

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14055

研究課題名（和文）ワイヤーク式付加製造法における気孔発生機構の解明と抑制技術の確立

研究課題名（英文）Experimental study on void generation mechanism in wire arc additive manufacturing

研究代表者

山口 貢（Yamaguchi, Mitsugu）

金沢大学・設計製造技術研究所・助教

研究者番号：50800877

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ワイヤークAMの造形プロセスを可視化するとともに、得られた造形物の形状や気孔分布を評価することで、造形物内部の気孔の発生に寄与する因子を調査した。その結果、造形物内部の気孔を誘発する主要な因子は層間の溶け込み不良であることを明らかにした。3次元形状の造形では、ライン造形物の幾何学的形状や溶け込みを考慮した条件設定が重要であり、適切な条件範囲のときに高密度な造形物が得られることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤークAMにおいて造形物内部に発生する気孔は機械的強度を低下させる主要な因子であり、高い安全性が求められる部品への適用を妨げる要因となっている。本研究では、高密度・高強度造形技術の確立に向け、造形時のアークや溶融池の挙動、ワイヤの溶融現象を含めて系統立てて整理し、造形物内部の気孔の発生機構の解明を目指した。得られた結果は気孔の発生を抑制可能な条件範囲を示しており、ワイヤークAMによる部品の強度向上と適用拡大に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：Wire arc additive manufacturing is categorized as a directed energy deposition technique that is specifically developed for fabricating large-scale metallic parts with complex features. In this study, we investigated the factors that affect the generation of voids inside built parts through the process visualization and the evaluation of geometry and void distribution. The results indicate that the major factor that induces voids inside built parts is a poor penetration between adjacent layers, and dense parts can be obtained under appropriate building conditions for achieving the desired geometry and penetration of single tracks.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：アディティブマニファクチャリング 指向性エネルギー堆積法 ワイヤークAM 気孔 ワイヤ溶融凝固現象

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

金属材料を用いた付加製造法(Additive Manufacturing: AM)は粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion: PBF)と指向性エネルギー堆積法(Directed Energy Deposition: DED)に大別され、本研究は DED に分類されるワイヤアーク AM を対象とする。本手法はアーク放電を利用し、供給する金属ワイヤ先端を局所的に加熱して溶滴を形成させ、母材上に積層させることで 3 次元形状を得るプロセスである。アーク溶接と異なり溶滴の積層を繰り返すため、造形物内部への蓄熱に起因して溶融状態が変化し、造形物の形状精度を悪化させる要因となる¹⁾。ワイヤアーク AM は他の AM と比較して造形効率に優れ、大型構造物が短時間で造形できる特長を有しているが、入熱の制御や管理が難しく、造形物内部の気孔に起因した機械的強度の低下や²⁾、金属組織の不均一さによる強度異方性など³⁾、実用化に向けて解決すべき課題が多い。特に、造形物内部に発生する数～数十 μm の大きさの気孔は、引張や圧縮時に応力集中を起し、亀裂発生の起点となる。ワイヤアーク AM により造形された部品内部に予期せぬ気孔が発生すれば、機械的強度の低下により最終製品に致命的欠陥を与えかねない。しかしながら、高温下におけるワイヤ成分の熱分解に起因したガスの発生、シールド不良による大気中のガスの溶融池への溶け込み、シールドガスの巻き込みなど複数の要因が影響し、気孔の発生挙動の理解を難しくしている。安全を保障した部品供給のためには、これらの要因を系統立てて整理し、気孔の抑制技術を確立することが望まれる。

2. 研究の目的

ワイヤアーク AM において造形物内部に発生する気孔は機械的強度を低下させる主要な因子であり、高い安全性が求められる部品への適用を妨げる要因となっている。本研究では、高密度・高強度造形技術の確立に向け、造形時のアークや溶融池の挙動、ワイヤの溶融現象を含めて系統立てて整理し、造形物内部の気孔の発生機構の解明を目指す。また、気孔の発生に寄与する因子を特定し、これらの因子の発生を抑制可能な造形条件を確立することにより、ワイヤアーク AM による部品の強度向上を達成し、適用拡大を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、ワイヤアーク AM の造形プロセスを可視化するとともに、得られた造形物の形状や気孔分布を評価することで、造形物内部の気孔の発生に寄与する因子を調査した。まず、電流や電圧、トーチ送り速度、ワイヤ供給速度、シールドガス種類などプロセスパラメータがライン造形物の形態変化に及ぼす影響を調査した。次に、ライン造形実験の結果から造形物の形状乱れ(蛇行)のない条件を選定し、ハッチングピッチを変化させたときの面造形物の表面性状を評価した。その後、面造形実験の結果から造形物の品質が良好となる条件を選定し、高さ方向に積層を繰り返すことで造形物を得た。造形物内部の気孔を評価するため、造形物の中心部を切断し、サンドペーパーやバフにより研磨した後、5%ナイトール溶液によりエッチング処理して断面観察に供した。また、造形物内部の気孔の 3 次元分布を評価するため、 $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$ の試料を製作し、X 線 CT 分析に供した。

4. 研究成果

4.1 電流、電圧、送り速度、シールドガス種類によるライン造形物の形態変化

造形プロセスにおける一連の現象を明らかにするため、電流を 75~238 A、電圧を 8~14 V、ワイヤ供給速度を 2~12 m/min、トーチ送り速度を 500~2000 mm/min に変化させ、流量が 15 L/min のシールドガスをワイヤの同軸上に供給しながら造形を行い、高速度カメラにより造形時のアーク挙動やワイヤの溶滴移行形態を観察した。シールドガスは、Ar および Ar+20%CO₂ を用いた。造形時の溶滴移行サイクルの一例を図 1 に示す。ワイヤ先端からアークが発生した直後(図 1(a))、アークの勢いは強くなるとともに(図 1(b))、ワイヤ先端に溶滴が形成された(図 1(c))。ワイヤの送給により溶滴は溶融池と短絡し(図 1(d))、溶融金属の液柱が形成された後、溶融池に離脱した(図 1(e))。その後、ワイヤ先端からアークが再発生した(図 1(f))。造形中はこれらのプロセスが繰り返され、造形条件によらず溶滴移行形態は全て短絡移行であった。

次に、これらのプロセスパラメータがライン造形物の形態変化に及ぼす影響を調査した結果、電流と電圧を高く、送り速度を遅くするにつれて、ライン造形物の高さとは幅は増加することが分かった。電流が 75 A、送り速度が 2000 mm/min の条件では、造形物の高さとは幅は共に 1.0 mm であり、電流が 238 A、送り速度が 500 mm/min のとき、造形物の高さは 3.0 mm、幅は 7.1 mm であった。これらの結果から、ワイヤアーク AM によるライン造形物の形状は条件により著しく異なり、適用する部品サイズ・形状に合わせて適切な条件を選定することが重要であることを示した。また、ライン造形物の蛇行領域の割合を光学顕微鏡により評価し、入熱(電流・電圧/送り速度)との関係を整理した結果を図 2 に示す。入熱量が 18 J/mm(電流 75 A、電圧 8 V、送り速度 2000 mm/min)の条件では蛇行領域の割合は 34%であり、入熱量が 400 J/mm(電流 238 A、電圧 14 V、送り速度 500 mm/min)のとき、蛇行領域の割合は 9%まで減少した。これらの結果から、入熱を 200 J/mm 以上に設定することでライン造形物の形状乱れを抑制できることを示した。低入

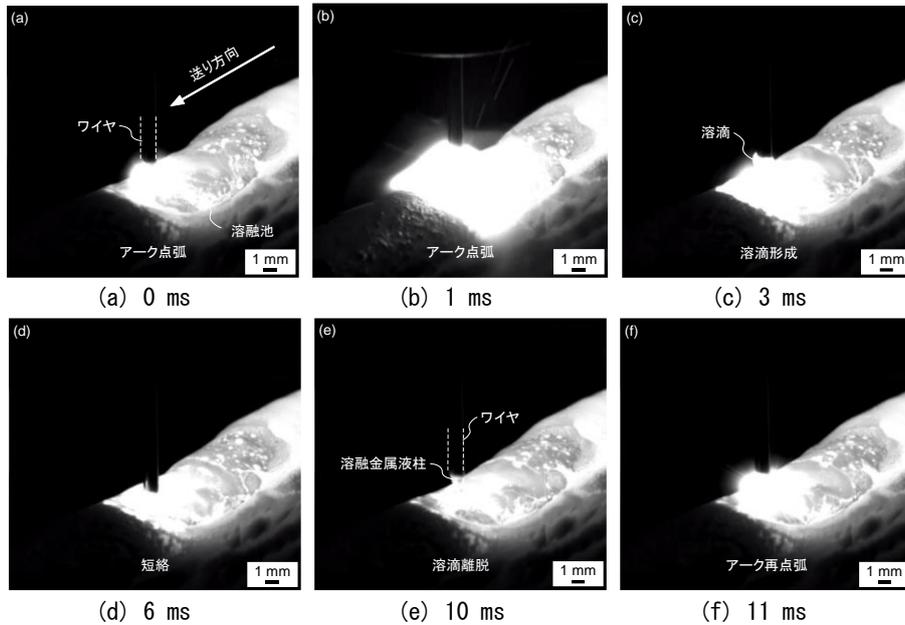


図1 造形時の溶滴移行サイクルの一例

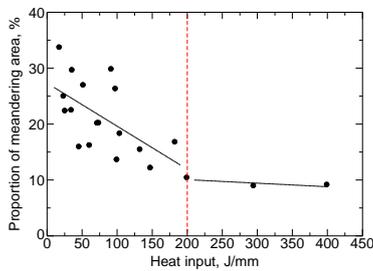


図2 入熱による蛇行領域の割合変化

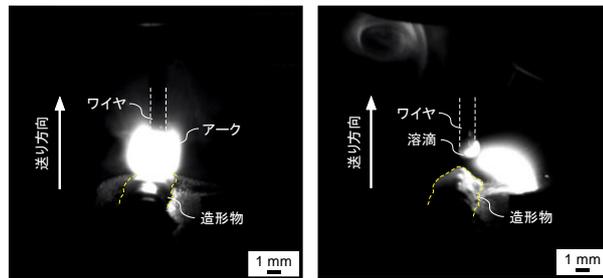


図3 低入熱の条件におけるアーク挙動

熱の造形条件におけるアーク挙動を図3に示す。図は、電流が75 A、電圧が8 V、送り速度が500 mm/minの条件で、送り方向に対して後方から造形領域を観察した結果である。ワイヤ先端からアークが発生した直後(図3(a)), アークは送り方向に対して垂直方向にふらつき、溶融池はアークの発生点を追従しながら固化する様相が観察された(図3(b))。Ar シールドガスを使用により、アークの母材側通電点である陰極点の形成が不安定になることが要因として考えられる。これらの結果から、ライン造形物の形状乱れの主要因は不安定なアーク挙動であることを示した。

特に、シールドガスの違いは造形時のアーク挙動に著しく影響し、アルゴンガス中では進行方向に対して広い範囲にアークが形成され、ワイヤ先端に形成される溶滴サイズは大きかった。造形プロセスの安定性は基材や造形物表面の酸素含有量に影響され、22 wt%のときに良好となった。一方、炭酸ガス中ではアークはワイヤ直下に集中し、溶滴サイズは小さかった。ワイヤ先端と造形物間の距離が短いため、造形物の表面うねりの影響を受けやすく、アークの発生点が頻繁に変化することで造形プロセスが不安定になることを明らかにした。これらの結果から、アーク放電による加熱でワイヤ先端に形成された溶滴が、溶融池に短絡・離脱することで層が形成される短絡移行形態では、溶滴がもつ熱量や短絡箇所の表面温度、酸素含有量がプロセス安定性に影響する因子であることを示した。

4.2 ハッチングピッチによる面造形物の形態変化

面造形時のハッチングピッチが造形物の形状や表面性状に及ぼす影響を調査するため、電流を200 A、電圧を12.3 V、ワイヤ供給速度を9.5 m/min、トーチ送り速度を500 mm/min(入熱300 J/mm)に固定し、ハッチングピッチを3.0~6.0 mmに変化させたときの造形物の形態変化を調査した。なお、同様の造形条件で得られたライン造形物の幅は7.0 mmであった。ハッチングピッチを変化させたときの造形物外観の比較を図4に示す。いずれのハッチングピッチにおいても、表面性状は比較的滑らかであった。造形物表面の断面曲線を形状測定機により取得し、うねりの最大高さを評価した結果を図5に示す。ハッチングピッチが4.5 mm以上の条件ではうねりの最大高さは増加した。

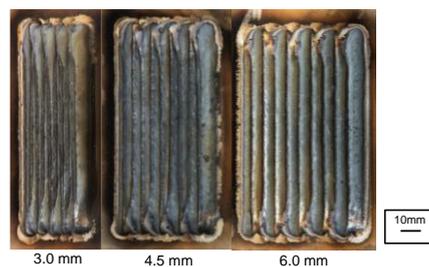


図4 ハッチングピッチによる造形物外観の比較

ハッチングピッチに対してライン造形物の幅が小さく、ライン結合の有する曲率が大きくなることが表面性状を悪化させた要因と考えられる。一方、造形物の断面観察の結果、ハッチングピッチが 3.0 mm の条件では、造形物/基材界面に溶け込み不良に起因した空隙が観察された。ワイヤアーク AM はレーザを熱源とした AM と比べてエネルギー密度が低いため、面造形ではライン造形物の幾何学的形状や溶け込みを考慮し、適切なハッチングピッチを選定することが重要であることを示した。

4.3 造形物内部の気孔の評価

面造形実験から得られた結果を基に、ハッチングピッチを 4.5, 6.0 mm に固定し、高さ方向に積層を繰り返して、造形物を得た。ハッチングピッチが 4.5, 6.0 mm のときの造形物断面の比較を図 6 に示す。図中の破線(赤)は各層の境界を示している。ハッチングピッチが 4.5 mm の条件では、層間に空隙が観察された。一方、ハッチングピッチが 6.0 mm のとき、内部に欠陥のない造形物が得られた。ハッチングピッチが小さい条件では、ライン造形物の幅に対してオーバーラップ量が過度となり、前層上に次層が造形されることで局部的に溶け込み不良が発生し、空隙を誘発すると考えられる。これらの結果から、電流が 200 A、電圧が 12.3 V、送り速度が 500 mm/min、ハッチングピッチが 6.0 mm のとき、表面性状が良好、かつ内部に空隙のない高品質な造形物が得られることを示した。

次に、X線 CT により造形物内部の気孔の 3次元分布を評価した。ハッチングピッチが 4.5, 6.0 mm のときの造形物の CT 像の比較を図 7 および図 8 に示す。図中の (a)は全体像、(b)は試料中心部の CT 像である。ハッチングピッチが 4.5 mm の条件では、造形物内部に気孔が観察された。また、CT 像で観察された気孔は、図 6(a)に示した空隙と一致していた。一方、ハッチングピッチが 6.0 mm のとき、造形物内部に気孔のない造形物が得られた。本実験で使用した X線 CT 装置の分解能は 5 μm であったが、試料全体を通して目立った欠陥は観察されなかった。これらの結果から、ワイヤアーク AM において造形物内部の気孔を誘発する主要な因子は層間の溶け込み不良であり、適切な条件の選定により高密度な造形物が得られることを明らかにした。

<参考文献>

- 1) D.R. Corradi et al., Effect of magnetic arc oscillation on the geometry of single-pass multi-layer walls and the process stability in wire and arc additive manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.*, 283 (2020) 116723.
- 2) R. Biswal et al., Interrupted fatigue testing with periodic tomography to monitor porosity defects in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V, *Additi. Manuf.*, 28 (2019) 517-527.
- 3) C.V. Haden et al., Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties, *Additi. Manuf.*, 16 (2017) 115-123.

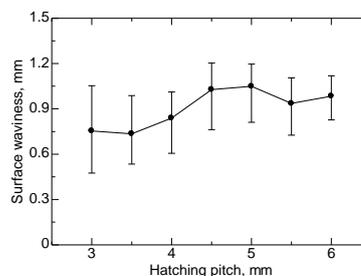
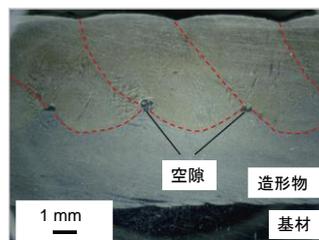
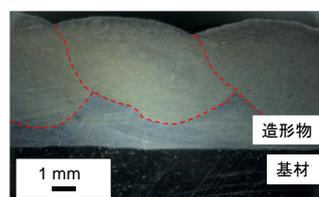


図 5 ハッチングピッチによる造形物表面性状の変化

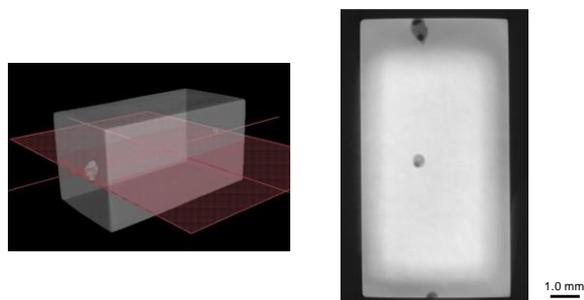


(a) 4.5 mm



(b) 6.0 mm

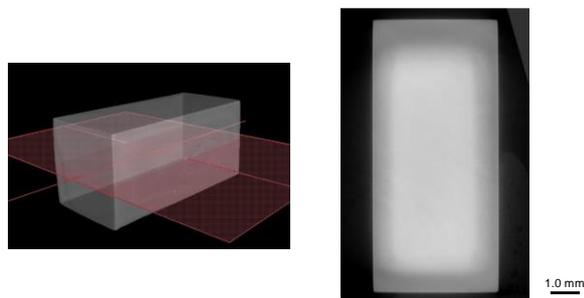
図 6 ハッチングピッチによる造形物断面の比較



(a) 全体像

(b) 中央断面

図 7 ハッチングピッチ 4.5 mm の造形物の X線 CT 像



(a) 全体像

(b) 中央断面

図 8 ハッチングピッチ 6.0 mm の造形物の X線 CT 像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 M. Yamaguchi, R. Komata, T. Furumoto, S. Abe, A. Hosokawa	4. 巻 119
2. 論文標題 Influence of metal transfer behavior under Ar and CO2 shielding gases on geometry and surface roughness of single and multi-layer structures in GMAW-based wire arc additive manufacturing of mild steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 911-926
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00170-021-08231-8	査読の有無 有
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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本 惇平, 山口 貢, 古本 達明, 阿部 諭, 橋本 洋平, 小谷野 智広
2. 発表標題 ワイヤアークAMによるオーバーハング構造の造形特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 第14回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2022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
---------	---------