

## Inconel 625 と SUS 316L の金属粉末溶融積層造形を用いた接合における界面の評価

慶應義塾大学 ○鶴瀬伊織, ◎柿沼康弘, 小池綾, 青山藤詞郎

## 要旨

複合材料への需要の高まりを受け、加工能率の向上や加工コストの削減の観点から、接合部を含め製品を一工程で造形することが可能な金属積層造形が注目されている。本研究では、金属積層造形の一手法である指向性エネルギー堆積法を用いて Inconel 625 と SUS 316L を接合し、接合界面の強度の測定と金属組織の観察を行った。その結果、入熱量を少なくすることによって、金属組織を緻密化し、接合強度を向上させられることを示した。

## 1. 結論

金属粉末溶融積層造形は付着加工の一種で、複雑形状や異種金属の複合材の一つのプロセスで作製できる積層造形技術であり、航空部品製造などへの応用が期待されている。本研究では、指向性エネルギー堆積法 (DED 法) を用い、多様な造形条件のもと Inconel 625 と SUS 316L の複合材料の造形を行ってその強度を評価した。また、接合界面周辺の観察・元素分析を行うことで、金属結晶の形状や組成が接合部に及ぼす影響を考察し、プロセス中の入熱量と異種金属積層造形物の関係について体系的な評価を行うことを本研究の目的とする。

## 2. DED 法の概要

DED 法とは、図 1 に示すように、材料粉末を供給しながらレーザーを照射することで、母材上で材料を溶融させ造形する積層造形方式である。レーザーヘッドを動かして所望の場所に材料を凝着させ、任意の 3 次元構造を形成することができる。造形中の加工点の酸化を防止するために、粉末を運ぶキャリアガスやレーザー系を保護するシールドガスにはアルゴンなどの不活性ガスが用いられる。固体時の材料硬度に関係なく造形することができる手法であり、切削による加工が困難な材料への応用が期待されている。

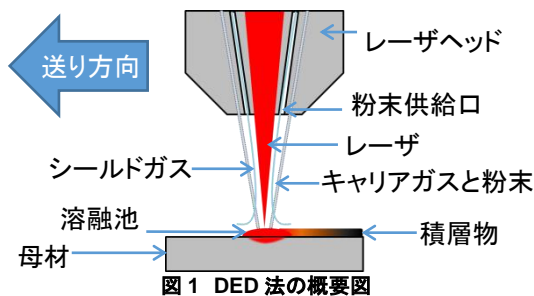


図 1 DED 法の概要図

## 3. 積層パラメータの設定

機械加工に比べ、DED 法の積層パラメータは多い。本研究では、図 2 に示すとおり、入熱量に係るパラメータとしてレーザーヘッドの送り速度  $v$  [mm/min]、レーザー出力  $P$  [W] に着目し、これらを総合的に評価できる指標として、一層の積層で単位面積あたりに加えられる熱量として入熱エネルギー密度  $\varepsilon$  [J/mm<sup>2</sup>] を以下の(1)式によって求めて利用した。

$$\varepsilon = P/vh \quad \dots (1)$$

なお、 $h$  [mm] はピッチ幅である。

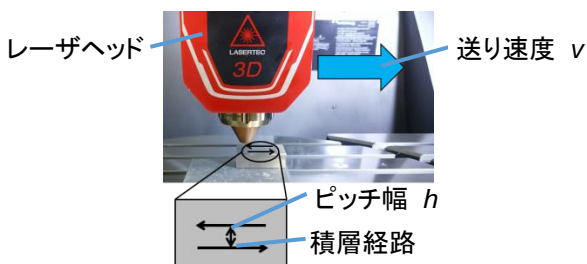


図 2 評価に使用した操作パラメータ

## 4. 引張強度の評価

表 1 の積層条件で異種金属積層物を造形し (図 3)、そこから切り出した試験片を用いて引張試験を行った。破断した引張試験片を図 4 に、入熱エネルギー密度を基準にして引張強度を比較した結果を図 5 に示す。

表 1 引張試験片の作製における積層パラメータ

入熱エネルギー密度	J/mm <sup>2</sup>	45.0, 60.0, 75.0
粉末供給量	g/min	5
キャリアガス流量	L/min	6
シールドガス流量	L/min	4

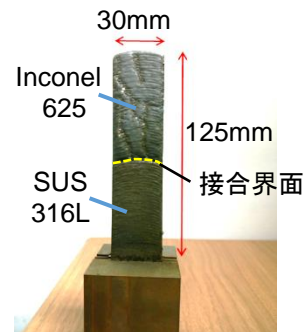


図 3 引張試験用積層物



図 4 破断後の引張試験片

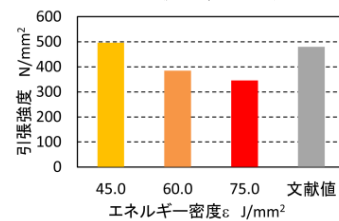


図 5 引張試験結果

全ての試験片において、接合界面ではなく SUS 316L 側で破断が起きた。また、エネルギー密度が小さいほど引張強度は高まり、45 J/mm<sup>2</sup> において SUS 316L の文献値 [1] と同等の引張強度に達した。このことから、接合界面は十分な強度を有しているといえる。

## 5. 接合界面近傍における結晶粒度

金属組織が強度に及ぼす影響を考察するため、入熱エネルギー密度を変化させて積層した造形物における結晶粒の観察・比較と、結晶粒度の定量評価を行った。積層には表 2 に示したパラメータを用いた。図 6 に示す寸法の積層物を造形した後、正面フライス加工ならびに研磨加工を施した表面に対して観察を行った。

面積軽量法により結晶粒度の定量評価を行った。面積計量法では、光学顕微鏡などによって得られる結晶粒の画像に対し、面積  $A$  の長方形を描き、図形中に含まれる結晶の数  $n_A$  を数え、(2)式より結晶粒度  $\sqrt{a}$  を

求める。本実験では、1辺500 $\mu\text{m}$ の正方形を描き、結晶粒数および結晶粒度の測定を1つの観察画像の上で5回行い、その平均を測定値とした。

$$\sqrt{a} = \sqrt{A/n_A} \quad \dots(2)$$

表2 結晶粒度・硬さ試験用試験片

レーザ出力	W	1200, 1600, 2000
入熱エネルギー密度	J/mm <sup>2</sup>	30.0, 40.2, 49.8
粉末供給量	g/min	5
キャリアガス流量	L/min	6
シールドガス流量	L/min	4

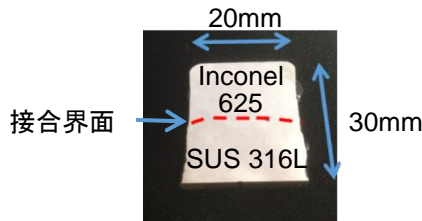


図6 結晶粒度・硬さ試験用試験片(研磨後)

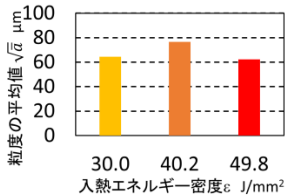


図7 入熱エネルギー密度による粒度の測定結果の比較

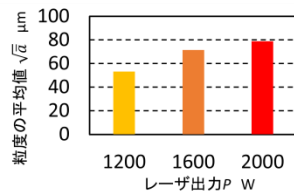


図8 レーザ出力による粒度の測定結果の比較

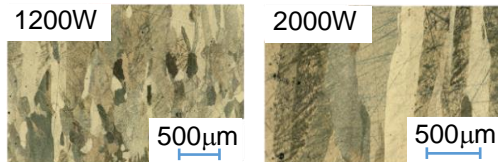


図9 SUS 316L側の積層物内結晶粒観察結果

積層物の結晶粒度の定量評価を行った結果について、入熱エネルギー密度によって比較したものが図7である。入熱エネルギー密度による比較では、結晶粒度との相関は見ることができなかった。しかし、レーザ出力で比較を行った図8では、レーザ出力が大きいほど、結晶粒度も大きくなっている傾向がみられた。図9は、定量評価に使用した、レーザ出力1200W、2000Wでそれぞれ積層した試験片の結晶粒の観察画像(SUS 316L側)であるが、こちらでも、2000Wで積層を行った積層物の方が、結晶粒が大きくなっている様子がわかる。この傾向は、レーザ出力の上昇に伴い、積層物内の蓄熱が大きくなり、冷却速度が低下することで、結晶粒がより粗大化したことに起因すると考えられる。結晶粒が大きいほど造形物の降伏応力は下がるため、レーザ出力を低下させることで、結晶粒を小さくし、造形物の強度を向上させられることがわかった。また、入熱エネルギー密度に比べ、レーザ出力の増減の方が結晶粒度に影響を及ぼしやすいことも確認した。

## 6. 硬さ試験と元素分布解析

接合界面付近を対象として試験片に対して硬さ試験を実施し、局所的な強度低下が生じていないか詳細に評価した。図6に示した積層物を試験片として使用し、図10に示すように、接合界面の上下5mmの範囲において1mm間隔の平行線上のそれぞれ3つの測定点(図上三角印)において、硬さの測定を行った。

硬さ試験の結果を図11-13に示す。横軸は測定位置、縦軸は硬さであり、各点の値は3点の測定の平均である。なお、図中の破線は文献値[1,2]を示している。

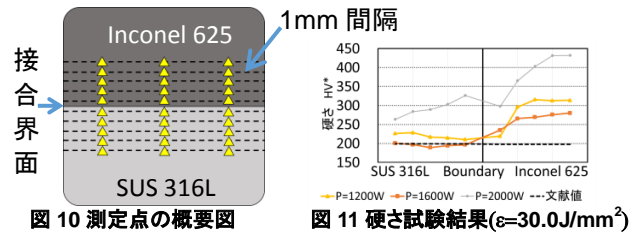


図10 測定点の概要図

図11 硬さ試験結果( $\epsilon=30.0\text{J/mm}^2$ )

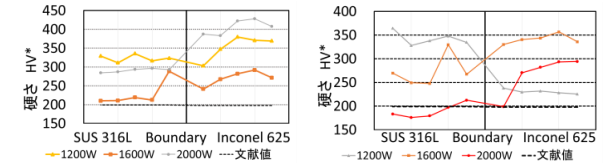


図12 硬さ試験結果( $\epsilon=40.2\text{J/mm}^2$ ) 図13 硬さ試験結果( $\epsilon=49.8\text{J/mm}^2$ )

これらの結果より、同じエネルギー密度においても、レーザ出力の変化によって硬さも変化している様子が確認できる。また、 $\epsilon=40.2\text{J/mm}^2$ 、 $49.8\text{J/mm}^2$ の結果では、SUS 316L側の接合界面付近では硬さが向上した。この原因について考察するため、接合界面付近の組成について元素分析を行った。

元素分析は、エネルギー分散型X線分析装置(EDX)を使用し、図14に示した接合界面部に対し、Inconel 625とSUS 316Lの組成に含まれる主な元素を対象としたマッピング分析を行った。そのうち、特徴的な傾向を示したFeとNbの結果を図15、図16に示す。

Inconel 625側の領域について、元の組成では5%程度しか含まれていないFeが、マッピングの結果では30%程度含まれていることがわかった。また、本来はInconel 625にのみ含まれているNbが、SUS 316L側にも存在することを確認した。

これらの結果より、SUS 316L側の接合界面付近ではNbの固溶が起きていると考えられる。固溶には外部からの応力による結晶格子のすべりを抑制することで材料の強度を上昇させる効果がある。したがって引張試験・硬さ試験の結果においては、接合界面付近でNbの固溶が発生したためにSUS 316Lより接合界面付近の強度が高くなったと考えられる。

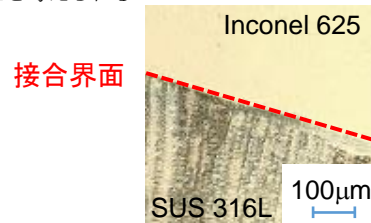


図14 光学顕微鏡による接合界面の観察画像

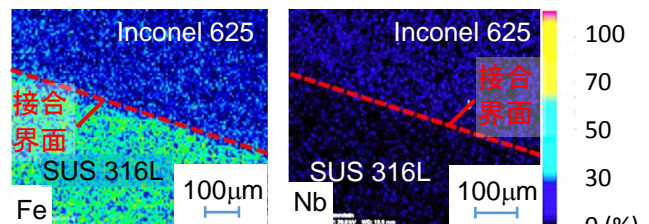


図15 Feの分布

図16 Nbの分布

## 7. 結論

- DED方式によって積層造形した異種金属接合部は、接合する材料によって、元の材料に劣らない高い強度を実現できる。
- 接合部付近において、Inconel 625内のNbが固溶したことによって、SUS 316Lの硬度が高まることを確認した。
- レーザ出力を小さくして積層物への入熱量を小さくすると、金属組織が緻密化し、強度の向上につながることを明らかにした。

## 参考文献

- [1]ステンレス協会,ステンレス鋼便覧 第3版,日刊工業新聞社,1995
- [2]日本溶接境界特殊材料溶接研究委員会,スーパーアロイの溶接—耐熱・耐食合金の溶接ガイドブック—,産報出版,2010