

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560876

研究課題名(和文)摩擦攪拌異材接合における材料流動

研究課題名(英文)Material flow during welding of dissimilar materials by friction stirring

研究代表者

安井 利明 (Yasui, Toshiaki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10263229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦攪拌接合によるアルミ合金と鉄鋼材料の接合は、輸送機器の軽量化に有望な方法である。その接合条件である入熱量(接合ツール回転数、接合速度)、接合ツール形状、接合線形上は、接合部材の材料流動に影響を与える。この材料流動を制御することが欠陥のない接合体の創製には重要である。そこで本研究では、トレーサを用いたX線CT撮像および数値シミュレーションにより摩擦攪拌による材料流動の可視化を実施し、各種接合条件がどのような影響を与えるかを明らかにした。また、この材料流動により接合界面に形成される反応層の形成機構を明らかにすると共に、その反応層の安定性を放射光によるX線回折により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Friction stir welding of aluminum alloy and steel is attractive method to fabricate light structure for transportation vehicle. The welding conditions, such as heat input (tool rotation speed and welding speed) and shape of welding tool shape and weld line influence on the weld material and the material flow during welding. Control of material flow is important for fabrication of sound weld without defect. Thus, the material flow in the weld was investigated by using X-ray CT technique after welding and numerical simulation. Also, stability of reaction layer in the weld interface by this material flow was evaluated by strength measurement and X-ray diffraction by synchrotron light.

研究分野：接合加工、プラズマプロセス、表面改質

キーワード：摩擦攪拌接合 FSW 異材接合 材料流動 金属間化合物

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止のための取り組みとして、自動車などの輸送機器では軽量化による燃費の改善のために、鉄鋼材から軽量のアルミ、マグネシウムなどへの材料置換が進められている。経済性と安全性の観点からすべてをこれらの材料に置き換えることは困難であるため、安価で強度の高い鉄鋼材と併用することが望ましく、ここに鉄鋼材と軽量材との異種金属間接合が必要となる。しかし、アルミ材と鉄鋼材の熔融溶接では、接合界面に数 μm 以上の厚い金属間化合物層を生成し高い接合強度を得ることがこれまで困難である。研究代表者らは、非熔融の固相接合である摩擦攪拌接合 (FSW) 応用し、接合ツールを軟質なアルミ材に挿入して回転・移動によりアルミの材料流動を起こし、硬質な鉄鋼材に押し付けることにより接合界面に生成する反応層を数百 nm 以下に抑えて高い接合強度を得ることを見出した。

本研究では、摩擦攪拌異材接合における材料流動状態を明らかにするとともに、接合欠陥や接合界面の状態を制御して安定な接合体の作製するための材料流動制御法の確立を目指す。

2. 研究の目的

摩擦攪拌による異材接合法では、その接合条件である入熱量 (接合ツール回転数、接合速度)、接合ツール形状、接合線形状が、接合部材の材料流動に影響を与えるため、この材料流動を制御することが欠陥のない接合体の創製には重要である。本研究では、摩擦攪拌による材料流動状態と接合界面形成機構を調査すると共に、反応層が接合強度に与える影響を調査することを目的とした。

3. 研究の方法

3. 1 材料流動状態の調査

摩擦攪拌によるアルミ材と鉄鋼材の突合せ接合ではアルミ材のみを攪拌する (図1)。この接合時のアルミの材料流動状態を明らかにするため以下の実験を実施した。

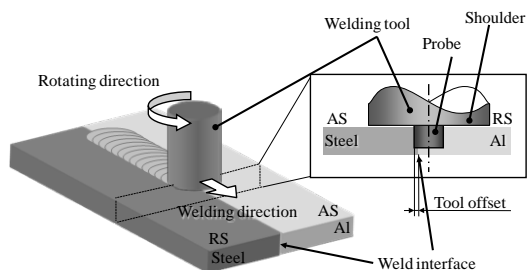


図1 摩擦攪拌によるアルミと鉄の接合

3. 1. 1 X線CTによる材料流動観察

トレーサとして BaSO_4 粉末を油性粘土に練り込んで接合部材に埋め込み接合実験を行ない、得られた接合体を X 線 CT 撮像する。接合部におけるトレーサの分布を三次元可視化することにより、接合時の材料流動状態を明らかにした。

3. 1. 2 数値計算による材料流動解析

摩擦攪拌によるアルミ材と鉄鋼材の突合せ接合におけるアルミ材内の材料流動の定常熱流体解析を行った。解析には有限要素流体解析ソフト (Altair AcuSolve) を用いた。

3. 2 接合界面形成機構の調査

接合ツールのプローブ側面による鉄鋼材表面の新生面の創出状態を調査するため、接合前に鉄鋼材の突合せ面に厚い酸化皮膜を形成させ、接合後に断面 SEM 観察および EDS 面分析を行った。また、接合体のアルミ材を溶解させることにより、接合界面全域で鉄鋼材表面がどのように削りだされているかを調査した。

次に鉄鋼材表面へのアルミ材の付着状態を調査するため接合体の破断面観察、接合界面の温度測定および接合断面組織の観察を行った。

3. 3 反応層が接合強度に与える影響調査

接合界面に生成する反応層が接合強度に与える影響を定量的に明らかにするため以下の実験を実施した。

3. 3. 1 反応層の強度試験

反応層厚さと強度の関係を調査するために、接合体を非酸化雰囲気の下で加熱 ($400 \sim 500^\circ\text{C}$) し、加熱時間により異なる厚さ ($0.5 \sim 5 \mu\text{m}$) の反応層を持つ試験片を作製した。SEM により反応層厚さの計測した後、引張強度試験を行った。

3. 3. 2 反応層の構造変化の調査

接合界面の反応層の成長挙動を観察するため、真空雰囲気下で接合体を加熱し、その反応層の化合物状態の変化を放射光による X 線回折を用いたその場観察により明らかにした。

4. 研究成果

4. 1 材料流動状態

図2に X 線 CT 撮像によりプローブ形状による上下方向の材料流動の違いを調査した結果を示す。ストレートプローブではプローブ通過後、上下方向に材料があまり移動しないのに対し、ネジプローブ接合では上下方向の流動が顕著であり、通過後の材料の多くは元の高さもしくはプローブ底部に堆積している。

図3に数値解析で得られた接合界面の圧力分布を示す。これら解析結果より、接合ツールの挿入位置や鉄鋼材の鋼種の違いにより、接合界面での圧力が異なり、これが接合強度に影響していることが明らかとなった。

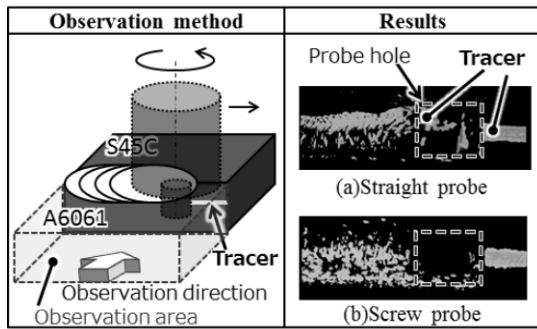


図2 プローブ形状による材料流動の違い

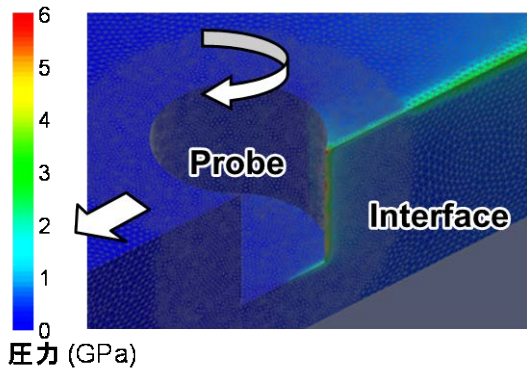


図3 接合界面における圧力分布

4. 2 接合界面形成機構

酸化皮膜による鉄鋼材表面の新生面の創出状態をストレートプローブで調査した結果を図4に示す。ストレートプローブではプローブ接触部全域にわたって鉄鋼材の表面が削られ、新生面が創出されていた。一方、ネジプローブでは接合界面の断面形状に凹凸が見られ、凸部では凹部よりも鉄鋼材表面の削られる量が小さいことが明らかとなった。

接合体破断面におけるアルミの特性X線像からストレートプローブでは深さによってアルミの付着状態に違いが見られた。ネジプローブでは断面SEM観察における凹部に相当する箇所でもアルミの濃化が確認された。この部分でアルミが接合界面に強固に密着することがネジプローブ接合体の継手強度を高くする一つの要因と考えられる。

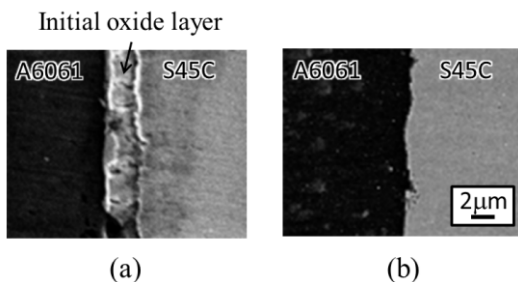


図4 接合前後の接合界面の変化
(a) 接合前, (b) 接合後

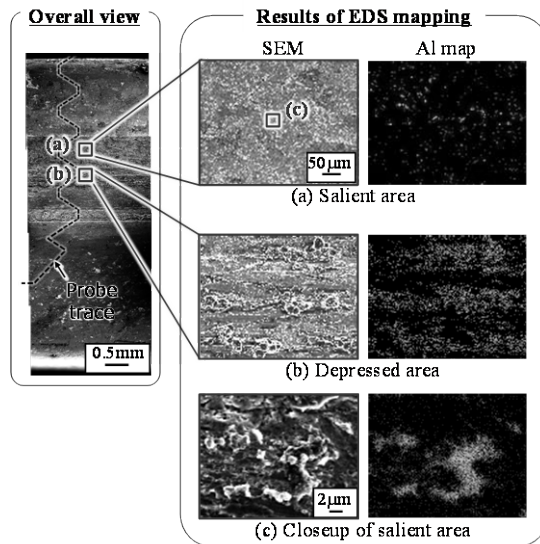


図5 鉄鋼材表面へのアルミ材の付着状態

4. 3 反応層が接合強度に与える影響

加熱により反応層厚さを調整した試験片を用いて引張強度の調査を行った結果を図6に示す。反応層厚さが $1\ \mu\text{m}$ 以下では強度の低下が見られず、 $1\ \mu\text{m}$ 以上では強度が次第に低下することが示された。また、加熱中の反応層の成長過程について放射光を用いたXRD測定によりその場観察した結果を図7に示す。この結果、一部の金属間化合物が特定の面方位に優先成長する挙動が観察された。

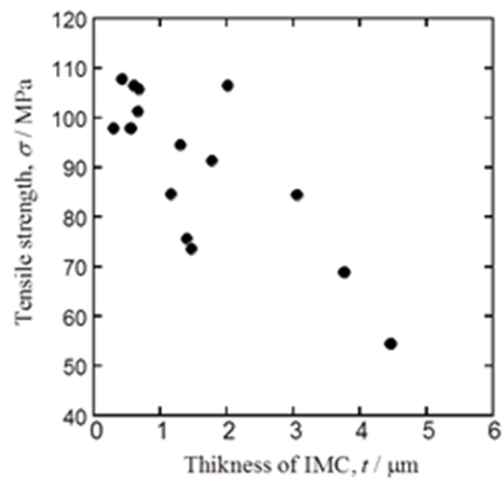


図6 引張強度と反応層厚さの関係

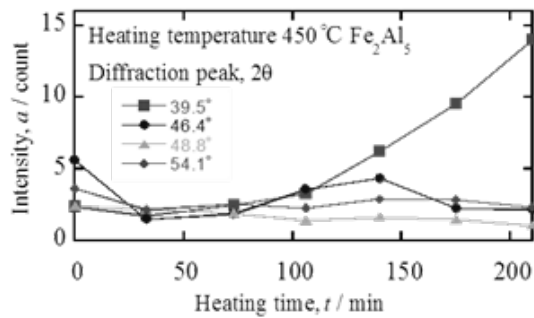


図7 加熱時間による回折ピーク強度の変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 安井利明、石田將、福本昌宏、アルミニウム合金/鋼の摩擦攪拌異材接合における材料流動の X 線 CT 観察、軽金属 査読有、64 巻、2014、604-610.
<http://doi.org/10.2464/jilm.64.604>
- ② T. Yasui、N. Ando、S. Morinaka、H. Mizushima、M. Fukumoto、Effect of weld line shape on material flow during friction stir welding of aluminum and steel、IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering、Vol.61、2014、012009.
doi:10.1088/1757-899X/61/1/012009

[学会発表] (計 12 件)

- ① T. Shimizu、T. Yasui、M. Fukumoto、Fluid Dynamics Analysis of Material Flow in Friction Stir Welding of Aluminum, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012), 2012.11.5-8, 豊橋.
- ② A. Imai、M. Tsubaki、T. Yasui、M. Fukumoto、Effect of Tool Shape on Weld Interface between Al/Fe by Friction Stirring, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012), 2012.11.5-8, 豊橋.
- ③ 清水貴明、安井利明、福本昌宏、Al 合金/鉄鋼材料摩擦攪拌接合の接合特性におよぼす鋼種の影響、日本機械学会東海支部第 62 期総会・講演会、2013.3.18-19, 三重.
- ④ 清水貴明、安井利明、福本昌宏、数値流体解析による異材摩擦攪拌接合の接合特性評価、平成 25 年度溶接学会春季全国大会、2013.4.17-19, 東京.
- ⑤ T. Yasui、T. Shimizu、M. Fukumoto、Effect of Material Flow by Friction Stir Welding between Aluminum and Steel on Weld Interface, International Joint Symposium on

Joining and Welding (IJS-JW2013), 2013.11.6-8, 大阪.

- ⑥ N. Ando、T. Yasui、M. Fukumoto、Influence of weld line shape on two-dimensional welding between steel and aluminum by friction stirring, International Symposium on Interfacial Joining and Surface Technology (IJST2013), 2013.11.27-29, 大阪.
- ⑦ 伊東篤志、安井利明、福本昌宏、Al 合金/鉄鋼材料の摩擦攪拌接合における接合線形状の影響、溶接学会春季全国大会、2014.4.22-24, 東京.
- ⑧ T. Yasui、A. Imai and M. Fukumoto、Formation Mechanism of Weld Interface between Aluminum and Steel by Friction Stirring, 10th International Symposium on Friction Stir Welding, 2014.5.20-23, Beijing.
- ⑨ 安井利明、摩擦攪拌接合を用いた異種材料界面接合現象について、溶接学会秋季全国大会フォーラム、2014.9.10-12, 富山.
- ⑩ 山口森彦、安井利明、福本昌宏、異種金属の摩擦攪拌接合における金属間化合物が強度に与える影響、金属学会秋期講演大会、2014.9.24-26, 名古屋.
- ⑪ 安井利明、摩擦攪拌による異材接合技術の現状と将来、生産加工研究会第 51 回研究会、2014.11.19, 豊橋.

[その他]

ホームページ等

<http://www.tut.ac.jp/university/faculty/me/565.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

安井 利明 (YASUI, Toshiaki)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10263229

(3)連携研究者

福本 昌宏 (FUKUMOTO, Masahiro)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80173368