FSP 法を利用した ADC12-A1050 ポーラスアルミニウム作製方法の検討*

大関 雄一郎^{*1}, 半谷 禎彦^{*2}, 宇都宮 登雄^{*3}, 桑水流 理^{*4}, 吉川 暢宏^{*5}Investigation of Manufacturing Process of ADC12-A1050 Porous Aluminum
by Friction Stir Processing RouteYuichiro OZEKI^{*1}, Yoshihiko HANGAI, Takao UTSUNOMIYA,
Osamu KUWAZURU and Nobuhiro YOSHIKAWA^{*1} Graduate School of Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Recently, porous aluminum has attracted special interest as a new functional material. However, the application of porous aluminum remains limited due to high-cost fabrication and low productivity. To overcome these problems, the authors proposed a new fabrication method by using friction stir processing (i. e. FSP route precursor method). In this study, at first, the precursors of ADC12 and A1050 were fabricated by FSP route individually and those precursors were welded by friction stir welding (FSW). Moreover, by foaming the welded precursor, ADC12-A1050 porous aluminum was manufactured. Based on the cross-sectional images and X-ray CT images, porosity and pore structures were examined. Although ADC12-A1050 bonded precursor tends to foam from the part of ADC12, ADC12-A1050 porous aluminum with high porosity and high circularity can be manufactured under proper forming conditions.

Key Words : Porous Material, Friction Stir Welding, Functionally Gradient Materials, Foaming, Aluminum Alloy

1. 緒 言

ポーラスアルミニウムは、軽量、衝突安全性に優れるなどの多くの利点を有した機能性材料として、その活用が期待されている⁽¹⁾。ポーラスアルミニウムの作製方法はいくつか提案されているが、その中にプリカーサ法がある⁽¹⁾。プリカーサ法は、アルミニウムと発泡剤を何らかの方法で均一に混合させた前駆体（プリカーサ）を作製し、それを加熱・発泡させることでポーラスアルミニウムを作製する方法である。プリカーサの既存の作製法として粉末冶金法⁽²⁾が提案されているが、この方法は出発材が粉末のため高価、工程が多く生産性が低いなどの問題があり、実用化への障害となっている。そこで著者らは、低コストでの生産が可能な方法として、摩擦攪拌プロセス（FSP）を利用した作製法（以下、FSP 法と呼ぶ）を提案した⁽³⁾。FSP は、高速で単純、外部熱源が不要で省エネルギーなプロセスであり、その強い攪拌作用によりアルミニウム合金内に発泡剤粉末などを混合することが可能である。著者らはこれまでに、この方法により種々のアルミニウム合金板材を用いて、高い気孔率を有するポーラスアルミニウムを作製してきた⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。そして、この FSP 法では異なる種類のアルミニウム合金から作製したプリカーサをさらに摩擦攪拌接合（FSW）させることが容易にでき、二つの材料が十分に接合され、異なる特性が一体となったポーラスアルミニウムを作製できる可能性を有している^{(6),(7)}。これにより、高強度部と低強度部を有するポーラスアルミニウムが作製できれば、衝撃吸収時における破壊の順番を制御可能となる。

本研究では、高強度でリサイクル性に優れる ADC12 ダイカスト板と延性に優れる A1050 アルミニウム板を用

* 原稿受付 2010 年 12 月 19 日

^{*1} 群馬大学大学院工学研究科（〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1）^{*2} 正員、群馬大学大学院工学研究科^{*3} 正員、芝浦工業大学先端工学研究機構^{*4} 正員、福井大学大学院工学研究科^{*5} 正員、東京大学生産技術研究所

E-mail: t09801209@gunma-u.ac.jp

いて作製したプリカーサを、FSW で接合することにより一つのプリカーサを作製する．このプリカーサを A1050 ポーラスアルミニウムの温度条件にて発泡させることにより、ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの作製を試みる．また、作製したポーラスアルミニウムの断面画像および X 線 CT 画像による気孔形態の観察と気孔率の評価から発泡の様子を観察する．更に、それらの結果をもとに温度条件を変化させ ADC12 部分と A1050 部分をほぼ同時に発泡させ、高気孔率を有し気孔形態に優れた ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの作製を試みる．

2. 実験方法

2・1 FSP 法によるプリカーサ作製手順

図 1 に、ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムのプリカーサ作製手順を示す．はじめに図 1(a)に示すように、ADC12 あるいは A1050 の 2 枚の板の間に発泡剤の水素化チタン粉末 (TiH_2 , $<45 \mu\text{m}$) と発泡補助剤のアルミナ粉末 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 約 $1 \mu\text{m}$) を挟み、積層板とする．続いて図 1(b)のように、 TiH_2 と Al_2O_3 を散布した部分に FSP を行うことで板内部にそれらを攪拌混合させ、それぞれの材料のプリカーサを作製する．ただし、 TiH_2 , Al_2O_3 を均一に混合するため、また大きいプリカーサを採取するため、ADC12 ではツールの走査列 3 列で同一列の走査回数 4 回、A1050 では走査列 3 列、走査回数 2 回のマルチパス法^{(3)-(5),(8)}を用いている．さらに、図 1(c)のように、ADC12 と A1050 プリカーサの攪拌部分を突き合せて FSW を行い接合させ、この接合板から機械加工により接合部を中央にして $30 \times 15 \times 6 \text{ mm}^3$ の大きさの加熱用の ADC12-A1050 プリカーサを切り出した．なお、ADC12 および A1050 それぞれのプリカーサを作製する際の FSP 条件、 TiH_2 , Al_2O_3 の量を、表 1 にまとめて示している．

Table 1 FSP and foaming conditions.

	A1050	ADC12
Tool rotational frequency : rpm	2200	1000
Tool traversing velocity : mm/min	100	100
TiH_2 : mass%	0.5	1
Al_2O_3 : mass%	5	5
Multi pass : pass	3×2	3×4
Forming temperature : K	1003	1003

Fig. 1 Schematic illustration of fabricating process of ADC12-A1050 precursor by FSP.

2・2 発泡方法および気孔形態の評価方法

ADC12-A1050 プリカーサを加熱することにより ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムを作製した。発泡の保持温度は表 1 に示しているが、熔融温度が高い A1050 に対する保持温度に合わせた。ADC12-A1050 プリカーサを加熱した保持時間は、4 分～10 分まで 2 分毎に変化させた。各条件において 2 個のプリカーサを発泡させた。各保持時間で得られた ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムを、機械加工により幅方向中央で切断し断面における気孔の形態の変化を観察した。また、ポーラスアルミニウムはマイクロフォーカス X 線 CT システム（島津製作所 SMX-225CT）により撮像し、その画像をもとに気孔形態の変化の評価も行った。さらに、気孔率 $p\%$ は、 $p = (\rho_i - \rho_f) / \rho_i \times 100$ により算出した。ここで、 ρ_i は発泡前のプリカーサの密度、 ρ_f は発泡後のプリカーサの密度であり、密度はアルキメデス法により求めた。なお、気孔率は各条件で得られた 2 個のポーラスアルミニウムの平均を取っている。

3. 実験結果および考察

図 2 に、気孔率と保持時間の関係を示す。また、図 3 に、各保持時間における、断面での気孔形態写真（上側）と X 線 CT 画像による気孔形態（下側）を示す。X 線 CT 画像は、ポーラスアルミニウムの高さ方向中央断面近傍での気孔形態である。図 2 より、ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの気孔率は、保持時間上昇にしたがって上昇し、保持時間 8 分以上で、気孔率は 73% 程度でほぼ一定となっていることがわかる。また、ポーラスアルミニウムの気孔形態は、保持時間 4 分（図 3(a)）では、発泡の保持温度が低い ADC12 側で小さい気孔が発生し始め、A1050 との接合部では ADC12 を含んでいる部分で発泡が始まっている。保持時間 6 分（図 3(b)）では、ADC12 側で 4 分の場合より大きく成長した円形の気孔が存在するようになっている。なお、X 線 CT 画像で A1050 側の周囲で気孔が発生しているが、これは A1050 側表面近傍の温度が内部より高く、部分的に発泡したため現れたものと思われる。保持時間 8 分（図 3(c)）になると、ADC12 に加え、A1050 側も発泡し円形の気孔が存在するようになっているが、ADC12 側の気孔は、気孔同士の合体が進み円形ではあるが大きな気孔となっている。保持時間 10 分（図 3(d)）では、A1050 側の気孔も成長・合体して大きくなっており、ADC12 側では気孔のさらなる粗大化と端部において気孔内ガスの外部への放出により気孔の潰れが現れ出していることがわかる。しかしながら、全体的に見ると気孔は円形を保っていることがわかる。

このような ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの気孔の発生・成長に差が出るのは、ADC12 と A1050 の熔融温度の違いによるものと考えられる。すなわち、ADC12 の熔融温度は今回採用した 1003 K よりも低いため、熔融が先に始まり TiH_2 の発泡も早く始まる。これにより、保持時間の経過とともに発生した気孔の成長・合体が先に進み、粗大になりやすくなると思われる。保持時間 10 分の気孔率が 8 分より若干減少しているのも、ADC12 側で気孔内ガスの外部への放出により気孔の潰れが現れたことが原因と考えられる。しかしながら、気孔形態の写真、画像からわかるように、ADC12 側の気孔は円形を長い時間一定に保つことが可能のようであり、A1050 側の気孔が成長するまで気孔があまり崩れずに保つ形になっている。さらに、発泡条件（保持温度、保持時間）を調整することによって、気孔の大きさや分布状態を変化させることができるものと考えられる。

そこで保持温度を 1003K よりも高温にし、ADC12 と A1050 の発泡に必要な時間差を減少させて、同時に発泡させることで、均一気孔のポーラスアルミニウムの作製を試みた。その際、電気炉内にプリカーサを入れてから、発泡してすぐに取り出すために、1 分ごとに電気炉内の様子を観察した。図 4 に保持温度 1123K、保持時間 4 分の場合における断面写真を示す。気孔率は 71.5% であり、ADC12 側と A1050 側それぞれの気孔が均一かつ微細な気孔を有していることがわかる。これより、発泡条件（保持温度、保持時間）を調整することで、気孔の制御が可能であることがわかった。

4. 結 言

本研究では、ADC12 ダイカスト板と A1050 アルミニウム板を用いて ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの作製を試みた。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

Fig. 2 Relationship between holding time and porosity.

Fig. 3 Variation of pore structures of porous aluminum with holding time.

Fig.4 Pore structure at foaming temperature of 1123 K.

- (1) ADC12 と A1050 ポーラスアルミニウムのプリカーサを接合させ、適切な発泡条件のもとで発泡させることによって ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムは作製可能である。
 - (2) ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムは、熔融温度の低い ADC12 側から発泡し、熔融温度が高い A1050 側で円形の気孔が現れた保持時間においても、ADC12 側の気孔は円形の状態を保つことが可能のようである。
 - (3) ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムは、保持温度を高温に設定することで、ADC12 と A1050 を同時に発泡させることで、均一気孔のポーラスアルミニウムが作製可能である。
- 今後は、本ポーラスアルミニウムの大型化と機械的性質の評価を行っていく予定である。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、元芝浦工業大学横田武男准教授には FSW に関して、群馬大学大学院工学研究科斉藤勝男教授には発泡実験に関して、元群馬大学大学院工学研究科久米原宏之教授には試験結果に対して有益なご助言をいただきました。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、および財団法人池谷科学技術振興財団研究助成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) Banhart, J., “Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams”, *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6 (2001), pp. 559-632.
- (2) 小橋眞, 棚橋伸也, 金武直幸, “Al-TiH₂ 混合粉末プリカーサの加熱によるポーラスアルミニウムの発泡過程”, 軽金属, Vol. 53, No. 10 (2003), pp. 427-432.
- (3) Hangai Y. and Utsunomiya, T., “Fabrication of Porous Aluminum by Friction Stir Processing”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, No. 2 (2009), pp. 275-277.
- (4) 半谷禎彦, 宇都宮登雄, “摩擦攪拌プロセスによる ADC12 アルミニウム合金ダイカストのポーラス化”, 鋳造工学, Vol. 81, No. 5 (2009), pp. 222-225.
- (5) 宇都宮登雄, 半谷禎彦, 大関雄一郎, “摩擦攪拌プロセスを用いたポーラスアルミニウムの作製におけるアルミナ添加量および保持時間の影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 75, No. 758 (2009), pp. 1334-1339.
- (6) 半谷禎彦, 小山真司, 宇都宮登雄, 長谷川誠, “異種アルミニウム合金による傾斜機能ポーラスアルミニウムの創製”, 日本金属学会誌, Vol. 74, No. 4 (2010), pp. 285-287.
- (7) 半谷禎彦, 大関雄一郎, 小山真司, 宇都宮登雄, “摩擦攪拌法を用いた ADC12-A1050 傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 775 (2011), pp. 517-525.
- (8) Sato, Y.S., Park, S.H.C., Matsunaga, A., Honda, A. and Kokawa, H., “Novel Production for Highly Formable Mg Alloy Plate”, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, No. 3 (2005), pp. 637-642.