



K. Aoki

超微細アルミニウム合金板材を用いた 摩擦攪拌接合による高継手効率継手の開発

青木 孝史朗 *

1. まえがき

現代社会を支えている様々な乗物においては時代と共に軽量化の試みが続いている。軽量化により燃費改善や消費電力減少等、多くのメリットが期待されるのは周知のとおりである。この実現の1つの手段として構造用素材を高強度化することが挙げられ、部材の減量に貢献する様々な手法が試みられている。

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)¹⁾ による超微細組織材の生成・活用が挙げられる。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、ホール・ペッチ則に従って強度を向上させる方法である。しかし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²⁾。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試みることを着想した。素材が板材であることから板材に適した摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding)³⁾ を採用した。

本研究では ECAP したアルミニウム合金板の FSW おける最適な条件を調査・検討することを目的とする。数値目標としては通常アルミニウム合金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%⁴⁾ ということから、この研究における接合でも同様に 70% 以上の値を目標とした。

2. 6000 系アルミニウム合金に対する試み

2.1 使用素材と実験装置

まず、本研究室にて巨大ひずみ加工を長年行ってきた 6000 系アルミニウムを素材として研究を開始した。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。ECAP 加工の条件は、室温で、曲がり角度が 90° (1 回当りの相当ひずみが約 1)、ラムスピード 0.32mm/s で、ルート A (各 pass 間で材料の向きを変えない加工法) で繰り返して 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。

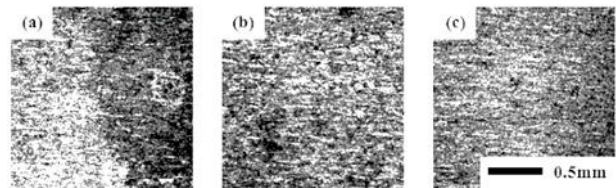


図1 ECAP 加工を 3Pass 施した A6063-T5 板材の断面における組織写真 (a) 板材左側, (b) 中央部, (c) 板材右側

ECAP 加工後、フライス盤による機械加工により、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、FSW 用の素材を作製した。FSW 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³⁾ である。このとき、接合された試験片を継手と呼ぶ。

この素材に対しては、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。

2.2 既存ツールを用いた継手効率と接合条件の関係

2.2.1 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。具体的にはシオ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はシオルダ径が 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はシオルダ径 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。

* 芝浦工業大学 工学部・機械機能工学科 教授

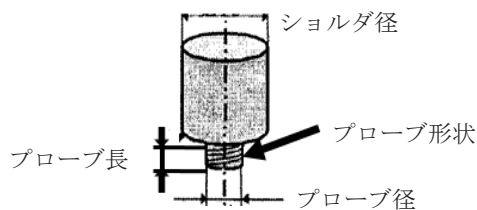


図2 FSW用ツール形状の各部名称

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。

2.2.2 結果と考察

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。

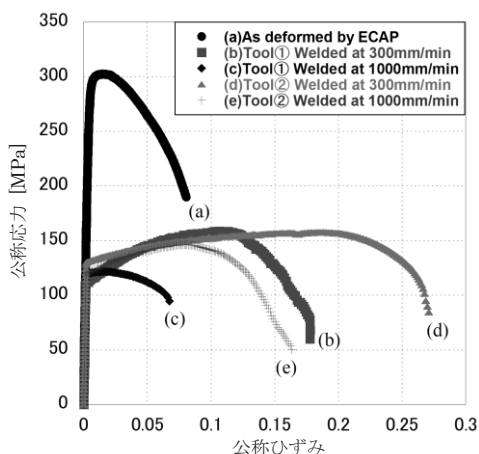


図3 ECAP3Pass後の母材およびFSWで接合した継手の公称応力-公称ひずみ線図

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。

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³⁾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。

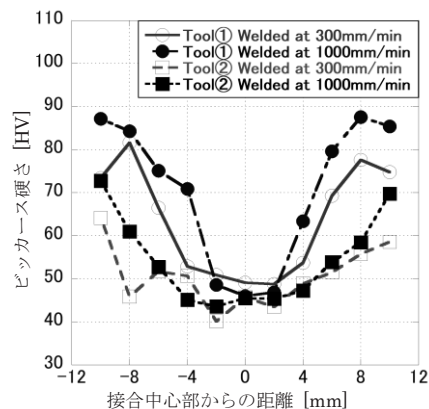


図4 各継手の板厚中央・接合部中央からの硬度分布

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。図5(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。

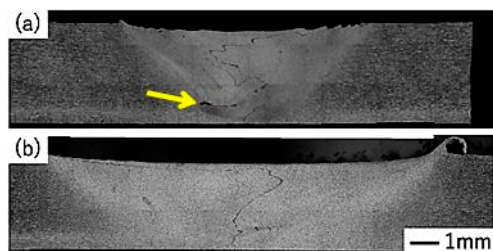


図5 接合速度 1000mm/min で接合した継手断面の光学顕微鏡写真、(a)ツール①使用、(b)ツール②使用

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、という方針でツール形状の設計を行った。

2.3 接合時の入熱における軟化挙動

2.3.1 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。

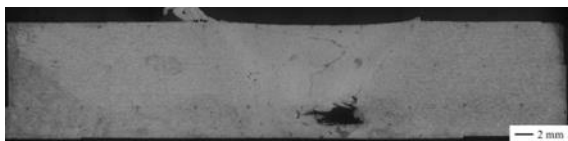


図6 接合速度400mm/minで接合した継手断面の光学顕微鏡写真

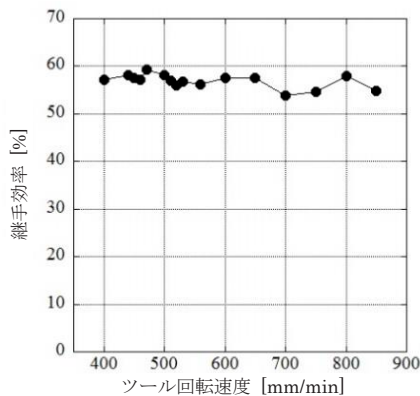


図7 接合速度を変化させた継手における継手効率

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⁵⁾。これまでの実験結果から攪拌部の硬度がECAP3Pass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判断できる。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。

2.3.2 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に欠陥が生じた。更に800rpmまで回転速度を下げ接合を試みたが、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。

2.4 プローブ形状による入熱の影響

次にショルダ径9mm・プローブ長4.3mm・プローブ径4mmのネジなしツールを作製し、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。

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。

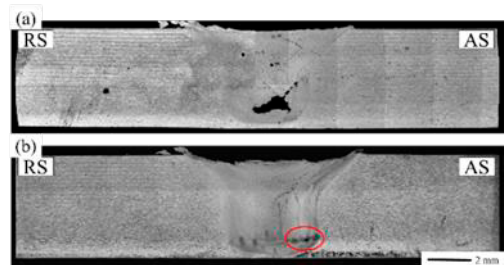


図8 ツール回転数1600rpmで接合した継手断面の光学顕微鏡写真、(a)ネジあり、(b)ネジなしの場合

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。

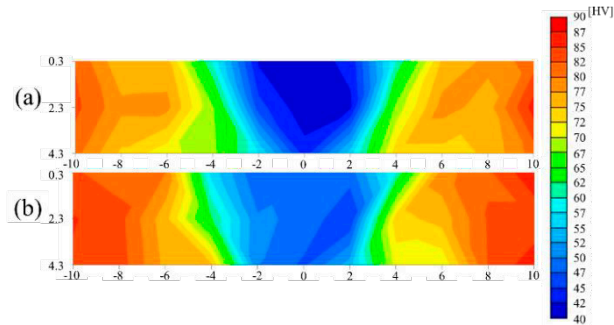


図9 図8に対応した硬度分状態, (a)ネジあり, (b)ネジなしの場合

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℃、ネジなしツールは約200~250℃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。

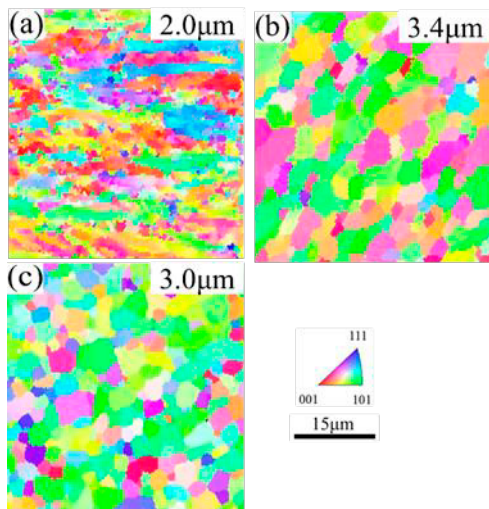


図10 SEM-EBSDによるIPFマップ表示を利用した結晶組織と測定した平均結晶粒径, (a)母材部, (b)ネジありツールを使用した接合部, (c)ネジなしツールを使用した接合部

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かった。

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。また接合時の入熱によってECAP加工前のA6063-T5の硬度よりも低下している事実を鑑みると、入熱を接合可能な下限に抑えたとしても素材における析出硬化の効果は消失し、高い継手効率を示す継手の生成は困難であると言えた。そこで析出硬化を用いない合金系の素材で試みるのが有効であると考え、6000系に変わり5000系アルミニウム合金板について、同様の試みを行うこととした。

3. 5000系アルミニウム合金に対する試み

3.1 使用素材と実験装置

供試材はA6063-T5材と同じく断面形状が30×5mmのアルミニウム合金A5052-H34材を使用した。低摩擦型せん断加工機によりECAP加工をルートAで3回行い、3pass材を製作した。引張強さは受入材で244MPa、3pass材で335MPaである。その後、機械加工により、幅b=29.2mm、長さh=60mm、厚さ5mmに整えてFSW用素材とした。大学の都合で6000系の時に利用していたFSW専用機が使えなくなったため、汎用フライス盤を改造してFSWを行った。図11に示すように接合試験片の敷板表面の接合部付近にK型熱電対を配置した。

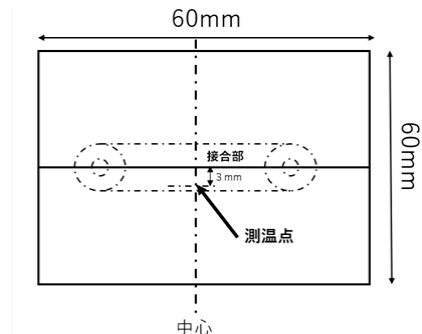


図11 ECAPしたA5052板材のFSW用試験片形状と測温用熱電対の配置

6000系の実験においてネジなしツールの方が入熱は少ないという結果が得られていたが、5000系では攪拌力が不足し接合欠陥が発生して接合できないことが分かった。そこで5000系素材に対して使用するツールは攪拌能力を増加させるため⁶⁾にネジあり(逆ネジ)とした。具体的にはショルダ径12mm・プローブ系M5・プローブ長4.3mmをAツール、ショルダ径10mm・プローブ系M4・プローブ長4.3mmをBツールとして用いた。

装置とツールが変わったため、5000系用の接合条件を6000系の実験結果と比較させるために以下の式⁷⁾を用いて入熱量の計算を行い、接合可能な入熱量の検討を行った。

$$Q[W] = 4/3 \cdot \pi^2 \mu PNR^3$$

ここで μ はツールと母材の摩擦係数、 P [Pa]はツールと母材の接触面圧、 N [rpm]はツール回転数、 R [m]はツールのショルダ径である。この式により約5400W程度で欠陥のない接合が可能であると考えられた。これからツールAで

1240rpm・300mm/min の接合条件を基準として始め、回転数・送り速度を変化させた。押込量、保持時間は6000系の時と同じくそれぞれ1.5mm、3sとした。

本式を適用する際、 μ やPについては別の実験系で取得した値や6000系素材を扱っていた時の値を用いた。故に、この実験に於ける値としては信頼性が乏しいと言わざるを得なかった。そこで本式の利用は最初の実験条件を定める目安程度に留め、入熱量は実測することとした。

具体的には、接合に用いるフライス盤の主軸用3相モーターの電源ラインに割り込む形で3相電力計を設置し、接合時の消費電力を計測する。この消費電力からフライス盤の無負荷時アイドル時の消費電力を差し引くことで、FSW時の試験片への入熱量を算出することとした。

フライス盤でのFSWでは加工中の冷却操作が継手強度に影響することが予備実験で判明した。そこで冷却操作を行わない条件をA、FSW時に圧縮空気を吹き付けて冷却する条件をBとした。

3.2 結果と考察（継手の機械的性質）

基準としたツールAで1240rpm・300mm/minの接合条件で冷却条件を変化させ、試験片温度と測定した入熱の変化を図12に示す。

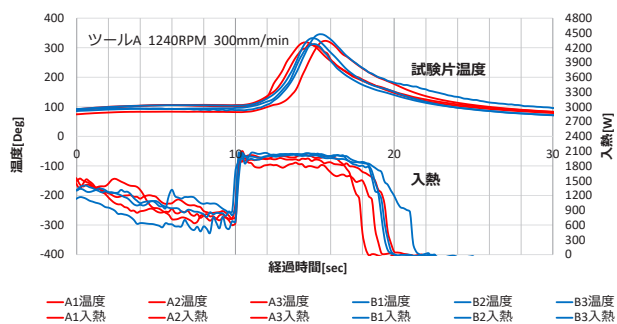


図12 基準接合条件下における試験片温度と測定入熱量（図中AとBは冷却条件、続く数字は試行回数を示す）

試験片の裏面に熱電対で計測した温度に関しては、予備実験結果とは異なり全ての条件で冷却の有無による有意な差は見受けられなかった。一方入熱量を見ると、冷却条件Aよりも条件B使用時の方がやや高くなっていった。これは冷却により試験片が冷えて強度が上がり、攪拌時の摩擦が増えた為だと考えられる。なお、継手断面を確認したところ、すべての条件において接合欠陥は見られなかった。

ツール形状・接合条件・冷却条件をそれぞれ変化させて入熱量を測定し、接合後の継手で引張試験を行い求めた継手効率の値を表2に示す。

継手効率においても冷却の有無による有意差は認められなかった。この結果より本装置においては冷却操作による抜熱量と硬化による入熱上昇はおおよそ釣り合っていると考えられた。接合条件により入熱量を下げることは可能であり、最も入熱を下げる事ができた条件は、464rpm・120mm/minであった。継手効率に注目すると、入熱量が少

表2 接合条件などを変化させた時の入熱量・継手効率

ツール	回転数 [rpm]	送り速度 [mm/min]	冷却条件	平均入熱 [W]	継手効率 [%]
A	1240	300	A	2357	62.5
A	1240	300	B	2350	64.2
A	660	300	A	1731	71.8
A	660	300	B	1808	70.8
A	460	120	A	1429	74.2
A	460	120	B	1520	73.6
B	1240	300	A	1836	69.8
B	1240	300	B	1956	70.0
B	916	300	A	1649	71.9
B	916	300	B	1831	72.4

なかったいくつかの条件において目標である70%を超える継手が得られた。なお、ツールBの916rpm・300mm/minの条件ではプローブが折れたため、916rpm未満の実験は行わなかった。

入熱量と継手効率の関係を図13に示す。今回の実験系においてはツールの種類に依らず入熱と継手効率には一定の相関が確認され、入熱の抑制に伴い継手効率が向上することが示された。また今回の実験系では入熱の下限値は1500W程度であることも分かった。

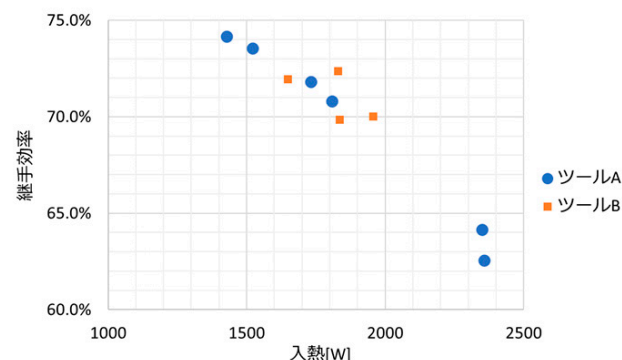


図13 入熱量と継手効率の関係

接合部断面の板厚中心位置でビッカース硬さにより硬度変化を確認したが、ツール・接合条件・冷却条件の変化が硬度の変化に顕著に現れることはなかった。傾向としては、母材(3pass材)がHV110で接合中心位置より8mm程度から硬度が下がり始め、中心位置より4mm程度でHV70まで軟化して中心部に至る、という具合である。硬度については軟化域の状態を詳細に把握するためには、図9に示す様な分布図を得たうえで比較検討する必要がある。

3.3 結果と考察2（接合後の金属組織）

SEM-EBSDによりIPFマップを取得し結晶粒径を測定した。図14に母材(3pass材)および代表的な接合部におけるIPFマップと平均結晶粒径を示す。母材の平均結晶粒径1.7 μ mに対し、全ての条件下において平均結晶粒径の増大が確認され、母材組織の維持は困難であった。しかし入熱を抑え、冷却を併用することで粒径の増大は抑えられ、大まかには継手効率の向上に寄与していると言える。ただ

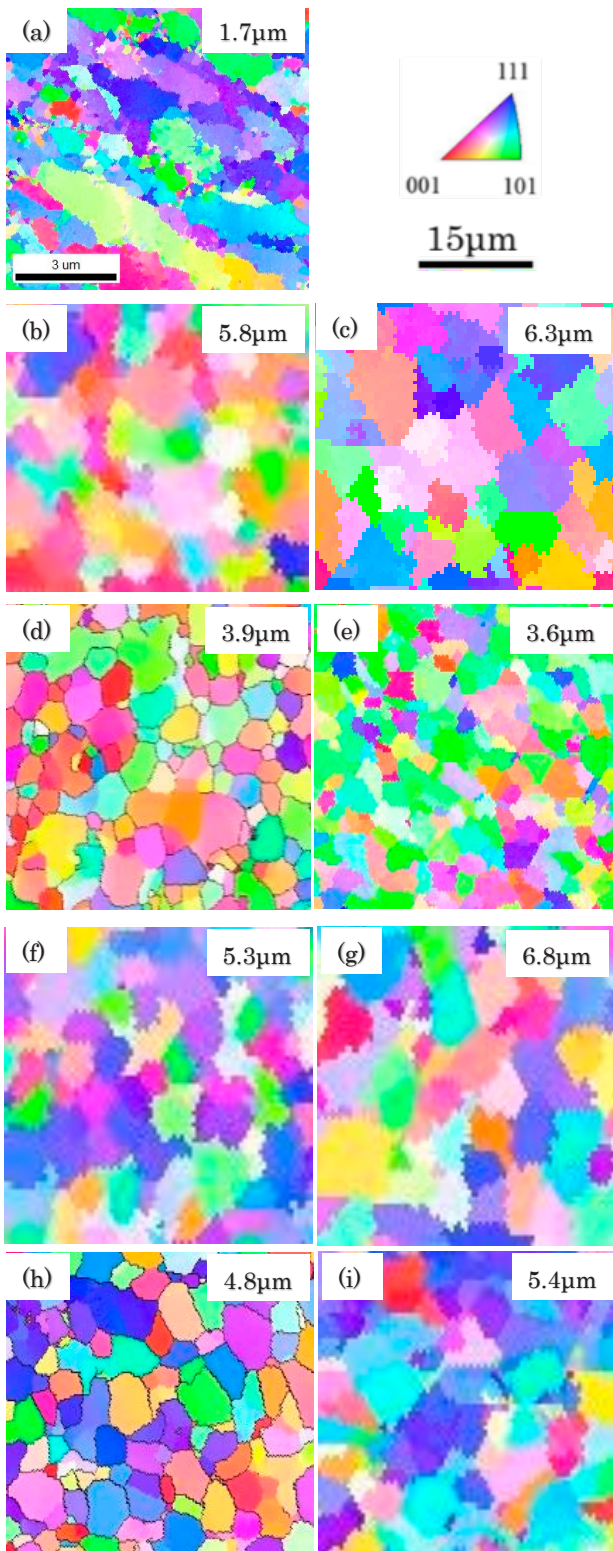


図1-4 SEM-EBSDにより得たIPFマップと平均結晶粒径, (a)母材(ECAP 3pass 材), (b)ツールA・660rpm-300mm/min・冷却条件A, (c)ツールA・660-300・冷却B, (d)ツールA・464-120・冷却A, (e)ツールA・464-120・冷却B, (f)ツールB・1240rpm-300 mm/min・冷却条件A, (g)ツールB・1240-300・冷却B, (h)ツールB・916-300・冷却A, (i)ツールB・916-300・冷却B

その対応は完全に一致することではなく、強度に及ぼす未考慮の因子が残っていると考えられる。

入熱の抑制により継手効率が向上し平均結晶粒径の増大も抑えられる、という大まかな傾向から更に小径のツールを用意すれば更に継手効率の向上も望めるかも知れない。しかしこの場合はツールが接合時の負荷に耐えられるかが問題となり十二分な強度計算による裏付けを要するであろう。

4. 結論

ECAP加工を3回施し結晶粒径を微細化したアルミニウム合金板同士のFSWを行い、高効率継手の開発を試みた。A6063-T5を用いた場合はFSWに伴う入熱により著しい軟化現象が発生し、継手効率は59%に留まり高効率継手は得られなかった。一方A5052-H34を用いた場合は、入熱量の抑制に伴い継手効率が向上し、目標である継手効率70%以上を達成する条件を見出した。最高値は74%であった。また本研究においては圧縮空気による冷却の効果は見られなかった。

謝辞

本研究の一部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ます。

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)”，まてりあ, 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.
- 6) 花井敦浩・清水彰子・津本宏樹・横山博・杉本貴紀・吉田陽子：“摩擦攪拌点接合継手の機械的特性におよぼすツール先端形状の影響” あいち産業科学技術総合センター 研究報告, (2015)
- 7) 藤井英俊：“FSW(摩擦攪拌接合)-鉄鋼材料を中心に-” 溶接学会誌, Vol.77, No.8(2008), 731.