押出 Mg-Zn-Y 合金の異方性と超音波接合性の関係*

星 勇太**, 岩本 知広***, 東 雄一****

Relationship between anisotropy of extruded Mg-Zn-Y alloy and ultrasonic spot weldability*

by HOSHI Yuta**, IWAMOTO Chihiro*** and HIGASHI Yuichi****

Two types of plates, which was cut parallel to the extrusion direction (0°specimen) and perpendicular to the extrusion direction (90°specimen), were prepared for ultrasonic spot welding. After welding, the tensile strength and microstructure of the joints were investigated. For the joints of 0°specimens, the strength was high and the dispersion of its strength was small. In contrast, the joints of 90°specimens were remarkably unstable in strength. To promote the plastic flow at the interface, we put a Mg film as an insert metal between the Mg-Zn-Y plates. After welding of the joints of 90°specimens with the insert metal, we found that the joints were stable in strength. It was revealed that, during the welding, the temperature of the joints with the insert metal was increased compared to the joints without the insert metal.

Key Words: Extruded Mg-Zn-Y alloy, Ultrasonic spot welding, Anisotropy, Insert metal, LPSO phase

1. 緒 言

近年、高い比強度を有するなど優れた機械特性を持つ LPSO 型 Mg 合金が開発され、活発に研究されている。本合金は、Mg 母相中に長周期積層構造相 (Long period stacking ordered structure phase, 以下 LPSO 相とする) という特徴的な相を持っている¹⁾。この相は Mg の底面に Zn と Y が $L1_2$ 型の Zn_6Y_8 クラスタとして部分規則配列し、それが底面に対して垂直方向に様々な長周期構造をなすことで形成されていることが明らかになってきている¹⁻³⁾。一般に Mg 合金の結晶構造は最密六方格子であり、低温でのすべり系は底面すべり {0001} に限られ、高温になると非底面すべり {10-10}, {10-11} が作用する。これに対し、本合金の LPSO 相は非底面すべりが強く制限され、底面すべり {0001} が唯一のすべり系である。また、この LPSO 相を持つ Mg 合金は押出加工を施すことで降伏応力と引張強さが著しく向上することが分かっている^{1,3,4)}。この時、LPSO 相は押出方向に沿って再配列し、底面 {0001} と押出方向は平行になる^{3,5)}。その優れた機械的特性は、Mg 母相と LPSO 相の両方が関係しており、押出方向に沿って伸びた LPSO 相自体が強い補強材として作用することや押出加工時に起こる Mg 母相の結晶粒の微細化によるものであると報告されている^{1,4,6)}。このように LPSO 型 Mg 合金については、近年盛んに研究が行われており、そ

の用途を拡大するためにも接合技術の開発は不可欠である。

本研究では接合法として超音波接合法を取り上げた。本接合法では、超音波振動による接合界面での摩擦が金属表面に存在する酸化被膜を機械的に除去し、清浄な面同士が接触することにより、熱源を用いることなく素早く接合することが可能である^{7,8)}。この接合法は、電子機器や自動車などの多くの産業で使われており、構造用部材としての薄板をスポット溶接するエネルギー効率の良い固相接合技術である⁹⁻¹²⁾。さらに、本接合法は抵抗スポット溶接と比べてはるかに低いエネルギーで接合できるため、省エネの観点からも構造用部材への応用が期待されている¹²⁾。

我々は以前から超音波接合法を LPSO 型 Mg 合金に応用し、その接合性について検討してきた^{13,14)}。LPSO 相が接合面に対し平行に伸びた板を用いた接合では、欠陥のない高強度な接合体が作成可能であった。この接合体では接合界面周辺に約 $1.2\mu\text{m}$ 幅の微細化した結晶粒をもつバンド状の領域が形成され、その外側において粒成長が起こっていることが分かった。これは LPSO 相が Mg 母相に比べてすべり系の数が少ないため、接合時の塑性変形に伴うすべりの伝播が LPSO 相によってせき止められ、転位密度が LPSO 相と接合界面の間で上昇した結果、再結晶の際に微細化結晶粒を持つバンドが生成されたと考えられた。

ところで、Mg 合金展伸材は塑性加工により底面集合組織が形成され、強い異方性が現れる事が知られている^{15,16)}。押出によって作成された LPSO 型 Mg 合金も同様に異方性が強いことが分かっている^{6,17)}。これらの Mg 合金に超音波接合法を応用する場合、超音波接合は固相接合であるため、母材の塑性変形能が大きく影響すると考えられる。しかしながら、本合金の異方性が接合に及ぼす影響は明らかになっていない。そこで、本研究では集合組織を持つ LPSO 型 Mg

*受付日 平成30年1月25日 受理日 平成30年7月10日

**学生員 茨城大学大学院理工学研究科 Student member, Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

***正 員 茨城大学工学部 Member, Department of Materials Science and Engineering, Ibaraki University

****正 員 鹿児島工業高等専門学校機械工学科 Member, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Kagoshima College

合金押出材から異なる方向で切り出した試験片を用いて、超音波接合を試みた。

また、本合金の異方性による影響を緩和する方法として、被接合板間に純 Mg 箔をインサートした接合を試みた。超音波接合された接合体に対して接合強度とその微細組織を比較検討することで、その接合性を評価した。

2. 実験方法

2.1 供試材と接合試験片

供試材として、 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の円柱押出材を用いた。本合金の押出条件は、押出温度 325°C 、押出速度 1mm/s 、押出比 12.5 である。この押出材から Fig.1 に示すように押出方向に対して 0° と 90° をなす方向に短冊状の試験片を切り出した。以下これらの試験片を 0° 材、 90° 材とする。試験片の形状は長さ 50mm 、幅 20mm 、板厚 0.8mm とした。この試験片を #400 の耐水研磨紙を用いて研磨した。また接合する面は特に #2000 の耐水研磨紙で表面を仕上げた。インサート材は長さ 16mm 、幅 16mm 、厚さ $70\mu\text{m}$ の Mg 箔（純度 $99.9\text{mass}\%$ ）を用いた。この箔は接合前に表裏両面を $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストで研磨した。

2.2 超音波接合実験

超音波接合実験には、超音波接合装置（東芝三菱電機産業システム(株)製）および発信器（ソノマックジャパン(株)製）を用いた。Fig.2 に、超音波接合装置の概略図を示す。溶接チップとアンビルの間に 2 枚の被接合板を置き、加圧力、超音波振動を印加して接合を行った。接合条件は定格出力 1200W 、発振周波数 20kHz 、加圧力 1980N 、接合エネルギー 2300J および最大接合時間 3.0s である。本実験条件は以前の実験で

Fig.1 Schematic illustration of the plates cut parallel (0 degree) and perpendicular (90 degree) to the extrusion direction.

Fig.2 Schematic of ultrasonic welding.

最大の接合強度を有する接合体が作成できた条件である¹⁴⁾。Fig.3 は、接合に供した 2 枚の板内の LPSO 相方向と、超音波振動方向の関係を示した模式図である。今回は接合面に対して、LPSO 相が水平の場合と垂直の場合の 2 種類の接合実験を行った。これらの接合でできた試料をそれぞれ 0° 接合体、 90° 接合体とした。また、本研究で用いた溶接チップを Fig.4(a) に示す。溶接チップは直径 13mm の円柱状で、先端に平面領域と傾斜領域がある。平面領域は直径 5mm の円形状で Fig.4(b) に示されるようにピッチ 0.3mm のローレット加工が施されている。アンビルは直径 19mm の円柱状で全面平坦な端部に溶接チップと同様のローレット加工が施されている。

また、接合中における接合部の温度履歴を調べるために、熱電対を用いた実験も行った。これは Fig.5 で示したように 2 枚の被接合板のうち、下板の接合箇所中央に幅 1.5mm の

Fig.3 Schematic illustration of the relationship between plates and the LPSO phase direction. (upper) LPSO phases are parallel to the interface (0 degree joints). (lower) LPSO phases are perpendicular to the interface (90 degree joints).

Fig.4 (a) Side-view image of the tool (b) Knurled pattern on the flat region of the tool.

Fig.5 Schematic of the plate with the notch in which the thermocouples are fitted.

切欠きを作製し、直径1mmのK型熱電対を差し込み超音波接合した。温度のデータはデータロガーによりリアルタイムでコンピュータに取り込んだ。

2.3 引張試験

押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の異方性を確認するために母材の引張試験、接合性を評価するために接合体のせん断引張試験を行った。

母材引張試験は押出方向に対して 0° 、 90° の2方向から試料を作製し、Fig.6に示す様な標点間距離8mm、幅4.7mmのASTM D1708-10の規格に準じた板状試験片を用いた。室温でクロスヘッドスピード2mm/minで行い、最大引張強さを評価した。

Fig.7は接合した試料のせん断引張試験の模式図である。引張試験中の試験片の回転による単軸引張以外の応力の影響を防ぐために、上板と下板の間にスペーサーを介し試料をチャックに取付けた。クロスヘッドスピードは1mm/minで最大引張せん断荷重を測定した。

2.4 継手の微細組織観察

接合した試料の中央部をロースピードカッターで、接合面に対して垂直に切断し、機械研磨、バフ研磨後、走査型電子顕微鏡:SEM(JEOL JSM-5400LV)を用いて観察を行った。加速電圧は15kVである。Fig.8は切断した試料の観察方向の模式図である。細い矢印は超音波の振動方向を示している。また、透過型電子顕微鏡:TEM(JEOL JEM-2010F)

Fig. 6 Shape and dimension(mm) of the specimens for base metal tensile test.

Fig. 7 Schematic layout of lap shear tensile test.

Fig. 8 Direction of the microstructure observation.

を用いてさらに微細な組織観察を行った。加速電圧は200kVである。TEM観察用の試料は、SEM観察用と同様の切断面から薄板を切り出し、機械研磨、 Ar^+ イオン研磨機により薄膜化した。また、このTEMに備え付けられてあるエネルギー分散型X線分析:EDS(JEOL EX-37001)を用いて元素分析も行った。

3. 実験結果

3.1 押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 母合金の微細組織と強度

Fig.9は押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 母合金の微細組織である。灰色を呈するMg母相に対し、LPSO相は白色で観察された。LPSO相の幅は約 $8\mu\text{m}$ であり、約 $10\mu\text{m}$ 間隔で押出方向に平行に伸長していた。Mg母相の結晶粒径は約 $2\mu\text{m}$ あり、この結果は以前の報告に一致した^{18,19)}。

この微細組織を有する押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 母合金板の異方性を確認するために引張試験を行った。その結果をFig.10に示す。 0° 材(押出方向と引張方向が平行)の最大引張り強さは約360MPaであるに対し、 90° 材(押出方向と引張方向が垂直)は約240MPaであり、 0° 材と比べて約30%の差があることが分かった。Ishiharaにより押出AZ31B合金は 0° 材の最大引張り強さが275MPa、 90° 材が235MPaと約15%の

Fig. 9 SEM image of extruded $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ alloy.

Fig. 10 Tensile strengths of the original extruded $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ alloy plates with different orientation.

差があることが報告されている¹⁵⁾。本押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金は押出 AZ31B 合金より強度が高いことに加え、同等以上の異方性を有することを確認した。

3.2 押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の異方性と超音波接合

3.2.1 押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の異方性と継手強度

押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の異方性が及ぼす超音波接合性への影響を検討するために 0° 材と 90° 材、2 種類の薄板をそれぞれ超音波接合し、せん断引張試験を行った。その結果を Fig. 11 に示す。接合に要した時間は 0° 接合体が 2.4~2.7s、 90° 接合体が 2.8~3.0s であった。 0° 接合体の接合強さは平均 2029N を示し、高強度で安定的に接合できた。破断は母材で生じた。それに対し 90° 接合体は、接合できた場合でも最大接合強さは 1506N と低い値を示した。特に同じ接合条件であっても 10 回の試験のうち 5 回は全く接合されず、接合強度が大きくばらついた。最も高い接合強度をもつ試料の破断形態はプラグ破断を示したが、多くが界面破断であった。

3.2.2 押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の異方性と接合微細組織

押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の異方性が強度に及ぼす影響について、組織学的な見地から検討を行うために、走査型電子顕微鏡による接合部の観察を行った。Fig. 12(a) は 0° 接合体、(b) は 90° 接合体の断面 SEM 像である。 90° 接合体は接合できた時の試料を用いた。上板の表面は Fig. 4(a) で示したツールの形状が反映されており、特に 0° 接合体で明確に平面領域と傾斜領域が観察された。また、ツールとアンピルのローレット形状が反映された凹凸が上板と下板の表面に観察された。接合部の厚さは、 0° 接合体では 1.2mm、 90° 接合体では 1.5mm であり、 0° 接合体では超音波接合により接合部が薄くなっていることが分かった。また、断面像から、 0° 接合体、 90° 接合体の接合径を測定したところ、それぞれ約 7.2mm と約 5.7mm であり、 90° 接合体の接合径の方が小さいことが明らかになった。Fig. 12(a), (b) の白い枠で囲んだ領域を高倍率で観察した像をそれぞれ Fig. 12(c), (d) に示す。Fig. 9(c) で示すように、 0° 接合体では以前観察された微細組織と同様

に、接合界面に沿って $1.2\mu\text{m}$ 以下の微細粒からなるバンド状領域が観察された。またそのバンドの外側では Mg 結晶粒の成長が起っていた^{13,14)}。一方 90° 接合体の場合は、粒成長は起っていたものの 0° 材の時に観察された様なバンドは観察されなかった。

これらの観察結果から 90° 接合体では、 0° 接合体と同接合条件の下では超音波接合が十分進行しなかったことが示唆された。 90° 接合体の場合、LPSO 相が接合界面に対して垂直方向に配向しており、 $\{0001\}$ 底面が超音波振動方向に対し垂直に配向している。このため、接合界面の塑性流動において主要な変形機構である底面すべりが制限されたと考えられる。その結果、塑性流動がほとんど進展せず、十分な強度を有する接合体を得ることが困難であったと考えられる。

3.3 インサート材を用いた押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の超音波接合

3.3.1 インサート材を用いた押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金継手強度

ここまでの実験より、 90° 接合体の場合は塑性流動が起きにくいことが示唆された。そこで、母材の異方性による接合性への影響を緩和する方法として被接合材間にインサート材を挟んだ超音波接合法を試みた。インサート材としては純 Mg 箔を使用した。純 Mg は LPSO 相よりも変形モードが多く接合に十分な塑性流動が期待できる。また、本合金の主成分である Mg であるため、異種材料接合で問題となる金属間化合物のような脆性反応相が生成せず、強固な接合体の作製が期待できる。

Fig. 11 Weld strength of 0 degree joints and 90 degree joints bonded by ultrasonic welding.

Fig. 12 Cross section SEM images of the joints with different extrusion direction to ultrasonic vibration direction: (a) 0 degree, (b) 90 degree. Enlarged SEM image of (c) 0 degree and (d) 90 degree joints around the weld interface. Two-headed arrows indicate the direction of ultrasonic vibration and arrows indicate the interface.

Fig.13はインサート材を挟み接合した試料の引張試験結果である。インサート材を用いた時の接合に要した時間は0°接合体が2.5~2.7s, 90°接合体が2.7~2.8sであった。Fig.13(a)は0°接合体の最大せん断引張強さである。インサート材が無い場合を白丸, インサート材が有る場合を黒丸で示した。0°材にインサート材を用いた場合, 平均1540Nのせん断引張強さを示した。破断形態は, 接合部にかかった母材破断および界面破断とプラグ破断が混ざった部分プラグ破断であった。インサート材を用いることで強度が低下し, 破断形態の変化は見られたが, インサート材を用いても安定に接合することが分かった。

同様にFig.13(b)は90°接合体の引張試験結果である。インサート材が無い場合を白三角, インサート材が有る場合を黒三角で示した。90°材にインサート材を用いた場合, 平均1060Nのせん断引張強さを示した。破断形態は接合部にかかった母材破断および部分プラグ破断だった。インサート材を用いない場合は非常に不安定で接合できないことがあったが, インサート材を用いることによって安定した接合が可能であった。

3.3.2 インサート材を用いた押出Mg₉₆Zn₂Y₂合金継手の微細組織観察

インサート材による接合への影響を探るために, 走査型電子顕微鏡で接合部の断面組織観察を行った。Fig.14(a), (b)にそれぞれ0°接合体と90°接合体の接合断面の全体像を示す。インサート材が無い時と同様に, 試料表面にはツール形状の反映やローレット部の跡が観察された。0°接合体の場合, インサート材による大きな組織変化は見られなかった。接合径はインサート材が無い時は約7.2mmに対し, イ

ンサート材を用いた時は約7.6mmであり大きな変化は見られなかった。それに対し90°接合体の場合, インサート材が無い場合の接合径は約5.7mmであったが, インサート材を用いた時の接合径は約7.1mmで大幅に拡大していた。また, インサート材を入れた場合, 白色を呈するLPSO相が接合部の中心から外側へ流れる様に変形していた。

Fig.15(a), (b)はインサート材を用いた0°接合体と90°接合体の接合中心部の接合界面近傍のSEM像である。画像上部と下部がMg₉₆Zn₂Y₂合金でその間がインサート材の純Mg

Fig.14 Cross section SEM images of (a) the 0 degree joint and (b) the 90 degree joint with insert Mg sheet.

Fig.13 Weld strength of (a) 0 degree joints and (b) 90 degree joints with and without insert Mg sheet.

Fig.15 Enlarged SEM image of (a) the 0 degree joint and (b) the 90 degree joint with insert Mg sheet. Arrows and white circle denote bright contrast regions observed around the interface.

である。矢印で示したように 0° 接合体と 90° 接合体のどちらにおいても、インサート材内部や母材とインサート材の界面に白色の層が観察された。Fig. 16 は 0° 接合体で観察された白色の層近傍の TEM 像である。この像では、SEM 画像の白色の層が、黒色で観察されている。これから、帯状の黒色の物質は、Mg の結晶粒界に存在していることが分かった。Fig. 17 は、EDS でこの層の組成分析をした結果である。Mg のピークの他に Zn と Y のピークが観察された。今までの研究から $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金では、LPSO 相の近傍に $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Y}_2$ が生成しているのが頻繁に観察されている²⁰⁾。本研究でも $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Y}_2$ などの Mg 化合物が出来ていると考えられる。さらに、これらは超音波接合中に、上板と下板の押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金からインサート材内部の粒界に、粒界拡散してできたと考えられる。

4. 考 察

4.1 超音波接合中の温度履歴とインサート材の影響

インサート材の接合過程に対する影響を調べるために、熱電対を用いて超音波接合中の接合中心部の温度を計測し

Fig. 16 Bright-field TEM image of the bright contrast region observed in Fig. 15.

Fig. 17 EDS profile obtained from the bright contrast region in Fig. 16.

た。Fig. 18(a) に 0° 接合体、Fig. 18(b) に 90° 接合体の接合温度の変化を示した。それぞれ、インサート材を用いた時を黒丸、インサート材を用いていない時を白四角で示した。 0° 接合体の場合、インサート材の有無による接合温度に大きな違いは見られず、最高温度は約 520°C であった。 90° 接合体においてインサート材を用いない場合、最高温度は約 480°C であったのに対し、インサート材を用いた場合の最高温度は約 520°C となり、接合温度が上昇することが分かった。

これは本合金よりも変形モードの多い純 Mg をインサート材としたことで、インサート材が無い場合と比較して塑性流動が起りやすくなり接合部の密着性が向上し、接触面積が増加することで、超音波接合時に発生する摩擦熱と塑性変形による発熱が上昇したためと考えられる。また本合金は高温になるほど良好な延性を示すことが知られている^{20,21)}。実際にインサート材を用いることで接合径が増加し、Fig. 14(b) で観察されたように LPSO 相の変形が起こることも確認された。これらより温度上昇により延性が向上することで、本合金自体の塑性流動が促進され、安定的な接合体が得られたと考えられる。

ところで押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金は 533°C で部分溶融が始まると言われている²²⁾。また、Mg 母相の再結晶温度は 350°C 、LPSO 相の再結晶温度は 400°C である²⁰⁾。これより本超音波接合では、試料は溶融せず固相のまま接合しているが、Mg 母相中では再結晶、結晶成長が生じていると考えられる。これは微細組織観察結果とよく一致している。

Fig. 18 Temperature history at the center of the joints during ultrasonic welding (a) for 0 degree joints and (b) 90 degree joints.

4.2 接合界面近傍の粒界偏析

Fig.15(a)の白丸で囲った領域は母材Mg中の結晶粒界で観察されたZnとYの偏析物であり、インサート材を用いた場合0°接合体と90°接合体両方で観察された。これまでこの超音波接合後におけるZnとYの粒界偏析は、インサート材を用いない0°接合体について報告されている^{13,14)}。LPSO相が400℃で分解し始めることから、この粒界偏析が観察される領域は超音波接合中におおよそ400～500℃程度の温度上昇があった領域と考えられ、接合中の等温領域とみなせる。そこで、本研究ではこの粒界偏析物の分布を詳細に解析することで、接合中の温度分布を評価することを試みた。

Fig.19に偏析物析出領域として、接合中心部からの接合面に沿った距離と、接合面に対して垂直方向で偏析物が観察された最大距離との関係を示す。接合面に沿った方向は、超音波振動と垂直な向きである。インサート材を用いた場合、接合面に対して垂直方向に偏析物が観察された最大距離はインサート材と母材の界面を0点として計測した。(a)は0°接合体、(b)は90°接合体についてのグラフであり、黒線がインサート材を用いた場合、灰色線がインサート材を用いていない場合である。インサート材を用いていない時の90°接合体は、接合できた試料を用いた。また、縦軸の正領域が上板、負領域が下板の偏析物分布を表している。

全体的な傾向として、接合中心部ほど接合面に対して垂直方向に離れた位置まで偏析物が観察された。また、インサート材を用いていない場合は+200 μm から-100 μm 、用いた場合は+100 μm から-50 μm の領域で偏析物が観察され、

下板に比べ上板の方が接合面から離れた位置まで偏析物が観察された。

偏析物が存在する領域は継手の中心に向かって拡大していたが、これは摩擦により発生した熱が接合体の内部で保持された結果、接合中心部に向かって温度が上昇するような温度分布が存在したためと考えられる。また、上板の方が接合面から離れた位置に偏析物が観察されたことから、接合中では上板の方が下板より温度が高くなったと考えられる。これは、溶接チップとアンビルが同じ材料であるため熱伝導率が同じであるが、上板側の溶接チップの板に対する接触面積が約153 mm^2 であるのに対し、下板側のアンビルの板に対する接触面積が約284 mm^2 と2倍程度大きいいため、板の温度が上がらず、偏析物の析出領域がほぼ半分程度になったと考えられる。

0°接合体でインサート材を用いない場合、粒界偏析物の分布は上板の接合中心部では接合面に対して垂直方向に約200 μm の位置まで観察され、接合面に対して平行方向では中心部から1.5mmの領域まで広がっていることが確認できた。これに対し、インサート材を用いた場合、粒界偏析物は上板の接合中心部で接合面に対して垂直方向に約100 μm 程度までしか観察されなかったが、接合面に対して平行方向では接合中心部から2.5mmの領域まで薄く広く存在することが確認できた。先行研究では、純Mgに対して $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ や $\text{Mg}_{88}\text{Zn}_6\text{Y}_9$ は電気抵抗率が大きく異なることが明らかになっている²³⁾。純Mgの電気抵抗率は約 $4.4 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ であるが、 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ は $1.0 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ 、ほとんどがLPSO相から成る $\text{Mg}_{88}\text{Zn}_6\text{Y}_9$ は $6.5 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ であった。ウィーデマン・フランツの法則などを考慮すると、LPSO相を含んだMg合金は純粋なMgに比べて熱伝導率が低いと考えられる。熱電対により計測した接合界面中央部の界面近傍の温度変化は、インサート材の有無に関わらずほぼ同じであった。これに対して観察された偏析物の分布の差は、熱伝導率が高い純Mgのインサート材が接合界面に沿って厚く存在するため、接合時に界面中央部の熱が拡散することによるものと考えられる。すなわち本接合においては、接合界面にインサート材を挟むことにより、接合界面に沿った接合温度勾配が緩やかになる傾向があると考えられる。また、インサート材の有無により0°接合体の接合強度に差が生じたが、これはもともと柔らかいインサート材が接合面に挿入されているなどの、接合体の形態的な差異に起因するものと考えられる。

90°接合体でインサート材を用いない場合、粒界偏析物は観察されなかった。しかし、インサート材を用いると上板の接合中心部では接合面に対して垂直方向に約150 μm の位置まで偏析物が観察され、接合面に対して平行方向では接合中心部から約2.5mmまで広がっている事が確認できた。4.1章で90°接合体ではインサート材を用いることで0°接合体と同程度まで接合温度が上昇することを確認している。本結果はこの結果と一致している。これらより、90°接合体はインサート材を用いることによって純Mgインサート材が

Fig.19 Segregation distribution around the weld interface for (a) 0 degree joints and (b) 90 degree joints.

接合界面で塑性流動し、接合部の密着性が向上すると共に、超音波接合時に発生する摩擦熱が上昇し、母材の延性が向上することで母材自体の塑性流動も促進させたため安定した接合が可能になったと考えられる。

5. 結 論

本研究では、強度試験と微細組織観察より押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の異方性が及ぼす超音波接合への影響を明らかにした。また、異方性の影響を緩和する方法として純 Mg をインサートした超音波接合を行いその影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 母合金の押出方向と引張方向が 0° の時の引張強度は 360 MPa、 90° の時は 240 MPa であり、約 30% 異なる強度を示した。
- 2) 押出 $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ 合金の押出方向と超音波振動方向が 0° の関係にある板同士を接合した場合、安定して接合できるが、 90° の関係にある場合、困難であることが分かった。
- 3) 純 Mg インサート材を用いることで押出方向と超音波振動方向が 90° の関係にある板に対しても、安定して超音波接合することが可能であった。これは純 Mg インサート材が接合界面で塑性流動し、接合部の密着性が向上すると共に、超音波接合時に発生する摩擦熱が上昇し、母材の延性が向上することで母材自体の塑性流動も促進されたためであった。

参 考 文 献

- 1) S. Yoshimoto, M. Yamasaki and Y. Kawamura: Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Mg-Zn-Y Alloys with 14H Long Period Ordered Structure, *Materials Transactions*, 47(2006), 959-965.
- 2) E. Abe, Y. Kawamura, K. Hayashi and A. Inoue: Long-period Ordered Structure in a High-strength Nanocrystalline Mg-1 at% Zn-2 at% Y Alloy Studied by Atomic-resolution Z-contrast STEM, *Acta Materialia*, 50(2002), 3845-3857.
- 3) E. Abe, A. Ono, T. Itoi, M. Yamasaki and Y. Kawamura: Polytypes of Long-period Stacking Structures Synchronized with Chemical Order in a Dilute Mg-Zn-Y Alloy, *Philosophical Magazine Letters*, 91(2011), 690-696.
- 4) Y. Kawamura and M. Yamasaki: Formation and Mechanical Properties of $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{RE}_2$ Alloys with Long-Period Stacking Ordered Structure, *Materials Transactions*, 48(2007), 2986-2992.
- 5) M. Noda, T. Mayama and Y. Kawamura: Evolution of Mechanical Properties and Microstructure in Extruded $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ Alloys by Annealing, *Materials Transactions*, 50(2009), 2526-2531.
- 6) K. Hagihara, A. Kinoshita, Y. Sugino, M. Yamasaki, Y. Kawamura, H. Y. Yasuda and Y. Umakoshi: Effect of Long-period Stacking Ordered Phase on Mechanical Properties of $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ Extruded Alloy, *Acta Materialia*, 58(2010), 6282-6293.
- 7) E. Mariani and E. Ghassemieh: Microstructure Evolution of 6061 O Al Alloy During Ultrasonic Consolidation: An Insight from Electron Backscatter Diffraction, *Acta Materialia*, 58(2010), 2492-2503.
- 8) C. Y. Kong, R. C. Soar and P. M. Dickens: Optimum Process Parameters for Ultrasonic Consolidation of 3003 Aluminium, *Journal of Materials Processing Technology*, 146(2004), 181-187.
- 9) E. T. Hetrick, J. R. Baer, W. Zhu, L. V. Reatherford, A. J. Grima, D. J. Scholl, D. E. Wilkosz, S. Fatima and S. M. Ward: Ultrasonic Metal Welding Process Robustness in Aluminum Automotive Body Construction Applications, *Welding Journal*, 88(2009), 149-158.
- 10) M. Shakil, N. H. Tariq, M. Ahmad, M. A. Choudhary, J. I. Akhter and S. S. Babu: Effect of Ultrasonic Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Joints, *Materials & Design*, 55(2014), 263-273.
- 11) U. I. Chang and J. Frisch: On Optimization of Some Parameters in Ultrasonic Metal Welding, *Welding Journal*, 53(1974), 24-35.
- 12) D. Bakavos and P. B. Prangnell: Mechanisms of Joint and Microstructure Formation in High Power Ultrasonic Spot Welding 6111 Aluminium Automotive Sheet, *Materials Science and Engineering A*, 527(2010), 6320-6334.
- 13) Y. Higashi, C. Iwamoto and Y. Kawamura: Microstructure Characteristic of Extruded $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ Alloy Joints Joined by Ultrasonic Welding, *The Japan Institute of Metals and Materials*, 79(2015), 176-182. (in Japanese)
- 14) Y. Higashi, C. Iwamoto and Y. Kawamura: Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Extruded $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ Alloy Joints with Ultrasonic Spot Welding, *Materials Science & Engineering A*, 651(2016), 925-934.
- 15) S. Ishihara, S. Taneguchi and H. Shibata: Anisotropy of The Fatigue Behavior of Extruded and Rolled Magnesium Alloys, *International Journal of Fatigue*, 50(2013), 94-100.
- 16) S. Yi, J. Bohlen, F. Heinemann: Deformation and Texture Evolution in AZ31 Magnesium Alloy During Uniaxial Loading, *Acta Materialia*, 58(2010), 592-605.
- 17) G. Garces, M. A. Munoz-Morris, D. G. Morris, J. A. Jimenez, P. Perez, P. Adeva: The Role of Extrusion Texture on Strength and Its Anisotropy in a Mg-base Alloy Composed of The Long-Period-Structural-Order phase, *Intermetallics*, 55(2014), 167-176.
- 18) M. Noda, T. Mayama and Y. Kawamura: Evolution of Mechanical Properties and Microstructure in Extruded $\text{Mg}_{96}\text{Zn}_2\text{Y}_2$ Alloys by Annealing, *Materials Transactions*, 50(2009), 2526-2531.
- 19) M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Hagihara and Y. Kawamura: Effect of Multimodal Microstructure Evolution on Mechanical Properties of Mg-Zn-Y Extruded Alloy, *Acta Materialia*, 59(2011), 3646-3658.
- 20) M. Noda, K. Funami, Y. Kawamura and T. Mayama: Thermal Stability and Mechanical Properties of Extruded Mg-Zn-Y Alloys with a Long-Period Stacking Order Phase and Plastic Deformation, *InTech 2012*, (2012), DOI: 10.5772/48202.
- 21) J. Kim and Y. Kawamura: Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Y-M (M: Mixed Re) Alloys with LPSO Phase, *Magnesium Technology 2011*, John Wiley & Sons, Inc, (2011), 229-231.
- 22) Y. Ienaga: 自動車用ビストンに向けた長周期積層構造相で強化した耐熱マグネシウム合金の開発, *Osaka Prefecture University Ph.D.thesis*, (2014), <http://hdl.handle.net/10466/14171>. (in Japanese)
- 23) C. Iwamoto, Y. Kawamura, H. Yokoi, M. Hano: Resistance Spot Welding of Mg Alloy with Mg-Zn-Y Alloy Insert, *Proceedings of the 10th International Conference Tokyo, JAPAN*, October 11-14, (2016).