ポーラスアルミニウムの圧縮特性に及ぼす 合金組成およびスキン層の影響

久米 裕二*・磯村 圭祐**・小橋 眞*・金武 直幸*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 63, No. 12 (2013), 446–451

© 2013 The Japan Institute of Light Metals

Effects of chemical composition and skin layer on compression properties of porous aluminum

Yuji KUME*, Keisuke ISOMURA**, Makoto KOBASHI* and Naoyuki KANETAKE*

Porous aluminum alloys prepared by a precursor method inherently develop a thin solid layer, also known as the skin layer, on their surface. Formation of a skin layer is a characteristic feature of the precursor method, and it affects certain compressive properties of the alloy. Furthermore, investigating the effect of changes in the aluminum alloy composition on the compressive properties is important. In this study, the effects of the skin layer on several compressive properties were investigated for two different porous aluminum alloys developed by the precursor method: AA6061 and Al-7mass% Si. The plateau stress and energy absorption of both alloys increased with increasing bulk density, irrespective of whether the skin layer was present or not. In the case of the porous AA6061 alloy, the skin layer did not affect the plateau stress; however, the plateau strain increased under large deformation because the skin layer peeled off under relatively small deformations in the compression test, causing a decrease in the relative density of the specimen. In the case of the Al-7%Si alloy, the skin layer affected stress oscillation and the plateau stress became unstable. Peeling of the skin layer also increased the plateau strain, resulting in increased energy absorption.

(Received June 26, 2013 Accepted August 20, 2013)

Keywords: porous aluminum, compression properties, skin layer

1. 緒 言

ポーラスアルミニウムは、その内部に多数の気孔を持つ多孔質構造材料であり、水に浮くほどの軽量で、衝撃吸収性に富み、吸音性や制震性が高いといった非常にユニークな特徴を持っている^{1)~5)}。このポーラスアルミニウムについては国内外で活発に研究が行われており、その作製方法としては溶湯法^{6),7)}とプリカーサ法(粉末冶金法)^{8)~11)}がある。溶湯法は一般的に大型の試料を作製し、所定のサイズに切出して用いるため、その材料表面は気孔がむき出した状態で用いることとなる。一方、プリカーサ法では、所定の型内にてプリカーサを発泡させるため、その表面はスキン層と呼ぶ薄くて緻密な層に覆われており、表面の気孔が覆われたままで用いることが多い。ポーラス材料の機械的特性には、合金組成や、かさ密度(または気孔率)、気孔径などが影響を及ぼすことがわかっているが、スキン層によっても機械的特性が変化¹²⁾するためこれらの系統的な検討が必要である。ここでポーラス材料の圧縮特性についての研究として、ポーラス金属の変形特性評価試験方法に関する標準化調査¹³⁾では、試

料サイズや気孔径、かさ密度などが圧縮特性に及ぼす影響について検討されている。また、Banhartら¹²⁾の研究では、プリカーサ法によりAl-6mass%Si-4mass%Cu合金のポーラスアルミニウムを作製し、圧縮方向に対して平行または垂直の2面がスキン層に覆われた試料の応力-ひずみ曲線やプラトー応力の変化、発泡させた方向と圧縮方向がプラトー応力に及ぼす影響を検討している。著者らはプリカーサ法を用いたポーラス材料の開発^{9)~11)}を行っており、発泡挙動や気孔性状について検討を行ってきたが、圧縮特性については詳細に検討できていなかった。ここで、プリカーサ法ではネットシェイプで試料が作製されるため、圧縮方向に対して平行な4面がスキン層で覆われた状態での圧縮試験が重要であると考えられる。また、ポーラス金属の圧縮特性では、プラトー応力以外にも初期最大圧縮応力、エネルギー吸収量などが規定¹⁴⁾されており、合金組成やスキン層の有無がこれらに及ぼす影響についても検討が必要である。

そこで本研究では、プリカーサ法によって6061合金およびAl-7mass%Si合金の2種類のポーラスアルミニウムを作製し、合金組成およびスキン層の有無が各種圧縮特性に及ぼす

*名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)。Graduate School of Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8601). E-mail: kume@numse.nagoya-u.ac.jp

**名古屋大学大学院工学研究科大学院生(名古屋市)〔現在:トヨタ自動車(株)〕。Graduate Student, Graduate School of Engineering, Nagoya University (Nagoya-shi, Aichi) [Present: Toyota Motor Corporation].

影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

ポーラスアルミニウムの作製には、日本軽金属株式会社により作製された板状（幅32mm，厚さ2mm）の粉末押出プリカーサを用いた。粉末の合金組成は6061合金およびAl-7mass%Si合金を用いており，発泡助剤にはTiH₂（0.5mass%）を使用した。発泡用の型として，内形寸法が35角，長さ230mmの角筒黒鉛型を用いた。長さ198mmに切断した4枚の板状プリカーサを口の字状に組んで黒鉛型に挿入した後に，型の開口部には黒鉛の蓋をした。なお，高密度のポーラスアルミニウムの作製には，黒鉛型内に充填するプリカーサを1枚追加した。発泡条件は，6061合金の場合は1000°Cに保持した電気炉の中に入れ，試料温度が650°C付近になったら黒鉛型を取出し，送風機による強制空冷を行った。また，Al-7Si合金の場合は，赤外線イメージ炉を用いて室温から1°C/sの速度で加熱し，550°Cで3分間保持した後に再び加熱し，試料温度が615°Cになったときに加熱を止め，炉から取出して強制空冷を行った。作製した棒状のポーラスアルミニウムは長さ50mmに切出して35×35×50mmの圧縮試験片とした。スキン層の有無を検討するために，同様に作製した試料から切削加工によりスキン層を除去した。なお，いずれの試料も圧縮面のスキン層は除去している。

6061合金はスキン層がない場合，かさ密度で393kg/m³から614kg/m³（気孔率で77.3%から85.5%）であり，スキン層がある場合はかさ密度で492kg/m³から705kg/m³（気孔率で73.9%から81.8%）であった。Al-7Si合金の場合，スキン層がない場合，かさ密度で312kg/m³から513kg/m³（気孔率で80.6%から88.4%）であり，スキン層がある場合はかさ密度で480kg/m³から617kg/m³（気孔率で77.2%から82.2%）であった。

画像解析により平均気孔径を求めたところ，いずれも2～3mmであった。またスキン層厚さと，圧縮面に占めるスキン層の割合を求めたところ，6061合金では厚さが0.7mm前後で面積割合が7%程度，Al-7Si合金は0.9mm前後の厚さで10%程度の面積割合であった。

2.2 圧縮試験方法

圧縮試験はポーラス金属の圧縮試験方法¹⁴⁾に従い行った。試験温度は室温，初期ひずみ速度は $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ とし，無潤滑で行った。圧縮応力-ひずみ曲線より初期最大圧縮応力，プラトー応力（20～30%ひずみでの平均応力），50%ひずみまでのエネルギー吸収量を評価した。また，ドイツのセル材料の圧縮試験方法¹⁵⁾に規定されている緻密化ひずみ（プラトー応力の1.3倍の応力値に達したときのひずみ）と緻密化ひずみまでのエネルギー吸収量も併せて評価した。

3. 結果と考察

3.1 圧縮試験時の外観変化

Fig. 1およびFig. 2は，6061アルミニウム合金およびAl-7Si合金の圧縮時の外観を示す。

6061合金（Fig. 1）でスキン層がない試料では，セル壁の大きな崩れや，水平方向に大きく広がることなく，圧縮方向に気孔が緻密化されていった。一方，スキン層がある試料は，

Fig. 1 Appearance of compression behavior on porous 6061 aluminum alloy with and without skin layer.

Fig. 2 Appearance of compression behavior on porous Al-7Si alloy with and without skin layer.

変形初期にスキン層にしわが生じ，亀裂が入った。そして，変形の進行とともにスキン層が剥離する様子が観察される。

Al-7Si合金（Fig. 2）の場合，スキン層がない試料では，セル壁が若干崩れ落ちる様子が観察されるが，6061合金と同様に圧縮されていく。一方，スキン層がある試料は，6061合金の試料よりも早い段階でスキン層が崩れ始め，剥離が観察された。

3.2 圧縮応力-ひずみ曲線

Fig. 3，Fig. 4は6061合金およびAl-7Si合金のスキン層の有

Fig. 3 Stress-strain curve of porous 6061 aluminum alloy with various density. (a) Without skin, (b) with skin.

Fig. 4 Stress-strain curve of porous Al-7Si alloy with various density. (a) Without skin, (b) with skin.

Fig. 5 Comparison of stress-strain curve of same density material with or without skin layer, (a) 6061 aluminum alloy, (b) Al-7Si alloy.

無および密度を変化させたときの圧縮応力-ひずみ曲線を示す。スキン層の有無や合金組成にかかわらず、密度が大きくなると初期最大圧縮応力とプラトー応力が高くなり、緻密化が早くなっている。これら密度変化に伴う挙動は、一般的なポーラス金属と同様である。スキン層の有無の違いについて比較すると、6061合金 (Fig. 3) の場合、スキン層がない試料ではひずみが大きくなるとプラトー応力が緩やかに上昇し、ひずみで60~80%付近の緻密化に伴う応力上昇も比較

的緩やかである。一方、スキン層がある試料では、ひずみが50%ぐらいまでのプラトー領域で、応力が若干上下変動するのと、緻密化に伴う応力上昇がスキン層がない場合と比較して鋭く立ち上がる傾向が観察される。Al-7Si合金 (Fig. 4) の場合、スキン層がない試料においても緻密化後の応力上昇が急であるのと、スキン層がある試料の低密度材ではプラトー領域で応力が大きく低下し、応力が一定とならない不安定な挙動を示している。

Fig. 6 Initial peak stress of porous 6061 aluminum and Al-7Si alloy with or without skin as a function of bulk density.

Fig. 5は、6061合金およびAl-7Si合金で、同密度であるがスキン層のある場合とない場合の試料の応力-ひずみ曲線を示す。なお、6061合金については、初期密度 500kg/m^3 程度の試料からスキン層を除去した場合（除去後の密度は 403kg/m^3 ）の結果も併せて示す。そして、Al-7Si合金でも同様の観点から、スキン層の除去前の密度が比較的近かった試料（除去後の密度は 479kg/m^3 ）の結果を併せて示す。6061合金の場合、密度が同じであればスキン層の有無によってプラトー応力に変化はない。しかし、前述のようにスキン層がない場合は圧縮に伴い応力が徐々に上昇していくのに対し、スキン層がある場合はゆるやかな応力上昇はなく、一定の値を保った後に急激に応力が高くなっており、緻密化挙動が遅れていることがわかる。このような緻密化の遅れは、Banhartら¹²⁾の報告と同様であった。同じ密度の試料からスキン層を除去した場合の試料の応力-ひずみ曲線と比較すると、プラトー領域の応力は異なるが、ひずみで60%以降の緻密化曲線が一致している。Al-7Si合金の場合、スキン層があると初期最大圧縮応力が高くなるが、プラトー応力が低くなり、緻密化も遅れる。また、6061合金と同様に、スキン層除去前の密度が似ていれば、ひずみが60%以降の曲線がほぼ一致している。

応力-ひずみ曲線から見た場合、スキン層が初期最大圧縮応力やプラトー応力に及ぼす影響は合金組成によって異なっているが、緻密化を遅くする効果は、合金組成によらないと言える。

3.3 各種圧縮特性

以下、応力-ひずみ曲線より求めた各種特性について検討を行う。

Fig. 6は密度に対する初期最大圧縮応力を示す。初期最大圧縮応力は密度が大きくなると高くなるが、スキン層の有無によってその傾向が大きく変わることはなかった。合金組成については、同密度でも6061合金の方が初期最大圧縮応力は高くなる。しかし、プロット点より引いた近似直線の傾きは、Al-7Si合金の方が急であり、密度の変化に対し敏感である。

Fig. 7は密度に対するプラトー応力を示す。プラトー応力も初期最大応力と同様に、密度が高くなると応力も高くな

Fig. 7 Plateau stress of porous 6061 aluminum and Al-7Si alloy with or without skin as a function of bulk density.

Fig. 8 Beginning strain for densification of porous 6061 aluminum and Al-7Si alloy with or without skin as a function of bulk density.

る。6061合金の場合、一つの近似直線上にすべての結果がプロットでき、スキン層の有無がプラトー応力にはほとんど影響を与えていないと考えられる。しかし、Al-7Si合金ではスキン層の有無によって近似直線の傾きが異なり、スキン層があると直線の傾きが急になる。

Fig. 8は、密度に対する緻密化ひずみを示す。プラトー応力の1.3倍となったときの緻密化ひずみで評価した場合、スキン層の有無や合金組成にかかわらず、密度が低くなると緻密化ひずみが大きくなる傾向が伺えるが、ばらつきも大きい。6061合金の場合は、スキン層がないと50%付近で緻密化となっているのに対し、スキン層があると60%前後となり、初期の密度が高いにもかかわらず緻密化ひずみが2割程度大きくなる。Al-7Si合金の場合、密度が高くてもスキン層があると60%以上の緻密化ひずみとなるが、スキン層がなく低密度の場合も60%程度まで大きくなっている。

Fig. 9, Fig. 10は、50%ひずみまで、および、緻密化ひずみまでの吸収エネルギーを示す。50%までの吸収エネルギー（**Fig. 9**）は、スキン層の有無および合金組成にかかわらず、密度が大きくなるほど吸収エネルギーが大きくなって

Fig. 9 Specific energy absorption by 50% strain of porous 6061 aluminum and Al-7Si alloy with or without skin as a function of bulk density.

Fig. 10 Specific energy absorption by densification of porous 6061 aluminum and Al-7Si alloy with or without skin as a function of bulk density.

いる。6061 合金の場合、スキン層の有無にかかわらず同一の近似直線上にプロットできるが、Al-7Si 合金の場合、スキン層の有無によって傾向が異なり、スキン層がある方が近似直線の傾きが急である。緻密化開始ひずみまでの吸収エネルギー (Fig. 10) の場合、50% までの吸収エネルギーと密度に対する傾向は変わらないが、スキン層がある試料の吸収エネルギーが、緻密化ひずみが大きくなった分だけ増加している。

以上を踏まえ、スキン層の有無および合金組成の影響について考察を行う。まず、今回用いたポーラスアルミニウムは加熱、発泡させたままで用いており、熱処理は行っていない。そのため、いずれの合金も铸造まま材の状態であり、6061 合金は比較的延性が高く、Al-7Si 合金は延性が低いと考えている。そして、セル壁の延性が圧縮時の気孔の圧密化に影響を及ぼしている。気孔の圧密化はセル壁の座屈または曲げによって起こるが、延性が高いと圧密時にセル壁の崩壊はない

が、延性が低いとセル壁が崩れてしまう。よって、スキン層の有無にかかわらず、延性の高い材料を圧縮すると、セル壁の加工硬化や圧密による密度上昇が緩やかに進むため、プラトー領域の応力が徐々に上昇し、緻密化時の応力上昇もプラトーからなだらかにつながっていく。一方、延性の低い材料の場合は、セル壁の崩壊が起こるため、セル壁の加工硬化やゆるやかな密度上昇も起きにくく、プラトー領域での応力上昇はほとんどなく、緻密化後に急激に応力が上昇する。

そして、スキン層がある場合は、スキン層自体の変形と、スキン層内部（ポーラス部）の変形挙動が異なることを併せて考える必要がある。スキン層は、気孔の外表面を覆っているものの、その厚さも 1 mm 以下で、セル壁と大きくかわらないため、スキン層と垂直（たて方向）に圧縮を行った場合は、特に強化相としては機能しない。しかし、変形が進むと、スキン層は薄い金属板が長手方向に圧縮される状態となるため、圧縮軸と垂直な方向に広がるように変形する。一方、スキン層内部は圧縮方向に収縮するのみであり、垂直方向に膨張しない。このため、スキン層とその内部に引張が生じると考えられる。圧縮中のスキン層の剥離はこの引張によって起きるが、延性が高いと圧縮がある程度まで進んでもセル壁が伸びるためスキン層の剥離が生じにくい。延性が低いと初期段階でセル壁が破断し、大きな剥離が生じる。そして、スキン層が剥離したポーラスアルミニウムは、かさ密度の低下が起こり、スキン層を有した初期の密度ではなく、スキン層を除去した場合の密度と等しくなるため、緻密化ひずみが大きくなると考えられる。

以上が合金組成とスキン層の影響についての定性的な考えであるが、セル壁の延性に関して定量的な評価ができていないため不明な点も多い。また、今回の試験はスキン層に対して垂直に圧縮負荷を加えた結果であり、引張や曲げなどの負荷条件では別の結果を得る可能性がある。特に、ポーラスアルミニウムは、引張の応力に対して弱いためスキン層が効果的に働く可能性もあり、今後の検討課題である。

4. 結 言

6061 合金および Al-7mass%Si 合金のポーラス材料を作製し、圧縮試験によって合金組成やスキン層の有無が各種圧縮特性に及ぼす影響について検討を行った結果、以下のことがわかった。

(1) ポーラスアルミニウムの応力-ひずみ曲線は、合金組成やスキン層の有無によって変化するが、これらの変化よりも密度変化の影響の方が大きく、密度の上昇に伴って初期最大応力、プラトー応力が上昇し、緻密化開始ひずみが小さくなる。

(2) 6061 アルミニウム合金で密度が同じ場合、スキン層の有無はプラトー応力には影響しないが、圧縮の進行とともにスキン層が剥離するため、緻密化開始ひずみを大きくする。また、その緻密化開始ひずみは、スキン層を除去した場合の試料と同じであった。

(3) Al-7Si 合金で密度が同じ場合、スキン層はプラトー応力を不安定化させ、緻密化開始ひずみを大きくする。

(4) 初期最大圧縮応力は、スキン層の有無にかかわらず、密度で整理でき、合金組成が異なると近似曲線の傾きが異なる。

(5) プラトー応力は、6061合金ではスキン層の有無によらず同一の近似曲線上にプロットできるが、Al-7Si合金ではスキン層の有無により近似曲線の傾きが異なり、スキン層があると傾きが急になる。

(6) 緻密化開始ひずみは、密度が低くなると大きくなる傾向が伺えるが、ばらつきも大きい。

(7) 吸収エネルギーの変化は、プラトー応力と同様の傾向であった。また、吸収エネルギーを求めるひずみを変化させても、その傾向は大きく変わらない。

(8) スキン層は、プラトー応力をあまり変化させることなく緻密化開始ひずみを大きくするため、緻密化までのエネルギー吸収量の向上が期待できる。

謝 辞

本研究に使用したプリカーサは、日本軽金属株式会社ならびに日軽金アクト株式会社にご提供頂いただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. Banhart: Adv. Eng. Mater., **8** (2006), 781–794.
- 2) J. Baumeister, J. Banhart and M. Weber: J. Mater. Design, **18** (1997), 217–220.
- 3) H. N. G. Wadley: Adv. Eng. Mater., **4** (2002), 726–733.
- 4) S. Ramachandra, P. S. Kumar and U. Ramamurty: Scr. Mater., **49** (2003), 741–745.
- 5) 金武直幸, 小橋 眞: 軽金属, **62** (2012), 112–134.
- 6) 三好鉄二: 鑄造工学, **74** (2002), 835–839.
- 7) 濱田 猛, 西 誠治, 三好鉄二, 金武直幸: 日本金属学会誌, **72** (2008), 825–831.
- 8) F. Baumgartner, I. Duarte and J. Banhart: Adv. Eng. Mater., **2** (2002), 168–174.
- 9) 小橋 眞, 棚橋伸也, 金武直幸: 軽金属, **53** (2003), 427–432.
- 10) M. Kobashi, R. Sato and N. Kanetake: Mater. Trans., **47** (2006), 2178–2182.
- 11) E. Mizutani, M. Kobashi and N. Kanetake: Adv. Mater. Res., **26** (2007), 909–912.
- 12) J. Banhart and J. Baumeister: J. Mater. Sci., **33** (1998), 1431–1440.
- 13) ニューマテリアルセンター: ポーラス金属の高速変形特性評価試験方法の標準化調査研究成果報告書 (NEDO委託事業), (2008).
- 14) 日本規格協会: ポーラス金属の圧縮試験方法, JIS H7902, (2008).
- 15) ドイツ規格協会: Compression Test of Metallic Cellular Materials, DIN 50134, (2008).