

塑性流動と塑性変形を用いた形状変化を伴うポーラスメタルコア サンドイッチパネルの創製法

芝浦工業大学 工学部 機械工学科
教授 宇都宮 登雄

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017021)

キーワード：ポーラス金属，摩擦攪拌，サンドイッチパネル，曲率

1. 緒言

ポーラスメタルは、非常に軽量で衝撃吸収性に優れており、自動車や、電車車両、工作機械などの軽量化の構造材料として利用拡大が期待されている^{1, 2)}。しかしながら、ポーラスメタルは引張りや曲げ強度が低く、また構造体への接合も難しいといった問題を有している。この点に関しては、ポーラスメタルに緻密な板材を接合し、サンドイッチパネルとすることで、ポーラスメタルの特徴を損なうことなく引張り・曲げ強度の向上を図ることが可能である。また、このポーラスコア部を持つサンドイッチパネルを実際に構造部材として適用する場合、種々の形状を付与できることが望ましいと考えられる。

アルミニウム合金をポーラスコア部の出発材としたポーラスアルミニウムコアサンドイッチパネル(以下ポーラス AI サンドイッチと呼ぶ)の作製には種々の方法²⁻⁹⁾が提案されているが、本研究では、摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding, FSW)を用いた方法に注目した⁷⁻⁹⁾。この方法では、FSWを用いてサンドイッチ構造を持たせたプリカーサの作製ができ、プリカーサを変形させた後に発泡させることにより、ポーラス AI サンドイッチに形状を付与することが可能性と考えられる。本研究では、基本的な付与形状として、サンドイッチ構造に曲率を持たせることを試みた。具体的には、ポーラスコア部の出発材としてアルミニウム合金ダイカスト ADC12、表面材として A1050 工業用純アルミニウムを用い、FSWを用いた方法によりサンドイッチ構造を持つプリカーサを作製した。はじめに、このプリカーサを発泡させ、平板型ポーラス AI サンドイッチを作製した。そして、その曲げ試験を、引張り圧縮試験機を用いて実施し、曲げ強度を調査した。その後、サンドイッチ構造を持つプリカーサに対して曲げ試験を実施し、プリカーサに曲率の付与を試みた。さらに、この曲率を付与したプリカーサを発泡させることによりポーラス AI サンドイッチとした。そして、これらの結果および X 線 CT 撮像の結果をもとに、表面材の接合強度や損傷特性およびポーラスコア部の気孔形態の評価を試みた。

2. サンドイッチ構造を持つプリカーサの作製

図 1 に、本研究で用いた、FSWを用いたサンドイッチ構造を持つプリカーサの作製工程の模式図を示す⁹⁾。はじめに、図 1(a)に示すように、2 枚の ADC12 板材(板厚 3 mm)

の間に発泡剤(TiH_2 , $<45 \mu\text{m}$)と気孔形態安定剤(Al_2O_3 , 約 $1 \mu\text{m}$)の各粉末を散布し、表面材となる A1050 板材(板厚 3 mm)に重ね積層板とした。 TiH_2 および Al_2O_3 粉末の散布量は、FSWによる攪拌体積分の ADC12 の質量に対して、それぞれ、1 mass%および 5 mass%とした。続いて、図 1(b)のように、積層板の上からプローブ長さ 4.8 mm のツールを回転速度 1000 rpm で押し込み、走査させた。この FSW で発生させた塑性流動を用いて、散布粉末(TiH_2 , Al_2O_3)を ADC12 板材内に均一攪拌させた。FSW では、4 列×4 パスのマルチパス法を用いた。また、ツールの先端を、最終的に A1050 板材に 0.2 mm 押し込むことによりプリカーサと表面材を接合させた。その後、図 1(c)に示すように、FSW を施した ADC12 積層板の上からさらに A1050 板材(板厚 3 mm)を重ね、プローブ長さ 3.0 mm のツールを回転速度 2200 rpm で、積層板表面から 0.2 mm 押し込み、走査させた。この FSW も、4 列×4 パスのマルチパスで行った。これにより表面材と積層板を接合させ、ADC12 積層板をコアとし、2 枚の A1050 表面材を接合したサンドイッチ構造の積層板を作製した。FSW には、摩擦攪拌接合装置(日立設備エンジニアリング SHH204-720)を用いた。そして、このサンドイッチ構造の積層板から、図 1(d)に示すように、機械加工によって長さ 120 mm×奥行き 15 mm×高さ 10 mm のプリカーサを切り出した。

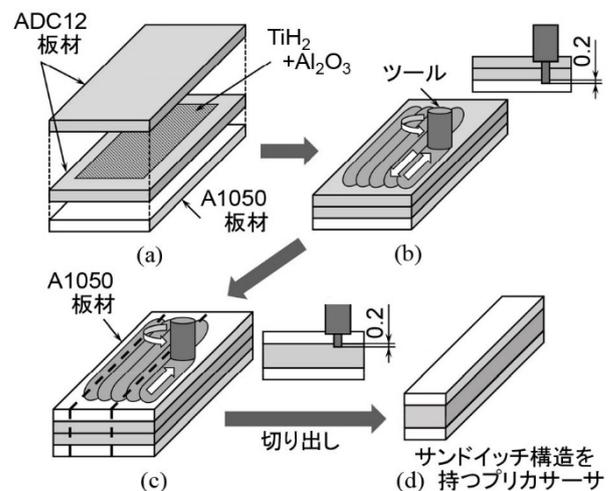


図1 摩擦攪拌を用いたサンドイッチ構造のプリカーサ作製法概略

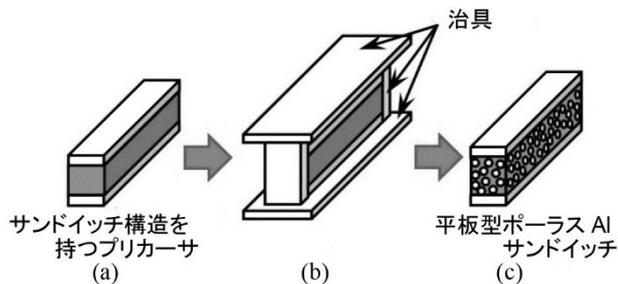


図2 平板型ポーラスAlサンドイッチの発泡手順概略

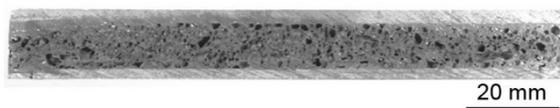


図3 作製した平板型ポーラスAlサンドイッチ

3. 平板型ポーラスAlサンドイッチの作製

3・1 プリカーサの発泡

図2(a)の作製したプリカーサを、図2(a)のように治具に固定し、一定温度に保った電気炉（デンケン KDF-S80）内で発泡させた。炉内の保持温度（炉内温度）は 948 K、保持時間は 11 min とした。発泡後、図2(c)に示すように機械加工により奥行き 15 mm×高さ 16 mm の形状に切り出しポーラス Al サンドイッチとした。

作製したポーラス Al サンドイッチのコア部の気孔率 p (%)は、次式により算出した。

$$p = \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_i} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 ρ_i は発泡前のプリカーサの攪拌部の密度、 ρ_f は発泡後のポーラスコア部の密度である。 ρ_i としては、ADC12 の密度¹⁰⁾を用いた。 ρ_f は、以下のようにして評価した。すなわち、ポーラス Al サンドイッチの表面材が接合された状態で質量を測定した後、純アルミニウムの密度¹¹⁾を用いて算出した表面材の質量を減じてポーラスコア部の質量とした。さらに、この質量をポーラスコア部の体積で割ることによって求めた。図3に、作製したポーラス Al コアサンドイッチ ($p=74.6\%$) を示す。

3・2 気孔形態の観察

ポーラス Al サンドイッチのポーラスコア内部の気孔状態の把握のため、マイクロフォーカス X 線透過検査装置（松定プレジジョン μ Ray8700-LCTN）により、長手方向中央部分の X 線 CT 撮像を行った。X 線源はタングステン、コーンビーム CT¹²⁾であり、撮像に用いた X 線管電圧は 90 kV、X 線管電流は 200 μ A である。画像サイズは 1024×1024 pixels で、スライスピッチは 61 μ m 程度であった。撮像した X 線 CT 画像に対して適切な閾値を設定して求めた断面の（二次元）二値化画像から、気孔の個数および相当円直

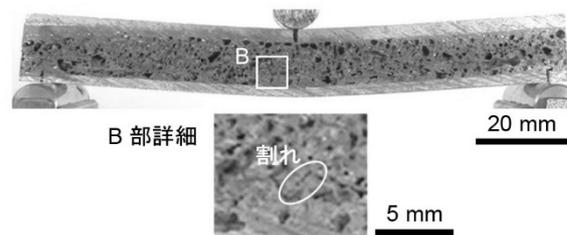


図4 平板型ポーラスAlサンドイッチの割れ発生状態（押込み量：3.7 mm）

径 d および円形度 $e^{13)}$ を求め、各断面の全気孔に対する平均値である平均相当円直径 d_x および平均円形度 e_x をそれぞれ求めた。さらに、撮像した全断面に対する平均値である全平均相当円直径 d_m および全平均円形度 e_m を求めた。これらの処理は、WinROOF を用いて行った。ただし、これらの処理では、画像の解像度の関係で、0.4 mm^2 以下の面積の気孔は無視した。

3・3 曲げ試験

ポーラス Al コアサンドイッチ構造の 3 点曲げ試験を実施した。曲げ試験の支点間距離 110 mm、圧子半径 5 mm、圧子の押込み速度は 2 mm/min とした。試験には、精密万能試験機（島津製作所 オートグラフ AG-100kG）を用いて行った。また、試験片の変形状態は、ビデオカメラを用いて記録した。図4に、試験結果の例として、ポーラスコア部で割れが発生し始めた時点の結果を示す。圧子の押込み量 3.7 mm の低い値（サンドイッチの曲率半径が大きい時点）で、ほぼ圧子直下の下部表面材側で縦方向に割れが発生し、5 mm では大きく進展した。このことから、ポーラスコア部の曲げ強度は低く、ポーラスコア部の破損が無く曲率を付与するとは難しいと考えられる。

4. 曲率を付与したポーラスAlサンドイッチの作製

4・1 プリカーサの曲げ試験および発泡

サンドイッチ構造を持つプリカーサに対して、3 点曲げ試験を行った。支点間距離は 100 mm であり、圧子直径は 80 mm、圧子の押込み速度は 2 mm/min とした。試験に用いた試験機は前章のものと同じであり、プリカーサの変形状態はビデオカメラを用いて撮影した。圧子の押込み量は、15 mm と、後述するように ADC12 のコア部で割れを起こした押込み量 20 mm の 2 種類について行った。試験後、厚み 0.2 mm の銅板を用いて、曲率を付与したプリカーサの上下面の曲率に沿った型を取り、これらの上下の型板の間隔を 18 mm に固定した治具を作製した。図5のように、プリカーサを治具内に設置して、電気炉内で保持温度 948 K、保持時間 11 min で発泡させた。発泡したプリカーサをワイヤーカット放電加工で奥行き 15 mm に切り出し、ポーラス Al サンドイッチとした。

作製したポーラス Al サンドイッチのコア部の気孔率 p (%)を、式(1)を用いて同様の方法で算出した。ただし、曲

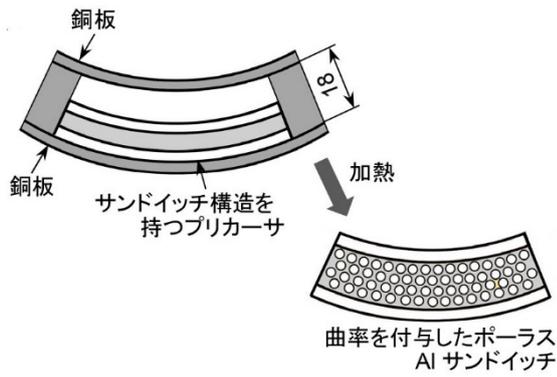
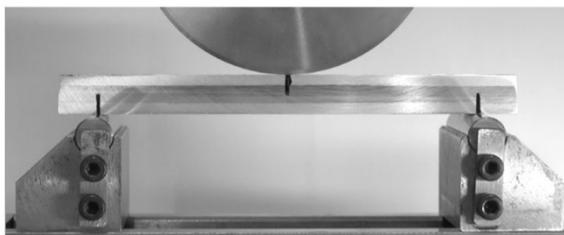
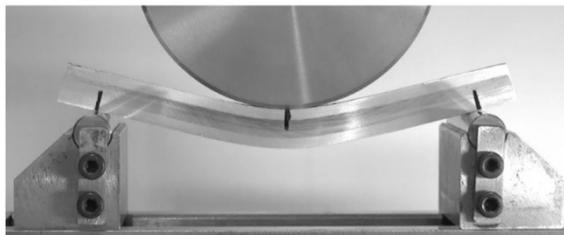


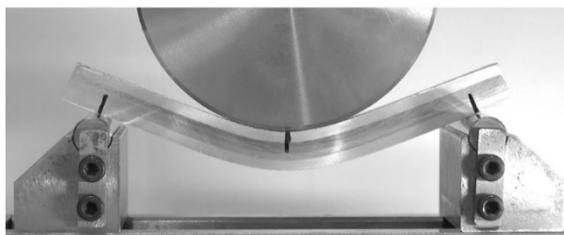
図5 曲率を付与したポーラスAIサンドイッチの発泡手順概略



(a) 押込み量: 0 mm



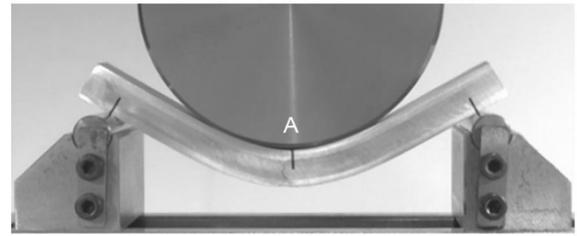
(b) 押込み量: 10 mm



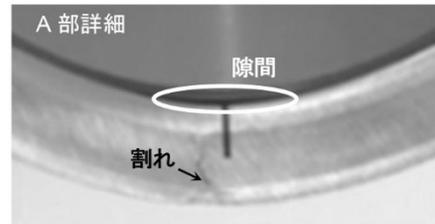
(c) 押込み量: 15 mm

図6 3点曲げ試験におけるサンドイッチ構造を持つプリカーサの変形状態

率を付与したポーラスコア部の体積は、ポーラス AI サンドイッチの側面写真（後に示す図 11, 12(a)参照）をもとに画像処理ソフト ImageJ を用いてコア部の面積を求め、それにポーラス AI サンドイッチの奥行き（15mm）をかけることによって算出した。さらに、前章と同様の方法で、曲率を付与した中央部分の X 線 CT 撮像を行い、ポーラスコア内部の気孔形態を表す各パラメータ (d, e, d_x, e_x, d_m および e_m) を評価した。



(a) 20 mm



(b) 10 mm

図7 3点曲げ試験におけるサンドイッチ構造を持つプリカーサの変形および割れ発生状態

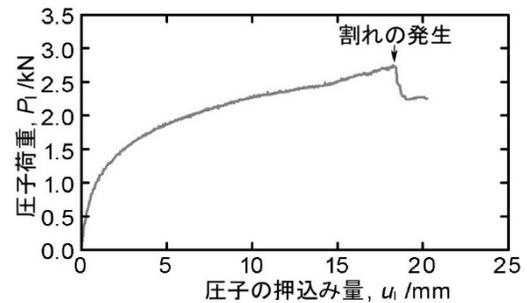
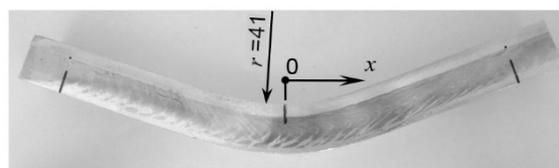


図8 3点曲げ試験における圧子荷重と圧子の押込み量の関係

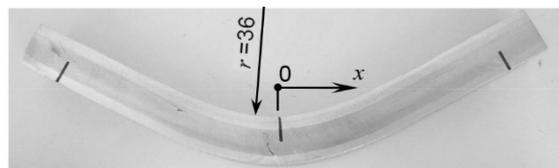
4・2 サンドイッチ構造を持つプリカーサの変形

図 6 に、押込み量 15 mm までの 3 点曲げ試験における、サンドイッチ構造を持つプリカーサの変形挙動の例を示す。押込み量 15 mm までは、プリカーサは割れや界面での剥離などの挙動は見られず、圧子に沿うように塑性変形した。図 7 に、圧子を押し込み量 20 mm まで押込んだ試験におけるプリカーサの外観写真を示す。また、図 8 に、3 点曲げ試験における圧子荷重と押し込み量の関係の例として、圧子の押し込み量 20 mm の結果を示す。この図のように、押し込み量の増加とともに、圧子荷重は顕著に増加した後、ほぼ一定のこう配で増加するようになる。割れは、押し込み量 18 mm 程度で、ほぼ圧子直下の下部表面材と ADC 12 コア部の境界側面において発生し、押し込み量が 1 mm 程度増加する間に、図 4(b)のように、ADC12 コア部の高さ方向ほぼ全体にわたるまで進展した。この割れは上部表面材と ADC12 コア部境界に達すると、進展が停止するため圧子荷重の低下はなくなり、その後、表面材が損傷した。ただし、押し込み量 20 mm では、上下の表面材には割れなどの損傷は現れていなかった。また、押し込み量 15 mm あ



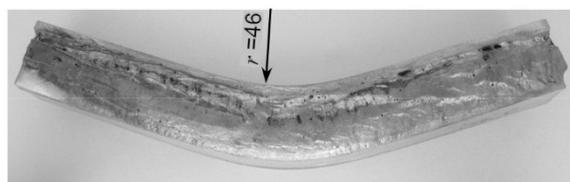
(a) 押込み量: 15 mm

20 mm



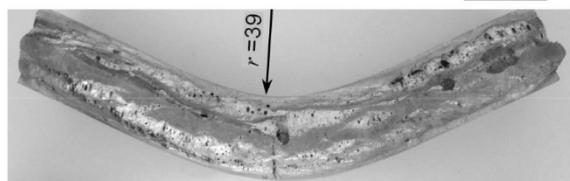
(b) 押込み量: 20 mm

図9 3点曲げ試験後のサンドイッチ構造を持つプリカーサ



(a) 押込み量: 15 mm

20 mm

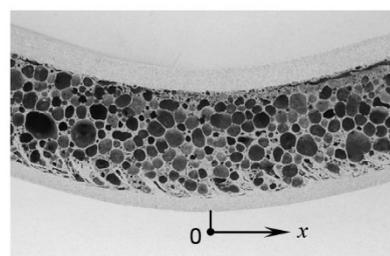


(b) 押込み量: 20 mm

図10 発泡後の曲率を付与したサンドイッチ構造を持つプリカーサ

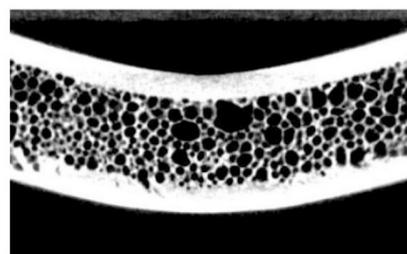
たりで圧子荷重の増加のこう配が若干変化している。これは、今回使用した3点曲げ試験用治具では、押込み量が15 mmを超えたとき、図4(b)にだ円で囲んだように、プリカーサ中央部と圧子の間に隙間ができ、圧子が中央部から離れた部分で接触するようになったことによる影響と考えられる。

図9(a), (b)に、それぞれ、押込み量15 mmおよび20 mmの場合の曲げ試験後のプリカーサの外観写真を示す。これらの上部表面材上面において、 $x=\pm 12$ mmの範囲で3点(プリカーサ中央とその左右に2点、図9(a), (b)参照)を設定し、WinROOFを用いて曲面形状に沿うように曲率半径 r を算出した。図9(a), (b)に、算出した r の値を示しているが、押込み量15 mmでは $r=41$ mmであり、弾性変形分が除去され、圧子の曲率半径(40 mm)より若干大きな値となっている。一方、押込み量20 mmでは $r=36$ mmであった。これは、図7(b)において示したように、圧子が中央部から離れた部分で接触するようになり、中央部がより小さい曲率で曲がるようになったためと考えられる。



(a) 側面写真

10 mm



(b) X線CT画像

図11 曲率を持つポラスAlサンドイッチ (押込み量: 15 mm)

4・3 曲率を付与したサンドイッチの作製結果

図10(a), (b)に、それぞれ、押込み量15 mmおよび20 mmの、発泡したプリカーサの外観写真を示す。発泡によって、プリカーサの上部表面材は、上部型板に接触した。これらの図では、表面からの観察であるが、押込み量15 mm, 20 mmともに、発泡後の側面のコア内部、表面材との境界に割れなどの欠陥は見られない。また図中に、プリカーサ中央部 r の値を示しているが、押込み量15 mmでは $r=46$ mm, 押込み量20 mmでは $r=39$ mmであった。プリカーサ上下面の曲率の型を取った銅板の板厚が0.2 mmであったため、プリカーサの発泡によって若干変形し、曲率半径が増加したようである。しかしながら、これらの r は、図4の平板型ポラスAlサンドイッチの割れ開始時点のそれより小さい値である。なお、この発泡による r の増加は、型を取る銅板の厚みを調整することによって防ぐことが可能と思われる。図11(a), (b)には、それぞれ、図10(a)の発泡したプリカーサから切り出した押込み量15 mmのポラスAlサンドイッチの側面写真と、奥行き方向中央断面のX線CT画像を示す。図12(a), (b)には、それぞれ、図10(b)の発泡したプリカーサから切り出した押込み量20 mmのポラスAlサンドイッチのそれらを示す。これらの図より、ポラスAlサンドイッチのX線CT画像では、押込み量15 mm, 20 mmともに、コア部表面および内部に割れは現れていないことがわかる。これは、押込み量20 mmの曲げ試験で現れた割れは、発泡過程においてコア部は急激に膨張するため、割れ表面の酸化皮膜が細かく分断されてADC12内に混入することにより再接合されたことによるものと考えられる。このように、変形によってコア部に初期の割れが発生しても、発泡による内部の気孔生成にほ

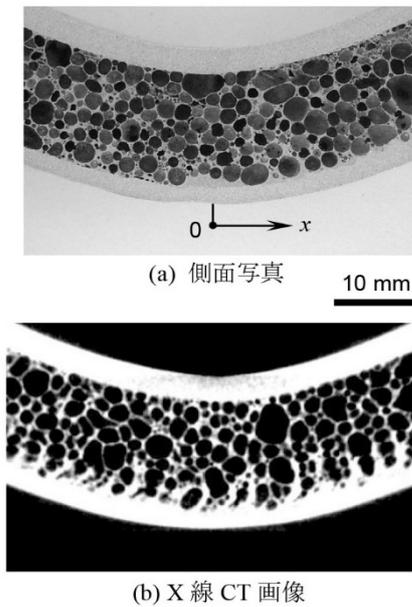


図12 曲率を持つポーラスAlサンドイッチ
(押込み量: 20 mm)

とんど影響していないことがわかる。また、図 11, 12 では、ポーラス Al サンドイッチには発泡による上下の表面材のずれや、加熱による表面材の変形は見られず、曲率を付与した部分の厚みの変化はほとんどなかった。これらは、プリカーサの温度は計測していないが、保持時間 11 min では、表面材は A1050 の固相線温度に達しておらず、表面材に軟化は起きているものの熔融はせず板材形状は保持できたことによるものと考えられる。

4・4 ポーラスコア部の気孔形態

押込み量 15 mm, 20 mm のポーラス Al サンドイッチのコア部の気孔率は、それぞれ 75.1% および 78.7% であった。図 13(a), (b) に、それぞれ、押込み量 15 mm, 20 mm のポーラス Al サンドイッチコア部の、曲率を付与した部分の中央位置からの距離 x (図 11, 12(a) 参照) に対する平均相当円直径 d_x および平均円形度 e_x の変化を、それぞれの d_m , e_m の値とともに示す。これらの図より、 d_m は押込み量 20 mm の方が若干大きくなっているが、 e_m は同程度であり、 d_x , e_x のばらつきは押込み量による差は小さく、気孔形態 (気孔径や形状) はコア部の割れ発生の影響は小さいことがわかる。これらの値や分布状態を、先に ADC12 を用いて作製したポーラスアルミニウム (長さ 20 mm × 奥行き 20 mm × 高さ 20 mm, 気孔率 80.3%)¹⁴⁾ の X 線 CT 画像をもとに、3.2 節と同様の方法で評価した d_m , e_m の値、 d_x および e_x の分布と比較した。詳細な結果は省略するが、ポーラス Al サンドイッチの d_m は ADC12 ポーラスアルミニウムのそれ ($d_m=1.18$ mm) より若干大きい、 e_m は ADC12 ポーラスアルミニウムのそれ ($e_m=0.86$) とほぼ等しく、 d_x と e_x のばらつきも近いものとなっていた。ポーラス Al サンドイッチにおいて d_m が大きくなったのは、今回の作製で

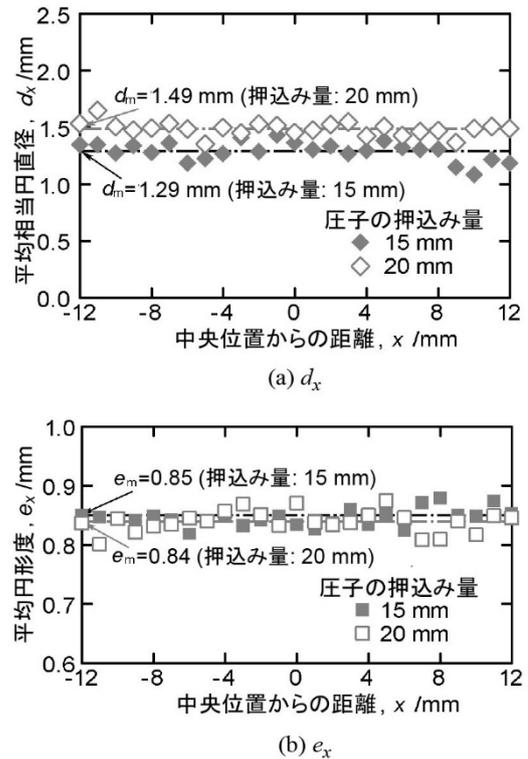


図13 ポーラスAlサンドイッチの中央位置からの距離 x に対するコア部の平均相当円直径 d_x および平均円形度 e_x の変化

は発泡剤 (TiH_2) 粉末を添加した (ADC12 ポーラスアルミニウムでは内在ガスのみを発泡源として活用し発泡剤を添加していない¹⁴⁾) が主な原因と考えられる。また、平板型ポーラス Al サンドイッチの $d_m=1.06$ mm, $e_m=0.76$ と比較しても大きな差はなく、 e_m についてはむしろ向上が見られた。これらのことから、ポーラス Al サンドイッチコア部の気孔形態は、 d_m は若干大きい値であったが、気孔形状や分布は、単一 ADC12 ポーラスアルミニウムや平板型ポーラス Al サンドイッチと同程度の良好なものが得られることがわかる。

以上のように、サンドイッチ構造を持つプリカーサを用いると、曲げ加工によってプリカーサコア部に初期の割れが発生したとしてもポーラスコア部の気孔形成には影響はなく、曲率を持ち気孔形態も良好なポーラス Al サンドイッチを作製することが可能であった。また、この作製法で付与可能な曲率半径の値は、平板型ポーラス Al サンドイッチの曲げ試験で付与できるそれより小さい値であった。ただし、この付与可能な曲率半径の範囲についてはさらに検討が必要である。今回の結果より、サンドイッチ構造を持つプリカーサに曲げ加工などの塑性加工を施すことで、より複雑な形状を持ったポーラス Al サンドイッチの作製が可能となることが示唆される。

5. 結言

本研究では、FSW を用いて作製したサンドイッチ構造

を持つプリカーサに対して3点曲げ試験を実施した後、発泡させることによりポーラス AI サンドイッチの作製を試みた。その結果、曲げ試験によりサンドイッチ構造を持つプリカーサに曲率を付与することが可能であり、そのプリカーサを発泡させることで、曲率を持ち気孔形態も良好なポーラス AI サンドイッチを作製することが可能であることがわかった。さらに、この作製法では、平板型ポーラス AI サンドイッチの曲げ試験で付与できる曲率半径より小さい値まで付与可能であった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 29 年度一般研究開発助成 (AF-2017021) のもとに行われました。ここに記して、厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) J. Banhart: *Manufacture, Progress in Materials Science*, **46** (2001), 559.
- 2) 三好鉄二・濱田 猛・金橋秀豪: *神戸製鋼技報*, **57-2** (2007), 95.
- 3) J. Banhart・H. W. Seeliger: *Adv. Eng. Mater.*, **10** (2008), 793.
- 4) F. Baumgartner・I. Duarte・J. Banhart: *Adv. Eng. Mater.*, **2** (2000), 168.
- 5) T. A. Barnes・I. R. Pashby: *J. Mater. Process. Technol.*, **99** (2000), 72.
- 6) 久米裕二・鈴木祐司・小橋 真・金武直幸: 平成 24 年塑性加工春季講演会講演論文集 (2012), 355.
- 7) T. Utsunomiya・N. Ishii・Y. Hangai・S. Koyama・O. Kuwazuru・N. Yoshikawa: *Mater. Trans.*, **53** (2012), 1674.
- 8) 宇都宮登雄・石井伸幸・半谷禎彦・小山真司・北原総一郎・桑水流理・吉川暢宏: *日本金属学会誌*, **77** (2013), 385.
- 9) T. Utsunomiya・K. Otsuki・Y. Hangai: *Mater. Trans.*, **59** (2018), 999.
- 10) 軽金属学会: *アルミニウムの組織と性質*, (1991), 531.
- 11) 軽金属学会: *アルミニウムの組織と性質*, (1991), 445.
- 12) 辻岡勝美: *日本放射線技術学会雑誌*, **58** (2002), 67.
- 13) 関 宏範・佐々木新悟・大塚正久・中嶋英雄: *日本金属学会誌*, **72** (2008), 278.
- 14) 宇都宮登雄・久保田直之・半谷禎彦・石間経章・川島久宣・桑水流理・吉川暢宏: *鑄造工学*, **86** (2014), 840.