

# 切削加工品の代替としての WAAM 方式金属積層造形品の可能性評価

## Evaluation of wire and arc additive manufacturing products as an alternative to machined products

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 安齋弘樹 小林翼 穴澤大樹

国立大学法人東京農工大学 笹原弘之

難加工材であるニッケル合金を対象として、積層造形品の熱処理条件の検討や機械的特性、金属組織の評価を行った。熱処理条件によって析出物の種類や大きさが変化する一方で、硬さにはあまり差が見られないことが分かった。機械的特性には異方性は見られず、熱処理によって引張強さや耐力が向上し、伸びが低下することを確認した。また、SUS316 上への積層造形では、十分な接合強度が得られることが分かった。

**Key words:** 金属積層造形、WAAM 方式、ニッケル合金、機械的特性、金属組織

## 1. 緒言

昨今、世界的に金属積層造形技術の活用が進んでおり、パウダーベッド方式 (PBF) や指向性エネルギー堆積方式 (DED) など様々な手法が開発されている。金属積層造形は、設計の自由度が高く、軽量化や部品点数削減等のメリットがあるため、従来の加工方法に代わる製造技術として注目されている。当所では、DED 方式のうち、金属ワイヤを溶融、凝固させるワイヤアーク式金属積層造形 (以下、WAAM 方式とする) を対象に研究を行ってきた<sup>1)</sup> これまでの結果から、複雑形状品の加工においては、切削加工に比べ、WAAM 方式の方が加工時間と材料費において優れることが分かっている。特に、難削材においては、加工時間や工具代、材料費の観点から、金属積層造形 (以下、積層造形とする) のメリットが大きいと考えられる。一方で、積層造形技術導入の際には、造形物の機械的特性の把握等が必要である。しかしながら、金属積層造形に関する研究は PBF 方式が主であり、WAAM 方式の研究は知見が少ない状況である。

そこで、本研究では、難削材であるニッケル合金を対象として、積層造形品の機械的特性や金属組織等を調査することで、WAAM 方式の適用可能性について評価した。

## 2. 実験

### 2. 1. 積層造形条件の検討

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 ワイヤアーク式) を用いた。積層造形条件は表 1 のとおりである。ここで、“CMT” は “Cold Metal Transfer” の略称であり、ワイヤ送給制御による低入熱、低スパッタを特徴とする溶接方法である。“P” は “Puls” の略称であり、周期的に高い電流を流し、深い溶け込みを得る溶接方法である。入熱及びパス間の温度を変えた 4 通事業名「基盤技術開発支援事業」

りの積層条件で造形を行った。金属ワイヤは直径 1.2 [mm] の特殊電極 (株) 製 M-NIC-718 (JIS Z3334 SNI7718 該当) を使用した。M-NIC-718 及び類似組成の Incone1718 の化学成分を表 2 に示す。ベースプレートは SUS304 とし、シールドガスには Ar を使用した。

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 145 [mm] 送り、Z 方向に 2.0 [mm] 移動、送り方向を反転させて X 方向に 145 [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、指定温度以下となつてから次の層を積層した。

積層造形条件が適正か確認する試験として、X 線 CT による内部観察と溶け込み部の断面観察を実施した。内部観察には、東芝 IT コントロールシステム (株) 社製の X 線 CT 装置 (TOSCANER-24500AVFD) を用いた。断面観察は、積層造形物のおおよそ中央部から切り出し、樹脂包埋、鏡面研磨を行い、(株) キーエンス社製のデジタルマイクロスコープ (VHX-7000) により観察を行った。測定項目は、図 2 に示す溶け込み深さ、1 層目のビード幅、溶け込み深さの 1/2 位置における溶け込み幅とした。

表 1 積層造形条件

試料 No.	溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤフィード	トーチ送り [mm/min]	パス間温度 [°C]
				[m/min]		
1	P	150	17	6	400	200
	CMT	140	14.1			
2	P	150	17	6	400	100
	CMT	140	14.1			
3	P	228	22.3	9	600	200
	CMT	195	17			
4	P	228	22.3	9	600	100
	CMT	195	17			

表2 ワイヤ及び Inconel718 の化学成分

単位  
[%]

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	Mo	Cu	Al	Ti	Nb	B
M-NIC-718	≤0.08	≤0.3	≤0.3	50.0~55.0	17.0~21.0	≤24.0	2.8~3.3	≤0.3	0.2~0.8	0.7~1.1	4.8~5.5	≤0.006
Inconel718	≤0.08	≤0.35	≤0.35	50.0~55.0	17.0~21.0	bal	2.8~3.3	≤0.3	0.2~0.8	0.65~1.15	4.75~5.50	≤0.006

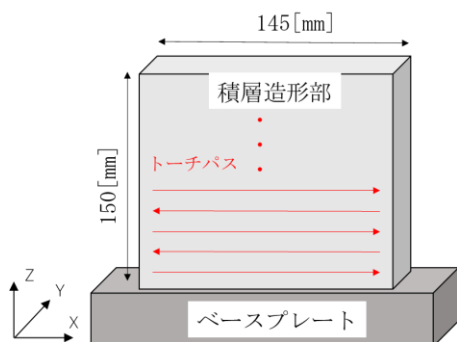


図1 積層造形のトーチパス

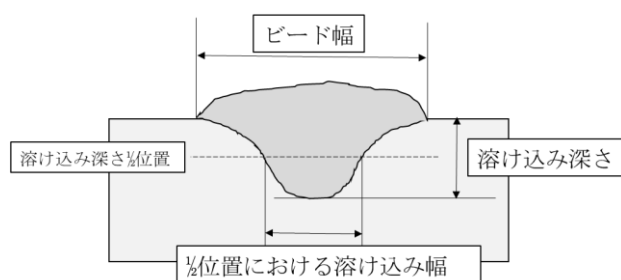


図2 溶け込み測定項目

に、樹脂包埋、鏡面研磨し、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。金属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20秒電解エッチングを行った。

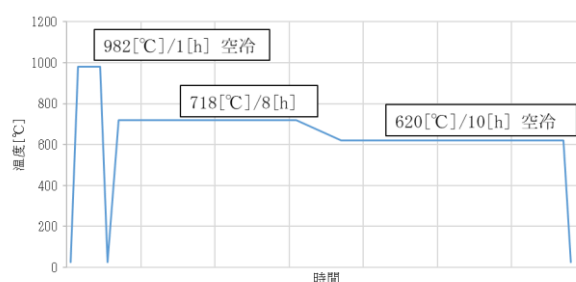


図3 インコネル 718 標準熱処理条件

表3 熱処理条件

条件 No.	溶体化処理条件	時効処理条件
1	982[°C]/1[h] 空冷	718[°C]/8[h]→ 620[°C]/10[h] 空冷
2	1080[°C]/1[h] 空冷	
3	-	

## 2. 2. 熱処理条件の検討

対象としているニッケル合金は熱処理合金であるため、規定の特性を得るために、積層造形後に熱処理を行う必要がある。類似組成の Inconel718 において、AMS 規格では、図3のような熱処理条件が規定されており、通常、溶解鍛造材においては図3の条件で熱処理されている。しかし、積層造形品では、特有の熱履歴を有するために、最適な熱処理条件が異なる可能性がある。

そこで、表3に示す3条件で熱処理を実施し、各条件における金属組織観察と硬さ試験を行った。条件1はAMS規格準拠の標準熱処理条件である。条件2は溶体化処理温度を1080[°C]として、 $\delta$ 相の固溶温度以上となる条件とした。条件3は時効処理のみ実施する条件である。積層造形品は造形時の入熱で溶体化温度を一度超えているため、溶体化処理を実施せずに熱処理が成立するか確認するために設定した。

試料は、10[mm]角程度に切断後に、アドバンテック(株)社製の電気マuffle炉(FUW230PB)のプログラム運転にて、大気雰囲気中で熱処理を実施した。熱処理後

## 2. 3. 機械的特性評価

機械的特性評価は、引張強さ、0.2[%]耐力及び伸びとした。評価に用いた試験片は、表4の条件で積層造形後、図4、図5に示すように積層方向に対して垂直方向と水平方向に切り出した各6本とした。試験片の寸法は図6のとおりである。ワイヤ放電加工機により切り出し後、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。作製した引張試験片は、3本は熱処理せずに試験を行い、3本は表3の条件1の熱処理を行った後に試験を行った。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。また、Correlated Solutions社製の非接触ひずみ測定システム(VIC-3D)を用い、デジタル画像相関法(DIC)により、引張試験中のひずみ分布について観察を行った。DIC観察は、積層造形物に特有の

ひずみ分布となるか確認するために用いた。

表 4 積層造形条件

溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	パス間温度 [°C]
CMT	195	17	9	600	200

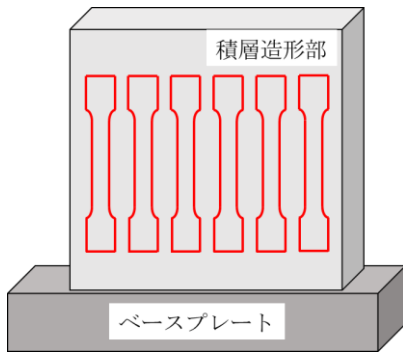


図 4 垂直方向の試験片切り出し位置模式図

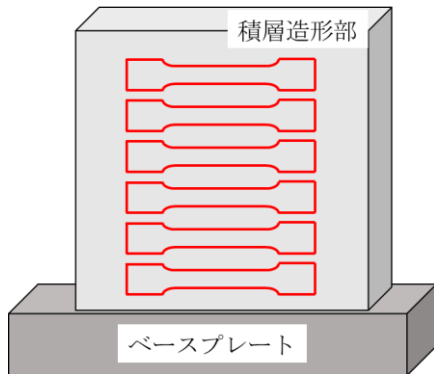


図 5 水平方向の試験片切り出し位置模式図

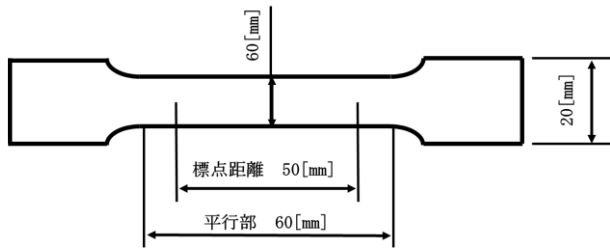


図 6 引張試験片形状

## 2. 4. 異種金属積層造形の検討

異種金属積層造形時の評価は、接合界面の硬さ測定と引張試験により行った。試験片は、図 7 に示すように SUS316 製ベースプレート上に、表 5 の積層条件で造形した。引張試験片は、図 7 に示したように接合界面が試験片中央部になるように採取し、図 6 の形状に加工を行った。硬さ試験片も接合界面から採取した。また、熱処理前後の硬度変化を調べるために、表 3 の条件 1 で熱処理した試料を作製した。硬さ試験は、図 8 に示すように積層造形部から溶け込み部、ベースプレート部にかけてライン状に測定を行った。測定は(株)島津製作所製のマイクロビッカース硬度計 (HMV-G21DT) を用いた。

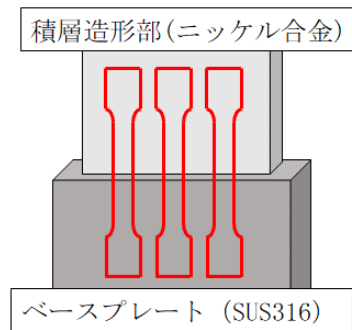


図 7 試験片切り出し位置模式図

表 5 積層造形条件

溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	パス間温度 [°C]
P	228	22.3	9	600	200
CMT	195	17			

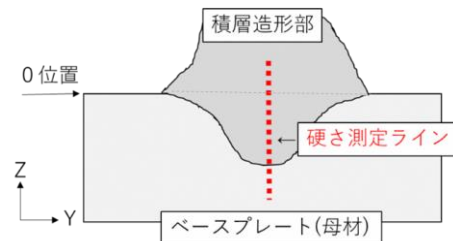


図 8 試験片切り出し位置模式図

### 3. 結果

#### 3. 1. 積層造形条件の検討

図9に内部観察結果を示す。なお、観察条件から、ここで観察されているのは0.5[mm]程度以上の比較的大きい欠陥である。いずれの条件においても欠陥はわずかであり、入熱が大きいほど欠陥が少ないことが分かる。図10には溶け込み部の断面観察結果を示す。いずれの条件においても良好な溶け込みが得られているが、入熱が大きい方が溶け込み深さが深く、ビード幅も大きいことが分かる。

以上のことから、入熱の大きい方が欠陥が少なく、溶け込みも深いため、望ましい条件であることが分かった。

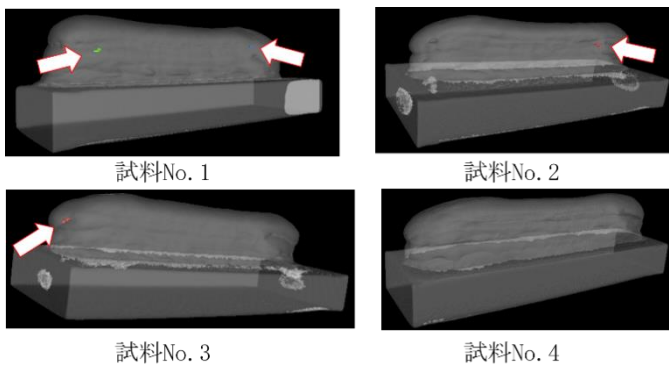


図9 内部欠陥観察結果

	試料No. 1	試料No. 2	試料No. 3	試料No. 4
溶け込み深さ [mm]	1.8	1.8	2.5	2.2
ビード幅 [mm]	7.6	9.3	10.7	11.3
ビード幅 1/2P位置 [mm]	2.4	2.5	2.4	2.6

図10 溶け込み部の断面観察結果

#### 3. 2. 熱処理条件の検討

図11に未熱処理品のYZ面の金属組織を、図12に熱処理条件1、図13に熱処理条件2、図14に熱処理条件3のYZ面観察結果を示す。いずれの試料もZ方向に結晶成長している様子が見られた。また、走査型電子顕微鏡（エネルギー分散型X線分析）による成分分析結果を図15～19に示す。図15は母相の成分分析結果である。図16は反射電子像において黒色に見えた析出物の成分分析結果であり、結果からアルミ酸化物であると推察される。図17は反射電子像中で白色に見える相の分析結果であり、主な強化相である $\gamma$ “相”と考えられる。図18は、 $\gamma$ “相”中に存在した比較的小さい析出物の分析結果であり、結果からNb、Tiの炭化物系と考えられる。図16～18の析出物については、いずれの試料においても同様に確認された

が、図19の析出物は熱処理条件1のみで確認された。図19は針状の析出物の分析結果であり、形状と組成から $\delta$ 相であると推察される。

表7には、各条件の硬さ試験結果と析出物の一覧を示す。未熱処理品に比べ、いずれの条件においても硬度が大きく向上していることが分かる。条件1と2はほぼ同じ硬度であり、条件3はやや低い硬度となっている。このことから、引張強さはいずれの条件でもほぼ同じ結果が得られると想定される。一方で、析出物の大きさや分布が異なるため、高温強度やクリープ特性では差が生じる可能性が高い。特に、熱処理条件1では、針状の $\delta$ 相( $Ni_3Nb$ )が生成している。 $\delta$ 相は主な強化相である $\gamma$ “相”が変態することで発生する。一般的なインコネル718合金では、 $\gamma$ “相”による粒内強化を重視するが、結晶成長方向に異方性がある積層造形物では、粒界を強化する $\delta$ 相も重要になると考えられる。今後、機械的特性の違いについて検証する必要がある。

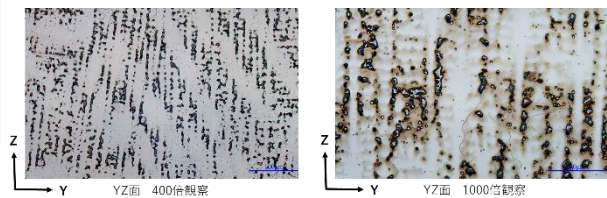


図11 未熱処理品の金属組織観察結果

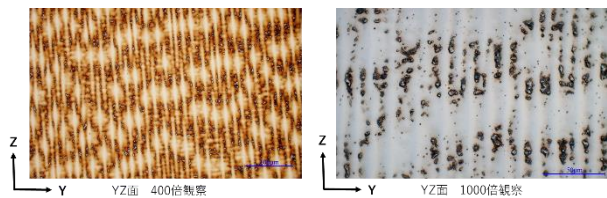


図12 熱処理条件1の金属組織観察結果

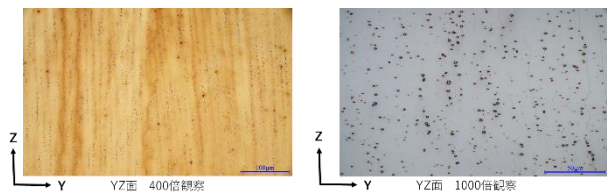


図13 熱処理条件2の金属組織観察結果

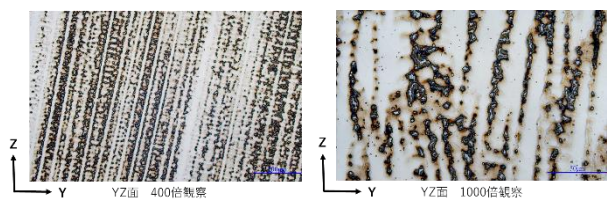


図14 熱処理条件3の金属組織観察結果

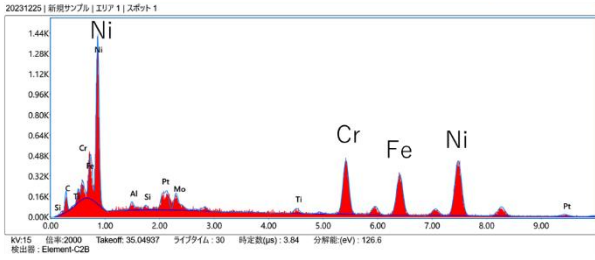
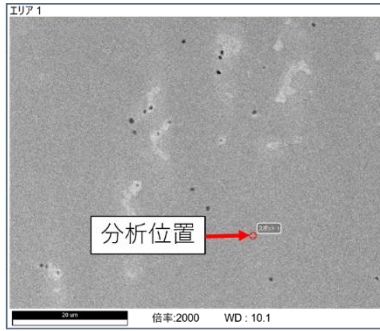


図 15 母相の成分分析結果

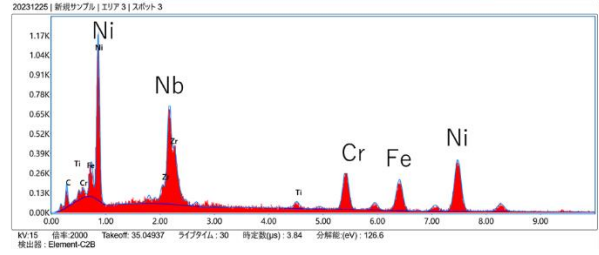
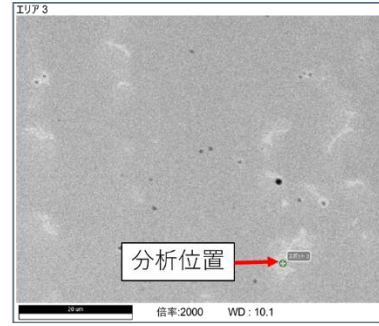


図 17 析出物の成分分析結果

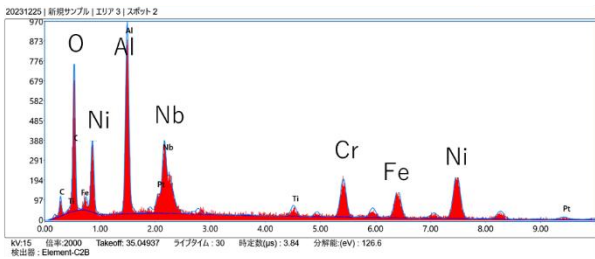
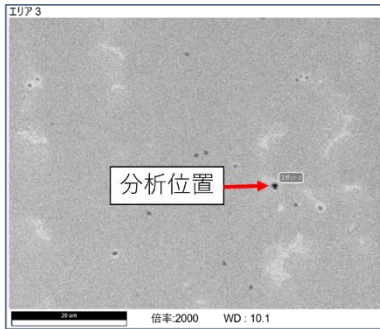


図 16 析出物の成分分析結果

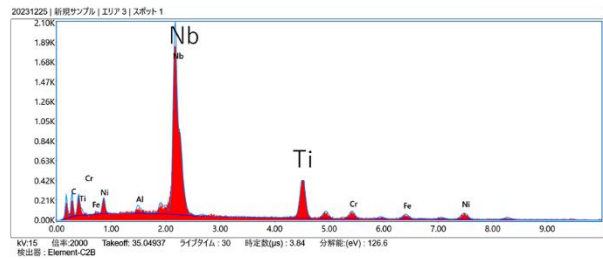
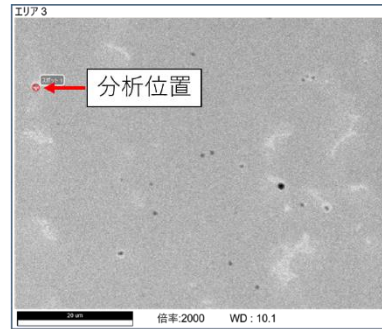


図 18 析出物の成分分析結果

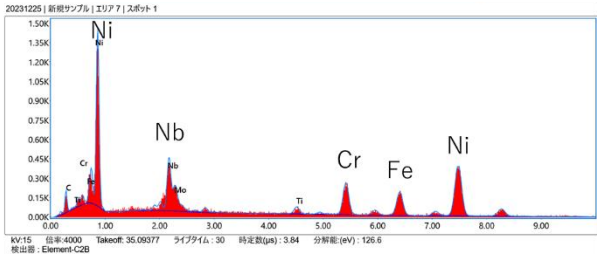
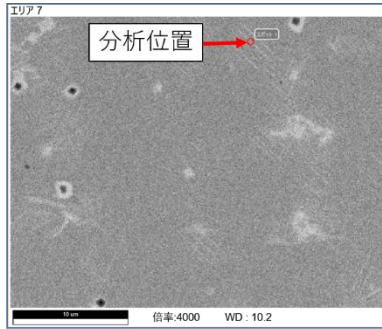


図 19 析出物の成分分析結果

表 7 硬さ試験結果及び析出物の種類

熱処理条件 No.	硬さ [HRC]	析出物の種類
未熱処理品	19.2	γ “相、Nb, Ti 炭化物、Al 酸化物
1	45.3	γ “相、δ 相、Nb, Ti 炭化物、Al 酸化物
2	46.2	γ “相、Nb, Ti 炭化物、Al 酸化物
3	43.0	γ “相、Nb, Ti 炭化物、Al 酸化物

### 3. 3. 機械的特性評価

引張試験結果を表 8、表 9 に示す。表 9 には、Incone1718 の ASTM 規格参考値も示す。結果から、熱処理によって、引張強さ、0.2%耐力が大きく向上し、伸びが低下することが分かる。ASTM 規格参考値と比較すると、引張強さはやや低いものの、0.2%耐力と伸びは参考値を上回る結果となった。また、垂直方向と水平方向を比較すると、いずれの項目においても差は小さいことが分かる。図 20 には熱処理前の引張試験における垂直方向と水平方向の応力-ひずみ曲線を示す。耐力点の位置は異なるものの、耐力弾性域、塑性域いずれの傾きも同一であり、応力-ひずみ曲線からも方向による差は小さいことが分かる。一方、当所でこれまでに実施したアルミ合金やステンレス鋼では機械的特性に異方性が見られていた。図 21 に、ニッケル合金、アルミ合金、ステンレス鋼のそれぞれの垂直方向/水平方向の比を示した。値が 1 に近いほど異方性が小さいことを表している。この図からもニッケル合金の異方

性が小さいことが分かる。

図 22 には、未熱処理品の引張試験の DIC 観察結果を示した。結果から、積層造形物特有のひずみ分布は見られず、展伸材と類似した結果となった。これは、展伸材と同様の変形挙動となることを示しており、異方性が小さいことも含め、切削加工から積層造形へ技術を代替するには有利な結果と言える。

表 8 熱処理前の引張試験結果

	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.2%耐力 [N/mm <sup>2</sup> ]	伸び [%]
垂直方向	786	541	35
水平方向	770	520	36

表 9 熱処理後の引張試験結果

	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.2%耐力 [N/mm <sup>2</sup> ]	伸び [%]
垂直方向	1212	1105	23
水平方向	1128	1047	22
ASTM 参考値	1275	1034	12

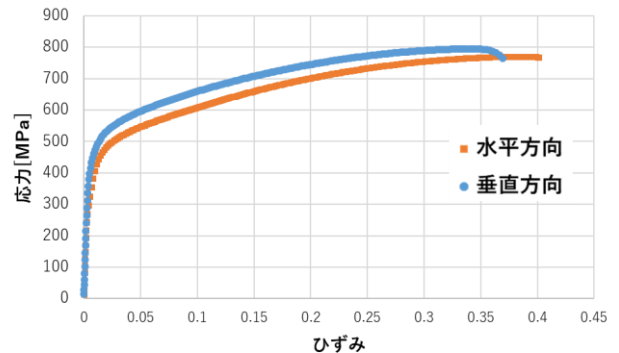


図 20 熱処理前引張試験の応力-ひずみ曲線

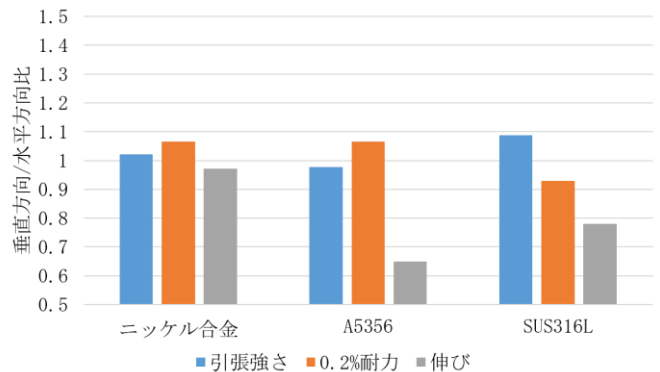
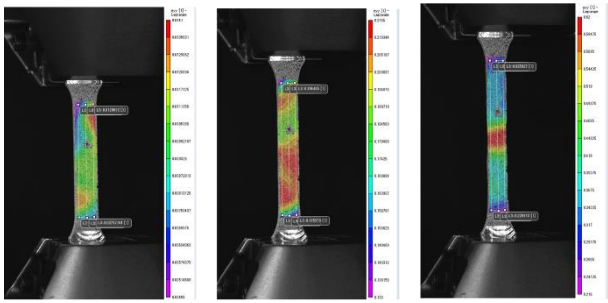
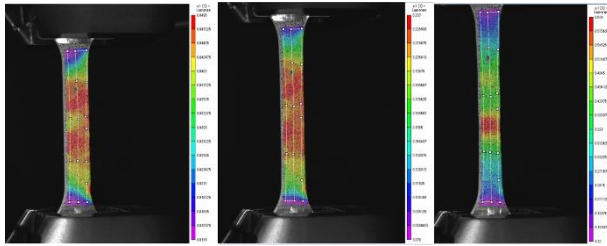


図 21 引張特性の垂直方向/水平方向比



水平方向DIC解析結果(左：引張初期、中央：引張中期、右：破断直前)



垂直方向DIC解析結果(左：引張初期、中央：引張中期、右：破断直前)

図 2 2 熱処理前引張試験の DIC 観察結果

### 3. 4. 異種金属積層造形の検討

SUS316 ベースプレートとニッケル合金積層造形界面の硬さ試験結果を図 2 3 に示す。熱処理前は母材部、積層造形部はどちらも同程度の硬度であるが、熱処理後は溶け込み部、積層造形部の硬度が大きく向上していることが分かる。引張試験時には、硬度が低い箇所から優先的に変形するため、熱処理前の引張試験において、SUS316 部で破断することを確認できれば、接合界面及び積層造形部が十分な強度を持っていることが分かる。

表 1 0 に熱処理前における引張試験結果を、図 2 4 にはその時の破断時の様子を示した。硬さ試験では硬度差はなかったものの、引張試験では母材部が優先的に変形し、そのまま母材破断する結果となった。このことから、SUS316 上へニッケル合金を積層造形した際には、接合界面及び積層造形部は母材以上の十分な強度を有することが分かった。

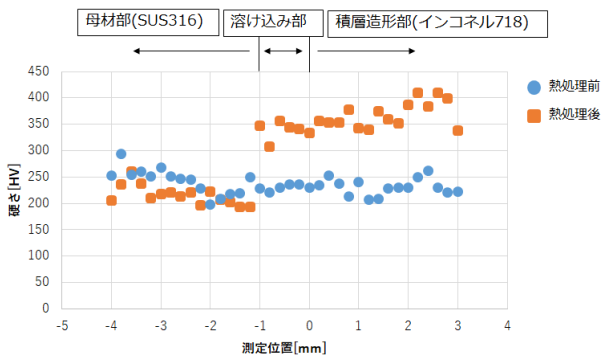


図 2 3 SUS316-ニッケル合金界面の硬さ試験結果

表 1 0 熱処理前の引張試験結果

引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	積層部伸び [%]	母材部伸び [%]	破断位置
586	7.6	69.4	母材部

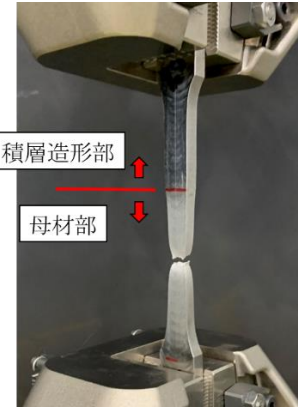


図 2 4 引張試験破断時の様子

## 4. 結言

ニッケル合金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、異種材料接合時の接合強度評価を行ったところ、以下の結果を得た。

- ・ニッケル合金を積層造形するには、入熱の大きい方が欠陥が少なく、溶け込みも深いため、望ましい条件であることが分かった。
- ・ニッケル合金積層造形物の熱処理条件について、溶体化処理温度の違いによって硬さや、析出物の種類、大きさがどのように変化するのか確認した。硬さはいずれの熱処理条件においても向上するが、析出物の大きさや分布、種類が異なるため、高温強度やクリープ特性では差が生じる可能性が高く、今後調査が必要である。
- ・ニッケル合金積層造形物は機械的特性の異方性が小さく、変形時のひずみ分布も展伸材と同様であることが分かった。また、熱処理によって引張強さ、0.2%耐力が大きく向上する一方で、伸びが減少することを確認した。
- ・SUS316 上へニッケル合金を積層造形した際には、接合部、積層造形部が SUS316 母材部よりも高い強度を持つことが分かった。

## 参考文献

- 1) 安齋弘樹. 複雑形状加工時の切削加工と金属積層造形のコスト比較. 令和2年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. pp.21-24. [https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/678056\\_1907239\\_misc.pdf](https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/678056_1907239_misc.pdf), (参照 2024-02-16)
- 2) 上垣内梓. 電子ビーム積層造形法により造形した Inconel718 の微視組織とクリープ特性. 首都大学東京大学院理工学研究科機械工学専攻修士論文. 平成31年. (未公刊)