板材から作製した薄肉アルミニウムパイプを用いた ポーラスアルミニウム充填パイプ

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. 6 (2016), pp. 386–389
© 2016 The Japan Institute of Metals and Materials
Rapid Publication

Aluminum Foam-Filled Pipe Using Thin-Wall Aluminum Pipe Fabricated from Plate

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

Thin aluminum (Al) pipes filled with Al foam were fabricated by friction welding. In this study, thin Al pipes were formed from thin Al plates and were welded during the coating of a precursor by friction welding. It was shown that seamless Al foam-filled pipes with a uniform wall thickness can be realized. Compression tests on the Al foam-filled pipes revealed that the welding of the pipes had no effect on the generation of cracks in the pipes and their compression properties.
[doi:10.2320/jinstmet.J2016006]

(Received February 4, 2016; Accepted March 16, 2016; Published April 15, 2016)

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

1. 緒 言

輸送機器など軽量化が求められる分野で、ポーラスアルミニウム (Al) を緻密金属パイプのコア材とした複合パイプが注目されている^{1,2)}。著者らは、ポーラス Al と金属パイプを金属接合により複合化する手法を試みている^{3,4)}。本手法は、発泡剤粉末を均一に Al 中に混合したプリカーサ^{5,6)}を、摩擦圧接^{7,8)}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、複合パイプを作製する手法である。摩擦圧接時に、プリカーサの塑性流動が発生し新生面が露出することで、パイプとポーラス Al の金属接合が達成されることが考えられる。

部材の軽量化やリサイクル性の観点から、金属パイプとして軽量の Al パイプを使用した複合パイプが期待されてい

る^{9,10)}。特に、Al パイプの肉厚がその軽量性に大きく影響するため、薄肉な Al パイプによる複合パイプが望まれている。しかしながら、市販の Al パイプの肉厚は限定されており、薄肉 Al パイプの入手は困難である。

そこで本研究では、Al パイプの代わりに入手が容易な薄い Al 板材をパイプのように丸め、そこにプリカーサを充填し、プリカーサの塑性流動により板材の接合を行うことで、複合パイプの作製を試みる。作製した複合パイプの X 線 CT 撮像や圧縮試験を行い、それらの結果をもとに、薄い Al 板材の複合パイプ用の薄肉パイプとしての利用可能性について検討する。

2. 実 験 方 法

2.1 複合パイプ作製方法

Fig. 1 に、ポーラス Al をコア材とした複合パイプの作製方法概略図を示す。本研究では、ポーラス Al として比較的

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

Fig. 1 Schematic illustration of fabrication process of ADC12 foam-filled A1050 pipe by friction welding.

Fig. 2 Thin Al pipe used in this study. (a) Rounded Al plate. (b) Lathe process.

融点の低い Al-Si-Cu 系 Al 合金 ADC12 を、Al パイプとして融点の高い工業用純 Al の A1050 を用いた。これは、ポーラス Al 発泡時の Al パイプの熔融やポーラス Al がパイプへ浸食することを防ぐためである。まず、Fig. 1(a)に示すように、ジグに外径 $\phi 20$ mm、高さ 40 mm、厚さ 0.5 mm のパイプとなるように素材を入れ固定する。本研究では、パイプを 2 種類の方法で準備した。1 つは、Fig. 2(a)に示すような、市販の厚さが 0.5 mm で 64 mm $\times$ 40 mm の板材をパイプ状に丸めてジグに入れたものである。板材を丸めジグに固定する際、両端が 2 mm 程度重なるようにした(以後、このように作製した複合パイプを“板材複合パイプ”と呼ぶ)。もう 1 つは、比較のため Fig. 2(b)に示すような、市販の外径 $\phi 20$ mm、高さ 40 mm、厚さ 1.0 mm のパイプの内側を旋盤加工により切削、厚さ 0.5 mm としたものである(以後、このように作製した複合パイプを“旋盤複合パイプ”と呼ぶ)。

次に、Fig. 1(a)に示すように、ポーラス Al のプリカーサを 2 個パイプの内側に投入した。プリカーサは摩擦攪拌法^{11,12)}により作製した。プリカーサ作製の詳細な条件等は文献 4) 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^{13,14)}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 $\phi 14$ 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 948 K に保持した電気炉に入れ、その温度に保ったまま 7.5 分から 9.0 分の間保持することでプリカーサが発泡し、パイプ内に充填される。その後、電気炉から取り出し空冷することで、複合パイプを得た。

発泡させた複合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、板材複合パイプを 15 個、旋盤複合パイプを 11 個作製した。

ポーラス Al 部の気孔率 p は、圧縮試験片の重さを計測し、そこから元々の板材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算出した。

2.2 X 線 CT 撮像方法

得られた複合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 μA 、画像サイズ 512 $\times$ 512 pixel とした。この時、1 pixel の大きさは 73 μm であった。

2.3 圧縮試験方法

得られた複合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」¹⁵⁾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、圧縮速度(クロスヘッド速度)4 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で求めた。

3. 実験結果

Fig. 3 に、プリカーサをコーティングした発泡前の板材複合パイプ(上下端切断前の Fig. 1(d)に相当)の外観写真を示す。矢印 I や矢印 II で示すプリカーサがコーティングされていない部分では、それぞれ板材の重なりや板材の継ぎ目が見られる。一方、矢印 II の部分より下部のプリカーサがコーティングされている部分では、板材の継ぎ目は見られない。上下端を切断してしまうと、元々の継ぎ目の位置を確認することは困難であった。これは、プリカーサをコーティングする際に、塑性流動と圧力により圧接されたものと考えられる。

Fig. 4 に作製した複合パイプの外観および X 線 CT 画像を示す。Fig. 4(a)–(d)は板材複合パイプ、Fig. 4(e)–(h)は旋盤複合パイプである。どちらの試験片も内部まで十分に発泡しており、パイプも保持されている。Fig. 4(a)の板材複

合パイプの外観写真では手前が、Fig. 4(b)–(d)のX線CT画像の矢印で示した下部が、板材の継ぎ目であった部分であるが、継ぎ目は肉眼あるいはX線CTの分解能で観察される範囲では全く見られない。なお、この部分では、パイプの肉厚が若干厚くなっているようにも見えるが、他の箇所でもセル壁がパイプと接し、厚くなっている箇所も見られ、それ

Fig. 3 ADC12 precursor coated Al pipe fabricated from thin Al plate.

Fig. 4 Compression test specimens and their X-ray CT images of composite pipe fabricated from thin plate and lathe process.

Fig. 5 Results of compression tests of composite pipe fabricated from plate ($p=86.0\%$). (a) Deformation behavior. (b) Stress-strain curve.

らと見分けがつかない。このことは、他に作製した全ての板材複合パイプについても同様であった。これは、摩擦圧接によるプリカーサの塑性流動と圧力により、板材の重なった部分が圧接されるとともに、板厚方向に圧縮を受けた状態となり、薄肉化したものと考えられる。

Fig. 5(a)に板材複合パイプ($p=86.0\%$)の圧縮変形挙動を示す。元々継ぎ目があった箇所を正面としている。まず、 $\varepsilon=0.1$ の圧縮初期の段階から、パイプが座屈変形するとともに、矢印で示した箇所でパイプにき裂が発生した。その後、それらき裂が進展するとともに、 $\varepsilon=0.2$ の時、継ぎ目であった箇所からもき裂が発生した。この圧縮初期からパイプの座屈変形とともに数箇所でき裂が発生する傾向は、他の板材複合パイプでも同様であり、元々の継ぎ目の有無に関わらず様々な箇所からき裂が発生した。また、Fig. 6(a)に示す旋盤複合パイプ($p=86.4\%$)の圧縮変形挙動の場合や、他の旋盤複合パイプについても同様の傾向であった。Fig. 5(b)に、Fig. 5(a)に示した圧縮変形挙動に対応した板材複合パイプの応力-ひずみ曲線を示す。一般のポーラス Al¹⁶⁻¹⁸⁾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つの領域が明確に見られる。この傾向は、Fig. 6(b)に示す旋盤複合パイプの応力-ひずみ曲線や、他の複合パイプの場合についても同様であった。パイプが高強度の場合³⁾、座屈変形のみでき裂発生が見られないため応力の上下動が大きくなる傾向にある。本研究のパイプは薄肉であるため、座屈とともにき裂が発生し、高い初期最大応力を示さないかわりに、応力の上下動も少ないものと考えられる。

Fig. 7に、ポーラス Al 部の気孔率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)や Fig. 6(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¹⁵⁾。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。板材複合パイプの場合であっても、気孔率が同じであれば旋盤複合パイプの場合と、ほぼ同じプラトー応力を示すことが分かる。以上のことから、板材からでも、複合パイプの作製が可能であり、機械的特性にも影響を与えないことが示唆された。

Fig. 6 Results of compression tests of composite pipe fabricated by lathe process ($p=86.4\%$). (a) Deformation behavior. (b) Stress-strain curve.

Fig. 7 Relationship between porosity p and plateau stress σ_{pl} of fabricated composite pipe.

4. 結 言

本研究では、ポーラス Al をコア材とした複合 Al パイプのパイプを板材から作製することを試みた。ポーラス Al のプリカーサを摩擦圧接を用いてパイプの内側にコーティングする際に、板材の接合も同時に行いパイプ化した。得られたパイプは、摩擦圧接時のプリカーサの塑性流動と圧力により、継ぎ目の無いものとなっていた。これを発泡させた複合パイプにおいても、内部までポーラス Al が充填し、パイプの継ぎ目が無く、板厚もほぼ均等な複合パイプとなった。複合パイプの圧縮試験から、元々板材の継ぎ目であった箇所から優先的に破壊が進行する変形は観察されなかった。また、旋盤から作製したパイプを用いた複合パイプと比べ、プラトー応力値も同等であり、圧縮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) S. Nishi, K. Makii, Y. Aruga, T. Hamada, J. Naito and T. Miyoshi: KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS **54** (2004) 89–94.
- 3) Y. Hangai, M. Saito, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Materials **7** (2014) 6796–6810.
- 4) Y. Hangai, Y. Nakano, S. Koyama, O. Kuwazuru, S. Kitahara and N. Yoshikawa: Materials **8** (2015) 7180–7190.
- 5) M. Kobashi: J. Japan Inst. Light Metals **55** (2005) 327–332.
- 6) J. Banhart: Adv. Eng. Mater. **15** (2013) 82–111.
- 7) T. Shinoda: J. JFS **83** (2011) 695–701.
- 8) F. Abu-Farha: Sci. Mater. **66** (2012) 615–618.
- 9) G. Y. Sun, G. Y. Li, S. J. Hou, S. W. Zhou, W. Li and Q. Li: Mater. Sci. Eng. A **527** (2010) 1911–1919.
- 10) I. Duarte, M. Vesenjak and L. Krstulović-Opara: Compos. Struct. **109** (2014) 48–56.
- 11) Y. Hangai, T. Utsunomiya and M. Hasegawa: J. Mater. Process. Technol. **210** (2010) 288–292.
- 12) Y. Hangai, K. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **556** (2012) 678–684.
- 13) Y. S. Sato, S. H. C. Park, A. Matsunaga, A. Honda and H. Kokawa: J. Mater. Sci. **40** (2005) 637–642.
- 14) N. Xu, R. Ueji and H. Fujii: Sci. Technol. Weld. Joining **20** (2015) 91–99.
- 15) JIS-H-7902: Method for compressive test of porous metals, (Japanese Standards Association, 2008).
- 16) L. J. Gibson: Ann. Rev. Mater. Sci. **30** (2000) 191–227.
- 17) T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama and A. Kitahara: Adv. Eng. Mater. **2** (2000) 179–183.
- 18) M. Hakamada and M. Mabuchi: J. Japan Inst. Light Metals **62** (2012) 313–321.