

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560705

 研究課題名（和文） 低環境負荷・低コスト化を目指したポーラスアルミニウム創製と
その耐圧縮能センシング

 研究課題名（英文） Fabrication of Porous Aluminum for Lowering Cost and Reducing
Environmental Load and Sensing Technology of Its Compressive Abilities

研究代表者

宇都宮 登雄（UTSUNOMIYA TAKAO）

芝浦工業大学・SIT 総合研究所・教授

研究者番号：60176708

研究成果の概要（和文）：摩擦攪拌（FSP）技術を利用し、50～85%程度までの広範囲の気孔率を有した高品質なポーラスアルミニウムの作製が可能となった。また、ポーラスアルミニウム内の最大気孔率断面の平均圧縮応力によりプラトー応力の推定が可能となった。さらに、ポーラスアルミニウムの圧潰試験に適用可能な、複数の測定面を持つ薄膜センサを作製した。センサ計測に利用可能な発振回路による測定システムを構築し、内部抵抗の補正計測を行うことにより、計測精度および出力安定性の向上を図ることができた。

研究成果の概要（英文）：Using a friction stir processing (FSP) route, high quality porous aluminum with porosity of approximately 50 - 85% were successfully fabricated. Next, it was shown that when the mean compressive stress on a maximum-porosity cross section reaches the critical value, the plateau stress can be evaluated approximately as the nominal compressive stress. Moreover, a thin film sensor with four measurement planes, which can be applied to the compressive failure test of porous aluminum, was fabricated. A new sensor measurement system using oscillator circuit was developed and, the measurement accuracy and output stability was improved by using simple compensation factor for internal resistance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 構造・機能材料

科研費の分科・細目： インテリジェント・安全・安心材料

キーワード： 構造・機能材料、環境材料

1. 研究開始当初の背景

(1) クールアース 50 国民運動にも見られるように、近年は温室効果ガス CO₂ の排出量削減が強く求められている。

(2) ポーラスアルミニウムは超軽量で比剛性が高く、エネルギー吸収特性や吸音特性に優れた材料で、自動車等の運輸機器など様々な

分野で衝撃吸収材、吸音材、部品軽量化の材料として利用の増大が期待されている。しかしながら現状は、作製プロセスにおける低コスト化が技術的に困難であることが障壁となって実用化には至っていない。

(3) 申請者らが提案した摩擦攪拌（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技術は、競合技術（粉末冶金法）と比較して原材料費 95%削減、生産時間 60%削減が可能で、省エネルギー効果も大きく、ポーラスアルミニウムの低コスト化に寄与する技術として期待されている。

(4) ポーラスアルミニウムの実用化のためには、性能保証のために、圧縮強度特性の把握および劣化・損傷状態を定量的・継続的モニタリングに関連する技術が必要である。

2. 研究の目的

上述の背景を考慮し、本研究の目的をまとめると以下ようになる。

(1) 高気孔率・高品質のポーラスアルミニウムの FSP を利用した作製法を確立する。

(2) ポーラスアルミニウムの圧縮強度を内部の気孔形態の変化と対応付けて評価する方法を検討する。

(3) ポーラスアルミニウムの局所的な損傷状態を把握できる薄膜センサの作製、およびセンサ出力をモニタリングできる発振回路法を用いたセンシング技術を検討する。

3. 研究の方法

(1) FSP を用いた作製法（以下 FSP 法と呼ぶ）において、発泡剤および安定剤を均一に分散させる FSP 条件を検討する。発泡時の保持温度、保持時間の検討を行い、気孔率 50~80% 程度の高品質のポーラスアルミニウムを作製する。

(2) マイクロフォーカス X 線 CT によるポーラスアルミニウムの三次元画像をもとに気孔形態パラメータの評価システムを構築し、気孔径や気孔形状を評価する。

(3) 圧縮試験に使用可能な大型のポーラスアルミニウム、一個体内で気孔率を傾斜的に変化させた（機能性）ポーラスアルミニウム、緻密鋼板とポーラスアルミニウムのサンドイッチ構造材の作製に関する検討を行う。

(4) ポーラスアルミニウムの静的圧縮試験を実施し、プラトー領域における圧潰状態を明らかにする。さらに、ポーラスアルミニウムの初期状態をもとに、圧潰荷重の推定法を導出する。

(5) 圧縮試験における最大荷重を想定し薄膜センサを作製する。薄膜センサの圧縮耐荷重試験を行い、出力の基本特性を求める。

(6) センサ出力のモニタリングに使用できる発振回路の作製を行う。回路の使用に際してセンサ出力に温度/周波数依存性があるため、補償要素を組み込んだ回路を作製し、ひずみ計測試験をもとに測定精度の高精度化を図る。

4. 研究成果

(1) ポーラスアルミニウムの作製

ポーラスアルミニウムの作製には、内部含有ガス量 9.7, 44.9, 195.2 $\text{cm}^3/100\text{g}$ の ADC12 の板材および純アルミニウム A1050 圧延材を用いた。図 1 には、FSP 法により、ADC12

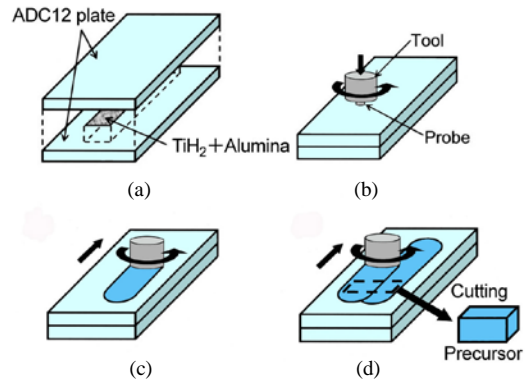


図 1 摩擦攪拌法によるプリカーサ作製手順

および A1050 の板に発泡剤（水素化チタン (TiH_2) 粉末）、安定剤（アルミナ粉末）を攪拌混合させる手順の概略を示す。図 1(a)のように、発泡剤、安定剤を 2 枚の板材に挟み FSP を行った。発泡剤量は、FSP による攪拌体積（幅方向 10 mm×走査方向 110 mm×厚み 5 mm）分のアルミニウム質量に対して、ADC12 では 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.4 mass%, A1050 では 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.6, 1.0, 1.4 mass% とした。アルミナ粉末は 5 mass% で一定とした。ツールの前進角は 3° 、回転速度は、ADC12 では 1000 rpm, A1050 では 2200 rpm, 移動速度は両者とも 100 mm/min である。ツールの走査には、2 列×4 回走査のマルチパス法を用いた。FSP 後の攪拌部より、図 1(d)のように、機械加工によりプリカーサを切り出した。このプリカーサを一定温度に保った電気炉に入れて発泡させ、その後、発泡したポーラスアルミニウムを炉より取り出し空冷した。発泡時の保持温度（炉内温度）は 988 K, 保持時間は 420 s である。

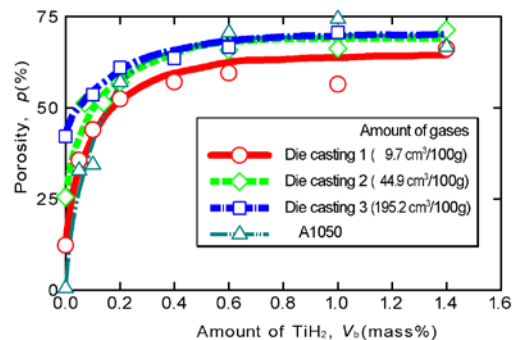


図 2 発泡剤量 V_b と気孔率 p の関係

図 2 に、3 種類の ADC12 および A1050 に対する発泡剤量 V_b と気孔率 p の関係を示す。図 3(a)~(d)は、気孔形態の例として、それぞれ、内部含有ガス量 9.7 $\text{cm}^3/100\text{g}$ の ADC12 における発泡剤量 0, 0.1, 0.6, 1.0 mass% の結果を示している。これらの図より、ADC12, A1050 とともに、発泡剤量が 0~0.6 mass% の範囲で気孔率が顕著に高くなり、気孔率 p が

50%程度以上で良好な気孔形態となることがわかった。

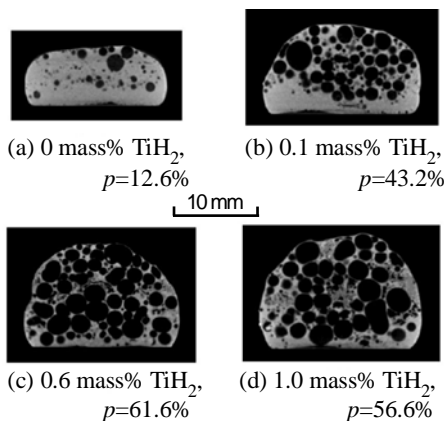


図3 気孔形態 (ADC12, $V_b=9.7 \text{ cm}^3/100\text{g}$)

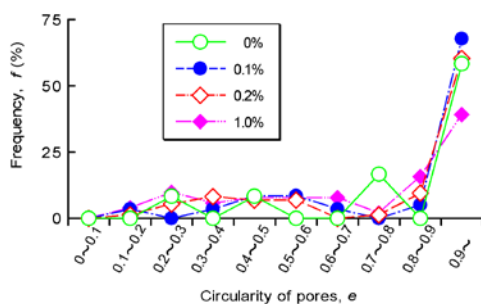


図4 円形度と存在頻度の関係

(2) 気孔形態の評価

ポーラスアルミニウムの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 (島津製作所 SMX-225CT) により撮像した。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、断面画像における気孔面積 A 、次式で定義される相当円直径 d および円形度 e を求めた。また、全気孔に対する平均相当円直径 d_m および平均円形度 e_m をそれぞれ求めた。

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

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

ここで、 l は各気孔の面積、気孔の周囲長である。図4に、気孔形態の評価結果の例として、ADC12 を用いたポーラスアルミニウムの断面における気孔の円形度とその存在頻度の関係を示す。このように気孔面積 A 、相当円直径 d および円形度 e の分布を評価できた。気孔率が 50~85% 程度のポーラスアルミニウムでは、平均相当円直径 d_m は 0.9~2.8 mm 程度、平均円形度 e_m は、気孔率 50% 程度では 0.6 程度で若干小さいが、70% 程度以上では 0.8 程度の高い値に達した。

(3) 種々のポーラスアルミニウムの作製

(1)で行ったポーラスアルミニウムの作製法の検討をもとに、種々のポーラスアルミニウムを作製した。FSP 法において板材の積層枚数と、ツールのパス数を増やすことにより圧縮試験片を作製した。図5は、作製した圧縮試験片の例として、ADC12 を用い発泡剤 1 mass% 添加して作製した一辺 25 mm の正六面体の試験片である。

発泡剤不使用と添加量 1 mass% のプリカーサを PSP 法により別々に作製し、それらを摩擦攪拌接合 (FSW) により接合した後、発泡させることにより機能性ポーラスアルミニウムを作製した。図6(a), (b)は、それぞれ、作製した機能性ポーラスアルミニウムの断面写真と、 x 軸に垂直な断面での気孔率の分布を示す。一個体内で気孔率が異なる2つの領域と境界領域が存在することがわかる。

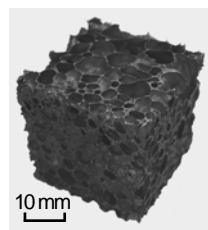
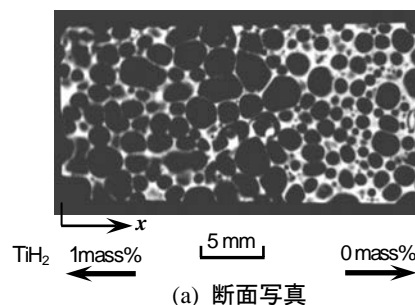
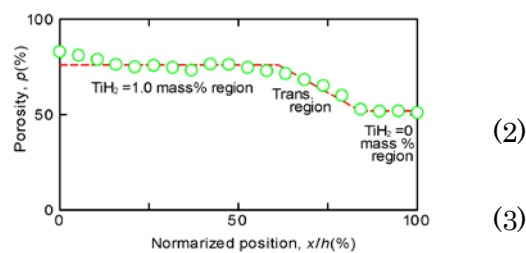


図5 圧縮試験片 (ADC12, $p=88\%$)



(a) 断面写真



(b) 気孔率分布

図6 機能性ポーラスアルミニウム (ADC12)

FSP 法により添加剤を板材に攪拌混合させると同時に緻密鋼板と接合したプリカーサを発泡させ、緻密鋼板とポーラスアルミニウムのサンドイッチパネルを作製した。図7(a)は、作製したサンドイッチパネルの例である。気孔率が 65% 以上であれば、図7(b)のようにポーラスアルミニウム部で引張り破壊し、鋼板との接合が強固であることが確認できた。

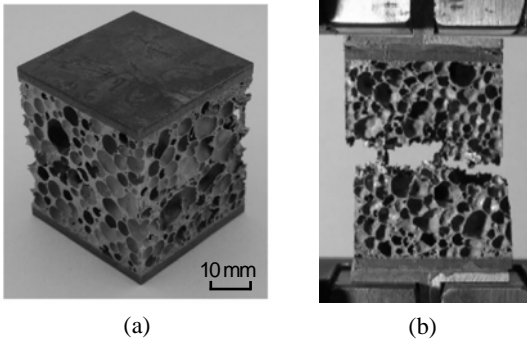
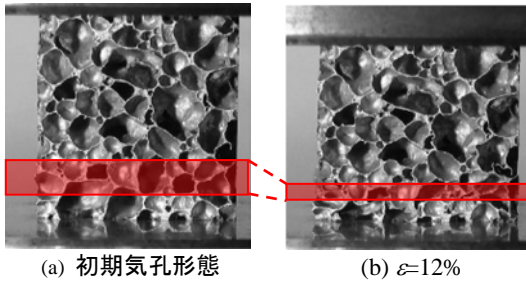
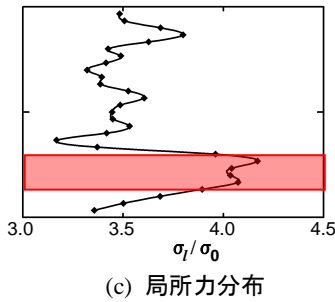


図7 緻密鋼板-ポラスアルミニウムのサンドイッチパネル ($p=83.6\%$)



(a) 初期気孔形態 (b) $\varepsilon=12\%$



(c) 局所力分布

図8 ポラスアルミニウムの圧潰状態

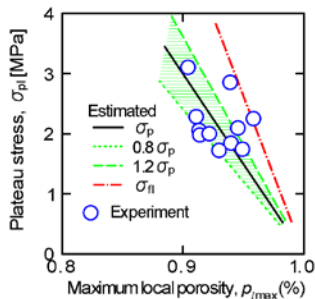


図9 プラトー応力の推定結果 (A1050)

(4) 圧縮試験とプラトー応力の推定

ADC12 および A1050 の試験片を用いて、静的圧縮試験を行った。図 8(a), (b)は、ポラスアルミニウムの圧潰状態の例として、A1050 試験片の結果を示している。このように、プラトー領域での圧潰は薄赤で示した層状領域で発生していることがわかる。そして、この層は、図 8(c)に示すように、試験片の高さ方向に垂直な断面の圧縮真応力 σ_l の最大値 σ_{lmax} を含んでいる。図 9 は、最大応力 σ_{lmax}

が、A1050 の 0.2%耐力 σ_p あるいは流動応力 σ_{fl} に達したときの、公称圧縮応力が圧潰応力 (プラトー応力) σ_{pl} と等しいとして推定した値と実験結果を比較したものである。図のように、プラトー応力の実験値は、ほぼ $\pm 20\%$ の誤差で推定できることがわかった。

(5) 圧潰評価用薄膜センサの作製

ポラスアルミニウムの局所圧潰挙動の検出に対応できるように、図 10 のような、4 面の測定面を持つ静電容量変化型薄膜荷重センサを作製した。本センサは誘電体を電極でサンドウィッチした平行平板型コンデンサであり、フレキシブルプリント基板用生基板を用い、電極形状をパターンニングして作製した。誘電体材料にはガラスエポキシ樹脂 FR-4 (厚み $100 \mu\text{m}$) を、センサ電極には FR-4 表面に貼付されている Cu 薄膜 (表裏共厚み $18 \mu\text{m}$) を利用している。本センサの基本特性を採取するため、静的圧縮荷重による耐荷重試験を実施した。その結果、本センサは 9.8 kN までの耐荷重を有していることが確認できた。さらに、荷重-静電容量変化の特性が把握でき、ポラスアルミニウムの圧潰評価に適用することが可能となった。

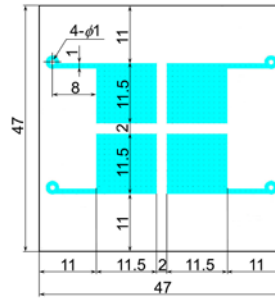


図10 薄膜荷重センサ (4分割測定面)

(6) 発振回路法による計測の高精度化

CMOS インバータ、キャパシタおよびセンサで構成された発振回路を作製した。本回路は、センサ出力 (抵抗) の変化を周波数の変化として検知できる。抵抗としては、回路自身が内部抵抗を有しているため、センサ出力 (抵抗) R_{gauge} の他に内部抵抗 R_{internal} も存在する。このとき、抵抗と周波数の積 A は次式のように表される。

$$(A =) R \times f = A_{\text{const}} - R_{\text{internal}} \times f \quad (3)$$

内部抵抗が存在する場合、ゲージ抵抗 R_{gauge} と周波数 f の積 A は f の一次関数となる。そこで、回路に埋め込んだ3種類の固定抵抗に対する発振周波数の実測値からこの一次関数を最小2乗法で求め、出力の補正を行った。

この補償回路を組み込んだ発振回路を、ひずみ計測試験に用いて、測定精度の検証を行った。試験は、試験片中央部の両面に、発振回路による計測用と通常のブリッジ回路に

よる計測用の汎用ひずみゲージをそれぞれ貼付した。試験は、はじめに、室温において、引張り荷重を負荷して行い、その後、試験片をチャック部ごと 323 K (50 °C) に保持した環境槽内に設置して、同様の試験を行った。

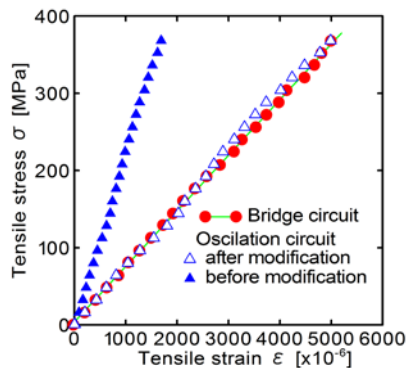


図 11 発振回路によるひずみ計測 (室温)

図 11 に、室温における、発振回路によるひずみ計測値を示す。この図より、発振回路出力の補正を行った値は、ブリッジ回路による計測値と全体的によく一致していることがわかる。図 12 は、323 K (50 °C) のときの、発振回路によるひずみ計測値である。この図より、発振回路出力による値はブリッジ回路による値に近くなっており、試験片温度の影響は小さいことがわかる。以上のことから、今回用いた補正回路の有効性が確認できた。今後は、本発振回路の利点を生かして、小型のひずみセンサの作製を行う予定である。

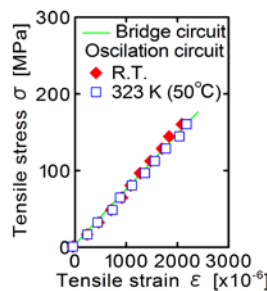


図 12 発振回路によるひずみ計測 (323 K)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 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, 60 巻 (2010), 590-595, 査読有.
- ② T. Utsunomiya, K. Takahashi, Y. Hangai and S. Kitahara, Effects of Amounts of Blowing

Agent and Contained Gases on Porosity and Pore Structure of Porous Aluminum Fabricated from Aluminum Alloy Die Casting by Friction Stir Processing Route, Materials Transactions, Vol. 52 (2011), 1263-1268, 査読有.

③ 宇都宮登雄, 石井伸幸, 半谷禎彦, 小山真司, 長谷川誠, 桑水流理, 吉川暢宏, 摩擦攪拌法によるポーラスアルミニウム/緻密鋼板サンドイッチパネルの作製, 日本機械学会論文集 (A 編), 77 巻 (2011), 1013-1016, 査読有.

④ 宇都宮登雄, 塚田敦海, 半谷禎彦, 金型利用によるポーラスアルミニウム部材の作製, 日本機械学会論文集 (A 編), 77 巻 (2011), 1017-1020, 査読有.

⑤ 半谷禎彦, 山口亮, 高橋俊也, 宇都宮登雄, 桑水流理, 吉川暢宏, X 線 CT 非破壊観察によるポーラスアルミニウムの圧縮過程における気孔圧潰挙動, 日本機械学会論文集 (A 編), 77 巻 (2011), 1025-1027, 査読有.

⑥ 半谷禎彦, 高橋和也, 加藤弘規, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12 ポーラスアルミニウムの気孔分布に対するフラクタル次元による定量的評価, 日本金属学会誌, 75 巻 (2011), 465-467, 査読有.

⑦ Y. Hangai, N. Ishii, S. Koyama, T. Utsunomiya, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa, Fabrication and Tensile Tests of Aluminum Foam Sandwich with Dense Steel Face Sheets by Friction Stir Processing Route, Materials Transactions, Vol. 53 (2012), 584-587, 査読有.

⑧ 宇都宮登雄, 高橋和也, 加藤弘規, 半谷禎彦, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, 気孔率および気孔形態を傾斜的に変化させた ADC12 ポーラスアルミニウムの作製, 軽金属, 62 巻 (2012), 278-284, 査読有.

⑨ Y. Hangai, H. Kato, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa, Effects of Porosity and Pore Structure on Compression Properties of Blowing-Agent-Free Aluminum Foams Fabricated from Aluminum Alloy Die Castings, Materials Transactions, Vol. 53 (2012), 1515-1520, 査読有.

[学会発表] (計 25 件)

① 高橋和也, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12 ポーラスアルミニウムの内部気孔形態に及ぼす発泡剤添加量の影響, 日本鋳造工学会 第157回全国講演大会 (2010年10月3日), 北海道大学.

② 加藤弘規, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12ダイカストを用いた発泡剤不使用ポーラスAlにおける圧縮特性, 日本鋳造工学会 第157回全国講演大会 (2010年10月3日), 北海道大学.

③ 高橋俊也, 山口亮, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 桑水流理, 吉川暢宏, 鋳造法で作製したポーラスアルミニウムの圧縮に伴う気孔形態変化の追跡, 日本鋳造工学会 第157回全国講演

大会 (2010年10月3日), 北海道大学.

④ 塚田敦海, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 金型利用による複雑形状ポーラスアルミニウムの作製, 日本機械学会 第18回機械材料・材料加工技術講演会 (2010年11月27日), 東京大学.

⑤ 石井伸幸, 半谷禎彦, 小山真司, 長谷川誠, 宇都宮登雄, 摩擦攪拌法によるポーラスアルミニウム/緻密鋼板サンドイッチパネルの作製, 日本機械学会 第18回機械材料・材料加工技術講演会 (2010年11月27日), 東京大学.

⑥ 高橋和也, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12ダイカストを用いた高機能ポーラスアルミニウム創製の検討, 軽金属学会 第120回春期大会 (2011年5月22日), 名古屋大学.

⑦ 宇都宮登雄, 大関雄一郎, 半谷禎彦, 桑水流理, 吉川暢宏, 摩擦攪拌接合を用いたADC12/A1050ポーラスアルミニウムの発泡条件, 軽金属学会 第120回春期大会 (2011年5月22日), 名古屋大学.

⑧ 加藤弘規, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, 高橋俊也, ADC12ダイカストを用いた発泡剤不使用ポーラスAIの作製とその圧縮特性, 軽金属学会 第120回春期大会 (2011年5月22日), 名古屋大学.

⑨ 加藤弘規, 半谷禎彦, 高橋俊也, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12ダイカストの内部ガスを利用したポーラスAIの圧縮挙動, 日本鑄造工学会 第158回全国講演大会 (2011年5月28日), 東京工業大学.

⑩ 高橋和也, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12ダイカストを用いた気孔制御による傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製, 日本鑄造工学会 第158回全国講演大会 (2011年5月28日), 東京工業大学.

⑪ 神田淳, 齋藤敦史, 宇都宮登雄, 発振回路法を用いたひずみの測定と出力特性, 日本航空宇宙学会 第53回構造強度に関する講演会 (2011年7月28日), ジョイナス(秋田県民会館付属施設).

⑫ 宇都宮登雄, 高橋和也, 加藤弘規, 半谷禎彦, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, 気孔率・気孔径により機能化したADC12ポーラスアルミニウムの創製と圧縮基本特性, 日本鑄造工学会 第159回全国講演大会 (2011年10月16日), 島根県立産業交流会館(くにびきメッセ).

⑬ 宇都宮登雄, 高橋和也, 半谷禎彦, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12機能性ポーラスアルミニウムの気孔形態と圧縮特性, 軽金属学会 第122回春期大会 (2012年5月19日), 九州大学.

⑭ 神田淳, 齋藤敦史, 宇都宮登雄, 汎用ひずみゲージを適用した発振回路ひずみセンサーの開発, 第54回構造強度に関する講演会 (2012年8月3日), 熊本市国際交流会館.

⑮ 石井伸幸, 半谷禎彦, 小山真司, 宇都宮登

雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏, ADC12ダイカストを用いたADC12ポーラスAコアサンドイッチパネルの作製, 日本鑄造工学会 第161回全国講演大会 (2012年10月13日), 岩手県民情報交流センター「アイーナ」.

⑯ 久保田直之, 半谷禎彦, 齋藤公佑, 宇都宮登雄, 桑水流理, 吉川暢宏, A1050-ADC12傾斜機能ポーラスアルミニウムの衝撃試験による破壊挙動の観察, 日本機械学会 機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012) (2012年12月1日), 大阪工業大学.

⑰ 笠原利行, 高戸谷健, 宇都宮登雄, 光ファイバセンサが埋め込まれたスマートボルトの強度低下に関する検討, 第26回信頼性シンポジウム (2012年12月13日), サンポートホール高松.

⑱ 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, 損傷検出に使用可能な発振回路を用いたひずみ計測センサー, 第26回信頼性シンポジウム (2012年12月13日), サンポートホール高松.

他 7 件

〔図書〕 (計 1 件)

① 中島英雄監修; 著者 40 名共著, マクロおよびナノポーラス金属の開発最前線 (第 1 章 4 摩擦攪拌による発泡金属作製 を担当), シーエムシー出版 (2011 年).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 計測装置及び計測方法

発明者: 神田淳, 佐藤裕, 宇都宮登雄, 齋藤敦史

権利者: 宇宙航空研究開発機構, 芝浦工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-162190

出願年月日: 2011 年 7 月 25 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇都宮 登雄 (UTSUNOMIYA TAKAO)

芝浦工業大学・SIT 総合研究所・教授

研究者番号: 60176978

(2) 研究分担者

半谷 禎彦 (HANGAI YOSHIHIKO)

群馬大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 80361385

齋藤 敦史 (SAITO ATSUSHI)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 30280994

高戸谷 健 (TAKATOYA TAKESHI)

宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・主幹研究員

研究者番号: 40344254