ポラスアルミニウム充填パイプへのスリット導入による変形制御の検討

半谷 禎彦¹ 中野ゆき子^{1,*} 宇都宮登雄²
桑水流 理³ 北原総一郎⁴ 吉川 暢 宏⁵

¹群馬大学大学院理工学府

²芝浦工業大学工学部

³福井大学大学院工学研究科

⁴ホクダイ株式会社

⁵東京大学生産技術研究所

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 80, No. 11 (2016), pp. 707-712

© 2016 The Japan Institute of Metals and Materials

Control of Deformation Behavior of Aluminum Foam-Filled Tube by Introducing Slit on Pipe

Yoshihiko Hangai¹, Yukiko Nakano^{1,*}, Takao Utsunomiya²,
Osamu Kuwazuru³, Soichiro Kitahara⁴ and Nobuhiro Yoshikawa⁵

¹Graduate School of Science and Technology, Gunma University, Kiryu 376-8515

²Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Tokyo 135-8548

³Graduate School of Engineering, University of Fukui, Fukui 910-8507

⁴Hokudai Co., Ltd., Abira 059-1434

⁵Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo 153-8505

In this study, compression deformation behavior of aluminum (Al) foam-filled thin-walled steel tubes was controlled by introducing slits on the tube and varying length and number of the slits. The deformation of the foam-filled tubes without slits started from various layers depending on the specimens. In contrast, the deformation of foam-filled tubes with slits started from the layer with a longest slit and largest number of slits, and spread to the layer with shorter slits and smaller number of slits. In addition, it was revealed that introducing of the slits on the tube had no effect on compression properties.

[doi:10.2320/jinstmet.J2016009]

(Received February 16, 2016; Accepted August 3, 2016; Published September 9, 2016)

Keywords: cellular materials, composite structural materials, X-ray computed tomography, foam, friction welding

1. 緒 言

ポラスアルミニウム (Al) をコア材として金属パイプに充填した“ポラスコアパイプ”は、軽量で衝撃吸収特性に優れることから、輸送機器等への適用が期待されている^{1,2)}。このポラスコアパイプを衝撃吸収部材として適用する場合には、その変形箇所を特定するなどの制御が重要になると考えられる。

著者らは、これまで単体のポラス Al 内で気孔率や合金組成を変化させた傾斜機能ポラス Al の作製を試み、ポラス Al の圧縮荷重下での変形制御可能性について検討している³⁻⁶⁾。この傾斜機能ポラス Al は、発泡剤量や合金組成の異なる 2 種類以上のプリカーサを摩擦攪拌接合により 1 つのプリカーサとし、それを発泡させることで得られる。ま

た、傾斜機能ポラス Al の圧縮試験では、低強度層から変形が開始し、その後、高強度層に変形が推移する変形挙動が観察され、変形制御の可能性が示唆されている。

一方、ポラスコアパイプの作製法の 1 つに、あらかじめ固体 Al 中に発泡剤粉末を混合して作製したプリカーサ^{7,8)}をパイプ内で発泡させる方法がある⁹⁻¹¹⁾。また著者らは、このプリカーサを、摩擦圧接を利用してパイプ内面にコーティングし、それを加熱発泡させることでポラスコアパイプを作製する方法を提案している¹²⁻¹⁴⁾。これらの方法においても、傾斜機能ポラス Al のプリカーサ用い、内部ポラス Al の気孔率や合金組成を傾斜化することで、変形箇所を制御可能なポラスコアパイプを作製できるものと考えられる。しかしながら、発泡剤量や合金組成を変化させた傾斜機能ポラス Al のプリカーサの発泡は、均一のポラス Al のそれよりも高精度な発泡温度と発泡時間の制御が不可欠となる。さらに、ポラスコアパイプの作製ではパイプ内のプリカーサを発泡させるため、パイプを介しての温度制御は難

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

しくなるものと考えられる。

そこで本研究では、ポーラスコアパイプのコア部を傾斜化することなく、変形箇所を制御する簡便な方法として、均一なポーラスコアを充填したポーラスコアパイプのパイプ部にあらかじめスリットを入れ、その部分からの変形を容易にすることで制御することを試みた。作製したスリット入りポーラスコアパイプは、X線CT非破壊観察により、ほぼ均一な気孔率になっていることを確認した上で、静的圧縮試験を行い、変形制御の可能性と、力学的特性への影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 ポーラスコアパイプ作製方法

Fig. 1 に、ポーラスコアパイプの作製方法概略図を示す。本研究では、著者らが提案した摩擦圧接を用いた手法により作製した¹²⁻¹⁴⁾。本手法は、ポーラス Al とパイプの金属接合が可能である。ポーラス Al として高強度な Al-Si-Cu 系 Al 合金 ADC12 を、パイプとして SUS304 を用いた。まず、Fig. 1 (a) に示すように、ジグに外径 $\phi 20$ mm、高さ 40 mm、肉厚 0.1 mm の SUS304 パイプを入れ固定した。次に、ポーラス Al のプリカーサをパイプの内側に投入した。プリカーサは摩擦攪拌法¹⁵⁾により作製した。プリカーサ作製の詳細な条件等は文献 14) を参照されたいが、以下に簡単に記載する。まず、ADC12 ダイカスト板材を 4 枚用意し、その間に発泡剤粉末 (TiH_2 , 0.5 mass%) と、気孔形態安定剤粉末 (Al_2O_3 , 5 mass%) をはさみ積層板とした。次に、摩擦攪拌接合時の回転ツールにより 4 枚の板材を接合するとともに、ADC12 ダイカスト板材中に粉末を混合した。ツール回転数は 1000 rpm、ツール移動速度は 50 mm/min、前進角は 3° とした。大きなプリカーサを得るため、および粉末を均一に混合するために、マルチパス法^{16,17)}による摩擦攪拌接合を行った。最後に、ツール走査箇所から機械加工によりプリカーサを切り出した。

次に、Fig. 1 (b) に示すように、外径 $\phi 15$ mm の底面が平滑な SUS304 ツールを、回転数 800 rpm、押込み速度 5 mm/min で、下部から 3 mm 上の高さまで押込んだ。Fig. 1 (c) に示すように、回転ツールとプリカーサの間で発生する摩擦熱により軟化したプリカーサが、ツールとパイプの間を

塑性流動し、パイプ内面にプリカーサがコーティングされる。これを、Fig. 1 (d) に示すように、上部のプリカーサ未接合部と、下部のプリカーサが底面に押しつけられた部分を、機械加工により切断した。これを、Fig. 1 (e) に示すように、あらかじめ 1003 K に保持した電気炉に入れ、その温度に保ったまま 4–5 min 間保持し、その後、電気炉から取り出し空冷することで、ポーラスコアパイプを得た。

発泡させたポーラスコアパイプの上下端を放電加工機により切断し、高さ 20 mm の圧縮試験片を作製した。本研究では、このように作製したポーラスコアパイプを 17 個作製した。そのうち、次節に述べるスリットを導入するポーラスコアパイプを 11 個、比較のためのスリットを入れない通常のポーラスコアパイプを 6 個とした。

2.2 スリット導入方法

本研究では、以下に示す 2 種類のスリットを導入した。

【スリット I】 Fig. 2 (a) に示すように、試験片高さ方向に垂直な断面において、パイプ表面からの最大深さ a が 1.3 mm, 0.6 mm, 0.3 mm の各スリットを、試験片上面から試験片高さに対して圧縮治具やスリット同士が可能な限り影響しないように 25%, 50%, 75% の位置に等間隔に導入した。スリットの最大深さ a は、予備実験により 0.3 mm 以上でスリット部から変形が開始することを確認した上で、その値を基準に、一番長いスリットは、横方向に 2 倍の長さとなる

Fig. 2 Schematic illustration of introducing slit on foam-filled tube. (a) Slit I and (b) Slit II.

Fig. 1 Schematic illustration of fabrication process of ADC12 Al foam-filled steel tube by friction welding.

ように設定し、中位の長さのスリットはその間となるように設定した。スリットは発泡後、圧縮試験片に切断する際 (Fig. 1(e)), 一緒に放電加工機を用いて加工し、結果としてスリット厚みは $320\ \mu\text{m}$ となった。このようにスリットを導入した試料を、以後“スリット I ポーラスコアパイプ”と呼ぶ。

【スリット II】 Fig. 2(b) に示すように、スリットの最大深さを $a=0.3\ \text{mm}$ に統一し、試験片高さ方向に垂直な断面において 60° おきに 6 本、 120° おきに 3 本、さらに 1 本の各スリットを、試験片上面から試験片高さに対して 25%, 50%, 75% の位置に導入した。スリットは、スリット I と同様の方法で加工した。このようにスリットを導入した試料を、以後“スリット II ポーラスコアパイプ”と呼ぶ。

2.3 気孔率算出方法

得られたポーラスコアパイプ圧縮試験片は、株式会社島津製作所のマイクロフォーカス X 線 CT, SMX-225CT を用いて X 線 CT 撮像を行った。X 線源はタングステンであり、圧縮試験片全体をコーンビーム CT 撮像した。撮像条件は、X 線管電圧 80 kV, X 線管電流 $30\ \mu\text{A}$, 画像サイズ $512 \times 512\ \text{pixel}$ とした。この時、1 pixel の大きさは、約 $50\ \mu\text{m}$ であった。これらの X 線 CT 画像から、三谷商事株式会社の画像解析ソフト WinROOF を用いて画像断面での気孔率 $p_{\text{x-ray}}$ を算出した。また、それとは別に、圧縮試験片の重さを計測し、そこからパイプの重さを引いた値と、試験片の寸法から計算した体積から、ポーラス Al 部の気孔率 p を算出した。

2.4 圧縮試験方法

ポーラスコアパイプの圧縮特性は、JIS-H-7902「ポーラス金属の圧縮試験方法」¹⁸⁾を参考にした静的圧縮試験により取得した。圧縮試験は、株式会社島津製作所の精密万能試験機オートグラフ AG-100kNG を用いて、圧縮試験片を上部が一番長いスリット、下部が一番短いスリットとなるように設置し、圧縮速度(クロスヘッド速度) $4\ \text{mm/min}$ で行った。変形挙動の外観観察を、ビデオ撮影により行った。圧縮ひずみは、クロスヘッド変位を初期の圧縮試験片高さで除することと求めた。

3. 実験結果

Fig. 3 に、作製したポーラスコアパイプの外観および X 線 CT 画像の一例を示す。Fig. 3(a), (b) はスリット I ポーラスコアパイプ、Fig. 3(c), (d) はスリット II ポーラスコアパイプである。Fig. 3(a), (c) の外観写真の矢印で示した部分がスリット部である。Fig. 3(b), (d) の X 線 CT 画像は、スリットの入っていない断面の画像であるが、白い円状の外周部がパイプ部であり、その内部の白い部分がポーラス Al のセル壁、黒い部分がポーラス Al の気孔である。どの試験片も内部まで十分にポーラス Al が充填されており、パイプも保持されている。

Fig. 4 は、Fig. 3 で示したスリット I およびスリット II

Fig. 3 Appearances and X-ray CT images of foam-filled tube compression test specimens with slit I ($p=79.7\%$) and slit II ($p=84.9\%$).

Fig. 4 Distributions of porosity $p_{\text{x-ray}}$ evaluated from X-ray CT images of foam-filled tube compression test specimens of (a) Slit I and (b) Slit II.

ポーラスコアパイプに対する気孔率 $p_{\text{x-ray}}$ の試験片高さ方向の分布である。どちらの試験片においても、高さ方向にはほぼ一定の気孔率となっており、気孔率分布のみから変形起点を予測することは困難である。

Fig. 5(a) に、スリット無しポーラスコアパイプ(ポーラス Al 部の気孔率 $p=87.0\%$)の圧縮変形挙動を示す。圧縮ひずみ $\varepsilon=0.05$ の圧縮初期から、パイプの座屈変形が中部と下部の 2 箇所が発生し、そこを起点に変形が進行している。このような変形挙動は、他のスリット無しポーラスコアパイプでも同様であったが、座屈変形の箇所(変形起点)は試験片によって異なっていた。

Fig. 6(a) に、スリット I ポーラスコアパイプ($p=79.7\%$)の圧縮変形挙動を示す。まず、 $\varepsilon=0.05$ の圧縮初期で、上部

Fig. 5 Result of compression test of foam-filled tube without slit ($p=87.0\%$). (a) Deformation behavior. (b) Stress-strain curve.

Fig. 6 Result of compression test of foam-filled tube with Slit I ($p=79.7\%$). (a) Deformation behavior. (b) Stress-strain curve.

Fig. 7 Result of compression test of foam-filled tube with Slit II ($p=84.9\%$). (a) Deformation behavior. (b) Stress-strain curve.

の一番長いスリットを含む層からパイプの座屈が始まっている。この時、他の部分の変形は見られないことから、ここが第一変形起点となっていることが分かる。 $\varepsilon=0.2$ で、中部の二番目に長いスリットを含む層から次のパイプの座屈が始まり、一番短いスリットを含む下部での変形は見られないことから、ここが第二変形起点となっていることが分かる。その後、パイプの座屈は下部で起こっており、上部から下部にかけて順番に変形が進行している。ただし下部の座屈は、一番短いスリットを含む層からは発生せず、下部全体で変形が生じている。これは、第二変形起点の座屈変形の影響で斜めに変形し、短いスリットが存在することの影響よりも、第二変形の影響を強く受けたためと考えられる。スリット間の距離やスリットの長さ、数などによる高精度な制御は今後の課題であるが、上部から下部にかけて順番に変形が進行する傾向は、他のスリット I ポーラスコアパイプの圧縮変形挙動においても同様であった。また、Fig. 7(a)のスリット II ポーラスコアパイプ($p=84.9\%$)の圧縮変形挙動においても、スリットの数が多い上部から少ない下部にかけて順番に座屈変形が進行していく様子が確認できる。他のスリット II ポーラ

スコアパイプも同様の傾向であった。すなわち、スリットの導入により、ポーラスコアパイプの変形制御は可能であることが示唆された。

Fig. 5(b)に、Fig. 5(a)に示した圧縮変形挙動に対応したスリット無しポーラスコアパイプの応力-ひずみ関係を示す。最初の座屈が発生する際に初期最大応力が発生し、かつ、座屈が発生するごとに応力の上下動が若干生じているが、おおよそ一般のポーラス Al^[19-21]に見られるように、圧縮初期の弾性領域、応力がほぼ一定で圧縮変形が進行するプラトー領域、最後の緻密化領域の 3 つの領域が見られる。この傾向は、他のスリット無しポーラスコアパイプや、Fig. 6(b)や Fig. 7(b)に一例を示したスリット入りポーラスコアパイプの応力-ひずみ曲線の場合についても同様であった。また、スリットを導入したことにより、強度が極端に低下する傾向は見られなかった。これは、圧縮方向と垂直にスリットが入っており、圧縮試験中に目視でスリットのオーバーラップが無いことを確認できていることから、圧縮の際にはスリットが閉口し、座屈を容易にするためだけに機能するためと考えられる。

Fig. 8 Result of compression test of tube with Slit I without Al foam. (a) Deformation behavior. (b) Stress-strain curve.

Fig. 9 Result of compression test of tube with Slit II without Al foam. (a) Deformation behavior. (b) Stress-strain curve.

Fig. 8, 9 は、それぞれポーラス Al を充填していないスリット I およびスリット II のパイプのみの圧縮変形挙動と応力-ひずみ関係である。上部の一番長いスリットを含む層やスリット数の多い層が第一変形起点となっている。スリットを入れた部分のパイプが互い違いに重なるように閉口し、それに伴って周囲のパイプも内部にへこんでいる。一方、ポーラス Al を充填したものは、パイプの重なりやへこみが生じることなく、層状に変形が進行する。これは、ポーラス Al が内部にあることや、ポーラス Al とパイプが金属接合されていることによるものと推定される。パイプのみの場合では、スリットを導入しても、第一の変形が比較的試料全体に渡るため、第二変形起点以降の制御が困難になることが分かる。

Fig. 10 に、スリット I、スリット II およびスリット無しポーラスコアパイプのポーラス Al 部の気孔率 p とプラトー応力の関係を示す。ここでプラトー応力は、Fig. 5(b)-7(b) に示した応力-ひずみ曲線から、ひずみ 20-30% における応力の平均値として算出した¹⁸⁾。気孔率の増加とともにプラトー応力が減少しており、両者に相関があることが分かる。したがって、スリット入りポーラスコアパイプであっても、気孔率が同じであればスリット無しポーラスコアパイプの場合と、ほぼ同じプラトー応力を示すことが分かる。なお、スリット II のプラトー応力が他のものよりも若干高い値となっているようにも見えるが、スリット I やスリット無しポーラスコアパイプの場合においても、若干ばらつきがあることから、内部気孔形態の影響による誤差と考えられる。以上のことから、ポーラスコアパイプのパイプにスリットを入れ、その長さや数を調整することで、力学的特性に影響を与えることなく変形制御の可能性が示唆された。

Fig. 10 Relationship between porosity p and plateau stress σ_{pl} of fabricated foam-filled tubes with and without slit.

4. 結 言

本研究では、ポーラス Al をコア材としたポーラスコアパイプにあらかじめスリットを入れ、スリットの長さや数を変化させることで、ポーラスコアパイプの圧縮変形挙動の制御を試みた。スリット無しポーラスコアパイプでは、変形は様々な層から発生していたが、スリット入りポーラスコアパイプでは、一番スリットの長い、あるいは一番スリット数の多い層が第一変形起点となり、スリットの長さが短くなる層や数が少なくなる層へ変形が推移していった。また、スリット入りポーラスコアパイプはスリット無しポーラスコアパイプと比べ、プラトー応力値も同等であり、力学的特性にも影響を与えないことが示唆された。

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、重要知財集約活用制度スーパーハイウェイ 2015 の助成のもと行われた。ここに厚く感謝いたします。

文 献

- 1) J. Banhart: Prog. Mater. Sci. **46**(2001) 559-632.
- 2) J. Banhart: Int. J. Veh. Des. **37**(2005) 114-125.
- 3) Y. Hangai, K. Takahashi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **534**(2012) 716-719.
- 4) Y. Hangai, K. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **556**(2012) 678-684.
- 5) Y. Hangai, K. Saito, T. Utsunomiya, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **613**(2014) 163-170.
- 6) Y. Hangai, N. Kubota, T. Utsunomiya, H. Kawashima, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **639**(2015) 597-603.
- 7) F. Baumgartner, I. Duarte and J. Banhart: Adv. Eng. Mater. **2**(2000) 168-174.
- 8) M. Kobashi: J. Japan Inst. Light Metals **55**(2005) 327-332.
- 9) M. Kobashi, R. Sato and N. Kanetake: Mater. Trans. **47**(2006) 2178-2182.
- 10) M. Kobashi and N. Kanetake: Mater. Japan **47**(2008) 178-181.
- 11) I. Duarte, M. Vesenjak, L. Krstulovic-Opara and Z. R. Ren: Composite Structures **124**(2015) 128-139.
- 12) Y. Hangai and M. Saito: Mater. Trans. **54**(2013) 1012-1017.
- 13) Y. Hangai, M. Saito, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Materials **7**(2014) 6796-6810.
- 14) Y. Hangai, Y. Nakano, S. Koyama, O. Kuwazuru, S. Kitahara and N. Yoshikawa: Materials **8**(2015) 7180-7190.
- 15) Y. Hangai, T. Utsunomiya and M. Hasegawa: J. Mater. Process. Technol. **210**(2010) 288-292.
- 16) Y. S. Sato, S. H. C. Park, A. Matsunaga, A. Honda and H. Kokawa: J. Mater. Sci. **40**(2005) 637-642.
- 17) N. Xu, R. Uejii and H. Fujii: Sci. Technol. Weld. Join. **20**(2015) 91-99.
- 18) JIS-H-7902: *Method for compressive test of porous metals*, (Japanese Standards Association, 2008).
- 19) L. J. Gibson: Annu. Rev. Mater. Sci. **30**(2000) 191-227.
- 20) T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama and A. Kitahara: Adv. Eng. Mater. **2**(2000) 179-183.
- 21) M. Hakamada and M. Mabuchi: J. Japan Inst. Light Metals **62**(2012) 313-321.