気孔形態を傾斜的に変化させたポーラスアルミニウムの 衝撃圧縮特性

半谷 禎彦*・須藤 俊**・宇都宮 登雄***
川島 久宣*・桑水流 理****・吉川 暢宏*****

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 67, No. 11 (2017), 576-581
© 2017 The Japan Institute of Light Metals

Dynamic compression properties of porous aluminum with functionally graded pore structures

Yoshihiko HANGAI*, Shun SUTO**, Takao UTSUNOMIYA***
Hisanobu KAWASHIMA*, Osamu KUWAZURU**** and Nobuhiro YOSHIKAWA*****

Functionally graded (FG) porous aluminum (Al), consisting of a high porosity layer and low porosity layer in a single porous Al, was fabricated by a friction stir welding (FSW). From X-ray computed tomography (CT) observations of the pore structures of fabricated FG porous Al, it was found that the fabricated FG porous Al had two layers with high porosity of large pore diameter layer and low porosity of small pore diameter layer. From compression tests of the fabricated FG porous Al, the deformation started from the high porosity layer then spread to the low porosity layer. The stress-strain curves obtained in the dynamic compression tests revealed that the stress of the plateau region was lower during the deformation of the high porosity layer than that during the deformation of the low porosity layer. The stresses and absorbed energies in those two plateau regions during such deformations were almost the same as those of the uniform porous Al.

(Received January 29, 2017 Accepted May 29, 2017)

Keywords: foam; functionally graded materials; friction stir welding; X-ray computed tomography; dynamic compression test

1. 緒 言

ポーラスアルミニウム (Al) は、軽量性と高い衝撃吸収性・吸音性を兼ね備えた多機能な素材として、建材や運輸機器部材など多くの分野への適用が期待されている^{1)~3)}。一方、傾斜機能材料は日本で開発され、素材の多機能化を実現できる材料としてすでに多くの実績がある^{4), 5)}。ポーラス Al の傾斜機能化は新たな多機能材料となることが期待され、シミュレーションにより衝撃エネルギー吸収能の向上など、その有効性が示唆されている^{6), 7)}。傾斜機能ポーラス Al 作製の試みは、近年、スパーサー法^{8)~12)}、プリカーサ法¹³⁾、鋳造法¹⁴⁾などで行われてきた。しかしながら、作製に関してはシミュレーションほどには研究が進んでいない。特にその力学特性に関しては、ほとんど調べられていないのが現状であり、傾

斜化していない単一ポーラス Al との関連性については未解明な部分が多い。

著者らはプリカーサ法において、発泡剤を使用するかわりに、Al 合金ダイカストのガス欠陥を発泡源として利用することを試みている¹⁵⁾。ダイカスト中のガス量と作製したポーラス Al の気孔率には相関があることがわかっているが¹⁵⁾、ダイカスト中に含有できるガス量には限りがあるため、発泡剤を使用するものと比べて同じ発泡温度・発泡時間でも、気孔率は低いものとなる。そこで、発泡剤を含有させたプリカーサと発泡剤を含有させずガス欠陥のみが含有しているプリカーサを接合し、一体化したプリカーサを加熱発泡させることで、異なる気孔率部分が共存する傾斜機能ポーラス Al が作製できることを示している。さらに、この傾斜機能ポーラス Al の静的圧縮試験により、気孔率に対応したブ

*群馬大学 理工学府 知能機械創製部門 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1) Division of Mechanical Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Gunma University (1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma 376-8515)

**群馬大学 大学院理工学府 理工学専攻 知能機械創製理工学教育プログラム, 大学院生 (桐生市) Graduate Student, Division of Mechanical Science and Technology, Graduate School of Science and Technology, Gunma University (Kiryu-shi, Gunma)

***芝浦工業大学工学部機械工学科 (江東区) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology (Koto-ku, Tokyo)

****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 (福井市) Department of Nuclear Power & Energy Safety Engineering, Graduate School of Engineering, University of Fukui (Fukui-shi, Fukui)

*****東京大学生産技術研究所 (目黒区) Institute of Industrial Science, The University of Tokyo (Meguro-ku, Tokyo)

ラート応力が現れ傾斜的圧縮特性が実現できることがわかっている^{16), 17)}。また、ダイカスト用Al合金から作製したポーラスAlは、脆性的な圧縮変形挙動を示し、特に静的圧縮試験時よりも衝撃圧縮試験時に顕著に現れることがわかっている¹⁸⁾。

そこで本研究では、ダイカスト用Al合金からなる傾斜機能ポーラスAlの衝撃圧縮試験において、脆性的な変形挙動を示した場合でも傾斜的圧縮特性が実現できるか検討を行う。特に、プラート応力とエネルギー吸収特性について単一ポーラスAlと比較し、傾斜機能ポーラスAlの衝撃圧縮試験時における力学特性の整理を試みる。

2. 実験方法

2.1 傾斜機能ポーラスAl作製方法

ポーラスAlの作製は摩擦攪拌接合を利用した方法^{15)~18)}により行った。Fig. 1に、傾斜機能ポーラスAl作製の概略図を示す。まず、母材となるADC12 (Al-Si-Cu) 合金ダイカスト板材をダイカスト法により作製した。ここで用いたダイカスト板材の作製法の詳細は文献^{18), 19)}をご参照頂きたいが、ガス量を多くするために、金型上部を溶接してエアイベントを無くすとともに、金型やスリーブ内に潤滑剤を塗布した後のエアブローを省略している。

板材の大きさは210mm×80mm×3mmである。このダイカスト板材2枚の間に、増粘剤であるアルミナ (α - Al_2O_3 , 約1 μm , 5mass%) や発泡剤である水素化チタン (TiH_2 , <45 μm , 1mass%) 粉末をはさみ積層させた。Fig. 1(a) のように Al_2O_3 のみを挟む積層板Iと、Fig. 1(f) のように Al_2O_3 と TiH_2 の両方を挟む積層板IIを、それぞれ別々に用意した。次にFig. 1(b), (g) のように、積層板の上から高速回転したツールを走査させることで、摩擦熱で軟化したAlに塑性流動を発生させ、上下のダイカスト板材の接合と同時に、増粘剤や発泡剤をダイカスト板材中に混合した。ツール回転数は1000rpm、ツール走査速度は100mm/min、前進角は3度とし

た。ツールは、工具鋼製でショルダ径17mm、プローブ径5mm、プローブ長さ4.8mmであり、プローブはねじ付きである。走査は、プローブ径分5mmずつずらしながら5列を行い、それを2往復行った。5列ツール走査することで、幅の広い大きなプリカーサを得ることができる。また、2往復走査することで、それぞれの箇所は4回攪拌されることになり、増粘剤や発泡剤粉末を均一に分散させることができる。ツール走査は日立設備エンジニアリング株式会社のFSW装置SHH204-720を用いて行った。

次にFig. 1(c), (h) のように、厚いプリカーサを作製するために、Fig. 1(b), (g) で作製したプリカーサを反転させ、別の1枚のダイカスト板材との間に、増粘剤や発泡剤をはさみ積層させた。次に、Fig. 1(d), (i) のように、積層板の上からFig. 1(b), (g) と同様のツール走査を行った。

このようにして、それぞれ作製した積層板IとIIをFig. 1(e), (j) のように、攪拌した箇所が出揃うように走査方向に切断し、Fig. 1(k), (l) のように、それらの面を突き合わせ摩擦攪拌接合した。接合は粉末の攪拌と同じツールを用い、同じ走査条件で行った。ただし、1列を1往復走査させるのみである。これを両面に対して行った。この摩擦攪拌接合したものから攪拌箇所をFig. 1(l) の四角い点線のように切断し、Fig. 1(m) のように傾斜機能ポーラスAlプリカーサを得た。得られたプリカーサを工具鋼製の金型に設置し、あらかじめ948Kに保った電気炉に金型ごと入れ、14分間保持することで発泡させた。得られた発泡体から放電加工により18mm×18mm、高さ36mmの圧縮試験片を得た。後述の衝撃圧縮試験における圧縮方向は高さ方向である。

また、同様の方法により作製した積層板Iのみ、積層板IIのみを、接合することなくそれぞれ別々に発泡させ、単一ポーラスAlの圧縮試験片を作製した。本研究では、傾斜機能ポーラスAlを3個、積層板Iから作製した低気孔率の単一ポーラスAlを1個、積層板IIから作製した高気孔率の単一ポーラスAlを1個作製して衝撃圧縮試験に供した。

Fig. 1 Schematic illustration of fabricating functionally graded (FG) porous Al.

2.2 気孔形態分布観察方法

得られたすべての傾斜機能ポーラスAl圧縮試験片は、圧縮試験を実施する前にX線CT撮像を行い、内部の気孔形態（気孔率や気孔の大きさの分布）が変化した試験片になっているか確認した。X線CT撮像は、マイクロフォーカスX線CTシステムSMX-225CT（株式会社島津製作所）により行った。X線源はタングステンであり、X線管電圧80kV、X線管電流30 μ Aで行った。得られた画像の1pixelの大きさは80~90 μ m程度であった。

2.3 衝撃圧縮試験方法

得られた傾斜機能ポーラスAlはJIS規格JIS H 7904「ポーラス金属の高速圧縮試験方法」²⁰⁾を参考に、落錘式衝撃試験機Instron Dynatup 9250HVにより衝撃圧縮試験を実施した。約20kgの錘を1mの高さから落下させた。試験片に到達した時の錘の速さは4.4m/sである。荷重はロードセルにより測定し、荷重データのノイズ除去のため4kHzのローパスフィルターをかけた。試験片の変形挙動は高速度カメラPhotron FASTCAM MAX 120Kを用いて撮影速度6000fps、サンプリング時間850 μ sで記録した。

3. 実験結果

3.1 傾斜機能ポーラスAlの気孔形態とその分布

Fig. 2(a)に得られた傾斜機能ポーラスAlの一例を示す。寸法から求めた体積と質量を用いて算出した試験片全体の気孔率 p は $p=81.8\%$ である。上部が発泡剤を添加した高気孔率層、下部が発泡剤を添加していない低気孔率層である。Fig. 3(a), (b)に、それぞれ圧縮試験片下辺からの高さ h (Fig. 2(a) 参照) が18mmおよび8mmにおけるX線CT断層画像を示す。白い部分がセル壁、黒い部分が気孔を示している。このX線CT画像から試験片中部~上部 (Fig. 3(a)) では下部 (Fig. 3(b)) に比べて気孔が大きく、白い部分も少なく気孔率が高いことがわかる。圧縮試験片の気孔形態を定量的に評価するために、得られたX線CT画像から画像処理ソフトWinRoof（三谷商事）を用いて気孔率 p_x や平均気孔径 d_a の分布を算出した。Fig. 2(b)に、その結果を示す。気孔率・平均気孔径ともに、試験片の $h=12$ mm近傍で大きく変化している。このことより、ガス欠陥で発泡可能なダイカストAl合金板材を用いて、発泡剤量を変化させることで気孔形態が変化する傾斜機能ポーラスAlが得られることがわかる。ただし、気孔形態の変化は試験片の中央 ($h=18$ mm) よりも下部で起こっている。プリカーサの段階では、発泡剤を添加したプリカーサと添加していないプリカーサは同じ大きさのものを接合している。しかしながら、発泡剤を添加した部分は添加していない部分よりも発泡力が高いため、境界が中央よりも下部寄りになったと考えられる。今後、傾斜機能ポーラスAlの気孔形態の分布をさらに制御するためには、発泡力なども考慮してプリカーサの大きさを設計することが必要である。

3.2 衝撃圧縮特性

Fig. 4とFig. 5に、それぞれ発泡剤を添加した単一ポーラスAl ($p=83.0\%$) と発泡剤を添加していない単一ポーラスAl ($p=72.9\%$) の衝撃試験における変形挙動を示す。気孔率にかかわらず、ともに圧縮変形により脆性的に崩壊したセル壁が破片となって飛散している。また、Fig. 6(a)にその時の公称応力 σ -ひずみ ϵ 曲線を示す。この図より、圧縮応力 σ

Fig. 2 (a) Compression test specimen of FG porous Al with $p=81.8\%$. (b) Distributions of porosity and average equivalent pore diameter of FG porous Al.

Fig. 3 X-ray CT images of FG porous Al with $p=81.8\%$ of (a) $h=18$ mm (high porosity layer) and (b) $h=8$ mm (low porosity layer).

は、気孔率が高い方が低く現れている。この σ の差には、気孔率の差によるものに加え、セル壁の飛散による影響も含まれていると考えられる。すなわち、脆性的に変形し飛散した箇所は側面の表面部分に限定され、残った内部の大部分のポーラスAlが緻密化まで荷重を支える。気孔率が低い方が気孔径も小さく破片が小さいため、セル壁の飛散は少なく内部に残った部分は大きくなり、圧縮荷重に対する抵抗が大きくなると考えられる。ダイカストから作製したポーラスAlは、同じ気孔率の延性的な純AlポーラスAlと比較しても、 σ が高くなることもわかっている¹⁸⁾。

Fig. 6(b)に、 σ とそのときまでの単位体積当たりの累積エネルギー吸収量 E_v の関係を示す。 σ の低いところでは、高気孔率のポーラスAlの方が多くのエネルギーを吸収でき、低気孔率のポーラスAlの吸収エネルギー量はわずかである。一方、 σ が高くなると、低気孔率のポーラスAlの方が多くのエネルギーを吸収できることがわかる。すなわち、これらを組み合わせることで、応力や吸収エネルギーに関して複数の特性をひとつのポーラスAlで実現できることが期待される。

本研究で得られた3つの傾斜機能ポーラスAlの気孔率は、 $p=80.9\%$, $p=81.8\%$, $p=82.9\%$ であった。Fig. 7(a)~(e)に $p=81.8\%$ の傾斜機能ポーラスAlの衝撃圧縮試験における変形挙動を示す。Fig. 7(a), (b)の白い矢印は、Fig. 2(b)の気孔形態分布を参考に高気孔率層と低気孔率層の境界を示した

Fig. 4 Deformation images for different strains during impact tests of uniform porous Al with $p=83.0\%$.

Fig. 5 Deformation images for different strains during impact tests of uniform porous Al with $p=72.9\%$.

Fig. 6 (a) Stress-strain curves and (b) stress-absorbed energy relationships of uniform porous Al with $p=83.0\%$ and $p=72.9\%$.

ものである。単一ポーラスAlの圧縮変形挙動と同様に脆性的な変形挙動を示しているが、Fig. 7(b), (c)のように変形は白い矢印から上の高気孔率層から始まっている。上部の高気孔率層が変形している間、下部の低気孔率層の変形はほとんど見られない。次にFig. 7(d), (e)のように、上部の変形が終わるとともに、下部の変形が始まる。Fig. 7(f)に、Fig. 7(a)~(e)の変形挙動に対応する σ - ε 曲線を示す。脆性的な変形のため、波打つような σ - ε 曲線となっているが、低 ε 領域における低 σ を示す第一プラトー領域と高 ε 領域における高 σ を示す第二プラトー領域の2つのプラトー領域が現れている。第一プラトー領域は上部の高気孔率層の変形、第二プラトー領域は下部の低気孔率層の変形にほぼ対応している。Fig. 7(f)には、単一ポーラスAlの σ - ε 曲線 (Fig. 6(a))も

あわせて示す。ただし、単一ポーラスAlの σ - ε 曲線の ε は文献^{16), 21)}を参考に補正している。補正方法を、以下に簡単に記す。まず、Fig. 7(a)~(e)に示した圧縮変形挙動から、第一プラトー領域では高気孔率層のみが変形していると仮定する。こうすると、傾斜機能ポーラスAlの実際の ε は変位を高気孔率層の高さで除したものとなり、Fig. 7(f)に示した傾斜機能ポーラスAlの σ - ε 曲線の第一プラトー領域部分は、高 ε 領域まで達し横に広がる。逆に、傾斜機能ポーラスAlの σ - ε 曲線をFig. 7(f)のままに、単一ポーラスAl ($p=83.0\%$)の ε を上述の仮定により補正すると、高気孔率層と低気孔率層の割合はFig. 2(b)の気孔形態分布からほぼ2:1であることから、 ε に約2/3を乗じると、Fig. 7(f)に示した単一ポーラスAl ($p=83.0\%$)のようになる。同様に、第二プラトー領域では低気孔率層のみが変形していると仮定し、単一ポーラスAl ($p=72.9\%$)の ε に約1/3を乗じるとともに、低気孔率層の変形開始時の ε 分 ($\varepsilon=58\%$)をオフセットすると、Fig. 7(f)に示した単一ポーラスAl ($p=72.9\%$)のようになる。これより、傾斜機能ポーラスAlと単一ポーラスAlの比較が容易となり、傾斜機能ポーラスAlのそれぞれの領域で単一ポーラスAlと同程度の σ を示すことがわかる。

Table 1に傾斜機能ポーラスAlの第一と第二のプラトー領域、およびそれぞれの領域の気孔率に対応した単一ポーラスAlのプラトー応力 σ_{pl} を示す。単一ポーラスAlの場合、JIS H 7904²⁰⁾において、 σ_{pl} は σ - ε 曲線における $\varepsilon=20\sim30\%$ 間の σ の平均値と規定されている。本研究のポーラスAlでは脆性的な変形による応力の上下動が大きいため、 ε の範囲を前後10%ずつ広げ、 $\varepsilon=10\sim40\%$ 間の σ の平均値として算出した。なお、かつこ内に従来の $\varepsilon=20\sim30\%$ 間の σ の平均値から求めた σ_{pl} も参考のために示す。傾斜機能ポーラスAlのそれぞれのプラトー領域における σ_{pl} は、文献²¹⁾を参考にして補正した単一ポーラスAlの σ - ε 曲線におけるプラトー領域と ε が一致するように求めた。すなわち、単一ポーラスAlの補正した ε のうち、元々 $\varepsilon=10\sim40\%$ だった補正後の ε を傾斜機能ポーラスAlのプラトー領域の ε と仮定し、その ε 間の σ の平均値として算出した。Table 1より、第一と第二プラトー領域の σ_{pl} は大きく異なっていることがわかる。一方、傾斜機能ポーラ

Fig. 7 (a)–(e) Deformation images for different strains during impact tests of FG porous Al with $p=81.8\%$. (f) Stress–strain curve of FG porous Al along with modified stress–strain curves of uniform porous Al with $p=83.0\%$ and $p=72.9\%$.

Table 1 Plateau stresses of first and second plateau regions of FG porous Al and uniform porous Al.

		FG ($p=80.9\%$)	FG ($p=81.8\%$)	FG ($p=82.9\%$)
σ_{pl} (MPa)	FG (1% layer) (1st plateau region)	3.24 (2.69)	2.56 (2.11)	3.48 (4.03)
	Uniform ($p=83.0\%$)	3.62 (3.47)		
	FG (0% layer) (2nd plateau region)	24.0 (24.3)	21.3 (18.5)	20.0 (19.0)
	Uniform ($p=72.9\%$)	19.4 (18.3)		

Table 2 Energy absorptions of first and second plateau regions of FG porous Al and uniform porous Al.

		FG ($p=80.9\%$)	FG ($p=81.8\%$)	FG ($p=82.9\%$)
E_V^{50} (MJ/m ³)	FG (1% layer) (1st plateau region)	1.15	0.90	1.34
	Uniform ($p=83.0\%$)	1.33	1.33	1.49
	FG (0% layer) (2nd plateau region)	3.76	3.46	2.40
	Uniform ($p=72.9\%$)	3.02	3.05	2.22

ス Al の第一と第二の σ_{pl} は、それぞれ対応する単一ポーラス Al と同程度の σ_{pl} を示すことがわかる。

Table 2 に傾斜機能ポーラス Al の第一と第二プラトー領域、およびそれぞれの領域の気孔率に対応した単一ポーラス Al の吸収エネルギー E_V^{50} を示す。 E_V^{50} は JIS H 7904²⁰⁾ において、 σ - ε 曲線における $\varepsilon=0\sim 50\%$ 間の領域に対する単位体積当たりのエネルギーと定義されている。ただし、**Table 2** では傾斜機能ポーラス Al、単一ポーラス Al とともに、単一ポーラス Al の $\varepsilon=0\sim 50\%$ を補正した後の ε 領域に対して求めた。これより、第一と第二プラトー領域の E_V^{50} も大きく異なっていることがわかる。一方、傾斜機能ポーラス Al の第一と第二のプラトー領域における E_V^{50} は、それぞれ対応する単一ポーラス Al と同程度の E_V^{50} を示すことがわかる。

Fig. 8 に、傾斜機能ポーラス Al と単一ポーラス Al の σ - E_V 関係を示す。この図における単一ポーラス Al の E_V は **Fig. 7(f)** に示す補正後の σ - ε 曲線から算出している。低 σ では、傾斜機能ポーラス Al の E_V ($\equiv$ 第一プラトー領域の E_V) は

単一ポーラス Al ($p=83.0\%$) の E_V とほぼ同様の傾向を示す。それに対し高 σ では、傾斜機能ポーラス Al の E_V ($\equiv$ 第二プラトー領域の E_V) は単一ポーラス Al ($p=72.9\%$) の E_V とほぼ同様の傾向を示し、単一ポーラス Al ($p=83.0\%$) の σ - E_V 関係から解離したものとなっている。以上の結果から、傾斜機能ポーラス Al の衝撃圧縮試験においても傾斜的力学特性が現れることがわかった。

4. 結 言

本研究では、ダイカスト用 Al 合金からなる傾斜機能ポーラス Al の衝撃圧縮試験において、脆性的な変形挙動を示した場合でも傾斜機能化が実現できるか検討を行った。また、傾斜機能ポーラス Al におけるそれぞれのプラトー領域におけるプラトー応力や吸収エネルギーの算出を試み、単一ポーラス Al との比較を行った。以下に得られた結言を示す。

(1) 得られた傾斜機能ポーラス Al の X 線 CT による非破壊観察から、高気孔率層と低気孔率層からなる 2 層構造ポー

Fig. 8 Relationship between compression stress and energy absorption of FG porous Al with $p=80.9\%$ along with modified curves of uniform porous Al with $p=83.0\%$ and $p=72.9\%$.

ラスAlが作製できた。

(2) 得られた傾斜機能ポーラスAlの衝撃圧縮試験では、脆性的な変形挙動が観察されたが、高気孔率層から変形が開始し、その層の変形がある程度進行した後、低気孔率層の変形が開始した。すなわち、脆性的な変形挙動を示した場合でも変形挙動の制御ができることが示唆された。

(3) 変形挙動に対応して、低いプラトー応力を示す第一プラトー領域と高いプラトー応力を示す第二プラトー領域が現れた。また、それぞれの領域におけるプラトー応力や吸収エネルギーは、それぞれの層の気孔率に対応した単体ポーラスAlのプラトー応力や吸収エネルギーとほぼ同様の値を示した。すなわち、気孔率が変化する傾斜機能ポーラスAlにより、傾斜的圧縮特性が実現できることが示唆された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、衝撃試験に関してJAXA宇宙航空研究開発機構の高戸谷健氏にご協力を頂きました。本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構（JST）知的財産戦略センターの重要知財集約活用制度スーパーハイウェイ

2015および公益財団法人軽金属奨学会の教育研究資金の助成のもと行われた。ここに厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) J. Banhart and H. W. Seeliger: *Adv. Eng. Mater.*, **14** (2012), 1082–1087.
- 2) 金武直幸, 小橋 眞: *軽金属*, **62** (2012), 122–134.
- 3) F. Garcia-Moreno: *Materials*, **9** (2016), 85.
- 4) Y. Miyamoto, W. A. Kaysser, B. H. Rabin, A. Kawasaki and R. G. Ford: *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications* Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA (US), (1999).
- 5) 日刊工業新聞社: *工業材料*, **63** (2015), 17–69.
- 6) X. Zhang and H. Zhang: *Int. J. Mech. Sci.*, **68** (2013), 199–211.
- 7) M. S. Attia, S. A. Meguid and H. Nouraei: *Finite Elem. Anal. Des.*, **61** (2012), 50–59.
- 8) A. Pollien, Y. Conde, L. Pambaguian and A. Mortensen: *Mater. Sci. Eng. A*, **404** (2005), 9–18.
- 9) A. H. Brothers and D. C. Dunand: *Adv. Eng. Mater.*, **8** (2006), 805–809.
- 10) A. Hassani, A. Habibolahzadeh and H. Bafti: *Mater. Des.*, **40** (2012), 510–515.
- 11) Y. Hangai, T. Morita, S. Koyama, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: *J. Mater. Eng. Perform.*, **25** (2016), 3691–3696.
- 12) 半谷禎彦, 石原綾乃, 宇都宮登雄, 桑水流理, 吉川暢宏: *日本金属学会誌*, **80** (2016), 390–393.
- 13) R. Suzuki and K. Kitazono: *J. Japan Inst. Met.*, **72** (2008), 758–762.
- 14) S.-Y. He, Y. Zhang, G. Dai and J.-Q. Jiang: *Mater. Sci. Eng. A*, **618** (2014), 496–499.
- 15) 半谷禎彦, 加藤弘規, 宇都宮登雄, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏: *日本金属学会誌*, **74** (2010), 592–597.
- 16) Y. Hangai, K. Takahashi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: *Mater. Sci. Eng. A*, **534** (2012), 716–719.
- 17) Y. Hangai, K. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: *Mater. Sci. Eng. A*, **556** (2012), 678–684.
- 18) 宇都宮登雄, 久保田直之, 半谷禎彦, 石間経章, 川島久宜, 桑水流理, 吉川暢宏: *鑄造工学*, **86** (2014), 840–845.
- 19) Y. Hangai, H. Kamada, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: *J. Mater. Process. Technol.*, **214** (2014), 1928–1934.
- 20) 日本工業規格: JIS H 7904 ポーラス金属の高速圧縮試験方法, 日本工業標準調査会, (2012).
- 21) Y. Hangai, K. Saito, T. Utsunomiya, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: *Mater. Sci. Eng. A*, **613** (2014), 163–170.