鉄鋼材料の摩擦攪拌接合の現状と今後の展開

藤井 英俊*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 57, No. 11 (2007), pp. 499-505

Recent trends in friction stir welding of steels

Hidetoshi FUJII*

Keywords: friction stir welding, FSW, carbon steel, high carbon steel, transformation, stainless steel, corrosion, ultrafine grained steel

1. はじめに

1991年に英国TWIで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、この16年間にさまざまな産業分野で実用化されてきた^{2)~7)}。特に、わが国における摩擦攪拌接合技術開発は、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ている。

しかしながら、現状ではこれらのほとんどはアルミニウム合金に限定されており、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擦攪拌接合技術が望まれている。

研究レベルにおいては、1999年にThomasら⁸⁾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^{8)~16)}、IF鋼 (極低炭素鋼)^{16),17)}、ステンレス鋼^{18)~31)}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。

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合に関する研究が、アルミニウム合金などと比較して大幅に少ない理由の一つとして、ツール材料に必要とされる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。従来のツールは寿命、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おり、最近では、北米におけるパイプライン等の具体的な実用化も検討され始めている。

このような現状のもと、本稿では、将来における、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合の実用化の可能性を念頭に置きながら、これまでの研究の例を紹介する。

2. 鉄鋼材料のための摩擦攪拌接合装置

鉄鋼材料はアルミニウム合金に比べ強度が高く、鉄鋼材料を摩擦攪拌接合する際には、試料の温度は通常約1100~1200°C^{8),9)}まで上昇すると言われている。したがって、アルミニウム合金の場合と異なり、以下のような条件を満たす必要がある。

- (1) 大きな押込み荷重および装置の剛性
- (2) シールドガス機構および冷却機構
- (3) 高強度ツールの開発
- (4) ツールの形状の最適化

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合時に主軸に必要な荷重は試料の材質、厚さによって変化するが、おおむね1~8tである^{11),28),32)}。したがって、この荷重に耐えるだけの装置の剛性が要求される。また、高温にさらされる鉄鋼材料の摩擦攪拌接合の場合には、被接合材およびツールを保護する目的でArなどのシールドガスが必要である。さらに、装置全体の温度上昇を抑えるための冷却機構も不可欠である。

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アルミニウム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^{9),10)}、Mo合金⁹⁾などが用いられたが、最近では、高融点金属材料のほか、多結晶立方晶窒化ほう素 (PCBN) ツール^{18),33)}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。しかしながら、実用化を考えるとPCBN等も寿命、靱性の問題が残っており、最近では、Ir合金ツール³⁴⁾など極めて高強度、長寿命なツールも開発されている。

また、ツール形状に関しても、鉄鋼材料に特化した形状の最適化が必要である。上述のように、鉄鋼材料などの高融点金属に用いるツールに関しては、1000°C以上の接合温度でも強度や耐摩耗性を保持するセラミックスや高融点金属などのツール材料が不可欠であるが、一般にこれらの材料は加工が難しく、仮に複雑な形状を作製しても、それが割れの起点になりやすいため、できるだけ単純な形状でツールを作製することが必要である^{35),36)}。したがって、主に攪拌効率を求めるアルミニウム合金の接合に用いられる工具とは異なり、攪拌効率だけでなく、いかに単純な形状でツールを作製するかという設計指針が必要となる。

例えば、アルミニウム合金の摩擦攪拌接合において、最も一般的に用いられているツールは、円柱状のプロブに回転方向と逆のねじを切ったものであるが、円柱状でねじ加工し

*大阪大学接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)。Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1, Mihogaoka, Ibaraki-shi, Osaka 567-0047). E-mail: fujii@jwri.osaka-u.ac.jp
受理日:平成19年7月18日 受付日:平成19年7月30日

図1 鉄鋼材料のFSWの外観写真

ないプローブを持つツールで接合が可能であれば、より望ましいことになる。

Fujii らによると^{35),36)}, 5mm 厚の種々のアルミニウム合金板に対して、通常のねじのある円柱状ツール、ねじのない円柱状ツール、同じ円に内接する三角柱状のプローブを持つツールの3種類のツールを用いて摩擦攪拌接合を行った結果、最適なツール形状は、材料の塑性流動性によって大きく変化する。

例えば、1050 などの塑性流動がしやすい材料の場合には、ツールの攪拌効率は高くなるにつれて内部欠陥が生じやすいため、ねじのあるツールより、ねじのない円柱状ツールの方が望ましい。一方、6061 合金などの塑性流動性が中程度の材料の場合には、ツール形状に関係なくほぼ同等な接合強度が得られ、5083 合金など塑性流動がしにくい材料の場合には、ツール攪拌効率が高くなるにつれて接合可能条件範囲が大きくなるため、ねじのないツールは攪拌効率の観点からは望ましくない。しかしながら、ねじのない円柱状ツールの場合も、ツールの回転速度を減少させると良好な継手が得られることが明らかにされている³⁵⁾。

一般に、多くの鉄鋼材料においては塑性流動のしにくい材料(5083 合金など)の結果が参考になる。したがって、鉄鋼材料の接合を行う際には、一般に、ツールの回転速度はアルミニウム合金の場合と比較して小さい。

このようにして、上に示した4つの条件をすべて満たすことにより、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合が可能となる。図1に示すように、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合は、外観的にはアルミニウム合金の場合と異なりツールが赤熱する。しかしながら、最適接合条件下では、それ以外はアルミニウム合金の場合とあまり大きな違いはなく、比較的容易に良好な継手が得られる。

3. 炭素鋼

図2⁸⁾に Thomas らが最初に行った (a) 低炭素鋼および (b) 低炭素鋼と 12%Cr 鋼の組合せに対する摩擦攪拌継手の断面マクロ写真を示す。いずれも接合欠陥はなく、良好に接合されていることがわかる。また、図3は Reynolds らの示した炭素鋼 (DH36) 継手の硬さ分布¹⁰⁾ であるが、アルミニウムと同様に攪拌部は母材に比べて硬さが上昇する。

図4¹⁷⁾に示すように、ほぼ純鉄に近い IF 鋼の攪拌部の

図2 両面接合した (a) 低炭素鋼および (b) 低炭素鋼 / 12% Cr 鋼の断面マクロ写真⁸⁾ 図3 炭素鋼 (DH36) 継手の硬さ分布¹⁰⁾ 図4 純アルミニウムと極低炭素鋼 (IF 鋼) の攪拌部の再結晶組織¹⁷⁾

TEM 組織は、粒内に転位が少し存在するものの、再結晶組織でアルミニウムの場合と非常に似ている。このことから、アルミニウム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可能であることが理解できる。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アルミニウム合金の場合と同様である。

図5 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6 Fe-Fe₃C状態図¹²⁾

炭素鋼の摩擦攪拌接合はアルミニウム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、接合中の変態をいかに制御するかで、大きく継手強度が異なり、アルミニウム合金では観察されない多くの現象も起こり得る。最近、Fujii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5¹²⁾は、IF鋼（極低炭素鋼，20ppm C）および炭素量がそれぞれ0.12%、0.35%のS12CおよびS35C炭素鋼の攪拌部の機械的特性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5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、アルミニウム合金の結果と同程度の変化量である。

図6はFe-Fe₃C系状態図および用いた試料の組成を示すが、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（ α ）+パーライト領域（ α +Fe₃C）、A₁点とA₃点の間にあるフェライト（ α ）+オーステナイト（ γ ）

二相領域、A₃点以上のオーステナイト単相（ γ ）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、パーライトを基底（フェライト）中に分散できるA₁点以下のフェライト（ α ）+パーライト領域（ α +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+オーステナイト二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、最高強度が得られる¹²⁾。一方、母材がフェライト+球状セメンタ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100~400mm/minにおいては、図6のようなピークは存在しない。

4. 中・高炭素鋼

図7¹³⁾はS70C（0.70% C）の高炭素鋼の結果である。これは、ほぼ共析の組成の高炭素鋼である。このような材料に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7では、左側にいくに従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、400rpm、400mm/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、400rpm、25mm/minの条件では、パーライトと約16vol%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。400rpm、25mm/minの条件では、1432MPaの引張強さで伸びが11%の機械的特性が得られる。回転速度を200rpm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7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。200rpm、400mm/minの接合条件では、最高到達温度はA₁点（723°C）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タ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と言える。図8に示すように、400rpmや800rpm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、200rpm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°C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。また、上述の接合思想と若干異なるが、過共析鋼の摩擦攪拌接合³⁷⁾も報告されている。

5. ステンレス鋼

オーステナイト系ステンレス鋼については、これまでに304^{18)~26)}、304L^{27)~28)}、および301L鋼²⁵⁾に関するいくつかの研究報告がある。ステンレス鋼のFSWにおける最大の課題

図7 S70Cの接合条件と接合部組織の関係¹³⁾ 図8 攪拌部の硬さに及ぼす回転速度の影響 (400mm/min)¹³⁾ 図9 304ステンレス鋼継手の硫酸・硫酸第二鉄腐食試験後の断面写真, (a) 摩擦攪拌接合 (PCBN ツール) と (b) 溶融溶接 (GTAW)²⁰⁾

は、ツールの摩耗と耐食性の低下であり、実用化に向けて依然大きな課題が残されている。

当初の課題となっていた接合性に関しては、Ishikawaら^{25)~26)}によって、板厚1.5mmの304ステンレス鋼を1m/minで接合し、約85%の継手効率を得られるようになり、実用化に向けた初期段階はクリアした感がある。今後は、厚板に対する展開が期待される。

耐食性に関しては、Parkら^{20),21)}によって詳細に検討されている。図9にParkら²⁰⁾が報告した硫酸・硫酸第二鉄腐食試験後の摩擦攪拌接合部および溶融溶接 (GTAW) 部断面の光学顕微鏡写真を示す。このとき、摩擦攪拌接合ではPCBNツールを用いている。摩擦攪拌接合では接合温度が低いため、

熱影響部における粒界腐食は、同程度の接合深さの溶融溶接に比べて抑制されていることがわかる。しかしながら、攪拌部の前進側 (advancing side) において、溶融溶接を超える腐食が生じ、耐食性が低下している。前進側には、特異な組織としてバンド組織が形成している。また、バンド組織中の粒界や粒内に微細な析出物が認められ、EDX分析および電子回折図形から、析出物は内部に多数の積層欠陥を含むシグマ相と同定されている。通常304鋼でのシグマ相析出には長時間を要するが、ParkらはFSW過程ではその析出が加速されると推察している。その加速の要因としてFSW時の δ フェライトの一時的形成および高ひずみと再結晶によるシグマ相への分解の著しい促進を挙げている。なお、304鋼母材板厚が

図 10 W-Re 合金ツールを用いた 304 ステンレス鋼 FSW 継手の EPR 試験による再活性化電流比²⁴⁾

図 11 SAF2507 二相ステンレス鋼 FSW 部のフェライト量分布³¹⁾

2mm と薄く FSW 過程の冷却速度が速い場合には、シグマ相が見られず δ フェライトが確認されている²³⁾。

また、最近、Sato ら²⁴⁾ によって、PCBN ツールではなく、W-Re ツールを用いると、耐食性が大幅に向上するという報告がなされた。W-Re ツールで接合した FSW 継手の EPR 試験により測定した各領域の鋭敏化度を図 10 に示す。鋭敏化度は、熱影響部 (HAZ) および攪拌部前進側 (SZ-AS) では母材よりは若干高いものの溶融溶接部の熱影響部の約 1/3 とかなり抑制されている。特に、前進側の値は PCBN ツールを用いた場合の 1/10 以下である。

オーステナイト系ステンレスと比べると数は多くないが、フェライト系ステンレス³⁰⁾ や二相ステンレス鋼³¹⁾ の摩擦攪拌接合に関する研究も報告されている。いずれも良好な継手が得られる。

フェライトとオーステナイトの二相ステンレス鋼の溶融溶接では、溶接金属でのフェライト量の増大が問題となるが、FSW ではフェライト量が母材と同程度に維持される。図 11 に SAF2507 二相ステンレス鋼継手のフェライト量分布³¹⁾ を示すが、継手全体として母材と同程度の均一なフェライト量分布が保たれていることがわかる。

6. 超微細粒鋼

近年、様々な手法を用いて結晶粒を $1\mu\text{m}$ 以下に微細化す

ることが可能となり、通常の材料の数倍の強度を持つ材料が作製され、工業的にも注目されている。実用化を考えると接合技術は不可欠であるが、このような材料を従来の溶融溶接法で接合すると、溶接部で結晶粒が粗大化するため、強度が大幅に低下するという問題点がある。これに対して、摩擦攪拌接合は固相接合法であり、さらにツールによる攪拌が行われるため、結晶の粗大化を抑制できる可能性があり、このような特殊な材料の接合法の一つとして有望視されている。

Fujii らは、自動車用の鋼板等に用いられる IF 鋼 (極低炭素鋼)^{16),17)} および炭素鋼 (SM490)¹⁵⁾ に対してそれぞれ繰返し重ね接合法またはマルテンサイト法を用いて、結晶粒が $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒材を作製し、摩擦攪拌接合による接合性について詳細な検討を行った。図 12 は IF 鋼の超微細粒材を摩擦攪拌接合した場合の接合方向に垂直な断面の EBSP カラーマップを、通常の IF 鋼 (通常粒径材) および超微細粒材を熱処理した後に摩擦攪拌接合した場合と合せて示している。

通常の IF 鋼の場合には、摩擦攪拌接合によって、攪拌部の結晶粒径が $2\mu\text{m}$ 程度に微細化されるため、硬さが母材に比べて上昇するが、超微細粒材の場合には、攪拌部の粒径は $1.5\mu\text{m}$ 程度と小さいが、母材 ($0.65\mu\text{m}$) と比較すると相対的に結晶粒が大きくなり、硬さが大幅に低下することがわかる。この問題に対しては、接合前に熱処理し、結晶粒を $2\mu\text{m}$ 程度まで粒成長させ、材料内のひずみエネルギーを低下させれば、摩擦攪拌接合後の結晶粒の大きさは最小となり、強度の低下が抑えられる¹⁷⁾。これは、図 13 に示すビッカース硬さ分布においてそれぞれの試料の最低硬さを比較すると、接合前に熱処理した材料の継手強度が、通常材および超微細粒材のいずれの継手より高いことが理解できる。

マルテンサイト法¹⁵⁾ は、炭素鋼の超微細粒化に有効な、新しい微細化手法である。いったん、焼入れを行い、組織をマルテンサイト化した後に、圧延によりそれを微細化し、最終的に熱処理を行うことによりフェライト化を図り、粒径約 300nm の超微細粒炭素鋼を製造する。得られた超微細粒材を種々の接合条件、施工条件で摩擦攪拌接合を行うことにより、マルテンサイト化、圧延による微細化を行った直後に摩擦攪拌接合を行い、最終プロセスとして熱処理を行うのが最も望ましいことが明らかとなった¹⁵⁾。熱処理の際には、攪拌部の強度 (硬さ) 変化はほとんどなく、母材部だけが、微細なフェライト組織に変化することで、母材と接合部のバランスが最もよく、継手として最高強度が得られる。

一方、Hirano ら³⁸⁾ は、 $1.6\sim 1.7\mu\text{m}$ の粒径の微細粒鋼 (SM490 相当: $0.14\% \text{C}$) に対して、熱処理等を行わずに摩擦攪拌接合を行うのみで、継手効率が 88% 得られるとしている (図 14)。これは、炭素鋼の場合には相変態を伴うため、ベイナイトやマルテンサイト等の急冷相が生成した場合には、フェライト粒径が大きくなっても、攪拌部の強度が母材より向上する場合があることを示している。しかしながら、同様な炭素鋼においても、わずかに組成や接合条件が異なると、得られる強度が大きく変化するので、上述のように、熱処理による制御が不可欠である場合もあると考えられる。

7. おわりに

昨年、鋼より 1000°C 以上も融点の高いモリブデン (2620°C) も摩擦攪拌接合が可能となり³⁴⁾、鋼の摩擦攪拌接合に対

図12 極低炭素鋼 (IF 鋼) の攪拌部の粒成長に及ぼす初期結晶粒径の影響¹⁷⁾

図13 結晶粒の異なる極低炭素鋼 (IF 鋼) の FSW 継手の断面の硬さ分布¹⁷⁾

する難易度が低下しているといえる。このほかにも、Ti 合金^{39)~43)}、Ni 基超合金⁴⁴⁾、鋳鉄^{45),46)}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。

アルミニウム合金と比較して、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、本稿で述べたように、さまざまな摩擦攪拌接合特有の特徴が発見、解明され

図14 1.6~1.7 μm の粒径を持つ SM490 鋼 (0.14% C) の引張試験結果³⁷⁾

てきた。これらを活用して、構造材料の大部分を占める鉄鋼材料に摩擦攪拌接合が適用されるようになれば、産業界に与える影響は計りしれない。今後のさらなる発展に期待したい。

なお、本稿では鉄鋼材料に特化してまとめたが、摩擦攪拌接合全般や最新情報に関しては、詳しい著書⁴⁷⁾や解説⁴⁸⁾があるので参照されたい。

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) H. Okamura, K. Aota, and M. Ezumi: J. Jpn. Inst. Light Met., **50** (2000), 166–171.
 - 3) G. Campbell and T. Stotler: Welding J., **78** (1999), 45–47.
 - 4) M. R. Johnsen: Weld. J., **78** (1999), 35–39.
 - 5) K. E. Knipstron and B. Pekkari: Weld. J., **76** (1997), 55–57.
 - 6) C. J. Dawes and W. M. Thomas: Weld. J., **75** (1996), 41–45.
 - 7) H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda and K. Nogi: J. Mater. Proc. Tech., **142** (2003), 692–696.
 - 8) W. M. Thomas, P. L. Threadgill and E. D. Nicholas: Sci. Technol. Weld. Join., **4** (1999), 365–371.
 - 9) T. J. Lienert, W. L. Stellwag, Jr., B. B. Grimmer and R. W. Warke: Weld. J., **82** (2003), 1–S.
 - 10) A. P. Reynolds, W. Tang, M. Posada and J. DeLoach: Sci. Technol. Weld. Join., **8** (2003), 455.
 - 11) A. Ozekcin, H. W. Jin, J. Y. Koo, N. V. Bangaru and R. Ayer: Intern. J. Offshore Polar Eng., **14** (2004), 284.
 - 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** (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, L. Cui, N. Tsuji, R. Ueji, K. Nakata and K. Nogi: Proc. High-Performance Materials Symposium on Advanced Welding of Structural Materials, 15th ISOPE, Seoul, (2005), IV, 22.
 - 17) H. Fujii, R. Ueji, Y. Takada, H. Kitahara, N. Tsuji, K. Nakata and K. Nogi: Mater. Trans., **47** (2006), 239–242.
 - 18) C. D. Sorensen, T. W. Nelson and S. M. Packer: Proc. 3rd Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Kobe, Japan, (2001), CD-ROM.
 - 19) A. P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold and H. Prask: Scripta Mater., **48** (2003), 1289.
 - 20) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Scripta Mater., **49** (2003), 1175.
 - 21) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Scripta Mater., **51** (2004), 101.
 - 22) Y. S. Sato, T. W. Nelson, C. J. Sterling: Acta Mater., **53** (2005), 637.
 - 23) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Science and Technology of Welding and Joining, **10-5** (2005), 550–556.
 - 24) Y. S. Sato, M. Muraguchi, H. Kokawa: Friction Stir Welding and Processing IV, Edited by R. S. Mishra, M. W. Mahoney, T. Lienert and K. V. Jata, TMS, (2007), 261–268.
 - 25) 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.
 - 26) T. Ishikawa, H. Fujii, S. Iwaki, S. Matsuoka and K. Nogi: Proc. 6th Int. FSW Symp., Montreal, Canada, 10–13 October, 2006, CD-ROM.
 - 27) C. D. Sorensen, T. W. Nelson and S. M. Packer: Proc. 3rd Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Kobe, Japan, (2001), CD-ROM.
 - 28) A. P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold and H. Prask: Scripta Mater., **48** (2003), 1289.
 - 29) X. K. Zhu and Y. J. Chao: J. Mater. Process. Technol., **146** (2004), 263.
 - 30) S. H. C. Park, T. Kumagai, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Proc. High-Performance Materials Symposium on Advanced Welding of Structural Materials, 15th ISOPE, Seoul, (2005), IV-6.
 - 31) Y. S. Sato, T. W. Nelson, C. J. Sterling, R. J. Steel and C.-O. Pettersson: Mater. Sci. Eng. A, **397** (2005), 376.
 - 32) S. Kilingsmith, J. N. DuPont and A. R. Marder: Weld. J., **84** (2005), 77s.
 - 33) M. Collier, R. Steel, T. W. Nelson, C. Sorensen and S. Packer: Mater. Sci. Forum, **426** (2003), 3011.
 - 34) H. Fujii, H. Kato, K. Nakata and K. Nogi: Proc. 6th Int. FSW Symp., Montreal, Canada, 10–13 October, 2006, CD-ROM.
 - 35) H. Fujii, L. Cui, M. Maeda, K. Nogi: Mater. Sci. Eng. A, **419** (2006), 25–31.
 - 36) 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.
 - 37) Y. S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Furuhashi: Scripta Mater., in press.
 - 38) S. Hirano, K. Okamoto, S. H. C. Park, K. Aota and T. Tsukamoto: Mater. Sci. Forum, **539–543** (2007), 3727–3732.
 - 39) W. B. Lee, C. Y. Lee, W. S. Chang, Y. M. Yeon and S. B. Jung: Mater. Letters, **59** (2005), 3315–3318.
 - 40) A. J. Ramirez and M. C. Juhas: Mater. Sci. Forum, **426–432** (2003), 2999–3004.
 - 41) R. John, K. V. Jata and K. Sadananda: Inter. Jour. of Fatigue, **25** (2003), 939–948.
 - 42) A. P. Reynolds, E. Hood and W. Tang: Scripta Mater., **52** (2005), 491–494.
 - 43) H. Fujii, H. Kato, K. Nakata and K. Nogi: Ceram. Trans., **198** (2007), 51–56.
 - 44) F. Ye, H. Fujii, T. Tsumura and K. Nakata: “Friction Stir Welding of Inconel Alloy 600”, J. Mater. Sci., **41** (2006), 5376–5379.
 - 45) 山口泰文, 藤井英俊, 木口昭二, 野城 清: 鑄造工学, **79** (2007), 643–648.
 - 46) 山口泰文, 藤井英俊, 木口昭二, 野城 清: 平成 18 年度溶接学会春期全国大会講演概要集, **78** (2006), 60–61.
 - 47) 摩擦攪拌接合—FSW のすべて—, 溶接学会編, 産報出版, (2006).
 - 48) 藤井英俊: 軽金属溶接, **45** (2007), 102–110.