摩擦攪拌法による ADC12 フォームコア サンドイッチパネルの作製と引張り特性

宇都宮登雄¹ 石井伸幸^{2,*} 半谷禎彦² 小山真司²
北原総一郎³ 桑水流理⁴ 吉川暢宏⁵

¹ 芝浦工業大学 SIT 総合研究所

² 群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

³ ホクダイ株式会社

⁴ 福井大学大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻

⁵ 東京大学生産技術研究所

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 77, No. 9 (2013), pp. 385–390
© 2013 The Japan Institute of Metals and Materials

Fabrication and Tensile Property of Sandwich Panel with ADC12 Foam Core by Friction Stir Processing Route

Takao Utsunomiya¹, Nobuyuki Ishii^{2,*}, Yoshihiko Hangai², Shinji Koyama²,
Soichiro Kitahara³, Osamu Kuwazuru⁴ and Nobuhiro Yoshikawa⁵

¹ *SIT Research Laboratories, Shibaura Institute of Technology, Saitama 337–8570*

² *Department of Mechanical System Engineering, Graduate School of Engineering, Gunma University, Kiryu 376–8515*

³ *Hokudai Co., Ltd, Yuufutsu-gun, Hokkaido 059–1434*

⁴ *Department of Nuclear Power and Energy Safety, Graduate School of Engineering, University of Fukui, Fukui 910–8507*

⁵ *Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo 153–8505*

An aluminum foam sandwich, which consists of an aluminum foam core and two dense metallic face sheets, is a lightweight structural component with good energy and vibration absorption properties. In this study, using aluminum alloy die casting ADC12 plates containing large amount of gases, sandwich panels with metallurgical bonding between ADC12 aluminum foam core and dense aluminum sheets, of which the thickness was 3 mm and 1 mm, were fabricated by friction stir processing route. Through the observations of the dense sheets and the pore structure of aluminum foam core, the foaming condition for obtaining high porosity and good pore structure, and keeping a dense aluminum plate as surface plate simultaneously was discussed. Moreover, tensile tests were carried out on the fabricated aluminum foam sandwiches and it was shown that the bonding strength of interface is higher than the tensile strength of aluminum foam core. [doi:10.2320/jinstmet.J2013017]

(Received March 19, 2013; Accepted May 24, 2013; Published September 1, 2013)

Keywords: porous metals, alloy die casting ADC12, foaming, friction stir processing, composites, sandwich panel, tensile property

1. 緒 言

アルミニウムフォームは、圧延材料などの緻密材料に比べ極めて軽量で、優れたエネルギー吸収特性や吸音特性を有している^{1–3)}。しかしながら、緻密材料に比べ引張り強度や曲げ強度は劣るため、構造体に使用する場合は、アルミニウムフォームのコアと表面材となる緻密板材を接合したサンドイッチパネルとすることが望ましい^{4,5)}。このサンドイッチパネルの作製法としては、アルミニウムフォームと表面材を接着剤で貼り合わせる方法^{2,6,7)}、金属粉末と発泡剤粉末の混合・圧粉固化により作製したプリカーサと表面材を圧延接合した積層プリカーサを加熱発泡する方法^{6,8)}などが提案され

ている。前者の方法は、接着剤を使用するため耐環境性やリサイクル性に問題がある^{6,9)}。後者の方は、アルミニウムフォーム作製のプリカーサと表面材を圧延接合する工程が必要で、生産工程の増加が問題といえる。また、圧延によって強固な接合は得られるが、圧延条件が積層プリカーサの発泡挙動に影響を及ぼすことも指摘されている¹⁰⁾。

著者らは、摩擦攪拌プロセス (Friction Stir Processing, 以下 FSP と記す) を利用したポーラスアルミニウム作製法 (この方法を摩擦攪拌法と呼ぶ)^{11,12)} を提案した。この方法では、アルミニウム板中への添加剤粉末の攪拌・混合により作製するプリカーサと、表面材となる緻密板材の接合を同時に行うことが可能である^{13,14)}。そこで、この利点を活用して、緻密鋼板とアルミニウムフォームのコアを接合したサンドイッチパネルの作製へ展開を図ってきた^{15,16)}。しかしながら、構造体のより軽量化には、表面材はアルミニウム板材とする

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

ことが望ましい．このアルミニウム(あるいはアルミニウム合金)同士の組み合わせの作製では、固相線温度が比較的近いため、発泡条件によっては軟化による表面材にたわみが発生する可能性がある．また、FSP による攪拌・接合およびその後の発泡により、表面材へのコア材料の混入・混合が大きく現れることも考えられる．本研究では、摩擦攪拌法を用いて、アルミニウム合金ダイカスト ADC12 により作製したアルミニウムフォームをコアとし、これとアルミニウムの中では最も高い融点を有する純アルミニウム板材からなるサンドイッチパネルの作製を試みる．この作製では、表面材の形状を保持しつつ、アルミニウムフォームコア部において最適な(気孔率が高く、気孔の円形度が高い)気孔形態を得るための発泡条件に関する検討を行う．また、作製したサンドイッチパネルの引張り試験を実施し、表面材との接合部界面の強度がアルミニウムフォームコア部より高くなることを示す．さらに、表面材を異種のアルミニウム合金板材に変更して、同様の作製法によって、同程度の気孔形態を持つサンドイッチパネルの作製が可能であることを確認する．

2. サンドイッチパネルの作製と気孔形態調査

2.1 サンドイッチパネルの作製法

アルミニウムフォームコアの作製には、板厚 3 mm のアルミニウム合金ダイカスト ADC12 の板材(幅 80 mm×長さ 180 mm)を用いた．これらの板材の内部含有ガス量は $315.6 \text{ cm}^3/100 \text{ gAl}$ であった．なお、このような内部含有ガス量の多い板材を作製する際のダイカスト条件の詳細については文献 14), 17) を参照されたい．また、サンドイッチパネルの表面材として、板厚 1 mm および 3 mm の工業用純アルミニウム A1050 板材(幅 80 mm×長さ 210 mm)を用いた．Fig. 1 に、これらの板材を用いて、摩擦攪拌法によりサンドイッチパネル用プリカーサの作製手順の概略を示す^{15,16)}．Fig. 1 (a), (b) のように、2 枚の ADC12 板材に気孔安定剤を挟み、A1050 板材の上に重ねて FSP を行うことによって、気孔安定剤を ADC12 板材中に攪拌・混合するとともに A1050 板材との接合を行った．気孔安定剤として粒径約 $1 \mu\text{m}$ のアルミナ粉末($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)を用い、それらを FSP 走査を行う範囲(幅方向 20 mm×走査方向 150 mm)に散布した．アルミナ粉末の添加量は、FSP による攪拌体積(幅方向 20 mm×走査方向 150 mm×厚み 6 mm)分のアルミニウム質量に対して 5 mass% とした．FSP には、摩擦攪拌接合装置(SHH204-720, 日立設備エンジニアリング)を用いた．FSP 用のツールは高速度工具鋼 SKH51 で作製し、ショルダ径 17 mm, プローブ径 6 mm, プローブ長さ 4.8 mm のネジ付きである．ツールの前進角は 3° 、ツールの回転速度は、ADC12 では 1000 rpm, 移動速度は 100 mm/min とした．ツールの走査は、Fig. 1 (b), (c) のように、ツールを、気孔安定剤を散布した幅方向の中央位置から 7.5 mm ずらして走査させ(1 パス目)、続いて走査方向に対して直角方向に 5 mm ずつ 3 回ずらして走査させた(2~4 パス目)．これら 1~4 パス目と同一箇所を逆方向からツールを走査させた(5~8 パス)．さらに、9~16 パスとして、ツールを 1~8 パス目と同一箇所

Fig. 1 Schematic illustration of fabrication process of foamable precursor for sandwich panel.

に、同一の方法で走査を繰り返した．これらの走査において、FSP 用ツールの ADC12 板材への押し込み量は 1~12 パスまで徐々に増加させ、13 パス目以降では ADC12 と A1050 板材の接合が確実となるように FSP 用ツールのプローブ先端を 0.2 mm だけ A1050 板材中に押し込むようにした．そして、この 4 列×2 回のマルチパス^{18,19)}により、添加剤がほぼ均一に混合することは確認されている^{11,20)}．FSP 後の積層板から、機械加工により、80 mm×20 mm×1 mm(あるいは 3 mm)の A1050 板材と接合された、20 mm×20 mm×4.5 mm の FSP による ADC12 の攪拌部を持つサンドイッチパネル用プリカーサを切り出した(Fig. 1 (d), (e) 参照)．なお、プリカーサ断面では FSP による空孔等は観察されなかった．

作製した 2 個のプリカーサを、Fig. 1 (f) のように治具内に向かい合わせて設置し、一定温度に保った電気炉(KDF-S80, デンケン)に入れて発泡させた．その後、発泡したプリカーサを炉より取り出し空冷した．発泡の際に用いた保持温度(炉内温度)は 948 K とし、保持時間については、板厚 1 mm の A1050 板材を用いたとき 7~15 分まで 30 秒毎に、板厚 3 mm の A1050 板材を用いたとき 8 分 30 秒~10 分 30 秒まで 30 秒毎に変化させた．なお、保持温度は、A1050 の固相線温度(919 K 程度)や ADC12 のそれ(788 K 程度)より高い値となっている．発泡後、放電加工により、板厚 1 mm の A1050 板材を用いたとき 15 mm×15 mm×12 mm, 板厚 3 mm の A1050 板材を用いたとき 15 mm×15 mm×16 mm のサンドイッチパネル(アルミニウムフォームコア部はいずれも 15 mm×15 mm×10 mm)を切り出した．

2.2 気孔率の評価

サンドイッチパネルのアルミニウムフォームコア部の気孔率 $p(\%)$ は、次式により算出した。

$$p = \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_i} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 ρ_i は発泡前のサンドイッチパネル用プリカーサの攪拌部の密度、 ρ_f は発泡後のサンドイッチパネルのアルミニウムフォームコアの密度である。 ρ_i としては、ADC12 の密度²¹⁾を用いた。また ρ_f は、まず表面材が接合された状態で質量を測定した後、純アルミニウムの密度²²⁾を用いて算出した表面材の質量を減じてアルミニウムフォームコア部の質量を求める。さらに、これらの質量を寸法計測により算出した体積で割ることによって求めた。

2.3 X 線 CT 撮像と気孔径・円形度の評価

サンドイッチパネルのアルミニウムフォームコア内部の気孔形態を評価するためマイクロフォーカス X 線 CT システム (SMX-225CT, 島津製作所) により撮像した。X 線源はタングステンであり、コーン CT を用いている。撮像に用いた X 線管電圧は 80 kV、X 線管電流は 30 μ A とした。画像サイズは 512 $\times$ 512 ピクセルであり、スライスピッチは 1 ピクセルの長さに等しく 50 μ m 程度であった。この X 線 CT 画像に対して適切な閾値を設定し、アルミニウム部と気孔部を区別して二値化画像を求めた。さらに、それらの断面 (二次元) 二値化画像から、気孔の個数および、次式で定義される相当円直径 d および円形度 e ²³⁾ を求めた。また、全気孔に対する平均値を求め平均相当円直径 d_m および平均円形度 e_m をそれぞれ求めた。

$$d = 2 \left(\frac{A}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$e = \frac{4\pi A}{l^2} \quad (3)$$

ここで、 A は断面画像における各気孔の面積、 l は各気孔の面積、気孔の周囲長である。以上の処理は、WinROOF (三谷商事) を用いて行った。ただし、画像の解像度の関係で、0.3 mm² 以下の面積の気孔は無視した。なお、円形度は 1.0 のときに真円となり、1.0 に近づくほど気孔が円形に近いことを表す。

2.4 接合界面近傍のミクロ観察

プリカーサの接合界面 (Fig. 1(d) の攪拌部の FSW 方向に垂直な断面) およびサンドイッチパネルの接合界面を、電子線マイクロアナライザー (EPMA-1610, 島津製作所、以後 EPMA と呼ぶ) により観察した。観察断面はエメリー紙により 2400 番まで研磨後、粒径 1.0 μ m のアルミナ粉末 (α -Al₂O₃) を用いたバフ研磨により仕上げた。観察では、ADC12 中に多く含まれる Si についてマッピング分析を行い、Si の分布画像を取得した。この画像に対して、Si とその他の部分を区別して二値化し面積比を算出した。この処理には、PopImaging (デジタル・ビーイング・キッズ) を用いた。

2.5 引張り試験

引張り試験は、サンドイッチパネルの 2 枚の表面材部に引張り試験用掴み部を接着し、室温において実施した。試験には、負荷容量 98 kN のインストロン型引張り試験機を用い、荷重はクロスヘッド相対速度 1 mm/min で静的に負荷した。

3. 試験結果および考察

3.1 気孔率の変化と表面材の状態

Fig. 2, Fig. 3 に、作製したサンドイッチパネルの例として、それぞれ、保持時間 9 分 30 秒で作製した表面材の厚み 3 mm および保持時間 8 分 30 秒で作製した表面材の厚み 1 mm の場合の外観および側面図を、アルミニウムフォーム部の気孔率 p とともに示す。いずれのサンドイッチパネルにおいても、目視による観察であるが、板厚によらず、表面材には FSP および発泡による大きな変形は現れていなかった。また、アルミニウムフォームコアと表面材の接合状態は、接合界面に割れ等はなく良好であることが確認できた。表面材に大きな変形が現れない要因として以下のことが考えられる。すなわち、発泡の際には、プリカーサは Fig. 1(f) に示すように治具内に向かい合わせて設置しているが、発泡後に A1050 板材を観察すると、板材の一部が治具外に流れ出るようなことは確認されなかった。このことから、プリカーサの温度は計測していないが、保持時間が 7~15 分と比較的短いため、A1050 板材は固相線温度に達しておらず、軟化はするものの溶融はせず板材形状は保持されと考えられ

Fig. 2 Sandwich panel (thickness of face plate: $t=3$ mm, porosity of aluminum foam part: $p=69.2\%$).

Fig. 3 Sandwich panel (thickness of face plate: $t=1$ mm, porosity of aluminum foam part: $p=70.6\%$).

る。また、ポーラスアルミニウムとなる、二つの ADC12 攪拌部は急激に発泡するため膨張・接着し、A1050 板材を治具に押し付けるように作用する。このことも板材の形状保持を補助するものとなっていると考えられる。Fig. 4 は、保持時間 t_H とアルミニウムフォームコア部の気孔率 p の関係を示している。この図より、表面材 1 mm のサンドイッチパネルの気孔率は、保持時間 7 分で 50% 程度であり、その後、保持時間が長くなるにつれて発泡が進むため上昇し、9 分以降では 80% 程度ではほぼ飽和することがわかる。一方、表面材 3 mm のサンドイッチパネルは、表面材 1 mm のものに比べると 80% 程度の気孔率を得るまでの保持時間が長くなっている。これは表面材が厚いためプリカーサの温度上昇が遅くなるためと考えられる。

3.2 接合界面の観察結果

ここでは、Fig. 2(b)に破線で示したように、摩擦攪拌を行った際にツール先端が通った面を接合界面と定義し、界面を原点として ADC12(アルミニウムフォーム)側を正として距離 x を取ることにした(プリカーサについても同様である)。Fig. 5(a), (b)に、それぞれ、プリカーサおよびサンドイッチパネルの接合界面および界面($x=0$)から $x=\pm 2$ mm の距

離における、EPMA 画像のマッピング分析で得られた Si 分布を示す。Fig. 6 に、マッピング分析画像中の Si が占める面積比と接合界面からの距離 x の関係を示す。これらの図より、プリカーサ、サンドイッチパネルいずれにおいても、接合界面を境に Si の分布は A1050(表面材)側では少なく、ADC12 側では多くなっていることがわかる。また、加熱発泡の前後のプリカーサとサンドイッチパネルで Si の面積比およびその分布に大きな差はみられない。ただし、Fig. 5 より、プリカーサの ADC12 側では摩擦攪拌により微細に粉碎されて分布していた Si が、サンドイッチパネルでは加熱後の冷却速度が遅いため針状組織となって析出していることがわかる。以上のことから、表面材である A1050 板中に ADC12 はほとんど侵入していないと判断できる。

3.3 気孔形態の変化

Fig. 7 に、X 線 CT によるアルミニウムフォームコア内部の観察画像の例として、表面材の厚みが 3 mm のサンドイッチパネルの、コア部の気孔率 p が 50% から 80% 程度までの結果を示す。また Fig. 8(a), (b)に、それぞれ、平均相当円直径 d_m とアルミニウムフォームコア部の気孔率 p の関係、

Fig. 4 Relationship between porosity and holding time.

Fig. 6 Relationship between area ratio of Si and distance from bonding boundary x .

Fig. 5 EPMA images of Si in precursor and sandwich panel.

Fig. 7 X ray CT images of sandwich panels (thickness of face plate: $t=3$ mm).

平均円形度 e_m とアルミニウムフォームコア部気孔率 p の関係を示す。Fig. 8 より、気孔径は、気孔率 50% 程度では若干小さく (0.9 mm 程度)、60~70% 程度では 1.0 mm 程度でほぼ一定となるが、それを超えると急激に大きくなることがわかる。一方、円形度は、発泡初期の低い気孔率のとき、Fig. 7(a) ($p=56.2\%$) のように径の小さい扁平な形状の気孔が多く見られるため 0.4~0.6 程度の小さい値となっているが、発泡が進み気孔率が 70% 程度になると 0.8 程度の高い値に達する。その後、円形度は気孔率の上昇とともに若干低下することがわかる。これは、Fig. 7(d) ($p=82.9\%$) のように、気孔の合体が進み、歪んだような形状の気孔が現れるようになったことが原因と考えられる。

3.4 引張り試験結果

Fig. 9 に、サンドイッチパネルの破断状態の例として、表面材の厚み 3 mm、気孔率 $p=69.2\%$ の結果を示す。このように、気孔率に関係なくすべてのサンドイッチパネルにおいて、破断はアルミニウムフォームコア内で起こり、接合界面で剥離等は発生していなかった。したがって、接合界面では強固な接合が行われていることが確認できた。Fig. 10 は、サンドイッチパネルの引張り強度 σ_t と気孔率 p の関係を示す。前述のように、破断はアルミニウムフォームコア内で起こっていることから、すべてアルミニウムフォームコアの引張り強度を示すことになるが、気孔率が高くなるにつれて金属部分の実断面積が少なくなるため低下する傾向を示してい

る。以上のことより、摩擦攪拌法を用いて、ADC12 のフォームをコアとし、表面材に A1050 を持ち、コア部と表面材の接合の強固なサンドイッチパネルの作製可能であることがわかる。

3.5 アルミニウム合金を表面材としたパネル作製

これまでは ADC12 の固相線温度より 130 K 程度高い A1050 を表面材としてサンドイッチパネルの作製が可能であることを示した。しかしながら、今後、表面材は自動車をはじめ運輸機器でよく使用される、より強度の高いアルミニウム合金での作製が望まれることも考えられる。そこで、厚み 3 mm であるが高強度のアルミニウム合金を表面材として用い、A1050 を用いた場合と同様の方法でサンドイッチパネルの作製を試みた。作製に用いた材料はアルミニウム合金 A6061 (固相線温度 855 K 程度) および A5053 (同 847 K 程度) である。Fig. 11 は、保持温度 948 K、保持時間 8 分 30 秒~9 分 30 秒で作製した、各表面材を用いたサンドイッチパネルの外観を示している。このように、コア部の材料 ADC12 の固相線温度より高い固相線温度の材料を表面材とした場合、コア部の気孔率 70% 程度、気孔形態も同程度で、コア部と表面材の接合の強固なサンドイッチパネルの作製が可能であった。今後は、さらに広範囲のアルミニウム合金の表面材とフォームコアを組み合わせのサンドイッチパネル作製へ展開して行きたいと考えている。

(a) average equivalent diameter

(b) average circularity of pores

Fig. 8 Pore structures of aluminum foam parts in sandwich panels.

Fig. 9 Tensile test results of sandwich panel (thickness of face plate: $t=3$ mm, porosity of aluminum foam part: $p=69.2\%$).

Fig. 10 Relationship between tensile strength and porosity.

Fig. 11 Sandwich panels with face plates of A6061 and A5083.

4. 結 言

本研究では、摩擦攪拌法により、ADC12 フォームをコアとし、表面材に A1050 を用いたサンドイッチパネルの作製に関する検討を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 表面材の厚み 3 mm の場合、保持温度 948 K で、保持時間 9 分 30 秒、表面材の厚み 1 mm の場合、保持時間 8 分 30 秒で、表面材に大きな変形や表面材との接合部に割れ等はない、アルミニウムフォーム部の気孔率が 70% 程度のサンドイッチパネルが作製できた。

(2) X 線 CT 画像に基づく観察により、アルミニウムフォーム部の気孔率 70% 程度では、0.8 程度の高い円形度の気孔形態が得られた。

(3) EPMA 画像による Si 分布より、A1050 表面材中に ADC12 はほとんど侵入していないことが確認できた。

(4) アルミニウムフォームコア部の気孔率が 50% から 80% のサンドイッチパネルの引張り試験を行い、破断はすべてアルミニウムフォームコア内で起こり、強固な表面材との結合が得られることを確認した。

(5) A6061 および A5083 板材のように、固相線温度がコアとなる ADC12 より高い表面材であれば、同様の摩擦攪拌法でコア部と表面材の接合の強固なサンドイッチパネルの作製が可能である。

本研究の遂行にあたり、横田武男元芝浦工業大学准教授に

は摩擦攪拌プロセスに関して、齋藤勝男群馬大学大学院工学研究科教授には発泡試験に関して、久米原宏之元群馬大学大学院工学研究科教授には試験結果に対して有益なご助言をいただいた。本研究の一部は、公益財団法人日本軽金属奨学会平成 24 年度教育研究資金、平成 24 年度科学研究費補助金基盤研究 (C) (22560705) および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の助成より行われものである。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) L. J. Gibson: Annu. Rev. Mater. Sci. **30**(2000) 191-227.
- 2) J. Banhart: Prog. Mater. Sci. **46**(2001) 559-632.
- 3) H. Nakajima: Prog. Mater. Sci. **52**(2007) 1091-1173.
- 4) J. Banhart: Int. J. Veh. Des. **37**(2005) 114-125.
- 5) H. W. Seeliger: Adv. Eng. Mater. **6**(2004) 448-451.
- 6) J. Banhart and H. W. Seeliger: Adv. Eng. Mater. **10**(2008) 793-802.
- 7) T. Miyoshi, T. Hamada and H. Kanahashi: Kobe Steel Engineering Reports **57**(2007) 95-100.
- 8) F. Baumgartner, I. Duarte and J. Banhart: Adv. Eng. Mater. **2**(2000) 168-174.
- 9) T. A. Barnes and I. R. Pashby: J. Mater. Process. Technol. **99**(2000) 72-79.
- 10) Y. Kume, Y. Suzumura, M. Kobashi and N. Kanetake: Proc. 2012 Japanese Spring Conference for Technology of Plasticity, (JSTP, 2012) pp. 355-356.
- 11) Y. Hangai, T. Utsunomiya and M. Hasegawa: J. Mater. Proc. Tech. **210**(2010) 288-292.
- 12) Y. Hangai, K. Takahashi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **534**(2012) 716-719.
- 13) Y. Hangai, S. Koyama, M. Hasegawa and T. Utsunomiya: Metall. Mater. Trans. A **41**(2010) 2184-2186.
- 14) Y. Hangai, N. Ishii, S. Koyama, T. Utsunomiya and S. Kitahara: J. Japan Inst. Metals **76**(2012) 349-354.
- 15) Y. Hangai, N. Ishii, S. Koyama, T. Utsunomiya, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Trans. **53**(2012) 584-587.
- 16) T. Utsunomiya, N. Ishii, Y. Hangai, S. Koyama, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Trans. **53**(2012) 1674-1679.
- 17) T. Utsunomiya, K. Takahashi, Y. Hangai and S. Kitahara: Mater. Trans. **52**(2011) 1263-1268.
- 18) Z. Y. Ma: Metall. Mater. Trans. A **39**(2008) 642-658.
- 19) Y. S. Sato, S. H. C. Park, A. Matsunaga, A. Honda and H. Kokawa: J. Mater. Sci. **40**(2005) 637-642.
- 20) Y. Hangai, H. Kato, T. Utsunomiya and S. Kitahara: Metall. Mater. Trans. A **41**(2010) 1883-1886.
- 21) The Japan Inst. Light Metals: *Microstructures and Properties of Aluminum*, (1991) p. 445.
- 22) The Japan Inst. Light Metals: *Microstructures and Properties of Aluminum*, (1991) p. 531.
- 23) H. Seki, S. Sasaki, M. Otsuka and H. Nakajima: J. Japan Inst. Metals **72**(2008) 278-284.