

摩擦攪拌接合用ツールの 長寿命化に関する研究動向

大石 郁*

1. 摩擦攪拌接合の特徴と開発状況

摩擦攪拌接合(FSW : Friction Stir Welding)とは、1991年に英国の TWI が考案した固相接合であり、図 1 に示すとおり、プローブと呼ばれる突起部を有した円柱形状の接合ツールを回転させながら接合したい箇所に挿入し、被接合材料である金属を溶かさずに固相状態で攪拌することによって接合する方法である⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。

摩擦攪拌接合の特徴は、

- ① 被接合材料を攪拌，材料流動(塑性流動，金属流動と呼ぶ論文もある)させることによって接合する固相接合である。
 - ② 接合部における結晶粒の粗大化が抑制され，強度低下が小さい。また結晶粒を微細化することも可能である。
 - ③ 入熱量が小さいため，熱変形が小さい。
 - ④ 鋳造材や複合材料の接合も可能である。
 - ⑤ 鉄鋼材料では，高張力鋼などの一部を除いて HAZ 軟化し難い。また A₁ 点以下での接合が可能であり，炭素量に依存することなく接合できる。
 - ⑥ 一般的な溶融溶接と比べ金属間化合物が発生し難く，異種金属接合に適している。
 - ⑦ 開先加工や接合時の前処理が不要である。
 - ⑧ 作業環境が良い。接合中にヒュームやスパッタ，紫外線等が発生しない。
 - ⑨ 気孔，割れなどが発生し難い。
 - ⑩ 原則，フィラーが不要である。
 - ⑪ 熟練技術が不要である。
- などが挙げられる。一方，摩擦攪拌接合の問題点としては、
- ⑫ 剛性のある拘束治具が必要である。特に突合せ継手の場

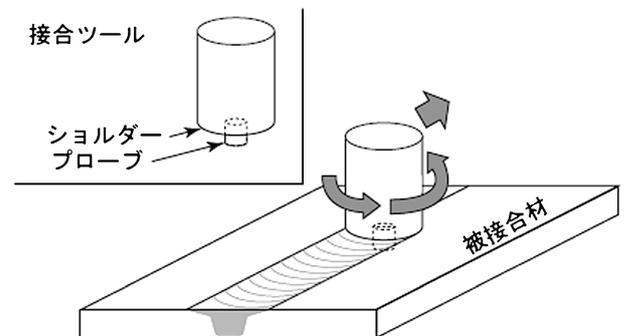


図 1 摩擦攪拌接合(FSW)の概略図。

合，拘束力が不十分だと接合時に開先が開き，隙間が形成されることがある。

- ⑬ ギャップの許容範囲が狭く，接合部の目違い，ギャップの制御が必要である。
- ⑭ 接合終端部に穴(接合痕)が残る。
- ⑮ 接合ツールを押し付けるので，裏当てもしくは被接合材料に剛性が必要である。
- ⑯ 高融点金属に関して，接合ツールの耐久性に課題がある。などが挙げられる。しかし，例えば“⑭接合痕”に対しては，接合ツールのプローブ部とショルダー部が別々に駆動する複動式接合ツールが有効であるとの報告があり⁽⁷⁾，また複動式接合ツールを用いなくても，捨て板を用いて製品外に接合終端部(接合痕)をもってくることによって問題解決を図るなど，製造現場では様々な創意工夫がなされている。そして，前述の特徴を活かし自動車や鉄道，ロケット，航空機，船舶，土木構造物等，様々な市場で用途拡大してきている⁽⁸⁾⁻⁽¹⁴⁾。

また図 2 に示す摩擦攪拌接合を応用した摩擦攪拌点接合

* 広島県立総合技術研究所；主任研究員(〒739-0046 東広島市鏡山 3-13-26)
Development of Tool Durability for Friction Stir Welding; Kaoru Ohishi (Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, Higashihiroshima)
Keywords: friction stir welding, friction stir spot welding, steel, joining tool durability, tool shape, tool material, tooling condition
2020年11月13日受理[doi:10.2320/materia.60.82]

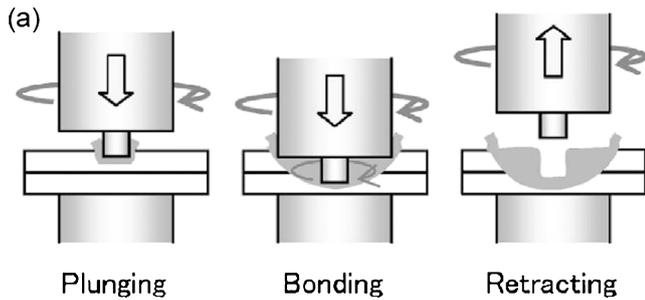


図2 摩擦攪拌点接合 FSSW (SFW) の (a) 概略図と (b) RX-8, (c) 製造工程写真.

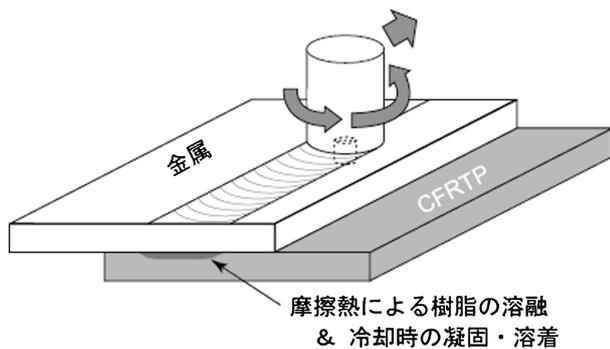


図3 摩擦重ね接合 (FLJ) の概略図.

(FSSW : Friction Stir Spot Welding) が考案され⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾, マツダの RX-8 やロードスター, トヨタのプリウスやクラウンなど自動車を中心⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾に実用化されている.

さらに近年, 自動車の軽量化に伴う車体のマルチマテリアル化によって樹脂/金属の異材接合に対するニーズが高まってきており, 摩擦攪拌接合を応用した摩擦重ね接合 (FLJ : Friction Lap Joining)⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾等の研究が盛んに行われるようになってきた. 尚, 摩擦重ね接合とは, 図3に示すとおり上板に金属材料, 下板に熱可塑性樹脂 (例えば CFRTTP) を重ねて配置し, 上板の金属材料を摩擦攪拌することによって生じる摩擦熱により樹脂が熔融して, その後の冷却過程で溶けた樹脂が金属と固着する, いわゆる溶着方法である. 熱と圧力を同時に接合面に付加することができるため (密着させることができるため), より強固な接合が得られる. ただし, 摩擦重ね接合は接合界面を攪拌させず, 被接合材料 (樹脂材料) を溶かし樹脂中の極性官能基と金属の酸化被膜との静電引力に起因する分子間力 (水素結合力) によって接合している. このように, 一見似た技術ではあるが, 接合原理は全く異なる

ものとなっている.

以上のように様々な分野で実用化され, さらに応用技術の開発も活発な摩擦攪拌接合であるが, 前述のとおり接合ツールの耐久性に課題があり, 市場の大きい鉄鋼材料に対してはなかなか普及していない. そこで本稿では, さらなる摩擦攪拌接合の発展を期待して, 接合ツールの長寿命化に対する研究開発状況を紹介することとする.

2. 接合ツールの長寿命化に対する対策

前述のとおり摩擦攪拌接合は, 回転する接合ツールを直接被接合材料に挿入し, 攪拌させるため, 接合ツールの摩耗は避けることができない. アルミニウム合金などの場合は, 接合ツールの材料に工具鋼などを用いることによって実用化されているが, 鉄鋼材料の場合は, 接合時の温度が約 1000~1200°C⁽²³⁾⁻⁽²⁵⁾まで上昇するといわれており, 接合ツールの材料には高温環境下における高強度と靱性, 耐摩耗性, 非反応性などの特性が要求されるため, 適用できる材質も少なく, なかなか実用化されていない.

一般的に接合ツールの長寿命化には,

- ① 接合ツールの形状による対策
- ② 接合ツールの材質による対策
- ③ 接合条件による対策

などが挙げられている. 以下に各対策における様々な研究開発状況を記す.

3. 接合ツールの形状による対策

被接合材料が鉄鋼材料の場合, 接合ツールにかかる負荷はアルミニウム合金と比べ大きくなることから, 接合ツールはできるだけ単純な形状で作製することが望ましいと考えられている⁽²³⁾⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾. 一般的な摩擦攪拌接合用ツールの形状は図1で前述したとおり先端のプロープ部と肩部分のショルダー部からなり, 円柱形状をしている. そして継手形状や接合強度などの用途や要望に応えるために, 接合ツールの形状は様々な工夫が施されている. その一例を図4にショルダー部を, 図5にプロープ部をそれぞれ示す⁽⁴⁾⁽²⁶⁾.

ショルダーの役割は「材料流動し易くするために摩擦熱を発生させること」と「被接合材料が中心方向へ材料流動するように働きかけること (外側へ逃げる金属を滞留させること)」が挙げられる. 図4(a)に示すとおりショルダー面は接合ツールの軸方向に直角ではなく, ショルダー角と呼ばれる角度を付けている場合がある. そして被接合材料を中心方向へ材料流動させるために, 図4(a)に示すとおりショルダー角を負とすることがあるが, 接合ツールの負荷は増大し, 摩耗が進行すると考えられる. 一方, ショルダー角が正であると, 接合ツールへの負荷は軽減されるが, 被接合材料はバリとして排出しやすく, 攪拌も小さくなり, 接合強度は低下すると考えられる.

また図4(b)には被接合材料と接するショルダー表面の形

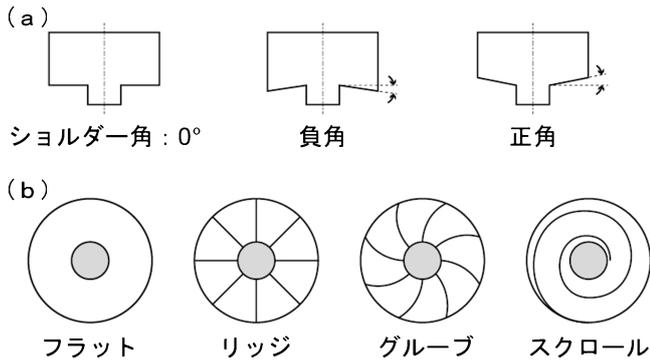


図4 FSW ツールのショルダー部の(a)断面形状と(b)底面形状.

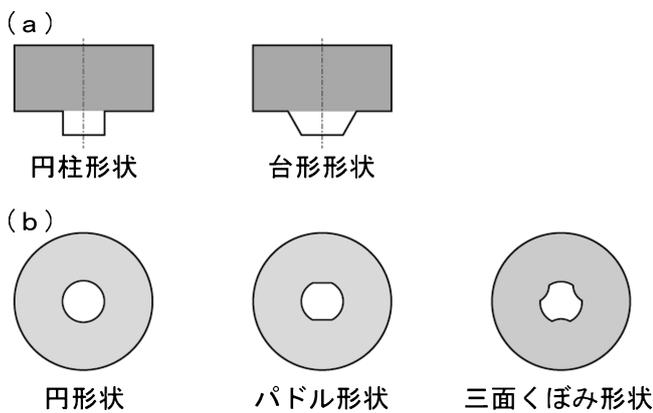


図5 FSW ツールのプローブ部の(a)断面形状と(b)平面形状.

状を示す. このように凹凸形状を設けることで被接合材料を中心方向に材料流動させる工夫が施されているが, 接合ツールへの負荷の観点からいうと, 複雑形状(凸形状)は摩耗し易いので無い方がよい. 以上のように, 接合ツールへの負荷と接合強度とはトレードオフの関係にあり, 開発者にとって難しい問題である.

一方, プローブの役割は「接合部を攪拌し, 材料流動を促進すること」が挙げられる. そして図5(a)に示すとおり, プローブの基本形状は単純な円柱形状か台形状であり, 台形状の方が接合ツールにかかる負荷への抵抗力が強くなり折れ難い. また図5(b)に示すとおりプローブの断面形状は円形を基準として, 溝付きの非円形断面プローブなど様々な形状が提案されている. ただし非円形断面プローブは断面積が減少し, 切り欠き部となることから破損につながり易い. またプローブには攪拌力を促進させる(垂直方向への材料流動の促進させる)ためにネジ加工が施されていることがあるが, ネジ加工は複雑形状(凸形状)であることから摩耗し易く, 耐久性に課題を残すものとなる.

これらの知見を基に, 坂村らが考案した鉄鋼材料用の摩擦攪拌点接合ツールの写真と概略図を図6に示す⁽²⁹⁾. この球面プローブを持つ接合ツールを用いた接合では, 先端の球面プローブ(球状セラミックス)だけを被接合材料に挿入し, 摩擦熱と攪拌の両方を起こさせて接合する. その際, 接合ツ

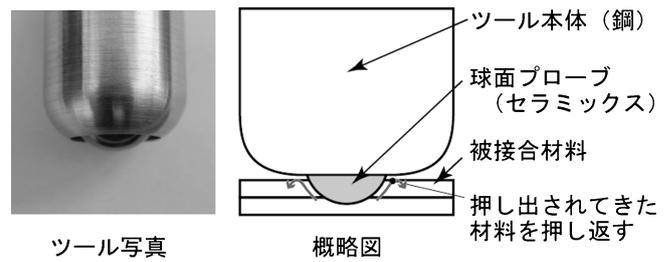


図6 球面プローブを持つ摩擦攪拌点接合ツール.

ルの本体端部(ショルダー部・鉄鋼材料)は一般的なショルダー部とは異なり, 積極的に摩擦熱を発生させるためのものではなく, 球面プローブを挿入することで材料流動してきた被接合材料を押し返すためのものである. 材料流動してきた被接合材料は約1000℃と高温ではあるものの, 非常に軟化しているため, 一般的なショルダー部ほどの耐摩耗性は必要とせず, ショルダー部が鉄鋼材料であっても十分対応でき, 接合ツールの損傷を大幅に低減できている. またプローブ部を球面にすることによって前述のとおり角度が正角となり, 一般的な摩擦攪拌点接合で問題となるプローブ部の欠損も大幅に低減されている. 一方, 下板の被接合材料を上板側へ材料流動させ, ショルダー部で若干の抵抗を行い攪拌させることで, 十分な接合強度が得られることを報告している.

尚, 本接合ツールは市販の球状セラミックスを本体の鋼材に固定することによって作製されており, 一般的な接合ツールと比較して非常に安価なものとなっている.

また, 優れた耐久性を有する本接合ツールを用いたアルミニウム合金/鉄鋼材料等の異種金属接合(摩擦アンカー接合)においては, アンカー効果による機械的な接合により摩擦攪拌点接合以上の接合強度を得られることが報告されている⁽³⁰⁾⁽³¹⁾.

4. 接合ツールの材質による対策

(1) 窒化ケイ素による対策

接合ツールの材質については, 超硬⁽³²⁾やCo合金⁽³³⁾⁻⁽³⁵⁾, Ir合金⁽³⁶⁾, W基複合材料⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾, PCBN⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾, 窒化ケイ素⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾など様々な材質が開発されてきている. さらにそれら材質にPVDなどのコーティングを施す研究⁽⁴³⁾も行われてきており, 研究範囲は多岐に渡る.

坂村らは前述した図6に示す接合ツールの球面プローブの材料に各種セラミックスを用いて実験を行った. その際の接合条件は, 被接合材料にt1.0 mmの軟鋼板SPCCを用い, 重ね継手, 接合ツールの回転速度1500 rpm, 接合ツールの押し込み深さ1.6 mm, 押し込み荷重6.3 kNとした. その結果を図7に示す. 図7に示すとおり, アルミナとジルコニアは欠損により使用できなくなった. また炭化ケイ素と超硬は摩耗によりプローブが小さくなって使用できなくなった. このようにアルミナやジルコニア, 炭化ケイ素, 超硬は

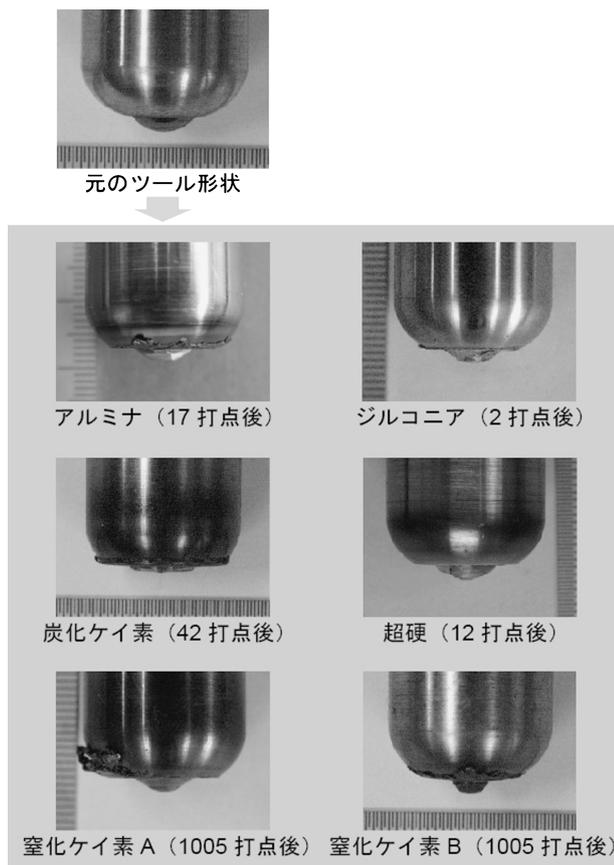


図7 接合後のツール外観.

数打点で摩耗や欠損が現れたのに対し、窒化ケイ素は約1000打点まで接合することができた⁽²⁹⁾⁽⁴⁴⁾.

尚、図7の窒化ケイ素AとBは製造元が異なることを表す。次に各窒化ケイ素接合ツールにおいて、被接合材料に残った接合痕の断面形状を測定した結果を図8と図9に示す。図8と図9より、窒化ケイ素Aは600打点目くらいから球面プローブの肩部の形状が直線形状になってきていることが判った。一方、窒化ケイ素Bは200打点前から球面プローブの肩部の摩耗が進行していることが判った。このことから同じ窒化ケイ素であっても、製造元(製造方法が異なること)により摩耗状況が大きく異なることが判った。このことは超硬などの他の材料においても同じことが言えるものと示唆される。

次に窒化ケイ素の摩耗と接合強度が打点数の増加とともにどのように変化したかを調べるため、図10に示すとおり接合試料に残った接合痕の断面形状(図の斜線部の領域)を測定し、これを接合時のツール形状と見立てた。さらに接合試料のせん断引張強度試験を行った。図11に窒化ケイ素Bにおける打点数と接合ツールの形状変化、接合強度との関係を示す。図11に示すとおり打点数の増加とともに、ツール形状(断面積)は小さくなり、かつ接合強度も低下していくことが判った。このことから、接合ツール(球面プローブ)の摩耗は接合強度に関係しており、接合ツールの形状変化(長寿命化)は接合強度を維持する上で重要であることが判った。

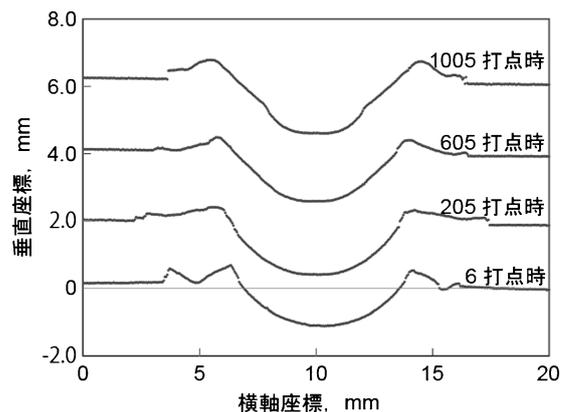


図8 窒化ケイ素Aの形状変化.

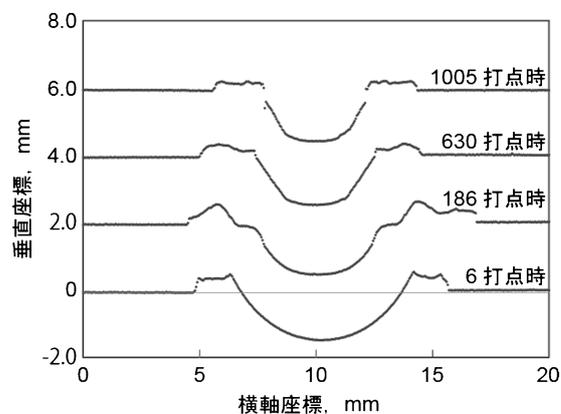


図9 窒化ケイ素Bの形状変化.

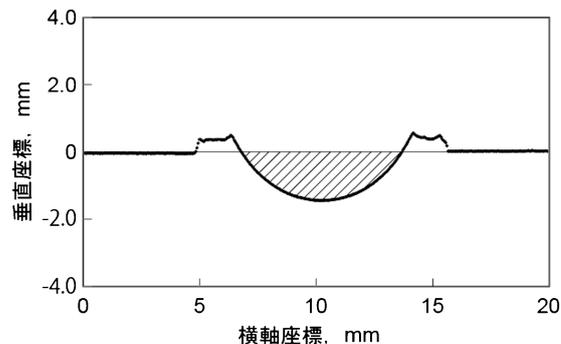


図10 断面積の求め方.

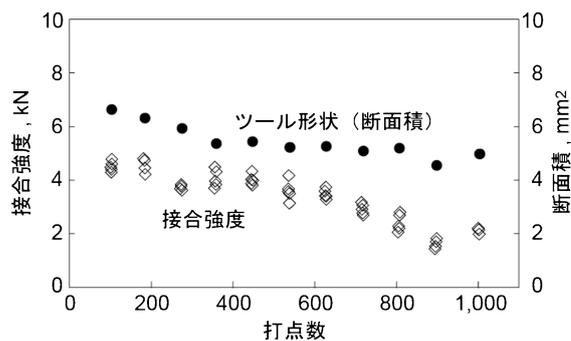


図11 窒化ケイ素Bの打数と接合強度、断面積の関係.

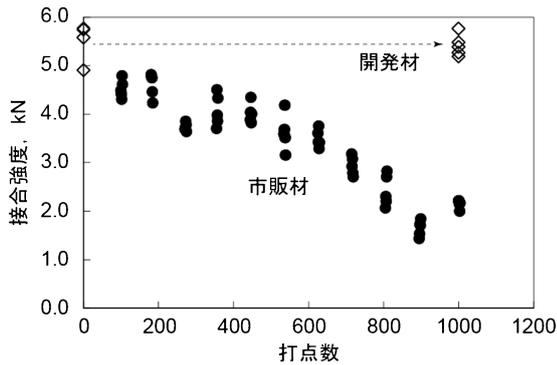


図12 窒化ケイ素の開発材における耐久性試験結果.

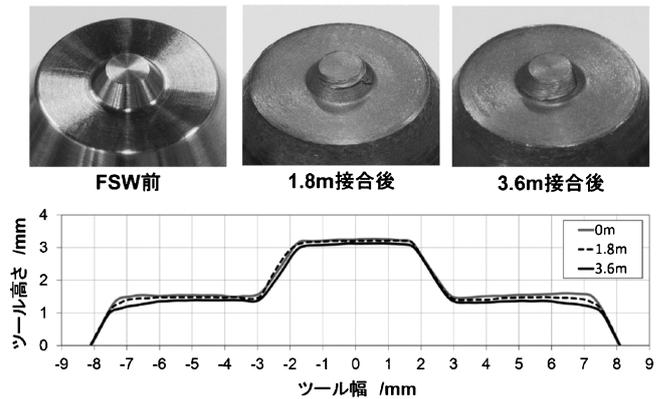
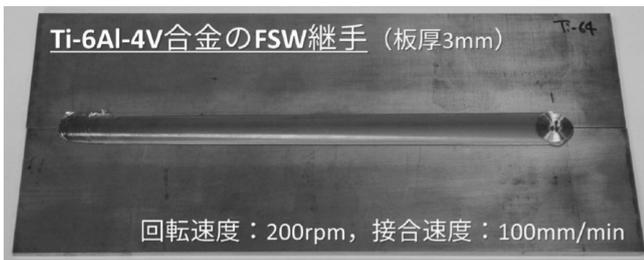


図14 硬質相のサイズと量を調整したCo基合金ツールのFSW前後の外観写真とツール断面形状プロファイル.



FSW前後のCo基合金ツールの外観

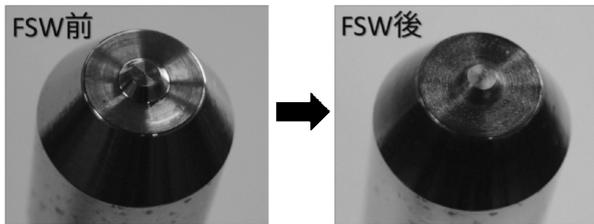


図13 Co基合金ツールで得られたTi-6Al-4V合金FSW継手の外観写真とFSW前後のツール外観変化.

尚、本実験では1000打点で約1/2の強度低下を示したが、その後、坂村らは大阪大学と東芝マテリアル(株)との共同研究で窒化ケイ素を用いた接合ツールの開発を行い、図12に示すとおり優れた耐久性を持つ接合ツールを開発している⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾。尚、本耐久性試験の接合条件は、軟鋼板SPCCの2枚重ね継手、接合ツールの回転速度1500 rpmであり、後述する接合条件による対策(接合ツールの低回転速度による対策)ではない。

(2) Co基合金による対策

次に摩擦攪拌接合に対する接合ツールの開発状況を示す。一見、摩擦攪拌点接合と似ているが、摩擦攪拌点接合では主に垂直荷重が接合ツールに負荷される。一方、摩擦攪拌接合では、さらに横からの荷重が負荷されるため接合ツールにとってより厳しい使用環境となってくる。

佐藤らはCo基合金⁽³¹⁾⁻⁽³³⁾、W基複合材料⁽³⁵⁾等を中心に開発を進めている。この中でCo基合金は γ/γ' 型組織の母相と硬質相(炭化物や金属間化合物)からなる合金であり、フェライト鋼やチタン合金の摩擦攪拌接合が可能なツール材料と

して市場展開されている。特に $\alpha+\beta$ 型チタン合金(例えばTi-6Al-4V合金)の摩擦攪拌接合においては、図13に示すようにアルミニウム合金並みの滑らかで光沢のある接合部外観が得られている⁽³³⁾⁽⁴⁷⁾。またCo基合金は摩擦攪拌接合時に割れることはなく摩耗するが、摩耗の程度は接合温度と硬質相の分布状態に依存し、2~5 mmの硬質相の体積率を増加させることにより耐摩耗性が向上することが報告されている⁽³⁴⁾⁽⁴⁸⁾。

そして硬質相の体積率を増加させた結果、図14に示すように中炭素鋼(S45C)を3.6 m接合してもツールはほとんど摩耗せず、初期開発合金に比べて1.5倍以上の長寿命化に成功している⁽³⁵⁾。

5. 接合条件による対策

(1) 接合ツールの低回転速度による対策

一般的に高炭素鋼への摩擦攪拌接合において、接合時の温度が約1000℃と高温になることから、接合試料の金属組織には脆い相が生成するため、接合後に熱処理が必要である。しかし、藤井らは熱処理不要の観点からA₁点(723℃)以下で接合を行うことにより、炭素量に関係なく、炭素鋼を接合する技術を確認した⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾。そしてその際、実験には超硬製接合ツールを用いていたが、摩耗し難いことも同時に導き出した。これは、温度が高くなると極端に超硬の硬度が低下してしまう特徴からきている。すなわち通常の摩擦攪拌接合では高温のため摩耗が進行してしまうが、比較的低温の場合は超硬本来の硬さが維持された状態で接合することができ、その結果、接合ツールの摩耗が減少、耐久性が向上したと考えられる。

また立野らは、接合方向後方から-20℃の液体CO₂を局部的に噴出させ、接合時の温度を制御することで接合継手の強度を向上させ、かつ接合ツールの寿命を大幅に延ばしたことを報告している⁽⁵¹⁾。

接合ツールの形状や材質だけでなく、接合条件においても接合ツールの耐久性に大きく影響を与えることは注目すべき

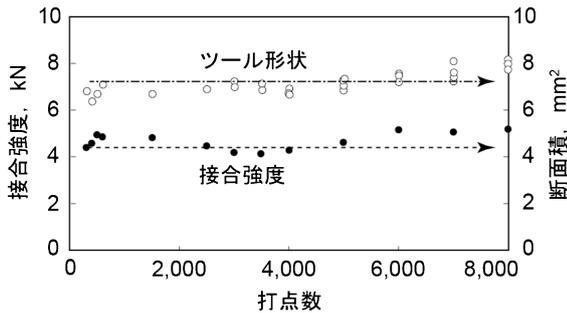


図15 低回転によるツール寿命への影響.

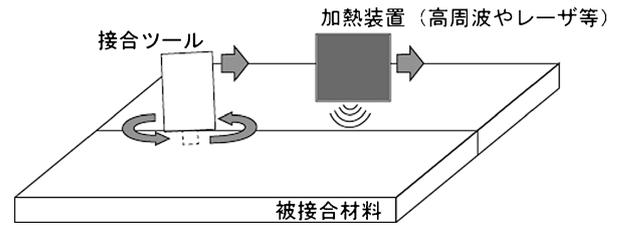
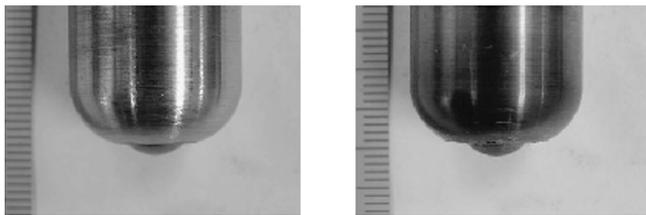


図17 予熱装置を付加した摩擦攪拌接合装置.



耐久試験前 8000 打点後

図16 接合ツールの摩耗状況.

点であり、このことをヒントに、坂村らは図7で示した実験条件において接合ツールの回転速度を1500 rpm から760 rpm へと遅くすることで、接合時に発生する摩擦熱を制御した。尚、その他の実験条件は同じである。その結果、図15と図16に示すとおり8000打点においても接合ツールに摩耗はなく、接合強度もほぼ一定の結果が得られた⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾。これにより市場ニーズにも十分応えられる打点数となり、接合ツールの長寿命化は達成できたと考えられた。

しかし残念ながら本手法では製造現場への適用には至っていない。これは回転速度を遅くすることによって、接合ツールを挿入し、発熱・攪拌する時間が長くなったためである。言い換えると接合時間が長くなるというデメリットが生じたためである。一般的に鋼板の点接合には抵抗スポット溶接が用いられることが多く、その接合時間は1秒以下である。摩擦攪拌点接合が鋼板の接合技術として実用化されるには、接合時間が同程度になる必要があり、現時点では満たしていないため本手法は実用化には至っていない。今後は如何に摩擦熱を制御し、かつ接合時間を短縮していくかが鍵となる。

(2) ハイブリット接合による対策

前述の接合時の温度を制御する方法の他に、図17に示すとおり接合前に外部から熱を供給することによって被接合材料を予熱し、接合時にかかる接合ツールへの負荷を小さくする試みが報告されている⁽⁵⁴⁾⁻⁽⁵⁷⁾。

この中で谷口らは、高周波誘導加熱装置による予熱を試みた。被接合材料としてS55Cを、接合ツールは超硬製を用いた。そして接合ツールの接合方向前方に高周波加熱コイルを配置し、加熱しながら接合を行った。その結果、予熱なしと

予熱500°Cとを比較すると回転トルクが約18%低減され、接合ツールの寿命は30%向上が見込まれると報告している。

また高周波誘導加熱装置の他に、藤井らはYAGレーザーによる予熱を試みた。被接合材料としてSS400を、接合ツールは超硬製を用いた。そして高周波と同様にレーザーを接合方向前方に照射した。その結果、レーザーによる予熱は最終的な金属組織に大きな影響を及ぼさず、継手特性は大幅に向上し、接合ツールの寿命も延びたことを報告している。

尚、レーザーの場合は、接合箇所斜めからレーザーを照射して予熱することが容易であるため、摩擦攪拌点接合へも展開も可能であり、前述した接合時間の短縮と接合ツールの長寿命化の両立が期待される。

6. 最後 に

前述のとおり摩擦攪拌接合ツールの長寿命化に対し様々な対策事例があり、窒化ケイ素やCo基合金など一部では鉄鋼用接合ツールとして市販化されてきている。ただし、まだまだ一般的とは言い難い状況である。

また今回紹介した研究以外にも、“接合ツールに用いられる材質の濡れ性の評価⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾”や“接合時の攪拌状況の可視化⁽⁶⁰⁾⁽⁶¹⁾”、“摩擦攪拌接合時の被接合材料の材料流動に関するシミュレーション⁽⁶²⁾⁽⁶³⁾”などの研究が報告されてきており、これらの知見は接合ツールの長寿命化に大変役立つ有益な情報である。今後、このような知見と前述の研究が合わさり、さらに発展していくことを期待する。

最後に、摩擦攪拌接合や摩擦攪拌点接合は、アルミニウム合金を中心として様々な分野で実用化され、さらに現在もなお研究開発が盛んに実施されている接合技術である。市場の大きな鉄鋼材料に対しても一般的な接合方法として採用されるようになれば、一つの接合方法(一つの接合装置)で鉄鋼材料、アルミニウム合金材料、アルミニウム合金/鋼の異種金属接合、樹脂/金属の異材接合など様々な接合箇所に適用でき、他の接合技術にはない大きなメリットを生むと想定される。

加えて、摩擦攪拌接合は一般的なアーク溶接や抵抗スポット溶接に比べ消費電力が非常に少なく、CO₂排出削減にも効果的である。そして作業環境も良く、かつ自動化も図りやすいことから、近年ニーズが高まりつつあるサステナブルな社会の実現に対しても貢献できると期待される。

