



技術解説

非常識を可能にする - 鉄鋼材料を変態させずに接合 -

藤井 英俊*

Joining of steels without any transformation

Key Words : 摩擦攪拌接合、FSW、炭素鋼、変態点、高強度、高靱性

1. はじめに

1991年に開発された摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW)¹⁾は、従来の溶接法にない種々の優れた特徴を有し、現在までにさまざまな分野で研究、実用化されてきた²⁻⁴⁾。特に、我が国における摩擦攪拌接合技術開発は、700系のみを始めとした鉄道車両、土木構造物、船舶、自動車を中心として、目覚ましい発展を遂げ、既に継手長さにして500 kmを超えている。この方法では、図1に示すように、回転ツール (Tool) と呼ばれる 10 ~ 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。最高到達温度が融点に到達せず、固相状態で接合するため組織が微細化され、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長で、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²⁻³⁾。

地震等の災害が発生すると、ほとんどの破断は溶接・接合部で生じ、いかに強度の高い母材を開発しても、溶接・接合部の強度が問題となることが指摘されている。したがって、母材より高強度の継手が得られる本手法に対する期待は大きい。しかしながら、現状では、摩擦攪拌接合で製造された構造物のほとんどはAl合金であり、構造物の多くを占める鉄鋼材料をはじめとした比較的融点の高い材料の摩

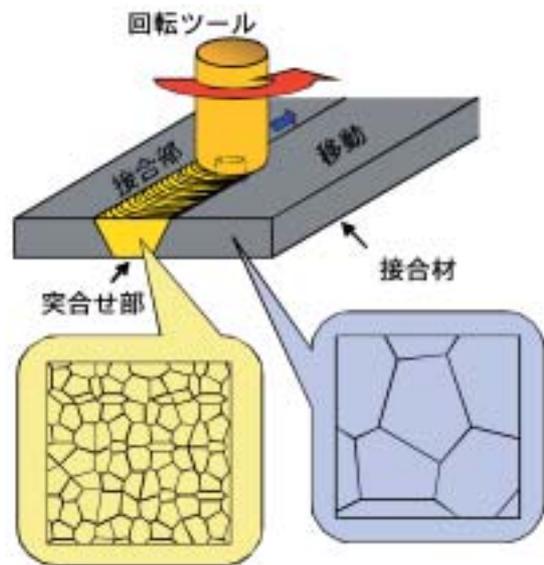


図1 摩擦攪拌接合 (FSW)

擦攪拌接合技術の確立が望まれているのが現状である。

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合の開発が、Al合金などと比較して大幅に遅れている理由の一つとして、回転ツールの材料に必要な条件が厳しいことが挙げられる。鉄鋼材料の接合に用いるツールには、高い高温強度、耐摩耗性、非反応性などの特性が求められる。

従来のツールは耐摩耗性、靱性が大きな問題とされていたが、ツールに対する種々の検討により、これらの問題点は以前より大幅に改善されてきた。本稿では、鉄鋼材料の中でも炭素鋼について中心的に解説し、特に、変態温度以下で接合することにより、含有炭素量に関係なく炭素鋼を接合することが可能になった研究について紹介する。

2. 摩擦攪拌接合法の原理と特徴

摩擦攪拌接合の回転ツールは径の大きい (10



* Hidetoshi FUJII

1965年5月生
早稲田大学大学院理工学研究科材料工学
専攻博士後期課程修了 (1993年)
現在、大阪大学接合科学研究所 准教授
博士(工学) 機能評価学
TEL : 06-6879-8663
FAX : 06-6879-8663
E-mail : fujii@jwri.osaka-u.ac.jp

～ 20 程度) ショルダ (Shoulder) 部とその先端に突起としてあるプローブ (Probe) 部 (M5 程度) からなる⁴⁾。図1に示すように、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。この時、材料は裏当て板に拘束し、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。

接合部の断面組織は図2のようになり、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 Al、純鉄 (IF 鋼) および純 Ti の攪拌部の TEM 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組織が観察される。

Al 合金は fcc 構造ではあるが、積層欠陥エネルギーが高く、一方、鉄鋼材料は bcc 構造を有するため、冷却中に回復が生じやすく、最終的に攪拌部において転位の少ない再結晶組織が得られるが、Ti 合金においては、転位の多い再結晶組織になり、摩擦攪拌接合では、動的再結晶が生じることにより、接合が行われていることがわかる⁵⁾。



図2 接合部の組織の模式図

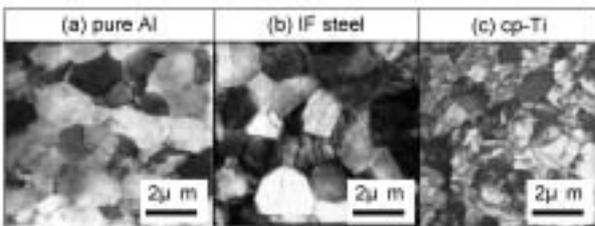


図3 純 Al、純 Fe (IF 鋼)、純 Ti の攪拌部の組織の比較⁵⁾

3. 回転ツール

Al 合金を接合する際には、回転ツールに SKD 61 等の SK あるいは SKD 工具鋼を使うのが一般的で

ある。プローブには、通常ネジがきつてあり、右ネジの場合には左回転、左ネジの場合には右回転で用いる⁴⁾。また、ショルダ部は平面ではなく、通常はわずかに凹面状になっていることが多い^{6,7)}。

プローブの長さは板厚とほぼ等しく、裏あての板と接触しないように 0.2mm 程度短いのが普通であり、熱伝導率の低い材料では、さらに長さを板厚に近づける必要がある。直径に関しては、例えば、5mm 厚の板材を接合する際には、ショルダが 15mm 程度、プローブが M5～6 が標準である。また、回転ツールはプローブ先端が先行するように進行逆方向に 1～5 度程度傾け、回転速度は 1 分間に数百から数千回転、接合速度は数十～数百 mm/min が一般的で、数 m/min も可能である⁴⁾。

ただし、ツール形状に関しては、この他にも種々の形状が開発されており⁴⁾、用途によって使い分けることが望ましい。ツールは接合部に発熱と攪拌を生じさせる要素であり、特にプローブ形状は接合品質を左右する重要な要素である。

工具鋼などの鉄鋼材料をツールとして用いることができる Al 合金の摩擦攪拌接合と異なり、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合においては、ツール材料に高温における高い強度と靱性、耐摩耗性、非反応性などの特性が要求される。研究初期においては、ツール材料に W 合金^{8,9)}、Mo 合金⁸⁾などが用いられたが、最近では、高融点金属材料の他、多結晶立方晶窒化ホウ素 (PCBN) ツール^{10,11)}を始めとしたセラミックス材料や超硬合金¹²⁻¹⁷⁾が用いられ始めている。その後、さらに高強度、長寿命な Ir 合金ツール¹⁸⁾なども開発されており、実用化に向けて大きく前進している。尚、超硬合金は、1000 以上の接合に適さないが、650～850 程度まで温度を低下させることにより、他のツールと比較して強度、靱性にすぐれ、実用化に向けて全く問題がない程度に長時間使用できる¹²⁻¹⁴⁾。また、スポット FSW においては、 Si_3N_4 ツールが実用的に有望な一つの材料であることが示されている¹⁹⁾。

4. 鉄鋼材料の摩擦攪拌接合

研究レベルにおいては、1999年に Thomas ら²⁰⁾が 12% Cr 鋼および低炭素鋼に摩擦攪拌接合を実施し、鉄鋼材料における摩擦攪拌接合の可能性を示して以来、炭素鋼、IF 鋼 (極低炭素鋼)、ステンレス

鋼などの鉄鋼材料への摩擦攪拌接合の適用例がいくつか報告されている。

図3に示したように、鉄鋼材料の攪拌部は、再結晶組織でAlの場合と非常に似ている。このことから、Alの場合と同様なメカニズムで鉄鋼材料の摩擦攪拌接合が行われていることが理解できる⁵⁾。回転速度が減少、あるいは接合速度が増加するにつれ、すなわち入熱が減少するにつれ、結晶粒がより微細化し、強度が徐々に増加するという傾向もAl合金の場合と同様である。

しかしながら、炭素鋼の摩擦攪拌接合はAl合金やオーステナイト系ステンレス鋼等と異なり、接合中に変態を伴う。したがって、接合中の変態を如何に制御するかで、大きく継手強度が異なり、Al合金では観察されない多くの現象も起こり得る。最近、著者ら¹²⁻¹⁴⁾はこの点に注目し、摩擦攪拌接合中の変態を制御することで、逆に、接合中に継手を高強度化する手法を提案した。

図4¹²⁾は、IF鋼(極低炭素鋼, 20 ppm C)および炭素量がそれぞれ0.12%, 0.35%のS12CおよびS35C炭素鋼の攪拌部の引張強さの変化を示している。このように、炭素鋼の接合においては、接合速度や回転速度を変化させた場合、接合強度は単調増加や単調減少とはならず、材料によっては、複雑な変化を示す。また、単調に変化しているS12Cの強度に関しても、IF鋼と比較して強度変化が大きいことがわかる。図4において、IF鋼の強度の速度依存性は相対的に小さいが、これが、Al合金の結果と同程度の変化量である。

図5はFe-Fe₃C系状態図および用いた試料の組成¹²⁾を示すが、炭素鋼の場合には変態を伴うため、例えば、接合温度がA₁点以下のフェライト() + セメントナイト領域(+ Fe₃C), A₁点とA₃点の間にあるフェライト() + オーステナイト() 2相領域, A₃点以上のオーステナイト単相() 領域のいずれの領域で接合するかによって、組織も大きく変化し、得られる継手強度も極めて大きく変化する。例えば、S12Cでは、パーライトを基地(フェライト)中に分散できるA₁点以下のフェライト() + セメントナイト領域(+ Fe₃C)点以下が望ましいのに対し、S35C等の中炭素鋼などでは、フェライト + オーステナイト2相領域で摩擦攪拌接合すると、得られる組織が最も微細化され、最高強度

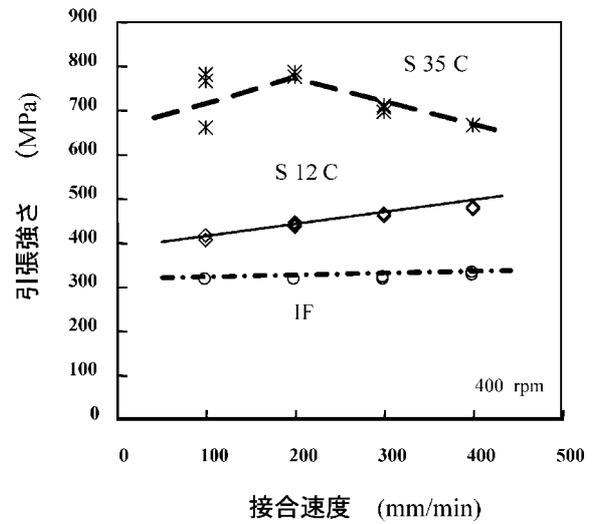


図4 IF鋼および炭素鋼の摩擦攪拌継手(攪拌部のみ)の引張強さ¹²⁾

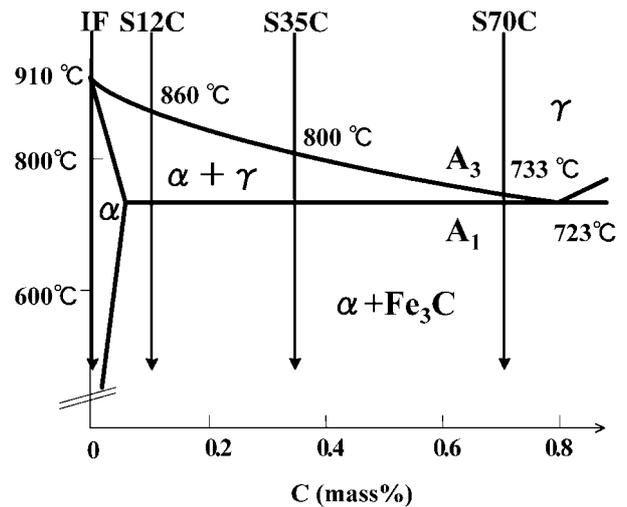


図5 Fe-Fe₃C状態図¹²⁾

が得られる¹²⁾。一方、母材がフェライト + 球状セメントナイトの場合とフェライト + パーライトの場合では、継手組織および強度において異なる傾向が得られる¹⁴⁾。母材がフェライト + パーライトの場合には、炭素間の距離が小さく、マルテンサイト化しやすいため、S35Cであっても接合速度 100 ~ 400 mm/min においては、図4のようなピークは存在しない¹⁴⁾。

5. 接合できない材料を接合する(高炭素鋼)

鉄鋼材料においては、炭素量を増加させると高強度化できることが知られている。しかしながら、実際には、例えば、自動車産業等においては、0.15%

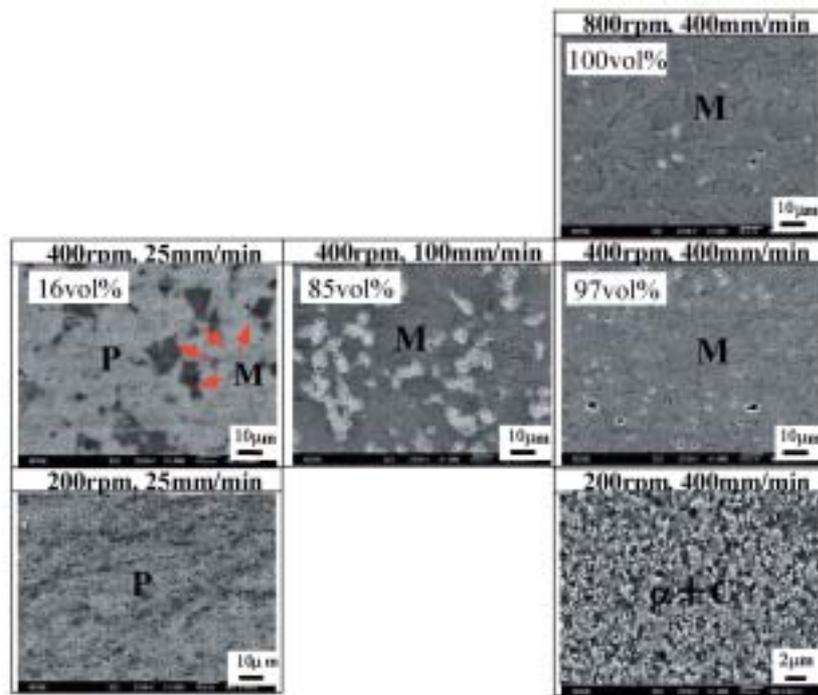


図6 S70Cの接合条件と接合部組織の関係¹³⁾
 P: パーライト、M: マルテンサイト、 : フェライト、C: 球状セメントライト

以上の炭素量を含む鋼材はほとんど使用されていない。これはプレス成型性の問題もあるが、鋼材の炭素量が増加するとスポット溶接を行う際に割れが生じ、溶接が出来ないためである。割れが発生する原因は、温度を一旦、上昇させる際に変態が起こり、マルテンサイト等のもろい相が生成する。そこで著者らは、変態温度より低い温度で接合することを試みた。

図6¹³⁾はS70C(0.70% C)の高炭素鋼の結果であり、ほぼ共析の組成の高炭素鋼である。このような材料を通常の熔融溶接を行うと、ほぼ全面にマルテンサイトが生成するため、継手が極めて脆くなり、接合は困難とされている。図6では、左側に行くにしたがって接合速度が減少し、これにより、冷却速度が減少する。したがって、400 rpm, 400 mm/minの条件では、ほぼ100%に近いマルテンサイトが生成するが、400 rpm, 25 mm/minの条件では、パーライトと約16 vol%のマルテンサイト組織となり、マルテンサイト量を減少させることが可能である。400 rpm, 25 mm/minの条件では、1432 MPaの引張強度で伸びが11%の機械的特性が得られる。回転速度を200 rpmに落とすことによって、さらに冷却速度を減少させ、全面パーライトの組織も得るこ

とが可能である。この場合、伸びが大幅に向上する。

一方、回転速度を減少させる(図6の上から下へ変化させる)ことによって、最高到達温度が減少する。200 rpm, 400 mm/minの接合条件では、最高到達温度はA₁点(723)以下となり、変態を伴わない接合が可能となる。この場合、得られた組織は極めて微細な球状セメントライトとフェライトの混合組織となり、強度、伸びとも備えた極めて理想的な組織を得ることができる。図7に示すように、400 rpmや600 rpmで接合を行うと、最高到達温度がA₁を超え、極めて硬く、脆い組織が得られるのに対して、200 rpmで行うと、硬さも母材よりやや向上した程度の値に抑えられ、強度とともに十分に伸びも確保される。

このような接合法は、まさに鋼材中の炭素量に関係なく、接合を行うことが可能で、今後の接合法および構造物設計に対して大きな変化をもたらす可能性がある。これまで不可能だった温度領域である700 ~ 900 程度の低温で接合を行うことにより、変態を伴う鉄鋼材料に対して、使用者の要求に応じて、自由度の高い強度設計が可能となる。このような接合は、接合温度の700 ~ 900 付近で高強度を示す超合金(WC)ツールを用いることで達成で

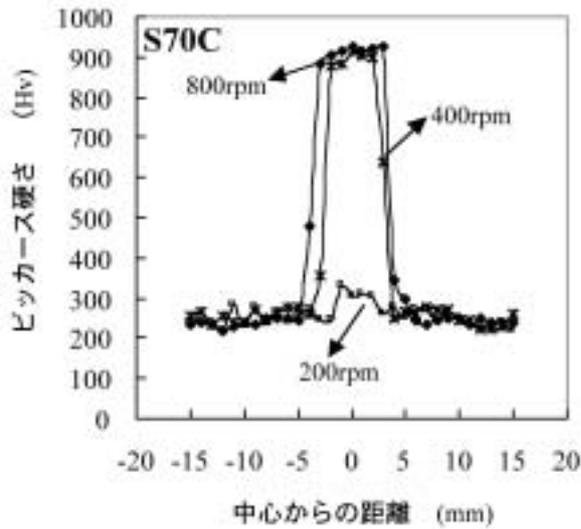


図7 攪拌部の硬さに及ぼす回転速度の影響
(400mm/min)¹³⁾

きる。

6. おわりに

これまで述べてきたように、摩擦攪拌接合はアルミニウム合金のみに限定されて用いられてきたが、2006年に鋼より1000以上も融点の高いモリブデン(2620)の摩擦攪拌接合が報告¹⁸⁾されており、鋼の摩擦攪拌接合に対する難易度が低下しているといえる。この他にも、Ni基超合金やTi合金、鋳鉄などで次々と摩擦攪拌接合に関する成功例が報告されている。

Al合金と比較して、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合の実用化が遅れている背景には、その接合が困難であるだけでなく、鉄鋼材料は従来の溶接法でも比較的十分に接合可能であったことが影響している。しかしながら、次第にさまざまな摩擦攪拌接合特有の特徴が発見、解明されてきた。

特に本稿で示した手法は、強度低下を引き起こし問題とされていた溶接・接合の過程において、母材よりさらに高強度化、高靱性化を図れる手法であり、まさにIn-situで組織制御が可能な接合法と言えよう。このような技術がきっかけとなり、近い将来、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合が幅広く使用される日が来ることを願っている。

謝辞

本研究の一部は、グローバルCOE、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、日本鉄鋼協会鉄鋼研究振興助成、岩谷、東レ科学振興研究助成の成果である。

参考文献

- 1) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes: *PCT/GB92/02203*, December 6, 1991.
- 2) R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, *Prog. Mater. Sci.*, 53 (2008) 980-1023.
- 3) R. S. Mishra and Z. Y. Ma, *Mater Sci Eng R* 50 (2005) 1-78.
- 4) 摩擦攪拌接合 - FSWのすべて -, 溶接学会編, 産報出版(2006).
- 5) 藤井英俊, 軽金属溶接, 45 (2007) 102-110.
- 6) E. D. Nicholas: Proc. Int. Conf. ICCA-6, Toyohashi, July 1998, 139.
- 7) K. Colligan: Proc. 1st Int. Symp. FSW, Thousand Oaks, USA, 14-16 June, 1999, 5-2.
- 8) T. J. Lienert, W. L. Stellwag, Jr., B. B. Grimmer and R. W. Warke: *Weld. J.*, 82 (2003), 1-S.
- 9) A. P. Reynolds, W. Tang, M. Posada and J. De Loach: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 8 (2003), 455.
- 10) C. D. Sorensen, T. W. Nelson and S. M. Packer: Proc. 3rd Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Kobe, Japan, (2001), CD-ROM.
- 11) M. Collier, R. Steel, T. W. Nelson, C. Sorensen and S. Packer: *Mater. Sci. Forum*, 426 (2003), 3011.
- 12) H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata and K. Nogi: *Mater. Sci. Eng. A*, 429 (2006), 50-57.
- 13) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: *Scripta Mater.*, 56 (2007), 637-640.
- 14) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji, K. Nakata, K. Nogi, R. Ikeda and M. Matsushita: *ISIJ Int.*, 47-2 (2007) 299-306.
- 15) R. Ueji, H. Fujii, L. Cui, A. Nishioka, K. Kunishige and K. Nogi: *Mater. Sci. Eng. A*, 423 (2006), 324-330.
- 16) H. Fujii, R. Ueji, Y. Takada, H. Kitahara, N. Tsuji, K. Nakata and K. Nogi: *Mater. Trans.*, 47 (2006), 239-242.

- 17) T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, H. Assadi and F. Malek Ghaini: Mater. Sci. Eng., A505 (2009) 157-162.
- 18) H. Fujii, H. Kato, K. Nakata and K. Nogi: Proc. 6th Int. FSW Symp., Montreal, Canada, 10-13 October, 2006, CD-ROM.
- 19) R. Ohashi, M. Fujimoto, S. Koga, R. Ikeda, M. Ono: Proc. 7th Int. FSW Symp., Awaji, Japan, 20-22 May, 2008, CD-ROM, 2-2.
- 20) W. M. Thomas, P. L. Threadgill and E. D. Nicholas: Sci. Technol. Weld. Join., 4 (1999), 365-371.

