

羽根部に複数の金属を使用したインデューサ作製方法の検討（第2報）

Consideration of inducer manufacturing method using multiple metals in the blade part (second edition)

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 小林翼 穴澤大樹

ワイヤーク方式金属積層造形（以下、WAAM方式とする）により、耐キャビテーション性を向上したインデューサの作製に取り組んだ。インデューサ羽根部にはステンレス鋼とコバルト基合金を積層造形し、その接合部の評価及び造形方法の検討を行った。接合部評価では、十分な接合強度を有することを確認し、複数の金属を有する羽根部の積層造形条件を確立できた。

Key words: 金属積層造形、WAAM方式、インデューサ、異種金属接合、接合強度

1. 緒言

金属積層造形技術の活用が各分野で進んでいる。当所でも WAAM 方式金属積層造形技術の研究開発に取り組んでいる。昨年度は、委託企業である（株）ミウラとともに、母材にステンレス鋼、羽根部にニッケル合金積層造形物とステンレス鋼積層造形物を用いたファン型インデューサを作製し、良好な結果が得られた¹⁾。

上記結果を受けて、日機装（株）から、耐キャビテーション性を向上したインデューサを作製したいとの要望があった。具体的には、キャビテーションの損傷事例が多い羽根の先端部に耐摩耗性のあるコバルト基合金を用い、それ以外はステンレス鋼を用いたインデューサの作製である。作製にあたり、ステンレス鋼積層造形物上へのコバルト基合金の積層造形可否を確認し、接合部を評価する必要がある。また、羽根部造形の積層造形条件を設定する必要がある。

そこで、本研究では母材にステンレス鋼、羽根部にステンレス鋼及びコバルト基合金を用いたインデューサの作製技術を確立する。具体的には、引張試験、硬さ試験、組織観察による接合部の評価及び WAAM 方式金属積層造形による羽根部の作製方法を検討した。なお、本研究では積層造形工程に関する検討のみ行っており、後加工及びインデューサとしての評価は行っていない。

2. 接合部の評価試験

2. 1. 試験片の作製

接合部の評価試験として、引張試験、硬さ試験、組織観察を行った。各試験片作製のため、ステンレス鋼積層造形物の上にコバルト基合金を積層造形した。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 ワイヤーク方式）を用いた。積層条件は表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。

金属ワイヤは直径1.2mmとし、ステンレス鋼には（株）

タセト製 MG316L（JIS Z3321 YS316L 該当）を使用し、コバルト基合金にはステライト No.6 合金である（株）鳥谷浴接研究所（現（株）ウェルマテック）製 KST-6FCW を使用した。各ワイヤの組成を表2、表3に示す。積層造形物は幅120mm、奥行き25mmの楕円形状にトーチを動かした。使用ワイヤは、高さ80mmまではMG316Lを用い、造形後に積層造形物上部を機械加工仕上げした。その後、ワイヤをKST-6FCWに交換し、高さ160mm狙いで積層造形した。KST-6FCWはJIS規格でも硬化肉盛用材料として規定されており、割れの発生リスクが高いため、熱応力低減のために図1のように幅30mmに分割して造形した。また、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、指定の温度以下となってから次の層を積層した。

積層造形中、KST-6FCWを40mm積層造形したところ、造形物の割れが確認された。割れの様子を図2に示す。引張試験片は図3のJISの13B号試験片形状を想定しており、試験平行部中央が接合界面となるように積層造形を進めていた。しかし、前述のとおりKST-6FCWは割れ発生のリスクが高く、これ以上の積層造形は困難と判断し、40mmでKST-6FCWの積層造形を中断した。そのため、引張試験片は図4に示すように接合界面が平行部中央からズレた状態で採取することとなった。なお、試験平行部には均一に引張応力が負荷されるため、接合界面が中央からズレたことによる接合強度評価への影響は軽微と考えられる。

積層造形後、ワイヤ放電加工機により引張試験片を6本切り出し、フライス盤により積層造形時の凹凸を除去した。切り出し時点で6本中3本に割れが認められ、この試験片は引張試験には用いないこととした。残りの3本の試験片は、2本は熱処理せずに引張試験を行い、1本はSUS316の固溶化熱処理後に引張試験を行った。固溶化熱処理は1,050℃で1時間加熱後、水冷した。また、コバルト基合金は硬度が高く、そのままでは引張試験機付属の治具で把持できないため、レーザーパウダー方式の金属積層造形装置（（株）ニコン製 Lasermeister101A）により SUS316L をつかみ部表面

事業名「外部資金等活用研究事業」（委託企業 株式会社ミウラ）

に積層造形した。造形後の試験片外観を図5に示す。

硬さ試験と組織観察用の試験片は引張試験片を切り出した残りの積層造形物の接合界面から切り出した。試験片は10mm角程度とし、樹脂包埋、鏡面研磨後に試験に供した。

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。接合界面を原点とし、0.2mmピッチで硬さの変化を確認した。試験荷重は0.2kgfとした。

組織観察は(株)日立ハイテクノロジー製の走査型電子顕微鏡(S-3700N)により行った。

表1 積層造形条件

積層材種	溶接方法	電流 A	電圧 V	ワイヤーフィード m/min	トーチ送り m/min	シールドガス	バス間温度 °C
MG316L	CMT	243.0	13.8	9.0	600.0	Ar	100
KST-6FCW	CMT	200.0	20.0	6.8	600.0	Ar	300

表2 MG316L ワイヤの化学成分

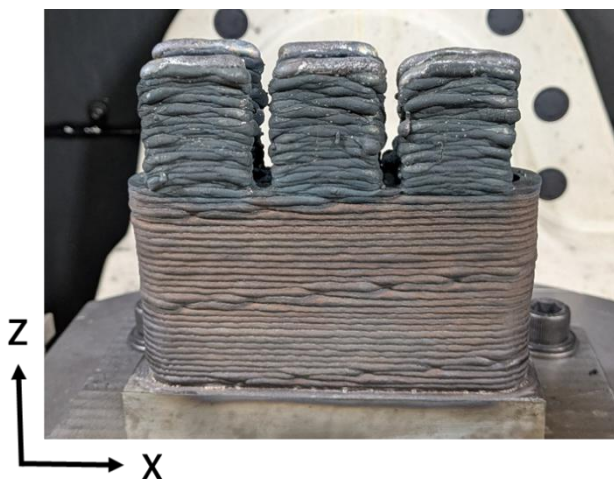
単位 %

	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

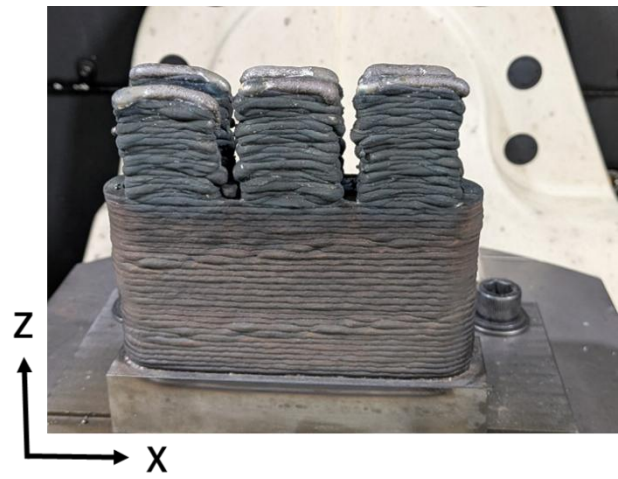
表3 KST-6FCW ワイヤの化学成分

単位 %

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	W	Co
KST-6FCW	1.03	0.70	0.55	28.73	1.18	4.94	4.26	残



(a) 表側



(b) 裏側

図1 引張試験用積層造形物外観



図2 割れ発生位置



図5 つかみ部積層造形後の外観

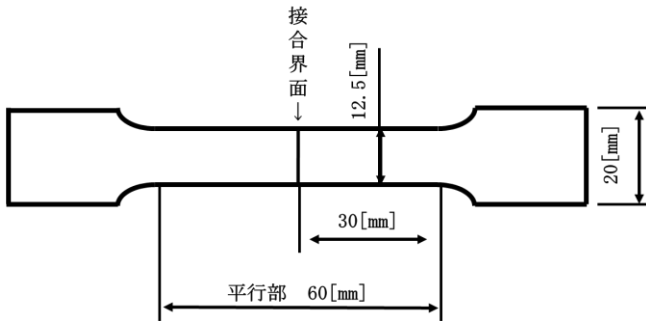


図3 引張試験片の形状 (想定)

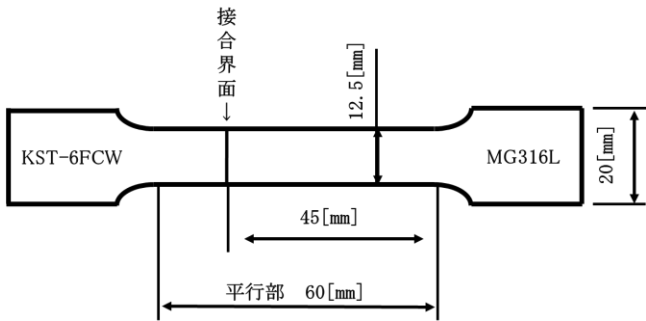


図4 引張試験片の形状 (実際)

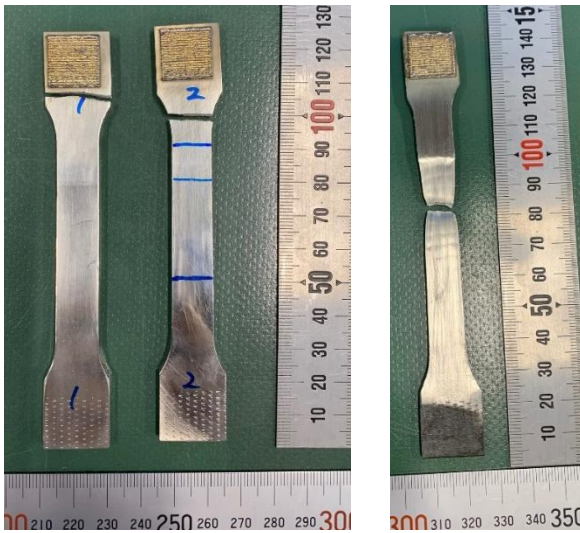
2. 2. 引張試験結果

引張試験結果を表4に示す。熱処理前の2本については、図6のようにつかみ部、肩部で破断してしまい、試験平行部の評価はできなかった。(株)キーエンス製のデジタルマイクロscope (VHX-7000) により破断面を確認すると、図7のように水・油染みがあり、引張試験前の時点ですでに割れが発生していたことが分かる。走査型電子顕微鏡 (S-3700N) により破断面観察を行うと、図8のようにタングステンが多く析出していることが分かる。電子顕微鏡観察は反射電子像により行っており、表面に白く見える点がタングステンである。図9に白く見える点の成分分析結果を示す。コバルト基合金積層造形物では、タングステンが多数析出している箇所があり、割れの起点となっていると考えられる。

熱処理後の試験片については、ステンレス鋼積層造形部で破断しており、コバルト基合金と十分な接合強度が得られていることが分かる。また、ステンレス鋼の破断面には欠陥等は存在していなかった。引張強さも JIS G4303 に規定されている SUS316L の引張強さ 480MPa 以上を満たしていた。この結果から、ステンレス鋼積層造形物へのコバルト基合金を積層造形した際には、十分な接合強度が得られると考えられるが、N数が1と少ないため実用可否の判断には注意が必要である。

表4 引張試験結果

	引張強さ [MPa]	破断位置
熱処理前-1	246	つかみ部
熱処理前-2	297	試験片肩部
熱処理後	516	ステンレス鋼積層造形部



(a) 熱処理前 (2本) (b) 熱処理後 (1本)
 図6 引張試験後の様子

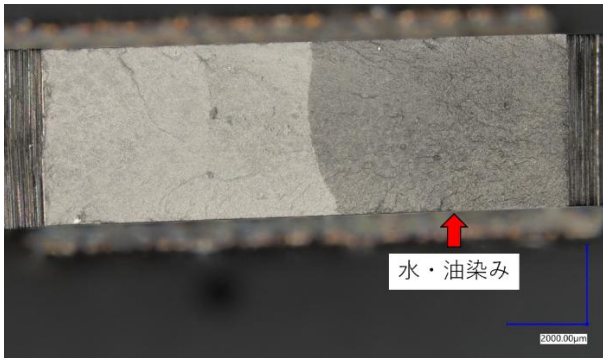


図7 破断面の様子 (マイクロスコープ)

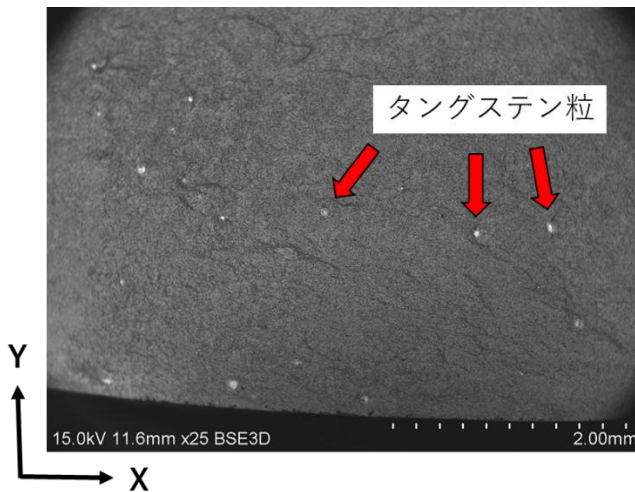


図8 破断面の様子 (電子顕微鏡)

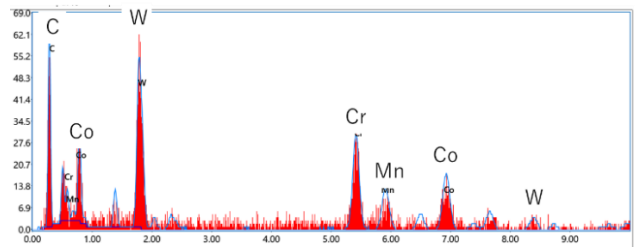
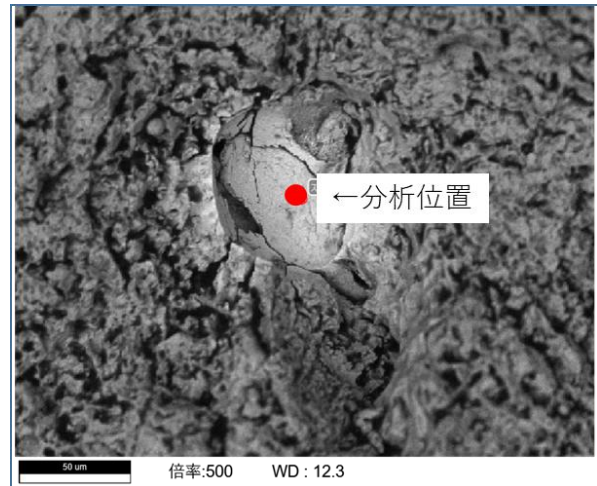


図9 破断面分析結果 (タングステン粒拡大)

2. 3. 硬さ試験結果

硬さ試験結果を図10に示す。ステンレス鋼積層造形部は熱処理前後ともに 160 [HV0.2] 程度であった。コバルト基合金積層造形部は熱処理前が 380 [HV0.2] 程度、熱処理後は 450 [HV0.2] 程度であり、熱処理により硬さが増加していることが分かる。成分の希釈・拡散のためか、コバルト基合金積層造形部側 2mm 程度まで (積層造形 1 層分) は硬さが低い結果となっている。溶け込み部は硬さが連続的に変化しており、熱処理により硬さが増加している。引張試験では、熱処理前品は割れにより接合界面の正しい評価ができなかったが、硬さ試験結果から、割れが無かった場合、ステンレス鋼積層造形部で破断していたと予想される。

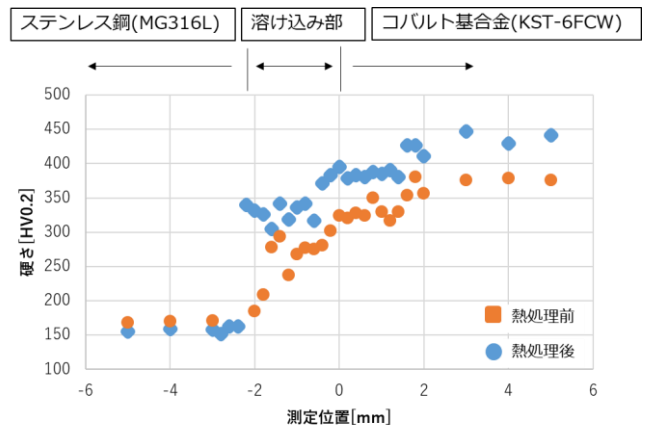


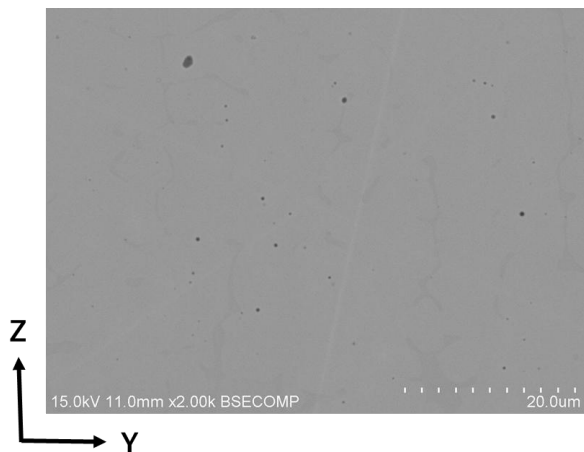
図10 硬さ試験結果

2. 4. 組織観察結果

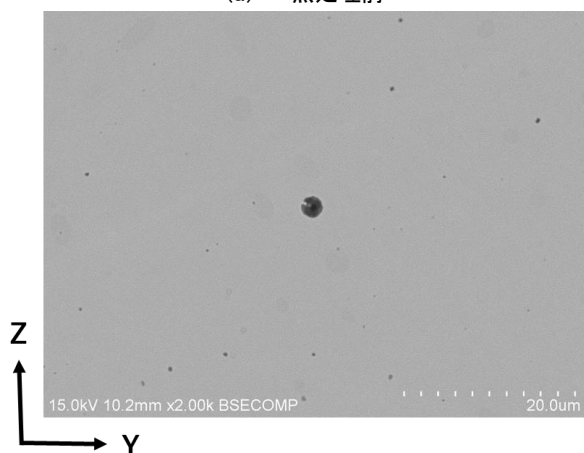
図 1 1 にステンレス鋼積層造形部の組織観察結果を、図 1 2 に溶け込み部の組織観察結果を、図 1 3 にコバルト基合金積層造形部の組織観察結果を示す。

ステンレス鋼積層造形部はオーステナイト素地組織中に網目状フェライトと粒状の Mn、Si 酸化物が見られた。この酸化物は溶接ワイヤに含まれる脱酸材である Si、Mn 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 Mn、Si 酸化物は比重が小さく、ビード表面に生成するが、積層造形ではその表面にさらに積層造形を行うため、組織中に分散していると考えられる。熱処理の前後で酸化物の形状、分布に差は見られないが、網目状組織については大部分が素地組織中に溶け込み消失していることが分かった。

コバルト基合金積層造形部では、Cr と W を含む Co 固溶体の樹枝状組織の間に Co 固溶体と Cr-W 炭化物の共晶組織が存在している。また、W 単体での析出も見られ、その周囲には W と Co、Cr、Fe の合金層が生成しており、熱処理後には W が粒界に拡散している。



(a) 熱処理前



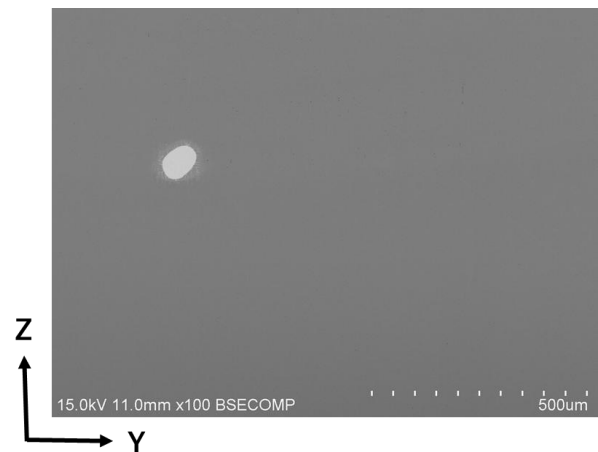
(b) 熱処理後

図 1 1 ステンレス鋼積層造形部の組織観察結果
(反射電子像、2,000 倍)

図 1 4、図 1 5 には熱処理前後の元素マッピング結果を示す。

また、図 1 6 に示すようにコバルト基合金積層造形部ではタングステンの析出が多い部分と少ない部分とが層状になっている。これは比重差により熔融池内でタングステンが沈むためと考えられる。図では、タングステンの析出が多い部分を赤枠で示した。2. 2. 引張試験結果で、割れ部の破断面にはタングステンが多く見られていたが、これはタングステンの析出が多い部分で割れが進展したものと考えられる。タングステンはヤング率が非常に大きく、周囲の組織に比べ変形しづらいため、変形の際には疑似的な欠陥のように働くと想定される。

溶け込み部の組織はコバルト基合金積層造形部とほぼ同一であるが、コバルト基合金がステンレス鋼により希釈された成分となっていた。各部位の簡易定量分析結果を表 5 に示す。なお、分析は EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) により行っており、定量精度は低いことに注意が必要である。

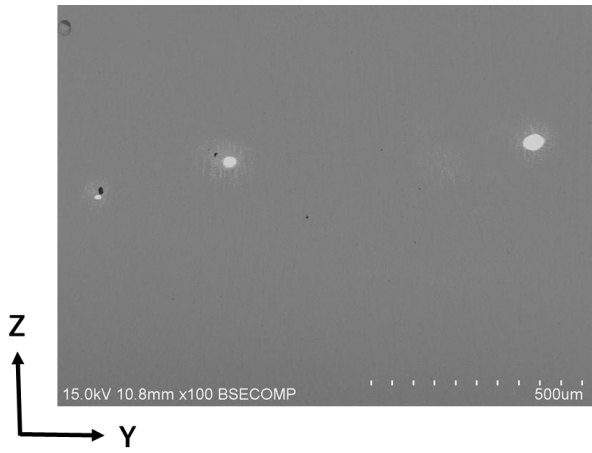


(a) 熱処理前

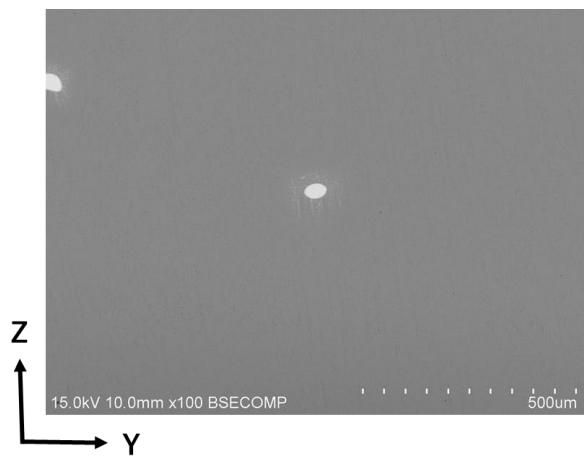


(b) 熱処理後

図 1 2 溶け込み部の組織観察結果
(反射電子像、100 倍)



(a) 熱処理前



(b) 熱処理後

図13 コバルト基合金積層造形部の組織観察結果
(反射電子像、100倍)

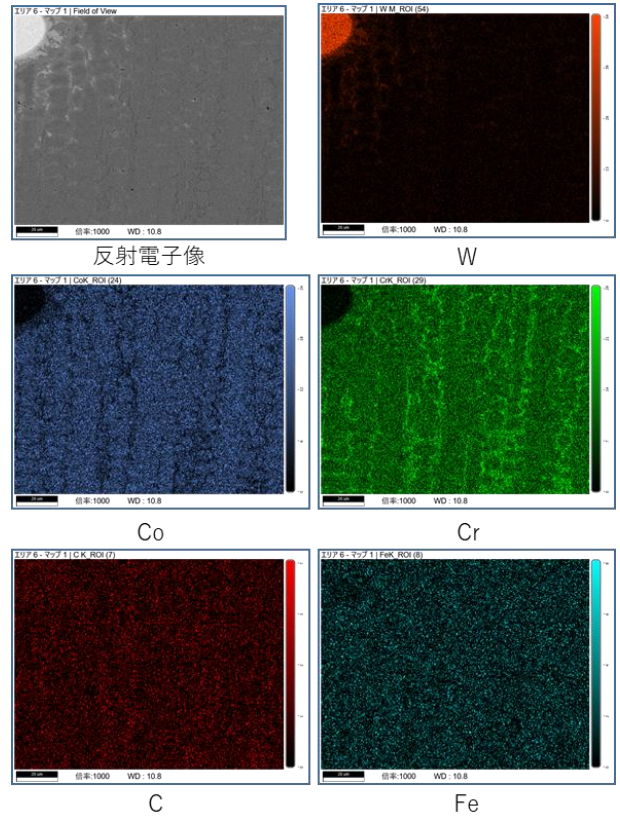


図14 コバルト基合金積層造形部の組織観察結果
(熱処理前マッピング)

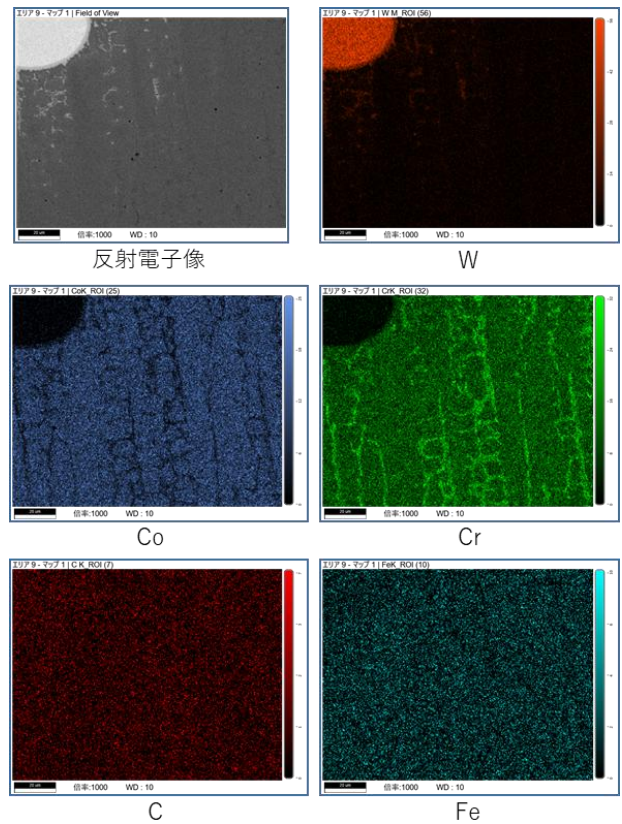


図15 コバルト基合金積層造形部の組織観察結果
(熱処理後マッピング)

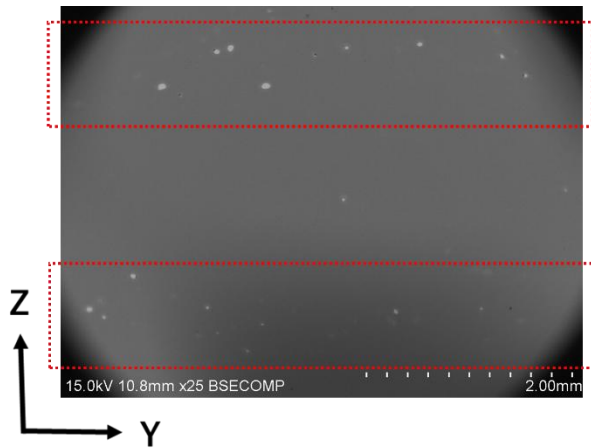


図 16 コバルト基合金積層造形部の組織観察結果
(反射電子像、25倍)

表 5 各部位の簡易定量分析結果

	Co	Cr	Fe	Ni	W	Mo
コバルト基合金	52.3	29.1	4.7	1.3	5.3	-
溶け込み部	30.8	24.3	29.2	4.6	3.3	0.9
ステンレス鋼	-	18.5	59.7	10.9	-	1.9

単位 %

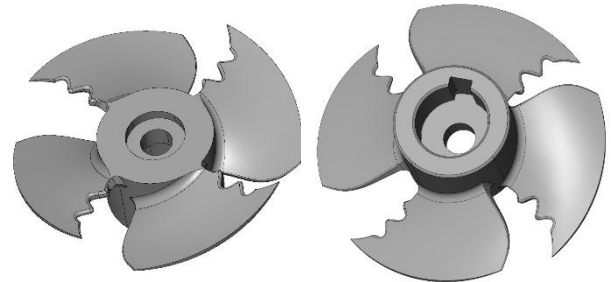
3. 羽根部の積層造形

3. 1. 作製方法

今回作製するインデューサ形状を図 17 に示す。作製方法は、WAAM 方式により母材ハブ部周囲に羽根形状を作製するが、羽根部の先端付近のみコバルト基合金とし、それ以外にはステンレス鋼を用いた。具体的には、羽根部の根元から 14 層 (28mm 程度) はステンレス鋼とし、その後先端まで 5 層 (10mm 程度) はコバルト基合金とした。コバルト基合金を積層造形する前に、ステンレス鋼積層造形部表面を切削加工し、羽根部高さを 28.5mm に揃えた。母材には直径 53mm、高さ 125mm の SUS304 丸棒を用いた。

積層造形条件は、これまでの結果²⁾を基に表 6 の条件とした。羽根部の根本付近は厚みが必要なため、ウィービングにより造形幅を増すこととした。根元から 1-4 層はウィービング幅 8mm、ピッチ 5mm とし、5-9 層はウィービング幅 4mm、ピッチ 5mm とした。

なお、パスの作成には、OPEN MIND 社製の hyperMILL を用いている。



(a) 表面 (b) 裏面

図 17 作製するインデューサの外観

3. 2. インデューサ形状の積層造形結果

インデューサ作製の様子を図 18~20 に示す。積層造形後、東芝ユニファイドテクノロジーズ (株) 製の X 線 CT 装置 (TOSCANER-24500AVFD) により内部欠陥の有無を確認した。図 21 に X 線 CT 観察結果を示す。今回の撮影条件では、おおよそ 0.5mm 程度以上の大きさの欠陥から観察が可能である。観察の結果、内部欠陥は確認できず、良好な積層造形ができていると考えられる。なお、積層造形に要した時間は、ステンレス鋼に約 4 時間、コバルト基合金では約 2 時間であり、これ以外にワイヤ交換及び位置合せ、一部切削加工に約 1 時間を要している。

表 6 積層造形条件

積層材種	溶接方法	電流 A	電圧 V	ワイヤーフィード m/min	トーチ送り m/min	シールドガス	パス間温度 °C
MG316L	CMT	243.0	13.8	9.0	600.0	Ar	100
KST-6FCW	CMT	200.0	20.0	6.8	600.0	Ar	300

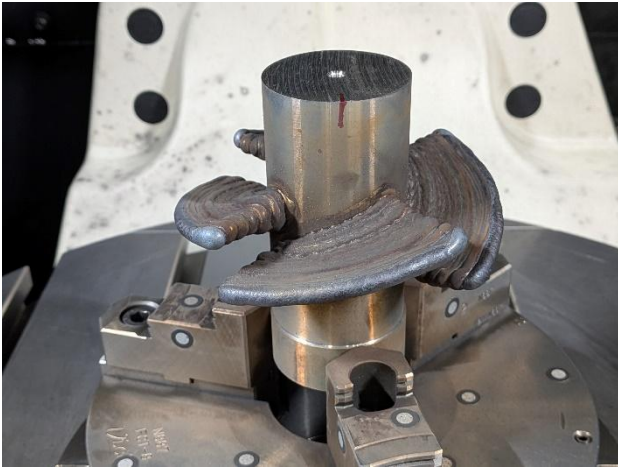


図 18 ステンレス鋼積層造形後の形状

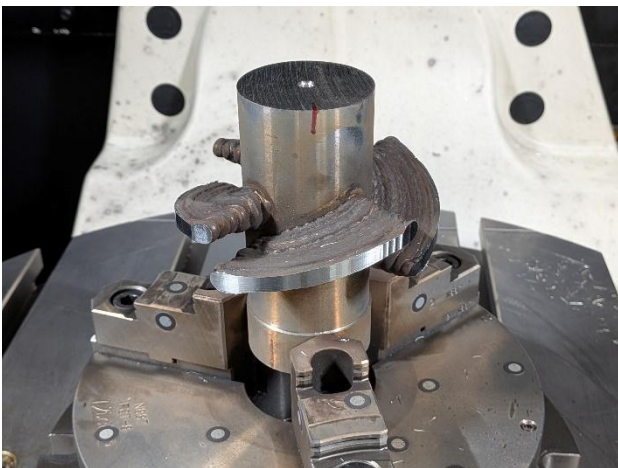


図 19 ステンレス鋼積層造形物表面切削後の形状



図 20 コバルト基合金積層造形後の形状

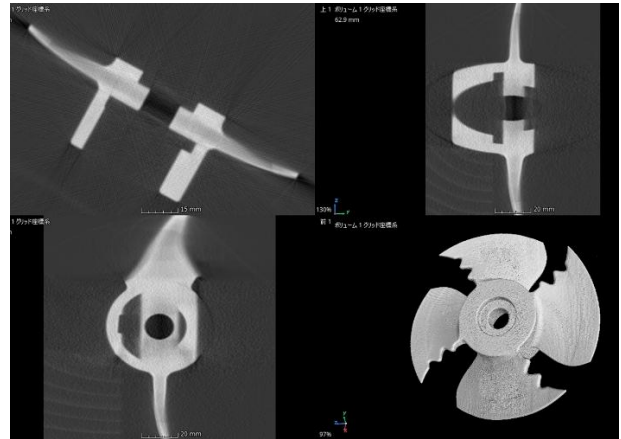


図 21 インデューサの X 線 CT 観察結果

4. 結言

ステンレス鋼積層造形物上にコバルト基合金を積層造形した際の接合部の評価及び羽根部にステンレス鋼とコバルト基合金を用いたインデューサを作製し、以下の結果を得た。

- 1) コバルト基合金は積層造形高さが 40mm 以上で割れの発生リスクが非常に高く、積層造形が困難である。
- 2) ステンレス鋼積層造形物上へのコバルト基合金の積層造形は十分な接合強度が得られると考えられるが、試験 N 数が少ないため、実用可否の判断には注意が必要である。
- 3) ステンレス鋼積層造形物とコバルト基合金積層造形物の接合界面の硬さ分布は、ステンレス鋼側が 160[HV0.2] 程度、コバルト基合金側が 380[HV0.2] 程度であった。ステンレス鋼の固溶化熱処理により、コバルト基合金側の硬さが増加することが分かった。
- 4) 今回用いた積層造形条件であれば、ステンレス鋼とコバルト基合金を用いた羽根部の積層造形が可能であると分かった。また、造形品の X 線 CT 観察結果から、0.5mm を超える大きさの欠陥を含まないことが分かった。

参考文献

- 1) 安齋弘樹, 小林翼, 佐藤善久. 羽根部に複数の金属を使用したインデューサ作製方法の検討. 2025.
- 2) 安齋弘樹, 小林翼, 佐藤善久. WAAM 方式によるステライトの積層造形条件の検討. 令和 6 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/attachment/704494.pdf>, (参照 2025-11-17)