

# 超微細アルミニウム合金板材における高継手効率を示す摩擦攪拌 接合継手の開発

芝浦工業大学 工学部 機械機能工学科

教授 青木 孝史朗

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016040)

キーワード：くり返しせん断変形加工，摩擦攪拌接合，継手効率

## 1. はじめに

超微細組織を有する高強度材料を創成する方法の 1 つとして、繰り返しせん断変形加工 (ECAP : Equal-Channel Angular Pressing)<sup>1)</sup>がある。これは素材にせん断変形を与えることで結晶粒を微細化し、強度を向上させる方法である。この方法では材料の寸法が金型の大きさに依存するため、大寸法の ECAP 材を作ることは困難となる。よって、ECAP 材を基に製品製造への応用を考えた場合、部材を接合し寸法を拡大する手法が考えられる。

超微細組織材同士の接合を考えた場合、接合時の発熱で超微細組織を破壊しないことが求められる。過去、本研究室では棒材の ECAP 加工を行い、これに適応した固相接合である摩擦圧接の研究を行った。その結果、ECAP 材は熱による影響を受けやすい事がわかり、加工時における入熱量を最小限に抑える事で、高い継手強度を達成することができた<sup>2)</sup>。一方、本研究室では板材の ECAP 加工も行えるようになっており、これも棒材と同様に固相接合による材料寸法の拡大を行いたいと考えている。そこで、板材に適した摩擦攪拌接合 (FSW : Friction Stir Welding)<sup>3)</sup>を採用した。

本研究では ECAP 材の FSW に最適な条件を調査・検討することを目的とする。数値目標として、通常アルミニウム合金 A6063 材の溶接継手の継手効率 (継手効率 = 継手の引張強さ / 母材の引張強さ) が 70%<sup>4)</sup>ということから、この接合でも同様に 70%以上の値を目標とした。

## 2. 使用素材と実験装置

### 2.1 使用材料

供試材は断面形状が 30×5mm のアルミニウム合金 A6063-T5 材を使用し、当研究室が所有する低摩擦型せん断加工機を用いて ECAP 加工を行った。この ECAP 加工の条件は、ルート A (各 pass 間で材料の向きを変えない加工法) で 3pass 材 (pass=ECAP 加工回数) を製作した。3pass 材は十分に結晶粒が微細化されており、接合時の流動性が向上したために FSW を行う上では、より低い熱量でも欠陥が発生しにくいと予想された。この ECAP 材についてのレーザー顕微鏡による組織観察の結果を図 1 に示す。

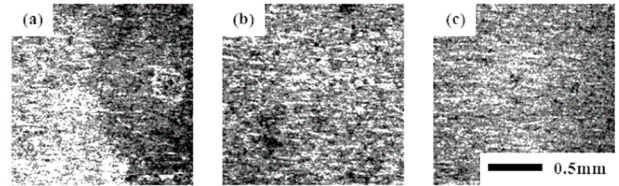


図 1 ECAP 加工を 3Pass 施した A6063-T5 板材の断面における組織写真 (a) 板材左側, (b) 中央部, (c) 板材右側

ECAP 加工後、フライス盤を用いて、幅  $b=29.2\text{mm}$ 、長さ  $h=70\text{mm}$ 、厚さを接合ツールの形状に合わせて、機械加工により形を整え、FSW 用の素材とした。

### 2.2 摩擦攪拌接合

FSW とは、ツールと呼ばれる棒状の工具を高速で回転させながら金属接合部に接触させて、材料との摩擦熱を発生させ、その熱により軟化した部分を攪拌し、金属を塑性流動化させて接合する方法<sup>3)</sup>である。このとき、接合された試験片を継手と呼ぶ。

本研究では、本学が所有する摩擦攪拌接合機 (日立設備エンジニアリング株式会社 SHH204-720) を使用した。実際に使用したツールや接合条件については後述する。

## 3. 既存ツールを用いた継手効率と接合条件の関係

### 3.1 実験条件および評価方法

まず、既存の接合用ツール (2 種類) を用い、ECAP 材の材料特性と接合条件の違いが継手特性にどのような影響を与えるのか調査した。具体的にはショルダ径の寸法をパラメータとして接合への影響を調査した。ツールの各部名称を図 2 に示す。使用したツールの寸法等は、ツール①はショルダ径が 9mm、プローブ長が 3.0mm、プローブ径と形状が M4 (ネジあり)、ツール②はショルダ径 15mm、プローブ長 2.9mm、プローブ径と形状 M4 (ネジあり) であった。

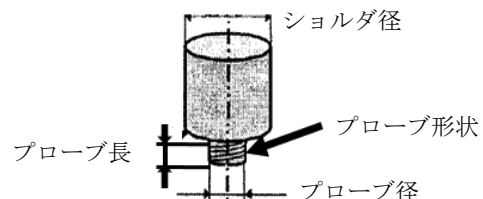


図 2 FSW 用ツール形状の各部名称

接合条件は、ツール回転数が 1000rpm, 押込み量が 0.15mm, 保持時間を 3s として固定し、接合速度を 300, 500, 1000mm/min の 3 条件で行った。製作した継手に対し、引張試験、硬さ試験、組織観察を行い、特性評価を行った。

### 3・2 結果と考察

#### 3・2・1 接合後継手の引張試験

接合部が平行部となる様に、評点間距離を 15mm とした板形状の試験片を切り出し、引張試験を行った。条件ごとの応力-ひずみ線図を図 3 に示す。

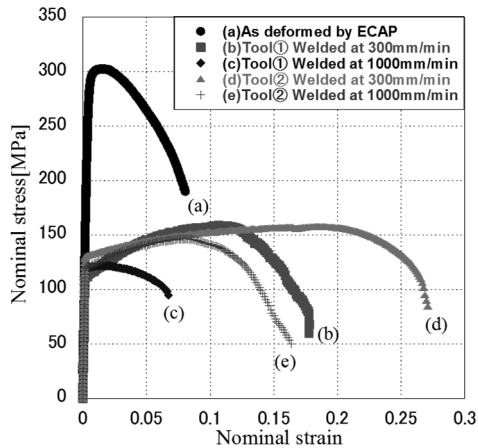


図 3 ECAP3Pass 後の母材および FSW で接合した継手の公称応力-公称ひずみ線図

ツール②において接合速度 300mm/min で接合した継手が最も強く、引張強さが 159MPa で継手効率が 52%となった。(b)と(d)で比較すると伸びが大きく異なることが分かる。これはショルダ径の違いにより軟化領域の範囲が変化したと考えられる。また、(b)と(c)、(d)と(e)で比較すると、接合距離当りの回転数が減少したことで、欠陥が発生しやすくなったことでより早期に破断したと考えられる。

#### 3・2・2 ビッカース硬さ試験

厚さ方向において中央、幅方向において接合部中心から左右に 10mm の範囲でビッカース硬さを測定した。条件ごとのビッカース硬さの分布を図 4 に示す。

全体を通して U 字形に軟化の度合いが変化しており、中心つまり攪拌部が最も軟化している。また、ショルダ径の

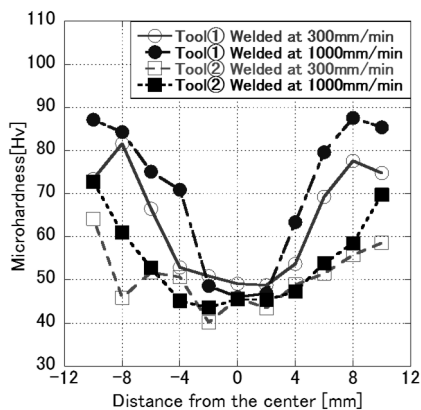


図 4 各継手の板厚中央・接合部中央からの硬度分布

小さい方が、軟化領域が小さいことが分かる。また引張試験と同様に、入熱量が最も少ないツール①で接合速度 300mm/min の結果が、最小硬さが大きい値となった。

一般に FSW の接合部は攪拌によるひずみの導入により硬化すると云われている<sup>3)</sup>が、その傾向は、ECAP 材を用いた継手においては確認できなかった。

#### 3・2・3 組織観察

接合部近傍を光学顕微鏡で組織観察した。図 5 にそれぞれのツールにおける接合速度 1000mm/min の時の接合箇所全体の写真を示す。逆八の字形に明るく見える、ツールで強く攪拌された攪拌部と、その外側に暗く見える攪拌と熱の影響を受けている熱加工影響部がある。(a)と(b)でこれを比較するとショルダの大きい(b)の方が、攪拌部がより大きい事が分かる。また、(a)を見ると矢印で示した攪拌部の下部に、欠陥が発生している事が分かる。引張試験ではこの欠陥から破断が進展していった為に大きく伸びが低下したと考えられる。

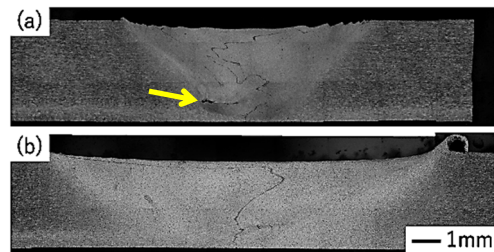


図 5 接合速度 1000mm/min で接合した継手断面の光学顕微鏡写真、(a)ツール①使用、(b)ツール②使用

### 3・3 接合条件と継手効率の関係

この接合条件では、母材に比べ引張強さとビッカース硬さが大きく低下していた。これは、加工による入熱の影響が大きいためと考えられる。ショルダの大きさにより入熱量が変化し、軟化領域もそれに伴って変化する。接合速度を速めると入熱量を減らすことができるが、今回の条件では引張強さは変化せず欠陥が発生する事となった。

軟化していることから、この条件において入熱は充分以上であり、攪拌に伴う材料流動は充分であったはずである。

以上の結果より、少ない入熱量においても欠陥が発生しにくい形状を持つツールを設計することとなった。具体的には、ショルダ径を小さく、プローブ径を小さくする事で入熱を減少させ、プローブ長を接合する板厚に合わせて伸ばす、と云う方針でツール形状の設計を行った。

## 4. 接合時の入熱における軟化挙動

### 4・1 実験(その1) および結果と考察

前述の結果より入熱量の低減および接合状態の健全化を目的に、ショルダ径が 9mm, プローブ径が M4, プローブ長が 4.3mm となる形状のツールを製作し接合実験を行った。接合条件は、ツール回転数 2000rpm, 保持時間 3s, 押し込み量 0.15mm とし、入熱量を最も変化させやすい因子

である接合速度を 400-850mm/min の間で変化させた。接合後、継手を切断して接合部の状態を確認した。

入熱量の減少と接合部の健全化を目標としたが、攪拌部下に欠陥が発生した。これから引張強さを測定し継手効率を求めた。測定時には欠陥を除去し、実際に接合された部分における強度を求めた。だが、欠陥除去した状態においても攪拌部の硬度低下が起きていることが原因で継手効率は 59% に留まった。攪拌部下に欠陥が生じた写真を図 6 に、欠陥除去した状態の継手効率の一例を図 7 に示す。

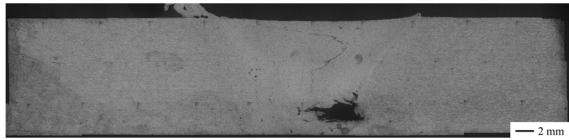


図 6 接合速度 400mm/min で接合した継手断面の光学顕微鏡写真

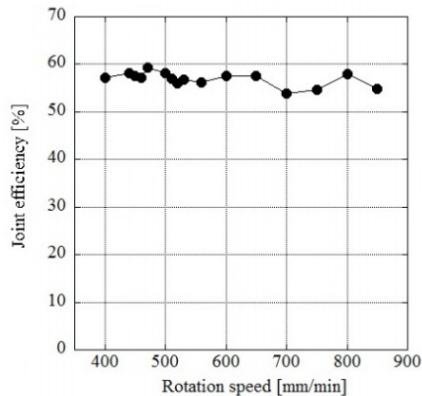


図 7 接合速度を変化させた継手における継手効率

欠陥が発生する原因について検討を行った。FSW における欠陥には異常欠陥と呼ばれるものがある。これはツール回転速度が速いため接合部下部では塑性流動が活発に生じ、一方接合部上部では比較的緩やかであり、結果的に塑性流動の差から欠肉として欠陥が生じると考えられている<sup>5)</sup>。これまでの実験結果から攪拌部の硬度が ECAP 3 Pass 後の硬度ではなく供試材である A6063-T5 の硬度よりも低下していることから、攪拌部にはかなりの入熱があると思われる。そこで欠陥発生の原因を、入熱過多に伴う攪拌の不安定状態であると予想した。この予想が正しければ、攪拌部の結晶粒径が母材よりも粗大化する事になる。そこで、同じツールを用いて接合条件を変えて入熱を減らした検証実験を行った。

#### 4・2 実験(その 2) および結果と考察

上述の考えを基に、接合条件は前報の条件よりツール回転速度を遅くして FSW を行った。接合条件はツール回転数を 2000rpm より下げて 1600 および 1200rpm とし、保持時間 3s、押し込み量 0.15mm は変えず、接合速度は 400mm/min 一定とした。接合後、FSW 後の攪拌部に対して、組織観察を行い欠陥の有無を確認した。また、これまで行った接合条件からいくつか選んだ攪拌部の組織写真を用いて母材

部と攪拌部の平均結晶粒径を求積法より算出し、その比較を行った。

接合の結果、今までと同様に攪拌部下に欠陥が生じた。更に 800rpm まで回転速度を下げて接合を試みたが、今度は接合不良となってしまった。

母材部と攪拌部の平均結晶粒径を表 1 に示す。これより母材部に比べ攪拌部周辺の平均結晶粒径は大きくなっていることが分かる。以上から接合部下部の欠陥と接合部の大幅な硬度低下といった 2 つの軟化挙動が生じたことから接合部は入熱過多になっていたことが分かった。

表 1 各ツール回転数で接合した継手における母材および接合部の平均結晶粒径

ツール回転数 [rpm]	接合速度 [mm/min]	母材部 粒径 [μm]	接合部 粒径 [μm]
2000	400	3.4	7.0
1600		3.6	7.4
1200		3.4	7.3

軟化を抑えるために入熱量を下げなければならないが、ツールの回転を下げると接合不良が生じる。そこで攪拌量だけを減少させる事を目的に、プローブ形状としてネジのないツールで接合を試みた。

## 5. プローブ形状による入熱の影響

### 5・1 実験方法および評価方法

新たにシールド径 9mm、プローブ長 4.3 mm、プローブ径 4mm のネジなしツールを製作し、ツール回転数 1200、1600rpm、接合速度 400mm/min、押し込み量 0.15mm、保持時間 3sec で FSW を行った。

FSW 後の接合部に対して、接合部の断面観察を行った。また、接合部のビッカース硬さと結晶粒径の測定を行って接合部の組織変化を調べ、ネジ有無による影響を調査した。

### 5・2 実験結果と考察

図 8 にツール回転数 1600rpm でネジありとネジなしの場合それぞれの条件で FSW を行った接合部断面のマクロ組織写真を示す。図 8 に示すようにツール回転数 1600rpm において接合部下部に小さな欠陥が発生したが、ネジありツール使用時よりも大幅に欠陥が抑制できていることが

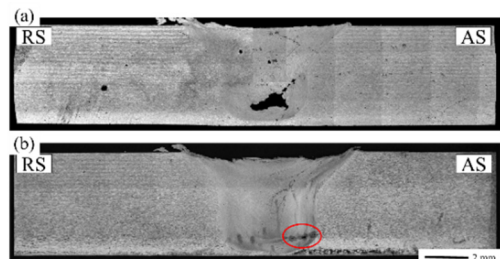


図 8 ツール回転数 1600rpm で接合した継手断面の光学顕微鏡写真、(a)ネジあり、(b)ネジなしの場合



分かる (図 8(b)の赤丸部). これより, ネジなしツールによって材料の流動と入熱を減らせたといえる.

図 9 に接合部付近のビッカース硬さの分布状況をカラーマップで示す. この図より, ネジなしツールの方が硬度を維持できている範囲が広いことが分かる. しかし, 接合部はネジあり, ネジなし共に母材より硬度が大きく低下していることが分かる.

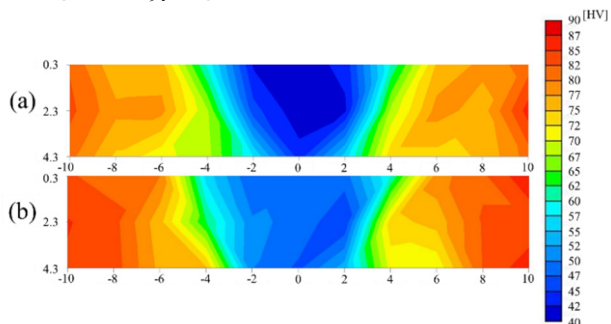


図 9 図 8 に対応した硬度分状態, (a)ネジあり, (b)ネジなしの場合

また接合部付近の試験片表面に熱電対を数カ所貼り付けて温度測定を行い, FSW 中の温度の推定を行った. 結果として, ネジありツールでは約 220~280°C, ネジなしツールは約 200~250°Cと予想され, ネジなしツールではネジありより温度上昇を抑えられたことも確認できた.

SEM-EBSD により IPF マップを取得し結晶粒径を測定した. 図 10 に母材, ネジありとネジなしツール使用時の接合部における IPF マップと平均結晶粒径を示す.

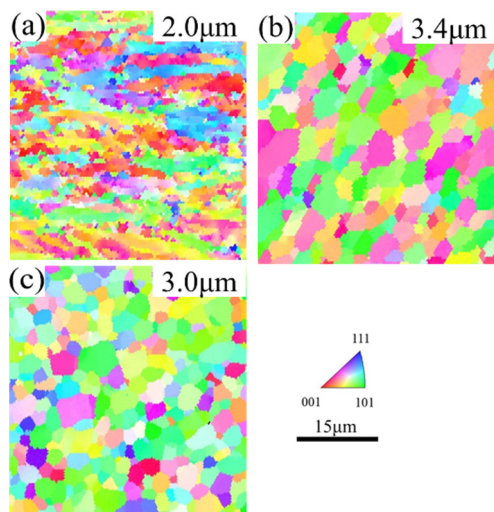


図 10 SEM-EBSD による IPF マップ表示を利用した結晶組織と測定した平均結晶粒径, (a)母材部, (b)ネジありツールを使用した接合部, (c)ネジなしツールを使用した接合部

これよりネジなしツール使用時の接合部の結晶粒径はネジありツール使用時とほぼ同等の大きさとなり, 母材より結晶粒径が粗大化したことが分かる. よって今回の実験でも接合部の結晶粒の粗大化を抑制することができな

った.

以上のことから, ECAP 材同士の FSW では接合時の入熱を減らし, 材料への熱の影響をいかに抑えるのかが非常に重要であることが判明した. 一方で FSW により接合させるために最低限の材料攪拌は必要である. これらの状況を鑑みると, 攪拌部の硬度低下は起こるものと考え, 攪拌部周辺の軟化幅を限りなく狭くした状態を最適な接合状態とみなし, ショルダレスやショルダ径, プロブ径を限界まで小さくして接合部およびその周辺の熱影響を受ける領域が狭くなるような形状のツールによる接合が望ましいと考えられる.

ただし, プロブを細くすれば FSW 中にツール自体が破損する可能性もあり, ツールの設計は十二分な強度計算による裏付けを要するなど, 容易ではない事が予想される.

## 6. 結論

ECAP 加工を施した A6063-T5 材を FSW により接合し, 継手効率 70%以上を目指したが, FSW に伴う入熱により, 軟化現象が発生し, 今回調査した範囲では継手効率は 59%が上限であった. 継手効率を上昇させるためには, 接合領域を限りなく微小化する必要があることが分かった. 引き続き, 健全な接合と入熱を減少させる工具形状・接合条件の調査が必要であろう.

## 謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団 2016 年度一般研究開発助成 (交付番号: AF-2016040) により実施された. 研究遂行に対して助成して頂いた事に深く感謝申し上げる.

## 参考文献

- 1) 例えば 堀田善治・古川稔・Terence G. Landon・根本 實: “新しい組織制御法としての Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)”, までりあ, Vol. 37, No. 9 (1998), 767.
- 2) K. Aoki, T. Koezawa: “Characteristics of friction welding within a short time for aluminum alloy deformed by ECAE process”, Procedia Engineering (International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017), Vol. 207, 597.
- 3) 時松光: FSW(摩擦攪拌接合)の基礎と応用, (2005), 日刊工業新聞社.
- 4) 笹部誠二: “最近のアルミニウム接合技術の動向と当社の取り組み”, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS/Vol. 58, No3, (Dec. 2008), 89.
- 5) Y. G. Kim・H. Fujii・T. Tsumura・T. Komazaki・K. Nakata: “Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy”, Materials Science and Engineering A 415, (2006), 250.