

令和元年6月5日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04241

研究課題名(和文) ワイヤー+アーク放電方式による金属材料の付加加工における形状精度と健全性

研究課題名(英文) Form accuracy and soundness in wire + arc additive manufacturing of metal

研究代表者

笹原 弘之 (Sasahara, Hiroyuki)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00205882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：ワイヤー材料をアーク放電を熱源として溶融し積層する独自の高能率な付加加工の手法において、造形精度と造形物の健全性を向上する手法の開発を行った。この方法で、積極的な冷却を行う事により凝固時の金属結晶微細化とそれによる強度向上が可能であることを明らかにした。造形物の温度と形状をモニタリングし造形条件にフィードバックするシステムの開発を行い、造形精度の向上を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤー+アーク放電方式による金属材料の付加加工の手法は、能率が高くコストが低い造形が可能であることが特徴であるが、精度はやや低いことが短所である。本研究成果により、そのプロセスにおける造形物の形状と温度をモニタリングし、造形条件を適切に設定することにより形状精度と健全性を高めることが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We developed a method to improve the form accuracy and the soundness of the objects in the highly efficient additive manufacturing method of using the arc discharge as a heat source and wire supply. By this method, 1) It was clarified that it is possible to refine the metal crystal during solidification and to improve its strength by performing aggressive cooling. 2) A system that monitors the temperature and shape of the object was developed and the information can be fed back to the fabricating conditions, then it was made possible to improve the fabricating accuracy of the object.

研究分野：生産加工学

キーワード：機械工作・生産工学 アディティブ・マニュファクチャリング アーク放電 モニタリング 金属組織

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

アディティブ・マニファクチャリング（AM）の対象が、試作から実製品へと急速に拡大し、強度部材にも適用できるような金属を用いた AM への期待が高まっていた。その手法の一つに指向性エネルギー堆積がある。これはいわゆる肉盛りプロセスがその原理であり、金属材料を粉末もしくはワイヤとして供給し、それをレーザーなどの熱源により溶融し金属のビードとして堆積することにより造形を行う。金属粉末をレーザーで溶融する組み合わせが最も一般的で研究例も多い。造形効率は粉末床溶融結合よりは高いがより一層の向上が求められており、装置コスト、使用できる材料に制限があるなどの問題を抱えている。

申請者らは、アーク放電を熱源として金属ワイヤを供給し溶融する溶融金属積層法に着目した。特に造形精度を向上し、欠陥を生じないためには適切な条件が存在し、その状態ではいわゆる焼鈍材と同等以上の引張強さが得られることはわかっていた。しかし、溶融後に凝固した状態であるため、圧延材や鍛造材よりも耐力が低くなることや、造形精度は必ずしも高くないことが機械部品への採用が拡がらない要因の一つとなっていた。

### 2. 研究の目的

アーク放電を熱源としてワイヤ材料を溶融し積層する独自の高能率な付加加工（アディティブ・マニファクチャリング、3D プリンティング）の手法において、造形精度と造形物の健全性を大幅に向上する新しい加工方法を提案する。この方法で、①積極的な冷却を行う事により凝固時の金属結晶微細化とそれによる強度向上、②造形物の温度と形状をモニタリングし造形条件にフィードバック、③パニシングを施すことにより積層内部欠陥を減少・消滅、④パニシングによって塑性変形を与え形状修正とひずみ硬化による耐力・疲労強度の向上、⑤最終切削仕上げによる高精度製品、を可能とする。最終的に、鉄鋼材料のみならずインコネルやチタン合金など難加工材料を迅速かつ使用材料を最少化する新たな金属製品の製造方法として確立する。

### 3. 研究の方法

まず、ワイヤ+アーク放電による金属の付加加工において、積層金属の溶融・固化のプロセスにおける冷却速度をコントロールする手法の開発と、形状・温度のインプロセスモニタリングの手法の開発を行う。これにより、凝固時の結晶粒微細化状態の制御とそれによる強度向上、および造形精度の向上を可能とする。次いで、造形物の積層とパニシングを反復するプロセスを開発し、造形表面の平滑化、寸法精度の向上だけでなく加工硬化による強度の向上と積層欠陥の減少・消滅を狙う。造形時の金属結晶微細化や、塑性変形の付与による形状修正とひずみ硬化による金属組織、強度、疲労強度など造形物の健全性への影響を明らかにし、最終的に造形条件設定の指針を確立する。

(1) 積層金属の溶融・固化のプロセスにおける冷却速度をコントロールするデバイスの開発と製作：ワイヤ+アーク放電による金属の溶融・固化による積層造形物の金属組織を制御するために、固化する過程における冷却プロセスを制御する装置を開発する。造形物内には温度勾配が存在し残留応力の発生につながる。冷媒の温度コントロールにより残留応力発生状態への影響も明らかにする。これらの調査結果を用いて造形を行いながら金属組織の制御を行い、造形物の機械的性質を調査する。

(2) 形状、温度のインプロセスモニタリング手法の開発と、造形条件へのフィードバック：二次元レーザーセンサを走査することにより三次元的な造形形状あるいは現在付加中の形状のモニタリングを可能とする。また、赤外線サーモグラフィにより、造形物の表面温度を同時にモニタリングする。形状と温度の情報をインプロセスモニタリングし、造形条件設定にフィードバックするシステムを開発する。

(3) 冷却速度や造形条件に依存する金属組織・強度・疲労特性との関係の解明：冷却速度や造形条件に対する、金属組織・強度・疲労特性を実験的に調査し、その影響を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 造形物の温度と高さモニタリングシステム

##### ① WAAM による造形システムの概要

図 1 にシステムの概要を示す。既存の直進 3 軸(X, Y, Z 軸：各ストローク 500 mm)を有する造形装置に対し、造形物の温度と形状をモニタリングするシステムを新たに開発した。造形装置の各軸の駆動にはステッピングモータを用い、適合するモータドライバと CNC 制御基板(CNC-4AXIS, オリジナルマインド社)を介して CNC ソフトウェア(Mach3, ArtSoft 社)上で制御する。さらに、Mach3 と MIG/MAG 溶接機を接続しており、各軸の運動と造形トーチの ON, OFF を NC プログラムに記述しその動作を制御することができる。

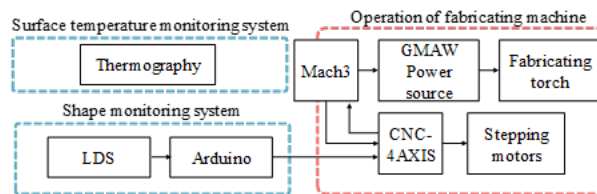


Fig.1 Schematic representation of WAAM system.

② 造形物温度モニタリング

ワイヤ+アーク方式のAMは、他の金属AMと比較して既存部材への入熱が大きく、造形物への熱の流入が過大になると熔融した金属の垂れや側面の平面度低下などの欠陥が発生する。特に連続造形の場合、積層が進むと造形物が過熱して1層あたりの積層高さが低くなる形状乱れが生じる。このため、層間には冷却時間を設ける必要がある。そこで、次層造形時の前層の温度である層間温度を一定となるよう制御した。サーモカメラ(T650sc, FLIR社)を用いて造形物表面の最高温度を非接触でモニタリングし、任意の層間温度まで温度が低下したら次層の造形の開始を指令するものとした。

③ 造形物高さモニタリング

2次元レーザ変位計(LJ-V7300, キーエンス社, 基準距離 300mm)を造形装置のZ軸にジグを介して取り付け、造形物高さを測定した。NC制御により造形装置-X方向に走査して2次元のプロファイルを連続して取得し3次元形状の測定をする。

造形物高さ測定の流れを図2に示す。本研究では、1層造形と造形物高さ測定を交互に繰り返して、目標高さまで積層されたら造形終了とした。基準ブロック上面の高さを基準値とし、造形物の最高点と基準値との差分を出力する。まず、造形装置に既存部材を固定するとともに、高さの基準となるブロックを設置し、①初期形状を測定する。次に、1層造形して②再度高さ測定する。図3に実際に初期形状を測定した時の結果を3次元表示して示す。

次に、造形トーチの高さを自動調整するシステムについて述べる。造形物高さの増加分はLDSのコントローラからアナログ出力しマイコンのひとつであるArduino Uno Rev3(Arduino LCC社)に入力する。Arduinoでは、入力された高さ値に応じてパルス波形を複数回出力してCNC-4AXISへと入力する。ここで、Mach3には拡張機能として「Brain」があり、任意の入力に対し、出力をプログラミングすることが可能である。このBrainにより、パルス1入力に対し、Z軸を0.1mmだけ上昇させるように記述した。

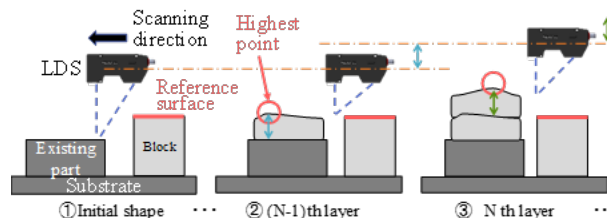


Fig.2 Height monitoring sequence

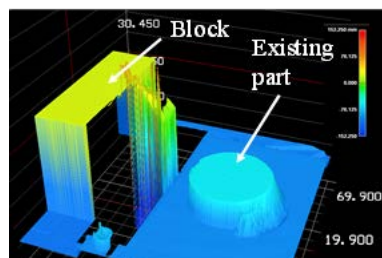


Fig.3 Measurement result of initial shape

(2) 目標造形物高さ 150mm の中実丸棒造形

① 造形条件

前述した造形物の温度と高さモニタリングシステムを用いて、目標高さ 150mm, 直径 44mm の中実丸棒の造形を行った。造形条件を表1に示す。造形ワイヤは 550MPa 級鋼で、温度モニ

タリングにより層間温度を 400°C に設定した。造形パスは図 4 に示す中心から外側へ向かううずまき状とし、1 層ごとに原点を中心に 90° ずつ回転させたパスで繰り返し積層した。隣接するビード間距離は 4mm であり、パスの最外周は直径 40mm の円である。

### ② 造形結果

図 5 に造形物の写真を示す。150mm の高さまで 31 層を要し、層間温度を一定に保つ冷却時間（休止時間）を含めた総造形時間は 5 時間 17 分だった。造形物温度と高さのモニタリングにより、造形途中のエラーなく造形が可能になった。また、造形パスを毎層 90° ずつ回転させたことで造形物上面がほぼ平滑に造形することができた。図 6 に高さ測定により得られた各層の高さ増分値を示す。層間温度を一定にしたことで、層数が増えても毎層の高さ増分はほぼ一定で推移していることがわかる。第 1 層目の積層高さが高くなっているのは、既存部材が常温の状態から積層を開始しており、造形されたビードの冷却速度が高く、幅方向に広がらずに固化したためと考える。また、造形後に目標形状である直径 44mm まで外周旋削を施したが、仕上げ面に欠陥は見あたらなかった。

Table1 Fabricating conditions

Welding machine		DAIHEN P500L
Welding mode		DC low sputtering
Welding current	A	150
Welding voltage	V	16.8
Torch feed speed	mm/min	150
Wire material		YGW12
Existing part material		SS400
Wire feed speed	cc/h	237.5
Shielding gas		Ar+20%CO <sub>2</sub>
Shielding gas flow rate	L/min	15
Cooling method		air cooling
Interlayer temperature	°C	400

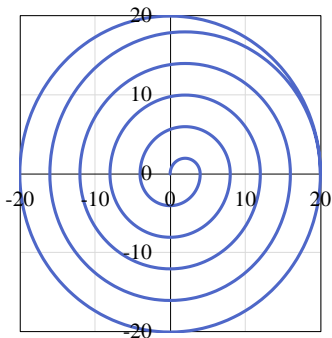


Fig.4 Fabricating path

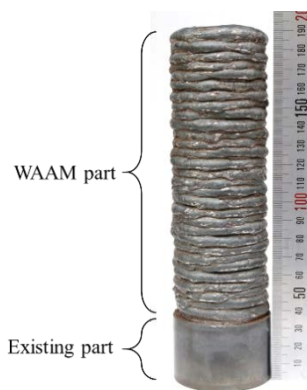


Fig.5 Manufactured object

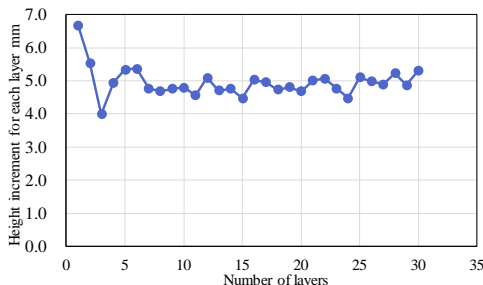
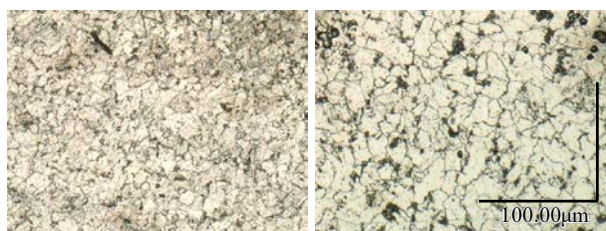


Fig.6 Height increment for each layer

### ③ 組織観察

図 5 に示した造形物の組織観察をするために、放電加工により試験片を切り出した。切り出しは、中心から 5mm の地点で造形物高さ方向全域にスライスした。その後湿式研磨と琢磨を行い、ナイタールによりエッチングした。切り出した面を目視観察した結果、未溶着や空隙などの欠陥は見あたらなかった。切り出した試験片の左端を X=0mm とし、既存部材上面 Z=0mm と定義して、図 7(a)に(X, Z)=(20, 11)、図 7(b)に(X, Z)=(30, 35)の組織観察の結果を示す。これより、造形物下部にあたる(a)の方が結晶粒径が小さいことがわか

る。高さ方向全域に組織観察したが、 $Z=35\text{mm}$  程度より上部では(b)の組織となっていて変化はなかった。また、同一  $Z$  位置であれば  $X$  方向（半径方向）に観察しても組織に変化はなかった。ここで、図 8 に各層の  $800^\circ\text{C}$  から  $500^\circ\text{C}$  までの冷却時間を示す。層数が増えると冷却時間も増加していく傾向が見てとれる。冷却時間が長く特に約  $200\text{s}$  を超えるような場合、マイクロ組織は粗粒化が進むとされる<sup>1)</sup>。そのために  $Z=35\text{mm}$ (7 層目)付近以降において結晶が粗粒化したものとする。



(a)  $(X, Z) = (20, 11)$  (b)  $(X, Z) = (30, 35)$

Fig.7 Metallographic structure

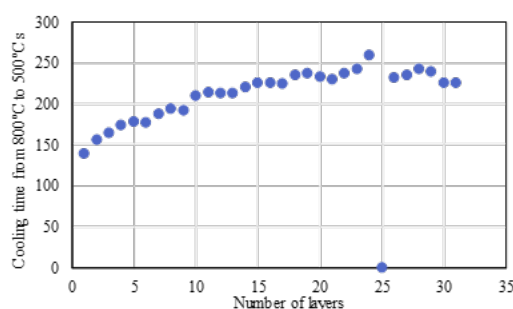


Fig.8 Cooling time from  $800^\circ\text{C}$  to  $500^\circ\text{C}$

### (3) 結言

- ① 積極的な冷却を行う事により凝固時の金属結晶微細化とそれによる強度向上が可能である。
- ② 造形物の温度と形状をモニタリングし造形条件にフィードバックするシステムを開発した。層間温度を一定に保つことで、造形途中の垂れや形状乱れなく造形が可能である。これにより高さ  $150\text{mm}$  と高さのある造形物の製作に成功した。
- ③ 造形物から放電加工により組織観察試験片を切り出してその切断面を観察した結果、未溶着や空隙といった欠陥は見あたらなかった。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① T.Tsurumaki, H.Chibahara, S.Tsukamoto, H.Sasahara, Precise additive fabrication of wall structure on thin plate end with interlayer temperature monitoring, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 13, 2 (April 2019) Paper No.19-00070 査読有 [DOI: 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0028]

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① T.Tsurumaki, S.Tsukamoto, H.Chibahara, H.Sasahara, Precise fabrication and cutting of wall structure to repair the thin end of plate using interlayer temperature monitoring on wire and arc-based additive manufacturing, Proc. ISFA2018, Kanazawa, Japan (2018), USB#22.
- ② T.Yoshioka, H.Sasahara, Minimization of Thermal Distortion on Wire and Arc-based Additive Manufacturing on the Shaft, Proc. 9th Int. Conf. on LEM21, Hiroshima (2017) (USB C22)
- ③ T.Tsurumaki, H.Chibahara, S.Tsukamoto, H.Sasahara, Precise Fabrication of Wall Structure onto Thin Plate End with Interlayer Temperature Monitoring on Wire and Arc-based Additive Manufacturing, Proc. 9th Int. Conf. on LEM21, Hiroshima (2017) (USB C20)
- ④ H.Nagamatsu, Y.Mitsutake, T.Hamamoto and H.Sasahara, Development of a

Cooperative System with Wire and Arc-based Additive Manufacturing and Machining, Proc.ICPE2016, Hamamatsu, (2016), USB# B105-8223.

- ⑤ 吉岡亨, 笹原弘之, 中野佑紀, ワイヤ+アーク方式の金属 AM における温度と形状のモニタリングと造形へのフィードバック, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2019 東京電機大学) pp. 496-497.
- ⑥ 永松秀朗, 光武祐介, 濱元剛, 高木悠貴, 笹原弘之, ワイヤ+アーク放電による AM と切削加工との連携システムの開発, 日本機械学会第 11 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2016 名古屋大学) pp. 233-234.

[その他]

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/~saslab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：中本 圭一

ローマ字氏名：(NAKAMOTO, Keiichi)

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：大学院工学研究院

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：9 0 3 7 9 3 3 9

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。