

## 特集 中高炭素鋼の実用化を促進する 革新的な固相摩擦接合技術の開発



フラットFSW装置(左)と  
X線透過装置(右手前)  
(大阪大学)

摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) は材料を溶かさずに接合する固相接合法の一つで、1990年代に英国のTWI (The Welding Institute: 溶接研究所) が考案した技術です。従来の熔融溶接法と比べて、1) 接合部の強度低下が小さい、2) 接合後の変形が小さい、3) 溶加材やシールドガスが不要、4) 異種金属接合にも比較的適している、5) ヒュームやスパッタなどが発生せず作業環境に優れる、などの利点があります。

すでにアルミニウム合金同士の接合を中心に、新幹線をはじめとする鉄道車両、自動車、船舶など輸送機器の構造材の接合に活用されていますが、自動車の次世代構造材

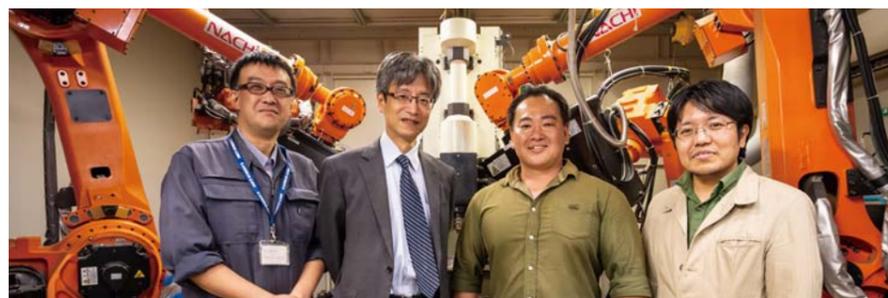
として期待されている中高炭素鋼<sup>\*1</sup>に適用するには、相変態<sup>\*2</sup>が引き起こす接合部の脆化やツールの摩耗が激しいなどさまざまな課題があります。

ISMAでは2016年度より、鉄鋼材料における接合技術開発のテーマとして「中高炭素鋼/中高炭素鋼の摩擦接合共通基盤研究」を掲げ、大阪大学を中心に新日鐵住金株式会社、JFEスチール株式会社、株式会社神戸製鋼所の鉄鋼3社と秋田大学、近畿大学、大阪府立大学が連携して、これまで接合が困難だった炭素量0.3%以上の中高炭素鋼の接合を可能にする技術を開発しています。

(※1-5は4面「鋼の基礎知識」を参照)

## 特集 | 中高炭素鋼の実用化を促進する 革新的な固相摩擦接合技術の開発

大阪大学は2006年に世界で初めてA<sub>1</sub>点<sup>\*3</sup>以下のFSWを発表し、2007年には高炭素鋼(S70C：炭素量0.65～0.75%)の接合に成功するなど、鉄鋼材料を中心としたFSW研究でめざましい成果を上げています。「中高炭素鋼／中高炭素鋼の摩擦接合共通基盤研究」のテーマリーダーを務める藤井英俊氏(大阪大学教授)の研究室を訪問し、研究の背景やこれまでの成果などについて伺いました。



左から青木祥宏特任講師(LFSW担当)、藤井教授、森貞好昭特任准教授(フラットFSW担当)、柳楽知也准教授

### 固相摩擦接合技術の中高炭素鋼への 適用でCO<sub>2</sub>を削減

— 研究の背景について教えてください。

藤井：CO<sub>2</sub>排出量の削減と衝突安全性向上の観点から、高強度鋼<sup>\*4</sup>の車体部品への適用は増加傾向にあり、特に引張強度(TS)980MPa級以上の超高強度鋼の使用は年々増加しています。本研究では自動車メーカーなどがTS1.5GPa以上

の中高炭素鋼を実用的に使える革新的な接合技術の開発を目指しています。FSWをはじめとする固相摩擦接合技術により中高炭素鋼の適用が進めば、CO<sub>2</sub>排出量と材料コストを低減させることができます。

FSWは接合中の最高到達温度が材料の融点よりも低く、摩擦熱による材料の軟化と塑性流動が接合の基本的な条件にな

るため、これまでアルミニウムやマグネシウムなど比較的低い温度で軟化する金属の接合法として開発されてきました。一方、中高炭素鋼の場合は、融点以下でも冷却時に相変態が起こって接合部が割れてしまうことや、母材が高強度でツールの摩耗が激しいなど、実用化には多くの課題があります。それらの課題を解決するため、本研究では固相摩擦接合技術の中でもツールを必要

としない線形摩擦攪拌接合法(Linear Friction Stir Welding: LFSW)とツールの耐久性を向上させる両面複動式摩擦攪拌接合法(フラットFSW)を開発しています。

### 薄板鋼板を無変態、 1秒で接合可能なLFSW

— LFSW法とはどのような技術でしょうか。

藤井：LFSWの基になる線形摩擦接合(Linear Friction Welding: LFW)は材料同士を押し付け、線形運動で擦りあわせた際に生じる摩擦熱を熱源とした固相接合法で、主に厚板の接合に適用されてきました。FSWのようなツールが不要で、

極めて短時間(約1秒)で接合できる点が優れています。しかし従来のLFWでは900℃程度で接合していたため、鋼の場合は冷却時の相変態による継手部の脆化の問題が解決できませんでした(図1)。

そこでこれまでFSWの研究で得た知見を生かして、界面近傍に大きなひずみを導入できるLFSWを開発しました。その開発の過程で新たに印加圧力の増加に伴って最高到達温度の低下が見られることを発見し、接合温度の低温化に成功しました(図2)。

LFSWは冷却時の継手の脆化抑制に加えて、薄板の接合では接合部のひずみの抑制にも効果があります。これまでに本プロセスを用いて厚さ2mmの継手作製に成功し、得られた継手の材料組織は、低温化によりマルテンサイト相<sup>\*5</sup>がない健全な組織となっています。また硬さ試験の結果からも、低温条件では硬化領域が全く観察されず、マルテンサイト変態の抑制によって接合部硬さを均一に母材と同等まで制御することに成功しています。

青木：今年度はさらに治具を改良することによって、よりきれいな接合面を実現しました(図3)。今後は自動車への適用を

見据えて、直線だけではなく複雑な断面形状を有する部材の接合や異種材料の接合も可能にすることが目標です。

### 接合部がフラットになる 両面複動式摩擦攪拌接合

— フラットFSW法について教えてください。  
藤井：通常のFSWでは、ツール先端のプロープ部は攪拌を促進するネジ加工がなされていますが、ネジ加工はツールの耐久性を低下させるため、中高炭素鋼の接合ではネジ加工なしでも上下の流れを発生させることができるフラットFSW法に注目しました。

フラットFSW法では、複動式ツールを用いて、接合界面に垂直な塑性流動を発生させることで、より積極的な攪拌が可能で、接合強度の向上につながるとともに、凹みを上下のツールにより無くすることができるので、最終的に接合部がフラットになり、美しい仕上がりを実現します(図5)。

森貞：フラットFSWは既存の装置がなく、装置の設計からスタートしました(表紙写真)。また、これまで開発されているあらゆるFSWを可能にするため複雑な動きが必要で、最大荷重が20トンとハイスペックなことに加えて、接合部を直接観察するX線透過装置を2台設置する必要があるなど、さまざまな要求を具現化する難しさがありました。

X線透過装置はまだ1台が未導入ですが、接合装置は稼働しています。これまでマグネシウムやアルミニウムでは理想的な継手が得られることを確認しており、今後は鋼同士の接合についても評価していきます。X線透過装置は透過率の差が大きい異種材料の評価により効果を発揮するので、異材接合にも活用できると期待しています。

柳楽：装置は基本的に育てていくものなので、よりよい研究成果を求めて改良を重ねています。

### LFSW

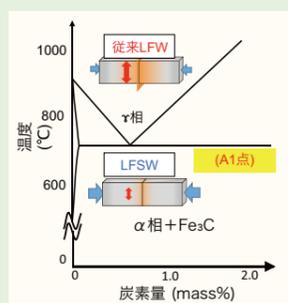


図1 従来LFWとLFSWの違い

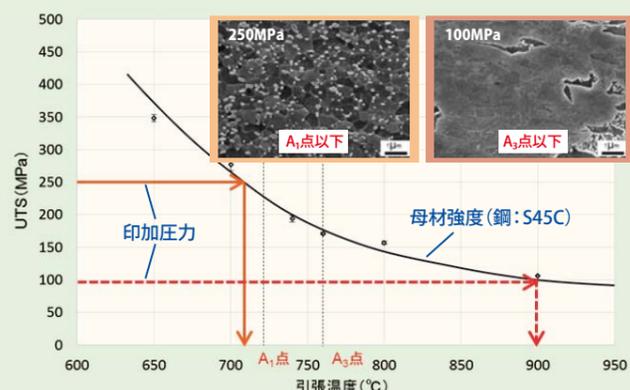
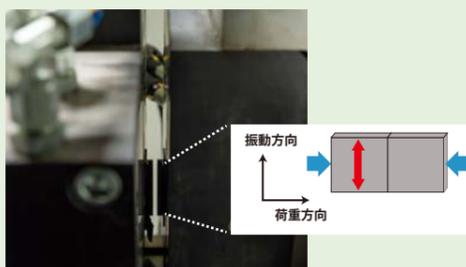


図2 母材強度(接合界面近傍)の温度依存性



LFSW装置の接合部とその動きのしくみ

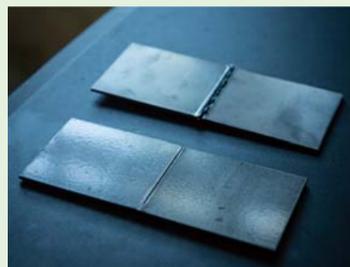
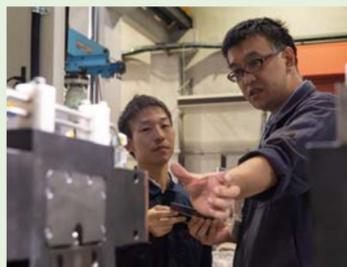


図3 接合後継手外観。手前は接合部がよりきれい



接合状態を学生と議論する青木氏(右)

### フラットFSW

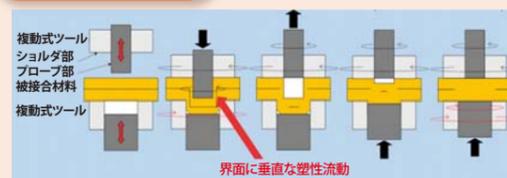


図4 フラットFSWのしくみ

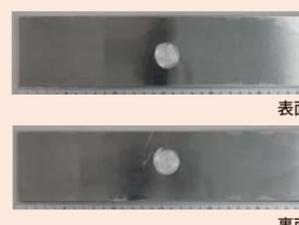


図5 接合片。表裏ともフラット



接合状態を確認する学生



フラットFSW装置のネジ加工のないプロープ。上下のツールで接合

## ■固相摩擦接合技術開発の拠点に

—今後の展望についてお聞かせください。

藤井：2017年度末までを技術検討フェーズと位置付け、LFSWやフラットFSW装置を導入し、本研究参画企業等が利用できるオープンラボを整備しました。今年度から実用化検討フェーズに移行し、摩擦接合技術開発の拠点となるべく、全参画者が一堂に会する研究推進合同会議も年4回主催して連携を深めています。また大学として、最先端の接合工学における基

礎研究を通じて、本分野の人材育成にも大きく貢献していきたいと考えています。

今年度中にはフラットFSW装置に2機のX線透過装置が完備され、あらゆる摩擦攪拌接合中の塑性流動解析を三次元で可視化(図6)できる環境が整います。これら施設を活用して本研究参画企業等との共同開発や自動車メーカーへのシーズ提供、ニーズ・情報収集などを積極的に進めていく予定です。具体的にはLFSWやフラットFSW技術の自動車ピ

ラーや外板の接合への適用可能性を見出し、実用化につなげていきたいと考えています。

接合強度の最終目標値として、突合せ摩擦接合技術(LFSW)に関しては、厚さ2mm、TS1.5GPa級中高炭素鋼で母材強度の70%以上、また、重ね摩擦接合技術(フラットFSW)に関しては、厚さ1.5mm、TS1.5GPa級中高炭素鋼で、引張せん断試験での継手効率70%以上を目指します。

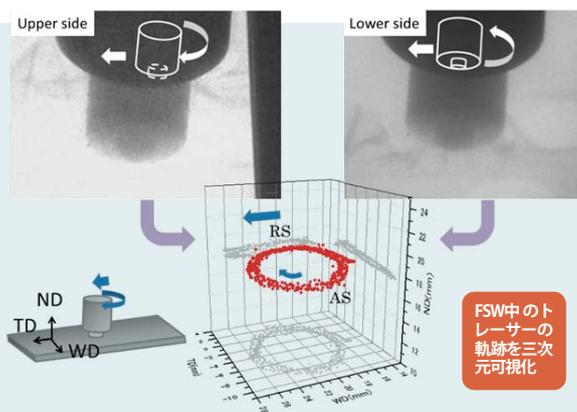


図6 X線透過装置によるFSW中の透過像

### 【参考】大阪大学接合科学研究所に設置されている固相摩擦接合装置

装置名	特徴	最大荷重
FSW1号機	市販機。手動操作での接合が可能	-
FSW2号機	鉄鋼材料用に開発したFSW	5トン
FSW3号機	ツールとショルダーの複動式のFSW。上下両面での接合が可能	4トン
FSW4号機	パイプ材の接合が可能	4トン
FSW5号機	大荷重での接合が可能	50トン
FSW6号機	X線により、FSW時の内部の流動観察が可能	3トン
FSW7号機	超小型FSW	-
FSW8号機	高回転速度での接合が可能	6トン
FSW9号機(フラットFSW)※	あらゆるFSWの接合が可能。フラットな継手の作製が可能	20トン
LFSW※	ツールを用いない短時間での接合が可能	15トン

※印は本プロジェクトにより導入

## 【鋼の基礎知識】

※1 鋼は炭素を含んだ鉄合金の総称で、種々の元素を含んだ鋼があります。一般的に使用されているのは炭素鋼で、炭素含有量が0.25%以下を低炭素鋼、0.25～0.6%を中炭素鋼、0.6%以上を高炭素鋼と呼びます。炭素濃度が高くなるほど鋼の強度は高くなりますが、延性が低下します。

※2、※5 鋼は温度によって相変態と呼ばれる挙動を示します。常温ではフェライト相( $\alpha$ )が、高温(900～1500℃)ではオーステナイト相( $\gamma$ )が安定しています。 $\gamma$ を急速に冷却(焼入れ)するとマルテンサイトという硬い相に変わります。

※3  $A_1$ 点は727℃、または723℃で、焼き入れできる臨界温度です。 $A_1$ 点以下で接合すれば相変態は起こらず、接合部はフェライト相と微細な球状セメントライト( $Fe_3C$ )となり、母材と同等以上の強度を持ちます。

※4 高強度鋼の定義は国や鉄鋼メーカーによって異なりますが、引張強度が590 MPa、780 MPa程度のものが主流で、980MPa級以上のものは超高強度鋼と呼ばれています。比強度が大きく、アルミニウム合金を用いた場合より軽量化が可能でコストも低いので、近年、自動車車体への適用が急速に伸びています。ISMAではレアメタル使用量を抑制した中高炭素鋼の開発を進めています。

## ISMAの活動についての報道

- 新聞
  - 2018年9月30日 日経ヴェリタス「新幹線を2割軽く：難燃性マグネシウム合金」
  - 2018年10月4日 日刊工業新聞「鉄道車両の構体向け提案」(三協立山)
- 雑誌
  - 2018年11月号 自動車技術「特集・マルチマテリアルによる軽量化：輸送機器用構造材料軽量化技術の展望」ほか

## ISMA REPORT December 2018, No.13

©Innovative Structural Materials Association. 2018 All rights reserved.

### 発行 新構造材料技術研究組合 (ISMA)

お問い合わせ先 新構造材料技術研究組合 (ISMA) 技術企画部  
 〒100-0006 東京都千代田区有楽町1-9-4 蚕糸会館10階  
 Tel : 03-6213-5655 Fax : 03-6213-5550  
 制作協力：サイテック・コミュニケーションズ  
 デザイン：高田事務所 撮影：石川典人(表紙ほか)