

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03802

研究課題名（和文）固相接合メカニズムを応用した金属積層技術の開発

研究課題名（英文）Additive manufacturing using wire and electric power

研究代表者

阿部 壮志（Abe, Takeyuki）

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60756469

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）：本研究では高効率・高精度かつ、様々な異種金属材料を用いた積層が可能な、新たな付加加工（アディティブ・マニファクチャリング）技術を提案する。提案方法ではワイヤ材料を通电加熱により加熱することによりワイヤと母材を接合させ、金属材料を直接積層する。加工実験によりワイヤの送給速度、ステージ送り速度、通电加熱の入熱エネルギーなどの加工パラメータと接合の有無、ビード形状との関係を調査した。その結果、ビード体積に対して、入熱量が不足すると接合不良やビードの座屈が見られた。また、入熱に対してテーブル送り速度が過大だとハンピングが発生することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤの直接加熱により低入熱での積層を可能にした。提案方法ではワイヤへの入熱が支配的であることから、アーク溶接方式など他の方式と比較して幅が細いビードが得られた。また、ワイヤが完全に溶融する、もしくは半凝固に近い状態でビードが形成していると考えられ、熱の影響を低減することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a new additive manufacturing technology that enables highly efficient, high-precision accumulation of various dissimilar metal materials. In the proposed method, the wire and base metal are bonded by heating the wire material with electric current, and the metal materials are directly deposited. Through experiments, we investigated the relationship between processing parameters such as wire feed rate, stage feed rate, and heat input energy of Joule heating, and bead shape. The results showed that insufficient heat input relative to bead volume resulted in poor bonding and bead buckling. Excessive table feed rate relative to the heat input was also found to cause humping.

研究分野：生産加工学

キーワード：アディティブ・マニファクチャリング 金属材料 通电加熱

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金属材料を用いて三次元形状を造形する Additive manufacturing (AM) のうち、材料とエネルギーを母材に投入し、溶融・積層し造形する方式を指向性エネルギー堆積法(Direct Energy Deposition, 以下 DED)という。DED は造形速度が高く異種金属積層が可能である特徴を持つ。ワイヤ材料を用いた DED は材料効率が高いという特徴があるが、造形能率を確保するためには熱源の出力を上げる必要があり、母材やワイヤに投入されるエネルギーが多くなる。それにより溶融池体積が大きくなり造形幅が大きくなる。さらにレーザーや電子ビームを用いる場合には大規模な機器構成が必要で、設備コストに課題がある。異種金属積層時には入熱により異種金属界面に脆弱な金属間化合物が生成し、接合強度低下の要因となる。

2. 研究の目的

ワイヤを直接加熱し、大きな溶融池を形成することなく金属を積層する技術を確立する。提案方法について、造形可能な加工条件を調査することでプロセスマップを作成し、加工条件が造形品質に与える影響を調査する。

3. 研究の方法

(1) 造形装置の開発

図1に示すように、ワイヤ材料に電圧を印可し、直接通電によるジュール発熱で加熱・積層する装置を開発した。ワイヤ材料はワイヤフィーダによって連続的に供給され、同時に 2000W 直流安定化電源によるジュール熱で加熱を行う。ワイヤフィーダは直流モータの PWM 制御により送給量を設定している。ワイヤと母材の相対運動は直動ステージの数値制御により行っている。セラミックプレートは母材の下に配置した。これは溶着性を向上させるための母材からテーブルへの断熱と、装置への通電を防ぐための電気的な絶縁を目的としている。

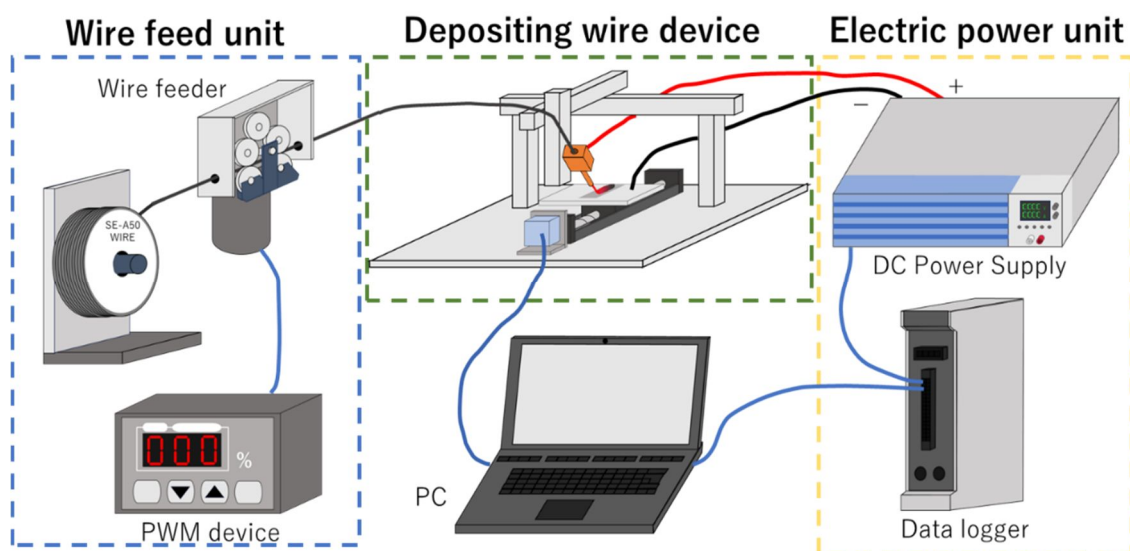


図1 造形装置概略図

(2) ビードオンプレート実験

図2に示すように平板上に積層実験を行い、加工条件が造形物形状に与える影響を調査した。製作したビードの幅を3点計測してその平均を算出した。また、造形中のワイヤおよび溶着金属をサーモカメラにより観察し、造形可能な条件の特徴を定性的に評価した。

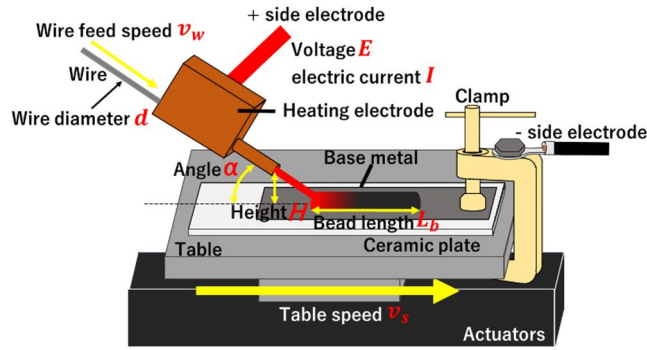


図2 ビードオンプレート実験

4. 研究成果

図3に実験結果を示す。縦軸は式(1)に示す単位体積あたりに投入した熱量の指標を示す。横軸の指標は式(2)に示すテーブル速度から計算したビードの断面積である。積層造形を行うにあたって2層以降積層可能であると判断したビードに関しては色のついた丸印で示している。丸印の色はビード幅を示す。それ以外の記号はビード幅が計測できなかった条件や2層目以上積み上げる際に形状精度が保てないと考えた、ビードとして不適な条件である。

$$\frac{Q}{V} = \frac{240IE}{\pi v_w d^2} \quad (1)$$

$$S = \frac{\pi d^2 v_w}{4v_s} \quad (2)$$

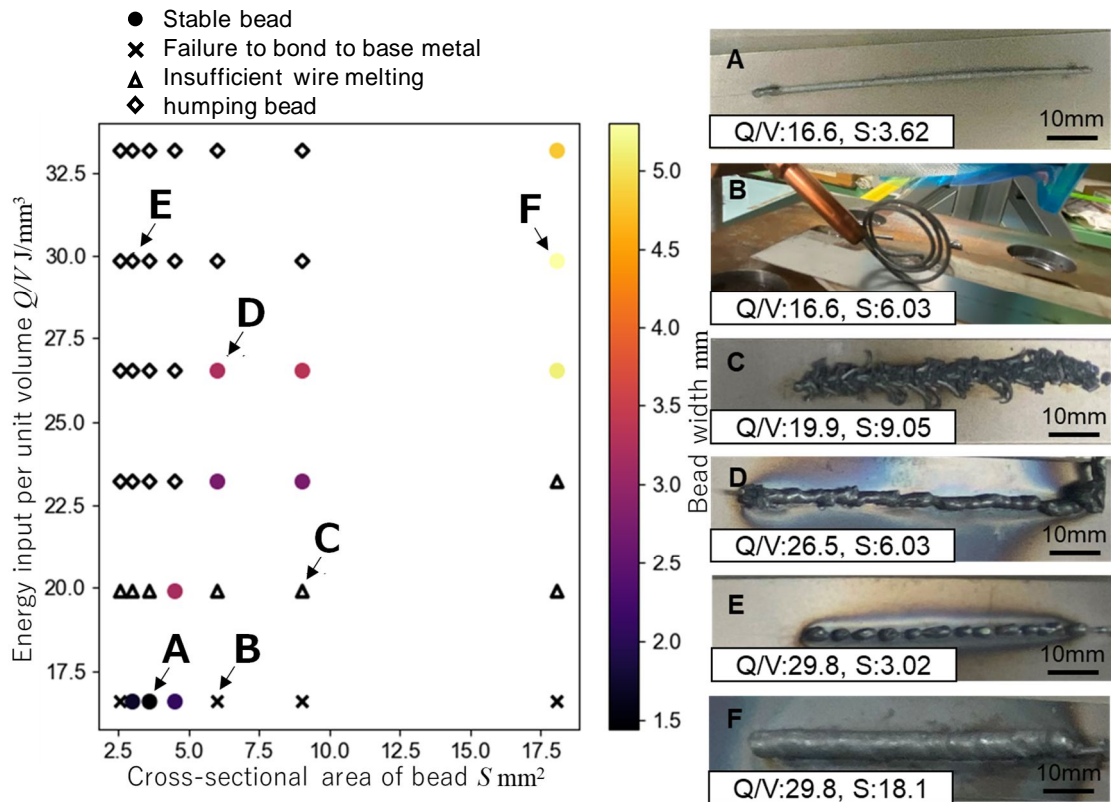


図3 ビード幅とビード外観

製作したビードの状態を 6 パターンに分類した際の各例を図 4 に示す．一般的に用いられるレーザを用いた DED 方式では 3mm 程度の幅であるのに対して，条件 A は最も細く直線的に造形できた条件で太さ 1.3~1.5mm 程度の幅を達成した．条件 B や C は低入熱・速度比が合わず接合不良または溶融不良となった．条件 D は造形可能だが，形状が不安定になっている．条件 E はテーブル速度が高く，ビードが途切れた．条件 F はワイヤ投入量が多いため幅 5mm 程度のビードとなっており，条件によってビード幅を調節であることを示唆している．

図 4 にサーモカメラによる観察結果を示す．条件 A と B を比較すると，条件 B での母材付近の温度が低く，ワイヤが母材と接合していないことがわかる．これはテーブルの送り速度に対してワイヤの送り速度が高いことにより母材とワイヤの接触時間が短く，ジュール熱が母材に電熱しなかったことが原因と考えられる．

条件 C は条件 B と比較すると母材への溶着が見られるが，ビード外観に欠陥が見られた．これは入熱が条件 B より大きいものの，入熱が不十分であるためと考えられる．

条件 E ではハンピングが見られ，条件 D でもややハンピングの傾向が見られた．安定したビードが得られた A，F とハンピングの傾向が見られる条件 D を比較すると，最高温度が高いことも特徴的である．ハンピングが発生した条件ではスパッタが見られた．これは入熱量が多いと溶融速度が高くなることと，溶滴の表面張力によって，母材とワイヤ先端が瞬間的に離れていることを示している．母材とワイヤ先端が離れている瞬間にスパッタが観察される．ワイヤは連続的に送給されるため，再度ワイヤ先端と母材は接触する．このワイヤ先端と母材の接触・非接触の繰り返しによってワイヤからの材料供給が不連続になり，ハンピングが発生していると考えられる．

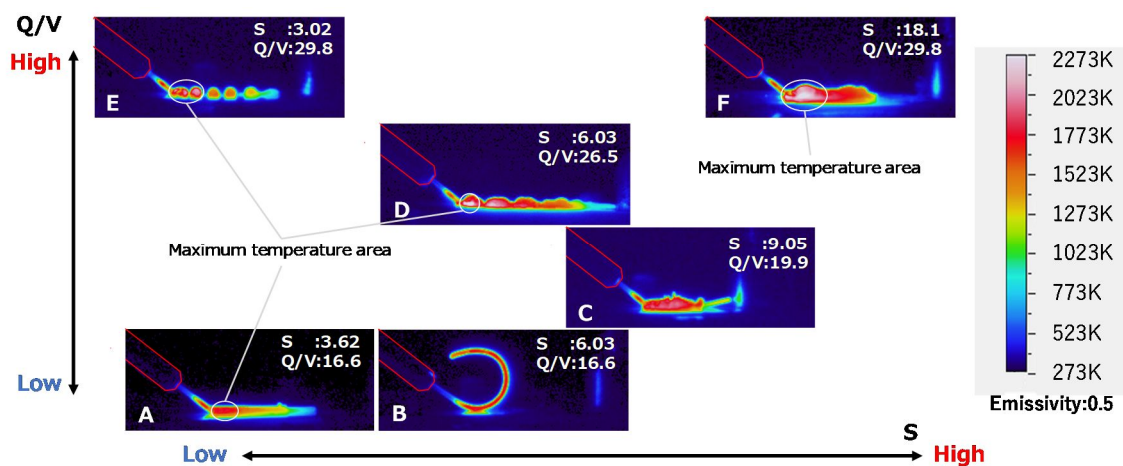
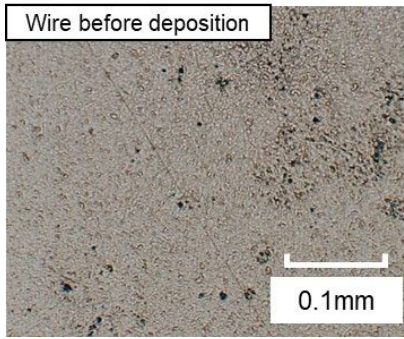
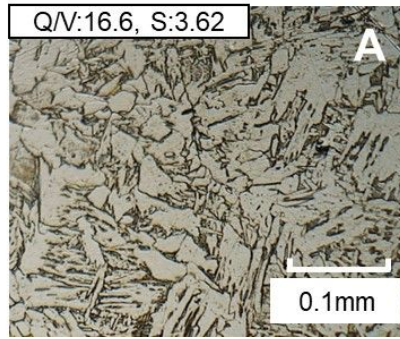


図 4 造形中の溶着金属

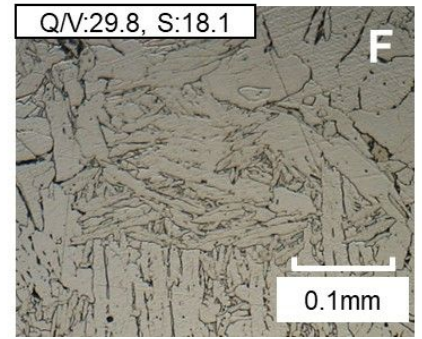
図 5 に造形に使用する前のワイヤの金属組織，および造形物の金属組織を示す．ワイヤの金属組織と比較すると条件 A および F の粒径が大きいことから，造形時の入熱により再結晶温度以上に加熱されていることがわかる．また，条件 A と F の結晶粒径もほぼ同等であることから，造形可能な条件での造形物温度履歴も同等であることが示唆される．



(a) ワイヤの金属組織



(b) 条件 A



(c) 条件 F

図5 金属組織

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 Naoki Koyama, Takeyuki Abe, Jun'ichi Kaneko
2. 発表標題 Investigation of the relationship between electric power and deposited metal width in wire additive manufacturing using Joule heating
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究分担者	金子 順一 (Kaneko Jun'ich) (80375584)	埼玉大学・理工学研究科・教授 (12401)	

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
---------	---------