

## 研究論文

# 摩擦撹拌接合を用いた付加製造における 接合経路が引張強度特性に及ぼす影響

河田圭一\*1、石川和昌\*1、児玉英也\*1、菅野祐介\*2、廣澤考司\*3、横山博\*3

## Effect of Tool Path in Additive Manufacturing Using Friction Stir Welding on Tensile Properties

Keiichi KAWATA\*1, Kazumasa ISHIKAWA\*1, Hideya KODAMA\*1,  
Yusuke KANNO\*2, Koji HIROSAWA\*3 and Hiroshi YOKOYAMA\*3

Industrial Research Center \*1\*2\*3

造形時間を短縮できる摩擦撹拌接合を利用した新しい金属付加製造技術の研究開発が行われている。摩擦撹拌接合では、前進側と後進側で左右非対称の塑性流動現象が生じるため、複雑な接合経路により造形した場合、強度の不均一性が懸念される。そこで、本研究では接合経路が引張強度特性に与える影響について調べた。その結果、接合経路による影響は小さく均質な強度が得られることが分かった。

### 1. はじめに

近年、航空機部品や樹脂成形用金型などの製造工程を中心に、金属付加製造(Additive Manufacturing、以下AM)の実用化が進められている。金属のAMでは、粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion、以下PBF)や指向性エネルギー堆積法(Directed Energy Deposition)などが主に利用されており、切削加工などの従来技術では製造できない形状やラティス構造による軽量化などが実現できることから、様々な分野で利用が進んでいる。しかし、造形時間が長い、造形できる金属材料が限定されるなどデメリットもある。

一方、名古屋大学や企業を中心として摩擦撹拌接合(Friction Stir Welding、以下FSW)を利用した新しい金属AM技術の研究開発が行われている<sup>1)</sup>。本技術は、FSWにより板材を重ね合わせ接合した後、切削加工を1層ずつ繰り返すことで三次元造形を行う。本技術の特徴として、造形時間がPBFと比較して短いこと、一般的な市販の板材を使用するので合金材料が限定されないこと、レーザー焼結が難しいアルミニウム合金や銅合金などの造形が可能などなどが挙げられる。図1に本技術を用いて製作した金属AM例を示す。製作モデルは立形マシニングセンタ(YBM640V、安田工業(株))を使用して製作した。縦200mm×横400mm×高さ10mmの範囲がAM部である。AM部はFSWにより材料が撹拌、接合され一体となっている。本技術を構造部品に使用するためにはAM部の材料特性の把握が重要である。そこ

で、本研究では前報<sup>2)</sup>に引き続きAM部の機械特性の検証を目的に、接合経路が引張強度特性に与える影響について調べた。

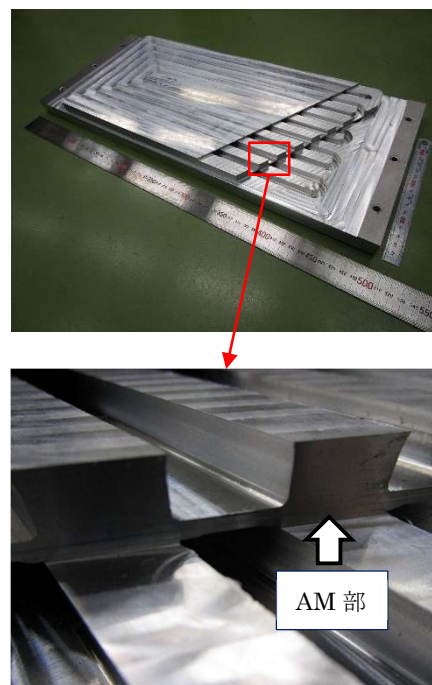


図1 FSWを利用して製作した金属AM例  
(使用材料：A5052)

### 2. 実験方法

#### 2.1 接合ツール及び接合条件

\*1 産業技術センター 自動車・機械技術室 \*2 産業技術センター 自動車・機械技術室 (現総合技術支援・人材育成室)  
\*3 産業技術センター 金属材料室

板材の接合に用いた接合ツールの概観を図2に、ツールの主要寸法を表に示す。マシニングセンタを使用したFSWでは、一般的なFSW装置のようにツールを数度傾けて接合することが出来ないため、ショルダ部の端面に渦巻き状の溝を設けることで、接合時におけるバリの発生を極力抑えた。

FSWでは、接合ツールの回転方向と接合方向が一致する側を前進側(Advancing Side、以下AS)、反対側を後進側(Retreating Side、以下RS)と呼び、ASとRSで左右非対称の塑性流動現象が生じることが知られている。そこで、本実験ではASが残るように接合した経路とRSが残るように接合した経路がAM部材の強度特性に与える影響を調べるため、図3に示す接合経路により接合を行った。FSWの接合条件は、主軸回転数2000rpm、接合速度500mm/min、ツールの挿入深さ2.4mm、接合ピッチ2mmとした。

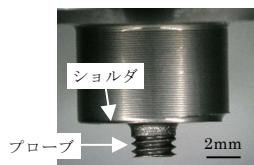


図2 接合ツール外観

表 ツールの主要寸法

ショルダ径	φ10mm
プローブ径	φ3mm
プローブ長	2.3mm
ねじピッチ	0.5mm
材質	SKH56

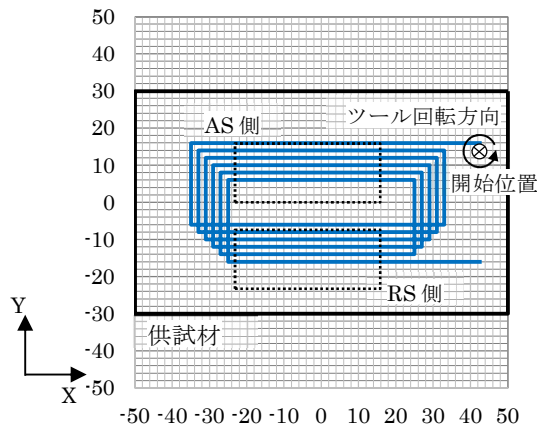


図3 FSWの接合経路

## 2.2 FSWによるAM方法

供試材には、厚さ2mmのアルミニウム合金A5052-H34の板材を使用した。はじめに、接合する板材をねじで固定し、FSWにより一部を仮接合した。ねじを取り外した後、図3に示した接合経路により本接合を行った。接合後のAM部材を図4に示す。接合後の表面は、図4のようにFSWによるツールマークの起伏が大きく荒れており、次の板材を上を設置できないため、上面0.3mmを切削加工により除去し、平滑にした。以上のFSWによる接合と切削を繰り返すことで合計36枚の板

材を接合し、引張試験を行うためのAM部材を作製した。

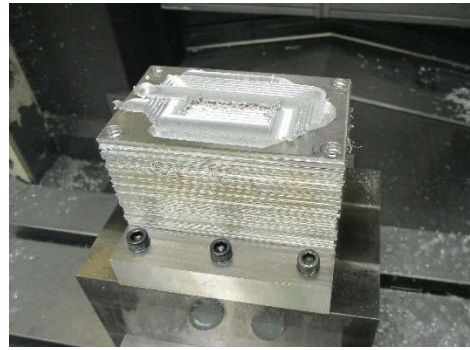


図4 FSWによる接合後のAM部材

## 2.3 加工力の測定方法

図3に示した接合経路で接合する時に発生する加工力の測定は、圧電式切削動力計(Type9139AA、キスラー)を用いて計測した。加工力はスラスト力とトルクを測定した。

## 2.4 接合温度の測定方法

接合温度は工具-被削材熱電対法<sup>3)</sup>により測定した。工具-被削材熱電対法は、切削加工分野でよく利用される温度計測方法であり、工具と材料との間で生じる熱起電力を利用して、加工中の温度を比較的簡易に測定できる方法である。本方法では、接合材料と接しているツールのプローブからショルダ部の平均温度を測定することができる。

図5に工具-被削材熱電対法の構成概要を示す。図に示す絶縁部を設けるとともに、回転しているツールに同質の材料を接触させることで熱起電力回路を形成した。熱起電力はツール側、材料側の端部に繋がれているオシロスコープにより計測した。

発生する熱起電力から温度を求めるためには、発生する熱起電力と温度の関係を事前に求めておく必要がある。そこで、FSWツールとアルミニウム合金との接触部にK熱電対を挿入し、昇温した時の熱起電力と温度の関係を求めた。求めた温度校正結果を図6に示す。

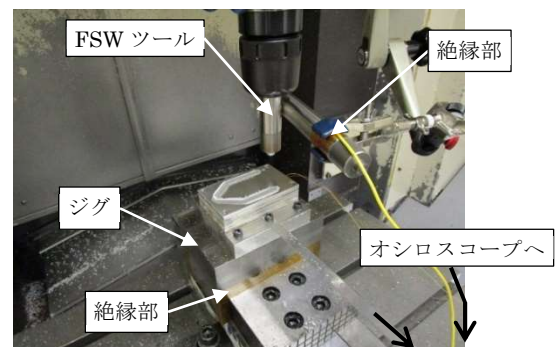


図5 工具-被削材熱電対法の構成概要

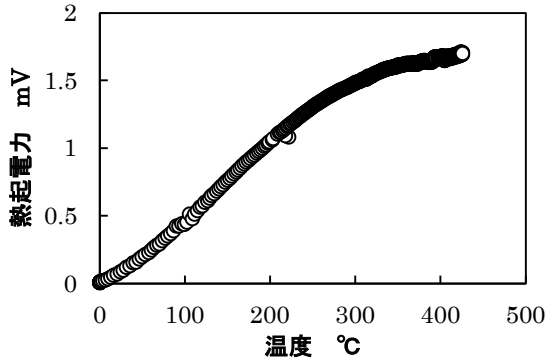


図6 熱起電力の校正結果

## 2.5 引張強度試験

引張試験片形状はJIS Z 2241 14号Bとし、幅4mm、厚み3mmとした。引張方向が積層方向となるように図3のAS側、RS側それぞれの中央付近から切り出した。引張試験機を用いて引張強さと伸びを測定した。N数は3とした。また試験後、破断面を走査型電子顕微鏡(SEM:JCM-6000PLUS、日本電子)により観察した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 接合時の加工力

1層目を図3の経路で接合した時のスラスト力と加工トルクの測定結果を図7に示す。図7のAS1からRS6は、図3の点線枠内に示したAS側、RS側をX方向に移動して接合しているときのそれぞれの経路の順番を示している。スラスト力は、接合開始から時間が経過するにつれ徐々に高くなる傾向が見られた。一方、加工トルクは、時間経過とともに僅かだが下がる傾向が見られた。これは、FSW ツールが材料を攪拌するときに発生する熱に起因し、ツールやワークの温度上昇に伴う熱膨張により、実質のツール挿入深さが増加しスラスト力は上昇し、またワーク温度の上昇による材料軟化により、加工トルクは低下したと推測される。実際、接合前後のツール及びワークの温度を測定すると100°C以上上昇していた。一方、AS側とRS側においてスラスト力及び加工トルクに大きな差は見られなかった。

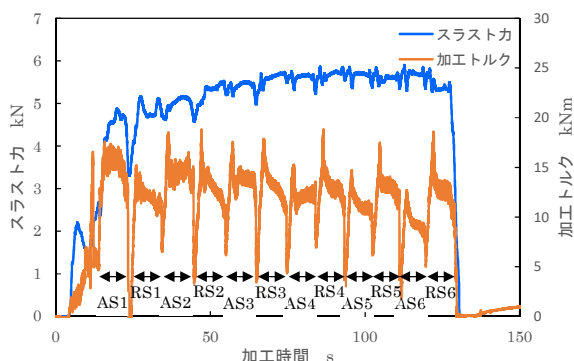


図7 スラスト力と加工トルクの測定結果

### 3.2 接合温度

図8に図3の経路で1層目を接合しているときの工具-被削材熱電対法による温度測定結果を示す。ツールの挿入により急激に温度は上昇し、接合開始直後には約250°Cまで温度は上昇した。ツールがX方向に移動し接合が始まると温度は徐々に上昇し、瞬間的には450°Cを超える結果が得られたが、AS側、RS側で温度に明確な差は見られなかった。開始から約70秒以降、温度が下がる傾向や急激な温度変化が見られるようになった。試験後のツール表面を観察すると、回転しているツールと熱起電力回路を形成するために同質材料を接していた部分に酸化とみられる変色した部分が観察できた。酸化した異質材により熱起電力が変化するとともに、摩耗粉による影響で変動が大きくなったのではないかと考えられる。

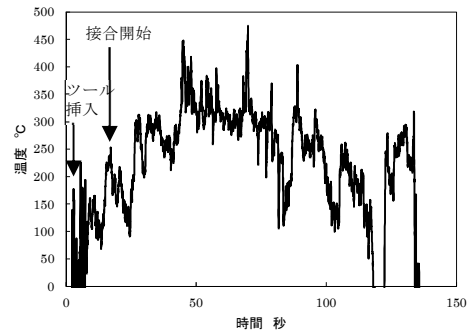
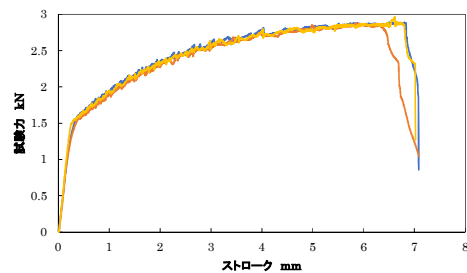


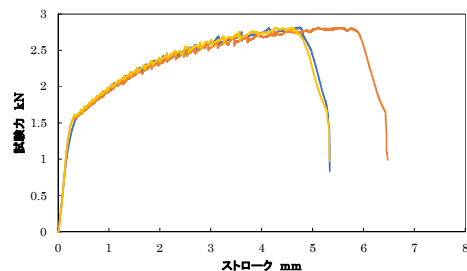
図8 接合時の温度測定結果

### 3.3 引張強度試験

図9に引張強度試験による試験結果を示す。AS側、RS側ともに比較的再現性の良い波形が得られており、材料はほぼ均一に攪拌されていると思われる。



(a) AS側



(b) RS側

図9 引張強度試験結果



図 10 に AS 側、RS 側の引張強さ及び伸びの測定結果を示す。参考として供試材として用いた A5052-H34 の試験結果も示す。AS 側、RS 側ともに、引張強さは供試材に対し約 5%低下した。一方、伸びは AS 側で約 30%、RS 側で約 10%増加した。FSW による金属 AM では、造形する形状により接合経路が複雑になり、AS または RS の影響で材料の均質性が得られないことが危惧されたが、本結果から接合経路による強度に違いは見られず、ほぼ均一であることが分かった。

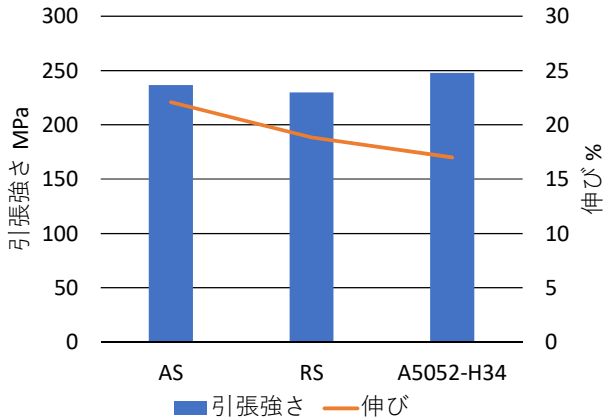


図 10 引張強さ及び伸びの測定結果

### 3.4 破断面観察

図 11、図 12 に引張試験後の破断面を SEM により観察した結果を示す。破断面全体を見ると、AS 側、RS 側ともにツールの送り方向に起因するツールマークが観察された。ツールマークのピッチを測定すると、おおよそツールの一回転あたりの送りに相当することが分かった。また、ツールマークがある破断面の A の部分を拡大すると (b) のようになっており、数  $\mu\text{m}$  程度のポーラス状の破断面が観察された。一般に FSW の攪拌部では微細な結晶粒組織が得られることが知られており、本実験においても、AM 部全体が数  $\mu\text{m}$  程度の微細な結晶粒組織となっていた。このことから、(b) のような破断面が生じていると思われる。一方、ツールマークとツールマークの間には、(c) に示すような一般の延性材料にみられるディンプル状の破断面も観察されており、複雑な破断面となっていることが分かった。

## 4. 結び

本実験では、AS が残るように接合した AM 部材と RS が残るように接合した AM 部材の引張強度特性について調べた。その結果、両材料には大きな違いがないことが

分かり、FSW による金属 AM において接合経路によらず強度的に均質な材料が得られることが確認できた。

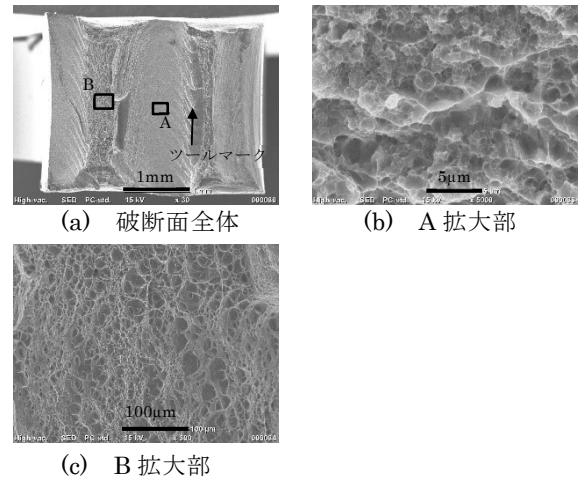


図 11 SEM による破断面の観察結果(AS 側)

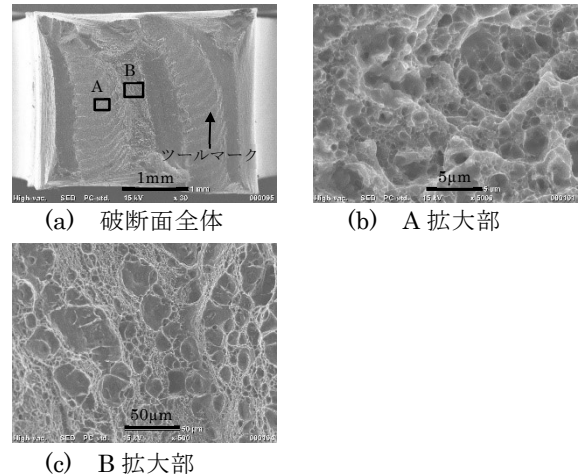


図 12 SEM による破断面の観察結果(RS 側)

## 付記

本研究は、「知の拠点あいち重点研究プロジェクトⅢ期」で行った研究の一部である。

## 文献

- 1) 特許第 6587028 号
- 2) 河田圭一, 児玉英也, 菅野祐介, 廣澤考司, 横山博: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **10**, 44(2021)
- 3) 浅井毅, 野村俊雄, 石塚春陽, 原昭夫: 精密機械, **44**(524), 1009 (1978)