

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 佐藤善久

国立大学法人東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門 笹原弘之

ワイヤアーク式金属積層造形（以下 WAAM 方式とする）により難削材であるチタンを積層造形した際の、シールドガスの影響、積層造形物の評価を行った。トーチノズルのシールドガスとして He、もしくは Ar を用いて機械的特性を比較したが、両者に違いは見られなかった。また、金属ワイヤに NTI-M 及び NTI-64M を用いた際の機械的特性評価の結果、NTI-M では垂直方向と水平方向に違いは見られなかったが、NTI-64M では水平方向の値が小さかった。チタン 60 種上への NTI-M 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、チタン、機械的特性、部材試作

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、金属ワイヤをアーク放電により溶融、凝固させる WAAM 方式を対象に研究を行ってきた¹⁾。これまでの結果から、スクリュープロペラ形状等の加工においては、切削加工に比べ、WAAM 方式の方が加工時間と除去量において優れてい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。

昨年度は、難削材であるニッケル合金に対して、積層造形物の機械的特性、ステンレス鋼との異種金属接合について評価を行っている²⁾。

今年度は、同じく難削材であるチタンに対して、積層造形物の機械的特性、チタン合金との接合について評価を行い、WAAM 方式の適用可能性について検討を行った。

2. シールドガスの影響検討

2. 1. 実験方法

チタンは高温で酸素や窒素と反応し酸化物や窒化物を作りやすく、これが形成されると硬化し、脆くなる。そのためトーチノズルからのシールドに加え、アウターシールドも用いられる³⁾。トーチノズルのシールド事業名「基盤技術開発支援事業」

ガスには、主に He や Ar が用いられるが、初めにこのシールドガスの違いが機械的特性に与える影響を調べることにした。なお、評価は、引張試験及び硬さ試験により行った。

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、“P” は“Pulse” 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。金属ワイヤには純チタンである直径 1.2[mm] のニッコー熔材工業（株）製 NTI-M（JIS Z3331 S Ti0100J 該当）を使用した。NTI-M（一例）及び類似組成のチタン 1 種の化学成分を表 2 に示す。ベースプレートはチタン 2 種とし、シールドガスはトーチノズルでは He もしくは Ar を、アウターシールドには Ar を使用した。ガス流量は、トーチノズルは 15[L/min]、アウターシールドは 30[L/min]とした。なお、今回用いるアウターシールドの外観を図 1 に示す。

積層造形物は幅 65[mm]、奥行き 20[mm] の口の字形状にトーチを動かし、高さ 160[mm] 程度まで積層造形した。バス間温度の制御のため、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] 以下となってから次の層を積層した。

積層造形後、図 2 のようにトーチの送り方向に対して垂直方向に図 3 の JIS の 13B 号試験片形状をワイヤ放電加工機により切り出し、フライス盤により積層造形時の凹凸を除去した。作製した引張試験片は、各条件 3 本とし、引張強さ、0.2%耐力及び伸びの測定を行った。引張試験には（株）島津製作所製の万能材料試験機 (AG-100KNX) を用いた。

硬さ試験は、図 4 に示すように積層造形物の水平方向の直線上を、高さを変えて各試験片 2 カ所の測定を行った。硬さ試験には（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。

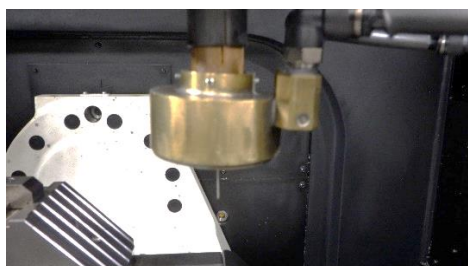
表 1 積層造形条件

| 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 | 111 | 22.1 | 6 | 400 | 100 |

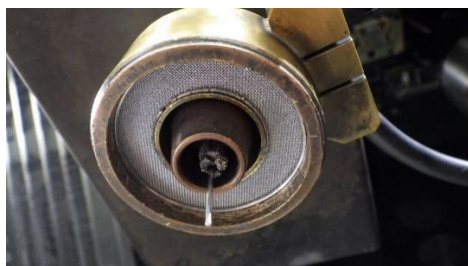
表 2 NTI-M ワイヤ及びチタン 1 種の化学成分

| | C | O | H | N | Fe | Ti |
|---------|-------|-------|--------|-------|-------|----|
| NTI-M | 0.01 | 0.08 | 0.001 | 0.003 | 0.04 | 残部 |
| チタン 1 種 | ≦0.08 | ≦0.15 | ≦0.013 | ≦0.03 | ≦0.20 | 残部 |

単位 %



(a) トーチに取付けた状態



(b) 下側からの様子

図 1 アウターシールドの外観

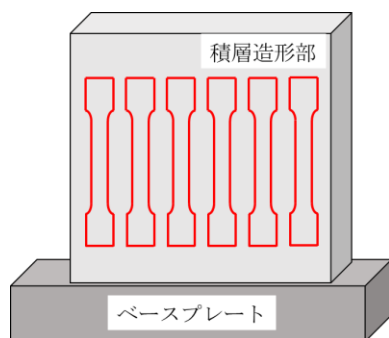


図 2 垂直方向の試験片切り出し位置模式図

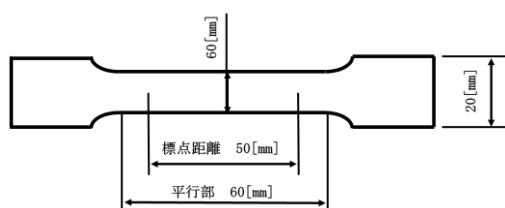


図 3 引張試験片形状

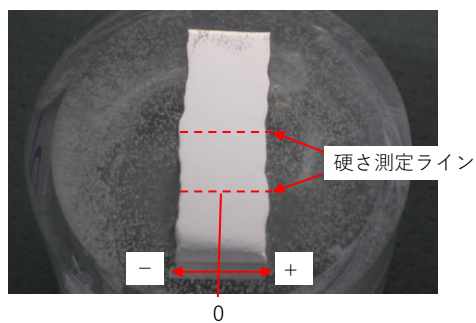


図 4 硬さ測定位置

2. 2. 試験結果

引張試験の結果を表 3 に、硬さ試験の結果を図 4 に示す。この結果からは、引張試験及び硬さ試験において、差が見られなかった。このことより、トーチノズルのシールドガスの種類による影響はないと考えられる。

これ以降の積層造形では、トーチノズルのシールドガスは Ar を用いることとする。

表 3 引張試験結果

| トーチガス | 引張強さ [N/mm ²] | 0.2%耐力 [N/mm ²] | 伸び [%] |
|-------|------------------------------|--------------------------------|-----------|
| He | 389 | 327 | 37 |
| Ar | 389 | 329 | 37 |

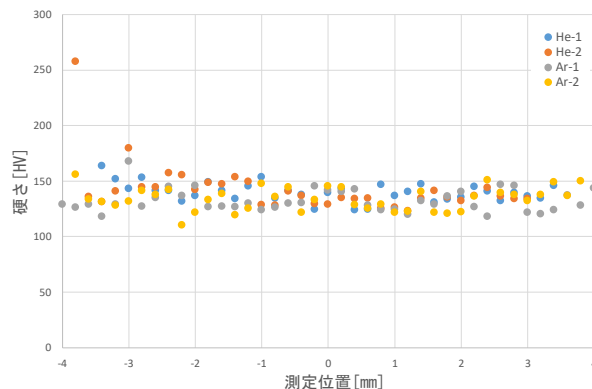


図 4 硬さ試験結果

3. チタンの機械的特性評価

3. 1. 実験方法

前述では、金属ワイヤ NTI-M の積層造形物に対し、垂直方向における機械的特性の評価を行ったが、積層造形物の評価としては水平方向の機械的特性の評価も必要である。そこで、幅 150 [mm]、高さ 30 [mm] 程度の立壁形状を作製した。そこから、図 5 のように引張試験片を採取し、同様の引張試験を行った。なお、積層造形条件は表 1 を使い、試験片は 2 本とした。

併せて、チタン合金であるニッコー熔材工業 (株) 製 NTI-64M (JIS Z3331 S Ti6400J 該当) についても

同様に垂直方向及び水平方向の引張試験を行った。作製した積層造形物形状、積層造形条件及び試験片の数は前述と同じとした。NTI-64M（一例）及び類似組成のチタン 60 種（64 チタン）の化学成分を表 4 に示す。

表 4 NTI-64M ワイヤ及びチタン 60 種の化学成分

| | C | O | H | N | Al | V | Fe | Ti |
|---------|-------|-------|--------|-------|-----------|----------|-------|----|
| NTI-64M | 0.01 | 0.14 | 0.001 | 0.004 | 5.90 | 4.00 | 0.22 | 残部 |
| チタン60種 | ≦0.08 | ≦0.20 | ≦0.015 | ≦0.05 | 5.50~6.75 | 3.50~4.5 | ≦0.40 | 残部 |

単位 %

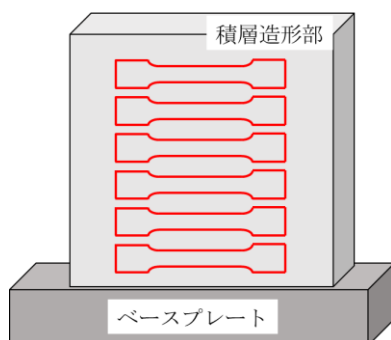


図5 水平方向の試験片切り出し位置模式図

3. 2. 結果

NTI-M の引張試験結果を表 5、NTI-64M の結果を表 6 に示す。表 5 には、JIS H4600 のチタン 1 種及び 2 種の値を、表 6 にはチタン 60 種の値も併せて示す。

表 5 の結果より、NTI-M では垂直方向と水平方向に差は見られず、チタン 1 種の規格を満たしていることが確認できた。

一方、表 6 の結果より、NTI-64M では垂直方向が水平方向に比べ、引張強さ及び 0.2%耐力が大きいことが分かる。チタン 60 種と比べると、規格を満たしているのは垂直方向では引張強さと 0.2%耐力、水平方向では引張強さのみとなっている。使用用途に応じて、熱処理の検討を行う必要があると考える。

表 5 NTI-M の引張試験結果

| 引張方向 | 引張強さ [N/mm ²] | 0.2%耐力 [N/mm ²] | 伸び [%] |
|---------|------------------------------|--------------------------------|-----------|
| 垂直方向 | 389 | 329 | 37 |
| 水平方向 | 382 | 321 | 38 |
| チタン 1 種 | 270~410 | 165≦ | 27≦ |
| チタン 2 種 | 340~510 | 215≦ | 23≦ |

表 6 NTI-64M の引張試験結果

| 引張方向 | 引張強さ [N/mm ²] | 0.2%耐力 [N/mm ²] | 伸び [%] |
|--------|------------------------------|--------------------------------|-----------|
| 垂直方向 | 965 | 858 | 9 |
| 水平方向 | 932 | 806 | 9 |
| チタン60種 | 895≦ | 825≦ | 10≦ |

4. 異種チタンの接合評価

4. 1. 実験方法

異種チタンの接合として、チタン 60 種のベースプレート上に NTI-M を積層造形した際の強度評価を、接合界面の硬さ測定と引張試験により行った。積層造形は、図 6 に示すように NTI-M をチタン 60 種製ベースプレート上に、表 1 の積層条件で行った。硬さ試験片は接合界面から採取し、図 6 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。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 3 の形状に加工を行った。

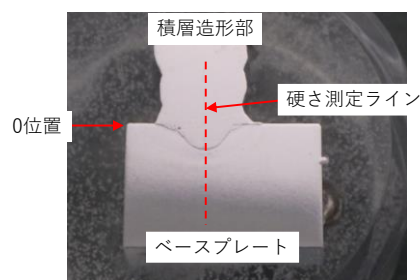


図6 硬さ試験測定箇所

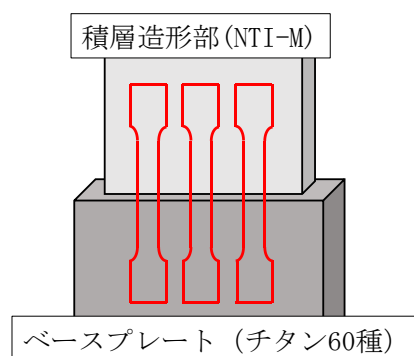


図7 試験片切り出し位置模式図

4. 2. 結果

ベースプレートと積層造形界面の硬さ試験結果を図 8 に示す。この結果より、溶け込み部は積層造形物より硬度が高いことが分かる。

引張試験結果を表 7 に、破断時の様子を図 9 に示す。硬さ試験において硬度の低かった積層造形部から優先的に変形し、そのまま破断する結果となった。このことから、チタン 60 種上へ NTI-M を積層造形した際に

は、溶け込み部は積層造形物以上の十分な強度を有することが分かった。

今回は、母材にチタン 60 種、積層造形材に NTI-M を用いたが、母材にチタン 2 種、積層造形材に NTI-64M を用いる等、上記以外の組合せも考えられる。その場合は用途に応じた必要な組合せによる接合強度試験等の実施が必要と考える。

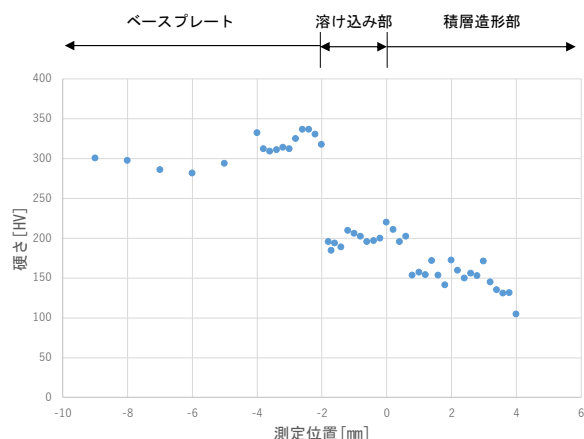


図 8 チタン 60 種と NTI-M 界面の硬さ試験結果

表 7 接合強度試験結果

| 引張強さ平均 [N/mm ²] | 引張強さ [N/mm ²] | 破断位置 |
|--------------------------------|------------------------------|-------|
| 419 | 421 | NTI-M |
| | 423 | NTI-M |
| | 413 | NTI-M |



図 9 引張試験破断時の様子

5. 部材の試作

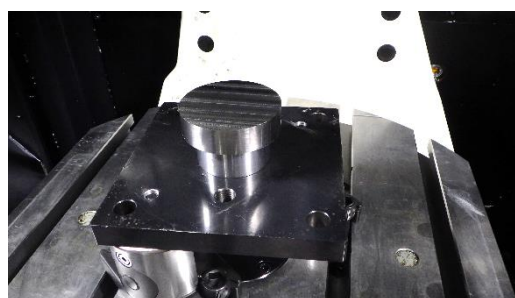
5. 1. インペラ形状の作製

これまでの実験結果により、チタン 60 種と NTI-M の接合が可能であることが確認できた。チタン 60 種

は、チタン 2 種に比べ高強度である一方、高価であり、加工が困難である。WAAM 方式を用いることで必要な個所にのみチタン 60 種を使用することが可能となるため、チタン 60 種の使用量が削減可能となる。

今回は、母材にチタン 60 種、羽根部に NTI-M を用いたインペラ形状を作製した。作製の様子を図 10 に示す。積層造形条件には表 1 を使い、形状の作製を目的としたため、アウターシールドを使用せずに行った。

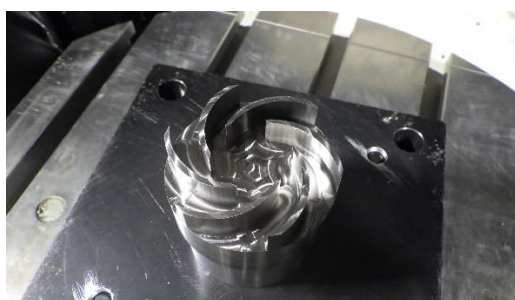
完成したインペラには、空孔や割れ等の不具合の発生は確認できなかった。



(a) 母材形状 (積層造形前)



(b) 積層造形後



(c) 切削加工後

図 10 作製したインペラ形状

6. 結言

チタン積層造形物の特性把握として、シールドガスによる影響、垂直方向と水平方向の機械的特性評価及び異種チタン接合時の接合強度評価を行い、以下の結果を得た。

- ・ トーチノズルのシールドガスに He、もしくは Ar を

用いた際の機械的特性を比較したところ、両者に違いは見られなかった。

- ・積層造形材として NTI-M を用いた際の機械的特性は、トーチの送り方向に対して垂直方向及び水平方向で違いが見られなかった。また、チタン 1 種の規格を満たしていた。

- ・積層造形材として NTI-64M を用いた際の機械的特性は、垂直方向が水平方向に比べ、引張強さ及び 0.2%耐力が大きい。また、チタン 60 種と比べると、規格を満たしているのは垂直方向では引張強さと 0.2%耐力、水平方向では引張強さのみであった。

- ・チタン 60 種のベースプレート上に NTI-M を積層造形し、積層界面を含む引張試験片で強度を測定したところ、積層造形部から破断しており、十分な接合強度を有していることが分かった。

- ・異種チタン接合を用いたインペラ形状を作製することができた。

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, 2021, p. 21-24.
- 2) 安齋弘樹, 小林翼 他. 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. 令和 5 年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2024.
- 3) 溶接学会編. 溶接便覧. 改訂 3 版, 丸善, 昭和 57 年, pp. 1077-1083.