

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06814

研究課題名(和文)異種金属箔材の摩擦攪拌拡散接合における攪拌領域の特定と接合メカニズムの解明

研究課題名(英文) Detection of stir zone and elucidation of bonding mechanism in friction stir diffusion bonding of dissimilar metallic foils

研究代表者

高山 善匡 (Takayama, Yoshimasa)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：60163325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：工業用純チタン箔の上にA5052, A4045およびA1050アルミニウム合金箔を重ね、摩擦攪拌拡散接合(Friction Stir Diffusion Bonding: FSDB)を行った。箔材のFSDBは105,000rpmの超高速回転するエアスピンドルによりアルミニウム上箔のみを攪拌することにより首尾よく遂行された。摩擦攪拌拡散点接合では、接合強度はツール中心からの距離によって変化した。攪拌領域と接合機構を調べるため接合断面のEBSD解析を行い、強度分布に対応する微細粒領域と粗大粒領域が観察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工業用純チタン箔の上にA5052, A4045およびA1050アルミニウム合金箔を重ね、回転するツールを箔材に押付け材料を加熱するとともに攪拌する摩擦攪拌拡散接合(FSDB)を行った。通例板材に適用されるFSDBを0.1mm厚の箔材に適用し、超高速回転するエアスピンドルを用いることにより首尾よく接合された。これまで不明であった攪拌領域と接合機構を接合断面のEBSD結晶方位解析により明らかにした。また、高い接合強度が大ききなひずみに対応する微細粒領域で得られることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Friction stir diffusion bonding (FSDB) has been applied to lap foil joints of A5052, A4045 or A1050 aluminum alloy on top of commercial purity (CP) titanium. FSDB of the foils was successfully performed through stirring only the upper aluminum foil by the air spindle with an extremely-high rotation speed of 105,000 rpm. In the spot FSDB, bonding strength varied with a distance from the tool center. In order to investigate the stir zone and the stirring mechanism of the upper foil, EBSD analysis was performed on the cross-section of the joint. As a result, two characteristic regions were observed, the former has fine grains while the latter has coarse. The distribution of these regions corresponded to the joint strength distribution.

研究分野：材料工学

キーワード：摩擦攪拌接合 摩擦攪拌拡散接合 箔 アルミニウム チタン EBSD解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding; FSW) は、1991年に英国溶接研究所で開発された固相接合法である。円柱形の端面にプローブと呼ばれる突起を有するツールを高速で回転させ、被接合材に押し当てることにより摩擦熱を生じさせて軟化させ材料を攪拌することにより接合する。通常、摩擦攪拌接合では、接合界面にツールを貫入させ、界面を含めた周辺部 (攪拌部) を練り混ぜることに被接合材を一体化させる場合が多い。これは、狭義の「摩擦攪拌接合」とも言えるものである。一方、最近盛んに研究開発がなされている異種材料の摩擦攪拌接合においては、Al合金/鋼の組合せに代表されるように、界面近傍の比較的軟質の Al 合金材にプローブを貫入させ、摩擦攪拌により材料を攪拌・加熱し、拡散を促進させることにより接合する方法が用いられている。後者は、摩擦攪拌のみならず拡散が接合の重要な因子となることから摩擦攪拌拡散接合 (Friction Stir Diffusion Bonding; FSDB) と呼ばれることがある。この摩擦攪拌拡散接合は、広い意味では、摩擦攪拌接合に含まれる。

異種材料の接合は、輸送機器のマルチマテリアル化 (部品毎の適材化) を背景に関連分野を中心に極めて重要な技術となっているが、自動車にアルミニウム合金製ワイヤハーネス (電源供給・信号通信用の内部配線束) が採用され始めており、細線材・薄板材等の電気電子部品においてもその重要性を増している。箔の摩擦攪拌接合は、研究論文としての報告例が限られており、特に異種箔材の研究成果は公表されていない。

2. 研究の目的

異種材料の接合は、輸送機器のマルチマテリアル化を背景に極めて重要な技術となっており、構造材のみならず細線材・薄板材等の車載用電気電子部品においてもその重要性を増している。高速回転ツールを用いた異種箔材の摩擦攪拌拡散接合 (FSDB) は、通常の摩擦攪拌接合 (FSW) とは異なる特殊性を有しており、接合メカニズムは必ずしも明らかになっていない。

そこで、本研究では Al 合金/異種金属箔材の重ね合わせ FSDB の特殊性を踏まえ、攪拌領域を特定するとともに接合メカニズムを解明する。(1) 箔材重ね合わせ FSDB を可能にする接合装置の試作、(2) 接合状況に及ぼす基本的接合パラメータの影響の調査、(3) 攪拌領域の特定、(4) 接合界面の金属間化合物の構造の同定、(5) 接合メカニズムの解明、を行う。

3. 研究の方法

まず、箔材用摩擦攪拌装置に高精度位置決め機構を備えた垂直軸方向移動ステージを取り付け、移動精度 $0.5\mu\text{m}$ 、分解能 $2\mu\text{m}$ の接合実験を可能にする。次に、この装置を用い、Al 合金/異種金属箔材の重ね合わせ FSDB に及ぼす押し込み量とツール表面粗さの影響を調べる。さらに、接合界面の TEM 観察を行い、金属間化合物相厚さと構造の関係を調査する。

Al 合金/異種金属箔材の重ね合わせ FSDB に及における攪拌領域に着目し、SEM/EBSD と Pd 蒸着により領域を特定する。また、Al 合金箔と異種金属箔材の組合せをも含めた接合条件と攪拌領域の関係を検討する。さらに、接合条件と界面金属間化合物相の構造の関係を検討し、接合メカニズムを解明する。

ツールの材質は SKD61、先端に $R1.0[\text{mm}]$ を持ち、表面粗さ $Ra0.03[\mu\text{m}]$ 、径 $3.6[\text{mm}]$ の円柱状ツールを用いた。5052Al 合金箔あるいは 1050Al 箔を上、Ti, Zr, Cu, Fe, 5052Al 合金箔のいずれかを下に配置し治具で固定し、室温あるいはヒーターで箔材を熱し、上部から高速回転させたツールを押し込み、重ね合わせ接合を行った。なお、ツールと被接合材との距離および押し込み量は $1.5\mu\text{m}$ あるいは $0.1[\mu\text{m}]$ の位置決め精度を有する Z ステージを使用し制御した。接合後の試料は接合部中心で切り出し、接合断面を研磨した後にデジタルマイクロスコープ及び SEM により観察を行った。温度測定には放射温度計を用い、ツール後方約 $1.0[\text{mm}]$ の位置の試料表面温度を放射率 0.320 に設定して測定した。

ツール回転数は $105,000\sim 120,000[\text{rpm}]$ 、押し込み量を任意に設定した。加えてツール貫入から引き抜きまでの摩擦時間を任意に設定し、接合を行い、接合界面の形成について考察した。一部の試料に対しては、接合後ツール中心を含む面で切断した上箔 A1050Al 断面を SEM/EBSD により解析した。

4. 研究成果

5052 アルミニウム合金と異種金属の $100\mu\text{m}$ 厚の箔材に対し、摩擦攪拌拡散接合 (Friction Stir Diffusion Bonding : FSDB) による重ね合わせ点接合を試みた。異種金属の組み合わせは混合エンタルピーが負の値を取る 5052Al/Ti、5052Al/Cu、5052Al/Zr、5052Al/Fe と選定した。接合パラメータは初期回転数 $60,000\sim 105,000[\text{rpm}]$ 、押し込み量 $3\sim 20[\mu\text{m}]$ の範囲で変化させ、接合時間 $10[\text{s}]$ 一定とした。摩擦攪拌は、接合過程において摩擦熱による温度上昇と材料の攪拌の二つの効果を与える。このうち温度の寄与を調査するためにセラミックヒーターを用い、箔材を初期設定温度 $20\sim 150[^\circ\text{C}]$ の範囲で加熱して接合実験を行った。その結果、各温度において最適接合条件が異なる結果が得られた。すなわち、5052Al/Ti の組み合わせにおいて、初期設定温度 $20[^\circ\text{C}]$ 時には、接合強度 $=146[\text{MPa}]$ が得られた。一方、初期設定温度 $150[^\circ\text{C}]$ 時には、接合強度 $=69.13[\text{MPa}]$ が得られた。ツールの先端は、粒度 P2000 の研磨紙で表面処理を行い、 $Ra26[\text{nm}]$ とした。このツールを使用した接合において、最小押し込み量 $3[\mu\text{m}]$ で良好な接合直径と上箔厚さを得た。以上から接合パラメータ、初期設定温度、押し込み量及び初期回転数を改

善することによって良好な接合継手を得られることが明らかとなった。

工業用純チタン箔の上に A5052, A4045 および A1050 アルミニウム合金箔を重ね、摩擦攪拌拡散接合(FSDB)を行った。箔材の FSDB は 105,000rpm の超高速回転するエアスピンドルによりアルミニウム上箔のみを攪拌することにより首尾よく遂行された。摩擦攪拌拡散点接合では、接合強度はツール中心からの距離によって変化した。攪拌領域と接合機構を調べるため接合断面の EBSD 解析を行い、強度分布に対応する微細粒領域と粗大粒領域が観察された。図 1 は、押込み量 10 μ m で接合した点接合継手のツール中心を通る断面の左半分の EBSD 解析結果(RD IPF-map)である。図右側の矢印がツール中心である。図のように、ツール中心からの距離に応じて結晶方位が変化していることが分かる。また、バリが生じた中心からの距離 1.5mm 付近で結晶粒の粗大化が確認される。図 2 はツール中心からの距離 1.2mm 付近の解析結果である。上箔上部に深さ 50 μ m 程度のナゲット状で非常に微細な結晶粒よりなる 2 つの領域が確認できる。これらの領域が攪拌部と思われる。

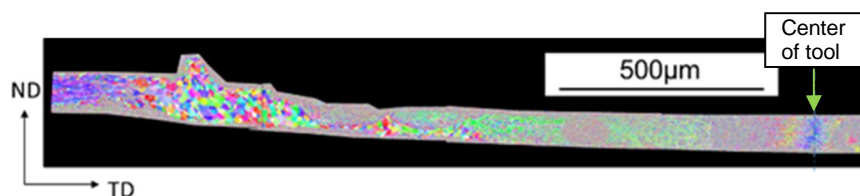


図 1 上箔 A1050Al 点接合中心断面左半分の EBSD 解析結果

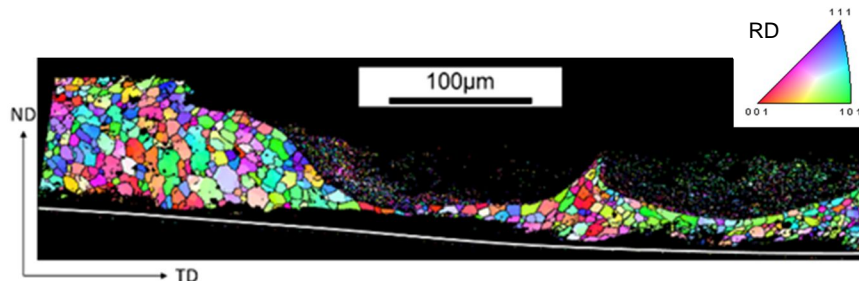


図 2 点接合中心断面左半分ツール中心からの距離 0.9mm ~ 1.4mm 領域の EBSD 解析結果 (図 1 の一部を拡大したマップ)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshimasa Takayama, Ryuichi Hamano, Takuya Arakawa and Hideo Watanabe	4. 巻 1270
2. 論文標題 Preferred orientation formation in surface layer of aluminum sheet subjected to friction roll surface processing and temperature gradient annealing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1270/1/012028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Igari, Shohei Moriyama, Takashi Kodama, Yoshimasa Takayama	4. 巻 1
2. 論文標題 Effect of temperature on friction stir diffusion bonding in foils of aluminum alloy and dissimilar metals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 14th INALCO2019	6. 最初と最後の頁 170-171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuki Nakayama, Takashi Kodama, Kohei Igari, Yoshimasa Takayama, Hideo Watanabe	4. 巻 1
2. 論文標題 Friction stir lap welding of aluminum alloy foils with micro indentation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 14th INALCO2019	6. 最初と最後の頁 220-221
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高山 善匡、猪狩 昂平 児玉 崇、渡部 英男
2. 発表標題 5052Al/ 金属箔材の摩擦攪拌拡散接合に及ぼす温度の影響
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 猪狩昂平, 児玉崇, 高山善匡, 渡部英男
2. 発表標題 5052Al/金属箔材の摩擦攪拌拡散接合継手に及ぼす温度の影響
3. 学会等名 軽金属学会第134回春期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猪狩昂平, 児玉崇, 高山善匡, 渡部英男
2. 発表標題 5052Al/金属箔材の摩擦攪拌拡散接合に及ぼす温度と押込み量の影響
3. 学会等名 軽金属学会第135回秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山和樹, 児玉崇, 猪狩昂平, 高山善匡
2. 発表標題 微小押込みによるアルミニウム合金 箔材の摩擦攪拌接合
3. 学会等名 軽金属溶接協会 年次講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 児玉 崇, 高山 善匡, 渡部 英男
2. 発表標題 アルミニウム合金/チタン箔材のアルミニウム合金/チタン箔材の摩擦攪拌拡散接合における材料流動と接合状態の関係状態の関係
3. 学会等名 軽金属学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 児玉 崇, 高山 善匡, 渡部 英男
2. 発表標題 摩擦攪拌拡散接合されたアルミニウム合金/チタン箔材の攪拌領域と微細組織
3. 学会等名 軽金属学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 猪狩昂平, 福重広輝, 高山善匡, 渡部英男
2. 発表標題 5052Al/金属箔材の重ね合わせ摩擦攪拌拡散接合継手における波状界面形成
3. 学会等名 軽金属学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 児玉 崇, 高山 善匡, 渡部 英男
2. 発表標題 摩擦攪拌拡散接合されたアルミニウム/チタン箔材断面のSEM/EBSD解析
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2018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	山本 篤史郎 (Yamamoto Tokujiro) (40334049)	宇都宮大学・工学部・准教授 (12201)	