

# 粉末焼結に塑性加工を利用した 異種合金からなる傾斜機能多孔質金属の創製

群馬大学 大学院理工学府 知能機械創製部門  
教授 半谷 禎彦  
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016029)

キーワード：ポーラスアルミニウム，傾斜機能材料，粉末冶金法

## 1. 緒言

ポーラスアルミニウムは、多気孔構造を有する超軽量な素材であり、その構造から優れた衝撃吸収特性を有する<sup>1-3)</sup>。そのため自動車用部材として用いることで安全性の向上及び軽量化に伴う燃費向上が期待されている<sup>4, 5)</sup>。ポーラスアルミニウムの機械的特性は気孔形態や合金種によって異なることが知られている。本研究では、ポーラスアルミニウム内でアルミニウムの合金種を変化させた傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製を試みる。

ポーラス金属を作製する方法には様々な手法が提案されている<sup>6, 7)</sup>。オープンセル型ポーラス金属の作製方法の一つに焼結スパーサー法 (sintering and dissolution process) がある<sup>8-10)</sup>。焼結スパーサー法は、まずアルミニウム粉末とスパーサーとなる塩化ナトリウム (NaCl) 粉末を混合・焼結する。焼結体を水洗し、NaCl を溶解除去することで、気孔を生成しポーラスアルミニウムを作製する

ものである。混合した NaCl の形状が、ほぼそのまま気孔形状となる。また、混合するアルミニウム粉末と NaCl 粉末の体積の割合が、ほぼそのまま作製するポーラスアルミニウムの気孔率 (試料全体に対する気孔の体積率) となる。そのため、焼結スパーサー法は気孔形態を容易に制御できる。更に、NaCl は安価で人体に無害であることや、水への溶解度が高く常温の水で容易に溶解除去できることなどから、簡便で生産コストを低く抑えられることが期待される。

本研究では、放電プラズマ焼結法により傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製を試みる。それぞれの層の気孔率が同じとなるようにアルミニウム粉末と NaCl 粉末の割合を調整し、2 種類のアルミニウム合金が 2 層となるようにそれぞれの混合粉末を順番に投入することで、傾斜機能ポーラスアルミニウムが作製できることが期待される。作製した傾斜機能ポーラスアルミニウムは X 線 CT により気孔形

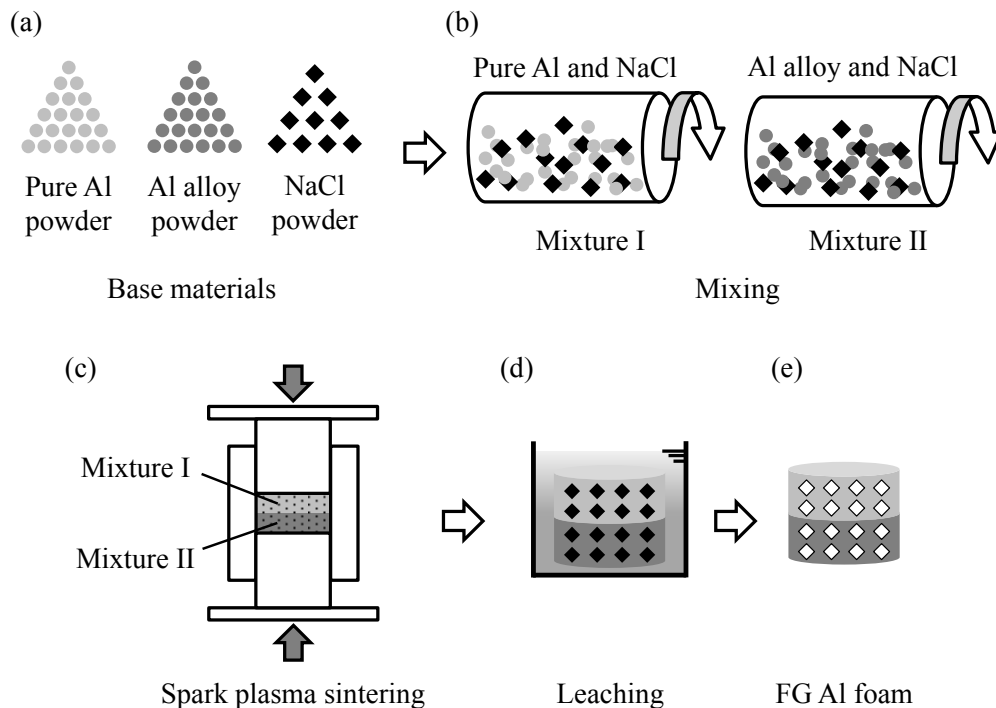


Fig. 1. Schematic illustration of fabrication of two-layered FG foam with different types of Al by sintering and dissolution process.

態を観察し、各層が同一の気孔率を有していることの確認を行う。その上で、作製した傾斜機能ポーラスアルミニウムの圧縮特性について調査する。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料作製方法

Fig.1 に異種アルミニウムからなる傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製方法を示す。Fig.1(a)に示すように出発材として、Pure Al 粉末（粒径 20  $\mu\text{m}$  以下）、Al-Si-Cu アルミニウム合金である ADC12 合金粉末（粒径 26  $\mu\text{m}$  以下）およびスパーサー粉末として塩化ナトリウム (NaCl) 粉末（425–500  $\mu\text{m}$ ）を用いた。Fig.2 にそれら粉末の Scanning electron microscope (SEM) 画像を示す。これらの粉末から、NaCl 体積割合が 70%となるようにそれぞれの Al 粉末と NaCl 粉末を混合し、Fig.1(b)に示すように 2 種類の混

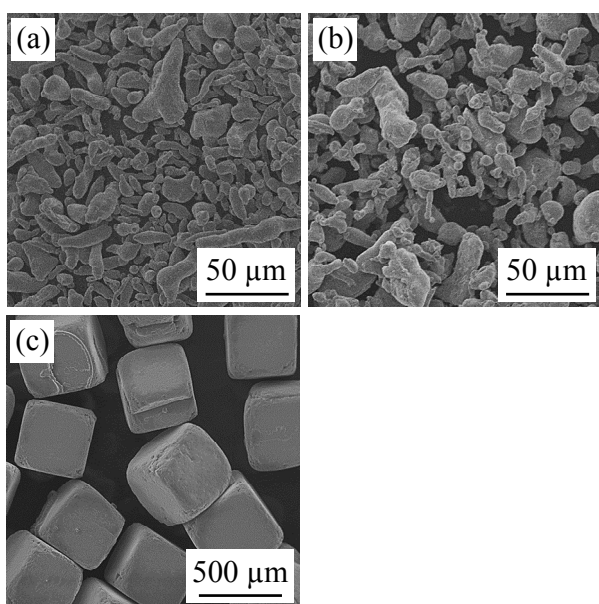


Fig. 2. SEM images of powder particles: (a) pure Al, (b) ADC12 Al, (c) NaCl.

合粉末を作製した。これらの混合粉末を Pure Al 層と ADC12 層の 2 層を形成するように、Fig.1(c)に示すように直径 20 mm、高さ 40 mm の黒鉛型に充填した。上下から黒鉛パンチによって圧力を加え、放電プラズマ焼結 (Spark Plasma Sintering, SPS) 装置 (住友炭素株式会社製 SPS - 1050) で焼結を行った。焼結条件は、室温から 673 K まで 8 min で昇温させた後、753 K まで 2 min で昇温させた。その後、753 K を 10 min 保持し、焼結体を作製した。加圧力は 50 MPa を保持した。その後、Fig.1(d)に示すように得られた焼結体を静水中で水洗することで NaCl を除去し、Fig.1(e)に示すようにポーラス Al を作製した。作製したポーラス Al は、X 線 CT 画像によりポーラス Al の非破壊観察を行った後、静的圧縮試験を行った。

### 2.2 気孔形態観察方法

得られた圧縮試験片の気孔形態は X 線 CT を用いて観察した。株式会社島津製作所のマイクロフォーカス X 線 CT, SMX-225CT を用いて行った。X 線源はタングステンであり、圧縮試験片全体をコーンビーム CT 撮像した。撮像条件は、X 線管電圧 80 kV, X 線管電流 30  $\mu\text{A}$ , 画像サイズ 512  $\times$  512 pixel とした。

取得した全ての断層画像に対して 2 値化処理を行い、アルミニウムと気孔を分離し気孔率を算出した。この画像処理には、WinROOF (三谷商事株式会社) を用いた。

### 2.3 圧縮試験方法

得られたポーラスアルミニウムの圧縮特性は JIS-H-7902 ポーラス金属の圧縮試験方法<sup>11)</sup>を参考にした静的圧縮試験により取得した。圧縮試験は、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 を用いて、圧縮速度 (クロスヘッド速度) 1 mm/min で行った。同時にビデオ撮影することで、変形挙動の外観観察も行った。圧縮ひずみは、クロスヘッド変位を初期の圧縮試験片高さで除することで求めた。

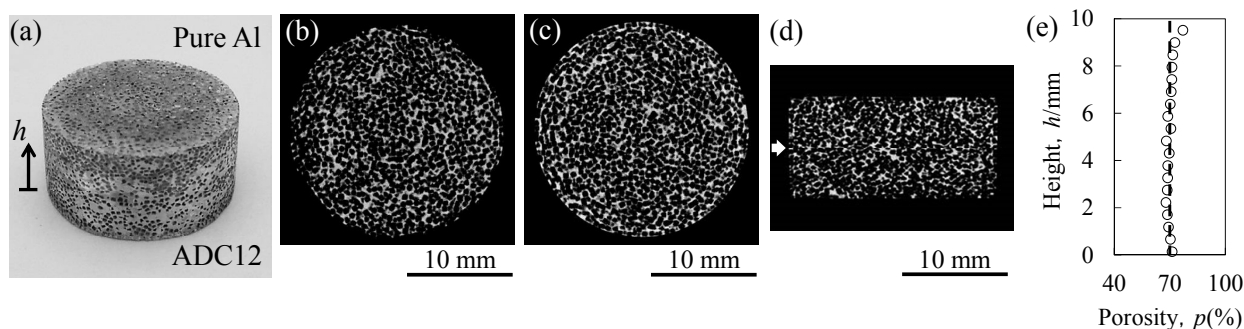


Fig. 3. Pure Al / ADC12 FG foam with  $V_f = 70\%$ : (a) compression test specimen (the compression direction was parallel to  $h$ ), (b) X-ray CT image of pure Al foam layer perpendicular to  $h$  direction, (c) X-ray CT image of ADC12 foam layer perpendicular to  $h$  direction, (d) X-ray CT image of compression test specimen parallel to  $h$  direction, (e) porosity distribution in  $h$  direction.

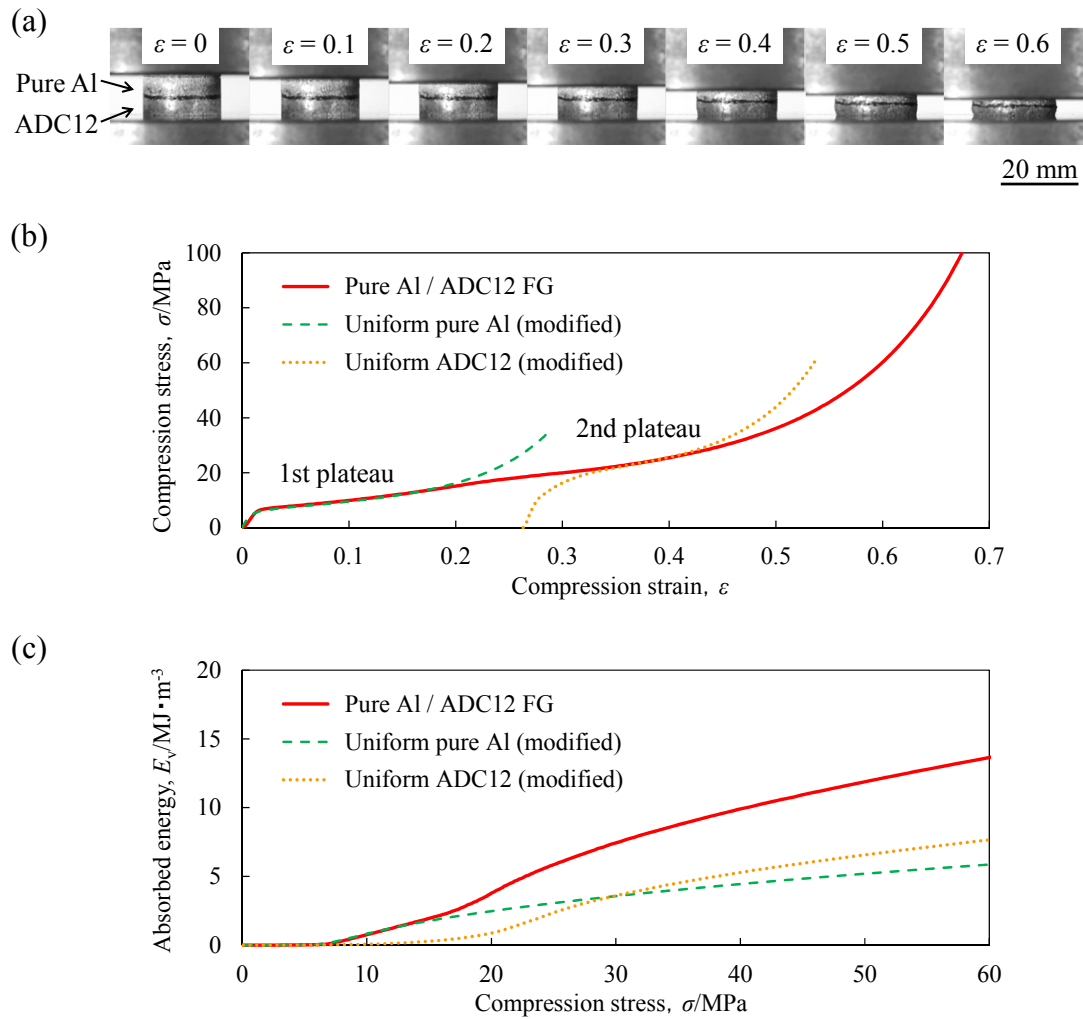


Fig. 4. (a) Deformation behavior and (b)  $\sigma$ - $\epsilon$  and (c)  $\sigma$ - $E_v$  curves of pure Al / ADC12 FG foam with  $V_t = 70\%$ .

		Sample A	Sample B	Sample C
$\sigma_{pl}$ (MPa)	FG (1st plateau)	10.4	11.2	11.3
	Uniform pure Al	10.8		
	FG (2nd plateau)	24.7	24.8	24.8
	Uniform ADC12	24.8		

Fig. 5.  $\sigma_{pl}$  values of first and second plateau regions of three FG foams and corresponding uniform foams.

### 3. 実験結果

Fig. 3 に作製したポーラス Al の外観図や X 線 CT 画像、高さ方向の気孔率分布を示す。Pure Al 層および ADC12 層は、水洗時に焼結不足による崩れは見られなかった。また、X 線 CT 画像から、作製したポーラス Al は、NaCl の形状が転写された気孔形状、およびほぼ均一な気孔分布を有していた。X 線 CT 画像より NaCl の残留が見られないことを確

認した。質量から算出した除塩率からも完全に除塩が行われていると考えられる。

Fig. 4 に静的圧縮試験より得られた変形挙動、応力-ひずみ線図およびその応力-ひずみ線図から算出した応力-単位体積あたりのエネルギー吸収量の関係を示す。圧縮初期段階 (1st plateau) では、Pure Al 層が圧潰するため低強度なプラトー領域が現れた。そして、 $\epsilon = 0.2 \sim 0.3$

あたりを境に ADC12 層の圧潰が始まるため高強度なプラトー領域 (2nd plateau) が現れた。したがって、作製したポーラス Al は内部において異なる強度を有していた。また、それに伴って、エネルギー吸収量も変化することが示された。

Fig. 5 に応力-ひずみ線図から算出したプラトー応力を示す。プラトー応力の算出方法は、文献<sup>12)</sup>を参考に同様に行った。すなわち、

- (1) pure Al 層の変形時には、ADC12 層は変形しない。
- (2) ADC12 層の変形時には、pure Al 層は変形しない。
- (3) pure Al 層のひずみは、pure Al 層の厚さで試験片全体の変位を除することで求める。
- (4) ADC12 層のひずみは、ADC12 層の厚さで試験片全体の変位を除することで求める。
- (5) JIS 規格のように<sup>11)</sup>、(3)、(4) で得られた圧縮ひずみのうち、20-30%ひずみの応力の平均値を、各層のプラトー応力と定める。

このような仮定のもと、プラトー応力を求めた。これより合金種を変化させた傾斜機能ポーラスアルミニウムは、各層の合金種単独のポーラスアルミニウムのプラトー応力と、ほぼ同様の値となっており、各層の合金種のポーラスアルミニウムの特性を有していることがわかった。

#### 4. 結言

本研究では焼結スペーサー法により合金種の異なる傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製を試みた。アルミニウム合金種を変化させた傾斜機能ポーラスアルミニウムにより、破壊の制御の可能性が示唆された。また、各領域が変形する時にその変形層の単体ポーラスアルミニウムの圧縮特性が発現していると考えられる。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 28 年度一般研究開発助成 (AF- 2016029) のもと行われました。ここに厚く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) L. J. Gibson: Annu. Rev. Mater. Sci. 30 (2000) 191.
- 2) 小橋眞: 軽金属 55 (2005) 327.
- 3) 金武直幸, 小橋眞: 軽金属 62 (2012) 122.
- 4) J. Banhart: Int. J. Veh. Des. 37 (2005) 114.
- 5) 三好鉄二, 濱田猛, 金橋秀豪: R&D神戸製鋼技報 57 (2007) 95.
- 6) J. Banhart: Prog. Mater. Sci. 46 (2001) 559.
- 7) 中嶋英雄監修: マクロおよびナノポーラス金属の開発最前線, (2011), シーエムシー出版.
- 8) Y. Y. Zhao, D. X. Sun: Scr. Mater. 44 (2001) 105.
- 9) M. Hakamada, Y. Yamada, T. Nomura, Y. Q. Chen, H. Kusuda, M. Mabuchi: Mater. Trans. 46 (2005) 2624.
- 10) 袴田昌高, 馬渕守: 軽金属 62 (2012) 313.
- 11) 日本工業規格: JIS-H-7902 ポーラス金属の圧縮試験方法, (2016), 日本工業標準調査会.
- 12) Y. Hangai, K. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A 556 (2012) 678.