

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14858

研究課題名（和文）切削・仕上げ同時加工による表面性状向上と内部組織微細化技術の開発

研究課題名（英文）Wire and arc additive manufacturing with finishing process

研究代表者

阿部 壮志（Takeyuki, Abe）

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60756469

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ワイヤ材料をアーク放電により溶融・積層する金属積層と回転工具を用いた仕上げ加工を同時に実施する、新たな加工法を提案した。提案方法により造形物の形状精度を向上させると同時に、工具により与えられる攪拌作用や塑性ひずみによって造形物内部組織の異方性を抑制する。切削工具およびFSB工具により仕上げ加工した際の造形物内部組織を評価し、提案方法の実現可能性を示した。また、仕上げ加工時における造形物の凝固状態と組織の異方性との関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤ+アーク放電式による積層造形物は他の指向性エネルギー堆積法による造形物と同様に、高い温度勾配と冷却速度によりデンドライト組織が成長しやすく、材料の異方性が問題となる。本研究結果により造形物表面付近の金属結晶の異方性が改善されることを明らかにした。これにより材料の機械的特性の改善が期待される。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new processing method that simultaneously performs metal additive manufacturing, which melts and deposits wire materials by arc discharge, and finishing processing using a rotary tool. The proposed method improves the shape accuracy of the accumulates, and at the same time suppresses the anisotropy of the microstructure of the accumulates by the stirring action and plastic strain given by the rotary tool. The microstructure of the accumulates after finishing with a cutting tool and FSB tool was evaluated, and the feasibility of the proposed method were shown. It was also clarified that the relationship between the solidification state of the accumulates and the anisotropy.

研究分野：生産工学・加工学

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

1. 研究開始当初の背景

アディティブ・マニュファクチャリング (AM) は材料を直接付与することで完成品に近い形状を直接造形することが可能である。特に、複雑形状を有し、強度が必要な金属製品への適用が期待されている。金属部材適用可能な AM プロセスはいくつか種類があるが、産業利用へ向け様々な取り組みがなされている方法は現状では 2 種類ある。ASTM で策定された分類では、ひとつは粉末床溶融結合であり、もうひとつは指向性エネルギー堆積である。

指向性エネルギー堆積はいわゆる肉盛溶接と同様なメカニズムであり、母材に熱源とともに材料を射出して溶融池を形成し、溶融金属を滴下・堆積させる方法である。本研究では指向性エネルギー堆積の一種であるワイヤ材料をアーク放電で溶融する「ワイヤ+アーク放電による AM 方式」を扱う (図 1)。指向性エネルギー堆積では、一般的な溶接と同様に、溶着金属の組織は母材 (圧延材など) と異なり、多くの場合、延性が乏しく、疲労強度が低下することが問題とされる。これは、圧延材である母材が一般的に等粒状組織であるのに対し、溶着金属は樹枝状組織 (デンドライト) になるためである。従来の研究では入熱条件によって内部組織の制御が試みられているが、母材と同様な等粒状組織が得られる加工法は確立されていない。これは、指向性エネルギー堆積では金属材料が局所的に溶融、凝固し、さらに積層により温度履歴が複雑かつ制御困難なためである。

2. 研究の目的

本研究では、AM による造形物には必須である、切削による仕上げ加工を利用して溶着金属組織を制御する方法を提案する。溶着金属の凝固および冷却過程において、仕上げ加工のような外力が組織形成に与えられる影響は明らかにされていない。そのため提案するプロセスによる溶着金属組織の形成を含む加工全体のメカニズムを実験的に明らかにし、加工条件を最適化することで、造形物内部組織を制御可能にする。

3. 研究の方法

本研究ではワイヤ+アーク放電による AM 方式により付加された溶融金属が凝固すると同時に回転工具により仕上げ加工を行い、母材と造形物の内部組織を等粒状に制御する。図 1 に示すように回転工具を凝固途中の造形物に押し当て、攪拌させることでデンドライト組織の成長を妨げることで造形物の内部組織の改質を目指す。また、回転工具の仕上げ加工によって、造形物の表面性状の向上とともに、従来造形後に行う仕上げ加工のプロセスの簡略化が期待される。しかしながら、回転工具による力学的作用や加工条件が内部組織に与える影響は明らかにされていない。そのため、回転工具として切削工具と FSB (Friction stir burnishing) 工具を用い、同時加工実験を行った。また、造形物の内部組織を評価し回転工具による力学的作用が内部組織に与える影響を調査した。

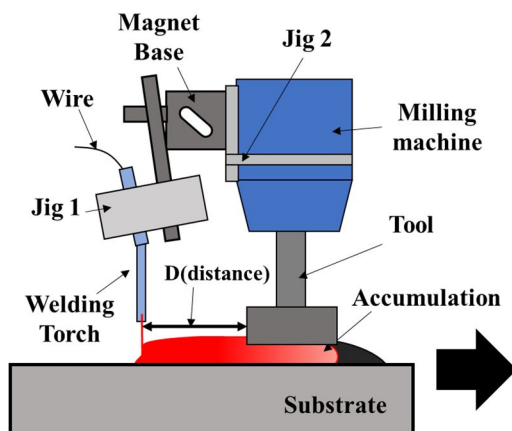


図 1 加工メカニズム

4. 研究成果

(1) 実験用加工システムの構築

提案方法による加工実験を実施するために実験装置を構築した。実験装置を図 2 に示す。立型汎用フライス盤に溶接トーチを取り付け、溶接装置による材料付加工程の直後に回転工具での仕上げ加工を可能にしている。溶接装置は DL350II (ダイヘン社) を用いた。回転工具には肩削り用のエンドミルおよび自作の FSB 工具を用いた。

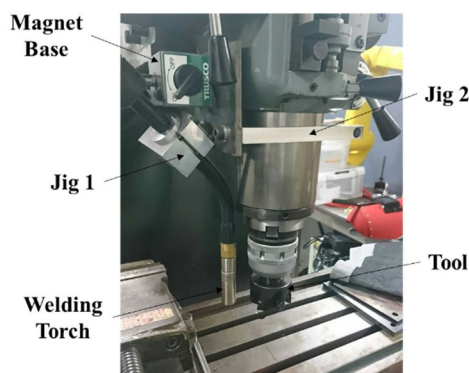


図 2 実験装置

(2) 造形物評価

造形物を切断・研磨しエッチングすることで内部組織を確認した。また、内部組織の異方性を定性的に評価するために D8 Discover (Bruker 社) による XRD 解析を行った。本装置は 2 次元検出器を有するため、2 次元の回折像が得られる。回折像の形状から組織の配向が定性的に評価可能である。

加工した造形物の断面組織写真を図 3 に示す。同時加工を行わない造形物には図 3(a) に示すように母材側から造形物上部方向へ成長したデンドライト組織が観察された。エンドミルによって加工された造形物には図 3(b) に示すように方向性のない組織も一部観察されたが多くの領域にはデンドライト組織が見られた。FSB 工具によって加工された造形物には図 3(c) に示すようにデンドライト組織が見られない領域が多く観察された。デンドライトが観察されなかった領域はビード上端部から深さおよそ 1 mm までであり、深さ 1 mm より下部ではデンドライト組織が見られた。

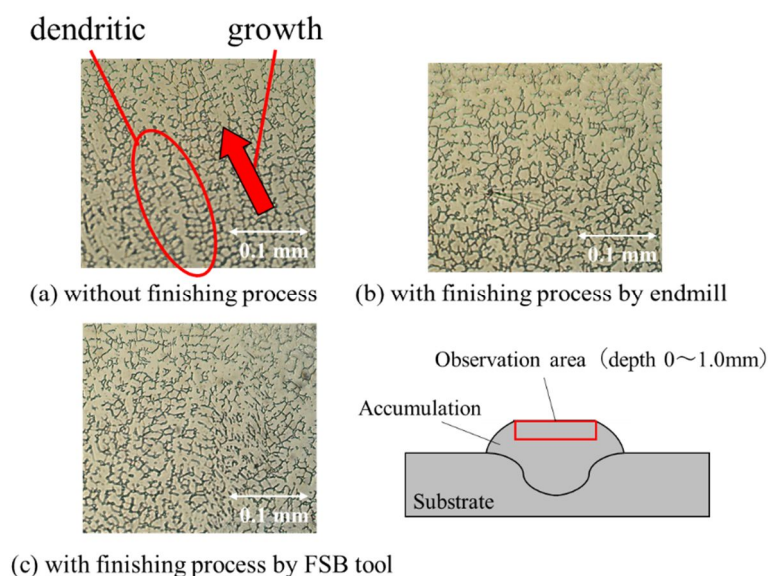


図 3 金属組織

次に XRD 装置による異方性の定性評価結果を示す。本試験では CuK α の X 線を用いて、照射径は 0.5mm、照射角度は $2\theta=35\sim 90^\circ$ とした。また、照射位置はビード頂点部から深さ 0.5mm とした。一般的に金属組織に異方性がない場合、結晶粒は様々な方向を向いているため、X 線の回折光は X 線照射部からリング状に広がる。本実験で使用した装置はその回折光の一部の領域を二次元で計測するため、リング状の回折光の一部を切り取った形で観察でき

る．そのため，異方性のない組織を分析した場合，連続した円弧状の回折光が見られる．一方，配向した組織にX線を照射した場合，回折光は点状もしくは短い円弧状に観察される．取得したX線回折強度分布を図4に示す．同時加工をしていない造形物とエンドミルによって同時加工を行った造形物の回折強度分布では，回折強度が高い領域は点状または短い曲線状に見られた．このことから，結晶粒の配向性が高いことがわかる．一方，FSB工具を用いて同時加工した試験片からは連続的な回折線が得られた．これは，FSB工具を用いた同時加工により，深さ0.75mm付近までの金属組織の異方性が少ないことを示している．

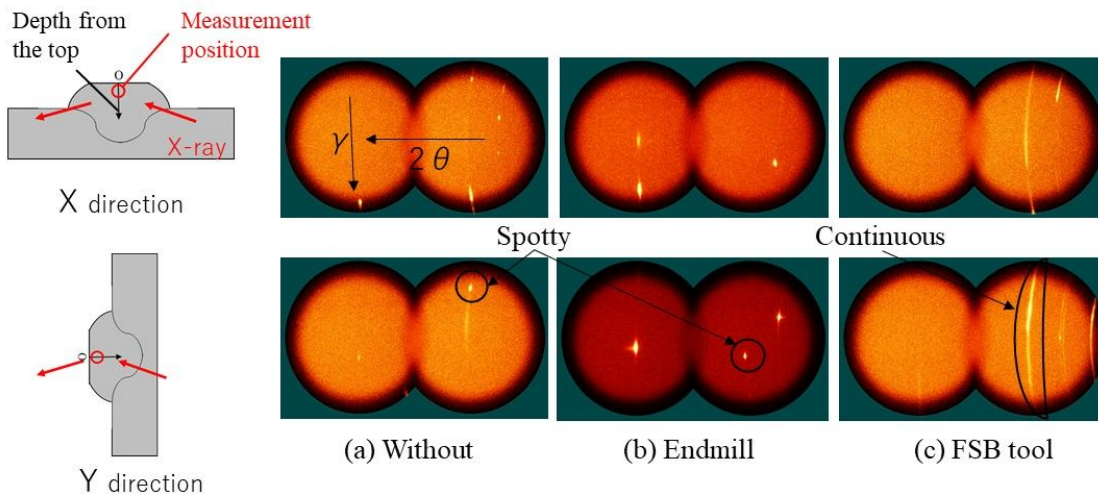


図4 X線回折強度分布（測定位置：0.5 mm）

(3) 加工条件と内部組織の関係調査

仕上げ加工時の造形物の凝固状態および温度によって凝固後の内部組織が異なると予測される．そこで，前述のFSB工具を用いて，溶融状態・凝固途中・凝固後の各段階で工具が接触した場合に金属内部組織がどのような影響を受けるか調査した．予備実験として，造形物の溶融池長さをハイスピードカメラで撮影・測定した．図5にハイスピードカメラでの撮影画像の例を示す．トーチ中心Oから動画により流動性が高く溶融していると判断されるピード後端の位置をA，凝固途中と思われる領域の後端をBと定義した．

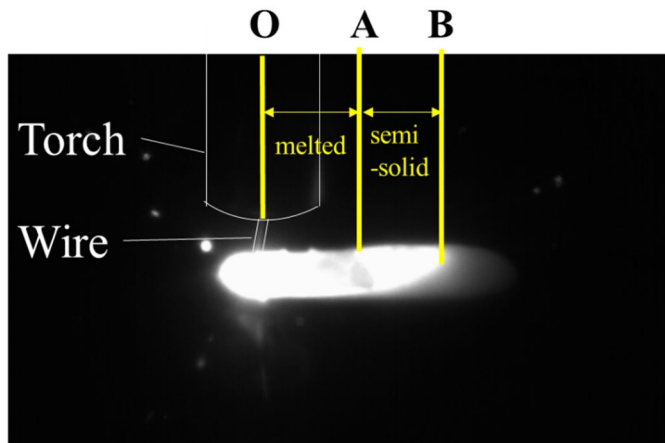


図5 ハイスピードカメラによる溶融池撮影画像

上記の結果をもとに溶接トーチとFSB工具の距離Dを調整することで，工具接触時の造形物の溶融状態が異なるようにした．溶接トーチとFSB工具の距離Dが近いほど，積層後にFSB工具が接触するまでの時間が短く，造形物温度が高い状態で回転工具による加工力が付与されることになる．

図6に溶接トーチとFSB工具の距離Dの異なる3条件におけるX線回折強度分布を示す．造形物最上部からの距離0.5 mmまでは図4(c)の結果と同様にどの条件も連続的な回折強度分布が得られたが，造形物最上部からの距離1.0 mmでは図6に示すように， $D=17$ mmが比較的連続的な回折強度分布が得られた．したがって，造形物温度が高い状態で加工力が付与されるほど内部組織へ与える影響が大きいことがわかる．これは造形物温度が高いと降伏応力が低下し，より大きな塑性ひずみが付与されたためだと考えられる．これにより凝固過程での攪拌作用によりデンドライトの成長が抑制された，もしくは再結晶がより多く発生

し、組織の異方性が低減したと考えられる。

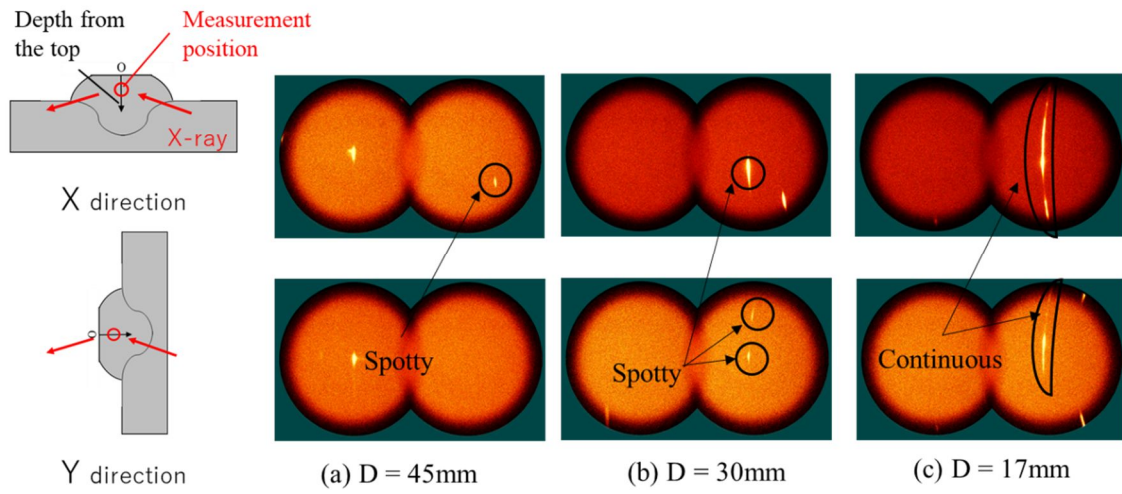


図6 X線回折強度分布(測定位置: 1.0 mm)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yu Nakata, Jun'ichi Kaneko, Takeyuki Abe
2. 発表標題 Improvement in microstructure by wire arc additive manufacturing with finishing process
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------