

令和 2 年 9 月 4 日現在

機関番号：57701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06829

研究課題名(和文)難燃性Mg合金を用いた超音波接合継手の凹み量低減と接合性向上に寄与する組織制御

研究課題名(英文) Microstructure control that contributes to reduction of dent depth and improvement of weldability of ultrasonic welded joints applied flame retardant Mg alloys

研究代表者

東 雄一 (Higashi, Yuichi)

鹿児島工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：70709336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超音波接合継手に生じる凹みが過剰になる場合において、接合プロセスにおける微細組織の進展に及ぼす影響を評価した。試験片にはZnとYが添加された難燃性LPSO型Mg合金を使用した。この合金はZnとYが濃化したLPSO相が押出方向に伸びていることが特徴である。接合後、凹み深さが深くなると、LPSO相は分断され、まだら状の形態に変化した。まだら状のLPSO相をより詳細に観察したところ、板状のLPSO相からなっていることが分かった。さらに、最も深い凹み深さにおいては、接合界面に沿って局所的に熔融組織が形成されていることも明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究から得られた研究成果は、超音波接合プロセス中で生じる継手の凹みの進行についてマクロ的な塑性変形の過程を微細組織観察の観点から評価したものである。超音波接合の接合機構においては、接合中の熱の影響や塑性変形挙動が重要な要素として挙げられる。2相合金における方向性の強い合金において、微細組織の進展がマクロ的な塑性変形挙動と関連付けられ、微細組織の特徴から明らかになった諸現象が超音波接合機構の理解に貢献できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, when the dent depth in the ultrasonic welded joints become excessive, the effect on the microstructure evolution during the welding process was evaluated. A flame-retardant LPSO type Mg alloy which Zn and Y were added was used for the specimens. The alloys have the LPSO phases enriched in Zn and Y extending along the extrusion direction. After the welding, when the dent depth became deeper, the continuity of the LPSO phases was lost, and it changed into a mottled morphology. A more detailed observation in the mottled LPSO phases revealed that it consisted of plate-like LPSO phases. Furthermore, it was also clarified that the molten structure was locally formed along the welded interface at the deepest dent depth.

研究分野：溶接・接合工学

キーワード：超音波接合 Mg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、既存の Mg 合金に比べて高強度かつ難燃性を併せ持つ LPSO 型 Mg 合金が開発され、その優れた特性から構造用部材への応用が期待されている。このような新規な材料については、実用化に向けた研究が重要な課題となる。特に、製造工程における溶接・接合技術は必ず課題に挙がる事象である。

超音波スポット接合は、従来の抵抗スポット溶接に比べて接合に要するエネルギーが 1/100 程度で接合することができ、エネルギー効率に非常に優れた接合法である。また、抵抗スポット溶接で発生するチリも生じず、チリの除去や掃除も必要なく環境に優しい要素技術の一つである。現状は、継手効率の課題や破断形態による品質保証の観点から接合強度をさほど必要としないハーネスと端子の接合等の製造工程で実用されているが、今後、超音波スポット接合は構造物の接合技術に発展し、抵抗スポット溶接に替わる次世代の接合技術として期待されている。

超音波スポット接合において、これまでの研究から、加圧力を増加させることで接合性が向上することが見いだされている。しかし、継手に凹みが生じることによる板厚減少率が増加し、エッジ破断を生じることが多い。そこで、凹み深さを接合パラメータの一つと考え、接合性を評価する必要がある。

### 2. 研究の目的

継手に生じる凹み深さを制御し、優れた接合性を有する継手を創り出すことを主たる目的とし、本研究では以下のことについて研究を行う。

- 凹み深さが過剰になりマクロ的な塑性変形が進行した際の継手内部の微細組織変化の解明
- 凹み深さを制御した際の接合性の評価 (接合条件の最適化)

### 3. 研究の方法

本研究では、供試材として  $Mg_{96}Zn_2Y_2$  合金の円柱押出材を用いた。凹み深さが過剰になる継手を準備する際は直径 22 mm の円柱押出材を用い、凹み量を制御して接合性を評価する継手を準備する際は直径 55 mm の円柱押出材を使用した。Fig. 1 と Fig. 2 にそれぞれの試験片の切り出し方法を図示している。Fig. 1 と 2 共に円柱に対して輪切り状に試験片を切り出し、板厚は 0.8 mm とした。

Fig. 3 には超音波スポット接合の概略図を示す。アンビルとダイの上に 2 枚の試験片をセットし、溶接チップを介して加圧力をかけながら超音波振動を印加する。このとき、試験片を輪切り状にカットし、重ねて接合するため、試験片の押出方向は縦方向、超音波振動の方向は横方向であるため、押出方向に沿って伸びている LPSO 相と超音波振動の方向は直交することになる。

凹み深さは、超音波接合装置にて接合時の変形量 (溶接チップが試験片に当たり、接合が完了するまでに試験片の方向に溶接チップが移動した量) をモニターにて確認することが可能であるため、その変形量を凹み深さと定義した。また、凹み深さを制御する際は、目的の変形量を接合パラメータとして指定することも可能であるため、所望の変形量に指定することで凹み深さを制御することができる。

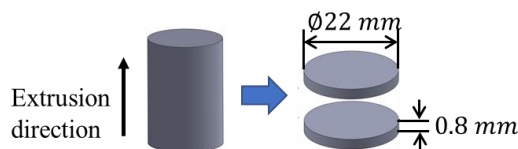


Fig. 1 Specimens for joints with excessive dent depth.

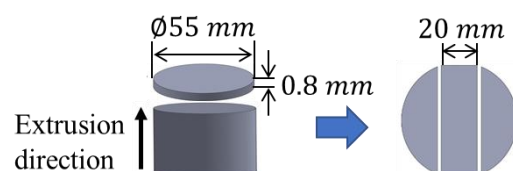


Fig. 2 Specimens for joints which controlled dent depth.

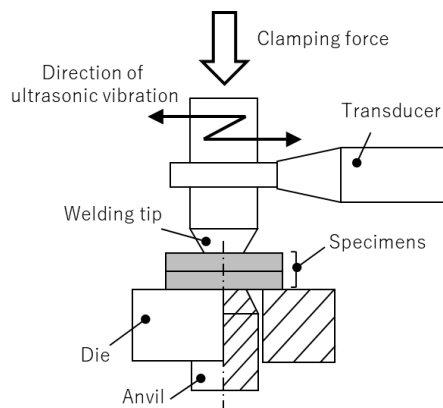


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic spot welding

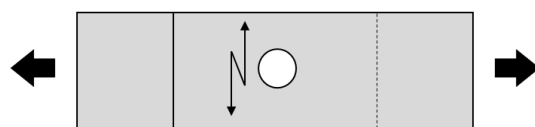


Fig. 4 Schematic diagram of sample used for lap shear tension test

接合条件は、定格出力：1200 W，発振周波数：20 kHz，加圧力：1980 N を一定とした。

継手の微細組織観察は、継手の接合部中心を超音波振動方向と平行な向きで、接合面に対して垂直にカットし、その断面を機械研磨およびバフ研磨した後に微細組織を観察した。観察には走査型電子顕微鏡(日本電子株式会社 JEOL JSM.6010LA)を使用し、15 kV の加速電圧で観察した。

継手の接合強度は、Fig.4 に示すように重ねせん断引張試験により接合強度の評価を行った。試験には AIKOH ENGINEERING CO., LTD 製の引張試験機を使用し、クロスヘッド速度は 2 mm/min とした。なお、本研究では最大引張強さを継手の接合強度として評価している。

#### 4. 研究成果

まず、凹み深さが過剰な継手について評価するために、異なる凹み深さをもつ継手を準備した。Fig. 5 は接合したサンプルを示し、Fig.5 (a) は 2 枚の試験片が完全に重なった状態で接合したサンプルである。このときの凹み深さは約 0.47 mm であり、板厚減少率は約 29.4% である。一方で、試験片を若干ずらして接合することでより深い凹み深さを再現することができた。Fig. 5 (b) は、凹み深さが約 0.56 mm、Fig. 5 (c) は、凹み深さが約 0.67 mm であり、凹み深さが約 0.1 mm ごとになるようなサンプルを選定した。それぞれの板厚減少率は、35.0% と 41.9% である。

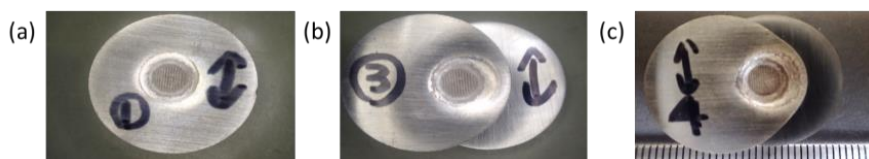


Fig. 5 The welded samples with different sheet thickness reduction rates: (a) 29.4%. (b) 35.0% (c) 41.9%.

各板厚減少率における継手内部の微細組織観察を行った結果を述べる。Fig. 6 に各板厚減少率の継手における断面の SEM 像を示す。Fig. 6 (a) の板厚減少率：29.4% の継手において、押出方向に沿って伸びている LPSO 相の形態はほぼ維持されていたが、材料が継手の外側に向かって押し出された塑性流動の形跡が観察できた。この現象は、超音波接合プロセスで見られるフォールディング現象を示しており、接合領域の拡大に寄与すると考えられている。この塑性流動はすべての継手において観察され、板厚減少率がより過剰になることで、上板における塑性変形がより激しくなった。そして、押出方向に沿って伸びていた LPSO 相の形態は維持できなくなっていた。

微細組織変化をより詳細に評価するために、継手の中心付近について拡大した接合界面周辺の SEM 観察を行った。Fig. 7 に各板厚減少率の継手における SEM 像を示す。Fig. 6 で示したように、板厚減少率が過剰になると LPSO 相の形態は劇的に変化しており、まだら状の形態に変化していることが Fig. 7 から分かる。LPSO 相のすべり系は Mg 母相より少なく、塑性変形が生じにくい。このプロセスにおいて、押出方向に沿って伸びている LPSO 相と超音波振動によるせん断変形は交差することになる。結果として、元々の LPSO 相の形態からまだら状の形態に変わることによって、激しい塑性変形のもとで接合プロセスが進行したと考えられる。

また、板厚減少率：41.9% の継手についてより詳細に分析したところ、まだら状の LPSO 相内部で Fig. 8 に示すような約 3  $\mu\text{m}$  程度の多くの板状の LPSO 相が観察された。これは接合プロセスにおける熱の影響によるものと考えられ、接合が進み、板厚減少率が増加していくことで熱の影響が顕著になっていることが示唆される。さらに、板厚減少率：41.9% の継手において、Fig. 9 に示すように、接合界面に沿って網状組織が所々で観察された。これは、 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$  合金を抵抗スポット溶接した際にナゲット内部で見られる熔融組織に類似しており、固相接合技術の一つである超音波接合において熔融組織が形成されていることが分かった。

次に、凹み深さを制御した継手の接合性の評価を行った。用意した継手の板厚減少率は、6.3%、12.5%、18.8% の 3 通りである。Fig. 10 に継手断面を観察した SEM 像を示す。板厚減少率が過剰であった継手に対して、各板厚減少率において元々の押出方向に沿って伸びている LPSO 相の形態が維持されて状態で接合されていることがわかる。また、板厚減少率が増加していくことにより、少しずつ継手の外側に向かって材料が押し出されている挙動が見られた。

重ねせん断引張試験の結果を Fig. 11 に示す。ここでは、板厚減少率を 18.8% の継手から 15.6% の継手に変更して実験を行った。最大引張荷重を接合強度とした場合、板厚減少率：12.5% の継手が最大値を示し、各板厚減少率において、接合強度がピークを持つことが分かった。しかし、同じ板厚減少率の継手においてバラツキが生じており、また、微細組織との相関等も未だ不明な点があることから、継手の最適化を目的に今後継続的に研究を進め、より詳細な分析をする必要があると考えている。この継手の最適化については、当初の計画通り本研究課題が終了した後の継続的な研究として計画していたことである。引き続き、研究の継続性をもって研究課題に取り組んでいく。

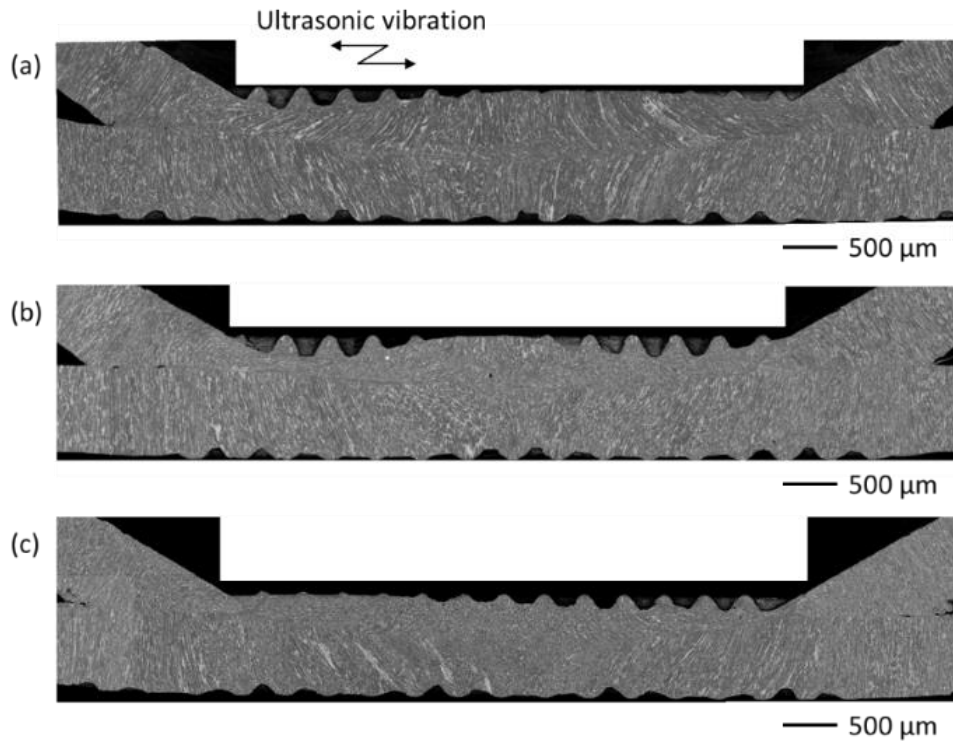


Fig. 6 SEM images of the cross section at each sheet thickness reduction rates. (a) 29.4%. (b) 35.0% (c) 41.9%.

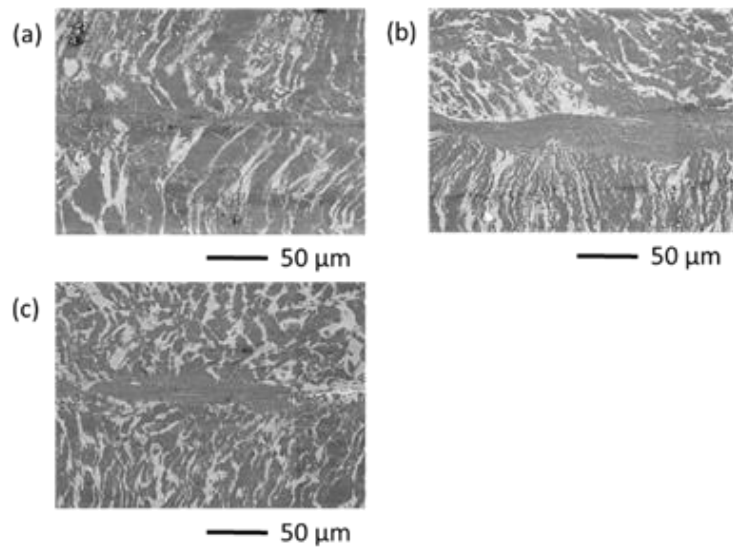


Fig. 7 SEM images around the welded interface enlarged the center of the joints. (a) 29.4%. (b) 35.0% (c) 41.9%.

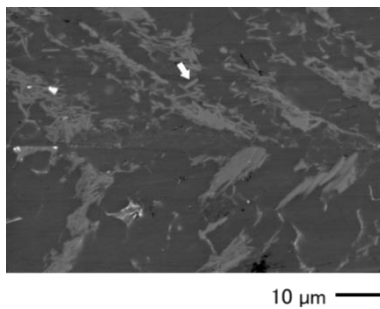


Fig.8 SEM image of plate-like LPSO phases which were observed along the welded interface in the joints with sheet thickness reduction rate of 41.9%

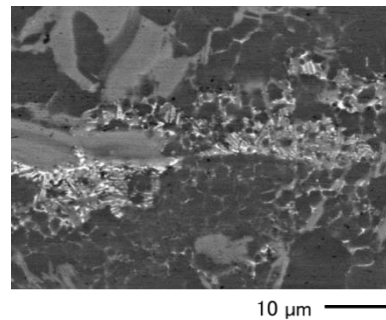


Fig. 9 SEM image of net-like structure which was occurred in places along the welded interface in the joints with sheet thickness reduction rate of 41.9%

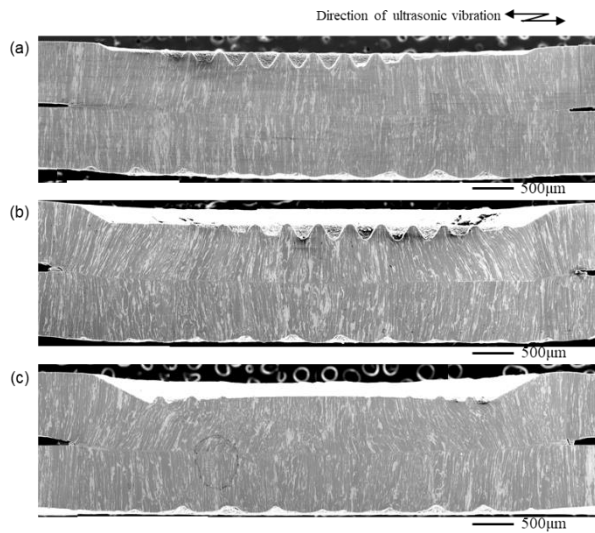


Fig. 10 SEM images of the cross section at each sheet thickness reduction rates of joints which controlled the dent depth. (a) 6.3%. (b) 12.5%. (c) 18.8%.

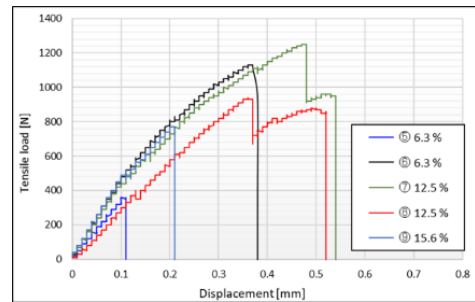


Fig. 11 Relationship between tensile load and displacement at each sheet thickness reduction rates.

※ Fig. 5, 6, 7 にて使用している図は, 学術論文として Transactions of the Materials Research Society of Japan に投稿し掲載が決定した論文に使用している図であることを申し添える.



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Higashi Yuichi, Futawatari Kazuto, Iwamoto Chihiro	4. 巻 45
2. 論文標題 Effect of Dent Depth in Ultrasonic Spot Welding Joints used Extruded Mg96Zn2Y2 Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Materials Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 121 ~ 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14723/tmrsj.45.121">https://doi.org/10.14723/tmrsj.45.121</a>	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuto Futawatari, Yuichi Higashi
2. 発表標題 Microstructure of LPSO type Mg-alloy Joint controlled amount of dent occurred by ultrasonic welding
3. 学会等名 2018 International Conference on Materials Science and Manufacturing Engineering (MSME 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuto Futawatari, Chihiro Iwamoto, Yuichi Higashi
2. 発表標題 Microstructure of LPSO type Mg-alloy Joint controlled amount of dent occurred by ultrasonic welding
3. 学会等名 4th international conference on nanojoining and microjoining 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東 雄一, 二渡 一昇, 岩本 知広, 河村 能人
2. 発表標題 超音波接合継手におけるくぼみ深さの影響
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会
4. 発表年 2019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	岩本 知広  (IWAMOTO Chihiro)  (60311635)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授    (12101)	