

クローズアップ

接合終端部の穴を残さずFSW — 複動型摩擦攪拌接合装置の開発 —

藤井 英俊・中田 一博

大阪大学接合科学研究所

1 はじめに

摩擦攪拌接合 (FSW) は、従来の溶接法にない種々の優れた特徴を有し、1991年に開発^{1) 2)}されてまもなく、種々の分野で実用化されてきた^{3)~7)}。とくに、わが国におけるFSWの技術開発は目覚ましい発展を遂げ、鉄道車両、船舶、土木構造物、自動車を中心として、継手長さにして既に400kmを超えるまでに至っている。

この手法は図1に示すように、ツール (Tool) と呼ばれる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方法で、最高到達温度が融点に達せず、固相状態で接合するため、これまでの熔融溶接と比較して接合部における強度低下が小さいのが特長である。また、回転ツールによる攪拌効果のため、結晶粒を1 μm 以下に微細化することも可能であり、母材より強度が向上する場合もある。

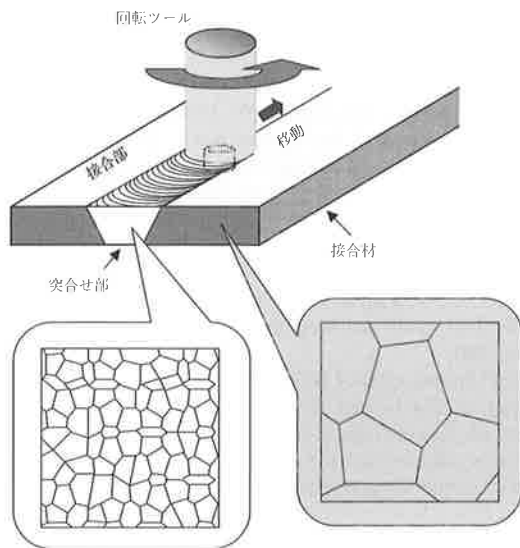


図1 摩擦攪拌接合 (FSW)

FSWはこの他にも、ミグ溶接の数分の1以下と言われる小さい変形や、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や鋳造材、複合材料の接合も可能であることなど、実用上きわめて有用な特徴がある。さらには、接合中にヒューム、スパッタ、紫外線等が発生しない、気孔、割れなどが発生しにくい、シールドガスが不要である、フィラーが不要であるなどの特徴も有する。

一方で、(1) 剛性のある拘束治具が必要である、(2) 接合終端部に穴が残る、(3) 裏面にキッキングボンドといわれる接合不良が生成しやすい、(4) 低融点金属に限られることなどが問題点とされている⁸⁾。

最後の問題点に関しては、種々の技術の開発より、最近では炭素鋼^{9)~14)} やステンレス鋼^{15)~17)}、さらには2620°Cの融点を有するMo¹⁸⁾などの摩擦攪拌接合も可能となり、ほとんどすべての金属のFSWができるようになってきた。

2 複動型回転ツールとその利点

上述の問題点の(1)~(3)を同時に解決する方法として、図2に示すように、プローブとショルダを別駆動させる複動型ツールが候補として挙げられる¹⁹⁾。複動型回

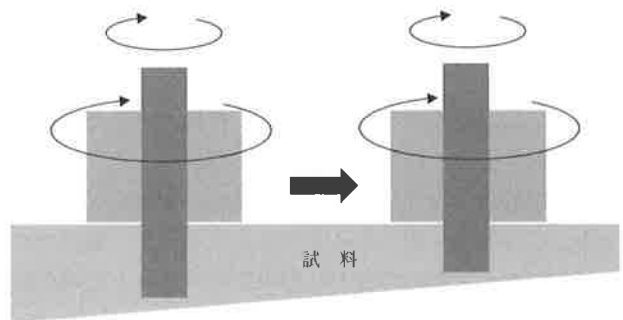


図2 異なる厚さの試料に対応可能な複動型ツール

転ツール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、終端の穴をなくすことが可能である。また、スポットFSW²⁰⁾ についても、穴を残さず接合できる。
- (2) 図2に示すように、厚さの異なる材料に対して、

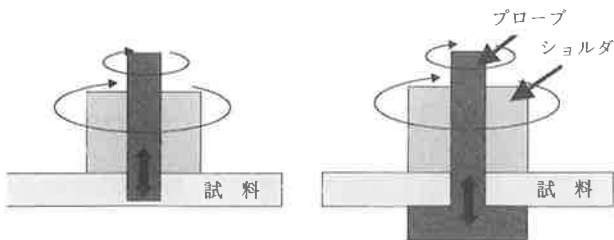


図3 複動型ツールに試料裏面からショルダ部をつけた場合

プローブの長さを調整しながら接合することが可能である。

- (3) 図3に示すように、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、キッシングボンドの発生を防止できる。また、この方法により、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ため²¹⁾、FSWの欠点であるツール荷重を無害化することが可能である。

3 阪大式複動型摩擦攪拌接合装置

図4は大阪大学接合科学研究所が開発した複動型FSW装置およびツールの外観写真である。この装置では、

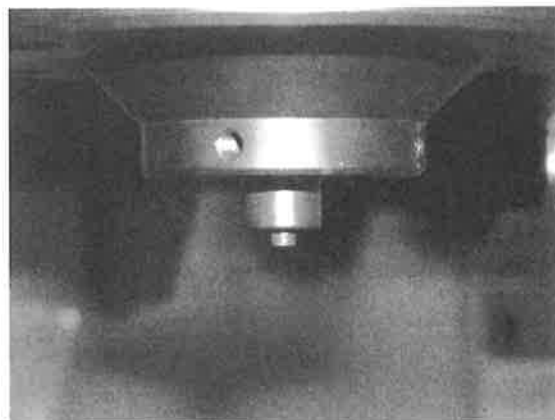
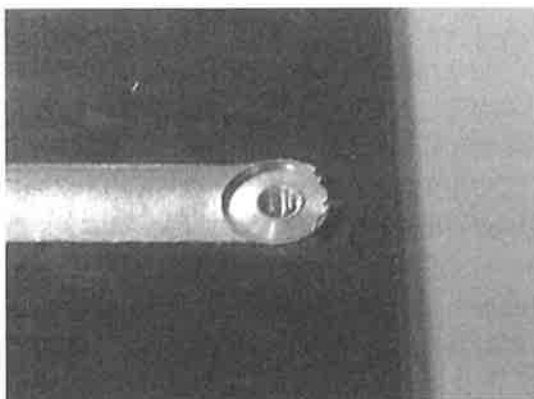


図4 阪大式複動型摩擦攪拌接合装置外観とツール先端部

(a) 通常のFSW



(b) 複動式FSW

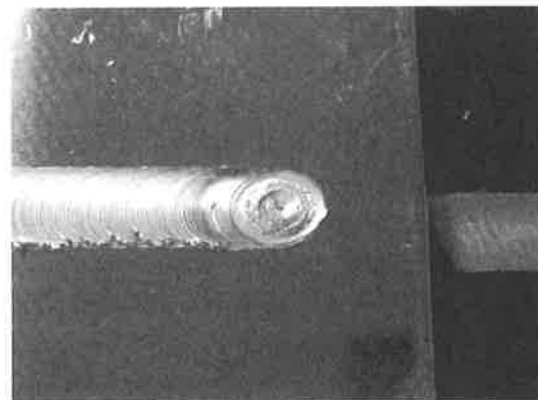


図5 接合終端部の形状

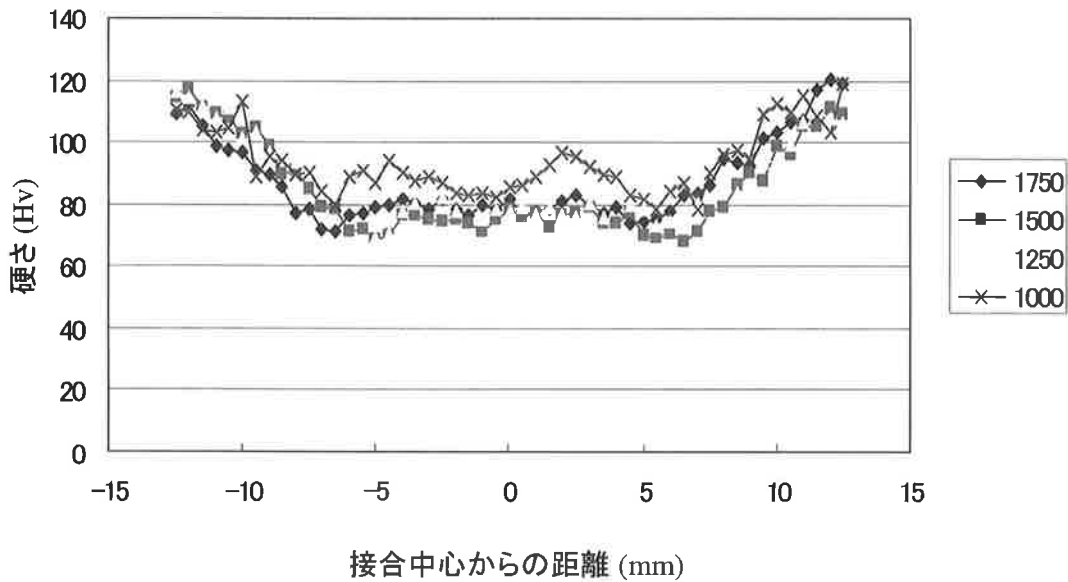


図6 A6061継手の硬さ分布に及ぼすプローブの回転速度 (rpm) の影響

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。また本装置では、レーザによる局所加熱²²⁾、液体CO₂による局所冷却システム²³⁾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、鋼等の高融点金属のFSWも可能である。

図5は本装置を用いて接合したAl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、複動型ツールを用いるとほとんど穴が残らないのがわかる。

4 攪拌部の特性に及ぼすプローブの回転速度の影響

ショルダ径φ15、プローブ径M5のツールを用いて、ショルダの回転速度を1,500rpm一定とし、プローブの回転速度を250から1,750rpmに変化させながら、A1050またはA6061 (300mm \times 70mm \times 5mm)の突合せ接合を行った。接合速度は300mm/minとした。

図6にA6061継手の攪拌部(接合方向に垂直な断面)の硬度に及ぼすプローブの回転速度の影響を示す。プローブの回転速度が減少するにつれ、攪拌部の硬さがやや増加し、軟化領域がやや縮小する傾向があるのがわかる。これはプローブの回転速度を減少させることにより、接合部において最も高温となる接合部中心の温度が低下し、攪拌部における硬度の減少を抑制できたことを示し

ている。

図7は各プローブ回転数に対して、表面のリップルの間隔の変化を示している。ショルダの回転速度は1,500rpmであるため、プローブの回転速度が1,500rpmの場合は従来のFSWと同様であるが、この際のリップルの間隔は、接合速度をツールの回転速度で割った回転ピッチ(Revolutionary Pitch)⁸⁾と一致する。本実験条件においては、その間隔は0.2mmである。(300mm \cdot min⁻¹/1,500rpm=0.2 (mm/r))

一方、プローブの回転速度を750rpm、500rpm、250rpmと減少させた場合には、1,500rpmの場合と比較してリップルの間隔がそれぞれ2倍、3倍、6倍の0.4mm、0.6mm、1.2mmとなる。これは、プローブの回転速度をツール全体の回転速度と見なしたときの回転ピッチに相当する。プローブの回転速度が1,250rpmあるいは1,750rpmの場合には、現象は単純ではなく、プローブとショルダの回転数の比が5:6、あるいは6:7となっているため、波のうなり現象に似た表面形状となる。すなわち、リップル形状はプローブおよびショルダの影響を受けている。

このように、プローブの回転速度が小さく、中心付近の温度が比較的低い場合には、本来ショルダの動きを示すリップルの形態がプローブの回転速度によって決定される。一方、回転速度が大きく、中心付近の温度が比較的高い場合には、ショルダおよびプローブの相互作用によって決定される。

以上のように、複動型ツールの場合には、プローブお

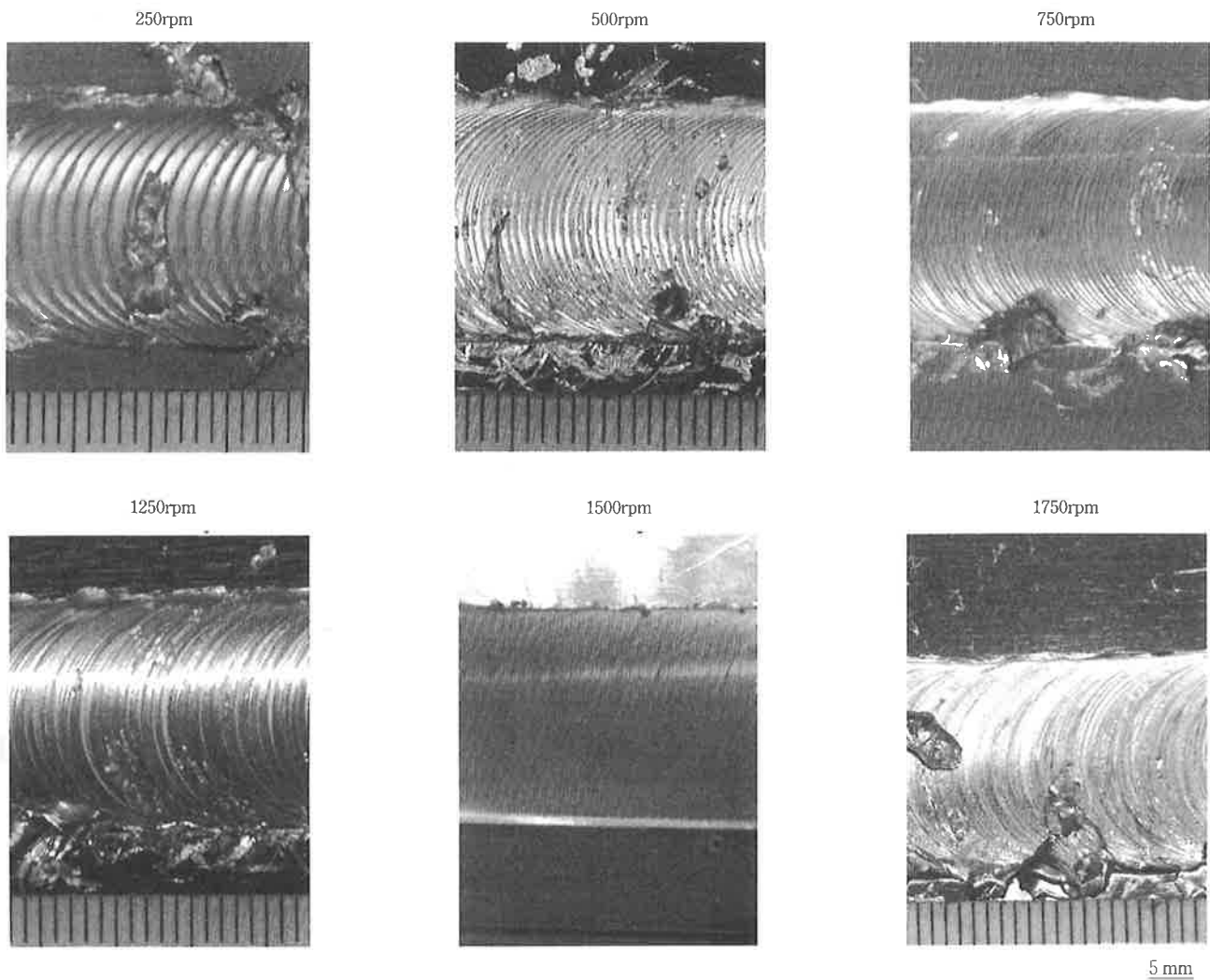


図7 表面のリップルの間隔 (A1050) に及ぼすプローブの回転速度の影響

よびショルダの回転数の比によって、攪拌の効果を変化させることが可能であり、与えられたそれぞれの材料に対して、従来法と比較して幅広い条件設定が行え、より最適な接合が可能になる。

5 おわりに

ショルダとプローブが同軸で独立に駆動する複動型摩擦攪拌接合装置を開発した。この方法を用いると、終端の穴やスポットFSWの穴をなくすことができ、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。また、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、いわゆるポピンツールを適用することで、厚板の接合が可能になるほか、キッシングボンドをなくすることができる。またこの方法により、ツール荷重をツ

ールの内部応力で打ち消すことができ、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。

また、開発した装置を用いて、ショルダの回転速度を一定とし、プローブの回転速度を変化させ、攪拌部の特性に及ぼすプローブの回転速度の影響を検討した。その結果、プローブの回転速度を小さくすることにより、攪拌部の硬さの減少を抑制することができた。

表面のリップル間隔はプローブの回転速度によって大きく変化し、低回転速度の場合には、プローブの回転速度、高回転速度の場合にはプローブとショルダとの回転速度の比によって決定されることが明らかになった。

本手法は今後のFSWの種々の装置開発の中で、一つの重要な方向性を示していると思われる。現状では、ツールの耐久性が実用上の課題であろう。

謝 辞

本研究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/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- 2) C.J.Dawes and W.M.Thomas, Weld. J., 53 (1996) , 41.
- 3) H. Okamura, K. Aota, and M. Ezumi: J. Jpn. Inst. Light Met., 50 (2000) , 166-171.
- 4) G. Campbell and T. Stotler: Welding J., 78 (1999) , 45-47.
- 5) M. R. Johnsen: Weld. J., 78 (1999) , 35-39.
- 6) K. E. Knipstron and B. Pekkari: Weld. J., 76 (1997) , 55-57.
- 7) C. J. Dawes and W. M. Thomas: Weld. J., 75 (1996) , 41-45.
- 8) 摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, 溶接学会編 (2006) .
- 9) T.J. Lienert, W.L. Stellwag, B.B. Grimmer, R.W. Warke: Weld. J. 82 (2003) 1s-9s.
- 10) W.M. Thomas, P.L. Threadgill, E.D. Nicholas: Sci. Technol. Weld. Joi. 4 (1999) 365-372.
- 11) A.P. Reynolds, W. Tang, M. Posada, J.DeLoach: Sci. Technol. Weld. Joi. 8 (2003) 455-460.
- 12) H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata, K. Nogi: Mater. Sci. Eng. A 429 (2006) 50-57
- 13) R. Ueji, H. Fujii, L. Cui, A. Nishioka, K. Kunishige, K.Nogi: Mater. Sci. Eng. A, 423 (2006) , 324-330.
- 14) H.Fujii, Y.Takada, N.Tsuji and K.Nogi: Mater. Trans. 47 (2006) 239-242.
- 15) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Scripta Mater., 49 (2003) , 1175.
- 16) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Scripta Mater., 51 (2004) , 101.
- 17) 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) 174-180.
- 18) 藤井英俊, 加藤英明, 中田一博, 野城清: 溶接学会全国大会講演概要集, 79 (2006) 50-51.
- 19) R. J. Ding & P. A. Oelgoetz: Proc. 1st Int. Symp. FSW, (1999) CD-ROM.
- 20) 田中直, 熊谷正樹, 吉田英雄: 溶接学会全国大会講演概要集, 75 (2004) 226-227.
- 21) M.Skinner, R.L.Edwards, Glynn Adams & Zhixian Li: 4th Int. Symp. FSW, (2003) CD-ROM.
- 22) 立野高寛, 藤井英俊, 津村卓也, 田中学, 中田一博: 溶接学会秋期全国大会講演概要集, 79 (2006) 58-59.
- 23) 立野高寛, 藤井英俊, 津村卓也, 田中学, 中田一博, 村上亨: 溶接学会全国大会講演概要集, 78 (2006) 54-55.

