Al/Al-Mg-Si/Al-Si-Cu 合金からなる 3 層傾斜機能ポラスアルミニウムの機械的特性

齋藤公佑^{1,*} 半谷禎彦² 宇都宮登雄³ 桑水流 理⁴
北原総一郎⁵ 吉川暢宏⁶

¹群馬大学大学院工学研究科

²群馬大学理工学研究院

³芝浦工業大学先端工学研究機構

⁴福井大学大学院工学研究科

⁵ホクダイ株式会社

⁶東京大学生産技術研究所

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 77, No. 10 (2013), pp. 430–434
© 2013 The Japan Institute of Metals and Materials

Compression Properties of Al/Al-Mg-Si/Al-Si-Cu Alloy Three-Layered Functionally Graded Aluminum Foam

Kousuke Saito^{1,*}, Yoshihiko Hangai², Takao Utsunomiya³, Osamu Kuwazuru⁴,
Soichiro Kitahara⁵ and Nobuhiro Yoshikawa⁶

¹Graduate School of Engineering, Gunma University, Kiryu 376–8515

²Faculty of Science and Technology, Gunma University, Kiryu 376–8515

³Research Organization for Advanced Engineering, Shibaura Institute of Technology, Saitama 337–8570

⁴Graduate School of Engineering, University of Fukui, Fukui 910–8507

⁵Hokudai Co., Ltd., Yuufutsu-gun, Hokkaido 059–1434

⁶Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo 153–8505

Aluminum foam is a multifunctional material with a light weight and a high energy absorption. In this study, an A1050 (pure Al)–A6061 (Al–Mg–Si)–ADC12 (Al–Si–Cu) aluminum alloy three-layered-structure functionally graded (FG) aluminum foam was fabricated by the friction stir welding (FSW) route. The pore structures and elemental Cu content of the fabricated A1050–A6061–ADC12 FG aluminum foam were observed nondestructively by X-ray CT inspection and Electron Probe Microanalysis (EPMA), respectively. It was shown that three-layered A1050–A6061–ADC12 FG aluminum foam can be fabricated with different pore structures and elemental Cu contents in each layer. The compression properties and deformation behavior of the A1050–A6061–ADC12 FG aluminum foam were obtained by a compression test. It was shown that the fabricated A1050–A6061–ADC12 FG aluminum foam exhibited three different deformation stages and three plateau regions corresponding to the pore structures and types of aluminum alloy in each layer. [doi:10.2320/jinstmet.JAW201309]

(Received April 23, 2013; Accepted June 20, 2013; Published October 1, 2013)

Keywords: cellular materials, functionally graded materials, friction stir welding, X-ray computed tomography, die casting

1. 緒 言

ポラスアルミニウムは軽量性、衝撃吸収性、防振性などに優れる多機能な材料である。近年、ポラスアルミニウムは自動車、鉄道車両に用いることで衝突安全性の向上や低燃費化による環境負荷低減が期待されている^{1,2)}。ポラスアルミニウムの機械的特性は緻密アルミニウムとは異なり、母材となる合金の種類と気孔形態(気孔率、気孔径など)の両者の影響を大きく受けることが知られている³⁾。そのため、合

金の種類や気孔形態を同一のポラスアルミニウム内で連続的に変化させることで傾斜機能材料とすることができ^{4–11)}。このような、傾斜機能材料とすることで熱応力の緩和に有効であることが示されており¹²⁾、ポラスアルミニウムの更なる高機能化が期待される。

著者らは、摩擦攪拌接合(FSW)¹³⁾を利用した摩擦攪拌法によりポラスアルミニウムの作製を試みている^{14–16)}。

FSW 技術を利用したプロセスであるため、出発材に安価な板材を使用することができる。また、容易に特性の異なる合金を組み合わせることができ、異種合金の板材を組み合わせることで傾斜機能ポラスアルミニウムの作製が可能となる^{8,11)}。過去の研究から、摩擦攪拌法により、純アルミ

* 群馬大学大学院生(Graduate Student, Gunma University)

ニウム(JIS A1050, 以下 A1050)と Al-Si-Cu 系ダイカストアルミニウム合金(JIS ADC12, 以下 ADC12)からなる傾斜機能ポーラスアルミニウムを作製することができた¹¹⁾. 作製した傾斜機能ポーラスアルミニウムは気孔形態が変化していた. また, 圧縮試験から A1050 と ADC12 それぞれの圧縮特性を有していた. さらに, 母材強度と気孔形態により低強度とした A1050 領域から変形が開始し, ADC12 領域へと変形が遷移しており, 変形制御の可能性が示唆された. このような強度を連続的に変化させて変形を制御した傾斜機能ポーラスアルミニウムは自動車のバンパー等に適用することで対人事故の際には低強度領域, 対物事故の際には高強度領域が変形することで衝撃吸収に効果的に作用すると考えられる. さらに, 傾斜機能ポーラスアルミニウムを多層構造にすることで, 任意の箇所において要求される機械的特性を発現させることが可能となり, より細かな変形の制御や機械的特性の発現が可能になると考えられる. また, 母材に異なる合金を使用することで, 耐食性や伝熱性等の物理的特性も変化させることが可能になると考えられる.

本研究では, 摩擦攪拌法により過去の研究¹¹⁾で作製した A1050-ADC12 傾斜機能ポーラスアルミニウムに Al-Mg-Si 系アルミニウム合金(JIS A6061, 以下 A6061)の層を加え, A1050-A6061-ADC12 からなる 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製を試みる. A1050 領域と A6061 領域は気孔形態を一致させることで母材合金の強度差により A1050 領域を低強度領域とする. ADC12 領域は他領域と比較して母材合金の強度が高く, 気孔率を低く細かな気孔形態とすることで高強度領域とする. A6061 領域はその中間の中強度領域とする. 次に, X 線 CT により各領域内部において目的とする気孔形態が実現できているか確認する. また, 各領域にそれぞれ異なる量が含まれている Cu 元素について電子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いて, 合金の組成が傾斜的に変化しているか確認する. さらに, 圧縮試験を行い, 得られた 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの圧縮特性の調査を行う. 以上より, A1050-A6061-ADC12 からなる 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製とその機械的特性の取得を試みる.

2. 実験方法

Fig. 1 に摩擦攪拌法を利用した 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製方法を示す. まず, (a)に示すように, A1050 板材と A6061 板材, ADC12 板材を突き合わせた.

A1050 板材として寸法が 210 mm×50 mm×6 mm で圧延により製造された H24 材, A6061 板材は寸法が 210 mm×14 mm×6 mm で圧延により製造された T6 材, ADC12 板材は寸法が 210 mm×50 mm×3 mm でダイカスト法により製造されたダイカストまま材を用いた. ADC12 板材は 2 枚重ねることで厚さを揃えた. それぞれの境界に対して大気中で FSW を行うことで接合した. この時の FSW 条件は回転数 1000 rpm, 送り速度 50 mm/min, 前進角 3°とした. その後, (b)に示すように, 新たに A1050 板材と A6061 板材, ADC12 板材を突き合わせ A1050 板材と A6061 板材の上に発泡剤と気孔形態安定剤を, ADC12 板材の上に気孔形態安定剤のみを散布した. 発泡剤には水素化チタン(TiH_2 , <45 μm , 0.4 mass%), 気孔形態安定剤にはアルミナ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 約 1 μm , 5 mass%)を使用した. また, ADC12 板材は内部に含まれるガスを利用して発泡させた^{17,18)}. なお, 本研究で用いた ADC12 板材中には内部ガス量に関して, 大量のガスを含んでいたため文献 18)のようなガスクロマトグラフィーではガス量を計測することができなかった. そのため, 文献 18)よりも多くガスが含まれていると予想されるため, 内部ガス量は 200 $\text{cm}^3/100 \text{ g Al}$ 以上であると考えられる. その上に, (a)であらかじめ接合した A1050 と A6061, ADC12 の板材を重ねることで積層板とした. 次に(c)に示すように, 作製した積層板の粉末散布領域全体に対して合計 3 回攪拌されるように大気中でマルチパス FSW を行った. この時の FSW 条件は A1050 板材上では回転数 2200 rpm, 送り速度 100 mm/min, 前進角 3°とし, A6061 板材上, ADC12 板材上では回転数 1000 rpm, 送り速度 50 mm/min, 前進角 3°とした. FSW 装置には日立エンジニアリング㈱の 1D-FSW 装置を用いた. FSW により攪拌された領域から機械加工により 25 mm×45 mm×9.3 mm となるようなプリカーサを切り出した. プリカーサをあらかじめ雰囲気温度 1003 K に保たれた電気炉内で 660 s 保持してから取り出し, 水冷を行うことで 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムを作製した. 作製した 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムに対して放電加工により寸法が 18 mm×18 mm×36 mm となるような圧縮試験片を切り出した.

作製した圧縮試験片の気孔形態を X 線 CT により観察した. X 線 CT 装置には梶島津製作所の SMX-225CT を使用した. X 線 CT の撮影条件は, X 線管電圧 80 kV, X 線管電流 30 μA , 画像サイズ 512×512 pixel とした. この時, 1 pixel の大きさは 95 μm であった. 得られた X 線 CT 画像を 2 値化処理することで, 気孔率 $p_{\text{X-ray}}$ と気孔径 d_a を求めた.

Fig. 1 Fabrication process of A1050-A6061-ADC12 functionally graded aluminum foam by FSW.

次に、圧縮試験片の表面に対して EPMA により Cu 元素のマッピング分析を行った。EPMA 装置には株式会社島津製作所の電子線マイクロアナライザー EPMA-1610 を使用した。圧縮試験片中央部を約 2 mm 間隔で 1 点につき 256×256 pixel の領域についてマッピング分析を行った。マッピング分析画像を 2 値化処理することで、マッピング分析画像中に Cu 元素が占める面積の割合を求めた。

作製した 3 層傾斜機能ポラスアルミニウムの圧縮試験には株式会社島津製作所の精密万能試験機オートグラフ AG-100kNG を用いた。圧縮試験条件は JIS H7902 に準拠して圧縮ひずみ速度 $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ とした¹⁹⁾。同時にビデオ撮影することで、圧縮過程における変形挙動の観察も行った。また、摩擦攪拌法により作製した A1050 と A6061, ADC12 単一合金のポラスアルミニウムに対しても JIS H7902 に準拠して圧縮試験を行い、3 層傾斜機能ポラスアルミニウムと圧縮特性を比較した。

3. 実験結果・考察

Fig. 2(a)に作製した 3 層傾斜機能ポラスアルミニウムの外観画像を示す。試験片の質量と寸法から算出した気孔率 p は 80.4% である。試験片の上部が A1050 領域、中央部が A6061 領域、下部が ADC12 領域となっており、A1050 領域と A6061 領域では発泡剤を使用しているため ADC12 領域に比べて気孔径が大きくなっている。また、A1050 領域と A6061 領域、A6061 領域と ADC12 領域の境界において欠陥なく接合されているのが確認できる。Fig. 2(b)に X 線 CT により得られた 3 層傾斜機能ポラスアルミニウムの断層画像を示す。(a)に示した 3 層傾斜機能ポラスアルミニウムの奥行方向に約 9 mm (ほぼ中央)の位置における断層画像である。内部においても外部の気孔形態と同じ傾向を示しているのがわかる。Fig. 2(c)に 3 層傾斜機能ポラスアル

ミニウム下端からの変位 x (a)参照)と X 線 C 画像より算出した気孔率 $p_{X\text{-ray}}$ および気孔径 d_a の関係を示す。気孔率と気孔径の分布から、A1050 領域と A6061 領域である $x=16 \sim 36$ mm の領域で気孔率と気孔径が共に高くなっている。この領域における気孔率 $p_{X\text{-ray}}$ と気孔径 d_a の平均は 71.4% と 2.19 mm である。また、A6061 領域と ADC12 領域の境界である $x=14 \sim 16$ mm の領域で気孔率と気孔径がなだらかに変化しており、A6061 と ADC12 の気孔形態が混在する遷移領域となっている。ADC12 領域である $x=0 \sim 14$ mm の領域では気孔率 $p_{X\text{-ray}}$ と気孔径 d_a の平均は 58.4% と 1.36 mm で、他領域に比べて気孔率は低く細かな気孔形態をしている。これらのことから、A1050 領域と A6061 領域では気孔形態が一致し、ADC12 領域では気孔率が低く細かな気孔形態を有する 3 層傾斜機能ポラスアルミニウムとなつて

Fig. 3 Distribution of elemental Cu contained in A1050-A6061-ADC12 functionally graded aluminum foam.

Fig. 2 (a) Compressive test specimen of A1050-A6061-ADC12 functionally graded aluminum foam, (b) cross-sectional X-ray CT image of A1050-A6061-ADC12 functionally graded aluminum foam, and (c) distribution of porosity and average pore size evaluated from X-ray CT images in A1050-A6061-ADC12 functionally graded aluminum foam.

いるのがわかる. X 線 CT 撮像データより算出した気孔率 $p_{X\text{-ray}}$ がどれも試験片の質量と寸法から算出した気孔率 p に比べて低い値を示しているのは, 画像処理において気孔同士が結合しないようにセル壁を厚くするようなしきい値設定をしたためと考えられる. また, 本研究で使用した X 線 CT 装置の解像度の関係から, 撮像できない気孔やセル壁に存在するミクロポアの影響も考えられる²⁰⁻²²⁾.

Fig. 3 に 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウム下端からの変位 x とマッピング分析画像中に Cu 元素が占める面積の割合との関係を示す. 図中に示すマッピング分析画像の白く表示されている部分に Cu 元素が存在している. マッピング分析画像から, A1050 領域では Cu 元素がほとんど存在していないのがわかる. A6061 領域では局所的に Cu 元素が存在しており, ADC12 領域では多量の Cu 元素が全体的に存在している. また, マッピング画像を 2 値化することでマッピング分析画像中に Cu 元素が占める面積の割合を求めた. Cu 元素は A1050 純アルミニウム中に 0.05 mass% 以下, A6061 アルミニウム合金中に約 0.3 mass%, ADC12 アルミニウムダイカスト中に約 3 mass% 含まれており, A1050 から ADC12 にかけて増加する傾向にある²³⁾. A1050 領域 ($x=20\sim36$ mm) から A6061 領域 ($x=10\sim18$ mm), ADC12 領域 ($x=0\sim8$ mm) にかけて Cu 元素が増加しているのがグラフとマッピング分析画像からわかる. このように, Cu 元素の存在が段階的に変化しており, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの組成も傾斜化しているのがわかる. ただし, FSW や発泡の影響により Fig. 2(c) と Fig. 3 に示した 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの内部気孔形態と表面の Cu 元素分布では各領域の範囲が若干異なっている. 今後, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの各領域が内部と表面で一致するような発泡方法を検討していく予定である.

Fig. 4 にビデオ撮影により得られた圧縮試験過程を示す. 圧縮ひずみ $\varepsilon=0\sim20\%$ では試験片上部の A1050 領域が主に變形しており, A6061 領域と ADC12 領域では大きな變形が生じていないのがわかる. また, $\varepsilon=20\sim40\%$ では試験片中央部の A6061 領域が主に變形しており, ADC12 領域では大きな變形が生じていないのがわかる. さらに, $\varepsilon=40\%$ 以降では ADC12 領域が變形し, 試験片全体が緻密化している. ADC12 領域では他領域に比べて細かな気孔形態をしており, 母材の合金強度が高いため強度差が現れた. A1050 領域と A6061 領域では気孔形態が一致しているため, 母材強

度の差により強度差が現れた. このように, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの圧縮過程の観察から段階的に變形しており, A1050 領域は低強度, A6061 領域は中強度, ADC12 領域は高強度となっていることがわかった.

Fig. 5 に圧縮試験により得られた 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの応力ひずみ曲線とともに, A1050, A6061, ADC12 単一ポーラスアルミニウムそれぞれの応力ひずみ曲線を示す. 各単一ポーラスアルミニウムの X 線 CT 画像より算出した気孔率 $p_{X\text{-ray}}$ は, それぞれ 69.5, 70.3, 59.0% であり, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの各層と同程度の気孔率である. ただし, 各単一ポーラスアルミニウムの応力ひずみ曲線は, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウム中に占めるそれぞれの領域の割合でひずみ ε を縮小することで補正をした⁹⁾. さらに, Fig. 4 から A6061 領域と ADC12 領域はそれぞれ圧縮ひずみ $\varepsilon=20\%$ と圧縮ひずみ $\varepsilon=40\%$ から圧縮が開始するため, A6061 と ADC12 ポーラスアルミニウムの応力ひずみ曲線の開始点をそれぞれ $\varepsilon=20\%$ と $\varepsilon=40\%$ にシフトすることで補正をした. 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムの応力ひずみ曲線は, 合金の種類や気孔形態を変化させることで 3 段階のプラトー領域が発現している. これは, Fig. 4 の圧縮過程の観察より, 圧縮ひずみ $\varepsilon=0\sim20\%$ では A1050 領域, 圧縮ひずみ $\varepsilon=20\sim40\%$ では A6061 領域, 圧縮ひずみ $\varepsilon=40\sim60\%$ では ADC12 領域の變形によるものと考えられる. また, 圧縮ひずみ ε が $0\sim20$, $20\sim40$, $40\sim$

Fig. 5 Stress-strain curve of A1050-A6061-ADC12 functionally graded aluminum foam and uniform A1050 ($p_{X\text{-ray}}=69.5\%$), A6061 ($p_{X\text{-ray}}=70.3\%$) and ADC12 ($p_{X\text{-ray}}=59.0\%$) aluminum foam.

Fig. 4 Sequential deformation images of A1050-A6061-ADC12 functionally graded aluminum foam.

60%ではそれぞれ約 5, 10, 25 MPa のプラトー応力である。これは, A1050, A6061, ADC12 単一ポーラスアルミニウムのプラトー応力とはほぼ一致しており, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムは各単一ポーラスアルミニウムの圧縮特性を有していると考えられる。このように, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムは母材合金と気孔形態の違いにより, A1050 領域, A6061 領域, ADC12 領域がそれぞれ変形することで, 各領域に対応した単一ポーラスアルミニウムのプラトー応力とはほぼ一致した約 5, 10, 25 MPa の 3 種類のプラトー領域を発現し, 各単一ポーラスアルミニウムの圧縮特性を一つのポーラスアルミニウム内で実現できることがわかった。

4. 結 言

本研究では A1050-A6061-ADC12 からなる 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムを作製し, その機械的特性について検討した。以下に得られた結果を示す。

(1) A1050 純アルミニウム, A6061 アルミニウム合金, ADC12 アルミニウム合金を用いることで摩擦攪拌法により 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムを作製可能であることが示された。

(2) X 線 CT による内部気孔形態の非破壊観察により, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムは A1050 領域と A6061 領域では均一な気孔率と気孔径を有し, ADC12 領域では他領域に比べて低い気孔率と気孔径を有していた。また, A6061 領域と ADC12 領域の間で気孔形態がなだらかに変化していることがわかった。

(3) EPMA のマッピング分析により, 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムに含まれる Cu 元素は A1050 領域から ADC12 領域にかけて段階的に変化していることがわかった。

(4) 圧縮変形挙動から, はじめに低強度な A1050 領域から変形が開始し, 中強度な A6061 領域, 高強度な ADC12 領域へと変形が遷移し, 変形制御の可能性が示された。

(5) 3 層傾斜機能ポーラスアルミニウムが圧縮変形する際に, A1050 領域, A6061 領域, ADC12 領域の各層に対応し, それぞれの応力値が約 5, 10, 25 MPa の 3 種類のプラトー領域を発現できることがわかった。

本研究の一部は, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)平成 21 年度産業技術研究助成事業, 公益財団法人軽金属奨学会教育研究資金, および科学研究費補助金若手研究(B)の助成のもと行われました。ここに厚く感謝いたします。

文 献

- 1) J. Banhart: Prog. Mater. Sci. **46**(2001) 559-632.
- 2) T. Miyoshi, T. Hamada and K. Kanahashi: R&D Kobe Steel Engineering Reports **57**(2007) 95-100.
- 3) L. J. Gibson: Ann. Rev. Mater. Sci. **30**(2000) 191-227.
- 4) A. Pollien, Y. Conde, L. Pambaguian and A. Mortensen: Mater. Sci. Eng. A **404**(2005) 9-18.
- 5) A. H. Brothers and D. C. Dunand: Adv. Eng. Mater. **8**(2006) 805-809.
- 6) A. H. Brothers and D. C. Dunand: Mater. Sci. Eng. A **489**(2008) 439-443.
- 7) A. Hassani, A. Habibolahzadeh and H. Bafti: Mater. Des. **40**(2012) 510-515.
- 8) Y. Hangai, Y. Oba, S. Koyama and T. Utsunomiya: Metall. Mater. Trans. A **42**(2011) 3585-3589.
- 9) Y. Hangai, K. Takahashi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **534**(2012) 716-719.
- 10) Y. Hangai, K. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **556**(2012) 678-684.
- 11) Y. Hangai, K. Saito, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Trans. **54**(2013) 405-408.
- 12) R. Suzuki and K. Kitazono: J. Japan Inst. Metals **72**(2008) 758-762.
- 13) R. S. Mishra and Z. Y. Ma: Mater. Sci. Eng. R **50**(2005) 1-78.
- 14) Y. Hangai and T. Utsunomiya: Metall. Mater. Trans. A **40**(2009) 275-277.
- 15) Y. Hangai, Y. Ozeki and T. Utsunomiya: Mater. Trans. **50**(2009) 2154-2159.
- 16) Y. Hangai, T. Utsunomiya and M. Hasegawa: J. Mater. Process. Tech. **210**(2010) 288-292.
- 17) Y. Hangai, K. Kato, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshihiko: Mater. Trans. **53**(2012) 1515-1520.
- 18) Y. Hangai, N. Ishii, S. Koyama, T. Utsunomiya and S. Kitahara: J. Japan Inst. Metals **76**(2012) 349-354.
- 19) JIS-H-7902: *Method for Compressive Test of Porous Metals*, (Japanese Standards Association, 2008).
- 20) Y. Hangai, S. Maruhashi, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Metal. Mater. Trans. A **40**(2009) 2789-2793.
- 21) T. Ohgaki, H. Toda, M. Kobayashi, K. Uesugi, T. Kobayashi, M. Niinomi, T. Akahori, K. Makii and Y. Aruga: Adv. Eng. Mater. **8**(2006) 473-475.
- 22) H. Toda and M. Kobayashi: *Materia Japan* **47**(2008) 191-195.
- 23) A. Kamio et al.: *Structures and Properties of Aluminum*, (The Japan Institute of Light Metals, Tokyo, 1991) pp. 414-531.