

特集：金属積層造形技術（WAAM 方式）の最新動向

アーク溶接技術を活用した金属 3D 造形技術と 複合構造材料創成への展開

物質・材料研究機構
北野 萌一

1. はじめに

Wire and Arc Additive Manufacturing(WAAM)は、アーク溶接技術を高速、低コストな金属溶融・凝固技術と捉えて活用する、金属 3D 造形技術である。アーク溶接プロセスでは、母材表面および素材金属(溶接ワイヤ)をアーク放電により素早く溶かして、開先内に堆積・一体化することで溶接継手を製作するが、WAAM プロセスでは、開先内では無く平板上に素材金属を積み重ねることで、所望の形状の造形部材を製作する。

金属粉末を素材として用いる Selective laser melting(SLM)方式¹⁾や Laser metal deposition(LMD)方式²⁾等の造形技術と比べて、金属ワイヤを素材として用いる WAAM は材料コストが安価であるという利点がある。また、熱源としてもレーザや電子ビームを用いる方式と比べて、アークを用いる WAAM は装置も安価であるという利点がある。

これまでに、WAAM による鉄鋼材料やアルミ合金、チタン合金等の構造材料の造形物製作と特性評価が行われており、適切な造形条件(溶接プロセスにおける溶接条件に相当)を採用すれば、鍛造材や鋳造材と同等の静的特性を持つことが明らかにされている^{3,4)}。

以上の通り、WAAM による造形物製作に関する基礎検証は進んでおり、今後は実用を見据えた検証・開発が重要になると考えられる。

そこで、本稿では、まず、今後新たに WAAM を用いた造形物製作技術の開発に携わろうとする研究者・技術者に向けての参考情報として、WAAM の概要と、他の金属 3D 造形技術と比較した場合の WAAM の位置付けについて整理する。その後、WAAM の一つの応用展開として、著者らが検討を進めている、異種鉄鋼材料を複合化して製作する複合鉄鋼材料に関する研究成果を紹介する。具体的には、低変態温度溶接材料の部分利用による WAAM 造形物の変形・残留応力の低減手法に関する研究⁵⁾と、強度・延性が異なる鉄鋼材料の複合化による高強度・高延性造形物の製作に関する研究⁶⁾について紹介する。

WAAM では素材として溶接ワイヤを用いるため、使用ワイヤを切り替えるだけで、比較的容易に異なる材料を複合化することができる。このような特徴は他の加工方法(切削や鋳造、鍛造)や他の金属 3D 造形技術にはあまり無い特徴である。そのため、複合化が容易であるという特徴を積極的に活用する方法を確立することで、WAAM 利用のメリットが大きくなり、WAAM の実応用が促進されると著者は考えている。

2. WAAM の概要とその他の造形技術との比較

2.1 WAAM の概要

WAAM は、前述の通り、金属 3D 造形技術の一つであり、造形物製作フローはその他の造形技術と共通である。すなわち、**図 1**に示すように、所望の造形物形状を 3D CAD モデル等によりモデリ

ングし、2D スライスデータに分割、その後 2D スライスデータに対応する様に、1 層ずつ金属材料を溶融・堆積していくことで、最終的な 3D 形状を持つ造形物を製作する。WAAM では 1 層厚さはおよそ 2 mm 程度である。このようなフローにより、複雑な形状の造形物製作が可能となる。また、削り出しによる 3D 形状の製作と比べて、材料を無駄なく利用することができるという利点もある。

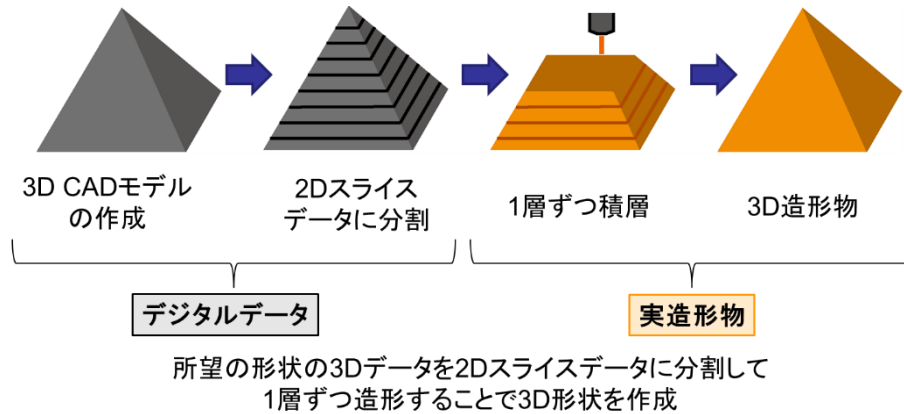


図 1 金属 3D 造形技術における造形物製作フロー

WAAM では、既積層部の過度な溶融を避けるため、高能率かつ低入熱な Cold Metal Transfer(CMT)方式⁷⁻⁸⁾の溶接プロセスや、アークの指向性が高いプラズマアーク溶接プロセスが採用されることが一般的である。また、溶接トーチは溶接ロボットシステムにより走査する方式が一般的であるが、マシニングセンタ内に溶接トーチを設置し、テーブルもしくは溶接トーチを動作させるシステムも開発されている。溶接ロボットシステムを採用した場合には、ロボットの動作範囲が造形可能範囲となり、比較的大きな造形物が製作できるという利点がある。マシニングセンタ内で造形を行う場合、造形後そのまま仕上げ機械加工を行うことができるという利点もある。

パスプランニング(熱源をどのような順序で走査するか)については、他の造形技術である SLM や LMD と同様に、3D CAD モデルや 2D スライスデータから自動でパス設定を行うシステムの開発が進められている⁹⁾。ただし、比較的单純な形状の造形物製作では、ロボット溶接と同様にティーチングにより、溶接トーチの移動経路を直接指示することも可能である。

WAAM の素材となる金属ワイヤについては、将来的には専用ワイヤの開発が進められることが予想されが、現状は溶接ワイヤを使用するのが一般的である。

以上を纏めると、溶接トーチの移動経路をティーチングにより設定し、素材として溶接ワイヤを用いる場合、WAAM による造形物製作技術の開発を開始するための最小構成は、低入熱方式溶接が可能な溶接システム(CMT 方式もしくはそれに類似した方式)と溶接ロボットシステムである。上記システムの一方あるいは両方を保有している場合、比較的安価に WAAM による造形物製作に関する検討を実施可能であり、WAAM は金属 3D 造形技術の中では参入障壁の低い技術であると考えられる。

2.2 WAAM とその他の金属 3D 造形技術との比較

金属 3D 造形技術の特性を定義付ける重要な因子として、造形速度(時間当たりの造形堆積, cc/h)、特徴サイズ(造形可能な最小サイズ, mm)、材料コスト(kg/円)がある。造形速度が速い手法を用いれば、短時間での造形物の製作が可能となり、製品の大量生産が可能となる。また、特徴サイズが小さければ、薄い壁面や緻密で複雑な造形物を製作することができる。材料コストが低ければ、安価に大

型の造形物製作が可能となる。

表 1 に、代表的な金属 3D 造形技術である SLM および LMD と WAAM について、上述の 3 因子を纏めたものを示す。各項目には、数値を記載しているが、これらは著者の経験やカタログ値等を参考に決定したものである。そのため、装置や材料メーカによって異なる数値となることに留意されたい。表 1 より、WAAM は SLM や LMD と比べて、安価な材料を用いて高速な造形が可能である一方で、特徴サイズが大きいことがわかる。そのため、WAAM は緻密で複雑な形状を持つ小型の造形物を製作する用途では、メリットが余り得られず、構成要素が大きく大型の造形物を製作する用途に適したプロセスであるといえる。

WAAM を用いた造形物製作技術の開発を開始する際には、以上の WAAM の概要や特徴、位置付けを理解し、WAAM を選定することのメリット・デメリットを整理しておくことが重要である。また、WAAM および LMD はその大きな特徴サイズにも現れているように、1 パスのサイズが大きく、造形物の壁面には凹凸(WAAM の場合、およそ 0.5 mm 程度の凹凸)が生じる。そのため、仕上げ加工が必要なことが多く、後加工のコストも含めて、製作コストの見積もりを行う必要がある。

表 1 各種金属 3D 造形技術と WAAM の比較

造形技術	造形速度	特徴サイズ	材料コスト
SLM	△ (約100 cc/h)	◎ (約0.2 mm)	△ (ステンレス鋼系: 約10,000円/kg)
LMD	○ (約250 cc/h)	○ (約1 mm)	△ (ステンレス鋼系: 約10,000円/kg)
WAAM	◎ (約450 cc/h)	△ (約2 mm)	◎ (ステンレス鋼系: 約2,000円/kg)

3. WAAM を用いた複合鉄鋼材料の創成

3.1 低変態温度溶接材料の部分利用による造形物の変形・残留応力の低減

WAAM 造形物は溶接部材と同様に、局所的な加熱に起因した変形や残留応力が生じる。本節では、溶接部材の変形・残留応力の低減のために開発された溶接材料である低変態温度溶接材料を WAAM 造形に適用した結果を紹介する。ここで、WAAM プロセスには、CMT 方式の溶接システムとロボット溶接システムを用いた。

3.1.1 低変態温度溶接材料の概要

低変態温度溶接材料は、図 2 に示すように熔融後の冷却過程で、室温付近でマルテンサイト変態を起こして膨張するように組成(Ni 量や Cr 量)を調整した材料である。冷却過程でマルテンサイト変態を生じる一般的な溶接材料(図中の通常溶接材料)と比べてマルテンサイト変態温度が低いために、低変態温度溶接材料と名付けられた。低変態温度溶接材料を用いることで、溶接部材の変形や残留応力の原因となる収縮(固有)ひずみを打ち消す作用が生じ、結果として溶接部材の変形や残留応力が低減される。既に、溶接部材への低変態温度溶接材料の適用効果の検証が行われている¹⁰⁾。

著者らは、WAAM による造形物製作において、部分的に低変態温度溶接材料を用いることで、溶接部材と同様に、変形や残留応力が低減可能であると考え、その検証を行った。

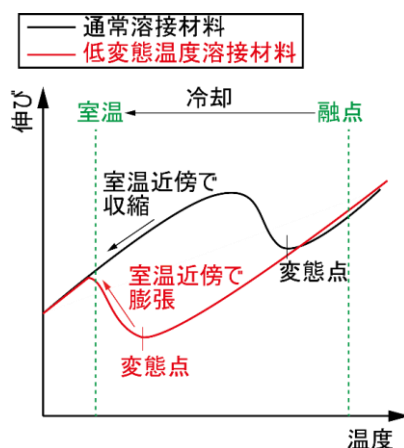


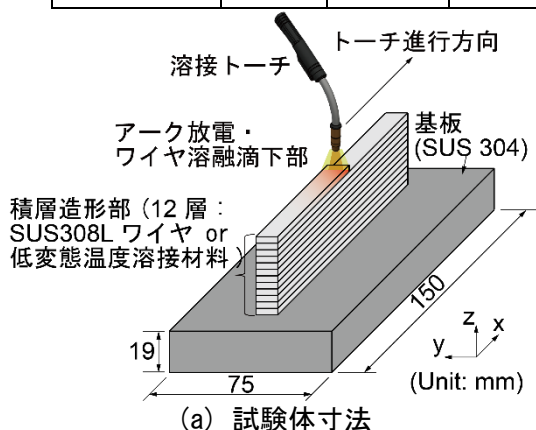
図2 通常および低変態温度溶接材料の冷却過程での膨張、収縮挙動

3.1.2 WAAM への低変態温度溶接材料適用効果の検証⁵⁾

図3に示すように SUS304 製の基板の上に SUS308L ワイヤおよび低変態温度溶接材料を用いて、壁状の造形物を製作した。両材料の組成および変態温度(M_s 点)を表2に示す。ここで、SUS308L ワイヤの M_s 点は、実験式を用いて組成から計算された参考値である。また、SUS308L ワイヤはオーステナイト系ステンレス鋼であり、 M_s 点は低変態温度溶接材料よりも低く、室温以下の温度である(室温環境ではプロセス完了後までにマルテンサイト変態を生じない)ことに注意されたい。造形物は、図4(a)に示す様に全12層を SUS308L ワイヤにて造形した造形物(造形物1)、最初の6層を低変態温度溶接材料で造形してその後の6層を SUS308L ワイヤにて造形した造形物(造形物2)、全12層を低変態温度溶接材料で造形した造形物(造形物3)の3種類製作し、変形および残留応力を評価した。造形物2は低変態温度溶接材料を部分的に使用した際の変形および残留応力状態を評価するために製作したものである。

表2 SUS308L ワイヤおよび低変態温度溶接材料の化学組成および変態温度⁵⁾

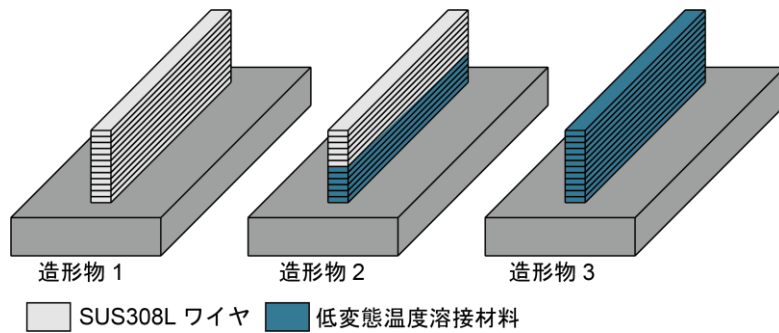
材種	化学組成 (wt%)						変態温度 M_s 点 (K)
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	
SUS308L ワイヤ	0.024	0.85	1.58	10.6	19.91	-	189
低変態温度 溶接材料	0.026	0.320	0.070	10.000	10.000	0.130	453



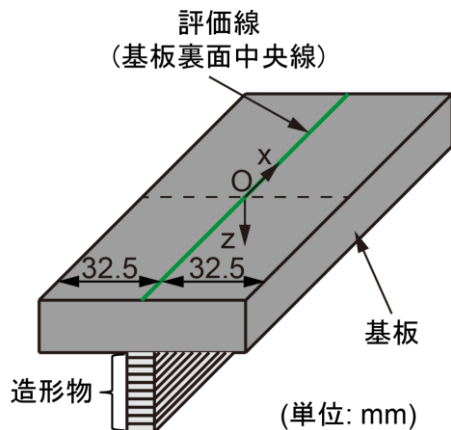
(a) 試験体寸法

(b) 試験体概観

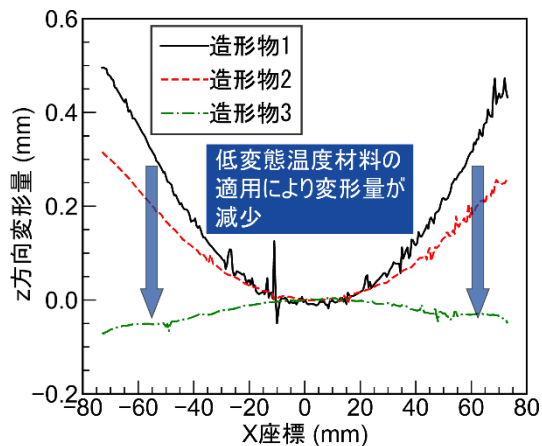
図3 WAAM への低変態温度溶接材料適用効果検証のための試験体概要



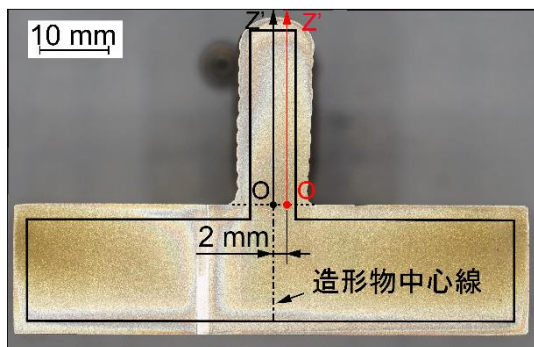
(a) 製作した造形物の層構成



(b) 変形評価線(基板裏面中央線)

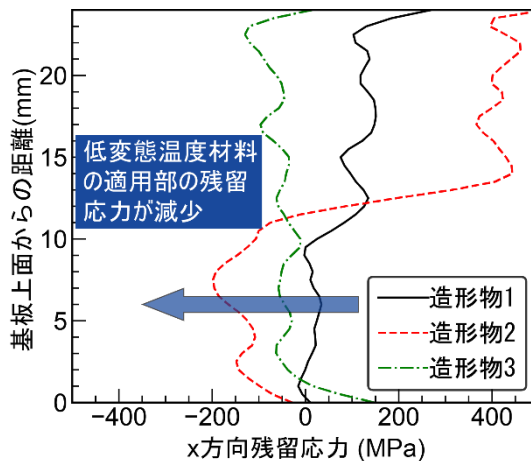


(c) 評価線上の変形量測定結果



→ 造形物1, 2における評価線
→ 造形物3における評価線

(d) 残留応力評価線
(造形物中央断面内の造形物中心線近傍)



(e) 評価線上の残留応力評価結果

図 4 WAAM への低変態温度溶接材料適用効果検証結果⁵⁾

非接触三次元測定機により基板裏面の中央線上(図 4(b)参照)の変形量(溶接部材での縦曲がり変形に相当)を図 4(c)に示す。また、放電加工面に存在していた残留応力を評価する手法であるコンター法により、造形物中央断面内の残留応力を評価した結果について、図 4(d)で定義する評価線上の残留応力分布を抽出した結果を図 4(e)に示す。

図 4(c)より、低変態温度溶接材料を部分利用した場合(造形物 2)、全ての層を低変態温度溶接材料とした場合(造形物 3)には及ばないものの、SUS308L ワイヤのみで造形した場合(造形物 1)と比べて、変形量が減少していることがわかる。また、図 4(e)より、SUS308L ワイヤのみで造形した場合(造形

物¹⁾、ほぼすべての領域で引張応力となっていることがわかる。このような引張残留応力は疲労寿命を低下させる原因となることが知られている¹¹⁾。低変態温度溶接材料を部分利用した場合(造形物²⁾と全ての層を低変態温度溶接材料とした場合(造形物³⁾)には、低変態温度材料を適用した領域近傍で圧縮残留応力となっていることがわかる。また、変態温度溶接材料を部分利用した場合(造形物²⁾)の圧縮残留応力の絶対値は、全ての層を低変態温度溶接材料とした場合(造形物³⁾)と比べて大きくなっていることがわかる。これは、造形物²⁾において、後続の SUS308L ワイヤによる造形層の収縮を拘束するために付加的な圧縮応力が加わっているためであると考えられる。後続の SUS308L ワイヤによる造形層の引張残留応力が、SUS308L ワイヤのみで造形した造形物¹⁾の引張残留応力値に比べて大きいのは、低変態温度溶接材料はマルテンサイト系の材料であり高強度であるため(同種材料による溶接部の引張特性評価では 1000~1200 MPa 程度の引張強さであることが報告されている¹²⁾)、SUS308L ワイヤによる造形層の収縮が強く拘束されるためである。各造形物の変形状態、残留応力値・分布と積層方法(材種の構成や積層順序)の関係についての詳細理解は今後の検討課題であり、現在は WAAM 造形中の熱弾塑性挙動評価のための有限要素シミュレーション手法の開発を進めている¹³⁾。開発手法を用いることで、プロセス中の弾塑性挙動の時刻歴を得ることができるため、より詳細な議論ができると考えている。以上を纏めると、低変態温度材料を部分的、または全体に使用することで、変形状態、残留応力値やその分布を制御できることがわかった。一般に低変態温度材料は、通常の溶接材料よりも高価であることを踏まえると、変形量をどの程度低減したいかにもよるが、部分的な利用とすることで、材料コストを抑えつつ、変形の低減も可能となるといえる。また、残留応力の観点からは、部材に応力集中箇所が存在し、その部分のみの疲労特性を確保したい場合には、低変態温度溶接材料の部分利用が効果的であるといえる。

以上の通り、WAAM の一つの特徴である、材料切り替えが比較的容易という特徴を活かすことで、材料コストと部材特性のバランスをとった造形物の製作が可能になる。

3.2 強度特性の異なる鉄鋼材料の複合化による高強度・高延性造形物の創成

3.2.1 複合鉄鋼材料の強度特性

積極的に材料内の強度特性(強度や延性)を分布させた複合鉄鋼製品として、古くから存在する代表的なものは日本刀である。日本刀では、刀身に延性や強度の異なる皮鉄、芯金、刃金、棟金を適切に配置し、一体化することで、折れにくくかつ曲がりにくい特性を実現している。現代においても、小関らはメゾ(サブミリ~ミリ)スケールで強度特性の異なる鋼板を積層圧延により一体化した複層鋼板の概念を提唱しており、適切な材料の組み合わせにより図 5 に示すように均一材の強度-延性関係を凌駕する、すなわち強度と延性を兼備した複合鉄鋼材料を製作できることを実証している¹⁴⁾。

著者らは、WAAM による造形物製作においても、強度特性の異なる材料を複合化することで、強度と延性を兼備した複合鉄鋼造形物の製作が可能であると考え、その検証を行った。

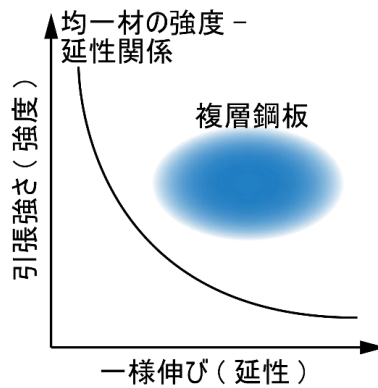


図5 複層鋼板の強度・延性バランスのイメージ

3.2.2 WAAMによる複合鉄鋼造形物の製作と評価⁶⁾

高強度材料としてマルテンサイト系ステンレス鋼ワイヤ(SUS410 ワイヤ)を、高延性材料としてオーステナイト系ステンレス鋼ワイヤ(SUS308L ワイヤ)を用いて、図6の壁状造形物を製作した。造形物は、図7(a)に示す様に全層を SUS410 ワイヤにて造形した造形物(造形物 1)、SUS410 ワイヤと SUS308L ワイヤを層ごとに切り替えて造形した造形物(造形物 2)、全層を SUS308L ワイヤで造形した造形物(造形物 3)の3種類製作し、断面評価(断面マクロ観察および硬さ分布評価)および強度特性評価を行った。

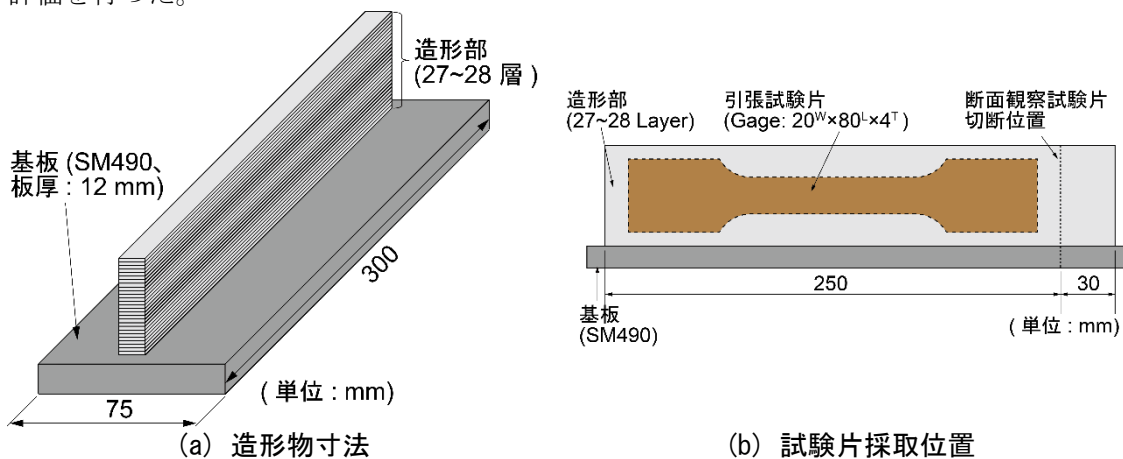
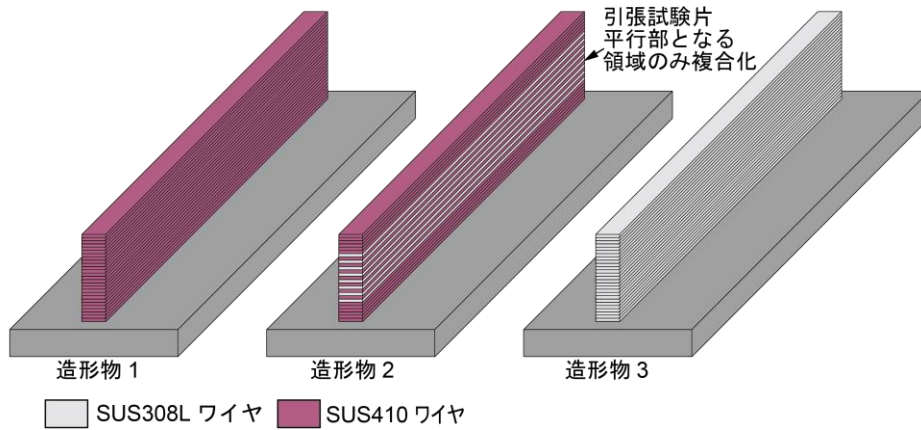


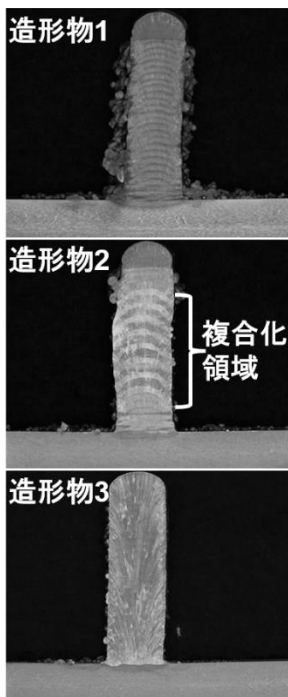
図6 複合鉄鋼造形物の寸法および試験片採取位置

図7(b)~(d)に断面マクロ観察結果、複合鉄鋼造形物(造形物 2)の断面硬さ分布評価、引張試験結果を示す。また、図7(e)には引張試験結果から算出される引張特性を纏めたものを示す。図7(b)に示す通り、複合鉄鋼造形物(造形物 2)は、引張試験片の平行部に含まれる範囲内で、複合化(SUS410 ワイヤと SUS308L ワイヤの切り替え造形)を行っている。その他の領域は SUS410 ワイヤで造形を行った。図7(c)より、複合鉄鋼材料では、ワイヤ切り替えにより、硬度が高い領域と低い領域が層状に分布していることがわかる。この結果より、ワイヤ切り替え造形により、強度特性が分布した造形物を製作できていることが確認された。図7(d)、(e)より、複合鉄鋼造形物(造形物 2)は高強度均一材(造形物 1)と同程度の引張り強さを示しつつ、大きな一様伸びおよび破断伸びを示していることがわかる。高延性均一材(造形物 3)の引張特性と比較した場合、複合鉄鋼造形物(造形物 2)は、伸びについては半分程度になっているものの、高い強度を示しているといえる。

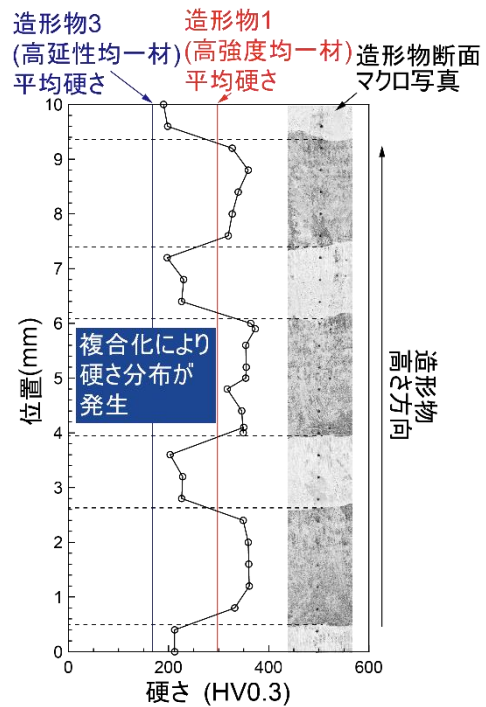
以上の通り、WAAMにより強度特性の異なる材料を切り替えながら造形を行うことで、強度特性を能動的に分布させた造形物の製作が可能であり、その造形物は、均一材とは異なる、強度・延性バランスを示すことがわかった。



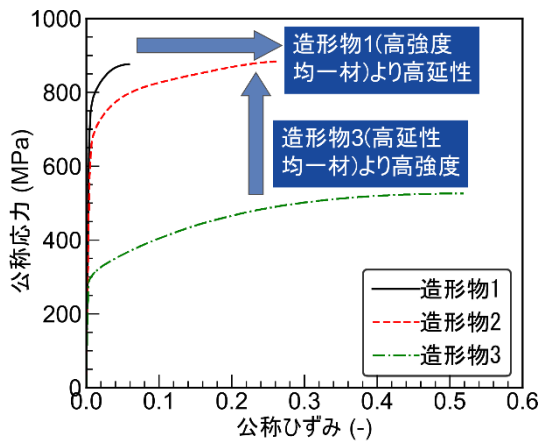
(a) 製作した造形物の層構成



(b) 断面マクロ観察結果



(c) 複合鉄鋼造形物(造形物2)の硬さ分布評価結果



(d) 引張試験結果

	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
造形物1	876	5.9	11.4
造形物2	884	26.4	29.8
造形物3	526	51.9	58.1

(e) 引張特性纏め

図7 WAAMで製作した複合鉄鋼造形物の評価結果⁶⁾

本章では、低変態温度溶接材料の部分利用および強度特性の異なる材料の複合化による高性能造形物製作の可能性を示した。WAAM による複合材料創成の概念を活用することで、形状のみならず、メゾスケールでの特性分布もデザインする、新たな金属 3 次元造形技術の開発へと展開することができると考えている。

4. おわりに

本稿では、比較的安価かつ高速に 3 次元形状を持つ部材の製作が可能な WAAM についての概要と、他の金属 3D 造形技術と比較した場合の WAAM の位置付けについて説明した。さらに、WAAM の一つの応用展開として、異なる特性を有する鉄鋼材料の複合化による効果に関する研究成果を紹介した。

WAAM 造形物の特性は、造形物の形状や熱履歴、材種等が影響し合って、決定される複雑なものである。WAAM 構造物の実用・応用範囲の拡大のためには、そのような特性を予測する技術、特性を向上させる技術の研究・開発が重要であり、今後の発展が期待される。

本稿が、WAAM を用いた造形物製作技術の開発に携わっている、あるいはこれから携わる研究者・技術者の参考になれば幸いである。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K15316 の助成を受けて行ったものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) J.P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts and B. Lauwers: Selective laser melting of iron-based powder, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3 (2004), 616-622.
- 2) G.P. Dinda, L. Song, and J. Mazumder: Fabrication of Ti-6Al-4V Scaffolds by Direct Metal Deposition, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, No. 12 (2008), 2914-2922.
- 3) F. Wang, S. Williams, Paul Colegrove and A. A. Antonysamy: Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 44, No. 2 (2013), 968-977.
- 4) 田中敬三, 阿部壮志, 吉丸玲欧, 笹原弘之: アーク放電を用いた熔融金属積層による造形物の強度, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 79, No. 800 (2013), 1168-1178.
- 5) 北野萌一, 中村照美: 低変態温度溶接材料を用いた熔融金属積層造形材の変形低減法に関する基礎的検討, *溶接学会論文集*, Vol. 36, No. 1 (2018), 31-38.
- 6) 北野萌一, 中村照美: 高延性層と高強度層で構成される熔融金属積層複合材の機械的特性, *溶接学会 2019 年度秋季全国大会*, (2019), 364-365.
- 7) C. G. Pickin and K. Young: Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, No. 5 (2006), 583-585.
- 8) 木寺正晃: 溶接電源の新しい展開～積層造形 (WAAM 方式) について, *WE-COM マガジン*, Vol. 39 (2021).
- 9) A. Yaseer and H. Chen: A Review of Path Planning for Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 20 (2021), 589-609.
- 10) 三上欣希, 望月正人, 豊田政男: 外的拘束下での溶接金属の変態膨張による角変形低減効果, *溶接学会論文集*, Vol. 25, No. 1 (2007), 74-79.
- 11) J. Zhang, X. Wang, S. Peddea, X. Zhang: Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additive

- manufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress, *Materials and Design*, Vol. 90, No. 15 (2016), 551-561.
- 12) 中村照美, 平岡和雄: 低変態溶接線材の研究開発の動向と実用化展開, *まてりあ*, Vol. 45, No.6 (2006), 429-437.
- 13) W. Huang, Q. Wang, N. Ma, H. Kitano: Distribution characteristics of residual stress in typical wall and pip components built by wire arc additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 82 (2022), 434-447.
- 14) 小関敏彦: 複層鋼板の開発, *NSST つうしん*, No. 88 (2015), 2-3.

<略歴>

北 野 萌 一 (きたの ほういち)

2014年3月 大阪大学大学院 工学研究科 博士後期過程修了
2014年4月 物質・材料研究機構 研究員
2015-2016年 ノースウェスタン大学 客員研究員(併任)
2018年4月- 物質・材料研究機構 主任研究員
現在に至る