

# 摩擦攪拌成形の開発

国士舘大学工学部機械情報工学科

教授 西原 公

(平成 13 年度研究開発助成 AF-2001012)

キーワード：鍛造，摩擦攪拌接合，摩擦攪拌成形

## 1. 研究の目的と背景

非消耗回転ツールとワークの間に発生する摩擦熱と塑性流動を利用した新しい固相接合法として Friction Stir Welding(FSW/摩擦攪拌接合)が注目されている。本接合法は英国ケンブリッジにある TWI(溶接研究所/接合・溶接・表面改質に関する受託研究機関)で発明され、1991年に特許が取得された。この FSW は特に溶接性が劣るアルミニウム合金板の接合に適していることからその研究が集中的に行われ、さらに銅、マグネシウムそして現在ではチタン、ステンレス、MMC(金属基複合材料)にまで応用の可能性が広く検討されている。またその応用分野の可能性は航空宇宙、自動車、鉄道および海洋等、多岐にわたっている。現在約 65 企業/組織が FSW 技術の使用実施権を得ており、FSW に関連した 400 以上の特許を申請している。また欧米、日本、オーストラリアの数社が商業製品の開発を行っている。

一方、著者らはこの FSW 時における優れた流動性および形状転写性に着目し、微細加工への応用を「Friction Stir Forming(FSF/摩擦攪拌成形)」として提唱し、その可能性を検討している<sup>2), 3)</sup>。本研究においては試作した FSF 装置により各種アルミニウム合金の転写性能におよぼす材質、金型形状および加工条件等の影響を実験的に調べ、さらに炭素鋼板にアルミニウム合金を機械的に接合することを試みた。

## 2. FSF の原理

FSW は非消耗回転ツールを接合部材の接合面に沿って押し付け、移動することによりキーホール溶接的に摩擦接合が行われ、健全な突合せ継手あるいは重ね継手が得られる接合法である。この FSW ツールは、一般にプローブとプローブより径の大きなショルダと呼ばれる部分が必要とされている。突合せ接合の場合プローブの長さは接合部材の板厚程度とされている。またプローブは接合面に沿って移動し、一方ショルダは接合部材の表面に密着し、軟化した材料が飛び出すのを防ぐ<sup>4)</sup>。

本研究における FSF は図 1 に示すように、FSW と同様のプローブとショルダからなる非消耗回転ツールを型に重ねたワークに沿って押し付け、移動することにより摩擦攪拌し、ワーク下面の金型に塑性流動により供試材

を流入させる成形方法である。すなわち FSW におけるワークとワークを支えるバックングプレートの上に型を挿入することにより成形が行われる。従って、型形状により供試材には型形状の転写あるいはアンカー効果による型との機械的接合が生じる。これは摩擦攪拌を利用した従来見られない新しい成形方法である。

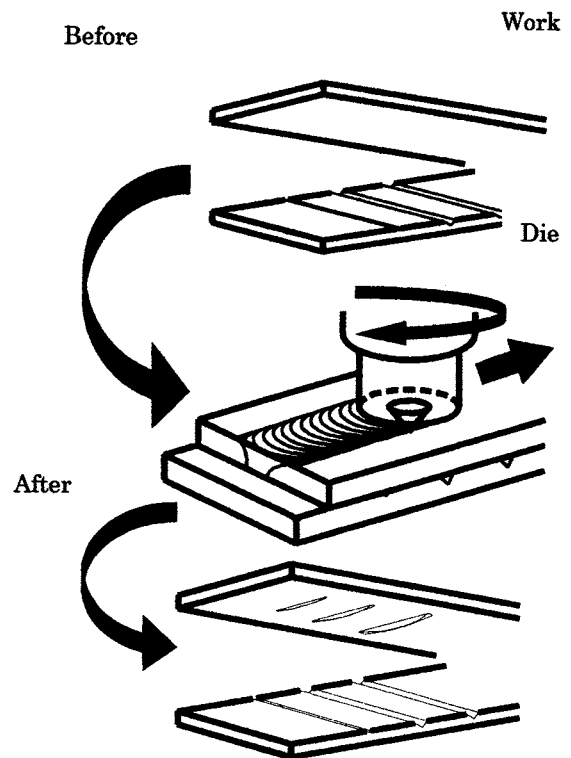


図 1 FSF の原理

## 3. 研究方法

試作した FSF 装置を図 2 に示す。装置本体は立型フライス盤を用い、金型、供試材およびこれらを固定するバックングプレート等の治具から構成されている。金型用材料には SUS304 を使用し、表面は鏡面加工またはフライスによる機械加工とし、V 型溝、半球溝およびピッカース圧痕を加工した。ここでは FSF による鍛造特性を評価するために開放型として V 型溝を、また密閉型として半球溝およびピッカース圧痕を用いた。また、FSF 時における温度を推測するため、金型表面から 1.0mm 下の

位置に直径 0.2mm の K 熱電対を埋め込んだ。FSF に際してはツールによりワークに摩擦熱を与える必要があるために、プローブとショルダ面との境界部付近の高温におけるせん断強度が重要となる。すなわちツールは高温における静的・動的な機械的性質が良好な耐摩耗性材料を用いる必要がある。そこで本研究ではツールは図 3 に示すような形状の SKD61 を調質したものを使用した。熱処理は図 4 に示すプロセスで行った。本実験ではショルダ面に  $\alpha = 5^\circ$  の角度を設け、またショルダからプローブ先端までの高さ  $H$  は供試材の厚さ 3mm よりも若干短めとし、ショルダ径  $\phi D$  は 20mm とした。このツール形状は前報<sup>9)</sup>のアルミニウム合金の FSW において安定した良好な接合面が得られたツールと同様のタイプのものである。供試材は 60×260×3mm の A6061P-T6, A2017P-T3, A2024P-T3 および A7075P-T651 アルミニウム合金板を用いた。実験に使用する金型とワークの表面は FSF を行う直前にアセトンにより脱脂した。また潤滑油は特に使用しなかった。

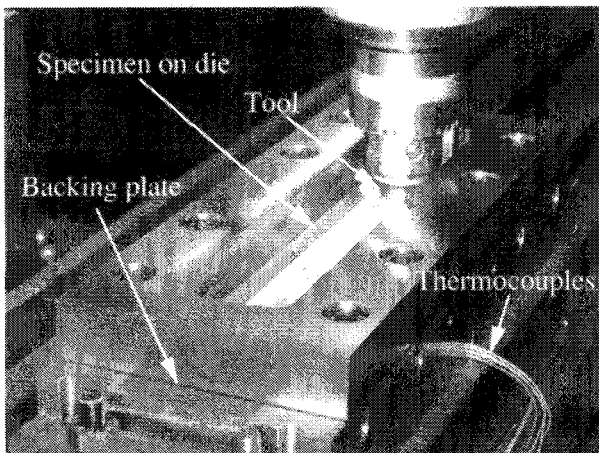


図 2 実験装置外観

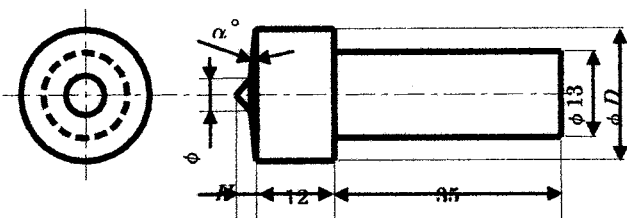


図 3 ツールの形状および寸法

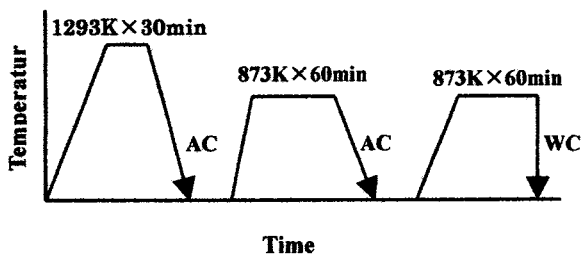


図 4 ツールの熱処理プロセス

## 4. 研究成果

### 4. 1 V型溝への充填性

45° の V 型溝 (開放型幅 30mm) を用いて FSF を行った結果を、溝の深さとプローブ直下における充填率との関係において供試材別に図 5 に示す。ツール移動方向は図 1 に示されるように V 型溝と直角の方向とした。この角度を変えると充填性が変化することを確認しているが、今後の問題としたい。ツール回転数は A6061P の場合 1320rpm とし、高力アルミニウム合金 A2017P, A2024P および A7075P においては 530rpm とした。また送り速度は 50mm/min とした。充填率の測定法は早乙女ら<sup>6)</sup>と同様な方法を用いた。図から充填率は型の深さが 0.6mm より大きくなると急激に減少する傾向にあることがわかる。また充填率は A6061P の場合がもっとも高く、A2017P, A2024P, A7075P の順に低下していくことがわかる。この結果はこれらアルミニウム合金の室温強度<sup>7)</sup>あるいは高温強度<sup>8)</sup>の特性の相違に関連しているものと思われるが詳細についてはいまのところ不明である。

図より型の深さが 0.5mm 以下では充填率が高いことか

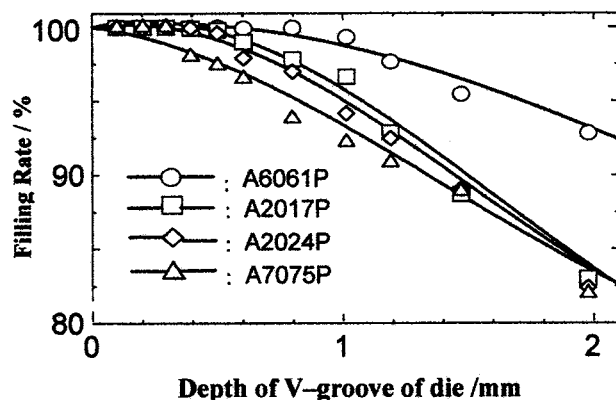


図 5 V型溝の深さと充填率の関係

ら、特に流動性の良好な A6061P の場合について微細加工面の転写の可能性を以下に示すように検討した。またこの時の A6061P の FSF 加工時における金型の温度を測定した結果、0.5mm 深さの型の場合プローブ直下で約 700K の最高温度が認められた。またこれらの結果はプローブ直下における測定結果であるが、FSF は FSW 同様に熱・機械的に対称な加工法ではない。したがって、advancing side と retreating side では充填性が異なることが予想されるが、著者らは軟化しやすい retreating side で充填性が良好となることを確認している<sup>9)</sup>。

### 4. 2 転写特性の評価

FSF により、機械的に加工した微細加工面を供試材へ転写することを試みるため、金型表面に回転数 170rpm、送り速度 100mm/min で正面フライス加工した。その機械加工面の断面曲線を図 6 に示す。フライスによる周期的な加工面が得られていることがわかる。

この金型を用い、供試材を重ね、回転数 1320rpm, 送り速度 50mm/min にて FSF を行った。供試材は as-received の状態であり、表面の加工は行っていない。供試材の転写前の断面曲線を図 7(a) に、転写後のプローブ直下におけるツールの移動方向と平行な断面曲線を図 7(b) に示す。図からわかるように供試材には金型の形状が微細な部分まできわめて良好に転写されている。また表面粗さ Ra, Rz とともに同様の値を示していることがわかる。

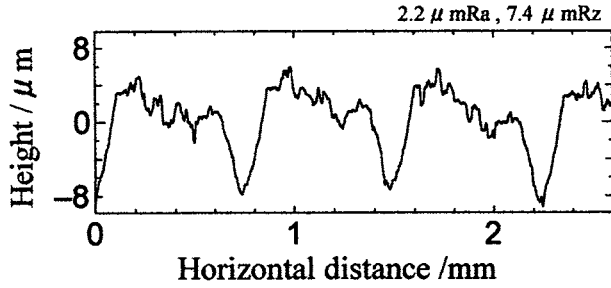


図 6 型の断面曲線

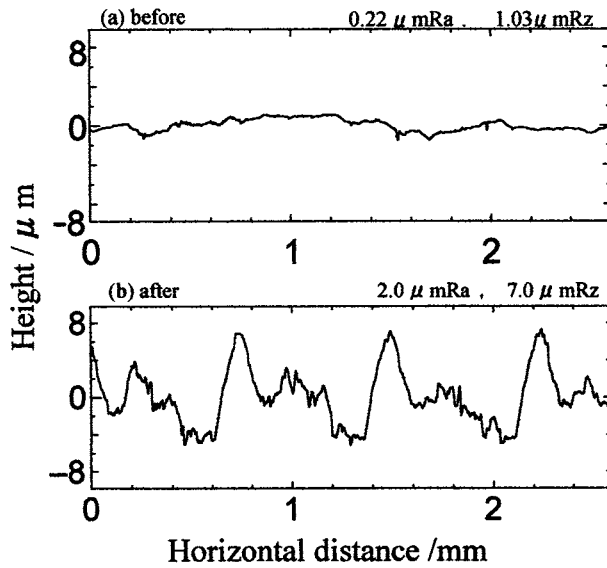


図 7 A6061P の FSF 加工前後の断面曲線

続いてさらなる微細加工面の転写を試みるために鏡面研磨した金型を用い同様に FSF を行った。ダイヤモンド 1μm にて研磨した金型の断面曲線を図 8 に示す。供試材は横フライスにより機械加工したものを、その断面曲線を図 9(a) に示す。図 6 に示された正面フライス加工の場合に比較して粗さの小さな断面曲線となっていることがわかる。また転写後のプローブ直下におけるツールの移動方向と平行な断面曲線を図 9(b) に示す。フライス加工による周期的な凹凸はなくなり、鏡面の転写までには至っていないが、表面粗さの値もかなり小さくなっていることがわかる。

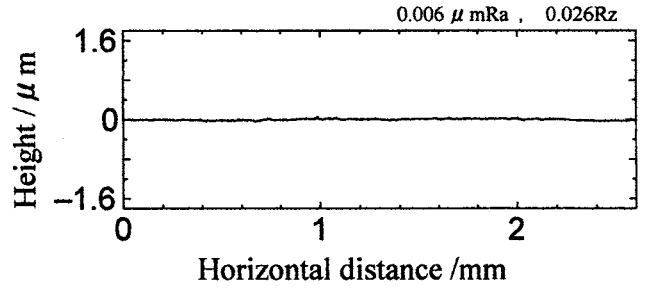


図 8 型の断面曲線

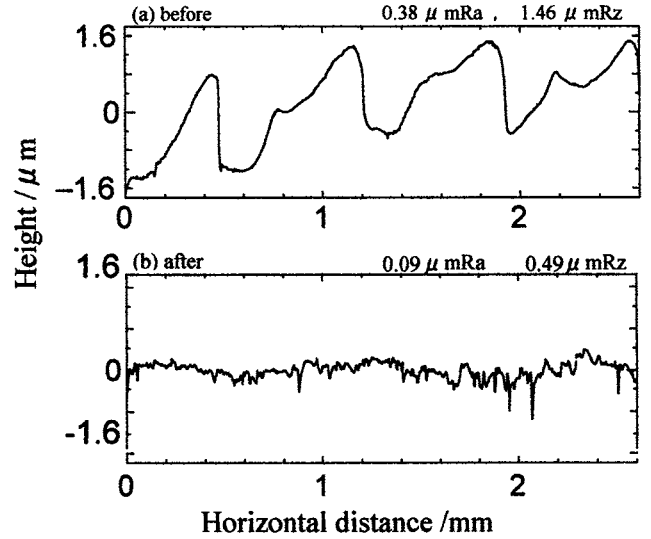


図 9 A6061P の FSF 加工前後の断面曲線

これらの FSF による転写において、加工後にワークと型が圧着されて離型できない場合が見られた。本実験においては潤滑油あるいは離型剤は用いていないが、今後検討の必要があると考えられる。さらにツール形状および加工条件等を改良することにより鏡面転写の可能性が十分に存在すると考えられるが今後の問題としたい。

#### 4. 3 FSF による密閉型鍛造の試み

上述のように FSF は開放型鍛造においてきわめて微細な加工あるいは転写が可能であることが確認された。すなわちフライス加工面から鏡面にいたる比較的微細な機械加工面を転写できることが示された。ここでは FSF による微細な密閉型鍛造の可能性を検討するために A6061P を用いて、ボールエンドミル加工による半球面およびビッカース圧痕を型とした FSF を試みた。半球面はφ0.4mm~3mm のものを用いた。FSF の一例をそれぞれ図 10(a), 10(b) に示す。ツール移動方向はプローブが半球溝あるいはビッカース圧痕の中心を通過するように行った。半球溝による FSF では最小径φ0.4mm のままでほぼ型どおりの鍛造が行われた。しかしながら、一部変形あるいは欠損している部分が観察されることがあった。これは離型時に生じたものと考えられる。ビッカース圧痕を型として用いた場合は圧痕の対角線がはっ

きりと確認され、比較的良好な鍛造が行われたことがわかる。またマイクロビッカース圧痕を型としたFSFを試みたが、一部亀裂が生じたり、不完全な鍛造となった。これらは鏡面転写の場合と同様に、ツール形状および加工条件等を改良することによりさらに微細な金型によるマイクロ鍛造も可能となろう。

#### 4.4 FSFの機械的接合への応用

近年アルミニウム合金や薄鋼板の接合に塑性変形を利用した接合法が多く開発されている<sup>10)</sup>。しかしながらFSFの原理で示したように、型の形状をアンカー効果を有するようなものにすればFSFによっても機械的接合の可能性が生じる。FSFによる機械的接合の一例として、A6061P/S45Cクラッド材を図11に示す。またこの場合のクラッド率は約11%である。溝を設けたS45CにA6061Pを重ね、FSFすることにより機械的接合が行われた。S45C側の溝にアルミニウム合金が塑性流動により流れ込み、機械的に接合されていることがわかる。この結果よりアンカー効果による良好な継手性能が得られることが期待される。したがって溶接困難な異種材のクラッドや機械的接合がFSFにより可能となろう。凹形の溝を有する鋼板に凸形の突起部を有するワークを重ね、押し込んで塑性変形を利用し、かしのめ的に機械的接合をおこなうアンカーボンド法が知られている<sup>11)</sup>が、FSFによる接合ではワークにあらかじめ突起を設ける必要はない。

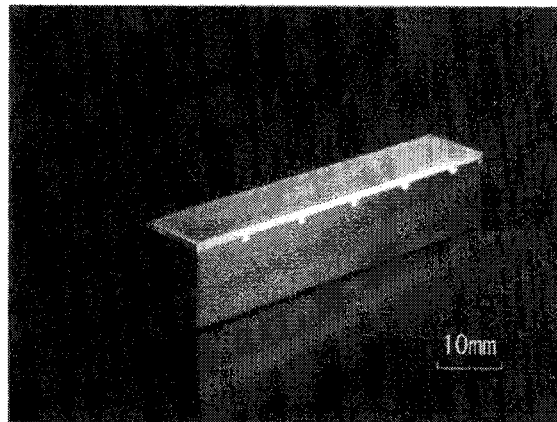
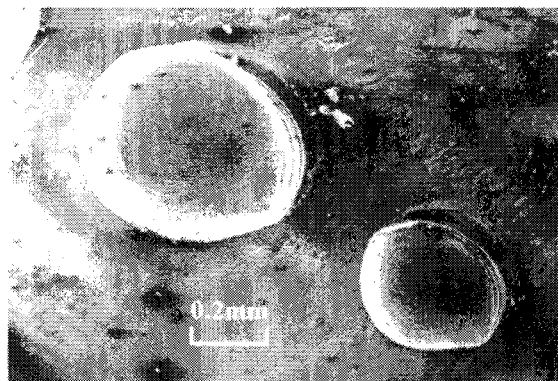


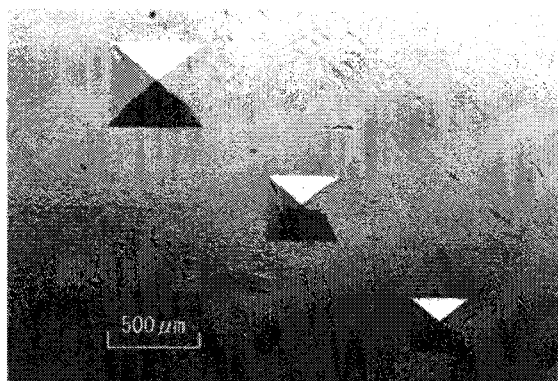
図11 A6061PでクラッドされたS45C

#### 4.5 FSFによる機械的接合継手の強度評価

継手は図12に示すような形状に加工したS45C材を用い、A6061Pを重ね、FSFを行うことにより試作した。S45C側はドリルにより穴をあけた後、穴の側面を削り、図のように凹形にすることにより、一度流れ込んだ供試材が元に戻らないような構造すなわちアンカー効果を生じるような構造とした。本実験において $d$ は1.2mm、 $h$ は0.2~0.4mmとし、溝の数 $n$ は1~5とした。またツール回転数は1335rpm、送り速度は50mm/minとした。さらに接合された継手の強度を評価するに図13に示すような方法により、引張せん断試験およびはく離試験を行った。引張せん断試験の場合は、S45C側にA6061Pと厚さの同じ鋼板を取り付け、試験を行った。



(a) 半球形



(b) ピラミッド

図10 FSFによる微細な密閉型鍛造例 (aは2次電子像, bは反射電子像)

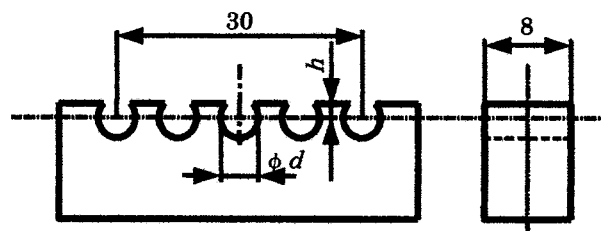
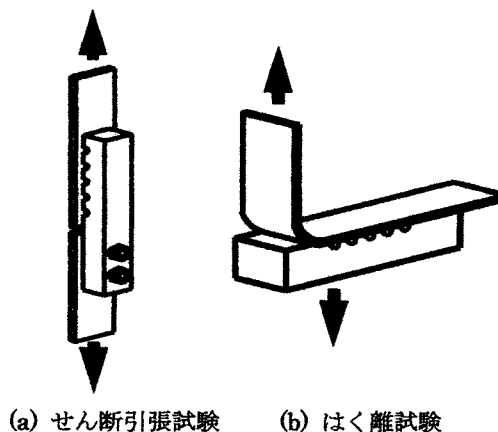


図12 溝の形状および寸法



(a) せん断引張試験 (b) はく離試験

図13 接合継手の強度評価方法

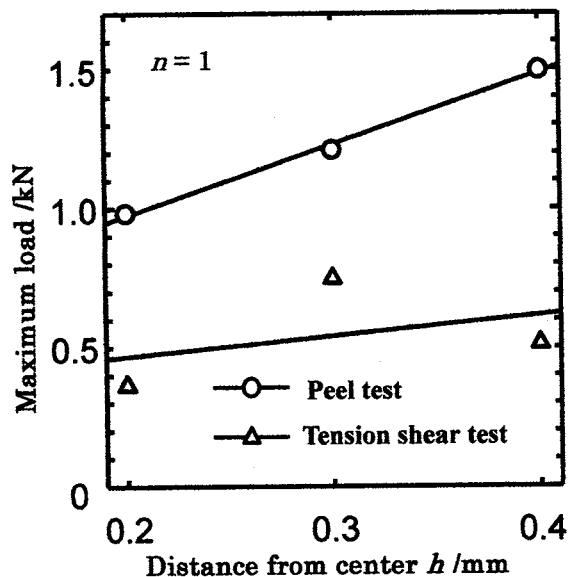


図 14 はく離試験および引張せん断試験の結果と中心までの距離

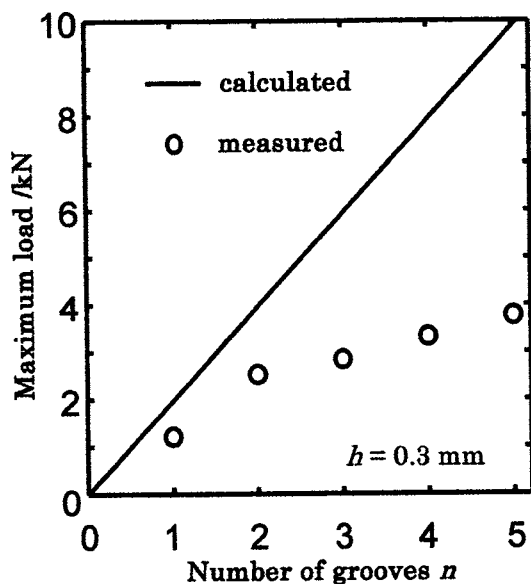


図 15 引張せん断試験の結果を溝の数との関係

溝の数が 1 の場合のはく離試験および引張せん断試験の結果を、図における表面からドリル穴の中心までの距離  $h$  と最大荷重の関係において図 14 に示す。 $h$  が 0.2mm の場合、最大荷重が低下しているが、この場合はアルミニウム合金の一部が溝から抜けることが確認された。 $h$  が大きくなると、はく離試験においては最大荷重が大きくなる傾向にあるが、さらに大きくなるとせん断を受けるアルミニウム合金側の面積が小さくなり、強度が低下することが予測される。そこで  $h = 0.3 \text{ mm}$  で一定とし、溝の数を変えて接合継手を試作した。この場合の引張せん断試験の結果を溝の数との関係において図 15 に示す。溝の数が増加すると最大荷重も上昇する傾向にあることがわかる。溝の数が多いとアルミニウム合金の突起部以外の母材から破断する場合があることが認められた。また図からわかるように、最大荷重の実験値はアルミニウム合金のせん断強度から計算した計算値よ

り低下している。これは加工による軟化および応力集中を考慮していないことに起因していると考えられる。ここで最大荷重の計算値は実験より求めた母材のせん断強度に引張せん断試験後のせん断破壊部の面積をかけることにより推定した。また接合時に溝以外の部分での圧着が生じ、極端に最大荷重が増加する場合があることが観察された。溝以外の機械加工面を設けることにより、圧着を利用して継手強度を増加する方法も考えられるが今後の研究としたい。

## 5. 結言

試作した Friction Stir Forming(摩擦攪拌成形)装置により各種アルミニウム合金の微細成形性におよぼす材質、金型形状および加工条件等の影響を実験的に調べ、以下の結果を得た。

- (1) FSF による V 型溝への充填率は A7075P, A2024P, A2017P, A6061P の順に増加した。
- (2) A6061P の FSF による転写特性は良好である。
- (3) FSF による A6061P/S45C クラッド材を試作し、その継手強度を評価した。これにより従来溶接困難な異種材のクラッドや機械的接合が FSF により可能となることが示された。

なお、本研究の一部は平成 13 年度天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成(AF-2001012)により行われたことを記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Kallee, S. W., Nicholas, E. D. and Thomas, W. M.: 'Industrialisation of friction stir welding for aerospace structures', Structures and Technologies-Challenges for Future Launchers, Third European Conference, Strasbourg, France, 11-14 December 2001.
- 2) 井上祐史・西原 公: 機講論, No. 00-36 (2000), 37-38.
- 3) 西原 公: 特開 2002-256453
- 4) 篠田 剛: 溶接学会誌, 67-4 (1998), 326-329.
- 5) 名倉 良・井上祐史・西原 公: 平 12 塑加春講論, (2000), 457-458.
- 6) 早乙女康典・秦 誠一・坂口幸二: 塑性と加工, 41-468 (2000), 49-53.
- 7) 小林俊郎編著: アルミニウム合金の強度, (2001), 37, 内田老鶴園.
- 8) Properties and selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, Vol. 2 Metals Handbook, 9th ed., (1979), 63, American Society for Metals.
- 9) 伊藤彰浩・西原 公: 機講論, No. 01-26 (2000), 75-76.
- 10) 春日幸生: 塑性と加工, 41-471 (2000), 319-325.
- 11) 古賀信次: 溶接学会誌, 69-3 (2000), 201-205.