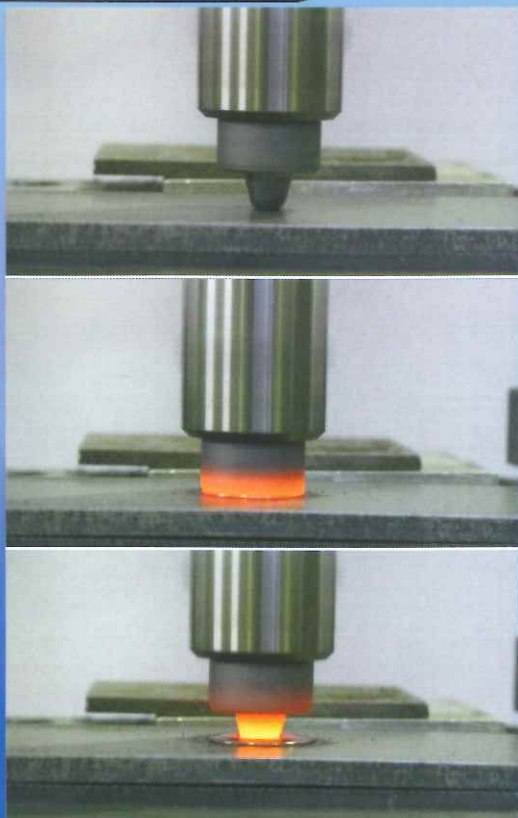




FSWを発展させた摩擦攪拌点接合(FSSW)は自動車分野で今、注目を集めている。写真は摩擦攪拌点接合の様子。上から鉄鋼材料に接合ツールを挿入前・中・後の様子。

写真提供:川崎重工業(株)

FSW

鉄鋼材料への 新展開

鉄道車両や造船、航空宇宙分野など、さまざまな分野で実用化が進む摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding、FSW)。これまでのアルミニウムを中心とした展開から、最近では鉄鋼材料に対して、実用化を見すえた研究が活発化している。

世界が求める画期的な接合技術

今年度中には、FSW(摩擦攪拌接合)の国際規格が承認される見通しとなっている。国際標準化には日米欧の10か国が参加し、幹事国は米国となっている。FSWは国内外に特許保有者が多く、その特許が現在有効な状態にあるにも関わらず、標準化が進むことはきわめて異例である。それほどFSWは多くの分野が活用を望む画期的な技術といえよう。これまでFSWは特許の関係で使用の制限があったが、標準化によって用途は拡大していくと期待されている。

注目されるFSWとは、1991年に英国溶接研究所(TWI)で開発された接合技術である。高速で回転するツールを材料中に挿入し、移動させることで、摩擦熱で材料を軟化させると同時に、ツールの回転により材料を攪拌することで接合する(原理等については連携・入門講座を参照)。

固相状態で接合するため、接合欠陥が少ない、入熱が小さく継手強度が高い、裏面が平坦、歪が少ない等、さまざまな特長がある。また作業環境が良好で、省エネルギーに優れる等の施工上の利点もある。

FSWは溶融溶接が困難なアルミニウムを中心に実用化が先行しており、海外では船舶、日本では鉄道車両などで実用化さ

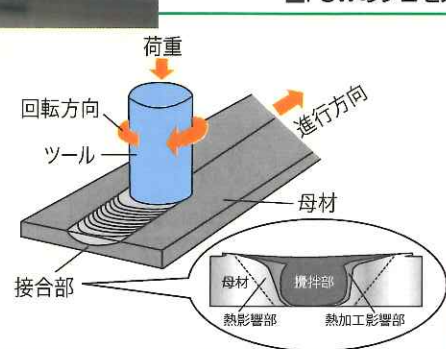
れている。最近では自動車部品にも適用が広がりつつある。アルミニウムのFSWにおいては、プロセス開発、接合部の諸特性や組織に関する多くの研究が行われ、また国際標準化も進められている。

一方、鉄鋼材料に対しては、FSWの研究はこれまであまり進展してこなかった。その理由は、ツールにある。従来のFSWツ



鉄鋼材料のFSWの様子
写真提供:大阪大学・藤井英俊教授

■FSWのプロセス



■ ツール開発の例

酸化に強く、融点の高いIr合金を用いたツールが開発されている。



応力が集中しないよう形状が工夫されている。ネジのない単純な形状は加工しにくい材料を用いたツールに適している。

資料提供: (株)フルヤ金属

● ツール寿命の評価

接合距離(m)	接合部	ツール挿入深さ(mm)	FSW 後のツールの状況
0.5		1.38	
10		1.38	
20		1.42	
30		1.44	
40		1.52	
50		1.52	
60		1.52	
70		1.53	

最もツールの摩耗が激しいオーステナイト系ステンレス鋼に対して、Ir合金ツールのFSW耐久性テストが行われた。ツールの挿入深さを変えながら接合し、1330rpm-320mm/minの条件で75mの接合が可能であった。

ルでは、鉄鋼材料を接合すると、ツールの先端が摩擦熱などの影響で高温となり、損傷してしまう。また既存の溶接技術が確立していることも、研究の遅れの要因となっていた。しかし近年、ツールの問題が大幅に改善してきたことから、鉄鋼材料に対しても研究が活発に行われるようになってきている。

鍵となる鉄鋼材料用ツールの開発

研究が活発化している背景にはツールの進化がある。接合部に発熱と攪拌を生じさせるツールは、FSWにおける最も重要な要素であり、その材質と形状が変わることによって、接合品質も変化する。つまり、FSWはツールに大きく依存した接合技術といえよう。

一般的にはツールは円柱形で、先端部の端面に小突起を有する。特に小突起の形状は接合品質や生産性向上に結びつくため、ネジ加工が施され、断面も非円形のものや、らせん状に溝があるものなど、多種多様である。また最近ではネジのない単純な形状のものも、加工が難しい材質のツールでは用いられている。これまでさまざまなツールが開発されてきたが、形状は各メーカーのノウハウの塊となっており、詳細はほとんど公表されていない。

ツールの材質としては、アルミニウムのFSWでは工具鋼が使用されている。しかし、鉄鋼材料は1000℃以上で接合が行われるため、工具鋼のツールでは軟化あるいは溶融して接合できない。従って、鉄鋼材料のFSWには、高温における強度と靱性、耐摩耗性、被接合材との非反応性を持つツールが求められる。

タングステンやモリブデンに加えて、最近では多結晶立方晶窒化ほう素(PCBN)などのセラミックス材料、超合金等が用いられたツールが開発されている。なかでもPCBNツールは米国で開発され、高温強度に優れることから有望視されているが、破壊靱性が小さいためツールの欠損が生じやすく、また高価である。最近ではコバルト基合金やイリジウム合金等を使用したツールも国内で開発されている。

現在、さまざまな種類の鉄鋼材料用ツールが開発・提案されているが、いずれも商業ベースでの実用化の域には達しておらず、課題が残っている。さらに高強度で長寿命なツールが開発されれば、多くの鋼種への適用が考えられる。鉄鋼材料には、今後どのような種類のツールが主流となるのか、開発動向に関心が集まっている。

鉄鋼材料へのFSW 適用の可能性

初めて鉄鋼材料のFSW研究が発表されたのは1999年で、低炭素鋼と12%Cr鋼の接合に適用したところ、接合欠陥がなく、良好な結果が得られたことから、以降、さまざまな鋼種を対象としたFSW研究が活発に行われるようになった。

近年では、純鉄や低炭素鋼、IF鋼(極低炭素鋼)、高炭素鋼、高張力鋼、ステンレス鋼、鋳鉄など、鉄系材料を対象とした研究報告が次々となされている。また鋼構造物への適用も検討されており、北米ではパイプライン用鋼管の研究が行われている。

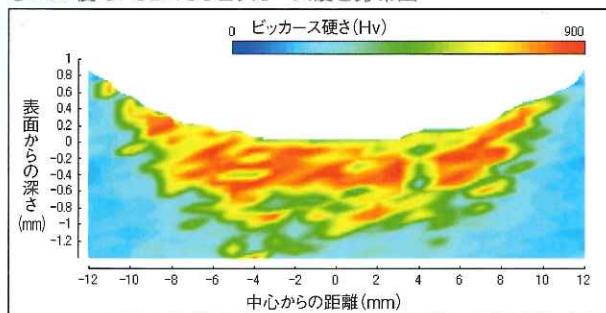
FSWの接合条件はツール回転速度と接合速度(ツールの移動速度)が重要となる。鉄鋼材料の場合、接合条件は材料

微細化現象を材料の特性改善に生かす FSP

FSWの特徴的な攪拌部組織の微細化現象を材料の特性改善に生かす試みが行われている。これはFSP(Friction Stir Processing)と呼ばれ、これまでアルミニウムを中心に行われてきた。例えばアルミ鋳造品の表面改質に応用すると、鋳造品の表層部に存在する気孔を除去したり、機械的特性の向上を図ることができる。

一方、鉄鋼材料にFSPを行うと、アルミニウム以上の効果が得られると言われている。一般に鉄鋼材料や鋳鉄は摩擦攪拌中に、1000℃近くで強ひずみ加工を受け、動的再結晶によってオーステナイト粒が微細になる。さらに局所加熱されるため、大きな冷却速度が得られ、通常の焼入と比較して非常に微細なマルテンサイトが形成される。また入熱量が既存の方法に比べ小さいため、材料の変形が抑制され、後処理が不要または少ない等の利点がある。

●FSP後のFCD450ビッカース硬さ分布図



ツール回転速度900rpm、ツール移動速度50mm/min、荷重5tonでFSPを行ったところ、表面より左右10mm、深さ1.2mmと広範囲に深く硬化層が分布していることがわかる

FSPによる特性改善の研究例もある。例えばパーライト基地組織である片状黒鉛鋳鉄FC300と球状黒鉛鋳鉄FCD700にFSPを施したところ、いずれも硬度は700～900Hv程度となった。また従来の熱処理法では硬化が期待できなかったダクタイル鋳鉄(球状黒鉛鋳鉄):FCD450にFSPを施したところ、800Hv以上の値を広範囲にわたって得ることができた。母材の硬度が200Hv程度であるから、大幅に硬度が向上したことがわかる。これはアルミニウムに比べても高い硬化率となっている。組織はきわめて微細なマルテンサイト組織が形成されていた。この技術は現在、工作機械等の鋳物構造物への適用が検討されている。

また米国では、工具鋼にFSPを施した刃物が実用化されている。この刃物は旧オーステナイト粒界やマルテンサイト組織が微細になっており、結晶粒が小さいことから刃欠けの量が小さく、切れ味が長期間維持されるという。



硬さ800Hvを示した部分の顕微鏡組織
きわめて微細な針状のマルテンサイト組織が生成している

資料提供:大阪大学・藤井英俊教授

や板厚、ツールの材質によって大きく異なり、一般的にはツール回転速度が150～600rpm、接合速度が100～1000mm/minとなっている。また接合中に到達する最高温度は1000～1300℃である。

接合部は、逆三角形の形状をしており、中央が「攪拌部」、その外側が「熱加工影響部」、その外側が「熱影響部」と呼ばれる。FSWは攪拌部の組織が、母材に比べて非常に微細な再結晶粒で構成されるのが特徴的である。攪拌部の微細粒組織は、固相攪拌に伴う再結晶で得られた微結晶粒が、攪拌後の冷却過程で静的に粒成長することによって形成される。

鋼やチタンのように固相変態が生じる場合、接合中の最高到達温度が変態点を超えることが多く、攪拌中に形成された再結晶粒組織の痕跡がほとんど見られなくなる。しかし回転速度を低下させ低入熱とすることで、変態点以下での接合が可能となり、炭素鋼やチタンでも微細な再結晶粒組織が観察できるよう

になる。

FSWによる攪拌部組織の微細化現象によって、接合部が母材より特性が向上するという、画期的な効果をもたらすケースもある。例えば炭素鋼(DH36)のFSW継手の引張強度は、母材の降伏応力および最大引張強さ以上の値が出ている。

期待される難接合材への適用

鉄鋼材料のなかでも、FSW適用が期待されているのが難接合材である。

なかでも高張力鋼は、軽量化要求から自動車や橋梁などへの適用が増加しているが、高張力鋼の溶融溶接では水素による遅れ割れが発生したり、過大な入熱により機械的特性の劣化などが生じることがあり、高度な溶接技術を必要とする。そこ

で、固相接合であるFSWによって、これらの問題が抑制されることが期待されている。

これまでの研究で、590MPa級以下の高張力鋼は通常の炭素鋼のFSW接合プロセスでも問題は生じないが、780MPaを超えるフェライト-マルテンサイト系の鋼材でマルテンサイトの量が多くなると、熱影響部の軟化が生じやすくなることが知られている。そのため780MPaを超える高張力鋼板のFSW技術の開発が必要であり、研究が行われている。例えば780～1180MPa級高張力薄鋼板に対して、超硬合金ツールを使用し、ツールの回転速度を低下させ低入熱とすることで、接合欠陥が無く、熱影響部の軟化が小さい継手を得られることが報告されている。

また、他の難接合材料として高炭素鋼が挙げられる。自動車分野においては一般に0.15wt%を超える炭素鋼はほとんど用いられていない。なぜならば、これ以上の炭素を含む鉄鋼材料を抵抗スポット溶接すると、溶接時に融点まで温度が上昇し、冷却時に硬くて脆いマルテンサイト相が生成して割れが発生するためである。このため、炭素量が高くても接合可能な方法が求められている。

そこで、FSWの接合条件を最適化することで、変態を制御し、継手を高強度化する方法が提案されている。例えばS70C(0.7%C)の高炭素鋼に対して接合条件の検討を行ったところ、ツール回転速度400rpm、接合速度400mm/minでは、ほぼ100%に近いマルテンサイトが生成するが、回転速度を200rpm、接合速度400mm/minにすると、最高到達温度はA1点(723℃)以下となり、マルテンサイト変態を伴わない接合が可能

であることが判った。組織は微細な球状セメンタイトとフェライトの混合組織で、強度、伸びとも備えた理想的な組織が得られる。この方法では炭素量に関係なく炭素鋼が接合でき、さらに接合中に組織を制御できるため、用途に応じた強度設計が可能になるとしている。

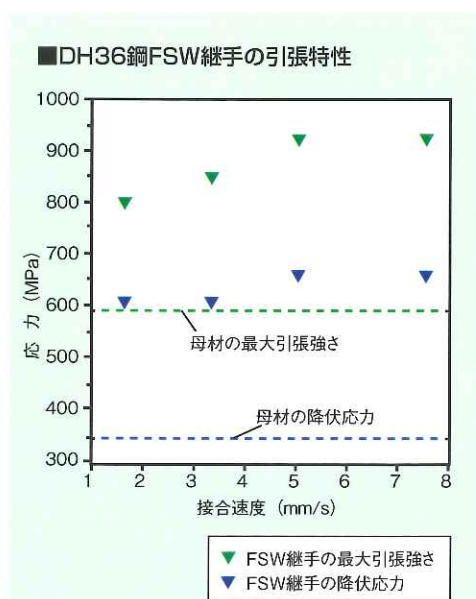
自動車分野で注目される FSSW

FSWを発展させた新技術として注目されているのが摩擦攪拌点接合である。この方法は摩擦点接合(Spot Friction Welding)、フリクションスポット接合(Friction Spot Joining, FSJ)、FSSW(Friction Stir Spot Welding)など、さまざまな呼び名があるがここではFSSWを用いる。

FSSWは、回転する接合ツールを材料中に挿入し、摩擦熱により材料を軟化、攪拌し、上下の材料を接合させる方法で、攪拌後はツールを引き抜く。FSWとは異なりツールを移動させないシンプルな方法である。

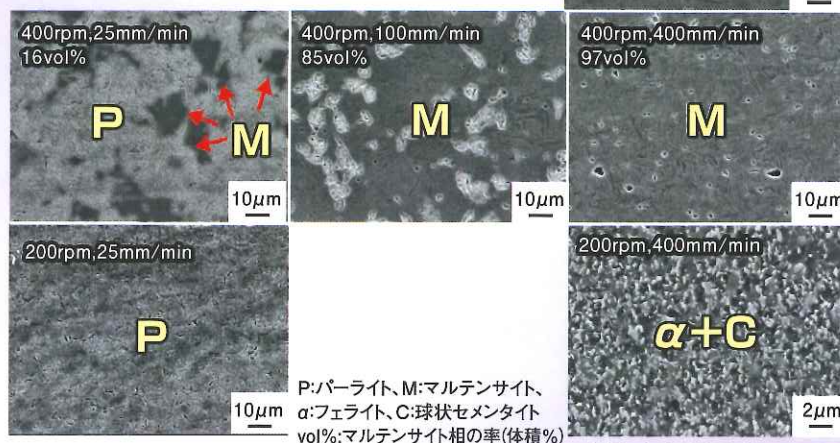
FSSWの適用が期待されているのが、高張力鋼や異種材料の接合である。高張力鋼を用いた自動車ボディの組立に用いられる抵抗スポット溶接は、高張力鋼の母材強度が高い場合、安定した接合が難しい等の問題点が指摘されている。これらを克服する接合技術としてFSSWは期待されており、すでにアルミニウムにおいては実用化が進んでいる。

また、2003年にマツダが自動車のトランクリッドで鉄鋼材料



■S70C(0.7%C)の接合条件と接合部組織の関係

高炭素鋼に対して回転速度と接合速度を変えて接合したところ、さまざまな組織が得られた。特に回転速度を200rpm、接合速度400mm/minにすると(右下の写真)、組織は微細な球状セメンタイトとフェライトの混合組織となった。



資料提供: 大阪大学・藤井英俊教授

とアルミニウムのFSSWに初めて成功し話題となったが、近年、異種材接合に関する研究が活発化している。溶融溶接による異種接合は非常に困難であるが、熱量の少ないFSSWでは、接合界面に脆い相の形成が抑えられるという利点があるため、異種接合法としての適用が期待されている。

鉄鋼材料のFSSWにおいて、課題となっているのがツールの耐久性と価格である。FSSWでは、冷間で急激に加えられる回転負荷や高温からの冷却に耐えることが求められる。そこで種々のツール材料が検討されているが、窒化珪素(Si_3N_4)を用いたツールで2000打点以上の耐久性が確認されている。ツールの耐久性向上には、窒化珪素と鋼材との反応を抑えるためツール表面にTiC/TiNコーティングが施されている。

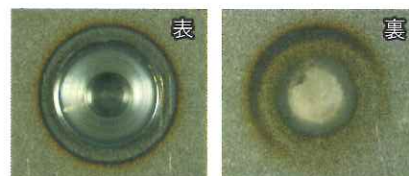
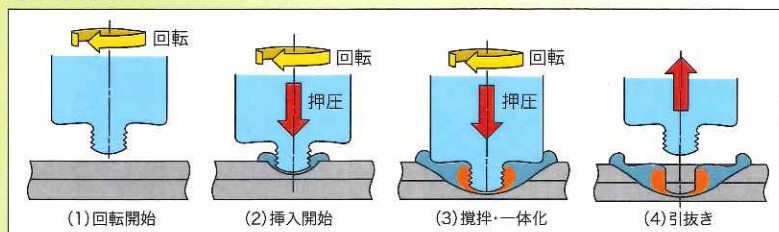
このツールを用いて、自動車ボディに多用されている二相組織高強度鋼板(DP鋼板)に対してFSSWを行ったところ、欠陥のない接合部が得られた。また、さまざまな強度の高張力鋼板に

FSSWを行い、継手の引張せん断強度を調べたところ、いずれもJIS-A級の要求値を満たしている。今後の実用化には、ツールのさらなる耐久性向上が必要となっており、1000MPa以上の高張力鋼板への適用を目指し、コーティング品質の安定化や新しいコーティング材料の開発が取り組まれている。

鉄鋼材料用ツールの性能は着実に向上しているが、それでもFSSWの実用化には、まだ超えなければならないハードルが幾つか存在する。長寿命で安価なツールをどこがいち早く開発し、市場に投入するか、積極的な開発が進められている。アルミニウムにおいてFSWは、これまでの大型構造物を中心とした展開から、近年では量産品への適用が始まっている。開発からわずか20年という驚くべきスピードでFSWは発展しており、今後、優れた鉄鋼材料用ツールが登場した際、鉄にはどのような効果をもたらすのだろうか。その可能性に多くの分野が注目している。

■FSSWの開発

●プロセス

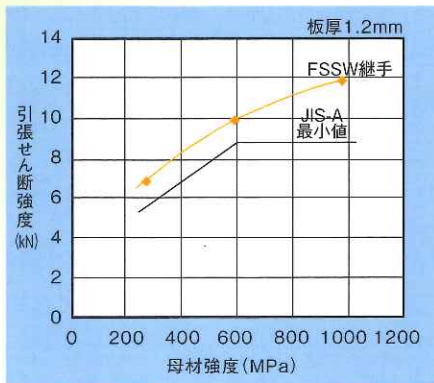


FSSW継手の外観は裏面が平坦なのが特徴である。



DP590のFSSW接合部断面
欠陥のない接合部が得られている

●各種高張力鋼板のFSSW継手の引張せん断強度



FSSWのロボットシステム

接合装置は、シンプルな機構となっており、接合ガンに2基のACサーボモータが備えられている。これによってガン先端に取り付けられたツールの加圧と回転を行う。抵抗スポット溶接のような冷却水や圧縮エア等も基本的に不要で、種々の周辺機器類を必要としない。

資料提供:川崎重工業(株)