



980MPa級鋼板用摩擦攪拌接合ツール

Development of a Friction Spot Joining Tool for
980-MPa Tensile Strength Steels Joining

宮崎 博香*
Hiroka Miyazaki

内海 慶春
Yoshiharu Utsumi

津田 圭一
Keiichi Tsuda

近年自動車メーカーではCO₂排出量削減に向けた車体軽量化及び、衝突安全性の向上のため、引張強度980MPa以上の超高張力鋼板の適用を拡大している。しかし、超高張力鋼板は鋼板中に炭素が多く含まれるため、現行の抵抗スポット溶接では十分な接合強度を得にくいという問題がある。一方、摩擦攪拌接合は、接合用ツールを用いて摩擦熱により被接合材同士を軟化、塑性流動させる固相接合技術であり、炭素量の多い超高張力鋼板でも高い接合強度が期待できる。摩擦攪拌接合はアルミ接合では既に実用化しているが、鋼接合ではツール寿命が短いため実用化していない。我々は、耐欠損性、耐塑性変形性、耐熱亀裂性を兼ね備えた超硬合金母材、硬度、耐酸化性に優れたPVDコーティング、高い接合強度を維持できるツール形状をそれぞれ開発、またツール摩耗を抑制するための接合条件を見出し、超高張力鋼板接合用ツールの長寿命化(～7000打点)に成功した。

Car manufacturers have been increasing the use of ultra-high tensile strength steels with strengths exceeding 980 MPa. This is to improve collision safety and reduce vehicle weight, thereby reducing CO₂ emissions. Due to their high carbon content, these steels cannot achieve sufficient joining strength when joined using the current resistance spot welding technology. To achieve high joining strength in high-carbon content steels, we focused on the friction spot joining (FSJ) method, a solid-phase joining method that employs the frictional heat of the joining tool to soften and ultimately join the sheets through a plastic flow process. FSJ has already been commercialized for the joining of aluminum sheets, but its poor tool life has prevented its application to steel sheet joining. To make the FSJ method practical in steel joining, we developed a cemented carbide tool base material with good resistance to breakage, plastic deformation and thermal cracking, a PVD coating that provides hardness and oxidation resistance, as well as a tool geometry that maintains joining strength. We also determined appropriate joining conditions to reduce tool wear. By integrating all these elements, we have successfully developed an FSJ tool with superior tool life for ultra-high tensile strength steel joining.

キーワード：摩擦攪拌接合、FSJ、FSW、超高張力鋼板、RSW

1. 緒言

近年、地球温暖化問題がますます注目されている中で、自動車メーカーではCO₂排出量削減のための車体の軽量化、衝突安全性向上が必須の課題となっており、引張強度980MPa以上の超高張力鋼板の採用が拡大している。自動車鋼板の接合方法には、現在主流である抵抗スポット溶接^{*1}(Resistance Spot Welding : RSW)やレーザー溶接^{*2}などがある。しかし、これらの接合方法では、鋼板の高張力化に伴って鋼板中の炭素量が増加すると十分な接合強度が得にくくなるという問題がある。これは、溶融接合では溶接部に脆化層(マルテンサイト相)が生成し、硬くなり破断してしまうからである⁽¹⁾。今後、更に炭素量が多く含まれた引張強度の高い鋼板が必要とされた場合、RSWでの接合は困難になると思われる。

一方、摩擦攪拌接合は非溶融接合法であるため、高炭素鋼や異種材が接合可能な技術として近年注目を浴びている。しかしながら、摩擦攪拌接合を用いた鋼板の接合は接合に用いるツールが短寿命であるため、未だ実用化に至っていない。そこで我々は、超高張力鋼板用摩擦攪拌接合ツールを実用化させるべく、当社の主力製品である超硬合金^{*3}製切削工具

で培った技術を活かし、摩擦攪拌接合装置メーカーである川崎重工業株式会社と協業で、980MPa級の超高張力鋼板を被接合材に用いて、長寿命な接合ツールの開発を行った。

2. 摩擦攪拌接合技術

摩擦攪拌接合とは、1991年にイギリスの溶接研究機関The Welding Institute (TWI) によって開発された新しい固相接合技術である⁽²⁾。先端にプローブと呼ばれる突起部を形成したツールを、高速回転させながら重ね合わせた被接合材に押し当てることで摩擦熱を発生させ、2枚の鋼板を軟化・塑性流動して接合するという非溶融接合技術である。ツールを被接合材に押し込んだまま線状に動かし接合するものを摩擦攪拌線接合(Friction Stir Welding : FSW)、点状に接合するものを摩擦攪拌点接合(Friction Spot Joining : FSJ)といい、FSJはFSWを改良、発展させたものとして2004年に川崎重工業株式会社とマツダ株式会社の共同開発によって実用化された⁽³⁾。**写真1**にFSJロボットシステムの外観写真と、接合ガンの先端に取り付ける接合ツールの写真を示す。**図1**にはFSJプロセスの模式図を、**写真2**にはFSJで接合した

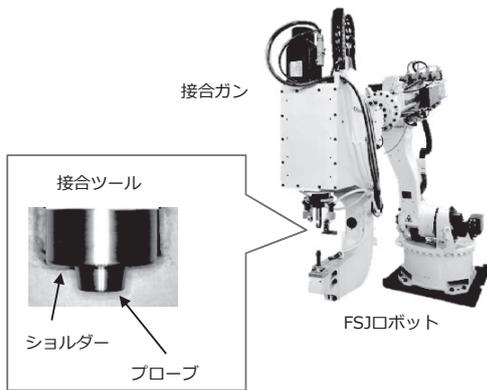


写真1 FSJロボットシステムと接合ツールの外観写真

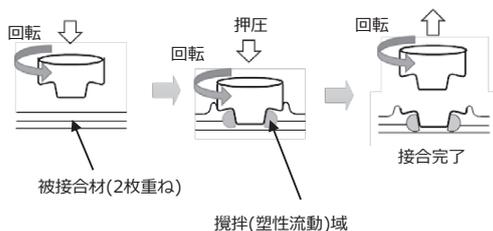


図1 FSJプロセスの模式図

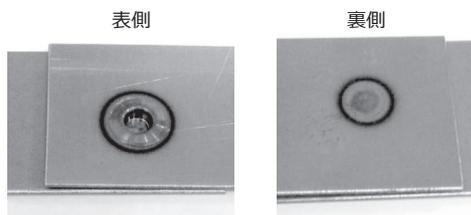


写真2 FSJ接合部の外観写真（980MPa級超高張力鋼板）

980MPa級超高張力鋼板の接合部の外観写真を示す。

FSJは、RSWと同様のロボットシステムを用いるが、RSWに付随する冷却水や抵抗溶接機など種々の補機類が必要なく、設備コストやランニングコストが低減できる。また、FSJの主な消費エネルギーは接合ツールを駆動する2台のモーターに要する電力のみのため、RSWに比べて電力消費量が低減でき省エネルギーである。更に、接合中はRSWのようにヒュームやチリが発生せずクリーンな作業環境を保持できるというメリットがある。

RSW、レーザ溶接、FSJの特徴を表1にまとめる。FSJは非溶融接合（固相接合）のため、高炭素鋼や異種材が接合可能であるが、ツールが短寿命であるため、未だ実用化に至っていない。アルミの接合では接合時のツール温度が400～500℃と低いため、工具鋼^{*4}製のツールを用いて既に実用化

されているが、鋼の接合では接合時のツール温度が1000℃前後と高いことが、ツール短寿命の原因である。そこで我々は超合金を用いた長寿命ツールの開発に着手した。

表1 各種接合方法の特徴

	抵抗スポット溶接 (RSW)	レーザ溶接	摩擦攪拌接合 (FSJ)
接合方式	溶融接合	溶融接合	固相接合
異種材接合	×	×	○
中高炭素鋼接合	×	×	○
消費電力	△	△	○
作業環境	×	×	○
	ヒューム、チリ	スパッタ、ヒューム	
接合コスト	○	× 装置費	× ツール費

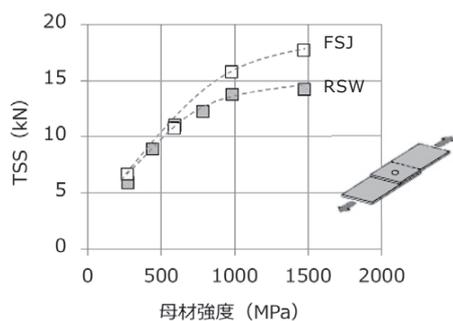
3. FSJの継手接合強度

アルミFSJでは、攪拌による塑性流動を促進するためツールのプローブにネジ形状が施されている。しかし、超高張力鋼接合の場合は、ネジ形状による攪拌効果がアルミ接合に比べて小さいことに加え、プローブがネジ形状だと欠損しやすい。そこで我々は、プローブがネジ形状でなくても、プローブの径と長さを最適化することにより、JIS-A級平均値を超える高い継手強度（引張せん断荷重）が得られることを見出した。ネジ形状に比べて、単純な円錐台形状であるため、摩耗が少なく欠損も起きにくい。更に、加工コストが低減できるというメリットもある（写真3）。

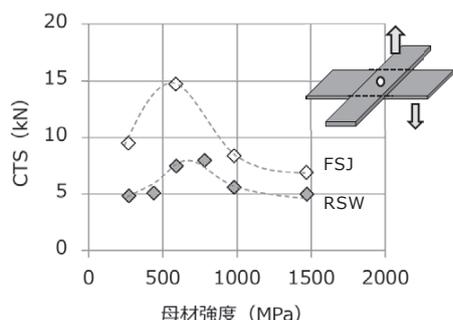


写真3 ネジ形状プローブツール（左）と円錐台プローブツール（右）

また、FSJで接合した様々な鋼板強度の継手について、引張せん断荷重（TSS）と十字引張荷重（CTS）をRSWの値⁽⁴⁾と比較した。結果を図2に示す。RSWのTSSは強度980MPa以上の鋼板で増加の伸び代が少なくなるのに対し、FSJでは1500MPaの鋼板においてもTSSが増加することが確認された。CTSに関しては、RSWとFSJでは同様の挙動であるが、FSJの方がRSWより高い値を示した。先述したように、RSWは溶融接合であるため、接合部の脆化によりクラックが発生し、それを起点に破断するためだと考えられる。以上のように、TSS、CTSいずれにおいても、FSJがRSWより優位であることがわかった。今後、更に自動車車体用鋼板の高



(a) 引張せん断荷重 (TSS)



(b) 十字引張荷重 (CTS)

図2 FSJとRSWの引張せん断荷重と十字引張荷重

張力化が進み、炭素含有量が増加傾向にあることを考えると、FSJは将来的にRSWに代わる有望な接合技術として期待できる。

4. ツール損傷評価

超硬合金は、用途によって様々な種類が存在する。本開発では、まず一般的に切削工具で用いられる数種類の代表的な超硬合金を用いてツールを作製し、既存超硬合金のポテンシャル評価を実施した。被接合材は厚さ1.2mmの980MPa級の超高張力鋼を2枚重ね合わせ、摩擦攪拌点接合 (FSJ) を行った。結果、ツールに生じた損傷の形態は写真4に示す①～⑤に分類されることがわかった。従って、長寿命なツールを実現するためには、耐熱亀裂性、耐塑性変形性、耐欠損性、耐摩耗性、耐酸化性を全て満たす必要があることが判明した。しかしながら、既存の超硬合金製ツールではわずか数十から数百パスで写真4①～⑤のような損傷に至り、長寿命ツールの実現は非常に難しい状況であることがわかった。

5. FSJに適した長寿命ツールの開発

FSJではツールと被接合材との間で摩擦熱を発生させる必要があるため、ツール母材としては熱伝導率が低くツールから熱が逃げにくい方が効率的に接合できる。しかし、熱伝導率が低すぎると、連続打点の接合を行った際にヒートサイク

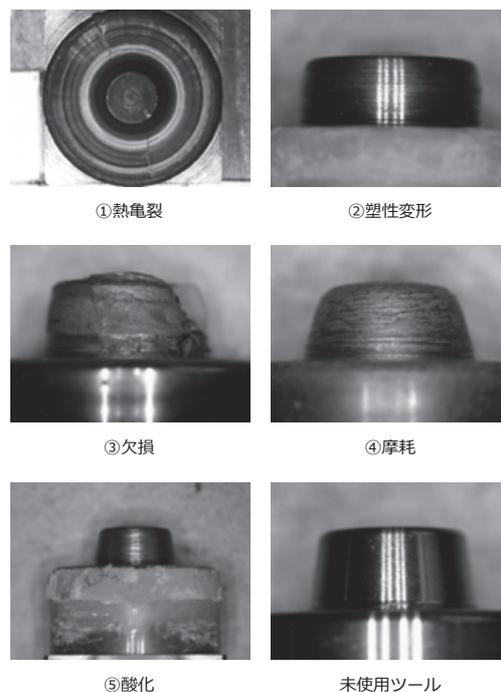


写真4 ツールの損傷形態

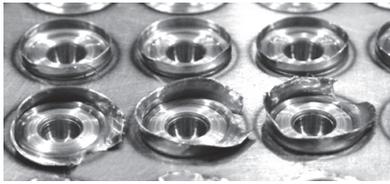
ルによりショルダー部に熱亀裂が発生してしまう。そのため、超硬合金母材の熱伝導率を最適化する必要があった。

また、FSJツールには高荷重が印加されるため、塑性変形に耐える硬度が必要であるが、超硬合金では一般的に硬度が高いと靱性が低下するトレードオフの関係があり、硬度を高くし過ぎると欠損してしまうという問題が生じる。そのため、FSJに適した硬度・靱性バランスを持つ母材開発が必要であった。

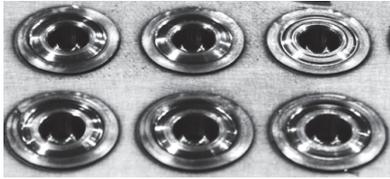
更に、接合強度を確保するために最も重要なプローブは、接合中、被接合材内で高温かつ高速回転しているため、摩耗が激しく、接合強度低下の原因となる。また、ショルダー部は大気中で繰り返し高温にさらされるため、酸化した母材が脱落摩耗し、それが原因で接合部にバリが発生するという接合品質の低下に繋がった (写真5)。

そこで我々は、母材の組成とWC粒径を最適化することにより、FSJに最適な熱伝導率、硬度・靱性バランスを有する母材を開発し、耐熱亀裂性、耐塑性変形性、耐欠損性を全て満たすことに成功した。また、摩耗に関してはツール表面にPVD^{*5}コーティングを施すことにより改善を図った。鋼の接合ではツール温度が1000℃前後となるため、1000℃以上の耐酸化性をもつコーティングが必要であった。本開発では、一般的な切削工具で用いられるTiAlNに新たな元素を添加することにより、高硬度で摩耗しにくく、かつ、酸化開始温度が1100℃以上のFSJ用PVDコーティングを開発した (表2)。

また、ツールへの負荷を低減すべく、有限要素法解析ソ



バリ発生 (接合品質悪)



バリなし (接合品質良)

写真5 接合後の被接合材の外観写真

表2 TiAlNと開発品膜の膜硬度と酸化開始温度

	膜硬度 (GPa)	酸化開始温度 (°C)
TiAlN	32	850
開発品膜	36	1129

ソフトウェアAbaqusを利用して、シミュレーション解析により、ツール温度を低減できる接合条件を探索した。鋼板及び、ツール母材の物理的特性として、ヤング率、ポアソン比、熱伝導率、比熱、比重、熱膨張率、降伏応力、摩擦係数を用いた。図3に異なる条件1と2で接合試験した際のツー

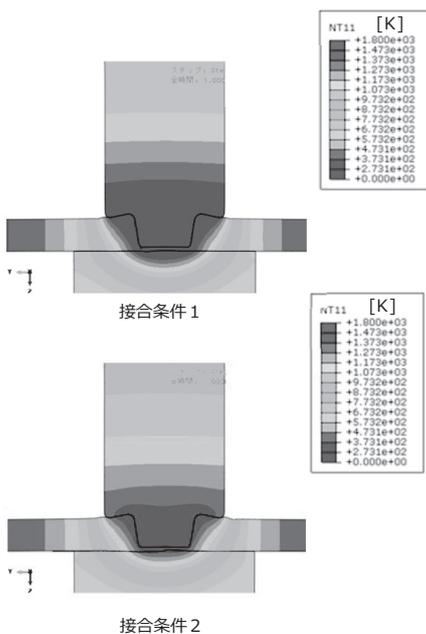


図3 シミュレーション解析結果

ル温度のシミュレーション結果を示す。同じ接合時間でも、接合条件1より接合条件2の方がツール温度の上昇が小さいことがわかる。接合条件2を選択した結果、接合中のツール温度が低減でき、プローブの摩耗やショルダーの酸化摩耗を抑制することができた。

これらの開発を経て、当初数百打点であったツール寿命を、約7000打点施工しても接合強度JIS-A級最小値以上を維持するまでに改善した(図4)。RSWが約200~300打点でドレッシングを要すること、また約2000~4000打点で電極の交換が必要となることを考えると、今回開発したFSJツールはRSWよりも優れたメンテナンス性とコストパフォーマンスを有すると考えられる。

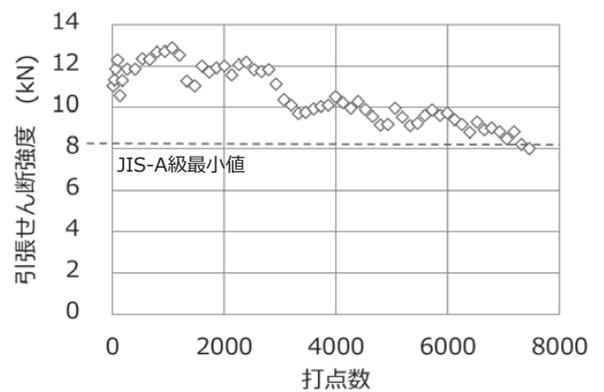


図4 980MPa級超高張力鋼接合の寿命評価結果

6. 結 言

摩擦攪拌接合は非溶融接合法であり、RSWでは接合困難な超高張力鋼や異種材を接合することができる画期的な新技術である。今回、980MPa級超高張力鋼の摩擦攪拌接合において、超合金製ツールの母材を摩擦攪拌接合に適した材料に改良することによって、ツールの耐熱亀裂性、耐塑性変形性、耐欠損性を全て満たすことができた。また、PVDコーティング開発、ツール形状の改良、接合条件の開発により、ツールの耐摩耗性を向上し、約7000打点までJIS-A級最小値の接合強度を維持可能な長寿命ツールを実現した。今後、自動車鋼板の高張力化が更に進み、RSWでは接合が不可能な領域まで鋼板中の炭素量が増加した場合でも、摩擦攪拌接合は高い可能性を有していると考えられる。引き続き、自動車鋼板の高張力化に対応したツール開発を進めていく所存である。

用語集

※1 抵抗スポット溶接

2枚の被接合材を圧着させつつ電流を流し、その抵抗熱で金属を溶かして接合する技術。

※2 レーザ溶接

レーザー光を熱源とし、金属を局部的に溶融・凝固させることで接合する方法。

※3 超硬合金

硬質相のタングステンカーバイド (WC) と結合相のコバルト (Co) を主成分とする硬質材料で、切削工具材料として主流の材料。

※4 工具鋼

主に金属加工用工具の材料として用いられる鋼材。

※5 PVD

Physical Vapor Depositionの略称。金属を高温で蒸発させ、物理的応用を利用して物質の表面に製膜する方法。

・Abaqusは、米国Abaqus Inc.の米国及びその他の国における商標または登録商標です。

参考文献

- (1) 及川初彦 他、「自動車用高強度鋼板のスポット溶接」、新日鐵技報第385号 (2006)
 - (2) 村上陽太郎、「摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW) の進歩と適用」、NMCニュース、12月号 (2004)
 - (3) Kawasaki News, 135, pp.18-19 (Aug. 2004)
 - (4) 富士本博紀 他、「熱間プレス鋼板、高張力鋼板の抵抗溶接性」、溶接技術、3月号、pp.48 (2011)
-

執筆者

宮崎 博香* : アドバンストマテリアル研究所



内海 慶春 : アドバンストマテリアル研究所
主席



津田 圭一 : アドバンストマテリアル研究所
グループ長



*主執筆者