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*

半谷 禎彦^{*1}, 大関 雄一郎^{*2}
小山 真司^{*1}, 宇都宮 登雄^{*3}

Manufacturing of ADC12-A1050 Functionally Graded Porous Aluminum by Friction Stir Processing Route

Yoshihiko HANGAI^{*1}, Yuichiro OZEKI,
Shinji KOYAMA and Takao UTSUNOMIYA

^{*1} Graduate School of Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Porous aluminum is a multifunctional material with lightweight and high energy absorption properties. In this study, using ADC12 aluminum alloy (Al-Si-Cu aluminum alloy) die castings and A1050 aluminum (pure aluminum), functionally graded porous aluminum was fabricated by friction stir processing (FSP) route precursor method. First, ADC12 and A1050 precursors were fabricated separately by FSP route. Next, these precursors were bonded by friction stir welding (FSW) and an ADC12-A1050 precursor was fabricated. Finally, the precursor was foamed and ADC12-A1050 functionally graded porous aluminum with a porosity of about 70% was successfully fabricated at a holding temperature of 1003 K and at a holding time of 8 min. It was shown that, by EPMA observation, the quantity of Si atoms was gradually changing at the bonding region and seamless functionally graded porous aluminum can be fabricated by FSP route.

Key Words : Porous Material, Functionally Gradient Materials, Aluminum Alloy, Foam, Die Casting, Friction Stir Welding, Precursor

1. 結 言

軽量で衝撃エネルギー吸収特性に優れたポーラスアルミニウムは、自動車用部材をはじめ多くの分野での利用が期待されている^(1, 2)。自動車用部材として利用が検討されているクローズドセル型ポーラスアルミニウムの作製には数多くの方法が提案されているが、その一つにプリカーサ法がある⁽¹⁾。プリカーサ法は、固相状態のアルミニウム合金（出発材）と発泡剤粉末を何らかの方法で混合した発泡前駆体（プリカーサ）を作製する。それを加熱することで発泡剤が分解し発生したガスにより、軟化したアルミニウム合金を膨張させポーラスアルミニウムを作製するものである。プリカーサを作製する方法には、粉末冶金法⁽³⁻⁶⁾、圧縮ねじり加工による方法^(7, 8)、圧延接合法^(9, 10)、摩擦攪拌法（FSP 法）⁽¹¹⁻¹³⁾ など種々提案されている。この中で摩擦攪拌法は、出発材として一般に流通している安価なアルミニウム合金板材を利用することができ、更に摩擦攪拌接合（FSW）の特長である単純プロセス、高速プロセス、高エネルギー効率、生産環境がクリーンといった利点^(14, 15)を有している。従って本手法は、ポーラスアルミニウムの低コスト化に寄与するものと考えられる。

また摩擦攪拌法は、FSW を応用した手法であるため、様々な種類のアルミニウム合金を適宜組み合わせで接合

* 原稿受付 2010 年 8 月 31 日

^{*1} 正員, 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} 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

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

することによって、様々な性質を持つポーラスアルミニウムを作製できる可能性がある⁽¹⁶⁾。例えば、強度に優れたアルミニウム合金と延性に優れたアルミニウム合金を組み合わせることで、一つのポーラスアルミニウム中に高強度部と高延性部の二つの性質の発現が期待できる。更に、FSW による接合部（攪拌部）は両方の組成が混合したアルミニウム合金となっているため、接着して作製するものとは異なり、傾斜的な特性（機能）の発現が期待できる。そしてこのような接合を行うことで、界面部での応力集中などを避けることができ、より健全な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を作製できるものと期待される。

本研究では、強度に優れた ADC12 アルミニウム合金ダイカスト板材（以後 ADC12 と呼ぶ）と、延性に優れた A1050 純アルミニウム圧延材（以後 A1050 と呼ぶ）を用いて、ADC12-A1050 傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製を試みる。ADC12 アルミニウム合金は、ダイカスト用アルミニウム合金の中では日本国内で最も多く利用されている合金である⁽¹⁷⁾。また、リサイクル性が 90%を超えるアルミニウム合金でもある⁽¹⁸⁾。ADC12 と A1050 の固相線温度はそれぞれ 788 K と 919 K、液相線温度は 853 K と 930 K と大きく異なる⁽¹⁹⁾。従って、ADC12 と A1050 を接合したプリカーサをある一定の雰囲気温度に保って加熱した場合、ADC12 の方が早く母材の軟化が始まり、A1050 よりも早く発泡するものと考えられる。そこで、はじめに一定雰囲気温度中で発泡させた ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの外観形状や内部気孔形態を基に、発泡挙動について調査する。次に、ADC12 に多く含有する Si 原子の分布について観察を行い、攪拌部やその周囲で組成成分が変化し傾斜化しているか検討する。

2. 実験方法

2・1 プリカーサ作製方法

図 1 に摩擦攪拌法によるプリカーサ作製の概略図を示す。供試材として、幅 110mm、長さ 180mm、厚さ 3mm の ADC12 アルミニウム合金ダイカスト板材をダイカストのままの状態、および幅 80mm、長さ 210mm、厚さ 3mm の A1050 純アルミニウム圧延材を圧延のままの状態で用いた。表 1 にそれぞれの組成成分を示す。図 1(a), (a')に

Fig. 1 Schematic illustration of the fabrication process of an ADC12-A1050 precursor by friction stir processing.

Table 1 Chemical composition of ADC12 aluminum alloy and A1050 aluminum used in this study (mass%).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Sn	Pb	Ti	Cr	Al
ADC12	11.5	0.77	1.92	0.21	0.19	0.77	0.06	0.02	0.05	0.04	0.03	Bal.
A1050	0.04	0.31	0.03	-	0.01	-	-	-	-	0.02	-	Bal.

示すように、はじめに、それぞれ 2 枚の板の間に、発泡剤として水素化チタン粉末 (TiH_2 , $<45 \mu\text{m}$), および気孔形態安定剤としてアルミナ粉末 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 約 $1 \mu\text{m}$) を散布した. 発泡剤は熱分解によりガスを発生し, アルミニウム合金母材を膨張させポーラス化させる. 気孔形態安定剤は, アルミニウム合金母材の粘性を高めることでアルミニウム合金母材膨張時に発生した気孔が合体粗大化し, 気孔からガスが外部に放出されるのを防ぐ. 散布量は, これら粉末を散布した面積に, 後述するツールのプローブ長さ (5 mm) をかけた体積分のアルミニウム合金の質量に対して, 発泡剤は ADC12 が 1 mass%, A1050 が 0.5mass%, 気孔形態安定剤は両合金とも 5 mass% とした. 次に図 1(b) - (f), (b') - (f') に示すように FSW を行うことで, アルミニウム合金母材中に発泡剤および気孔形態安定剤を混合する. この工程は ADC12, A1050 いずれの場合も同様である.

FSW には, FSW 装置 (SHH204-720, 日立設備エンジニアリング株式会社) を用いた. ツールは SKH51 高速度工具鋼製で, ショルダ径 17 mm, プローブ径 6 mm, プローブ長さ 5 mm のネジ付き (M6) である. ツール回転速度は ADC12 の場合 1000 rpm, A1050 の場合 2200 rpm で, ツール移動速度は両者とも 100 mm/min, 前進角は 3° とした. プリカーサの寸法を大きくするため, また発泡剤や気孔形態安定剤をより良く攪拌するために, FSW の際にはマルチパス法⁽²⁰⁻²³⁾ を採用し以下のように行った.

- ① 図 1(c)のように, 発泡剤や気孔形態安定剤を散布した個所の図中一番右側部分に対して FSW を行う.
 - ② 図 1(d)のように, 既に FSW を行ったものと攪拌部同士が若干重なるようにツールを約 5 mm ずつ, FSW のツール走査方向と垂直方向にずらしながら合計 7 回 FSW を行う. これにより, FSW を 1 回のみ行う場合よりも大きなプリカーサを得ることができる.
 - ③ 図 1(e), (f)のように, 一度 FSW を行った同一個所に対して左側から走査方向を逆転させて FSW を行う.
- ADC12 の場合は, 更にもう 1 回, ①~③の操作を同一個所に対して行った. すなわち, A1050 は 2 回, ADC12 は 4 回攪拌されたことになり, 発泡剤や安定剤をより均一に混合することができる⁽²⁴⁾. なお, ツール回転数やマルチパス法における攪拌回数などは過去の研究^(12, 24-26) を参考に設定した.

最後に図 1(g), (g'), (h)のように, FSW を行った ADC12 および A1050 を機械加工により走査方向に半分に切断し, FSW を施した部分が突き合わせ面となるように配置して FSW を行った. ツール回転速度は 1400 rpm, ツール移動速度は 100 mm/min, 前進角は 3° とした. この接合を行う際にも, 攪拌を十分に行うためにマルチパス法を適用し, FSW を同一個所に対して 2 回行った.

2・2 発泡方法

図 1(h)で作製したもののから機械加工によりプリカーサを採取した. プリカーサの大きさは $30 \times 15 \times 6 \text{ mm}^3$ であり, 元々 ADC12 であった部分や A1050 であった部分はそれぞれ $15 \times 15 \times 6 \text{ mm}^3$ である. なお, FSW の際に生じたバリは何の処理も施さず, そのままプリカーサとして用いている. このプリカーサをあらかじめ 1003 K に温めておいた電気炉に入れ, その温度に保ったまま保持し, その後, 電気炉から取り出し空冷した. この保持温度は, 固相線温度や液相線温度の高い A1050 に対するものを用いた^(24, 27). 保持時間は 4 分から 10 分まで 2 分ごとに变化させた. 気孔率 (発泡率) $p(\%)$ は, $p = (\rho_f - \rho) / \rho_f \times 100$ により算出した. ここで, ρ_f は発泡前のプリカーサの密度, ρ_f は発泡後のポーラスアルミニウムの密度である. それぞれの密度はアルキメデス法により測定した.

2・3 組成成分の分布観察

作製した ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの接合部 (攪拌部) における組成成分の傾斜化の様子について, ADC12 に多く含まれている Si の分布を FSW の走査方向に垂直な断面に対して観察した. 観察には電子線マイクロアナライザー (EPMA-1610, 株式会社島津製作所, 以後 EPMA と呼ぶ) を用いた. 観察する断面はエメリー紙により 1200 番まで研磨後, 電解研磨により仕上げた.

また、各観察点における Si 量の定量的評価を行うために、EPMA 観察により得られた Si 分布の画像について、Si が画像全体中で占める割合を以下のように算出した。すなわち、適切な X 線強度の値を閾値として二値化し、Si が存在する領域と存在しない領域を分離した上で、Si が存在する領域のピクセル数の和を画像全体のピクセル数で割ることで求めた。

3. 実験結果

3・1 発泡挙動

図 2 に、発泡前のプリカーサと、各発泡時間における ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムの外観写真を示す。これらの図は、FSW を施した面から観察したものであり、ポーラスアルミニウムにはそれぞれの気孔率 p も合わせて示している。左側が ADC12、右側が A1050 である。図 2(a)のようにプリカーサ中央部の FSW の跡は、図 1(h)に示すように一番最後に ADC12 と A1050 を接合した際のものである。加熱時には、この面が上になるように発泡させた。図 3 は、図 2 に対応するプリカーサおよびポーラスアルミニウムの走査方向に垂直な断面の写真を示

Fig. 2 Photographs of ADC12 (left side) - A1050 (right side) functionally graded porous aluminum.

Fig. 3 Photographs of cross section of ADC12 (left side) - A1050 (right side) functionally graded porous aluminum perpendicular to the FSW direction.

す。図 3(a)では、トンネル状の欠陥などといった FSW 欠陥⁽²⁸⁾ は観察されず良好な接合が出来ていることが分かる。また、後述するように FSW 特有のオニオンリングが観察され、発泡剤や気孔形態安定剤がほぼ均一に混合している様子が確認できる。

発泡時間 $t = 4 \text{ min}$ では、図 2(b)の外観から ADC12 側で若干の発泡が見られるが、FSW の跡がはっきりと残っており、発泡の初期段階であることが分かる。図 3(b)の内部気孔形態を見ると、ADC12 側に非常に小さい気孔が数多く発生しており、ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムは、まず ADC12 側から発泡が始まったことが分かる。これは、ADC12 は A1050 よりも固相線温度や液相線温度が低く、ADC12 の方が短い時間で発泡可能な温度（すなわち、軟化状態）に達したためと考えられる。接合部では後述するように発泡が始まっている部分と始まっていない部分が混在している。A1050 側の発泡は始まっていない。

発泡時間 $t = 6 \text{ min}$ では、図 2(c)の外観から ADC12 側の発泡が進み膨張したため FSW の跡がなくなっている。一方、A1050 側では一部右端などで膨らんでいるのが観察されるが、FSW の跡は残っており、発泡のごく初期段階であることが分かる。図 3(c)の内部気孔形態を見ると、ADC12 側の気孔が成長し、ADC12 側全体にほぼ均一で細かく真円度の高い気孔が生成している。しかし、A1050 側では右端で気孔が若干観察されるが、ほとんど発生していない。

発泡時間 $t = 8 \text{ min}$ では、図 2(d)の外観からは大きく膨張していることが観察され、気孔率が大幅に上昇している。しかし、図 3(d)の内部気孔形態は、ADC12 側で気孔の合体・粗大化が始まっており、 $t = 6 \text{ min}$ の場合では真円度の高い気孔だったものが、 $t = 8 \text{ min}$ の場合では崩れているのが観察される。一方、A1050 側では気孔が数多く発生し、A1050 側全体にほぼ均一で細かく真円度の高い気孔が生成している。また、接合部で欠陥などの発生は観察されない。

発泡時間 $t = 10 \text{ min}$ では、図 2(e)の外観は $t = 8 \text{ min}$ の場合と比較してあまり変化がないように見える。しかし、一部表面に穴が生じ気孔率も若干低下している。これは、生成した気孔の合体・粗大化が促進され、気孔が浮上し、アルミニウム合金の表面張力では支えられなくなり、ガスが外部に放出されたため起こったものと考えられる。図 3(e)の内部気孔形態からも、矢印で示す箇所 ADC12 側の上部で気孔が潰れた跡である層状となった部分が観察され、気孔の合体→粗大化→浮上→放出が進行したことが分かる。

以上のことから、本研究で作製した ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムでは発泡時間 $t = 8 \text{ min}$ で最大の気孔率が得られることが分かった。また、得られた ADC12-A1050 ポーラスアルミニウムは ADC12 と A1050 の境界で欠陥が生じることなく、良好なポーラスアルミニウムが作製できることが分かった。

3・2 ADC12 と A1050 の接合状態

図 4 は、ADC12 と A1050 の接合状態をより詳細に観察するために、図 3(a), (b)を実体顕微鏡により観察したものである。図 4(a)のプリカーサでは、FSW 特有のオニオンリング⁽²⁸⁾ が複数箇所確認できる。用いたツールのプローブはネジ付きであるため、上下方向にも大きな攪拌が行われている⁽²⁸⁾。解像度の問題から若干分かりにくい箇所もあるが、プリカーサ全域に渡ってほぼ均一に攪拌がなされていることが分かる。発泡時間 $t = 4 \text{ min}$ の図 4(b)では、ADC12 側で発泡が始まる一方、A1050 側では発泡は始まっていないが、攪拌部を詳細に観察すると黒

Fig. 4 Detailed observation of cross section of ADC12 (left side) - A1050 (right side) functionally graded porous aluminum perpendicular to the FSW direction corresponding to Fig. 3(a) and (b).

枠部に示すように、一部発泡している個所が観察できる。これはオニオンリングの一部に形状が似ていることから、ADC12 と A1050 を FSW により接合する際、攪拌部では完全に組成が混合するわけではなく、ある部分は ADC12、ある部分は A1050 とある程度の大きさを持った領域となって機械的に混合すると考えられる。このため、攪拌部領域中の ADC12 部分のみが発泡し、黒枠部に示すように部分的に発泡している。ただし、巨視的に見れば、攪拌部は ADC12 の組成と A1050 の組成が混合し平均的な組成となっていると考えられる。

3・3 Si の分布

図 5 に、最大気孔率が得られた ADC12-A1050 ポーラスアルミニウム（図 3(d)）の断面を EPMA 観察した結果を示す。白い部分が Si が存在している個所である。図中の d は、図 3(d) に示すように ADC12 と A1050 の接合部を原点として、そこからの横方向の距離である。図 5(a) - (d) は、元々 ADC12 であった領域の Si 分布である。図 5(a), (b) に示すように、ADC12 部分では本研究で用いたアルミニウム合金ダイカストが Al-Si 共晶点に近かったため、Si が広い範囲に分布している。接合部に近づくに従って、Si の分布範囲は減少していくのが分かる。図 5(e),

Fig. 5 EPMA image of Si corresponding to Fig.3(d).

Fig. 6 Relationship between distance from center d of ADC12-A1050 porous aluminum and frequency of Si in area.

(f)は、元々A1050であった領域のSi分布である。 d が増加するに従ってSiの検出量が減少していくことが分かる。

図6に距離 d とSiが画像全体に占める割合との関係を示す。ADC12側でSiの占める割合は高い値を示しているが、若干のばらつきがある。このばらつきは、凝固の際にSiが偏析して析出し、観察個所により異なった値となったことが原因と考えられる。攪拌部に近づくに従って、ADC12側 $d = -5\text{mm}$ 辺りからSiの割合が徐々に低下し、 $d = +10\text{mm}$ ではほぼA1050の組成となりSiはほとんど検出されない。すなわち、接合部（攪拌部）ではSiの検出量が急激に変化するのではなく、徐々に変化し組成成分が傾斜化していることが分かる。また、ADC12側ではばらつきがあるため一概には言えないが、本研究においては攪拌されている範囲はADC12よりもA1050の方が広い領域で行われている。これは、脆性的なADC12ではFSWの攪拌で生じる塑性流動領域が狭いのに対し、延性的なA1050では塑性流動領域が広いことと関係していると考えられる。すなわち、ADC12-A1050ポラスアルミニウムの場合、組成成分が傾斜化する領域は元々A1050であった領域に広く存在することが予想される。また、材料の組み合わせにより傾斜化の領域が異なるものと推察される。

本研究において、固相線温度や液相線温度および機械的性質が大きく異なるADC12とA1050により、プリカーサの作製および傾斜機能ポラスアルミニウムの作製が行えることが分かった。ただし、A1050に最適な保持時間では、ADC12の気孔は粗大化していた。この対策として、プリカーサのADC12側を大きめに作製し、ADC12全体が軟化するまでの時間を長くする、あるいは発泡の際にADC12側に覆いを設け、入熱量をA1050側よりも少なくする、ことが考えられる。

また、本研究では発泡剤をはさんだ上下2枚の板を同一のアルミニウム合金としたが（図1(a), (a')参照）、上の板をADC12、下の板をA1050とした積層板を作製し、図1(h)での接合の際に、図1(g)と(g')の間にはさむことで、より継ぎ目の無い傾斜機能ポラスアルミニウムが作製できることが期待される。更に、本研究ではADC12とA1050を分離して図1(g), (g')のような積層板を作製したが、図1(a)の際に両者のアルミニウム板を並べて配置しFSWを行えば、一度に図1(h)に示すようなADC12-A1050プリカーサを作製することも可能と考えられる。

4. 結 語

本研究では、摩擦攪拌法によりADC12-A1050傾斜機能ポラスアルミニウムの作製を試みた。得られた結果を以下に示す。

- (1) 摩擦攪拌法により作製したADC12およびA1050単一組成によるプリカーサをFSW接合することにより、FSW欠陥を生じることなく健全なADC12-A1050プリカーサを作製することができた。
- (2) ADC12およびA1050は固相線温度や液相線温度が大きく異なるが、ADC12-A1050プリカーサを加熱することで、接合部で欠陥のない良好なADC12-A1050ポラスアルミニウムを作製することができた。
- (3) ADC12-A1050ポラスアルミニウムの接合部（攪拌部）では、組成成分が徐々に変化し傾斜化しており、継ぎ目のない傾斜機能ポラスアルミニウムとなっていることが確認できた。
- (4) ADC12-A1050ポラスアルミニウムの場合、組成成分が傾斜化している領域は元々A1050であった領域に広く存在することが分かった。

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、群馬大学大学院工学研究科大学院生川澄健太郎君にはEPMA利用に対して、元群馬大学大学院工学研究科久米原宏之教授、東京大学生産技術研究所吉川暢宏教授、福井大学大学院工学研究科桑水流理准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。また、実体顕微鏡観察では群馬大学工学部学部生大場裕太郎君にご協力を頂きました。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, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6 (2001), pp. 559-632.
- (2) Nakajima, H., "Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores", *Progress in Materials Science*, Vol. 52, No. 7 (2007), pp. 1091-1173.
- (3) Kunze, H.D., Baumeister, J., Banhart, J. and Weber, M., "P/M TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF METAL FOAMS", *Powder Metallurgy International*, Vol. 25, No. 4 (1993), pp. 182-185.
- (4) Baumgartner, F., Duarte, I. and Banhart, J., "Industrialization of powder compact foaming process", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2, No. 4 (2000), pp. 168-174.
- (5) 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.
- (6) Kobashi, M., Sato, R. and Kanetake, N., "Foaming and Filling-in Behavior of Porous Aluminum in Hollow Components", *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 9 (2006), pp. 2178-2182.
- (7) Tsuda, S., Kobashi, M. and Kanetake, N., "Producing technology of aluminum foam from machined chip waste", *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 9 (2006), pp. 2125-2130.
- (8) Kanetake, N., Kobashi, M. and Tsuda, S., "Foaming Behavior of Aluminum Precursor Produced from Machined Chip Waste", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, No. 9 (2008), pp. 840-844.
- (9) Kitazono, K., Sato, E. and Kuribayashi, K., "Novel manufacturing process of closed-cell aluminum foam by accumulative roll-bonding", *Scripta Materialia*, Vol. 50, No. 4 (2004), pp. 495-498.
- (10) Kitazono, K., Nishizawa, S., Sato, E. and Motegi, T., "Effect of ARB cycle number on cell morphology of closed-cell Al-Si alloy foam", *Materials Transactions*, Vol. 45, No. 7 (2004), pp. 2389-2394.
- (11) 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.
- (12) Hangai, Y., Ozeki, Y. and Utsunomiya, T., "Foaming Conditions of Porous Aluminum in Fabrication of ADC12 Aluminum Alloy Die Castings by Friction Stir Processing", *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 9 (2009), pp. 2154-2159.
- (13) Hangai, Y. and Utsunomiya, T., "Fabrication of Porous Aluminum Utilizing Gases Intrinsically Contained in Aluminum Alloy Die Castings", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, No. 6 (2009), pp. 1284-1287.
- (14) Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, No. 1-2 (2005), pp. 1-78.
- (15) Ma, Z.Y., "Friction stir processing technology: A review", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, No. 3 (2008), pp. 642-658.
- (16) 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.
- (17) 社団法人日本ダイカスト協会, *ダイカストって何?*, (2004), 社団法人日本ダイカスト協会.
- (18) 高杉篤美, "アルミニウムを取巻くリサイクル事情", *軽金属*, Vol. 59, No. 2 (2009), pp. 87-93.
- (19) 軽金属学会, *アルミニウムの組織と性質*, (1991), 軽金属学会.
- (20) 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.
- (21) Su, J.Q., Nelson, T.W. and Sterling, C.J., "Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 52, No. 2 (2005), pp. 135-140.
- (22) Nakata, K., Kim, Y.G., Fujii, H., Tsumura, T. and Komazaki, T., "Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 437, No. 2 (2006), pp. 274-280.
- (23) 金永坤, 藤井英俊, 津村卓也, 駒崎徹, 中田一博, "マルチパス摩擦攪拌プロセスによる ADC12 ダイカスト材の組織と機械的性質の改善", *铸造工学*, Vol. 78, No. 9 (2006), pp. 451-456.
- (24) Hangai, Y., Utsunomiya, T. and Hasegawa, M., "Effect of tool rotating rate on foaming properties of porous aluminum fabricated by using friction stir processing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 2 (2010), pp. 288-292.
- (25) 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", *铸造工学*, Vol. 81, No. 5 (2009), pp. 222-225.

- (26) 宇都宮登雄, 高橋和也, 半谷禎彦, 河野成博, 桑水流理, 吉川暢宏, “摩擦攪拌法で作製した ADC12 ポーラスアルミニウムの気孔形態と圧縮特性”, 軽金属, Vol. 60, No. 11 (2010), pp. 590-595.
 - (27) 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.
 - (28) 社団法人溶接学会, 摩擦攪拌接合 –FSW のすべて–, (2006), 産報出版.
-