板状ポーラスアルミニウムの発泡特性と気孔性状に及ぼす 板厚拘束の影響

小橋 眞*・坂本 憲昭**・金武 直幸*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 59, No. 1 (2008), pp. 7-12

Effect of die cavity constraint on foaming behavior and pore morphology of sheet type porous aluminum

Makoto KOBASHI*, Noriaki SAKAMOTO** and Naoyuki KANETAKE*

Foaming behavior of 6061 aluminum sheet-type precursor by free foaming or by foaming in die cavity was examined. Projected area of the precursor during foaming process was recorded by two video cameras to analyze the foaming behavior of both vertical (thickness) and horizontal (in-plane) directions. The free foaming behavior of sheet type precursor was extremely unidirectional along the compressed direction of precursor. The specimen expanded only along the vertical direction, and did not expand along the horizontal direction of the sheet type precursor, while pore morphology in the aluminum foam was quite isotropic. Two separate parallel plates were used to investigate the effect of die constraint. The precursor expanded along the in-plane direction when foamed in between the parallel plates. The porosity was not significantly affected by the constraint. The isotropic pore morphology was maintained after foamed in the parallel plates. The mean size of the pores decreased by decreasing the die spacing.

(Received May 26, 2008 Accepted August 14, 2008)

Keywords: porous aluminum, sheet type precursor, foaming behavior, free foaming, die foaming

1. 緒 言

溶融または半溶融状態の金属に多量のガスを導入して作製されるクローズドセル型ポーラス金属（またはメタルフォーム）は、緻密材料と比較して、超低比重、高比剛性、高制振性、吸音性、断熱性、電磁波吸収性などの特徴を有する^{1)~4)}。また、力学特性においては、幅広いひずみ範囲で圧縮変形応力が一定値となるプラトー応力領域を示すなど⁵⁾、ユニークな特徴を有している。また、ポーラス金属は、その特性を、セル構造制御（気孔形状、形状異方性、気孔サイズ、気孔率、それらの分布など）によりコントロールできるという点も大きな魅力であり^{6),7)}、合金設計による材質制御とは異なった概念となる形態的因子により特性を制御するという新しい可能性を有している。ポーラス金属の中でも、ポーラスアルミニウムは、非常に軽量な材料であり、例えば気孔率が65%程度以上であれば、比重は1.0未満となり水に浮く軽さである。このようなポーラスアルミニウムは、パイプなどの中空部材へ充填することにより、曲げ剛性が向上し、構造物の軽量化に有効であることが知られている。そこで、車両重量の軽減による温暖化ガスの排出量削減などの観点から、近年、その研究開発が非常に盛んになっている材料である^{8),9)}。また、衝撃エネルギー吸収量が大きいことから、輸送機器にお

けるクラッシュエレメントへの適用などが検討されている¹⁰⁾。ポーラスアルミニウムの製造方法は、種々提案されているが、筆者等は、これまでに、発泡助剤として水素化チタン (TiH_2) 粉末をアルミニウム粉末、または切削屑と混合した後に、固化成形したプリカーサを加熱発泡させ、ポーラスアルミニウムを製造するプリカーサ法について研究を行ってきた。主に円柱形状や直方体形状などのバルク形状のプリカーサを用いた研究を通じて、プリカーサの成形条件や加熱条件が、発泡特性（プリカーサの膨張の量、速度や異方性）や気孔性状（気孔の大きさや形状）に及ぼす影響について報告した^{11)~13)}。一方、板状ポーラスアルミニウムをコア材として、それを二枚の薄板で挟んだサンドイッチ構造体は、同重量のアルミニウム板と比較して断面二次モーメントが大きく、その結果として高い曲げ剛性を示すことが知られている¹⁴⁾。このような板状のポーラスアルミニウムは、自動車のボンネットやドアなどに代表されるパネル部材への適用が期待されている。また、高所作業トラックの架台アーム部分にポーラスアルミニウムサンドイッチパネルを使用する試みも報告されており¹⁵⁾、大幅な軽量化が達成されたことが示されている。このようなポーラスアルミニウムサンドイッチパネルは、特性などの応用面での報告は見られるが、板状プリカーサの発泡特性および気孔の生成状態のような基礎的知見に関する系統的な調査

* 名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）。Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603). E-mail: kobashi@numse.nagoya-u.ac.jp

** 名古屋大学大学院生（名古屋市）〔現在：ヤマハ発動機(株)〕。Graduate Student, Nagoya University (Nagoya, Aichi) (Present: Yamaha Motor Co., Ltd.).

Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus.

は、ほとんど見られない。そこで本研究では、板状プリカーサの発泡特性、および、板状プリカーサから作製されたポラスアルミニウムの気孔性状を調査することにした。また、板状プリカーサの板厚方向の膨張を抑制する上下型内での発泡特性も評価し、気孔性状の解析結果とあわせて報告する。

2. 実験方法

2.1 発泡特性の評価

プリカーサ合金系には 6061 アルミニウム合金を用いた。6061 合金粉末に TiH_2 粉末を 0.5 mass% 添加し、粉末混合、押出加工を行って板状 (幅 40 mm × 厚さ 4 mm) に固化成形し、長さ 40 mm に切断してプリカーサとした。発泡特性の観察には Fig. 1 に示す高周波誘導加熱装置を用いた。高周波コイルに隣接してステンレス鋼板を置き、その上に Fig. 1 に示すように板状プリカーサの面内方向が水平となるように設置した。これ以降、板状プリカーサの板厚、面内それぞれの方向を垂直方向、水平面内方向と表記する。この状態で加熱する自由発泡と、さらに上型を設置して加熱する型内発泡を実施した。型内発泡でプリカーサの上面に設置する上型には、後述する発泡過程のビデオ観察のため耐熱硝子を用いた。上下型はスペーサにより型間隔を 5, 10, 20 mm と変化させた。プリカーサの加熱は大気雰囲気中で行うため、プリカーサ周囲にチャンバは設置していない。プリカーサの発泡特性は、Fig. 1 に示すように試料上部位置および側部位置に取付けたビデオカメラで撮影し、それぞれの映像から板状プリカーサの水平面内方向および垂直方向の発泡特性を評価した。発泡特性の定量的評価は、ビデオで撮影した映像を画像解析装置を用い、次式 (1) で定義される相対投影面積 (A_r) を用いて行った¹¹⁾。

$$\text{相対投影面積 } (A_r) = \frac{\text{加熱中の投影面積 } (A_t)}{\text{加熱前の投影面積 } (A_{\text{ini}})} \quad (1)$$

なお、発泡中のプリカーサ温度は、プリカーサの側面に穴をあけ、熱電対を差込んで直接測定した。熱電対により、測定する温度は、発泡中、または、発泡後も安定して正しい値を測定することは、純アルミニウムや Al-Si 合金などの融点や固相線温度が明らかな試料の温度測定結果¹⁶⁾ から実証されている。

2.2 気孔性状の観察

気孔性状の観察は、加熱中に最大発泡に到達した時点で炉から取出し、直ちに代替フロンガス (HFC-134a) を用いて強制冷却した試料を用いて行った。冷却後の試料は、まず、垂

Fig. 2 Evaluated properties of pore morphology by image analyzing software with some examples of calculation.

直方向に切断し、垂直断面を観察した後、水平面内方向に切断し、水平断面を観察した。Fig. 2 に示すように画像解析装置により断面組織写真を白黒二値化した上で各気孔の面積 (S) と周囲長 (L)、気孔に外接する矩形 (縦横は Fig. 1 中の垂直方向、水平面内方向に平行) の各辺の長さ (D_v : 垂直方向 Feret 径, D_h : 水平方向 Feret 径) を測定し、各気孔が持つ大きさと扁平度を評価した。気孔の大きさ、および、真円度を表す指標として、(2), (3) 式で示す面積相当円直径および円形度を用いた。また、上下型の拘束による気孔の扁平度を評価する指標として、(4) 式により Feret 径比を求めた。

$$\text{面積相当円直径} = 2 \times (S/\pi)^{0.5} \quad (2)$$

$$\text{円形度} = 4\pi \times S/L^2 \quad (3)$$

$$\text{Feret 径比} = D_v/D_h \quad (4)$$

円形度は、気孔が真円のときに 1.0 となる値であり、形状が不定形になるほど 0.0 に近づく。また、Feret 径比が小さいほど気孔は垂直方向に扁平である。Fig. 2 中に、いくつかの気孔形状と円形度、Feret 径比の値を例として示す。なお、気孔率は、アルキメデス法により求めた見掛け密度と 6061 合金の真密度 (2.70) との比から計算した。

3. 実験結果

3.1 板状プリカーサの自由発泡

Fig. 3 に上型による拘束のない状態での板状プリカーサの発泡過程 (自由発泡) を示す。プリカーサの水平面内方向の膨張を示す上面観察からは、ほとんど膨張していない様子が明らかである。それに対して、側面観察からは、プリカーサの垂直方向への顕著な膨張が確認される。そこで、このプリカーサの膨張過程を定量的に評価するために、ビデオ画像から相対投影面積を算出した。

Fig. 4 に、プリカーサ温度と水平面内方向、垂直方向の相対投影面積の経時変化を示す。加熱開始から 140 s ほど経過した時点 (図中 a 点) で、垂直方向の投影面積が上昇し、発泡が開始したことを示している。このときのプリカーサ温度は、バルク形状プリカーサの結果と同様に^{16), 17)}、6061 合金の固相線温度 (580°C) 付近であった。 TiH_2 の分解温度は、440~500°C 程度であり^{18)~20)}、6061 合金の固相線温度より低

Fig. 3 Sequential photos of expanding precursor at heating time of (a) 180 s, (b) 250 s and (c) 350 s.

Fig. 4 Temperature profile and relative projected area of precursor as a function of heating time (free foaming). Points (a) and (b) in the figure indicate the initiation of foaming and shrinkage.

いため、6061 合金が固相の状態でも水素ガスは発生するが、固相線を超えて液相が生成するまで、プリカーサの膨張は、ほとんど見られなかった。このように、板状プリカーサの膨張開始温度とアルミニウム合金の液相線温度との関連は、すでに報告したバルク形状（直方体、円柱など）のプリカーサで見られる現象とまったく同様であった^{16),17)}。また、液相線温度（652°C）を越えると、相対投影面積が最大となるが、その後も加熱を継続すると、収縮を開始した（図中 b 点）。この間、水平面内方向の相対投影面積は、ほぼ 1.0 のままであり、Fig. 3 にも示したように板状プリカーサは、自由発泡では水平面内方向には、ほとんど膨張しないことを示している。粉末法により作製したプリカーサの発泡方向は、プリカーサ成形時の荷重方向に依存した顕著な異方性を示すことが知られているが^{21),22)}、本実験において発泡方向の異方性が特に顕著であるのは、プリカーサを板状に押出成形するとき、水平面内方向に展伸したアルミニウム粉末の界面にて気孔が発

Fig. 5 Horizontal and vertical cross sections of specimen fabricated by free foaming (The dotted line in the figure shows the original size of foam before cutting).

生して、アルミニウム粉末界面が剥離して、広がるためであると考えられる。

3.2 自由発泡試料の気孔性状

プリカーサの最大発泡時に強制冷却を行った試料を切断し、垂直断面、水平断面の気孔性状を観察した結果を **Fig. 5** に示す。気孔性状観察のために、はじめに垂直断面を切出しているため、ここで示す水平断面は、実際のポーラスアルミニウムの半分の大きさである。また、この試料の気孔率は 76.3% であった。気孔形状に関して、特定の方向に扁平または伸張する気孔は、観察されなかった。また、垂直断面、水平断面の気孔形状にも差異は見られなかった。次に、気孔性状の定量的評価のために、垂直断面において気孔径、Feret 径比、円形度を画像解析により算出した。**Fig. 6** に (a) 気孔径（面積相当円直径）のヒストグラム、(b) Feret 径比と気孔径の相関分布図、(c) 円形度と気孔径の相関分布図を示す。この試料の垂直断面における平均気孔径は 2.8mm であり、最大頻度分布は 2.0~2.5mm の範囲に見られるが、5mm を超える粗大な気孔も存在した。このような粗大な気孔は、Fig. 5 中に見られるように、セル壁が一部欠損して連結したセルの存在による。次に、Fig. 6 (b) に示す Feret 径比と気孔径の相関分散図から、Feret 径比は、ほぼ 1.0 を中心に分散し（平均: 0.97）、プリカーサの膨張方向に見られたような著しい異方性は見られなかった。円形度に関しては、Fig. 6 (c) に示されるように、面積相当円直径が 1mm 以下の気孔の円形度は、0.7~1.0 の間に分布し、面積相当円直径が 5mm 以上の気孔の円形度は、0.55 以下に分布した。これは、気孔径が小さい場合は表面張力の作用が強くなり球形状を保ちやすいことと、気孔同士の合体により粗大気孔が生成するため、粗大気孔の形状が不定形になりやすいことによる。面積相当円直径が 1~5mm の気孔に関しては、円形度に有意な傾向は見られなかった。

3.3 板状プリカーサの型内発泡特性

次に、プリカーサを垂直方向の膨張を抑制する上下型内で加熱し、発泡特性を調査した結果を示す。型間隔を 10mm に

Fig. 6 Cell morphology of free foamed specimen showing (a) pore size distribution, (b) feret diameter ratio and (c) circularity.

Fig. 7 Sequential photos of expanding precursor at heating time of (a) 220 s, (b) 240 s and (c) 270 s (die spacing: 10 mm).

Fig. 8 Temperature profile and relative projected area of precursor as a function of heating time (die spacing: 10 mm).

設定した上下型内で発泡させたときの発泡の過程を **Fig. 7** に示す。先に示した自由発泡においてプリカーサは垂直方向に優先的に膨張し、水平面内方向には、ほとんど膨張しなかったが、型内発泡では水平面内方向にも膨張している様子が明らかである。**Fig. 8** に、上面および側面から観察した相対投影面積の経時変化を示す。上面および側面からの観察結果を比較すると、垂直方向の相対投影面積の増加が、水平面内方向よりも先に開始していることがわかる。これは、自由発泡の場合に示したように、プリカーサは拘束を受けない状態では、垂直方向に優先的に膨張するからである。次に、やや遅れて水平面内方向への膨張が開始した。プリカーサが上型に接する時点を目視により確認したが、加熱時間約 150 s の時点 (**Fig. 8** 中矢印) であった。この時点で、垂直方向の膨張速度が一時的に低下し、水平面内方向の膨張が開始している。すなわち、垂直方向の膨張が抑制されると、プリカーサ内で発生する水素ガス圧により、水平面内方向にも膨張するようになった。また、型内発泡においても、プリカーサ温度が液相線を超えると収縮を始めてしまうため側面から観察した相対投影面積は減少した。

次に、型間隔が発泡特性に及ぼす影響を調査した結果を示す。**Fig. 9** は型間隔の異なる上下型内 (5, 10, 20 mm) で発泡したプリカーサの垂直方向、水平面内方向の相対投影面積を自由発泡の結果とあわせて示している。型間隔が狭くなるに従い、垂直方向の最大相対投影面積が減少し、水平面内方向の相対投影面積が増加する傾向が示される。すなわち、型により垂直方向への膨張が抑制された分、水平面内方向へ膨張するようになる。また、型間隔が小さくなるに従い発泡の開始から収縮が始まるまでに要する時間が短くなっている。これは、型間隔が小さいほど、プリカーサは水平面内方向に大きく広がるために下型である鋼板からの入熱量が増加し、プリカーサの昇温速度が上昇したためである。

3.4 型内発泡試料の気孔性状

3.4.1 気孔サイズに及ぼす型の影響

Fig. 10 に型間隔 10 mm として作製したポーラスアルミニウムの断面を示す。水平断面、垂直断面のいずれからでも、特定方向へ伸張あるいは扁平した気孔は見られず、異方性は示されなかった。また、この試料の気孔率は 72.8% であり、自由発泡の場合 (76.3%) とほぼ同程度であった。**Fig. 11** に型間隔が 5 mm, 20 mm の場合の試料の垂直断面を示す。試料

Fig. 9 Relative projected area of (a) side view and (b) top view of the precursor as a function of heating time (free foaming and die foaming, die spacing: 5, 10, 20 mm).

Fig. 10 Horizontal and vertical cross sections of foamed specimen in die cavity (die spacing: 10 mm).

の気孔率は、それぞれ 76.0%, 72.2% であり、気孔率に関しては、型間隔の影響に関する有意な傾向は見られなかった。しかしながら、気孔の大きさには型間隔の明確な影響が現れ、型間隔が狭いほど気孔径が低下する傾向が見られた。この傾向を定量的に評価するために、画像解析装置により求めた面積相当円直径のヒストグラムを Fig. 12 に示す。自由発泡の場合と同様に型間隔 20 mm の試料では、頻度分布の最大値は

Fig. 11 Vertical cross sections of foamed specimens in die cavity (die spacing: 5 and 20 mm).

Fig. 12 Histograms of equivalent pore diameter of specimens foamed in die cavity.

相当円直径 2.5~3mm の値で示されるのに対して、型間隔が 5mm, 10mm の試料では 1~1.5mm の気孔が最も多く見られる。また、型間隔を超える大きさの気孔は生成しなかった。そのため、型間隔 5mm の試料中に生成する気孔はすべて 5mm 以下であった。

3.4.2 気孔の異方性および円形度に及ぼす型の影響

上下型により垂直方向への拘束を受けた状態で生成した気孔の異方性を調べるため、垂直断面における気孔の Feret 径比を画像解析により算出した。各試料について個々の気孔の Feret 径比を縦軸、面積相当円直径を横軸にプロットした分散図を Fig. 13 に示す。いずれの型間隔の試料においても、明らかな Feret 径比分布の異方性は示されなかった。当初、型内で発泡させることにより、垂直方向への気孔の成長が抑制されるため、気孔形状に異方性が見られることを予想して

Fig. 13 Feret diameter ratio of specimens foamed in die cavity.

いたが、そのような現象は生じなかった。ただし、ここで示した結果は、型間隔が5mm以上の場合であり、より小さい型間隔の場合については、別途検討を要する。各試料について気孔の平均円形度を計算したが、自由発泡、型間隔5, 10, 20mmの場合について、それぞれ0.69, 0.65, 0.64, 0.74となり、円形度に関しても、型間隔によらず、ほぼ一定であった。

4. 結 言

押出加工により作製した板状プリカーサの発泡特性および型内発泡における型間隔の影響を調査し、以下に示す結果を得た。

(1) 押出板状プリカーサを加熱すると、ほぼ垂直方向（板厚方向）にのみ膨張し、水平面内方向への膨張は、ほとんど見られない。気孔形状は、垂直方向断面、水平面内方向断面を比較しても、異方性は見られず、比較的等方的な球状の気孔が生成する。

(2) 垂直方向（板厚方向）拘束型内でプリカーサを加熱すると、水平面内方向にも膨張する。型間隔が狭くなるほど、水平面内方向への膨張の程度は大きくなる。型内発泡におい

ても、プリカーサは最大発泡後に収縮する。

(3) 気孔率は、加熱温度を適切に設定すれば、型内発泡（プリカーサ厚さ：4mm、型間隔：5mm～20mm）においても、70%を超え、自由発泡の場合と、ほぼ同等のレベルで発泡させることが可能であった。

(4) 平均気孔サイズは上下型による拘束を行うことにより低下した。しかしながら、気孔形状の等方性の指標となるFeret径比は、型間隔によらず、ほぼ1.0であり、垂直方向の膨張の拘束を受けても、等方的な気孔形状が維持された。

参 考 文 献

- 1) J. Banhart: Adv. Eng. Mater., **8** (2006), 781–794.
- 2) J. Baumeister, J. Banhart and M. Weber: 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) R. Kretz, K. Hausberger and B. Gotzinger: Adv. Eng. Mater., **4** (2002), 781–785.
- 6) J. Banhart: Functional applications, ed. by Hans-Peter Degischer, B. Kriszt. Handbook of Cellular Metals. Weinheim: Wiley-VCH; 2002, 313–320.
- 7) A. G. Evans, J. W. Hutchinson and M. F. Ashby: Prog. in Mater. Sci., **43** (1998), 171–221.
- 8) J. Baumeister, J. Banhart and M. Weber: Mater. & Design, **18** (1997), 217–220.
- 9) F. Simancik: ed. by Hans-Peter Degischer, B. Kriszt. Handbook of Cellular Metals. Weinheim: Wiley-VCH; 2002, 1–4.
- 10) R. Kretz, K. Hausberger and B. Gotzinger: Advanced Engineering Materials, **4** (2002), 781–785.
- 11) 小橋 眞, 棚橋伸也, 金武直幸: 軽金属, **53** (2003), 427–432.
- 12) S. Tsuda, M. Kobashi and N. Kanetake: Mater. Trans., **47** (2006), 2125–2130.
- 13) E. Mizutani, M. Kobashi and N. Kanetake: Advanced Materials Research, **26–28** (2007), 909–912.
- 14) A. G. Mamalis et al.: Composite Structures, **83** (2008), 335–340.
- 15) H. W. Seelinger: Adv. Eng. Mater., **6** (2004), 448–451.
- 16) M. Ota, M. Kobashi and N. Kanetake: Proc. 4th Int. Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Tech. (MetFoam 2005), Kyoto, (2005), 111–114.
- 17) M. Kobashi, R. Sato and N. Kanetake: Mater. Trans., **47** (2006), 2178–2182.
- 18) A. R. Kennedy and V. H. Lopez: Mater. Sci. and Eng., **A357** (2003), 258–263.
- 19) A. R. Kennedy: Scr. Mater., **47** (2002), 763–767.
- 20) B. Matijasevic-Lux, J. Banhart, S. Fiechter, O. Gorke and N. Wanderk: Acta Mater., **54** (2006), 1887–1900.
- 21) L. Helfen et al.: Adv. Eng. Mater., **4** (2002), 808–813.
- 22) I. Duarte and J. Banhart: Acta Mater., **48** (2000), 2349–2362.
- 23) W. Deqing and S. Ziyuan: Mater. Sci. Eng., **A361** (2003), 45–49.
- 24) V. Gergely and B. Clyne: Adv. Eng. Mat., **2** (2000), 175–178.
- 25) S. Asavavithichai and A. R. Kennedy: Scripta Mater., **54** (2006), 1331–1334.