

WAAM 方式で作製したステンレス製金属積層造形物の特性把握

Understanding characteristic of stainless structures formed by wire and arc additive manufacturing

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 安齋弘樹 穴澤大樹

ワイヤーク式金属積層造形で作製したオーステナイト系ステンレス鋼積層造形物の機械的特性及び金属組織の特性を調べた。引張特性には異方性が存在し、固溶化熱処理後も異方性は失われないことを確認した。また、金属組織観察により、オーステナイト中に網目状フェライトが存在することを確認した。介在物として Mn、Si 系酸化物が存在し、固溶化熱処理によって網目状フェライトが分解するとともに、介在物が減少することを確認した。

Key words: 金属積層造形、WAAM 方式、ハイブリッド複合加工機、機械的特性、金属組織

1. 緒言

金属積層造形技術が様々な分野で活用が進んでいる。応募企業では現在、鋳造や切削加工により製品を製造しているが、オーステナイト系ステンレス鋼材を対象に、金属積層造形技術の活用を検討している。特に、形状付加や大型品造形に強みを持つ指向性エネルギー堆積方式 (DED) 方式に注目している。しかし、金属積層造形に関する研究報告の多くがパウダーベッド方式 (PBF) に関するものであり、DED 方式に関する知見が少ないことが技術導入の障壁となっている。

当所では、DED 方式のうちワイヤーク式金属積層造形方式 (以下、WAAM 方式とする) と 5 軸切削加工とのハイブリッド加工機を保有しており、WAAM 方式による積層造形物の研究を実施してきた。昨年度は、オーステナイト系ステンレス鋼積層造形物のポイド評価や、トーチパスと垂直方向の引張試験等を行った¹⁾。

今後、技術導入の検討を進めるためには、上記結果に加えて、下記の点についても調査する必要がある。

金属積層造形物の引張特性について、PBF 方式では異方性が確認されている²⁾。異方性がある材料では、使用時に想定される負荷方向を考慮して設計や製造を行うことで高い機能性を発揮できる。実用化においては、WAAM 方式による積層造形物も PBF 方式と同様の異方性を持つのか確認する必要がある。

また、オーステナイト系ステンレス鋼の積層造形物は、耐食性向上と残留応力除去のために、固溶化熱処理を行うことが一般的である。WAAM 方式で作製した積層造形物の機械的特性や金属組織が、固溶化熱処理によってどのように変化するのも調査する必要がある。

そこで、本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼の積層造形物において、トーチパスに対して垂直方向と水平方向の機械的特性を評価し、異方性の有無を調べた。併せて熱処理前後の比較や組織解析も行い、WAAM 方式による積層造形物の特徴を調査した。

2. 実験

2. 1. 機械的特性の評価

積層造形には、ヤマザキマザック (株) 製のハイブリッド複合加工機 (VARIAXIS j-600/5X AM ワイヤーク式) を用いた。積層条件は表 1 のとおりである。ワイヤは直径 1.2[mm] の JIS 規格 YS316L 相当である (株) タセト製 MG316L を使用した。MG316L 及び類似組成の SUS316L の主な化学成分を表 2 に示す。

積層造形物は図 1 に示す幅 150[mm]、高さ 150[mm] 程度の立壁形状とした。トーチパスは、トーチを X 方向に 150[mm] 送り、Z 方向に 2.5[mm] 移動、送り方向を反転させて X 方向に 150[mm] 移動を繰り返している。ヤマザキマザック (株) 製のサーモグラフィカメラ (VARIAXIS j-600/5X AM 用サーモグラフィシステム) によって 1 層毎に温度を確認し、100[°C] 以下となつてから次の層を積層した。

積層造形後、図 2、図 3 に示すように積層方向に対して垂直方向と水平方向の試験片を各 6 本切り出した。試験片の寸法は図 4 のとおりである。切り出しにはワイヤ放電加工機を用いた。切り出し後は、フライス盤により積層造形時の凹凸を除去し、サンドペーパーで加工変質層を除去した。切り出した引張試験片は、3 本は熱処理せずに試験を行い、3 本は固溶化熱処理を行った後に試験を行った。固溶化熱処理は 1050[°C] で 1 時間加熱後に水冷した。表面に生じた酸化スケールはサンドペーパーで除去した。

引張試験には (株) 島津製作所製の万能材料試験機 (AG-100KNXPlus) を用い、ひずみの測定にはビデオ式伸び計を用いた。

表 1 積層条件

電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	シールドガス
190	13.0	6	400	Ar+O ₂

表2 ワイヤ及びSUS316Lの化学成分

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]
MG316L	≦0.03	≦0.65	1.0~2.5	≦0.03	≦0.03	11.0~14.0	18.0~20.0	2.0~3.0
SUS316L	≦0.03	≦1.00	≦2.0	≦0.045	≦0.03	12.0~15.0	16.0~18.0	2.0~3.0

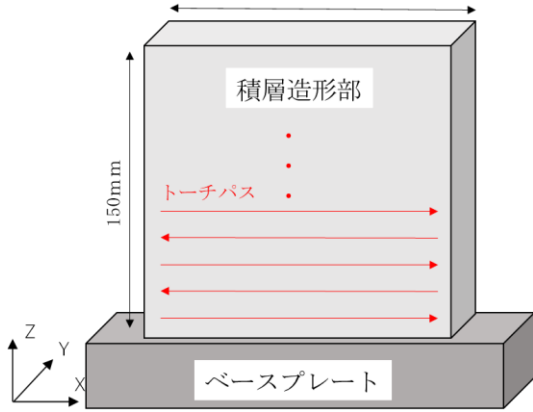


図1 積層造形のトーチパス

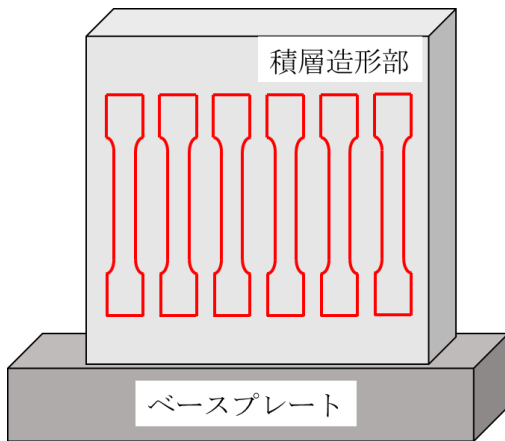


図2 垂直方向の試験片切り出し位置模式図

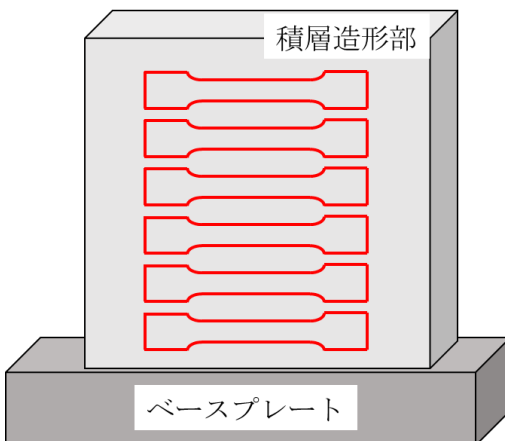


図3 水平方向の試験片切り出し位置模式図

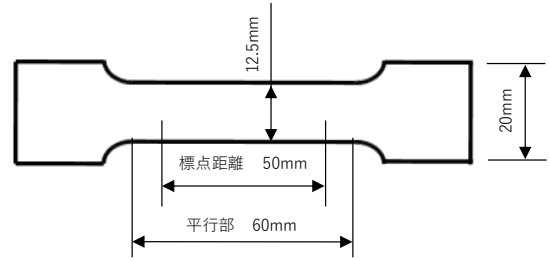


図4 試験に用いた引張試験片の形状

2. 2. 金属組織解析

金属組織解析用の試料は、引張試験片と同じ積層造形物から採取し、一部の試料を引張試験片と同様に固溶化熱処理した。試料は切断、樹脂埋め、鏡面研磨を行い、オリンパス(株)製の金属顕微鏡(GX-71)及び(株)日立ハイテクノロジーズ製の走査型電子顕微鏡(S-3700N)により観察を行った。光学顕微鏡観察の前処理には、10[%]シュウ酸水溶液中で3[V]にて30秒電解エッチングを行った。

3. 結果

3. 1. 機械的特性の評価

引張試験結果を表3に示す。JIS G 4303に規定されているSUS316Lの規格と比較すると、熱処理前の水平方向のみ全ての項目で規格を満たしている。一方で、その他の試験片では、引張強さ、0.2%耐力は規格を満たすが、伸びは規格値以下となっている。

また、熱処理の前後いずれの場合でも、水平方向に比べ、垂直方向の引張強さが大きく、伸びが小さい特性異方性が存在することが分かる。そのため、想定される負荷方向を考慮した上で積層造形を行うことで、高い機能が得られると期待できる。

一方で、熱処理を行った場合には、どちらの方向においても引張強さ、0.2%耐力、伸びが低下している。特性が低下した原因として、後述する熱処理による金属組織変化が考えられるが、本研究内での原因の特定は難しく、今後、引き続き調査を進める必要がある。

表3 引張試験結果

	引張強さ [N/mm ²]	0.2%耐力 [N/mm ²]	伸び [%]
垂直方向 熱処理前	558	290	32
水平方向 熱処理前	513	312	41
垂直方向 熱処理後	509	244	28
水平方向 熱処理後	483	234	37
SUS316L規格値	480以上	175以上	40以上

3. 2. 金属組織解析

図5に熱処理前のYZ面の金属組織を、図6に熱処理後のYZ面の金属組織を示す。図5から、Z軸方向に向けて結晶成長した異方性のある組織であることが分かった。図6では、網目状組織が熱処理によって分解されるものの、組織異方性は完全に失われていないことが分かる。ここで、網目状に観察される組織は、シェフラの組織図³⁾とワイヤ組成から、オーステナイト中に5~10[%]含まれるフェライトと推測される。確認のために、素地組織及び網目状組織のSEM-EDSによる定性分析を行った結果を図7、図8に示す。網目状組織の方が、フェライト化元素であるCrとMoのピークが高く、オーステナイト化元素のNiが少ないことが分かる。このことから網目状組織がフェライトであると考えられる。

このフェライト相からは700[°C]~900[°C]程度の熱処理によって短時間でFe、Cr、Moの金属間化合物である σ 相が析出することが知られている⁴⁾。 σ 相は硬く脆い組織で機械的特性を著しく低下させる。熱処理後の機械的特性低下の原因に σ 相の析出が考えられるが、図9の破断面観察では、脆性破壊の様子は見られなかった。 σ 相については、今後、X線回折法や着色エッチング法により評価する必要がある。

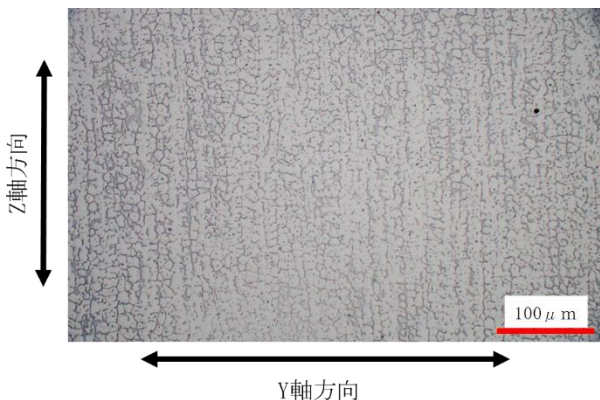


図5 熱処理前の金属組織(YZ面)

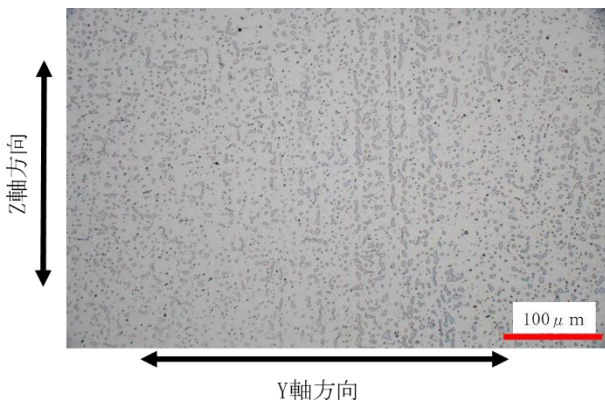


図6 熱処理後の金属組織(YZ面)

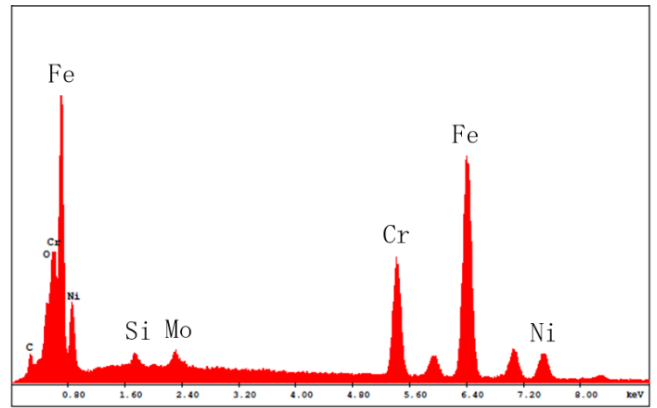


図7 素地組織の定性分析結果

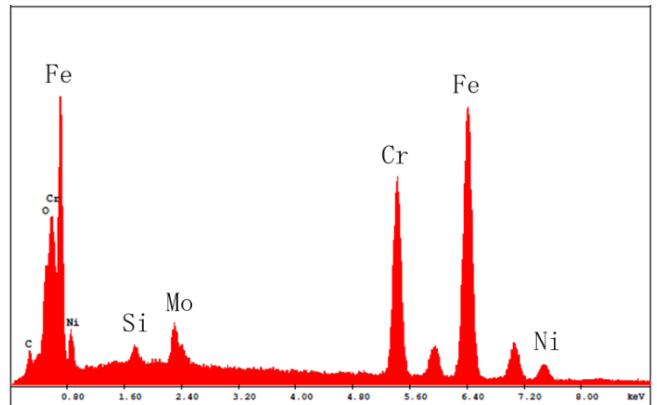


図8 網目状組織の定性分析結果

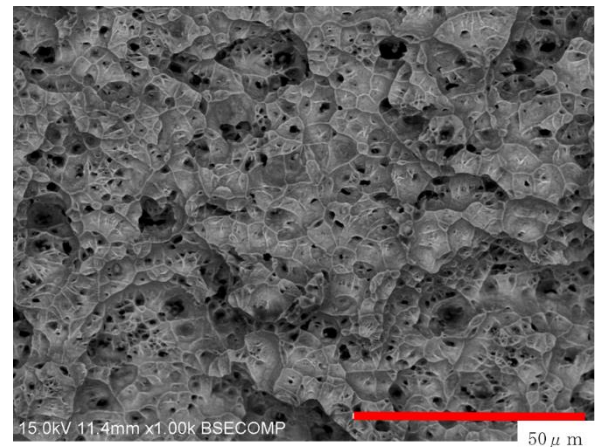


図9 引張破断面写真(垂直方向熱処理後)

また、組織中に多数存在する黒い点をSEM-EDSで定性分析したところ、Mn、Si系の酸化物であると推測された。結果を図10に示す。これは、溶接ワイヤに脱酸材として含まれるMn、Siが組織中に取り込まれたものと考えられる。通常の溶接では、これらのMn、Siと酸素が反応し生成する酸化物は、比重が小さく、熔融池表面にスラグとして浮上するため、組織中に取り込まれることは少ない。本研究で用いているWAAM方式では、その表面にさらに積層造形を行うため、酸化物が

取り込まれてしまい、組織中に分散していると考えられる。図11、図12にはSEMの反射電子像観察による熱処理前後の比較写真を示した。この結果から Mn、Si 系酸化物は熱処理によって減少していることが分かる。

組織中の Mn、Si 系酸化物の存在によって機械的特性にどの程度悪影響を与えているかは不明であるが、耐食性の劣化は懸念される。酸化物の存在はその種類や大きさにより、ステンレス鋼表面の不動態被膜の形成を阻害し、耐食性を低下させるという報告⁵⁾もあり、今後、耐食性試験により評価する必要があると考える。

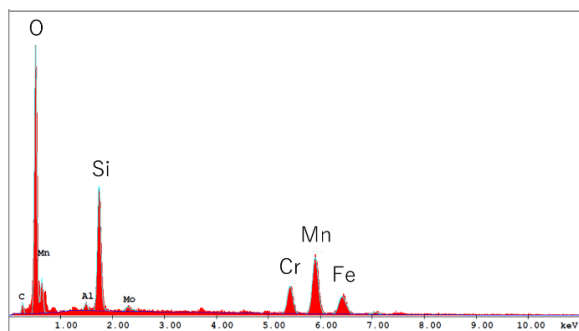


図10 析出物の定性分析結果

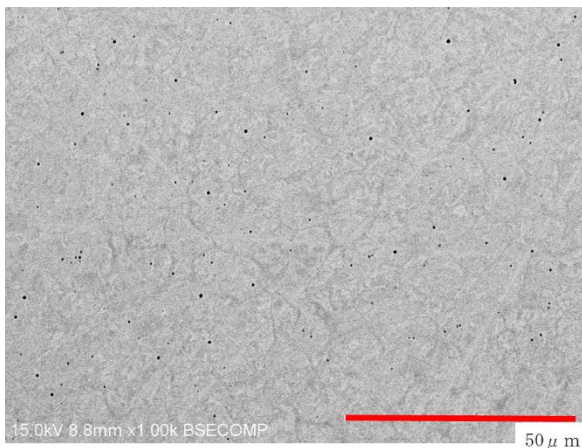


図11 反射電子像観察写真(熱処理前)

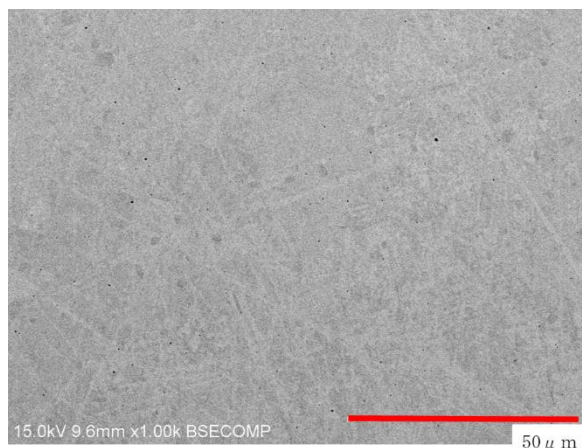


図12 反射電子像観察写真(熱処理後)

4. 結言

MG316L を用いて作製した積層造形物の特性把握として、熱処理前後における、垂直方向と水平方向の機械的特性評価及び組織解析を行ったところ、以下の結果を得た。

- ・SUS316L の規格と比較すると、引張強さ及び0.2%耐力は全ての試験片で規格を満足している。一方、伸びは熱処理前の水平方向のみが規格を満たしている。
- ・積層造形物の機械的特性は、水平方向に比べ、垂直方向の引張強さが大きく、伸びが小さいという異方性を持つ。想定される負荷方向を考慮した上で積層造形を行うことで、高い機能性が得られると期待できる。
- ・固溶化熱処理によって異方性は失われませんが、機械的特性が低下する。機械的特性低下の要因として σ 相の析出が考えられ、今後評価を行う必要がある。
- ・積層造形物の金属組織はオーステナイト中に網目状のフェライトが含まれる組織となる。網目状フェライトは、固溶化熱処理により分解される。
- ・組織中には Mn、Si 系酸化物が存在し、固溶化熱処理によって減少する。酸化物の存在による機械的特性への影響は不明であるが、耐食性への影響が懸念され、今後評価を行う必要がある。

参考文献

- 1) 安齋弘樹, 仲沼岳, 松浦和俊. 金属積層造形物の特性把握. 令和3年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/652144_1827844_misc.pdf, (参照2023-02-15)
- 2) 静岡県工業技術研究所. 樹脂及び金属3Dプリンタ造形物の物性情報と公設試験機関の取り組み. 令和5年1月. pp.46-49.
- 3) 社団法人溶接学会. 改訂3版 溶接便覧. 丸善株式会社, 昭和52年, p983.
- 4) 小畑英一, 伊藤一夫, 飯久保知人. 二相ステンレス鋼における σ 相析出挙動. 電気製鋼. 昭和53年, 第49巻, 第4号, pp.242-250.
- 5) 森陽一, 高業飛, 廖金孫, 元田慎一. 二相ステンレス鋼の耐食性における介在物の影響. 材料と環境. 2017年, 第66巻, 第4号, pp.142-146.