

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02038

研究課題名（和文）ワイヤ+アーク放電方式によるMg合金と異種金属の付加加工における機能創成

研究課題名（英文）Function creation in additive manufacturing using Mg alloys and dissimilar metals with wire arc discharge

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）：アーク放電を熱源としてワイヤ材料を溶融・積層する付加加工の手法において、供給した溶融金属に固体ブロックを接触させて強制的に冷却することにより、軽量高比強度金属であるが溶融時の粘性が低く造形が難しいMg合金を精度よく造形することを可能とした。さらにその表層にMg合金に比して耐熱性や耐食性・耐摩耗性に優れたTi合金、Al合金の異種金属造形の可能性について調査し、界面の金属組織状態や接合強度について明らかにした。これらの組み合わせでは異種金属界面に金属間化合物が生成し冶金的な接合強度は低い、造形自体は可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Mg合金は軽量で比強度が高いが、粉末状態では粉塵爆発や燃焼が生じやすいため、粉末材料を用いる一般的な金属AMでの造形が難しい。ワイヤ・アーク方式と固体接触による冷却により、安全かつ精度良くMg合金を造形できることを示した。Mg合金とTi合金、Al合金の異種金属積層における界面での金属間化合物生成の状態を明らかにし、Mg合金表面の硬度の高い金属を積層することができた。金属間化合物の状態は、投入エネルギー量と造形物の温度状態により大きな影響を受けることを明らかにした。低入熱条件では接合状態は悪いが、成分希釈のないTi合金を積層できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In additive manufacturing utilizing wire material and arc discharge, a magnesium alloy, which is a lightweight and high specific-strength metal, can be applied for fabrication with high precision by active cooling with solid block contact to the supplied molten metal. Furthermore, on the surface layer, the possibility of deposition of dissimilar metals such as Ti alloy and Al alloy, which have superior heat resistance, corrosion resistance and wear resistance compared to Mg alloy, was investigated. The metallographic state and bond strength at the interface were also clarified. Although the metallurgical bonding strength of these combinations is low due to the formation of intermetallic compounds at the interfaces between dissimilar metals, the additive process itself is feasible.

研究分野：生産加工学

キーワード：アディティブ・マニュファクチャリング マグネシウム合金 異種金属造形

1. 研究開始当初の背景

軽量高比強度の Mg 合金を用いた造形には、航空機や自動車向けなど軽量化が求められる分野から注目を集めているが、Mg 粉末を用いるプロセスには粉塵爆発や発火の危険性が伴う。それでも Mg を Additive Manufacturing (AM) に適用しようとする研究は精力的に行われているが、沸点が低く急速に蒸発しやすく、その際に溶融池や付近の未焼結の粉末材料を吹き飛ばすことにより造形自体が難しく、また空孔率が高く十分な強度が得られないことが問題となっている。ワイヤ+アーク放電方式による AM で Mg 合金を安定かつ精度よく造形することが望まれている。また、Mg 合金の造形物の実用的な付加価値を高めるために、表層に耐摩耗性・耐食性の高い異種金属層を設けることを着想した。Mg 合金による造形物表面にさらに Ti 合金や Al 合金などの異種金属を付加造形することの実現可能性を明らかにすることが課題となる。

2. 研究の目的

一般的な他の金属 AM では造形が困難な Mg 合金の造形を可能とし、その際に積極的な冷却とパルス電流の付与により凝固時の金属結晶微細化と強度向上を実現する。さらに、必要十分な強度を有する Mg 合金～異種金属間の積層を可能とし Mg 合金造形物表層への耐摩耗性・耐食性を付与する。そのプロセス手法として、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造形するものとする。

3. 研究の方法

積層 Mg 合金の溶融・固化プロセスにおける冷却速度のコントロール： 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と形状精度を制御するためには、固化する過程における冷却プロセスを制御する必要がある。これまでに、鉄鋼材料や Ni 基耐熱合金では造形時の水冷により結晶粒が微細化することが明らかとなってきた。しかし Mg は反応性が高いため、水以外の反応性の低い物質を用いることが必要となる。冷却においては、金属の融点から温度低下し凝固や析出をする温度域の冷却速度がコントロールできればよいと考えた。当初は液体、気体の冷媒も想定したが、冷却速度と低反応性を満足することができず、最終的には図1に示すように、銅ブロックを高温の造形部分に接触させ、冷却速度を高めるとともに、形状を規定し粘度の低い溶融 Mg 合金が滴り落ちることを回避する手法を取ることにした。

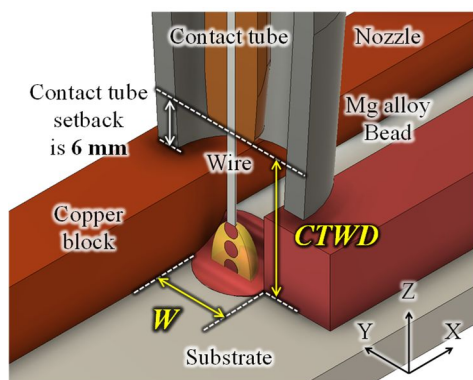


図1 銅ブロックの接触による造形壁の冷却と形状規定

形状、温度のインプロセスモニタリングと、造形条件へのフィードバック： 指向性エネルギー堆積の原理による造形では、付加する金属の体積は制御可能であるが、凝固するまでの流動可能な熔融状態の表面形状は、重力、表面張力、粘度、濡れ性、下層部分の形状や温度に依存し単純には定まらない。そこで、二次元レーザ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をモニタリングを可能とした。同時に赤外線サーモグラフィにより造形物の表面温度もモニタリングした。形状と温度の情報をインプロセスモニタリングし、1)あらかじめ取得した造形条件と付加部分の高さ・幅の情報、2)現在付加部分と一層下の形状情報、3)造形物の表面温度、4)金属組織の状態に関する情報、の4つの情報を元に造形条件を修正した。

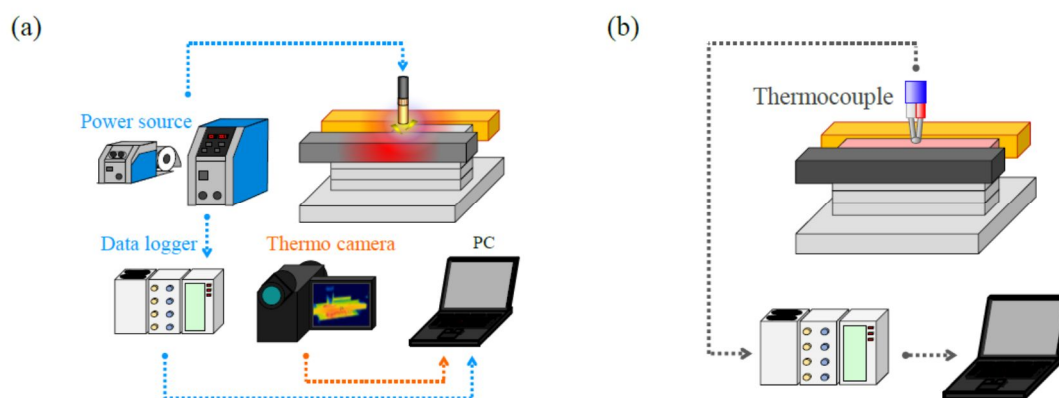


図2 造形中の温度モニタリング

Mg合金への異種金属の積層造形： Mg合金に対しTi合金、Al合金をワイヤ+アーク放電によるAMで積層造形の可能性を明らかにする。当初は熔融しあい混合した状態からの凝固プロセスを制御することによる接合を試みたが、Ti-Mg系は2相分離系で混合状態の実現はできなかった。そこで、Mg-Al、Mg-Tiの積層界面における金属間化合物の状態について、入熱量や冷却速度との関連について調査を行った。付加するAl合金ワイヤ中のSi添加物の影響、Al合金を積層する際に、Znのインサート材を設けることによる接合状態について検討した。

4. 研究成果

- (1) Mg合金の溶融・固化プロセスにおける冷却速度のコントロール： 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は、固化する過程における冷却プロセスを制御する必要がある。固体を造形部分に強制的に接触させて冷却する手法について、その接触固体内にさらに冷却水を循環する手法を開発し、冷却能を高めることができた。この手法の採用により、Mg合金の造形壁は接触壁に規定されるため、図3に示すように造形壁の厚さは均一となり、表面粗さも小さくなった。結晶粒は造形物中心から側面にかけて等軸状に成長する傾向が見られた。造形高さ方向を引張方向とする試験片により引張試験を行った結果、個体接触により冷却した場合は、積極的な冷却は行わないが層間時間が長く温度上昇を回避した場合と同等の引張強度・破断伸びを示した。図4に造形後に引張試験片を作成した状態を示す。

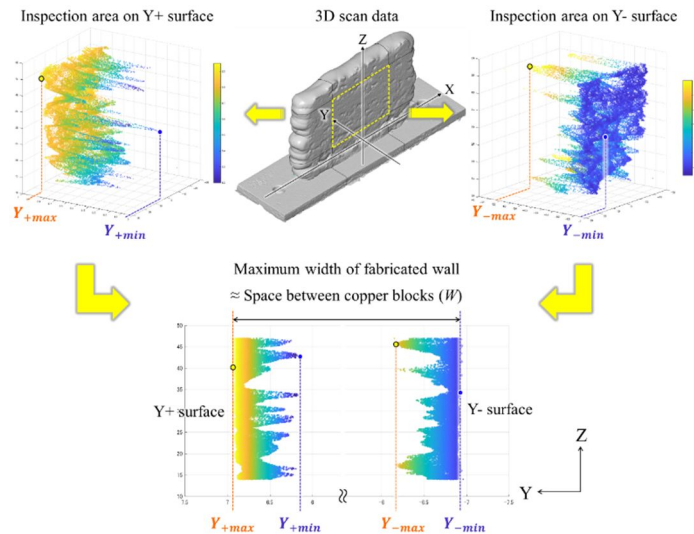


図3 Mg合金による造形壁の形状精度

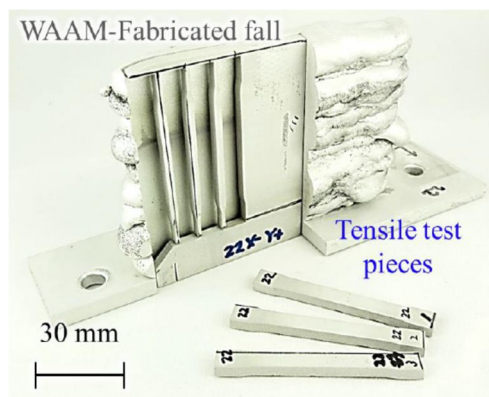


図4 Mg積層物から作成した引張試験片

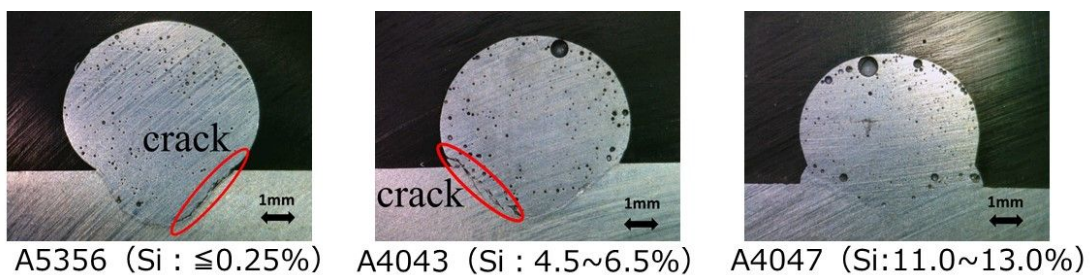


図5 Mg合金上にSi添加量の異なるAl合金を積層した際の割れの発生状態

(2) 混合異種金属の溶融・凝固プロセスにおける保護層の形成：Mgの上にSi添加量の異なるAl合金ワイヤを用いて積層すると、図5に示すように、Si添加量が多い方が金属間加工物層は厚くなるが、き裂の発生しない接合が可能であった。Mg合金-Al合金の積層の成否はAl合金のSi添加量による影響が大きい。造形自体は可能であることを見出したが、成分や厚さが均一なAl層の創成には成功できておらず、耐食性への影響について調査できなかった。他方、冶金的な結合によらず構造的結合により、結合強度は向上できることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Nagamatsu Hideaki, Sasahara Hiroyuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Improvement of Cooling Effect and Dimensional Accuracy of Wire and Arc Additive Manufactured Magnesium Alloy by Active-Cooling-Based Contacting Copper Blocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing and Materials Processing	6. 最初と最後の頁 27 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jmmp6020027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Abe Takeyuki, Kaneko Jun'ichi, Sasahara Hiroyuki	4. 巻 35
2. 論文標題 Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 101357 ~ 101357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2020.101357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nagamatsu Hideaki, Sasahara Hiroyuki, Mitsutake Yuusuke, Hamamoto Takeshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 100896 ~ 100896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2019.100896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Miyake Ryotaro, Sasahara Hiroyuki, Suzuki Atsushi, Ouchi Seigo	4. 巻 11
2. 論文標題 Wire Arc Additive and High-Temperature Subtractive Manufacturing of Ti-6Al-4V	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 9521 ~ 9521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app11209521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 永松秀朗, 笹原弘之, 李俊霆, 木下淳
2. 発表標題 銅ブロック補助材によるWAAM積層手法がAZ31積層壁の形状精度・積層能率・強制冷却に与える影響
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶋田大祥, 永松秀朗, 阿部壮志, 金子順一, 笹原弘之
2. 発表標題 ワイヤ+アーク放電によるアディティブ・マニファクチャリングを用いたMg合金-Al合金積層におけるAl合金Si添加量の影響
3. 学会等名 2021年度精密工学会 第28回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T.Shimada, H. Nagamatsu, T.Abe, .Kaneko, H.Sasahara
2. 発表標題 Mechanical properties and joining state in wire and arc additive manufacturing of Al-Si/Mg-Al-Zn dissimilar alloys
3. 学会等名 10th International conference on LEM21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H.Nagamatsu, H.Sasahara, T.Abe
2. 発表標題 Microstructure and welding penetration of wire and arc additive manufactured Pure Titanium and A5356 dissimilar alloys using cold metal transfer welding
3. 学会等名 euspen 's 21st International Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 H.Nagamatsu, A.Pagliai, H.Sasahara
2 . 発表標題 Influence of processing conditions on porosity in WAAM-block structures with aluminum alloy
3 . 学会等名 ICPE2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 R.Kobayashi, N.Fujita1, H.Nagamatsu, H.Sasahara
2 . 発表標題 Fabrication of Ni/Co based functionally graded materials with WAAM
3 . 学会等名 ICPE2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 H.Masuda, H.Sasahara
2 . 発表標題 Molding on Curved Surface in WAAM by Shape Monitoring and Feedback
3 . 学会等名 ICPE2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 H.Nagamatsu and H.Sasahara
2 . 発表標題 Double-weld-overlay cladding to make an undiluted surface on cylindrical-outer layer using stainless steel and Ni-based wire
3 . 学会等名 Int. Conf. ASPEN (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Abe, J. Kaneko, H. Sasahara
2. 発表標題 Deposited metal shape control based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing
3. 学会等名 Int. Conf. ASPEN (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島健太郎, 笹原弘之, 永松秀朗, 薄井雅俊, 阿部壮志
2. 発表標題 構造的強度を有したTiとAl合金の異種金属積層法の開発
3. 学会等名 精密工学会第29回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅遼太郎, 笹原弘之, 大内誠悟, 鈴木敦
2. 発表標題 プラズマ方式WAAMにより造形されたチタン合金部材の高温切削
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅遼太郎, 笹原弘之, 大内誠悟, 鈴木敦
2. 発表標題 ローカルシールドを用いたプラズマ方式WAAMによるチタン合金部材の造形
3. 学会等名 日本機械学会 第13回 生産加工・工作機械部門講演会
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
研究分担者	阿部 壮志 (Abe Takeyuki) (60756469)	埼玉大学・理工学研究科・助教 (12401)	
研究分担者	中本 圭一 (Nakamoto Keiichi) (90379339)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (12605)	

	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
研究協力者	永松 秀朗 (Nagamatsu Hideaki)		

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