

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630334

研究課題名(和文) 手動で駆動可能なハンドFSW技術の開発と集合組織の制御手法の確立

研究課題名(英文) Development of Manually Operated FSW Method and Establishment of Controlling Method of Texture

研究代表者

藤井 英俊 (Fujii, Hidetoshi)

大阪大学・接合科学研究所・教授

研究者番号：00247230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：手動で制御可能なFSW装置を設計・試作し、「ハンドFSW技術」を確立した。対象を3mm厚までのAl合金およびMg合金とし、Mg合金に対しては、加工に伴う<0001>方向への配向性(集合組織の形成)の問題を解決する手法を確立した。これらの目的を達成するために、荷重・トルク相殺ダブルツール設計を行った。

通常数百kgf以上必要なツール押し付け力、接合方向並びにそれらに垂直な方向への力のいずれもが10kgf以内と収めることに成功した。これに加えて、予熱システムを用いて更に必要な力を低減させるとともに、作業者が接合方向を意図的に決定できる仕組みを構築した。

研究成果の概要(英文)：Much attention has been paid to FSW as a practical useful joining process that provides superior characteristics compared with conventional fusion welding. However, the FSW equipment must have a high stiffness due to the applied load and the tool torque, which increases the size of the equipment. Therefore, it is difficult to use the FSW technique on-site for repairs and/or hand-operated welding. In this study, the relationship between the FSW parameters and the process loads was investigated for the FSW with a counterbalanced tool and preheating to evaluate the possible miniaturization of the equipment. The results revealed that the counterbalanced tool concept with preheating was effective for the miniaturization of the equipment because it reduced the applied load and the tool torque during the FSW. Welding The welding direction force F_x and transverse direction force F_y can be reduced below 70 N and 50 N, respectively.

研究分野：接合科学

キーワード：接合 ものづくり 組織制御 配向性制御 補修

1. 研究開始当初の背景

FSW (摩擦攪拌接合) は、高速で回転する $\Phi 10\sim 20$ 程度の円柱状のツールを被接合材に押し当てることにより摩擦熱を生じさせ、その熱によって接合する方法である。接合材が固相の状態での接合が可能であり、得られる継手の機械的特性が従来のものと比較して大幅に向上することから、多くの研究者によって積極的に研究が進められている。しかしながら、本手法では、回転するツールを用いて固相状態の材料をいわば強制的に攪拌するため、高い装置剛性や大きな荷重が必要となっている。したがって、装置の大型化が避けられず、各辺が 3m を超える装置が一般的となっており、「FSW は、大型の装置を用いた自動化された手法である」という認識が定着していた。本研究代表者らも、これまで 40ton の最大荷重を与えられる日本最大の装置を開発し、20mm 厚板の鉄鋼材料の接合に成功するなど、大型構造物や難接合材の接合を念頭に研究開発を進めてきた。一方で、極めて高い継手特性を得られる FSW 装置が、アーク溶接装置のように自由に持ち運びでき、屋外で使用することが可能であれば、その適用範囲は極めて大きいものとなり、産業構造そのものにも影響を及ぼす可能性がある。

2. 研究の目的

手動で (人力で) 制御可能な FSW (摩擦攪拌接合) 装置を設計・試作し、従来の常識を覆す、装置が運搬可能な「ハンド FSW 技術」を確立する。対象を 3mm 厚までの Al 合金および Mg 合金とし、Mg 合金に対しては、加工に伴う $\langle 0001 \rangle$ 方向への配向性 (集合組織の形成) の問題を解決する手法を確立する。これらの目的を達成するために、荷重・トルク相殺ダブルツール、凹凸ダブルツールの設計を行い、装置を試作する。装置の大きさは概ね $300\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 以内とし、通常数百 kgf 以上必要なツール押し付け力、接合方向並びにそれらに垂直な方向への力のいずれもが 10kgf 以内にと収まる仕様とする。これに加えて、予熱システムを用いて更に必要な力を低減させるとともに、作業者が接合方向を意図的に決定できる仕組みを構築する。

3. 研究の方法

3.1 装置構成

図 1 に既存の FSW 装置及び本研究で試作した小型 FSW 装置の外観写真を示す。ペットボトルで比較するとその大きさの差異が明瞭であるが、試作した FSW 装置のサイズ (外形寸法: 幅 280mm × 奥行 440mm × 高さ 570mm) は既存の FSW 装置に比べて劇的に小さくなっている。小型 FSW 装置は、スピンドルを有する接合ヘッドと電動試料台から構成される。装置の上方には、上部ツールを回転させるモータと下部ツールを回転させるモータが並列に設置されており、タイミングベルトで同軸にしている (ツールの詳細は後述)。また、

電動試料台には被接合材を移動させる送りモータが取り付けられており、回転するツールを固定して被接合材を移動させることで接合が達成される。なお、最大ツール回転数及び最大接合速度はそれぞれ 1200rpm 及び 300min/mm である。

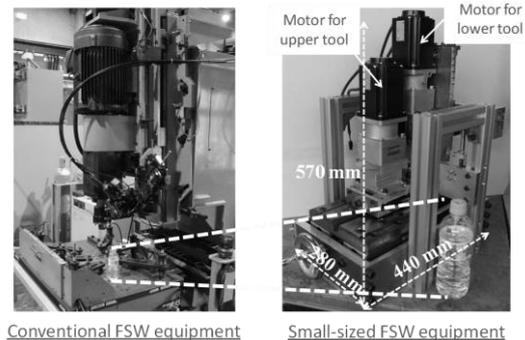


図 1 小型摩擦攪拌接合装置

3.2 上下別駆動ボビンツール

FSW 装置を小型化するために、上下のツール内部で垂直方向のプロセス荷重が相殺されるボビンツールのコンセプトを用いた。これにより、装置本体に要求される剛性を大幅に低減することができる。本研究で用いた上下別駆動ボビンツールの模式図を図 2 に示す。上下別駆動ボビンツールは、通常のボビンツールを上部ツール (ショルダ) と、下部ツール (ショルダ+プローブ) に分けた構造となっており、このような分割構造の採用によって、上部と下部のツールをそれぞれ別々のモータで駆動し、回転数と回転方向を独立して制御することが可能である。なお、ツールの材質は SKD61 で、上下ショルダの直径は共に 10 mm、プローブ径は 4 mm とした。上下ショルダ間のギャップは、板厚より小さくなるようにセッティングした。被接合材の板厚が 2mm の場合、ギャップは 1.8mm 程度とし、接合中は装置の剛性によって当該ギャップを保持することで、ショルダから材料に FSW に必要な圧力が印加される。

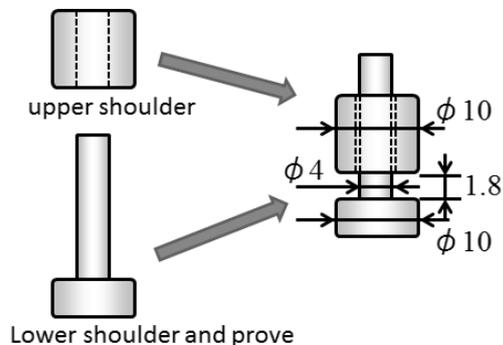


図 2 上下別駆動ボビンツール

4. 研究成果

被接合材を固定する治具の下部に 5 つのロードセルを取り付け、FSW 中に発生する接合

方向の力 F_x と、接合線と直交方向の力 F_y を測定した。ロードセルの配置を図 3 に示す。接合方向の力 F_x をロードセル X (定格荷重: 5000 N)、接合線と直交方向の力 F_y の分力をロードセル Y1 から Y4 (定格荷重: 300 N) で測定した。ロードセルに与えられたひずみはロードセルアンプで電気信号に変換し、取得した電気信号は PC に記録した。

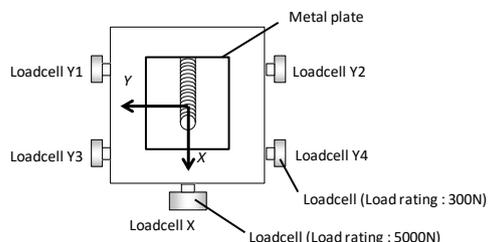


図 3 ロードセルの配置

上下のツール回転方向を共に CW とし (同方向)、回転速度を 600 rpm 及び 1000 rpm、移動速度を 50~300 mm/min とした場合の F_x を図 4 に示す。 F_x はツールの回転速度が大きく、移動速度が小さい条件で小さな値を示しており、1000 rpm、50 mm/min では約 70 N となっている。FSW ではツールの回転速度が大きく、移動速度が小さい条件で入熱量が多くなることから、得られた傾向は妥当なものである。また、1000 rpm の場合と比較して入熱量が小さくなる 600 rpm の場合は移動速度の増加が F_x に及ぼす影響が大きく、移動速度の増加に伴って F_x が急激に増加している。FSW 中の被接合材の最高到達温度は回転速度に大きく依存し、ツールの回転速度を大きくすることは小型摩擦攪拌接合装置を用いて接合速度を担保するために効果的である。

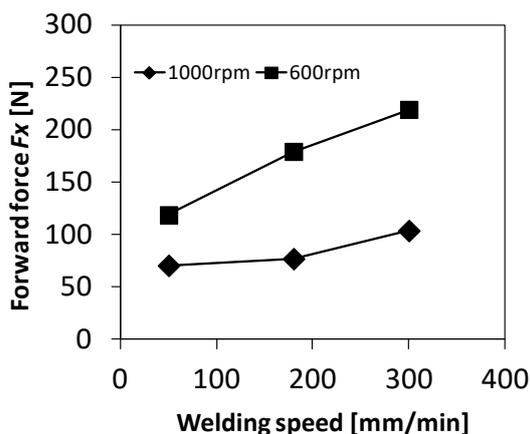


図 4 ツール移動方向に加わる力に及ぼす接合速度および回転数の影響

上下のツール回転方向が同じ場合 (CW) と異なる場合 (上側ツール CCW/下側ツール CW) において、 F_y を測定した結果を図 5 に示す。ツール回転方向が同じ場合は上下のツール

共に 700 rpm とし、ツール回転方向が異なる場合は上側ツールを 600 rpm、下側ツールを 700 rpm とした。なお、上下のツール共に 700 rpm で逆回転とした場合は捻りによるプローブの破断が顕著であったため、良好な測定値を得ることができなかった。 F_y の絶対値に着目すると、同回転の場合と比較して、逆回転の場合は概ね値が小さくなっている。これは、上下のツールによって発生する力が相殺された結果であると考えられる。ここで、同回転の場合は F_y が全て正の値を示しているのに対し、逆回転の場合は F_{y1} 及び F_{y2} は正、 F_{y3} 及び F_{y4} は負の値を示している。

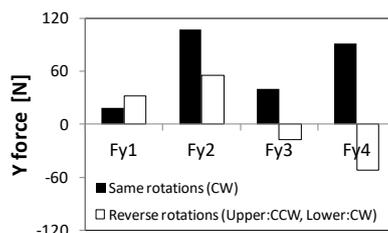


図 5 横方向の力に及ぼす回転方向の影響

これは、同回転の場合は被接合材が一方向に押されるような力が印加されているのに対し、逆回転の場合は被接合材が CCW 方向に回転するような力が印加されていることを意味している。

ボビンツールでは接合時にツール前進角を設けないため、被接合材に印加される力は、ツールの進行によって高圧領域となるツール前方の影響をより強く受けるものと考えられる。つまり、同回転の場合は上下のツールから被接合材に印加される力の方向は共に後退側 (RS: Retreating Side) となる。これに対し、逆回転の場合は上側のツールは後退側、下側のツールは上側ツールの回転方向を基準とすると前進側 (AS: Advancing Side) となる。ここで、逆回転の場合、上下のツールから印加される逆向き力が上手く相殺されれば F_y が小さくなるが、相殺されない場合は被接合材が回転するような力が残存することになる。

予熱機構を用い、予熱が FSW 中のプロセス荷重に及ぼす影響について検討した。予熱の有無におけるプロセス荷重 (F_x, F_y) を図 6 に示す。なお、FSW 条件は上下のツールを逆回転 (上側ツール CCW/下側ツール CW) とし、ツールの移動速度を 200 mm/min、回転速度を上側 600 rpm、下側 700 rpm とした。また、予熱機構の設定電流を 100 A とし、供試材裏面の最高到達温度を約 150°C とした。

予熱によるプロセス荷重の低下は顕著であり、 F_y については F_{y2} を除いて数 N となっている。加えて、 F_x も予熱によって約 30% 低減されており、 F_y 及び F_x 共に、手動によるツール位置の制御が可能な値となっている。

なお、本研究で試作した小型FSW装置を用いて得られる接合体の外観は良好であり、予熱を伴った場合でも特に変化は認められない。

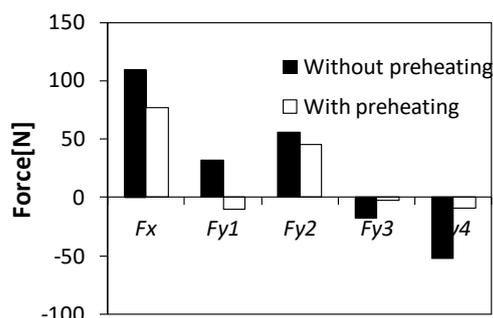


図6 各荷重に及ぼす余熱の影響

予熱を伴って得られた接合体の表面及び裏面の外観写真を図7に示す。接合の始端部にはポピンツール特有の欠陥が存在するが、それ以外はバリも少なく、攪拌部表面は滑らかな形状を有している。

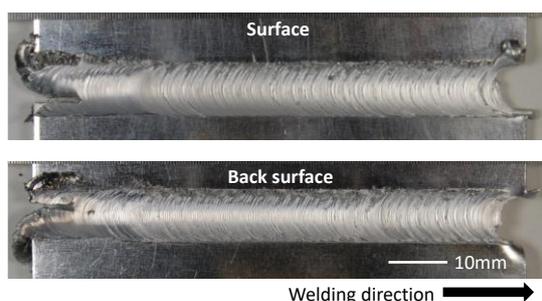


図7 継手の外観

以上のように、上下別駆動ポピンツールと予熱機構の組み合わせにより、手動によるツール位置の制御が可能となる程度にまでプロセス荷重を低減することができた (Fx: 約70 N, Fy: 50 N未滿)。いずれの方向にも10kfg以下となり、目標を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- ① Juan Chen, Rintaro Ueji and Hidetoshi Fujii, Double-sided Friction Stir Welding of Magnesium Alloy with Concave-Convex Tools for Texture Control, *Materials and Design*, 査読有, Vol.76, 2015, 181-189
DOI: 10.1016/j.matdes.2015.03.040
- ② Y.Morisada, K.Tamashiro, M.Kamai, R.Ueji and H.Fujii, Development of Small Sized Friction Stir Welding Equipment for Hand Operated Welding, *Science and Technology of Welding and*

Joining, 査読有, Vol.20, 2015, 249-253
DOI: 10.1179/136217815Y.0000000004

- ③ M.Zhou, Y.Morisada, H.Fujii and T.Ishikawa, Flame-resisitant Mg Alloy Joint Formed by Asymetry Double-sided FSW, *Proc. 10th Int. Conf. on Trends in Welding Research & 9th Int. Welding Symp. of Japan Welding Society*, 査読無, Vol.10, 2016, 278-281.
- ④ M.Takeoka, H.Fujii, Y.Morisada and Y.Sun, Fundamental Role of FSW Tool for Stir Zone Formation, *FSW, Proc. 10th Int. Conf. on Trends in Welding Research & 9th Int. Welding Symp. of Japan Welding Society*, 査読無, Vol.10, 2016, 282-285.
- ⑤ M.Zhou, Y.Morisada, H.Fujii, AZX Series Flame-registant Mg Alloy Joints Formed Using Asymetry Double-Sided FSW with Different Lower Tool Rotation Rate, *Proc. 11th Int. Symp. of Friction Stir Welding*, 査読無, Vol.11, 2016, 1-8.
- ⑥ M.Takeoka, H.Fujii, Y.Morisada and Y.Sun, Clarification of Formation Mechanism of Stir Zone Using and Adjustable Tool, *Proc. 11th Int. Symp. of Friction Stir Welding*, 査読無, Vol.11, 2016, 1-5.

〔学会発表〕(計10件)

- ① 藤井 英俊、小型摩擦攪拌接合装置、(一社) 溶接学会平成 26 年秋季全国大会、2014 年 9 月 10 日～2014 年 9 月 12 日、礪波
- ② M. Zhou, R. Ueji, H. Fujii, Manufacturing of Non-Combustive Magnesium Alloy Joints by Asymmetry Double-Sided Friction Stir Welding, 3rd Int. Conf. in Africa and Asia, *Welding and Failure Analysis of Engineering Materials (WAFSA-2015)*, 2015 年 11 月 2 日～2015 年 11 月 5 日、Luxor, Egypt
- ③ 周 夢然、上路 林太郎、藤井 英俊、非対称 DFSW による難燃性マグネシウム合金継手の作製、(一社) 溶接学会平成 27 年秋季全国大会、2015 年 9 月 2 日～2015 年 9 月 4 日、札幌
- ④ 武岡 正樹、森貞 好昭、藤井 英俊、複動式ツールを用いた摩擦攪拌接合条件の最適化、(一社) 溶接学会平成 27 年秋季全国大会、2015 年 9 月 2 日～2015 年 9 月 4 日、札幌
- ⑤ 上路 林太郎、周 夢然、藤井 英俊、石川 武、非対称両面摩擦攪拌接合されたマグネシウム合金の集合組織、*軽金属学会大 129 回秋季大会*、2015 年 11 月 21 日～2015 年 11 月 22 日、津田沼
- ⑥ 周 夢然、上路 林太郎、藤井 英俊、石川武、非対称 DFSW による難燃性マ

ネシウム合金継手の作製、(一社)溶接学会平成 27 年秋季全国大会、2015 年 9 月 2 日～2015 年 9 月 4 日、札幌

- ⑦ 周 夢然、上路 林太郎、藤井 英俊、石川武、難燃性マグネシウム合金の非対称 DFSW による難燃性マグネシウム合金継手の組織と機械的性質に及ぼすツール回転速度の影響、(一社)溶接学会平成 28 年春季全国大会、2016 年 4 月 12 日～2016 年 4 月 14 日、大阪
- ⑧ 武岡 正樹、森貞 好昭、藤井 英俊、無回転ショルダツールを用いた摩擦攪拌接合における攪拌部形成機構の解明、(一社)溶接学会平成 28 年春季全国大会、2016 年 4 月 12 日～2016 年 4 月 14 日、大阪
- ⑨ 周 夢然、上路 林太郎、藤井 英俊、石川武、非対称 DFSW 難燃性マグネシウム合金継手の組織と機械的性質に及ぼすツール回転速度の影響、(一社)溶接学会平成 28 年秋季全国大会、2016 年 9 月 14 日～2016 年 9 月 16 日、群馬
- ⑩ 周 夢然、上路 林太郎、藤井 英俊、石川武、マグネシウム合金の非対称摩擦攪拌接合に及ぼすカルシウム添加の影響、(一社)軽金属学会大 31 回秋期大会、2016 年 11 月 5 日～2016 年 11 月 6 日、水戸

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 英俊 (FUJII Hidetoshi)
大阪大学接合科学研究所・教授
研究者番号：00247230