶が認められ、低層間温度でのひずみ蓄積が関与する可能性が示唆された。

- (4) 機械的特性に関して、As builtでは層間温度 ≤ 100 ℃条件で0.2%耐力が高い傾向を示した。一方、ST後は0.2%耐力が低下し、層間温度による差は認められなかった。As builtで観察された0.2%耐力の層間温度依存性は、造形中に導入される加工硬化要因(転位密度等)および δ フェライトの形態に起因し、STにより回復・再結晶の進行と δ フェライトの減少・分断を通じて差が縮退したものと推察される。引張強さはST後で低く、伸びはST後で高い傾向を示し、層間温度の影響は限定的であった。Puls条件では伸びのばらつきが大きく、破面観察よりブローホールに起因する早期破断がばらつき増大の一因と考えられた。
- (5) 溶着金属の機械的特性は、層間温度 ≤ 100 ℃のWAAM造形物と概ね同程度であった。また、CMT条件の層間温度 ≤ 100 ℃では、水平方向・垂直方向ならびにAs built/ST後のいずれにおいてもASTM A182(F316L)の規格値を満足した。

積層造形は、急冷・吸熱を伴う多重熱サイクル下で進行する非平衡プロセスであり、プロセスパラメータが多岐にわたることから、複数の現象が相互に影響し合う。したがって、造形物がどのような組織状態にあるかを十分に把握するとともに、必要に応じてシミュレーションソフトウェア等も活用し、従来の溶接プロセスとの類似点および相違点を整理・理解することが重要である。これらの理解に基づき、積層造形に関する規格の整備が進むとともに、本技術のさらなる社会実装が促進されることを期待する。

(文 献)

- 1) A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau and K. Hayward: Applied Science, 11(2021), 3, 1213.

- 2) J. Liu, Y. Xu, Y. Ge, Z. Hou and S. Chen: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111(2020), 149.
- 3) J. R. Davis (Ed.), ASM Speciality Handbook Stainless Steels, American Society for Metals, Metals Park, Ohio 1994.
- 4) T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos and J. P. Oliveira: Materials, 12(2019), 7, 1121.
- 5) P. Badoniya, M. Srivastava, P. K. Jain: Materials Today Communications, 43(2025), 111758.
- 6) N. K. Mishra, V. Ajay, J. Nakrani, A. Shrivastava: Journal of Manufacturing Processes, 145(2025), 600.
- 7) C. Wang, P. Zhu, Y. H. Lu, T. Shoji: Materials Science & Engineering A, 832(2022), 142446.



内 真人



高橋茉莉



小柳禎彦