

摩擦攪拌接合装置の開発 —ハイブリッド複動式摩擦攪拌接合装置—

大阪大学 藤井英俊*、中園一博**

摩擦攪拌接合 (FSW) は、1991年に英国溶接研究所で開発された新接合法^{1)~3)}であり、従来の溶接法と比較して、高強度の継手が得られること、変形が少ないこと、2000系や7000系のアルミニウム合金の接合も可能であることなどの種々の優れた特徴を有するため、この10年あまりの間に多くの分野で実用化されている^{4)~6)}。特に我が国における摩擦攪拌接合の技術開発は目覚ましい発展を遂げ、鉄道車両、土木構造物、船舶、自動車を中心として、次々と実用化されてきた。

この手法は図1(a)に示すように、ツール (Tool) と呼ばれる $\phi 10 \sim 20$ 程度の棒状の工具を高速で回転させながら材料と接触させ、材料との摩擦熱を利用して接合する接合法である。最高到達温度が融点に達せず、固相状態で接合するため、接合部における強度低下がこれまでの熔融溶接に比べて小さいのが特徴で、場合によっては接合部のほ

うが母材より高強度化されるという画期的な手法である。

これまで、FSWに関する種々のプロセスの開発や接合部の機械的特性、組織的变化に関する多くの研究が行われ、種々のアルミニウムの接合性が明らかにされてきた⁹⁾。また、当初は問題点とされていた事項についても解決されたものも多く、その進歩は目覚ましい。アルミニウム合金以外にも、マグネシウム合金^{10), 11)}、銅合金^{12), 13)}などはすでに実用化されており、さらに最近、鋼^{14)~21)}などの摩擦攪拌接合も可能になり、種々の産業分野から注目を浴びている。

摩擦攪拌接合法の原理と特徴

図1(b)に示すように、ツールは径の大きいショルダ (Shoulder) 部とその先端にあるプローブ (Probe) 部からなる。接合中はプローブのみが材料中に押し入れられ、接合すべき突合せ面に沿って移動させる。このとき、材料は裏当て板に拘束され、固体の状態を維持しながら、ツールによる塑性流動によって接合を行う。ツールの詳細に

* (ふじい ひでとし) : 接合科学研究所 助教授
** (なかた かずひろ) : 接合科学研究所 教授
〒567-0048 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1
TEL & FAX (06) 6879-8653

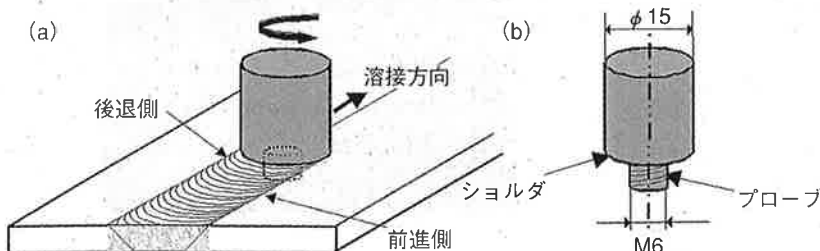


図1 摩擦攪拌接合と回転ツール (5 mm厚板用の一例)

関しては、専門書を参考にさせていただきたい⁹⁾。

接合部の断面組織は図2のようになる。接合部中央には、攪拌部と言われる数 μm の等軸晶からなる再結晶組織が存在する。攪拌部の外側には、塑性変形により結晶粒が伸びた形状を持つ熱加工影響部 (Thermo-Mechanically Affected Zone、TMAZ)、その外側には、塑性変形は受けていないが、熱の影響を受けた熱影響部 (Heat Affected Zone、HAZ) が存在する。図3は純アルミニウムおよび純鉄 (IF 鋼) の攪拌部の透過型電子顕微鏡像である。このように攪拌部では、いずれの材料においても非常に微細な再結晶粒が生成されるため、非常に高強度な継手が得られる。

FSW の特徴をまとめると以下のようになる。

- (1) 固相接合である。したがって、接合部における結晶粒の粗大化が抑制され、強度低下が小さい。また、回転ツールによる攪拌効果のため、結晶粒を微細化することも可能で、母材より強度が向上する場合もある。
- (2) 変形が小さい。アーク溶接 (ミグ) の数分の1以下である。
- (3) これまで接合が困難であった2000系や7000系のアルミニウム合金、あるいは鋳造材や複合材料の接合も可能である。
- (4) 異種材料の接合に適している。
- (5) 開先加工や接合時の前処理が不要である。
- (6) 接合中にヒューム、スパッタ、紫外線などの発生がない。
- (7) 気孔、割れなどが発生しにくい。
- (8) アルミニウム合金の接合の場合には、シールドガスが不要である。



図2 断面組織の模式図

- (9) 原則、フィラーが不要である。
- (10) 接合部から合金成分の蒸発がほとんどない。
- (11) 熟練技術が不要である。
- (12) (現在のところ) 溶接免許が不要である。

一方、以下のような問題点がある。

- (1) 剛性のある拘束治具が必要である。
- (2) ギャップの許容範囲が狭く、接合部の目違い、ギャップの制御が必要である。
- (3) すみ肉継手などの複雑形状の部材の接合が困難である。
- (4) 接合終端部に穴が残る。
- (5) 裏面にキッシングボンドといわれる接合不良が生成しやすい。
- (6) 低融点金属に限られる。

(6) に関しては、鋼のFSW^{14)~21)}に代表されるように、最近、高融点の金属のFSWがさかんに行われており、解決の方向にある。そこで本稿では、上記の問題点(1)、(4)、(5)について一気に解決できる新手法、複動式摩擦攪拌接合装置について紹介する。

複動式摩擦攪拌接合とその利点

図4に示すように、プローブとショルダを別駆動させる複動式FSWは、FSWの複数の欠点を同時に解決する方法として注目されている²²⁾。P

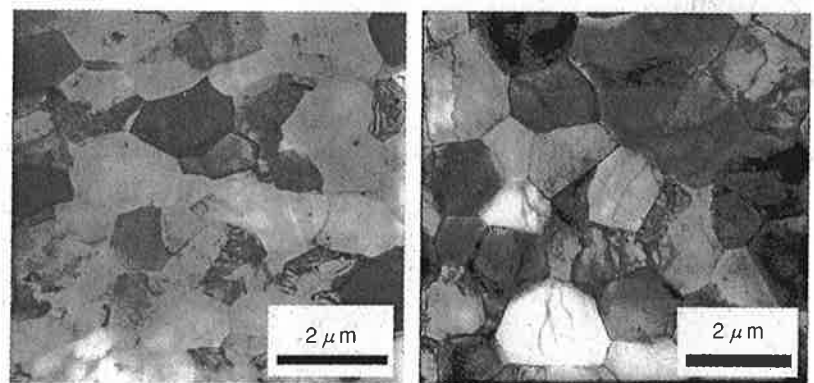


図3 純アルミニウム(a)と極低炭素鋼 (IF 鋼) (b)の攪拌部の再結晶組織

400rpm、1000mm/min
(a) 99.5%Al

400rpm、400mm/min
(b) IF steel

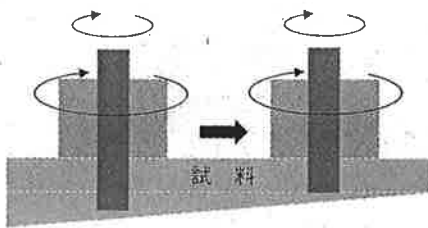


図4 異なる厚さの試料に対応可能な複動式ツール

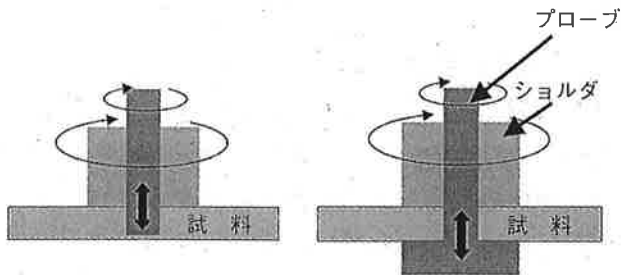


図5 複動式ツールに試料裏面からショルダ部をつけた場合

プローブとショルダが独立して動くこの手法では、プローブ長さを変化させることが可能であり、接合終了時にプローブを早めに引き抜くことにより、終端の穴をなくすることができる。また、板厚に応じて、プローブ長を変化させることにより、板厚の異なる材料を接合できる。さらに、図5に示すように、この構造に対して、プローブ先端に材料裏面から支持する部材を取り付け、材料の両面からショルダで挟みこむ、いわゆるボビンツールを適用することで、キッシングボンドをなくすとともに、ツール荷重をツールの内部応力で打ち消すことが可能になる²³⁾。この構造を採用することで、

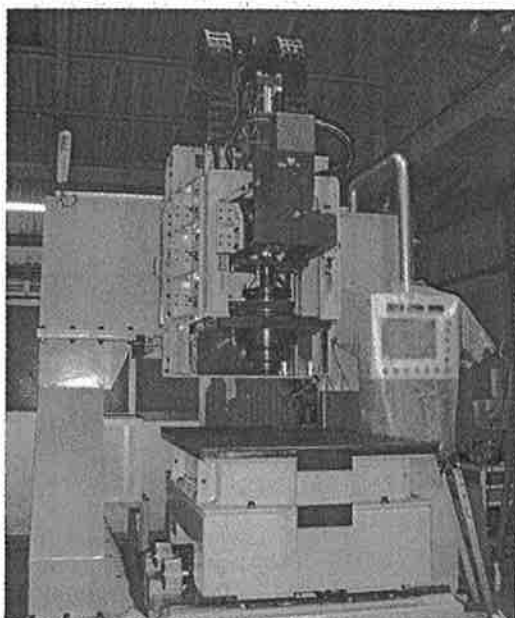


図7 阪大式ハイブリッド複動式摩擦攪拌接合装置外観(左)とツール先端部(右)

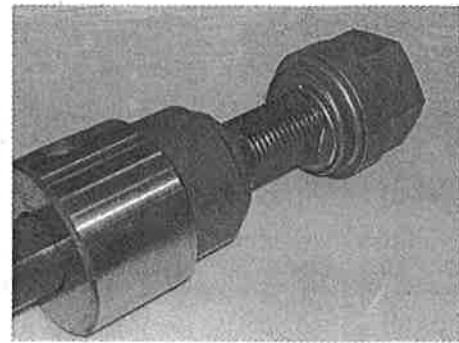


図6 厚板用ボビンツールの一例

FSWの欠点であるツール荷重を無害化することが可能になるが、ツールの耐久性が実用上の課題である。図6に25mmの厚板用に開発された複動式のツールの一例²⁴⁾を示す。

ハイブリッド複動式摩擦攪拌接合装置

図7は大阪大学接合科学研究所が開発したハイブリッド複動式FSW装置である。この装置では、接合中にプローブ長を変化させることができるばかりか、プローブとショルダの相対速度を変化させることが可能である。加えて、回転方向もそれぞれが同じ場合と逆である場合とが選択できる。本装置では、レーザーによる局所加熱、液体CO₂による局所冷却システムも備えており、接合部の温度分布を自在に変化させることにより、被接合材に合わせた最適な接合条件を設定できる。また、鋼などの高融点金属のFSWも可能としている。

図8は本装置を用いて、接合したアルミニウム合金の終端部の様子である。従来の手法を用いると、終端に大きな穴が残るのに対し、複動式ツールを用いるとほとんど穴が残らないのがわかる。また、これまでに、攪拌部の機械的強度、攪拌領域の大きさ、表面リップルの形状に及ぼすプローブとショルダの回転速度の比の影響などを明らかにした²⁵⁾。

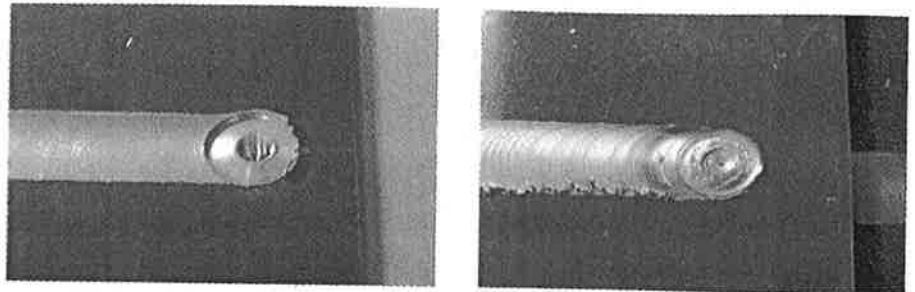


図8
接合終端部の形状

通常のFSW

複動式FSW

☆ ☆

これまでのFSWの複数の欠点を解決する手法として、プローブとショルダを独立して制御する複動式FSWについて紹介した。この方法の利点をまとめると、次の3つとなる。

- (1) 接合終了時にプローブを早めに引き抜くことにより、終端の穴をなくすることができる。また、スポットFSWに関しても、穴を残さず接合できる。
- (2) 厚さの異なる材料に対して、プローブの長さを調整しながら接合することが可能である。
- (3) プローブを介して裏側にいわゆるショルダ部を接合することで、裏側のショルダの位置を制御できるポピンツールで接合できる。この場合、厚板の接合が可能になるほか、キッシングボンドなどの不完全接合部がなくなる。また、ツール荷重をツールの内部応力で打ち消すことができる。

現状では、ツールの耐久性が実用上の課題となっている。しかしながら、本手法は、今後の種々のFSW装置開発の中で、1つの重要な方向性を示していると思われる。

謝 辞

本研究の一部は全国共同利用附置研究所連携事業（金属ガラス・無機材料接合技術開発拠点）、日本学術振興会の科学研究費および東レ科学技術振興助成の成果である。

参考文献

- 1) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes: International Patent Application PCT/GB 92/02203 and GB

Patent Application 9125978. 8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.

- 2) C. J. Dawes, *Weld. Metal Fab.*, 63(1995), 13.
- 3) C. J. Dawes and W. M. Thomas, *Weld. J.*, 53(1996), 41.
- 4) H. Okamura, K. Aota, and M. Ezumi: *J. Jpn. Inst. Light Met.*, 50(2000), 166.
- 5) G. Campbell and T. Stotler: *Welding J.*, 78(1999), 4.
- 6) M. R. Johnsen: *Weld. J.*, 78 (1999), 35.
- 7) K. E. Knipstron and B. Pekkari: *Weld. J.*, 76(1997), 55.
- 8) C. J. Dawes and W. M. Thomas: *Weld. J.*, 75(1996), 41.
- 9) 摩擦攪拌接合—FSWのすべて—、溶接学会編 (2006).
- 10) 中田一博、居軒征吾、長野喜隆、橋本武典、成願茂利、牛尾誠夫: *軽金属*, 51-10 (2001), 528.
- 11) S. H. C. Park, Y. S. Sato and H. Kokawa: *Scripta Mater.*, 49-2(2003), 161.
- 12) 外木達也、C. P. Tong、小野純夫、岡野雅樹: *銅と銅合金*, 41-1 (2002), 310.
- 13) H. S. Park, T. Kimura, T. Murakami, Y. Nagano, K. Nakata and M. Ushio: *Mater. Sci. Eng. A*, 371(2004), 160.
- 14) W. M. Thomas, P. L. Threadgill, E. D. Nicholas, *Sci Technol Weld Joi* 4 (1999) 365.
- 15) T. J. Lienert, W. L. Stellwag, B. B. Grimmer, R. W. Warke, *Weld. J.* 48 (2003) 1289.
- 16) W. M. Thomas: *Proc. Ist Int. Symp. FSW*, Thousand Oaks, USA, 14-16 June, 1999, CD-ROM.
- 17) Reynolds AP, Tang W, Posada M, DeLoach J. *Sci Technol Weld Join.*, 8 (2003) 455.
- 18) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: *Scripta Mater.*, 49(2003), 1175.
- 19) H. Fujii, Y. Takada, N. Tsuji and K. Nogi, *Mater. Trans.* 47(2006)239.
- 20) 石川武、藤井英俊、玄地一夫、崔靈、松岡茂樹、野城清、溶接学会論文集、24 (2006) 174.
- 21) 藤井英俊: *KANRIN* (日本船舶海洋工学会誌) 5 (2006) 42.
- 22) R. J. Ding & P. A. Oelgoetz: *Proc. 1st Int. Symp. FSW*, (1999) CD-ROM.
- 23) M. Skinner, R. L. Edwards, Glynn Adams & Zhixian Li: *4th Int. Symp. FSW*, (2003) CD-ROM.
- 24) 藤井英俊: *軽金属溶接*, 43 (2005) 325.
- 25) 藤井英俊、加藤英明、津村卓也、中田一博、溶接学会全国大会講演概要集、78 (2006) 56.