

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06872

研究課題名(和文) アルミニウム合金と炭素繊維強化熱可塑性樹脂の摩擦点接合における接合条件の検討

研究課題名(英文) Examination of Conditions for Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy and Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastic

研究代表者

清水 利弘 (Shimizu, Toshihiro)

豊田工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70196525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、アルミニウム合金と樹脂材料(および繊維強化樹脂材料)を、接着剤やボルト締結に代用する接合法であるFSW(材料を工具によって塑性流動させることによる接合)法において、強度が得られる有効な条件について検討した。A1100合金とABSおよび、ポリカーボネート樹脂の各種の摩擦攪拌重ね合わせ接合法について、工具の形状、回転速度、接合速度等の条件を変化させて作成した継手を評価した。その結果、接合する合金の種類、接合の種類によって最適な接合条件は大きく変化し、また作成した継手の強度は、材料の噛み合いによって担保されていること、摩擦熱による合金温度が理想的なときに強い継手が得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アルミニウム合金と炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料は、いずれも軽量化が要求される構造物に必要な不可欠のものになってきている。しかしながら、この二者は性質が大きく異なるため接合の際には従来の方法では、部品数の増加や、経年劣化といった困難を伴う。これに対して本研究対象のFSWは、固相接合であることから、これまでの接合法に対してメリットがある。これまでFSWは異種金属材料間の接合法として研究がなされてきたが、複合材料と金属間の接合はまだ実用化されてなく、研究はまだ発展途上である。研究の成果は、接合のための諸条件を、作成した継手の強度、表面状態をもとに検討したものであり、実用化に対して資するものである。

研究成果の概要(英文)：The Joints of A1100 Aluminum Alloy with PC and ABS resin has been made using Friction Stir Wrapped Welding, Spot Welding and Butt Welding. A series of condition parameters including tool shape, tool rotating speed, tool travelling rate, tool inserting depth and thickness of each material were examined carefully in order to facilitate to make good shaped and high strength joints. As results, optimal set of parameters varied extensively with different materials, and major welding mechanism turned out to be the anchor effects. Observations of joint sections reveal existence of recrystallized Alloy and suggested the significance of welding temperatures. The friction heats between tool shoulder and Aluminum Alloy during welding generated and increase the heat of Alloy. When the heat of Alloy reaches the recrystallize temperature, the fluidity of the Alloy increases. It is found that the most excellent joints can be made when the welding temperature is just optimum.

研究分野：金属材料の強度評価

キーワード：摩擦攪拌接合 異種材料接合 CFRTP 熱可塑性樹脂 アルミニウム合金

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化対策などの影響から軽量化や小型化が進んでいる。その中で、アルミニウム合金などの軽金属材料と、炭素繊維強化プラスチックに代表される樹脂材料の需要が増加してきている。これと並行して、これらの金属樹脂間の接合技術の開発も進められている。

現在実用化されている金属樹脂間の接合はボルト締めや接着剤などであり、これらには予備加工が必要、乾燥時間が必要などの欠点がある。そのためこれらを代替する新たな接合法の開発が進められている。中でも摩擦攪拌接合（以下 FSW）は有用な技術として目されている。

FSW は固相接合の一種であり、工具を接合部へ挿入、攪拌することで接合を行う。摩擦攪拌接合の特徴として、主に以下の点が挙げられる。

- (a) 固相接合であり、熔融接合で生じるような接合部における結晶粒の粗大化が抑制される。その結果、強度低下が低い。
- (b) アルミニウム合金などは難溶接であるが、固相接合であるため接合方法として有効である。
- (c) 被接合材料の表面処理などの前処理が不要である。
- (d) 接合終了後にプローブに相当する穴が残る。
- (e) 工具からの回転トルクと圧力に耐えうる強固な支持基盤が必要である。

2. 研究の目的

金属間 FSW はすでに研究が進んでいるが、金属樹脂間 FSW に関する研究は接合可能性に焦点を当てたものが多く実用化に向けた研究は少ない⁽¹⁾。また、一般に、FSW の重要なパラメータとして回転ピッチ⁽²⁾があげられている。これは工具送り速度を工具回転数で除したもので、工具一回転あたりの工具送り量を表す指標である。しかし金属樹脂間 FSW においては、同じ回転ピッチであっても継手強度にばらつきがあり、接合強度に関するメカニズムも不明な点が多い。また一般に、金属樹脂間 FSW の接合は樹脂内部に侵入した金属材料がアンカーのような役割を果たすアンカー効果によるものとされている⁽²⁾。

以上のことから、本研究では、これまでに接合可能であることが示された A1100 アルミニウム合金と ABS 樹脂の FSW を行い、その継手強度に対する接合パラメータによる影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

使用した供試材は金属材料が板厚 3mm の A1100、樹脂材料が板厚 5mm の ABS 樹脂である。A1100 の組成を Table 1 に、A1100 と ABS 樹脂の機械的性質を Table 2 に示す。本試験ではどちらも 150×50mm に切断して使用した。また一部の A1100 は接合中の温度変化を測定する際に放射率を一定にするためにマットブラック塗装をして使用した。

Table 1 Chemical composition of A1100 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
~0.95		0.05~0.20	~0.05	~0.10	Bal.

Table 2 Mechanical properties and recrystallization temperature of base materials.

Materials	Tensile strength [MPa]	Coefficient of thermal expansion [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	Vickers hardness [HV0.1]	Recrystallization temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Glass transition temperature [$^{\circ}\text{C}$]
A1100	88	23.6	40.02	180~200	-
ABS	23	0.6	-	-	100~120

A1100 と ABS 樹脂を Fig. 1 に示すように重ね合わせて接合した。工具は先行研究^{(1)~(6)}を参考に SKD11 相当の鋼材を Fig. 2 に示す形状に加工したものを使用した。

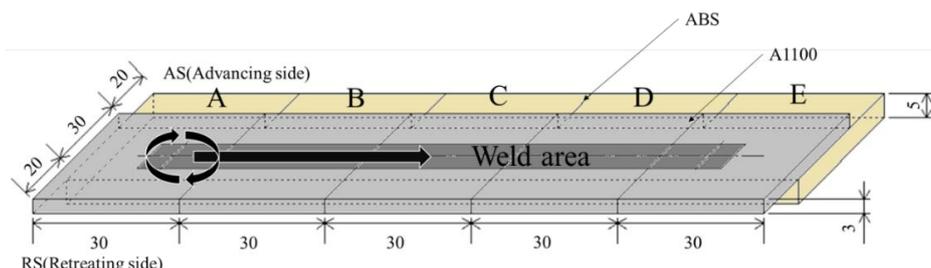


Fig. 1 Welding process of FSW joint

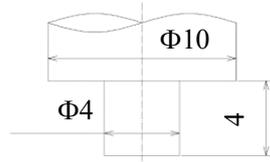


Fig. 2 FSW tool shape

工具回転数 $n = 500 \sim 1500 \text{rpm}$, 工具送り速度 $v = 300 \sim 900 \text{mm/min}$ の範囲で変化させて接合を行い, 主として表面状態について検討をした結果, 工具押し込み深さは工具ショルダ部がアルミニウム合金より 0.1mm 高い位置とした. 工具は A1100 に対して垂直に挿入し, 工具に傾斜角は設けない. 接合中に NEC 三栄製 TH9100MVI 赤外線放射温度計 (測定可能レンジ $0 \sim 250^\circ\text{C}$) を用いて A1100 表面の温度変化を測定した.

引張せん断強度の比較対象として, エポキシ樹脂系接着剤を用いた継手を作製した. エポキシ樹脂は重ね合わせられた 30mm 幅前面に接着剤を塗布し, 24 時間乾燥させたものを用いた.

4. 研究成果

(1) 実験結果

①継手表面性状 作製に成功した継手は, 接合部の表面性状から 2 種類に大別できた. 一つは表面に欠陥を持たず, 表面に飛び出したバリも小さい継手であり, もう一つは表面に溝状の欠陥を持ち, RS 側に大きなバリを有する継手である. 前者を *type-s*, 後者を *type-r* として区別し, 各条件における接合結果を Fig. 3 に示す. *type-s* で接合可能な条件は工具回転数 $n \leq 1000 \text{rpm}$, 工具送り速度 $v \leq 600 \text{mm/min}$ の回転ピッチ $p = 0.45 \sim 0.6$ 程度の領域に限られていた. また, 工具破損は低工具回転数域かつ回転ピッチ $p \geq 0.8$ の領域で発生したが, 工具回転数 $n \geq 1000 \text{rpm}$ の領域では回転ピッチ $p = 0.9$ でも工具破損には至らなかった.

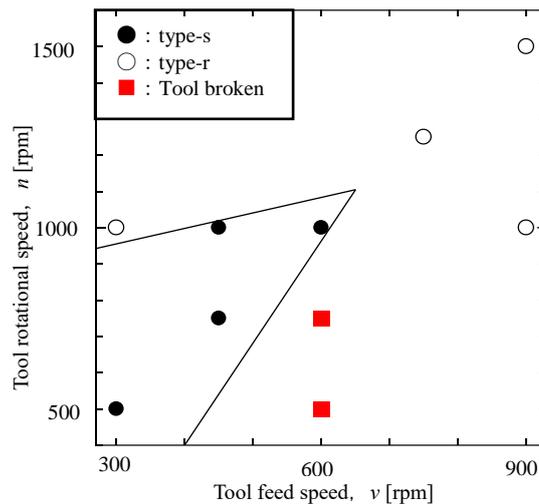
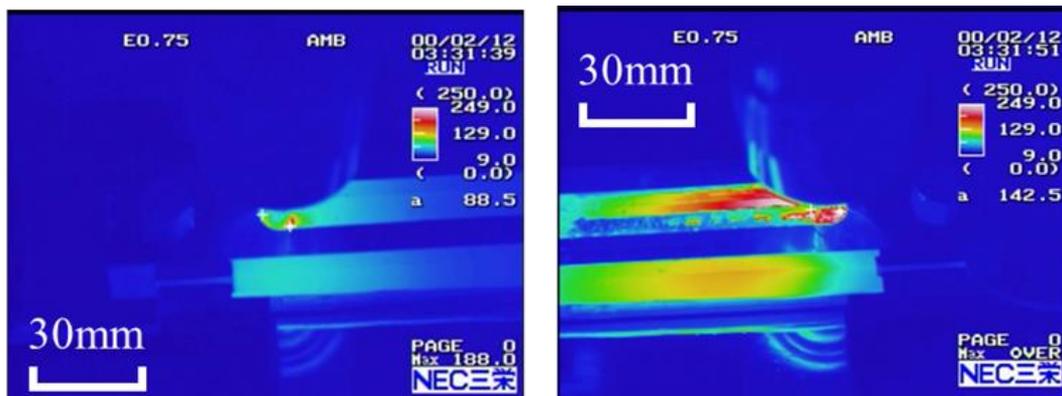


Fig. 3 Condition of joint

②接合中の温度測定結果 接合中の温度変化を測定したサーモカメラの画面のうち一つを Fig. 4 に示す. (a)が接合開始点 (Fig. 1:Position A), (b)が接合終了点 (Fig. 1:Position E) を示す.



(a) Position A

(b) Position E

Fig.4 Image of temperature distribution during FSW process

また、各工具回転数と送り速度における接合中の最高温度を Table 3 に示す。サーモカメラのレンジ上限が 250°Cであるため、250°Cを超えたものは>250°Cと表記した。

Table 3 Temperature of weld point in various welding conditions

Conditions		Temperatures[°C]	
n [rpm]	v [mm/min]	Section A	Section E
1000	600	174.0	>250
1000	450	180.7	>250
750	450	127.0	>250
500	300	137.3	209.0

最高温度は工具挿入部周辺に発生し、次第に増加した。また接合が進むにつれて A1100 全体の温度が上昇し、攪拌部以外でも 100~150°C程度まで上昇している。工具回転数 $n=1000\text{rpm}$ の条件においては接合開始時点ですでに 180°C前後に達しており、A1100 の再結晶温度に近い値を示した。接合終了時には 250°Cを超え、再結晶温度を十分に超える値となった。工具回転数 $n=750\text{rpm}$ および $n=500\text{rpm}$ の条件においては、接合開始時点では 130°C前後で A1100 の再結晶温度より低い値を示したが、接合終了時には $n=500\text{rpm}$ でも 200°Cを超えており、再結晶温度を超えていた。

③ビッカース硬さの測定結果 Type-s 継手の各条件におけるビッカース硬さの測定結果を Fig. 5 に示す。図中黒太線は母材 A1100 の硬さを表している。母材 A1100 の硬さは、接合に使用する前の A1100 のビッカース硬さを 5 点測定した結果の平均値である。

工具回転数 $n=1000\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v=600\text{mm/min}$ の条件では、A-B 断面において 1 点を除いて硬さが大きく変化することは無く、一方 D-E 断面では工具攪拌部から AS 側にかけて硬さが多い場所で約 10 低下している。

工具回転数 $n=1000\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v=450\text{mm/min}$ の条件では、A-B 断面において一部で約 10 の硬さの上昇があり、一方 D-E 断面の硬さの低下は $n=1000\text{rpm}$ 、 $v=600\text{mm/min}$ の条件に比べて狭い範囲に限られたが、大きいところで約 10 低下している。

工具回転数 $n=750\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v=450\text{mm/min}$ の条件では、A-B 断面において工具攪拌部を中心に硬さが約 15 上昇しており、D-E 断面においては $n=1000\text{rpm}$ 、 $v=600\text{mm/min}$ の条件と同様に工具攪拌部から AS 側にかけて硬さが多い場所で約 10 低下している。

工具回転数 $n=500\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v=300\text{mm/min}$ の条件では、A-B 断面において工具攪拌部から RS 側にかけて硬さが最大で約 25 上昇しており、D-E 断面においても硬さが母材に比べて約 13 上昇する結果となった。

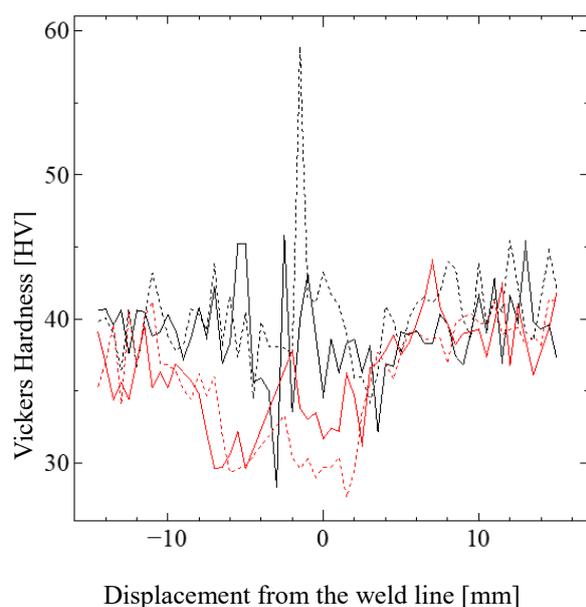


Fig. 5 Vickers hardness across the weld line

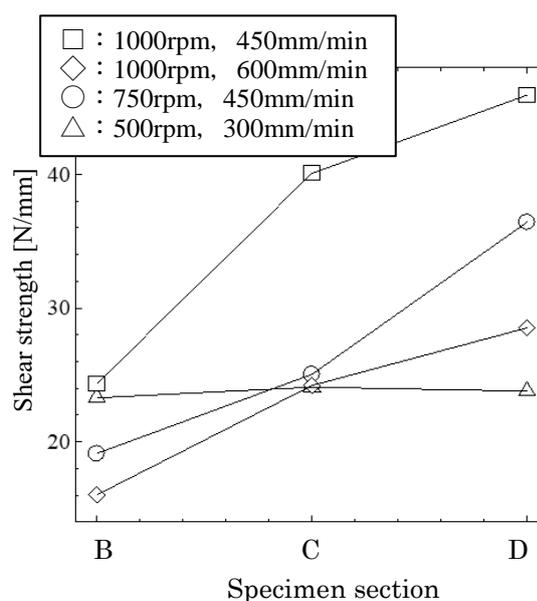


Fig. 6 Shear strength of joint specimen

④引張せん断試験結果 Type-s の条件の試験片に引張せん断試験を行った結果の平均を Fig. 6 に

示す。重ね合わせ FSW においては接合面積を定義することが難しいため、試験片幅で最大せん断荷重を除いた単位幅当たりのせん断荷重を比較した。またエポキシ樹脂系接着剤を用いた継手の最大せん断強度は 108N/mm となった。

強度に変化の見られなかった工具回転数 $n = 500\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 300\text{mm/min}$ の条件を除いて、他の 3 条件では接合序盤の B 試験片に比べて接合終盤の D 試験片のせん断強度が高くなる結果が得られた。また工具回転数 $n = 1000\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 450\text{mm/min}$ の条件では D 試験片において約 45N/mm の最大せん断強度となったが、これはエポキシ樹脂系接着剤のおよそ半分の強度である。

⑤実験結果の考察 硬さの増減およびせん断強度の変化は、加工中の加工硬化および再結晶によって以下のように説明できる。

工具回転数 $n = 1000\text{rpm}$ の 2 条件においては接合開始時点で再結晶温度に近い約 180°C まで加熱されていたため、攪拌による加工硬化の影響が再結晶によって解消されて硬さの上昇につながらなかったと考えられる。また接合終了時点においては 250°C を超えるほどの十分な加熱がなされており、母材製作過程における加工硬化まで再結晶によって解消されて軟化につながったと考えられる。そのため D 試験片においては、ABS 内部に侵入してアンカー効果をもたらしていた A1100 が、引張による変形の際に低荷重でせん断されることなくアンカーの役割を果たし続けたことでせん断強度の向上につながったと考えられる。

工具回転数 $n = 750\text{rpm}$ の条件においては、接合開始時点ではまだ約 130°C であったため再結晶は起こらず、加工硬化が解消されなかったために大きく硬さが上昇したと考えられる。一方で接合終了時点では 250°C を超えるほどの過熱がなされたことで、母材製作過程における加工硬化まで解消されて軟化したと考えられる。そのため D 試験片においては、工具回転数 $n = 1000\text{rpm}$ の条件と同様の理由でせん断強度が向上したと考えられる。

⑥本研究で得られた結果のまとめ

1. FSW 中の A1100 の表面温度は接合条件によって変化し、良好な表面性状をもって接合可能な領域では $120\sim 250^{\circ}\text{C}$ 超となった。工具回転数が高くなるほど接合開始点温度と接合終了点温度の両方で上昇する傾向にあった。
2. A1100 の硬さの変化は条件によって異なり、以下のようになった
 - a. 工具回転数 $n = 1000\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 600\text{mm/min}$ では接合序盤の A-B 断面においては増減がなく、接合終盤の D-E 断面において硬さが約 10 減少している。
 - b. 工具回転数 $n = 1000\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 450\text{mm/min}$ では接合序盤の A-B 断面においては約 10 増加し、接合終盤の D-E 断面においては約 10 減少している。
 - c. 工具回転数 $n = 750\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 450\text{mm/min}$ では接合序盤の A-B 断面においては約 15 増加し、接合終盤の D-E 断面においては約 10 減少している。
 - d. 工具回転数 $n = 500\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 300\text{mm/min}$ では接合序盤の A-B 断面においては約 25 増加し、接合終盤の D-E 断面においても約 13 増加している。
3. 引張せん断荷重は工具回転数 $n = 500\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 300\text{mm/min}$ 以外の 3 条件において接合終盤の D 試験片に向かって増加し、最大で 45N/mm（工具回転数 $n = 1000\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 450\text{mm/min}$ ）となった。
4. 温度測定の結果、硬さが減少する場所では接合中温度が再結晶温度の $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ を 50°C 以上超えており、再結晶による加工硬化の解消が要因であると考えられる。
5. 工具回転数 $n = 500\text{rpm}$ 、工具送り速度 $v = 300\text{mm/min}$ を除く 3 条件において引張せん断応力が D 試験片に向けて増加しているのは、再結晶によって A1100 の変形能が増加し、ABS 樹脂内部に侵入した A1100 が引張による変形で容易に破断することなくアンカー効果が維持されたためと考えられる。

参考文献

- (1)倉部洋平, 宮下幸雄, 堀久司, 接合部の材料複合化を同時に行う PVC 摩擦攪拌点接合の接合プロセスと接合強度, 溶接学会論文集 Vol.33 No.1, pp34-41(2015)
- (2)小澤崇将, 加藤数良, 前田将克, 3003 アルミニウム合金と熱可塑性樹脂の重ね摩擦攪拌接合, 軽金属 Vol.65 No.9, pp403-410(2015)
- (3)H.J.Liu, H.Fujii, M.Maeda, K.Nogi, Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology 142, pp692-696(2003)
- (4)植松美彦, 柿内利文, 近藤英介, 戸崎康成, IBRAHIM Ishak, A6061/SS400 異種金属摩擦攪拌接合継手の疲労挙動, 溶接学会論文集 Vol.31 No.2, pp112-118(2013)
- (5)西田英人, 小椋智, 波多野遼一, 倉嶋寛貴, 藤本光生, 廣瀬明夫, A3003/SUS304 重ね摩擦攪拌接合継手の疲労靱性と疲労き裂進展挙動, 溶接学会論文集 Vol33 No.1, pp20-28(2015)
- (6)高橋正詞, 加藤数良, 時末光, 2024 アルミニウム合金摩擦攪拌接合継手の機械的性質, 軽金属 Vol.61 No.1, pp14-19(2011)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永濱隆幸, 清水利弘, 中村裕紀
2. 発表標題 AI-ABS樹脂摩擦攪拌接合継手の接合メカニズム
3. 学会等名 第24回高専シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村圭之介, 清水利弘, 中村裕紀
2. 発表標題 AI/PC摩擦攪拌点接合継手の評価
3. 学会等名 第24回高専シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長濱隆幸, 清水利弘
2. 発表標題 AI / ABS樹脂摩擦攪拌接合継手の強度評価
3. 学会等名 23rd高専シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 裕紀 (Nakamura Yuki) (10612939)	豊田工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (53901)	