

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：82108  
研究種目：若手研究  
研究期間：2019～2021  
課題番号：19K15316  
研究課題名(和文)ワイヤ溶融・積層式金属3Dプリント技術を応用した高強度・高延性複合鉄鋼材の創成  
研究課題名(英文)Creation of high-strength and high-ductility composite steel materials using wire and arc additive manufacturing technique  
研究代表者  
北野 萌一(KITANO, Houichi)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主任研究員  
研究者番号：40736972  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ワイヤ溶融・積層方式の金属3D造形技術(溶融金属積層法)を応用することで、ミリスケールで高強度層(硬質層)と高延性層(軟質層)を複合化した、高強度・高延性を兼備する複合鉄鋼材の概念を提唱し、その機械的特性の明確化を目的とした検討を行った。具体的には、高強度材料としてマルテンサイトステンレス鋼を、高延性材料としてオーステナイトステンレス鋼を用いた複合鉄鋼材を製作し、造形材全体としての機械的特性の評価、強度・組成・ミクロ組織分布の評価を行った。その結果から、溶融金属積層法により、形状に加えて強度特性をもデザインした3次元構造物の製作の可能性を示すことができた。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来鋼における強度-破断伸び(延性)間のトレードオフ関係を打破することを目指し、金属3D造形技術を活用して、メゾスケールで強度特性制御を行う新しい鋼材設計の概念を提案したものである。本研究で明らかにされた複合鉄鋼材に関する知見をベースとして、軽量かつ高強度、高延性な構造物の製作技術へと展開されることが期待され、鋼構造物を取り扱う産業のカーボンニュートラル化に寄与する成果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, the concept of a composite steel material with high strength and high ductility, in which a high-strength (hard) layer and a high-ductility (soft) layer are combined on a millimeter scale, was proposed by applying wire and arc additive manufacturing (WAAM) technique. Specifically, composite steel materials were fabricated using martensitic stainless steel as the high-strength material and austenitic stainless steel as the high-ductility material. The mechanical properties of the fabricated material were evaluated. In addition, the strength, composition and microstructure distribution were evaluated. The results show the feasibility of using the WAAM to fabricate three-dimensional structures with designed strength properties in addition to shape.

研究分野：金属3D造形技術、アーク溶接技術

キーワード：金属3D造形技術 複合鉄鋼材料 高強度・高延性材料 アーク溶接

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

金属 3D 造形技術の一つである、アーク放電により金属ワイヤを溶融し、積層する熔融金属積層法 (Wire and Arc Additive manufacturing: WAAM) は、時間当たりの造形量が多く、大きな部材の造形が可能な手法である。金属粉末をレーザーや電子ビームにより溶融・積層する Selective Laser Melting 方式や Direct Metal Deposition 方式と比べて、装置コストや材料コストが比較的安価であるといった利点がある。

WAAM の特徴の一つとして、素材として金属ワイヤを用いるため、積層プロセス中に金属ワイヤを切り替えることで、異種金属を容易に複合化できるという特徴がある。このような特徴を活用すれば、複層鋼板の様に、機械的特性が異なる鋼材を複合化することができる。複層鋼板とは、高延性鋼板と高強度鋼板を積層圧延により複層化した鋼板である。複層鋼板の大きな特徴は機械的特性にあり、組成や微視組織の制御のみでは達成し得ない、高延性と高強度の両立を達成している。WAAM でも同様にメソスケールで強度分布を制御することにより、強度と延性を兼ね備えた造形物の製作が可能であると考えられるが、これまでにそのような観点から検討を行った例は無い。

### 2. 研究の目的

本研究では、上述の背景を踏まえ、WAAM により実際に高強度層と高延性層から成る複合鉄鋼材料を製作し、その特性を評価する。具体的には、高強度材としてマルテンサイト系ステンレス鋼、高延性材としてオーステナイト系ステンレス鋼を使用した造形物を製作し、断面組織、組成・強度分布、造形物としての機械的特性を評価する。以上の検討により WAAM による高強度・高延性複合鉄鋼材創成の可能性検証を行うことを、本研究の目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 高強度層と高延性層の分率を変化させた複合鉄鋼材の製作

SM490 製のベースプレート上 (板厚: 12 mm) に、6 軸溶接ロボットを用いて、アーク放電により金属ワイヤを溶融、積層して造形物を製作した。造形物の概要を図 1 に示す。造形物寸法は、x 方向、y 方向にそれぞれ約 280 mm、15 mm である。積層数は、造形物の高さが機械的特性評価用試験片を採取可能な高さである 55 mm を超えるように、27 層もしくは 28 層とした。高延性層積層用の金属ワイヤとして、オーステナイト系ステンレス鋼である JIS 規格 YS308LSi 相当の溶接ワイヤ (以下 SUS308L ワイヤ) を、高強度層積層用の金属ワイヤとして、マルテンサイト系ステンレス鋼である JIS 規格 YS410 相当の溶接ワイヤ (以下 SUS410 ワイヤ) を使用した。高強度層と高延性層の分率が造形物の特性に及ぼす影響を評価するために、表 1 に示す通り、高延性層と高強度層の比率を変化させた造形物 (全 5 体) を製作した。

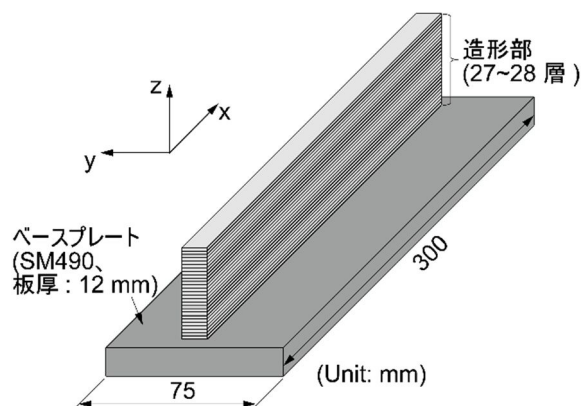


図 1 造形物の概要

高延性層と高強度層の比率を変化させた造形物 (全 5 体) を製作した。

#### (2) 造形物特性の評価方法

表 2 に各造形物に対して実施した評価項目を示す。引張試験および曲げ試験は、造形物の高さ中央近傍から試験片を採取し、図 1 中 x 方向に引張応力もしくは曲げモーメントが付与されるように試験を行った。断面組織観察は、観察面を鏡面に研磨した後、塩酸を用いて金属組織を現出させ、光学顕微鏡により行った。組成分析は EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) により行

表 1 造形物の高延性層・高強度層の比率

試験体	高延性層と高強度層の比率
1	高延性層:高強度層=1:0 (全層高延性層)
2	高延性層:高強度層=2:1 (高延性層 2 層積層-高強度層 1 層積層)
3	高延性層:高強度層=1:1 (高延性層 1 層積層-高強度層 1 層積層)
4	高延性層:高強度層=1:2 (高延性層 1 層積層-高強度層 2 層積層)
5	高延性層:高強度層=0:1 (全層高強度層)

表 2 造形物特性の評価項目(×は未実施)

試験体	断面観察	組成分布評価	硬さ分布評価	引張特性評価	曲げ特性評価
1					
2					×
3					
4					×
5					

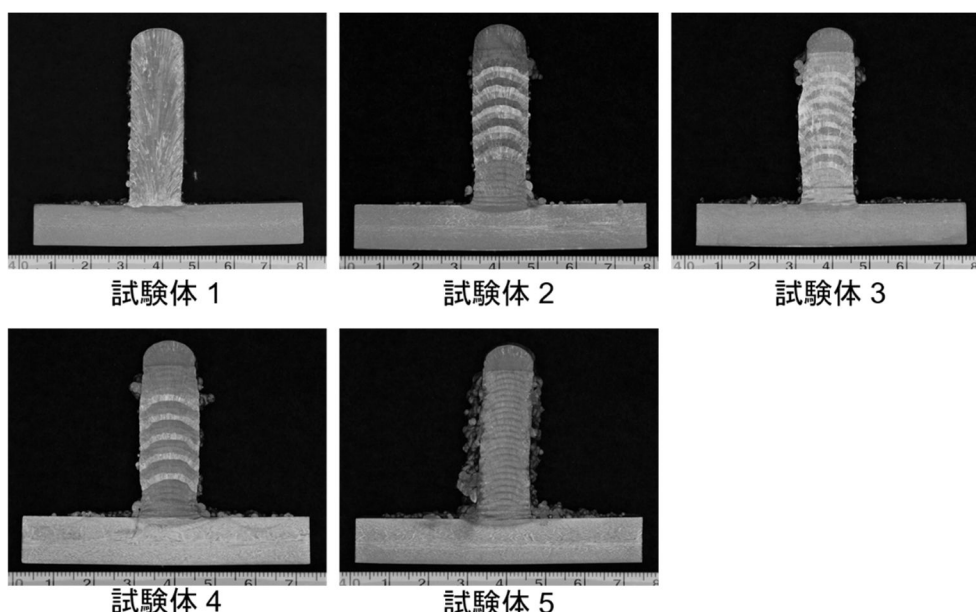


図 2 造形物断面観察結果

い、造形物高さ中央近傍の 7 層程度の積層部が含まれる様に、測定ラインを設定し、5  $\mu\text{m}$  間隔で測定した。ピッカース硬さ分布は、組成分析を行ったラインとほぼ一致するライン上で評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 造形物断面観察結果

図 2 に、造形物断面の光学顕微鏡による観察結果を示す。すべての層を SUS308L ワイヤで積層した場合(試験体 1)、層境界がほとんどみられず、デンドライト組織が層境界を超えて成長している。SUS308L ワイヤの組成から、この積層物は数%のフェライト組織を含み、それ以外はオーステナイト組織であると考えられる。すべての層を SUS410 ワイヤで積層した場合(試験体 5)は、層の境界が明瞭に見られる。この積層物は SUS410 ワイヤの組成から、マルテンサイト組織とフェライト組織で構成されていると考えられ、層境界が明瞭であるのは、積層中の熱履歴が位置により異なり、部分的に焼戻しが生じたためである。試験体 2~4 では、SUS308L 層(図中:白色部)と SUS410 層(図中:黒色部)を判別することができる。試験体 2 において、SUS410 層の次に積層した SUS308L 層は次の SUS308L 層と比べて暗色を示し、試験体 4 では、SUS308L 層の次に積層した SUS410 層は、次の SUS410 層と比べて、明色を示している。これは、既積層部の溶融により Ni 当量および Cr 当量が変化し、組織に差異が生じているためであると考えられる。試験体 3 においても、SUS308L および SUS410 ワイヤで積層した組織は、一種のワイヤで積層した場合は異なっていると考えられる。

##### (2) 造形物断面内の組成および硬さ分布評価結果

図 3、図 4 に複合造形物(試験体 2~4)断面内の組成および硬さ分布評価結果を示す。組成分布については、一例として Ni 量の分布を示している。両図とも、硬で示す領域は SUS410 により積層した層(Ni 濃度は 0)を示しており、軟で示す領域は SUS308L ワイヤで積層した層を示している。図 3 には試験体 1 の平均 Ni 濃度を併せて示しており、図 4 には試験体 1 および試験体 5 の平均硬さも併せて示している。

図 3 より、希釈により層ごとの Ni 濃度が変化していることがわかる。ただし、各層内ではほとんど変化がみられない。これは WAAM によりメソスケールで組成分布を持つ造形物の製作が可能であることを示す。図 4 より、組成分布と同様に、層ごとに硬さは変化するが、各層内ではほ

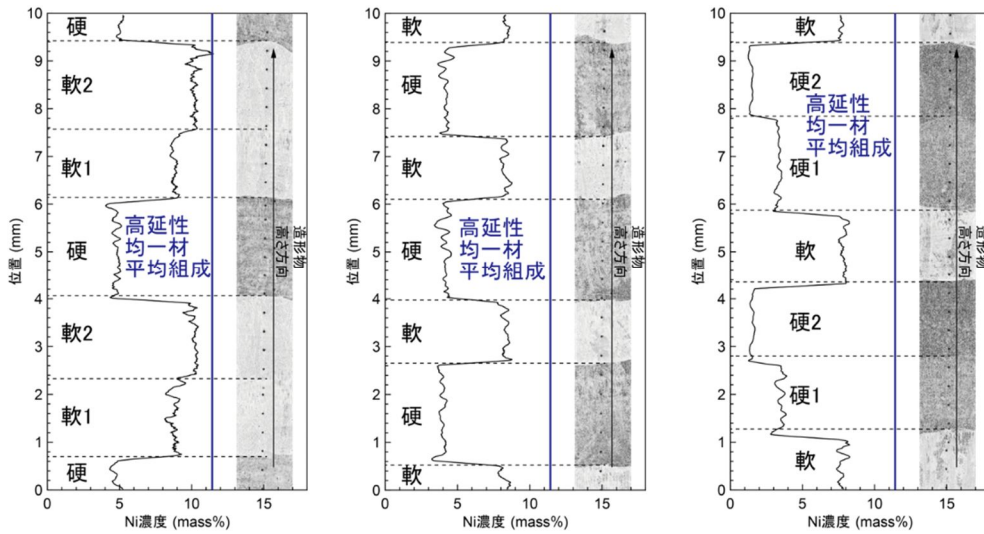


図3 造形物断面内のNi濃度分布

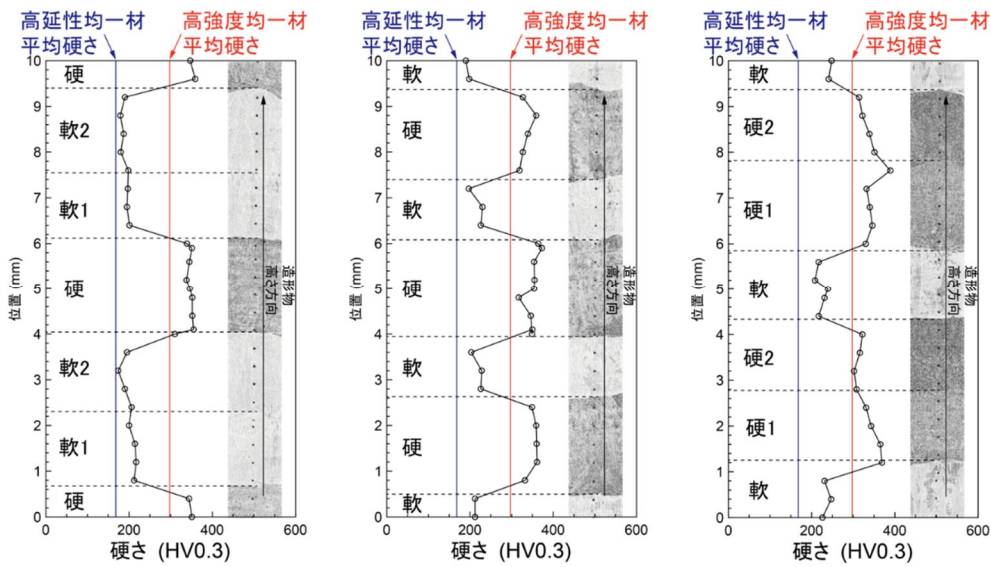


図4 造形物断面内の硬さ分布

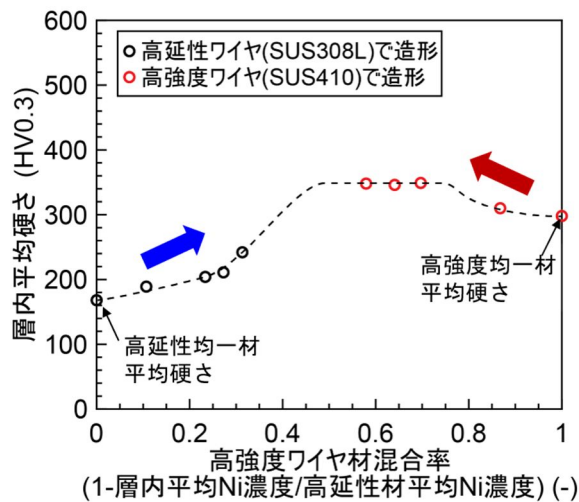


図5 各層の高強度ワイヤ混合率と硬さ平均値の関係

ば一定の硬さであることがわかる。これは、WAAMによりメソスケールで硬さ(強度)が異なる造形物が製作可能であることを示す。

図5に各層の高強度ワイヤ混合率と硬さ平均値の関係を示す。この図より、SUS308Lワイヤで積層した層は高強度ワイヤ材の混合(図中青矢印方向)により、硬化していることがわかる。これはマルテンサイト分率の上昇による硬化である。一方で、SUS410ワイヤで積層した層も高延性ワイヤ材の混合(図中赤矢印方向)により硬化していることがわかる。これは、Niの混合による



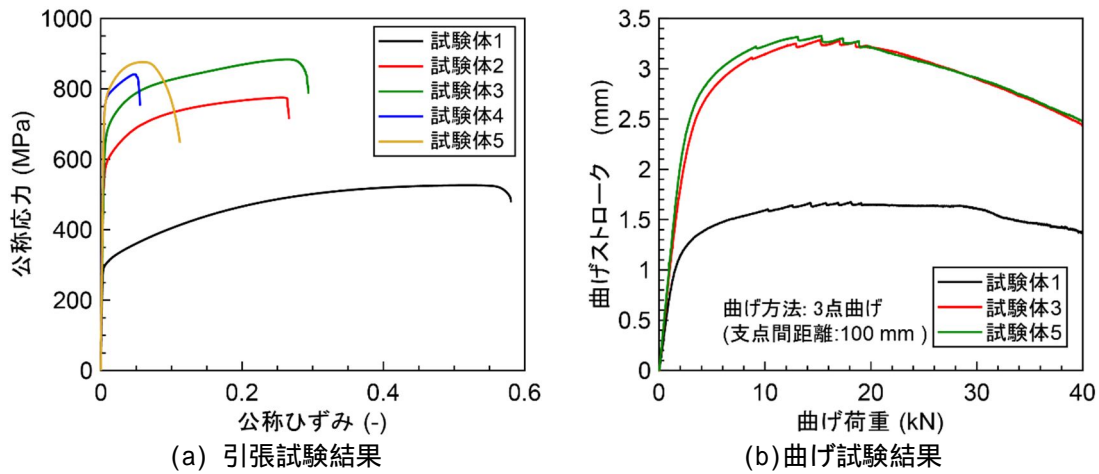


図 6 造形物の機械的特性評価結果

マルテンサイト層の固溶強化、Ms 点低下による転位密度上昇、マルテンサイト組織の微細化による硬化であると考えられる。

### (3) 造形物の機械的特性評価結果

図 6(a)に引張試験結果を、(b)に曲げ試験結果を示す。いずれの試験においても試験片には、11 層程度の積層部が含まれていることを確認している。

図 6(a)より、造形物の高延性層・高強度層分率により、引張特性が変化していることがわかる。特に、高延性層・高強度層分率が 1:1 である試験体 3 は、試験体 5(全て高強度層)の場合と同程度の引張強さでありながら、延性が高いことがわかる。一様伸びで比較すると、試験体 5 は 5.9%であるのに対し、試験体 3 は 26.4%であり、およそ 4 倍の伸びを示している。本結果より、WAAM により強度・延性バランスを制御した造形物の製作が可能であり、条件によっては高強度・高延性を兼備した、複合鉄鋼材の創成が可能であることが示唆された。

また、図 6(b)より、高延性層・高強度層分率が 1:1 である試験体 3 は、全て高強度材料で造形された試験体 5 と同程度の最大荷重および最大曲げストロークを示している。引張特性のように、試験体 3 に高延性(最大曲げストローク)が現れなかったのは原因については、今後の検討課題であるが、少なくとも、複合化による特性劣化は生じない結果となった。

以上の検討により、ワイヤ溶融・積層方式の金属 3D 造形技術を用いることで、形状に加えて強度特性をもデザインした 3 次元構造物の製作の可能性を示すことができた。本研究で明らかにされた複合鉄鋼材をベースとして、今後は、ワイヤ溶融・積層方式の金属 3D 造形による軽量かつ高強度、高延性な造形物の製作技術へと展開されることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 KITANO Houichi	4. 巻 89
2. 論文標題 Metal 3D Printing Technology Based on Arc Welding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY	6. 最初と最後の頁 533 ~ 537
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/jjws.89.533	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 北野 萌一
2. 発表標題 金属ワイヤ溶融積層造形によるメソスケール特性制御造形物の創成と力学特性評価
3. 学会等名 「微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング」 第二回研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhengzhong SUN, Ikumu WATANABE, Houichi KITANO
2. 発表標題 Multiscale analysis of multilayer steels fabricated by wire-based additive manufacturing
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第179回春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北野 萌一、中村 照美
2. 発表標題 アーク放電を用いた金属ワイヤ溶融積層造形技術の高度化
3. 学会等名 一般社団法人 溶接学会 溶接法研究委員会 第250回記念委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北野 萌一
2. 発表標題 アーク溶接技術を応用した金属3D造形手法
3. 学会等名 日本溶接協会 特殊材料溶接研究委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北野 萌一, 中村 照美
2. 発表標題 高延性層と高強度層で構成される溶融金属積層複合材の機械的特性
3. 学会等名 2019年度溶接学会秋季全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhengzhong SUN, Ikumu WATANABE, Houichi KITANO
2. 発表標題 Wire-based Additive Manufacturing of Multilayer Steels
3. 学会等名 日本鉄鋼協会2019年春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhengzhong SUN, Houichi KITANO, Kenta GOTO, Ikumu WATANABE
2. 発表標題 Multiscale Analysis of Multilayer Steels Fabricated by Wire based Additive Manufacturing
3. 学会等名 日本金属学会研究会 "微小領域の力学特性評価とマルチスケールモデリング" 第一回研究集会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------