

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14138

研究課題名(和文) 離脱充填制御による消耗ツール式摩擦バット接合への挑戦

研究課題名(英文) Development of friction butt welding using separation and filling of consumable tool material

研究代表者

粉川 博之 (Kokawa, Hiroyuki)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10133050

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦肉盛法を応用した新しい消耗ツール型突合せ接合技術「摩擦バット接合」の開発に挑戦した。5052Al合金に対して種々のプロセス条件下で摩擦バット接合を行い、消耗ツールのせん断離脱・充填挙動に及ぼすプロセス条件の影響と継手の界面組織・引張特性を系統的に評価して、本接合技術の実現可能性を検証した。摩擦バット接合を用いて母材と同等の継手強度を得るには更なるプロセス最適化が必要であるが、摩擦バット接合は新たな突合せ接合技術として高い可能性を有していることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Development of friction butt welding, which is a new butt welding process using a consumable tool, based on principle of friction surfacing, has been challenged in this study. Al alloy 5052 was welded using the friction butt welding process at various process parameters, and then effect of process parameters on separation and filling of the consumable tool, and microstructure and transverse tensile properties of the weld were systematically examined. The present study suggested that friction butt welding had the high potential as a new butt welding one although the further optimization of process parameters was required to produce the weld with the strength close to that of the base material.

研究分野：工学

キーワード：摩擦攪拌接合 摩擦肉盛 突合せ接合

1. 研究開始当初の背景

摩擦攪拌接合 (FSW) は非消費接合ツールによる摩擦発熱と材料流動を用いた固相接合であり、すでにアルミニウム合金に対する種々の実機適用例が報告されているが、鉄鋼等の FSW は接合ツールの損傷が顕在化しているため、爆発的な普及には至っていない。一方、摩擦肉盛法は棒材を回転させながら基材に押し付けて、基材表面に棒材を肉盛る技術であり、希釈がなく強固な肉厚のコーティングが可能な手法として古くから利用されている。ここで、2枚の被接合材の開先に回転丸棒を押し付けて開先に材料を充填できれば、FSW と摩擦肉盛法を組み合わせた新しい摩擦バット (突合せ) 接合が達成できると考えられるが、本接合技術が達成可能な条件は不明であるばかりでなく、開先を消耗ツール材料で充填するのに不可欠な「回転する消耗ツールのせん断離脱挙動」に関する知見も明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

FSW と摩擦肉盛を組み合わせた全く新しい消耗ツール型突合せ接合技術「摩擦バット接合」の開発に挑戦することを目的とした。具体的には、「回転する消耗ツールを被接合材の開先部に押し付けて、開先部に消耗ツールをせん断離脱・充填させ、2枚の板材を突合せ (バット) 接合する技術」の実現を目指した。この新しい接合技術において、消耗ツールのせん断離脱・充填過程を高度に制御するプロセス原理を学術的に明らかにするとともに、得られた界面組織・継手特性を系統的に評価して、接合メカニズムを解明し、本接合技術の実現可能性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 摩擦肉盛における棒材接合ツールの離脱挙動に及ぼすプロセス条件の影響：5052Al 合金の棒材 (直径 20×長さ 100mm) と基材 (幅 50×長さ 150×板厚 5mm) を用いて、種々のプロセス条件下で摩擦肉盛を実施した。摩擦肉盛は全自動摩擦圧接機を使用し、棒材の回転速度を 1500~3000rpm、接合速度を 300~660mm/min、押付け圧力を 20~40Mpa の間で変化させた。肉盛は基材と棒材が接触した後、1秒間保持し、その後基材を移動させて、棒材が 30mm 消費するまで継続した。摩擦肉盛を実施した後、肉盛材を切断して断面マクロ観察を行い、棒材接合ツールの離脱量 (厚さや幅) を定量化した。また、離脱量に及ぼすプロセス条件の影響について検討するとともに、肉盛材/基材界面近傍のミクロ組織解析を実施した。

(2) 摩擦バット接合の実施とせん断離脱・充填挙動の検討：開先加工した 5052Al 合金基材 (板厚 5mm) と 5052Al 棒材 (直径 20mm) を用いて、種々のプロセス条件下で摩擦バ

ット接合を試みた。摩擦肉盛試験と同様、棒材の回転速度を 1500~3000rpm、押付け圧力を 20~40MPa の間で変化させたが、走行速度は 500mm/min で一定とした。また、開先形状も種々に変化させた (図 1)。開先角は 45° と 60°、ルート面高さは 0mm と 1.6mm の 2 段階に変化させた。さらにルート間隔を 0~5mm の間で変化させた (図 1)。摩擦バット接合は基材と棒材が接触した後、1秒間保持し、その後基材を移動させて、棒材が 30mm 消費するまで継続した。摩擦バット接合を実施した後、肉盛材を切断して断面マクロ観察を行い、棒材接合ツールのせん断離脱面の位置や開先部への充填 (図 2) に及ぼすプロセス条件の影響について検討した。

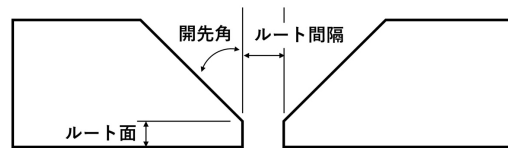


図 1 開先形状とルート間隔の模式図

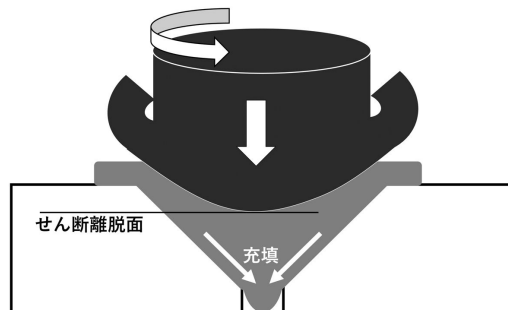


図 2 棒状接合ツールのせん断離脱面と充填挙動の模式図

(3) 摩擦バット接合継手の界面組織と継手強度の評価：(2)で得られた摩擦バット接合継手の開先部において、基材と充填剤での界面接合状態を調べるため、継手断面を研磨後に希薄な水酸化ナトリウム水溶液に浸漬し、初期界面の残存状態を光学顕微鏡ならびに SEM を用いて調べた。また、摩擦バット接合継手を接合方向に垂直に切断し、継手引張試験に供した。引張試験は室温で実施し、クロスヘッド速度は 0.2mm/min とした。継手引張試験の終了後、破断した引張試験の断面組織を観察して破断部を特定し、プロセス条件との関連性を調べた。

4. 研究成果

(1) 摩擦肉盛における棒材接合ツールの離脱挙動に及ぼすプロセス条件の影響：棒材の回転速度を増加させた結果、肉盛り層の厚さと幅は減少する傾向を示した。走行速度は肉盛り層の厚さにはほとんど影響しなかったが、幅は走行速度が速いほど減少する傾向が見られた。また、棒材の押付け圧力の増加とともに肉盛り厚さは若干減少する傾向を示した。最大の肉盛り厚さは 6mm 程度であったことから、板厚 6mm 程度の被接合材の摩擦バ

ット接合の可能性が示唆された。基材と肉盛り層の界面は非常に強固に接合されており、摩擦熱と塑性流動に起因する微細な等軸結晶粒組織が観察された。

(2) 摩擦バット接合の実施とせん断離脱・充填挙動の検討：開先形状の影響を調べた結果、ルート面の存在は棒材のせん断離脱面にほとんど影響しないが、肉盛り材の充填量を減少させることが明らかとなった。開先角の増加は棒材の充填量を増加させるものの、棒材のせん断離脱面を下げる効果があり、開先角が 60° では、せん断離脱面は被接合材上表面よりも下側に移動する傾向が示された。また、ルート間隔の影響を調べた結果、ルート間隔 0mm では肉盛り材の開先部への充填が不十分であったが、ルート間隔 3mm 以上では肉盛り材は開先部に十分に充填された。これらの結果に基づいて、ルート面 0mm、開先角度 45°、ルート間隔 3mm でプロセス条件の影響を調べた。

押付け圧力 30MPa 一定で得られた摩擦バット接合継手の断面マクロに及ぼす棒材回転速度の影響を図 3 に示す。いずれの継手においても肉盛り材が開先部を充填しているが、回転速度の増加とともに接合中心部での厚が小さくなっており、せん断離脱面が下方に移動することが明らかとなった。また、回転速度 2000rpm 一定で得られた摩擦バット接合継手の断面マクロに及ぼす押付け圧力の影響を図 4 に示す。いずれの継手でも肉盛り材の開先部への充填は十分に行われているが、押付け圧力の増加とともにせん断離脱面が下方に移動し、被接合材上表面よりも下側に位置することが示された。

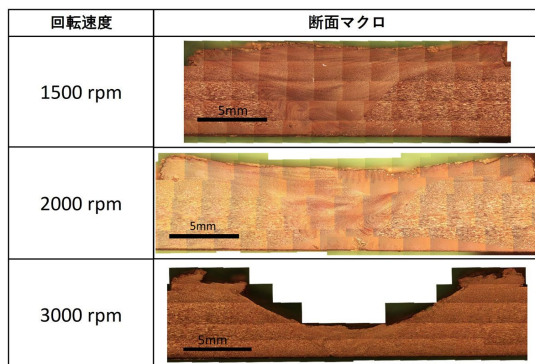


図 3 摩擦バット接合継手の断面マクロに及ぼす棒材回転速度の影響(押付け圧力:30MPa、走行速度:500mm/min)

摩擦肉盛りおよび摩擦を利用した接合技術においては、棒材や接合ツールの回転速度の増加および押付け圧力の増加は、接合温度を増加させることが知られている。接合温度の増加に伴って棒材は軟化するため、軟化した棒材の開先部への充填が促進されたものと考えられる。その一方で、軟化した棒材は外部へ排出されやすくなる。また、接合過程において棒材と被接合材は温度上昇するが、棒

材と被接合材の形状や体積の違いにより温度分布は均一ではない。せん断離脱挙動は棒材内部の温度分布に影響され、ある温度を境界として、棒材と一緒に回転する材料と基材側に固着される材料に分離され、基材側に固着された材料が肉盛り材となる。すなわち、この分離される面(摩擦面)でせん断離脱が生じるものと考えられる。回転速度および押付け圧力の増加は、接合温度を増加させるため、せん断離脱が生じる摩擦面が基材側にシフトすることが予想される。棒材における温度分布からも、回転速度および押付け圧力の増加によりせん断離脱面が下方に移動することが示唆された。

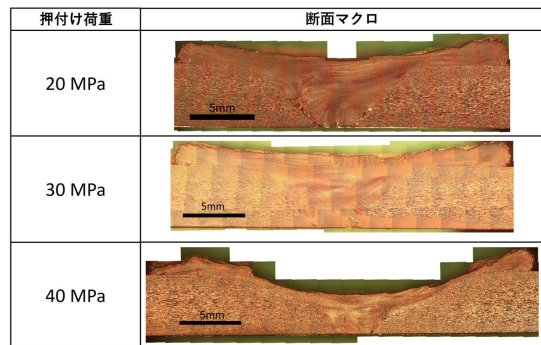


図 4 摩擦バット接合継手の断面マクロに及ぼす押付け圧力の影響(回転速度:2000rpm、走行速度:500mm/min)

(3) 摩擦バット接合継手の界面組織と継手強度の評価：摩擦バット接合継手の引張試験を実施した結果、継手強度は 5052Al 合金母材強度よりも低く、継手効率は最大でも 40% に留まることが示された。その一例として、継手引張強度に及ぼす回転速度の影響を図 5 に示す。回転速度が 1500rpm から 2000rpm に増加することで継手強度は上昇するが、3000rpm では減少する傾向が示された。継手強度に及ぼす押付け圧力の影響も同様の傾向を示した。

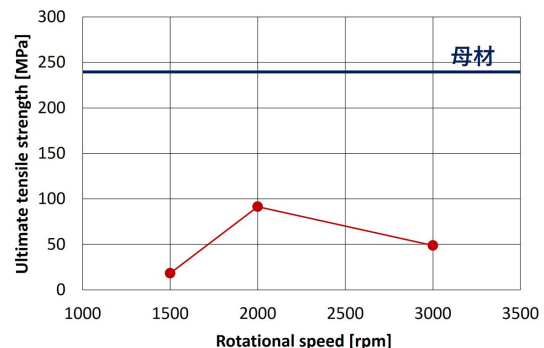


図 5 摩擦バット接合継手の継手強度に及ぼす回転速度の影響

高い継手強度が得られなかった原因と継手強度が回転速度 2000rpm で最大値を示す理由を調べるため、引張試験時の破断起点を調べた結果、き裂はいずれもルート部の開先面

から発生していた。回転速度が 1500rpm と 2000rpm では、そのき裂は初期開先面に沿って進展して破断したが、3000rpm ではルート部近傍において初期開先面に沿って進展するものの、途中から接合中心部へ向かって進展し、破断に至ることが示された。さらに初期開先面近傍（基材と肉盛材の界面近傍）のミクロ組織を詳細に調べた結果、開先面上部には開先面や酸化膜の残存は確認されなかったが、開先面下部には明瞭な開先面の残存が観察され（図 6）その残存量は回転速度が高いほど、また押付け圧力が高いほど減少する傾向が示された。

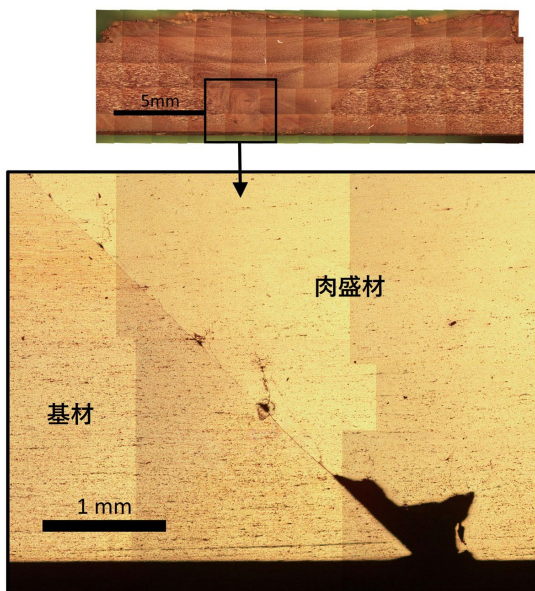


図 6 摩擦バット接合継手のルート部近傍の開先面の光学顕微鏡写真

断面マクロでは、軟化した肉盛材が開先面下部まで充填されている様子が観察されたが、開先面/肉盛材の接合状態は不十分であることが示された。これは棒材の押し込みによって開先面にかかる面圧が下部で相対的に弱くなるためと考えられる。しかし、回転速度や押付け圧力を増加させることで、接合時の温度が上昇して、せん断離脱面が下降するため、接合部中央ののど厚は減少するが、一方で棒材から開先面にかかる面圧が下部でも上昇することから、金属結合が達成される基材/肉盛材の界面（開先面）は拡大する傾向を示すと考えられる。回転速度が 1500rpm から 2000rpm へ増加することに伴う継手強度の向上は、接合された開先面が拡大することに起因する。一方、2000rpm から 3000rpm へ増加することで接合された開先面は更に拡大するものの、のど厚が減少するため、き裂が接合部中心へ進展し、継手強度が低下したものと推察される。しかし、全ての継手において未接合な開先面が残存した結果、母材並みの継手強度を得ることはできなかった。継手強度の向上には、接合時に開先面下部での接合を達成しつつ、のど厚の減少を防ぐ必要があることが示された。そのためには走行速

度の減少、被接合材よりも高温強度が高い棒材の利用や開先面形状の最適化など、更なる接合プロセスの最適化の必要性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~setsugo/lab.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

粉川 博之 (KOKAWA, Hiroyuki)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：10133050

(2) 研究分担者

佐藤 裕 (SATO, Yutaka)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00292243

藤井 啓道 (FUJII, Hiromichi)

東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：70560225

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし