

技術解説

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合(FSW)

Friction Stir Welding of Steels

東北大学 大学院 工学研究科
材料システム工学専攻
接合界面制御学講座
教授

工学博士 粉川 博之
Hiroyuki Kokawa



1. はじめに

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) は、1991 年に英国溶接研究所 (TWI) で開発¹⁾されて以来、短期間でめざましく発展し、航空宇宙、鉄道、自動車、船舶、土木構造物、半導体機器など様々な分野で、すでに実用化が進んでいる。図 1 に模式図で示すように、FSW は非消耗回転ツールによる摩擦熱と塑性流動を利用した固相接合で、熔融を伴わず、接合時の変形が小さく、接合欠陥が少なく、接合部の機械的特性が良好であるなどの優れた特徴を有することから、現状で熔融溶接が困難なアルミニウム合金への適用が大きな効果を奏し、アルミニウム(Al)合金を中心に世界各国で研究と実用化が急速に進められている^{2),3)}。最近では、Al 合金以外の研究も急増し、鉄鋼材料 (ステンレス鋼を含む)、マグネシウム(Mg)合金、銅(Cu)合金、チタン(Ti)合金、鋳造合金、金属基複合材料、非晶質合金、超微細粒材料、異種材料など多岐にわたり、FSW が Al 合金のみの接合法から脱皮し、より一般的な接合法として、広範囲な材料への展開が進む段階に入っている。中でも鉄鋼材料への展開の期待が大きいことから、FSW の鉄鋼材料への展開の現状⁴⁾について紹介する。

2. 鉄鋼材料の FSW の現状

1999 年に TWI の Thomas ら⁵⁾が鋼の FSW を報告して鉄鋼材料における FSW の可能性を示して以来、炭素鋼、高張力鋼、ステンレス鋼、耐熱鋼など鉄鋼材料における FSW が報告されている⁶⁾。図 2 に Thomas らの歴史的な鋼 FSW 論文⁵⁾からの引用写真を示す。両面接合を行った低炭素鋼 FSW 部(a)

および低炭素鋼と 12%Cr 鋼の異材 FSW 部の断面マクロ写真で、いずれも接合欠陥はない。これらの FSW 継ぎ手の引張試験の結果、すべて母材部で破断し、降伏応力および最大引張応力は母材と、ほぼ同等であったと報告⁵⁾している。

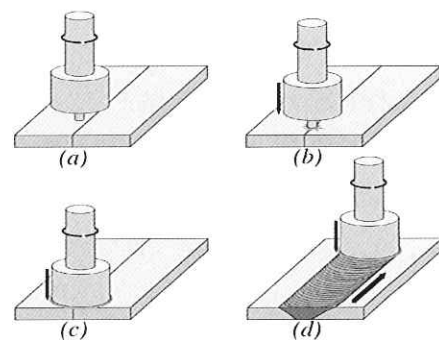
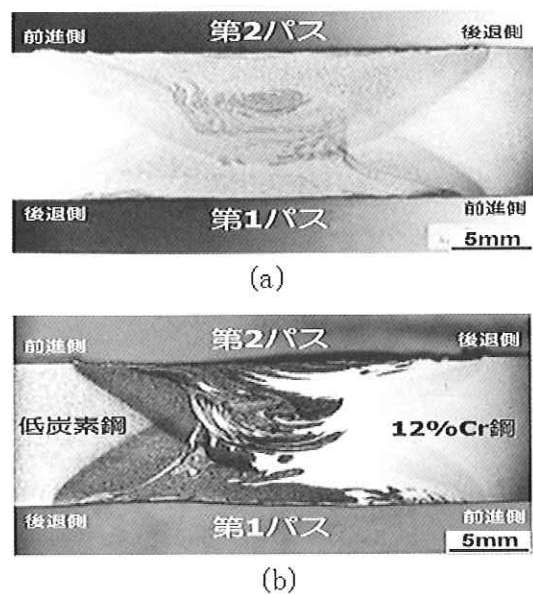
図 1 摩擦攪拌接合 (FSW) 過程の模式図²⁾

図 2 両面接合した低炭素鋼 FSW 部(a)および低炭素鋼/12%Cr 鋼異材 FSW 部(b)の断面マクロ写真⁵⁾

しかし、その後しばらく鉄鋼材料のFSW報告例が増えなかった。その大きな理由の一つに、鉄鋼材料に適したFSWツール材料がないことが挙げられる。ツール材料の条件としては、高い高温強度、耐摩耗性、非反応性などが要求される。初期研究のツール材料には、タングステン(W)合金、モリブデン(Mo)合金、超合金などが用いられたが、いずれもツールの摩耗や変形が顕著で実用的には問題が多かった⁶⁾。しかし、その後、鉄鋼材料用のツール開発が進み、様々な高融点金属材料やセラミックス材料などが用いられ、ツール形状にも様々な工夫がなされて、問題が軽減されるに伴い、鉄鋼材料のFSW研究が2003年頃から着実に増加している。その代表的なツール材料である多結晶立方晶窒化ホウ素 (pcBN : polycrystalline cubic Boron Nitride) ツールの例 (MegaStir Technologies 社製) を図3に示す。

炭素鋼のFSW研究^{7)~10)}に関しては、極低炭素鋼から1mass%を超える高炭素鋼まで、めだつたツール摩耗もなく、FSWが可能で良好な接合部が得られることが報告されている。FSWでは、割れが生じやすく、アーク溶接が困難な高炭素鋼の接合が可能であるとともに、低入熱条件でFSWすることによって接合部をA₁変態点以下の高靱性組織(図4)とすることが可能であることが示された⁸⁾。

現在、米国を中心に、パイプライン鋼の溶接技術としてFSWを用いようとする動きが活発化している。図5はMegaStir Technologies社により開発されたパイプ用FSW装置を示している。



図3 pcBN (多結晶立方晶窒化ホウ素) ツール [CS4(Concave Scrolled Shoulder, Step Spiral)ピンツールの例] (MegaStir Technologies 社製)

この装置は、径12インチのパイプライン鋼の円周溶接用に開発されたものであり、非常にコンパクトで、クレーンにて施工現場に持ち込んで接合可能な構造になっている。図6は実際にパイプライン鋼X65(径12インチ、板厚6.35mm)をピン長6mmのpcBNツールを用いて1パスFSWしている様子である。現在、用いられている接合条件は、ツール回転速度400rpm、送り速度8インチ/minである。接合最終部のピン穴は、捨て板を取り付けることにより、パイプ材内に残らないように工夫されている。

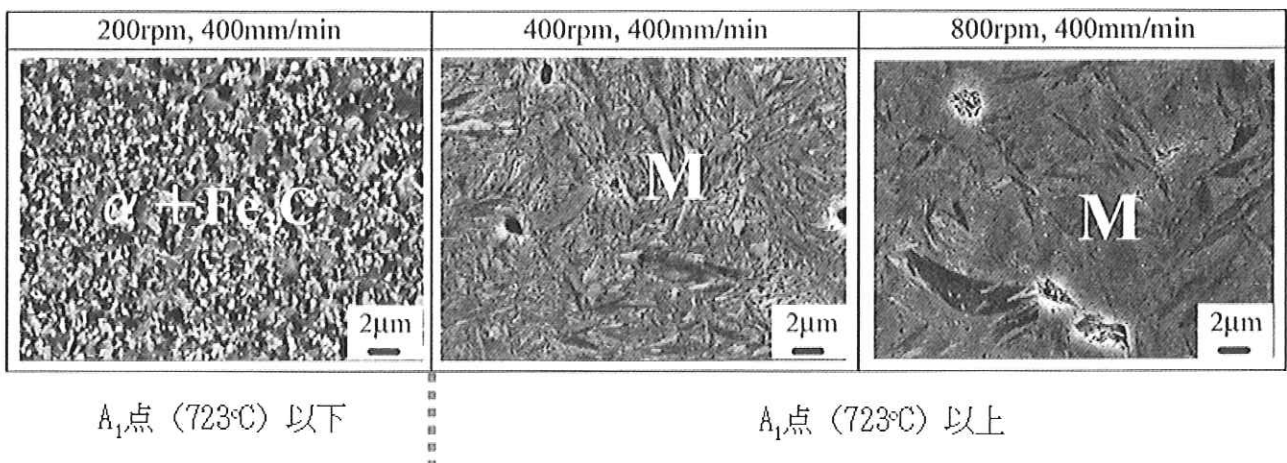


図4 高炭素鋼(S70C)をA₁変態点以下でFSWすることで高靱性組織を形成⁸⁾



図5 パイプ用 FSW 装置
(MegaStir Technologies 社提供)

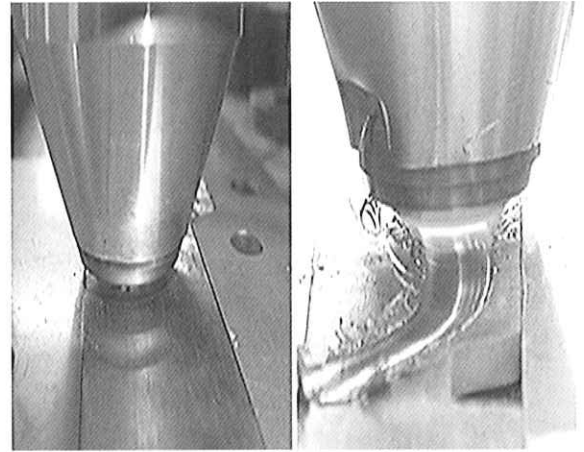


図7 D2 鋼への FSP 過程¹²⁾

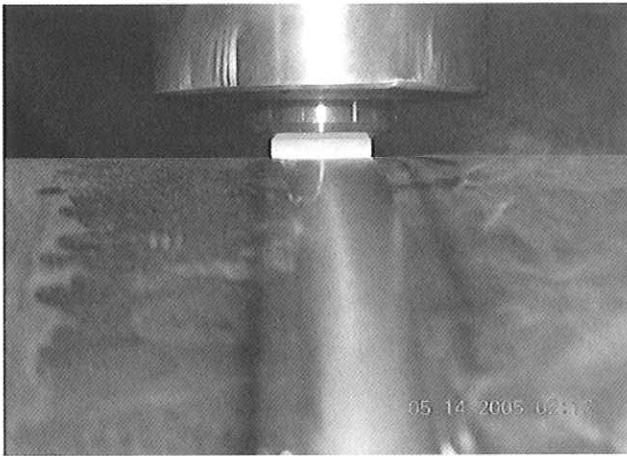


図6 パイプライン鋼の FSW 過程
(MegaStir Technologies 社提供)

摩擦攪拌プロセッシング (Friction Stir Processing: FSP) の実用例としては、D2 工具鋼に対して FSP を行い、局部領域に微細なマルテンサイトを得て、高性能な刃物を作製するプロセスが報告されている¹¹⁾。図 7¹²⁾に D2 鋼に対して、ツール回転速度 400rpm、送り速度 4 インチ/min にて FSP している様子を示す。FSP 後、刃物の形に切り出して研磨後、図 8¹²⁾のような刃物として販売されている。なお、鋼に FSP を行って刃物を作製するプロセスは、米国 DiamondBlade 社により Friction Forging の名称で呼ばれており、商標登録されている。

ステンレス鋼の FSW 研究に関してもその数が増え、フェライト系¹³⁾では組織微細化により接合部が



図8 D2 鋼の FSP により作られた刃物¹²⁾

高強度高靱性化し、フェライト—オーステナイト二相系¹⁴⁾では接合後も図 9 のように等相比の微細二相組織が維持されるなど、大きな利点が報告されている。オーステナイト系^{15,16)}でも熱影響部の鋭敏化抑制などの利点が認められるが、図 10 のように攪拌部の前進側 (Advancing side) バンド組織が形成され、耐食性の劣化を招く可能性があるという問題点も報告された。

ツール摩耗の観点からは、炭素鋼、フェライト系ステンレス鋼、二相ステンレス鋼、オーステナイト系ステンレス鋼の順に次第に FSW が困難になるが、最近の pcBN ツールを用いた場合オーステナイト系ステンレス鋼以外では際立った摩耗はほとんど見られない。しかし、実用化を考えると、さらに高強度、長寿命のツールが必要と考えられ、現在盛んに開発が進められている。

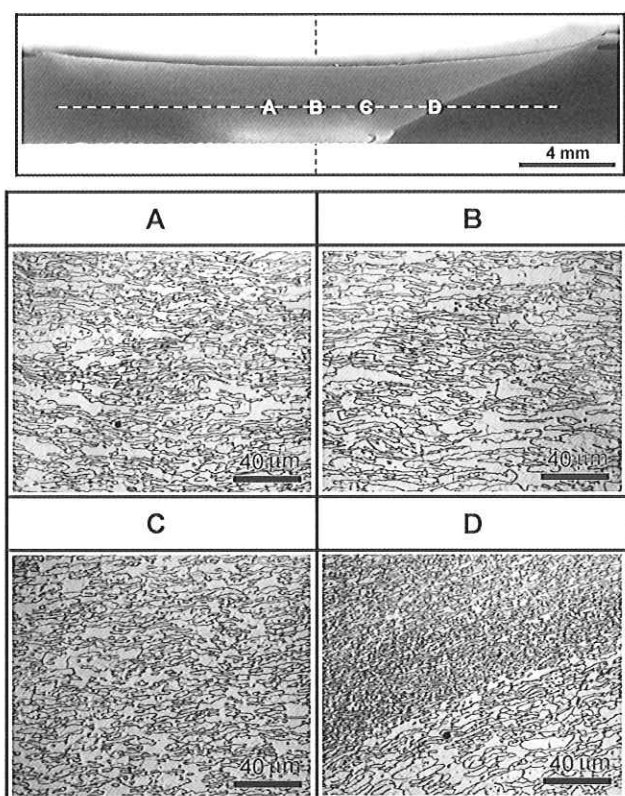


図9 二相ステンレス鋼 FSW 部組織¹⁴⁾

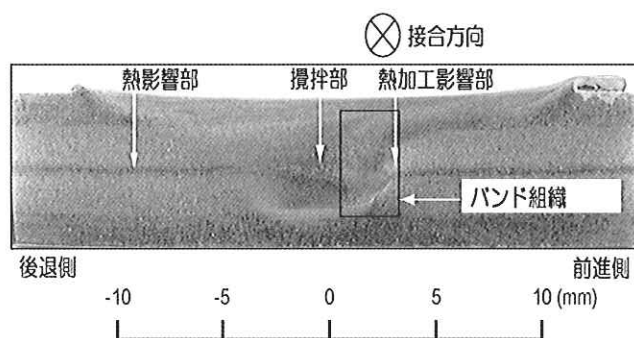


図10 オーステナイト系ステンレス鋼 FSW 部組織^{15,16)}

また、FSW 過程のツールへの負担軽減策も検討されており、レーザと FSW のハイブリット¹⁷⁾の試みが報告されている。

3. おわりに

鉄鋼材料の溶接・接合は、アーク溶接を中心に、高度で経済的な技術がある程度確立しており、新しい接合法が入り込むのは容易ではないが、FSW の持つ数々の利点は、鉄鋼材料に対してもやはり大きな魅力である。問題点が次第に軽減、克服されつつあることから、FSW が鉄鋼材料をも含む一般的な接合法の一つとして、多かれ少なかれ、次第に浸透していくものと思われる。

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) 佐藤裕, 粉川博之: 摩擦攪拌(FSW)プロセス ~ 材料科学的視点から~, まてりあ, 42・3 (2003), 214-220.
- 3) 佐藤裕, 粉川博之: 軽金属の新しい接合技術 - 摩擦攪拌接合 (FSW) -, 金属, 76・10 (2006), 1163-1168.
- 4) 粉川博之, 佐藤裕: FSW の鉄鋼材料への展開, 溶接技術, 55・12 (2007), 55-59.
- 5) W.M. Thomas, P.L. Threadgill and E.D. Nicholas: Feasibility of friction stir welding steel, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 4-6 (1999), 365-372.
- 6) 溶接学会編: 摩擦攪拌接合 - FSW のすべて -, 産報出版, (2006), pp. 129-141.
- 7) 藤井英俊: 鉄鋼材料の摩擦攪拌接合 (FSW) の現状, 溶接技術, 53・12 (2005), 60-67.
- 8) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji, K. Nakata, K. Nogi, R. Ikeda and M. Matsushita: Transformation in stir zone of friction stir welded carbon steels with different carbon contents, *ISIJ Intern.*, 47・2 (2007), 299-306.
- 9) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: Friction stir welding of high carbon steel, *Scripta Mater.*, 56・7 (2007), 637-640.
- 10) Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Furuhashi, Microstructural evolution of ultrahigh carbon steel during friction stir welding, *Scripta Mater.*, 57・6 (2007), 557-560.
- 11) C.D. Sorensen, T. Nelson, S.M. Packer and C. Allen, Friction Stir Processing of D2 Tool Steel for Enhanced Blade Performance, *Friction Stir Welding and Processing IV*, Edited by R.S. Mishra, M.W. Mahoney, T.J. Lienert and K.V. Jata, TMS, Warrendale, PA,

- (2007), 409-418.
- 12) DiamondBlade ホームページ
(<http://www.diamondbladeknives.com/>)
- 13) S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 430 stainless steel, Proc. ISOPE 2005, Seoul, 2005, Vol. IV, pp. 6-12.
- 14) Y.S. Sato, T.W. Nelson, C.J. Sterling, R.J. Steel, C.-O. Pettersson: Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel, Mater. Sci. Eng. A, 397 (2005), 376-384.
- 15) S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki: Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding, Scripta Mater., 49-12 (2003), 1175-1180.
- 16) S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Corrosion resistance of friction stir welded 304 stainless steel, Scripta Mater., 51-2 (2004), 101-105.
- 17) 中田一博：鉄鋼，ニッケル合金および高融点金属のFSW，溶接技術，55・11 (2007)，132-135.