



H. Yoshimura

0.1mm薄板オーステナイト系ステンレス鋼の 突合せ摩擦攪拌点接合法の開発

吉村 英徳*

1. まえがき

摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) は、ツールと呼ばれる棒状の工具を高速回転させ、ツールを母材に押し付けたときの摩擦を利用して母材同士を一体化させる接合技術である¹⁾。FSWは固相接合であり、最高到達温度が融点に達しないため、接合部の強度低下を溶融溶接と比較して抑えられる事や、熱による変形が小さいなど様々な特長があり、自動車産業を中心に、ツールを横方向に移動させずにスポット溶接を行う摩擦攪拌点接合 (FSSW: Friction Stir Spot Welding) の適用も進んでいる。

これらの FSW が適用された製品のほとんどはアルミニウム合金であり、研究対象としても、アルミニウム合金を中心に、マグネシウム合金や銅合金などの接合が報告されている。また、炭素鋼やステンレス鋼等の鉄鋼材料系でも機械特性や接合組織の報告がされており、FSWの適応可能範囲は広がっている。しかし、鉄鋼材料は比較的強度が高く、ツールの摩耗・欠損が発生しやすいなどの理由から、アルミニウム合金などと比較すると報告は少ない。これに対して、ツール材質を高温強度、耐摩耗性が高い PCBN ツールを用いる研究や、板厚が 1mm を下回る薄板に関してはプローブレス・ツールを用いる研究が進められている。

しかし、板厚が 1mm を下回る薄板における FSW, FSSW は、ツールの回転などにより材料自体が変形してしまうなどの困難がある。また、FSW においてツール挿入量は接合品質に大きく影響しており、薄板においてはより高い精度が求められるため接合報告は少なく、突合せでの接合例は板厚 0.5mm が最小となっている。これを下回る板厚に対しての接合方法は確立されておらず、FSW が実用できる板厚の最小は 1mm 程度が限界となっている。板厚が 0.1mm 程度の薄板に対する接合は、主にレーザー溶接が用いられるが、コスト面で課題があり、付加価値の高い製品への用途に限定されている。そこで、板厚 0.1mm の FSW が確立されれば、比較的安価に導入ができるため、電子部品、精密部品などにも適用することができ、FSW の応用範囲を広げることができると考えられる。

本研究では、FSW の適用範囲拡大を目的に、板厚 0.1mm の SUS304 薄板材の突合せ接合において、線接合の前段階として突合せ FSSW の適用方法を検討し、薄板における接合方法の確立ならびに適正接合条件範囲の調査や接合部

の評価を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究では、FSW の適用範囲拡大のため、電子部品や微小構造物への適用を想定し、板厚 0.1mm のオーステナイト系ステンレス (SUS304) を供試材として用いた。供試材の機械特性を表 1 に示す。また、供試材の表面は 2B 仕上げである。

表 1 供試材の SUS304 の機械特性

硬度 (HV)	引張強さ (MPa)	降伏応力 (MPa)	破断伸び (%)
152	746	271	73

2.2 ツール形状

ツール形状を図 1 に示す。一般的な FSW ツールはプローブと呼ばれる凸部を持っており、プローブを材料内に挿入し接合を行う。しかし、板厚が $t=0.1$ mm 程度の場合、ツール先端のプローブ部の加工が困難となる。そこで、球頭ツールの適用を試みた。攪拌によるツール先端周辺の材料の盛り上がり抑制するショルダー部の役割を果たすため、ツール端部に R15 mm の球頭部を設け、その先端に攪拌部として直径 $\Phi 1.5$ mm のフラット部を設けた。ここで、先端まで完全な球頭形状ではなく、先端にフラット部を設けたのは、ツール軸方向の接触荷重設定の安定化、およびツール先端の加工精度が理由である。下記 2.3 節においては、旋盤と拡大顕微鏡による研磨にてツール端部を加工していたが、表面粗さや先端に残ったバリによって初期位置合わせに再現不足が生じていた。したがって、最終的には NC フライス盤を使用し、ツールの外縁から直径線に平行にエンドミルを移動して加工した。これにより、フラット部の直径および表面粗さのツールごとの誤差は抑制できた。フラット部の平均表面粗さは $Ra 0.11 \mu m$ である。球頭部の R に関して、入熱量の向上や被加工材を抑える目的で更に大きな R も検討したが、ツール先端の加工精度の問題から 1.5 mm 程度とした。また、フラット部の直径を大きくすると、ツール回転時のブレによるフラット円周の方当たりが発生し、破断しやすくなった。ツールには、直径 $\Phi 10$ mm、材質は SKH51 (硬さ 16.1HRC) を

* 香川大学 創造工学部・創造工学科・機械システム領域
准教授

用いた。

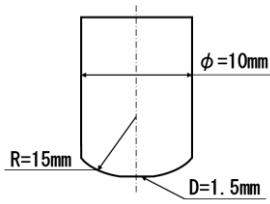


図1 球頭プローブレス ツール（先端は平坦）

2.3 ツール挿入量基準による初期位置合わせの試行

まず、予備実験として所定の挿入量を与えて接合を試みた。実験の概要図を図2に示す。エタノールで試験片表面およびツール先端の脱脂を行った後、裏当て板の上に材料を突合せて固定し、汎用 NC フライス盤 (OKK 社製, VM53) を用いて実験を行った。タッチセンサによりツールと供試材との接触位置を原点として設定した後、ツールを回転させた状態でプログラムにより 0.75mm/min の速度で所定の挿入深さまで押し込み、所定の時間保持させ、100mm/min の速度で引き上げた。しかしながら、供試材は所定の幅でスリット加工されており、端部には多少のバリが残っている。そのため、タッチセンサを用いて位置決めでは精度に問題があることが分かった。そこで、図3に示すようなベースプレート下にロードセル (A&D, KC1205-L100) を取付けた装置を用いて、ツール静止状態で材料に接触させ、25N を与える位置を原点に設定した。また、裏当て板の材質は S50C を用いた。

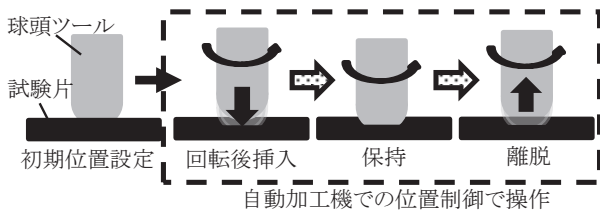


図2 プローブレス・ツールによる摩擦攪拌点接合の手順

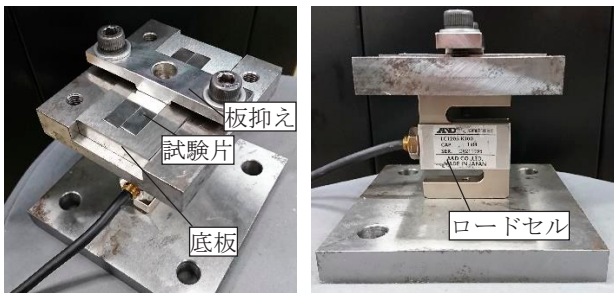


図3 初期位置設定のための荷重測定用ジグ

回転数 1800rpm, 挿入量 0.015mm, 保持時間 1s で実験を行ったときの外観とその荷重測定結果をそれぞれ図4, 図5に示す。荷重測定結果は挿入過程から保持過程に移ったタイミングを 0s としている。この条件での接合が比較的良好であったが、同条件での接合成功割合は 5 割以下で

あり、再現性に問題が残った。接合結果には主に 3 パターンあり、ツールと接触した跡はあるが、突合せ面の変形が見られない「荷重不足」。加工後に 2 枚の板が分離しない「接合」。荷重超過が要因と思われるツール接触部に穴が空いてしまった「破断」。以上の結果が得られた。

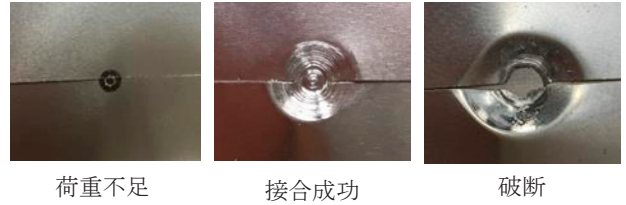


図4 接合実験後の試験片外観

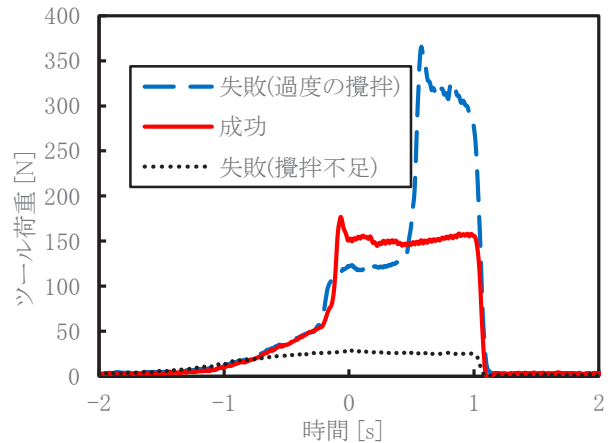


図5 同じツール挿入深さでの荷重変動の比較 (1800rpm, 0.015mm, 1s)

図5の荷重測定の結果から、接合成功時および破断時には、荷重の急激な上昇が発生していることがわかる。接合成功時と破断時は挿入過程で 100~200N の荷重上昇、破断時には加えて 300N を超える鋭い荷重の上昇が見られた。一方、荷重不足の際は荷重の急激な変化はなく、なめらかに変化している。ここで、実験終了後のツール先端を観察すると、接合成功時と破断時に見られた荷重上昇が発生したときには、試験片の凝着と見られる表面あれが発生していた。凝着が発生したツール表面の様子を図6に示す。この結果から、荷重の上昇はツール先端での供試材の凝着による変動を表していると考えられる。

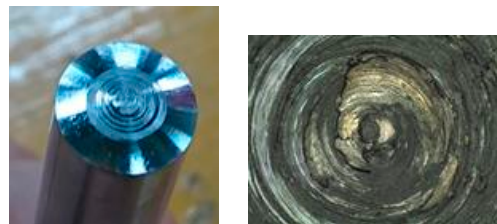


図6 接合加工後のツール先端の凝着の様子

また、接合成功時などの境界面の変形が見られた際には 100N~200N の上昇、破断時には 300N を超える鋭い荷重上

昇が見られることから、凝着による荷重上昇が発生したときに攪拌が行われるが、凝着量が大きすぎると破断に至ると考えられる。ここで、挿入過程で荷重上昇が発生した場合と荷重不足の場合の荷重測定結果をまとめて図7に示す。この結果を見ると、およそ 50N 付近で荷重の上昇が発生しており、凝着が発生する条件として、ある荷重の閾値があると考えられる。以上の結果から、ツール軸方向に発生する荷重を一定に揃える事ができれば結果が安定すると考えられる。

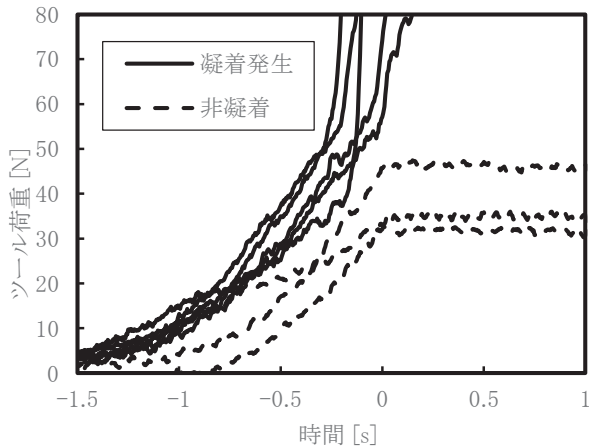


図7 凝着時と非凝着時での荷重変動の比較

3. ツール静止荷重による挿入位置設定による試行

3.1 試験方法

前2.3節の結果より、ツール荷重による最大挿入位置の設定による接合の試行を行った。実験の概要図を図8に示す。まず、裏当て板の上に材料を2枚突合せて固定し、ツール静止状態で材料と接触させて徐々に押し込む。そして、目標の設定荷重に達した位置をプログラム上の原点に設定する。その後ツールを一度上げ、ツールを回転させた状態で0.75mm/minの速度で再び原点位置まで押し込み、所定の時間保持させ、100mm/minの速度で引き上げた。この手法では、ツール静止状態で材料に押し付けたときの荷重（以下、設定荷重）を変化させることで、原点位置が変化し、材料に対する挿入量を変化させる。

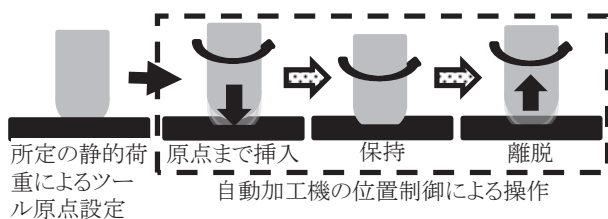


図8 荷重による初期位置設定を用いた摩擦攪拌点接合の手順

ツール回転速度の条件を増やすため、図3の装置をマシンニングセンタ（ヤマザキマザック、VERTICAL CENTER

NEXUS 430B-II HS 型)のステージに取付けて接合試験を行った。裏当て材には、供試材との凝着防止のため、アルミナ製のセラミックプレートを使用した。裏当て版の材質として、本報告では省略するが、S50Cの場合には裏当て板への凝着、凝着を抑制しながら弾性率を下げるためのテフロンプレートの場合では加工中の板材の沈み込みにより荷重不足の傾向の出現など問題があり、セラミックプレートを選択した。また、ツール先端のフラット部の表面粗さについても、平均表面粗さ Ra 0.25 μm と Ra 2.37 μm の2パターン試行したが、後者では試行ごとにばらつきが多く、前者が良好であり、本試験では、2.2節の最終的な加工により、Ra 0.11 μm のものを使用している。

接合可能条件を特定するために実施した接合条件を表2に示す。

表2 接合のための条件

ツール回転数 [rpm]	3000, 4500, 6000
ツール原点のための初期荷重 [N]	10, 25, 50, 75, 100
ツール挿入速度 mm/min	0.5
ツール保持時間 [sec]	1.5

3.2 評価方法

接合実験における接合の成否は、目視によって判断した。試験片の接合部に目視では欠陥が認められなかった場合を「成功」、接合部が欠落した場合や、ツールと接触した痕はあるが、突き合わせ面に変形が見られなかった場合を「不成功」とした。なお、条件によっては、接合の成否が不安定であったが、ここでは複数回の試行で一度でも接合に成功した条件は「成功」と判断した。

接合実験後に接合部の強度評価のためオートグラフ（島津製作所、AG-50kND）を用いて引張試験を行い、最大荷重を測定した。引張試験片は、成功した接合条件において、各1個作製した。また、接合部が組織的に攪拌されていることを確認するため、接合部近辺の断面観察を行った。回転数 6000 rpm、初期荷重 100 N の接合条件において行い、光学顕微鏡を用いて観察した。

3.3 接合試験結果

各接合条件における接合の成否を図9に示す。また、例として回転数 4500 rpm の条件における接合後の接合部、ツール表面の外観の結果をそれぞれ図10, 11, 12に示す。

接合が不成功であった場合のうち、初期荷重が低い条件では、供試材表面にツールのわずかな接触痕は確認できたが、攪拌には至っておらず、突き合わせ面の変形は見られなかった。この場合、接合中の荷重にも、初期荷重からの変化はほとんど認められなかった。それに対し、接合に成功した場合、前述と同様に接合中の荷重は初期荷重よりも高い値にまで上昇した。ツールに供試材が凝着して攪拌が開始したためと考えられる。ただし、初期荷重が高すぎる場合においては、攪拌を示す荷重上昇が見られるが、接合部中心に過度の攪拌により欠落が生じた。また、回転数が上昇するほど、初期荷重が低い条件で接合に成功した。これ

は、一般の FSW と同様に回転数の上昇により摩擦入熱が増加し、攪拌が開始されやすくなるものと考えられる。

予備検討では、図3の装置を他の NC 加工機に取り付けて同様の予備試験をしたが、100%の再現性が得られていた。しかし、本報告の最終試行では少し再現性に乏しい結果となった。荷重をより精度良く図るために、図3のロードセルを水晶振動子式の剛性の高いものに換えた試験も行ったが、その時には荷重超過による欠落が多く発生したことに原因があると思われる。すなわち、凝着による急激な荷重増加に対し、低取付け剛性にて衝撃的な負荷を軽減する方が好ましいと考えられたことから、具体的には裏当て材に試験片を押し付けるための上側ジグを取り付けるボルトの締付けトルクをトルクレンチを使用して、一定にすることで安定的に加工ができるようになった。

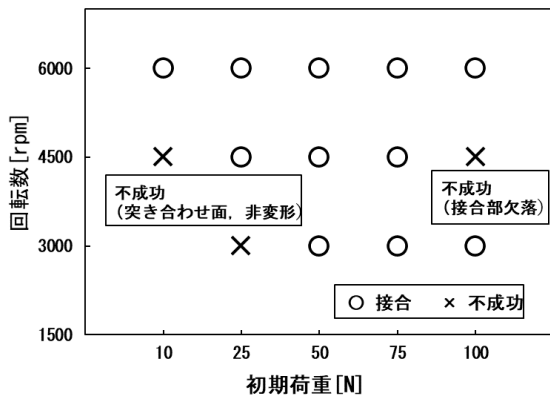


図9 核接合条件での結果

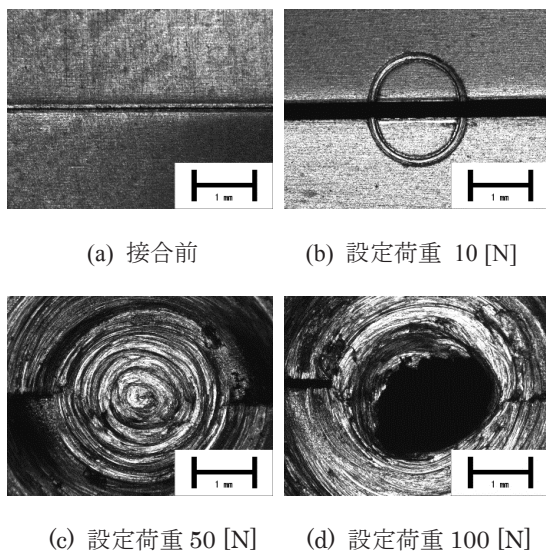


図10 試験片のツール接触近傍の外観

(ツール回転数 4500rpm)

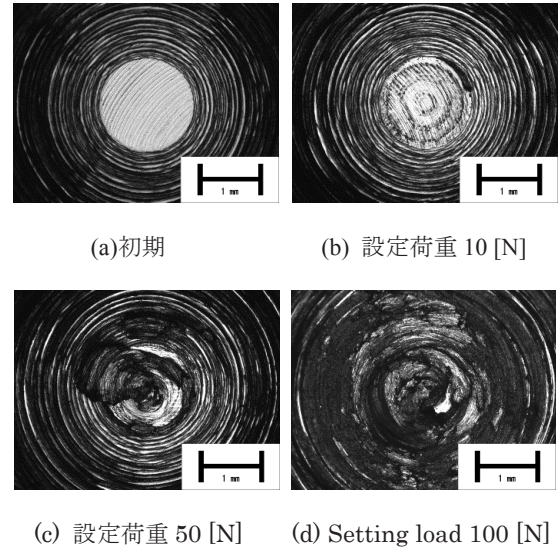
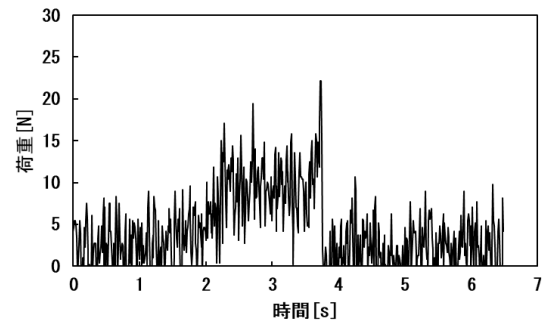
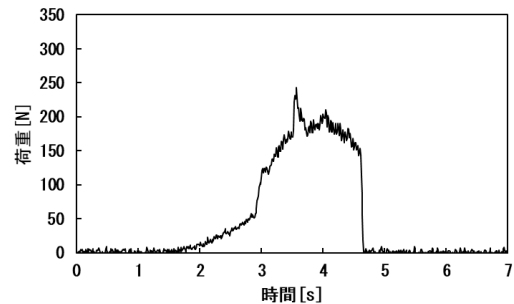


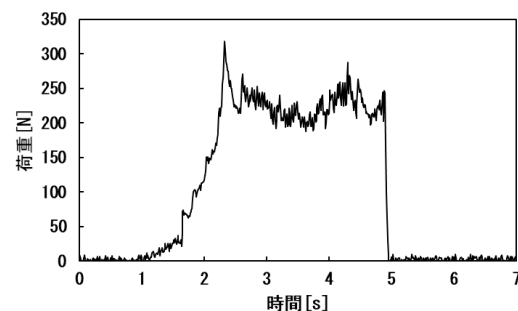
図11 ツール先端の外観 (ツール回転数 4500rpm)



(a) 設定荷重 10 [N], 失敗 (荷重不足)



(b) 設定荷重 50 [N], 成功



(c) 設定荷重 100 [N], 失敗 (過荷重)

図12 接合中の荷重変化 (ツール回転数 4500 [rpm])

3.4 接合部の引張試験

接合強度を調べるため、接合に成功したものに対し、図13の試験片を切り出して、引張試験を行った。

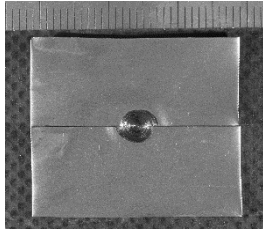


図13 引張試験片

図14に引張試験の結果を示す。接合に成功した場合、初期荷重および回転数はいずれも高い場合に高強度が得られた。このことから、初期荷重と回転数が低い条件では、摩擦入熱の低下などで攪拌が不十分になり、接合強度が小さくなると考えられる。供試材の引張試験結果から攪拌直径が1.5mmとして肉厚1mmと仮定したときの引張強さは約100Nであり、実際にはツールが押付け・攪拌されて薄くなっていることを加味すると、適切な条件で同様もしくはそれ以上の接合強度が得られていると考えている。

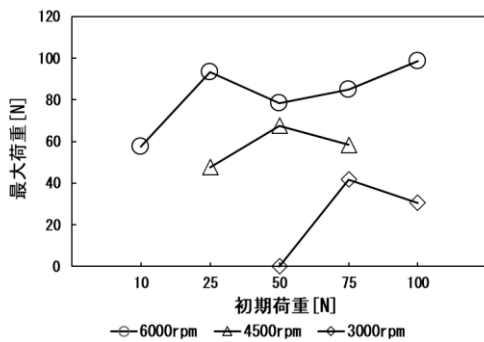
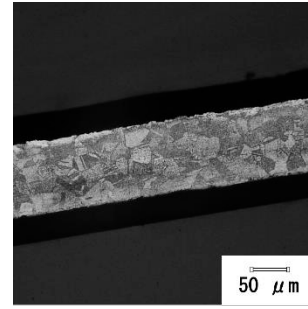


図14 引張試験による接合強度

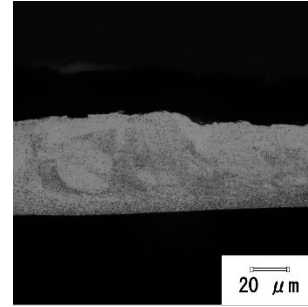
3.5 接合部の断面観察

接合に成功した試験片に対し、その断面観察を行った結果を図15に示す。マクロ試験の結果、接合前の突き合わせ面は確認されず、接合部では、攪拌により結晶粒が微細化していた。また、その近傍では、微細化までには至っていないが、結晶粒界が板厚に対してせん断方向に伸びており、鉛直方向に押しつぶされ、攪拌されている様相が表れていた。ツールの球頭部に接触していたと思われる箇所では、結晶粒が徐々に大きくなっていった。以上のことから、金属組織が攪拌され、供試材の突き合わせ面が接合していることが確認された。

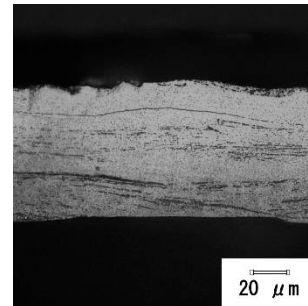
図16~18に非攪拌部(初期材と同様の組織)、攪拌されているところの外周から半径1/4のところ、攪拌中心のEBSD観察結果を示す。初期は10 μ m超の平均粒径であり、赤色の γ 相、KAM値も低い値となっている。が、半径1/4および中央では、攪拌により、加工誘起変態によって α 相



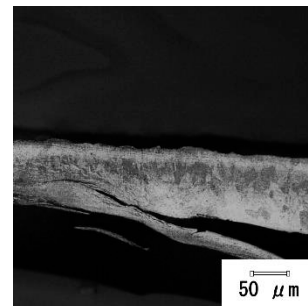
(a) 工具非接触領域(初期組織と同じ)



(b) 接合部(攪拌による微細結晶粒化)



(c) 接合部(少ない攪拌)

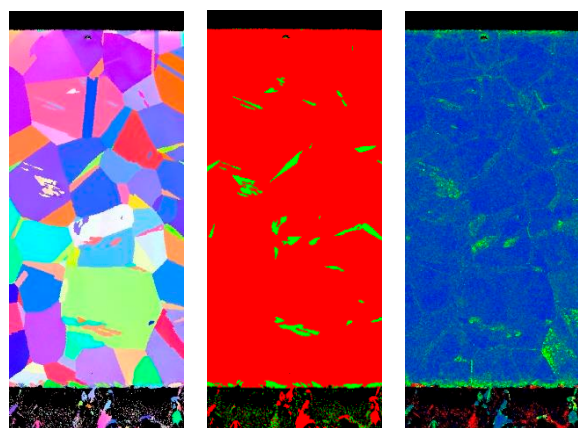


(d) ツール先端(平坦部)接触周辺

図15 接合後試験片のSEM断面観察

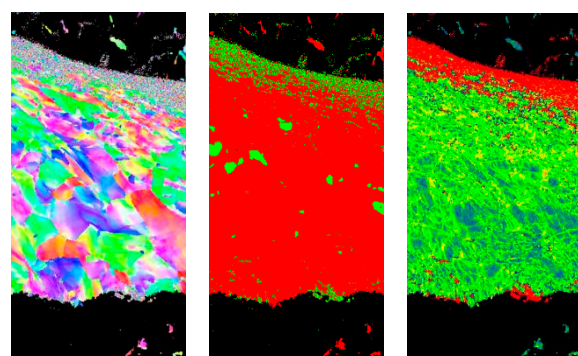
になり、KAM値も大きくなり、微細化が進行しているのが分かる。ただし、攪拌部1/4のところでは、上面付近のみに大きなひずみが入っており、内部は結晶粒が変形しているもののひずみ量としては小さい。接合強度が高いものについては、裏面(図下面)でもひずみが大きくなっており、ツールおよび裏当て材との摩擦によるねじれのせん断

が表層から強く入ることが常用であると思われる。中央部はツール中央であり、周速が低いにも関わらず、かなり攪拌され、全体的に微細化が進んでいる。試験中の外観から、鋼材のFSWに見られる攪拌部の赤熱などは見られず、比較的低温での加工にも関わらず、十分な攪拌により接合が可能であると思われる。



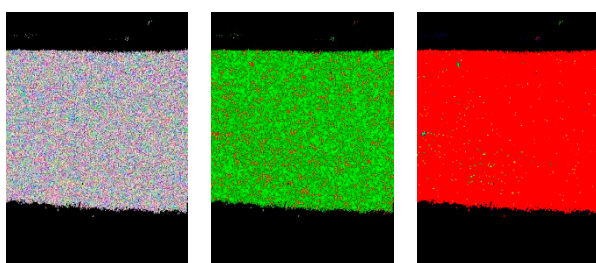
(a)IPF (ND) (b)Phase (c)KAM

図 16 EBSD 観察 (ツール非接触部)



(a)IPF (ND) (b)Phase (c)KAM

図 17 EBSD 観察 (攪拌部の外周から半径 1/4 の位置)



(a)IPF (ND) (b)Phase (c)KAM

図 18 EBSD 観察 (攪拌部中央)

4. 摩擦攪拌点線接合

本研究において、ツールへの凝着は接合に対して重要な要因となる。本報告では省略するが、過度な凝着を防ぐには SUS304 との親和性の少ないツール材料を選ぶことによって、成功率を高めることができる。実際、タングステンのツールを使うことで適度な凝着を起こすことにより、過攪拌による破れを軽減できることが分かっている。これによる適切な接合条件により、図 17 のように突合せ線によって移動した結果、ツールの押し込みによる更なる厚み低下によって面内に延び、凹凸はできているが、線接合にも成功している。



図 19 本提案手法による 0.1mm 薄 SUS304 板の線接合

5. 結言

FSW によるマイクロ接合の基礎的知見を得るために、板厚 0.1 mm の薄板(SUS304)について、摩擦攪拌突合せ点線接合を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1)接合に成功した場合、攪拌の開始を示すと考えられる接合中の荷重上昇が発生した。一方、不成功時では、初期荷重が低い場合、荷重上昇及び突き合わせ面の変形は、見られなかった。初期荷重が高過ぎる場合は、荷重上昇は見られたが、接合部中心に欠落が生じた。
- (2)回転数が上昇するほど初期荷重が低い条件においても接合に成功した。
- (3)初期荷重および回転数がいずれも高い場合に高強度が得られた。
- (4)接合部のマクロ試験の結果、接合部における金属組織の攪拌および結晶粒の微細化を確認した。

また、適切な接合条件およびツール材質の選択により、線接合にも成功している。

参考文献

- 1) 編者 社団法人 溶接学会 発行者 馬場信：摩擦攪拌接合—FSW のすべて—, (2006)

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。また、試験実施において、共同研究を実施して頂いた香川県産業技術センター 新名氏、福井大学 大津雅亮教授にも感謝致します。