



K. Nisufuhara

摩擦攪拌成形とその応用

西原 公*

1. はじめに

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 115 企業/組織が FSW 技術の使用実施権を得ており¹⁾、FSW に関連した 1200 以上の特許を申請している²⁾。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³⁻⁵⁾。ここでは FSF による各種アルミニウム合金の転写性能および機械的接合への応用について説明する。

2. 摩擦攪拌成形の原理

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。

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 FSF におけるワークとワークを支えるバックングプレートとの間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。これら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。

3. 摩擦攪拌成形の加工例

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、半球溝およびビ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ビ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

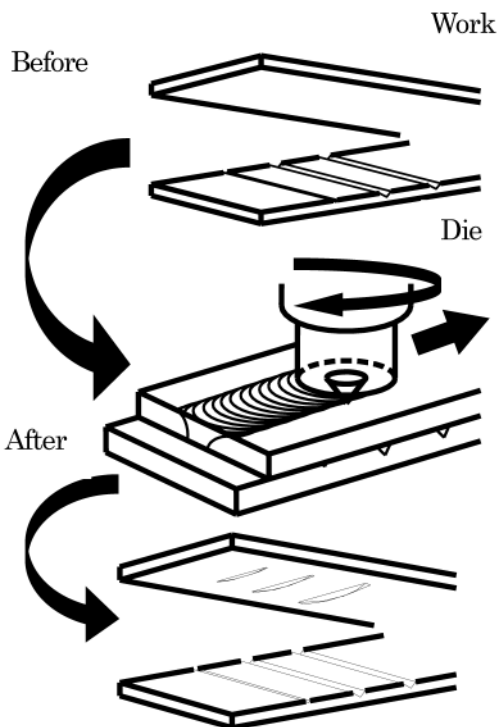


図 1 FSF の原理

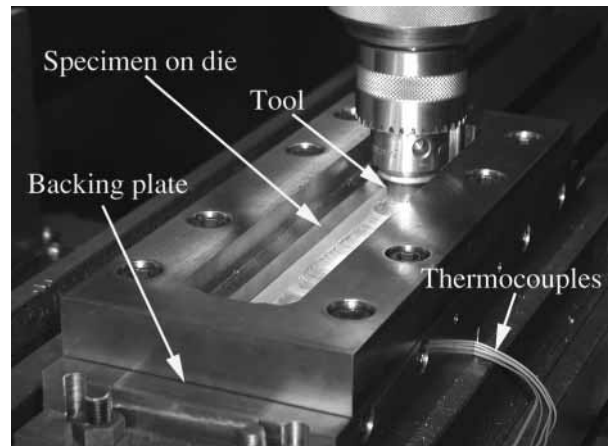


図 2 実験装置外観

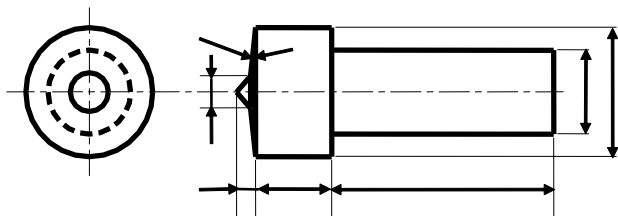


図3 ツールの形状および寸法

形状のSKD61を調質したものを使用した。本実験ではショルダー面に $\alpha = 5^\circ$ 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、ショルダー径 ϕD は20mmとした。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。

FSF加工のいくつかの例を以下に示す。

まず、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4に示す。ツール回転数はA6061Pの場合1320rpm、高力アルミニウム合金A2017P, A2024PおよびA7075Pの場合には530rpmで、送り速度は50mm/minである。早乙女ら⁶⁾と同様な方法で測定した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。

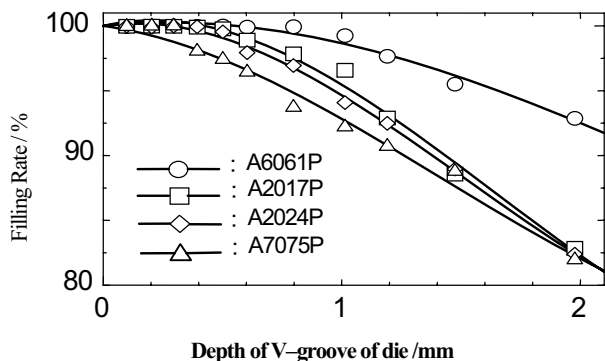


図4 V型溝の深さと充填率の関係

この結果はこれらアルミニウム合金の室温強度⁷⁾あるいは高温強度⁸⁾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。

A6061PのFSF加工時における金型の温度を測定した結果、充填率が高い0.5mm深さの型の場合プローブ直下で最高到達温度は約700Kであった。FSFはFSW同様に熱・機械的に対称な加工法ではなく、軟化しやすい後退側で充填性が良好となる⁹⁾。

次に、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加工面の断面に転写した結果を示す。金型の表面形状は図5に示すとおりで、フライスによる周期的な加工面が得られている。

この金型を用い、回転数1320rpm、送り速度50mm/minにてFSFを行った供試材の断面曲線は図6(b)のように変化する。

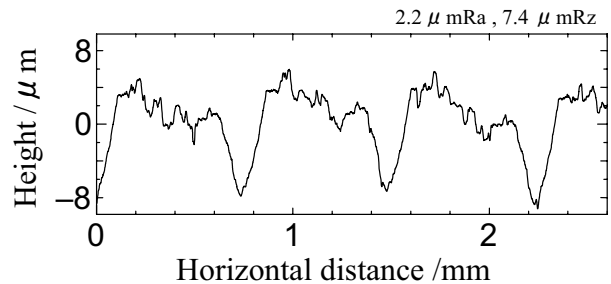


図5 型の断面曲線

転写前の断面曲線は図6(a)に示すとおりで、このように、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ことがわかる。図7に示すように、ダイヤモンド1μmにて研磨した金型を用いてFSFを行った場合にも、図8(a)に示す断面曲線をもった供試材の断面曲線は、図8(b)のように変化する。鏡面の転写までには至っていないが、フライス加工による周期的な凹凸はなくなり、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9(a), 9(b)は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てFSFを試みた結果である。また、マイクロビッカース圧痕を型とした場合には、一部亀裂が生じたり、不完全な鍛造となった。しかし、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。

この他にも、図10に示すように、Thomasは同様の方法に

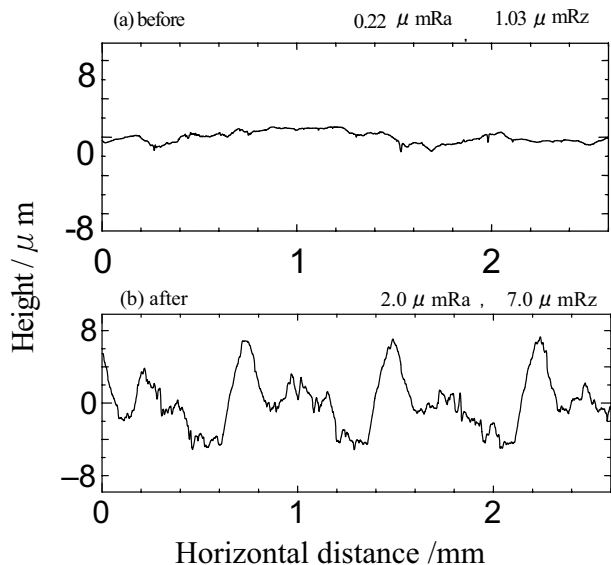


図6 A6061PのFSF加工前後の断面曲線

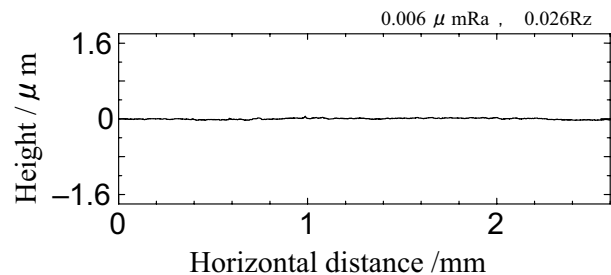


図7 型の断面曲線

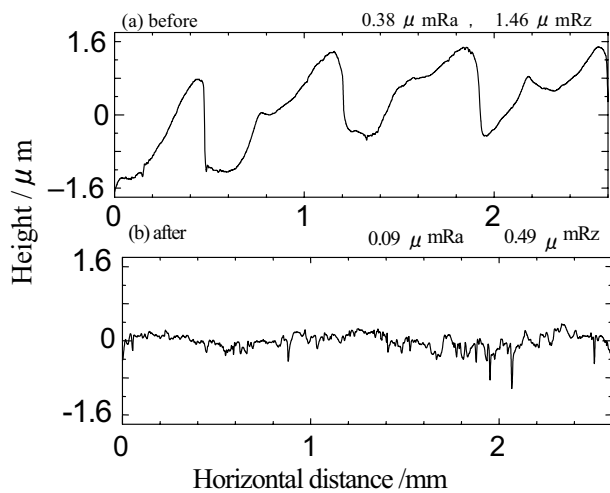
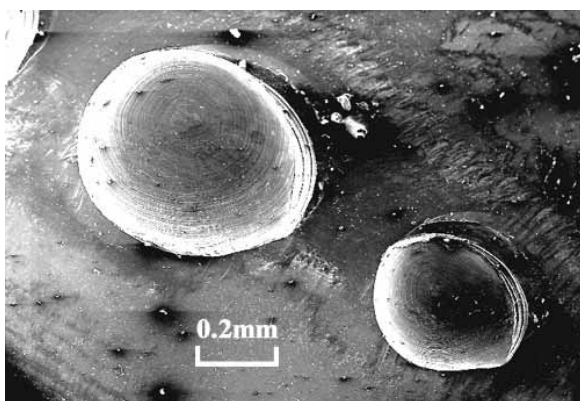
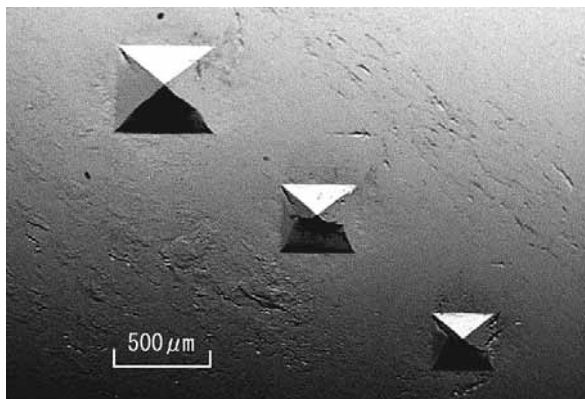


図 8 A6061P の FSF 加工前後の断面曲線



(a) 半球形



(b) ピラミッド

図 9 FSF による微細な密閉型鍛造例

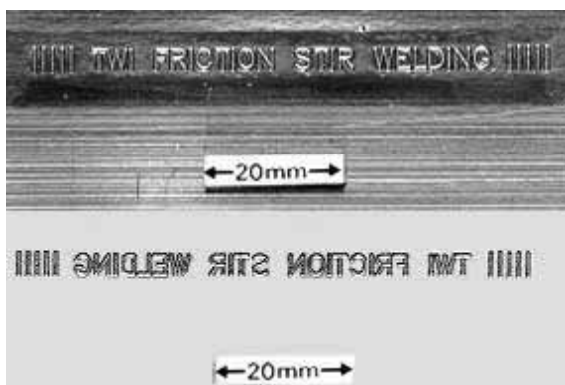


図 10 FSF によるエンボス加工¹⁰⁾

より、FSW 中にエンボス加工が可能なことを示している¹⁰⁾。

4. 摩擦攪拌成形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¹¹⁾。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ものにするれば FSF によっても機械的接合が可能である。その一例として、A6061P/S45C クラッド材を図 11 に示す。

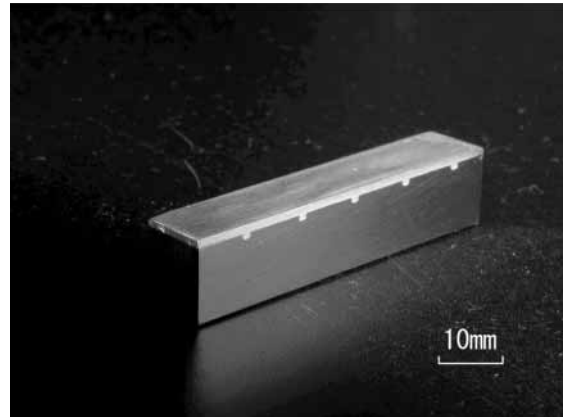


図 11 A6061P でクラッドされた S45C

またこの場合のクラッド率は約 11% である。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。したがって、この方法を用いて溶接困難な異種材のクラッドや機械的接合が FSF により可能となる。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¹²⁾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。

また、図 12 に示すように、Kallee らも同様な手法で、軟鋼のあり溝に FSF プロセスによりアルミニウムを流入させ、機械的接合を試みている¹³⁾。



図 12 FSF プロセスによる機械的接合¹³⁾

5. おわりに

以上 Friction Stir Forming (FSF/摩擦攪拌成形) とその応用について簡単に紹介したが、本加工技術は FSF の研究においてたまたまスピノフ効果的に得られたものである。FSF のマイクロ鍛造、機械的接合等、微細成形加工への応用も今後実用化に向けて重要となろう。また最近注目され

ているFSP(Friction Stir Processing)とも密接に関連していると思われる。今後さらにFSWプロセスに関連した多くの技術が発展することを願ってやまない。

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) 特許庁：平成16年度特許出願技術動向調査報告書「非鉄金属の溶接」,(2005), 151.
- 2) <http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/binary/FSWpatents.xls>
- 3) 井上祐史・西原 公：第8回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集,(2000),37-38.
- 4) 西原 公：特開2002-256453
- 5) 西原 公・井上祐史・宮田和明：塑性と加工, 45-519(2004), 46-50.
- 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, 内田老鶴圃.
- 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：第8回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集,(2000), 75-76.
- 10) W. M. Thomas: INALCO' 98, 7th International Conference Joints in Aluminium, Cambridge, UK, 16th April 1998.
- 11) 春日幸生：塑性と加工, 41-471 (2000), 319-325.
- 12) 古賀信次：溶接学会誌, 69-3 (2000), 201-205.
- 13) S. W. Kallee, E. D. Nicholas and W. M. Thomas: INALCO 2001, 8th International Conference on Joints in Aluminium, Munich, Germany, 28-30 March 2001.