

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06842

研究課題名（和文）金属組成と気孔形態を制御したポーラスメタルコアサンドイッチ構造の開発とその設計法

研究課題名（英文）Development and Strength Evaluation of Porous Metal Core Sandwich Structure Controlled Metal Composition and Pore Structure

研究代表者

宇都宮 登雄（UTSUNOMIYA, Takao）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：60176708

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：摩擦攪拌接合技術を用いて作製した単一ポーラスアルミニウム（Al）コアサンドイッチ構造の曲げ試験を実施し、コア部の気孔率によって曲げ（引張り）とせん断による破損が発生することを示した。2種類のAl合金を用いてポーラスコア部を複合化し、各層厚み、気孔形態が均一な複合化ポーラスAlコアサンドイッチ構造の作製が可能となった。単一ポーラスAlコアサンドイッチ構造の曲げ試験に対する有限要素解析により評価した曲げ/せん断応力分布を用いて、引張りとせん断の各破損基準を導出した。さらに、これらの破損基準は、複合化サンドイッチ構造の曲げ強度に適用可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、2種類のアルミニウム（Al）合金を用い、各層厚み、気孔形態（気孔率や気孔径）を均一に制御した複合化ポーラスAlコアサンドイッチ構造の作製が可能となった。これにより、例えば、低い強度の部分で歩行者を保護するとともに、高い強度を持つ部分で自動車同士の衝撃を吸収できる軽量の衝撃吸収材の実用化が可能となる。また、サンドイッチ構造の曲げ（引張り）とせん断の2つの破損形態に対する破損基準を導出した。このことにより、サンドイッチ構造を使用する際の強度計算が可能となり、ポーラスAlを含む構造部材の実用化を促進させることができる。

研究成果の概要（英文）：Based on the bending test results of sandwich structures with a single layered porous aluminum (Al) core fabricated using a friction stir welding route, it was shown that two types of failures of bending (tensile) type and shear type occurred according to the porosity of the porous core part. A sandwich structure, which has two layered porous core of different Al alloys, could be successfully fabricated. The thickness and pore structures for each layer of porous Al core of the sandwich structure were approximately same. Using the distributions of bending stress and shear stress evaluated by the finite element analyses for the bending tests of sandwich structures with a single layered porous Al core, two types of criteria for tensile type and shear type were derived. Moreover, these criteria could be also applied to a sandwich structure with two layered porous Al core.

研究分野：構造・機能材料

キーワード：多機能材料 環境材料 ポーラスメタル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 多孔質体であるポーラスメタルは、水に浮く超軽量性と優れた衝撃エネルギー吸収特性・吸音特性を合わせ持つ機能性材料である。
- (2) 特性が異なるアルミニウム (Al) 合金を用いて作製したポーラス Al を複合化することにより、複数機能の同時発現が期待できる。
- (3) ポーラス Al は構造体への接合が難しく、また曲げ剛性も低く、実用化のためには緻密板とのサンドイッチ構造とすることが必要である。
- (4) 複合化したポーラス Al をコアに持つサンドイッチ構造の作製は世界に例が無いものである。
- (5) ポーラス Al のサンドイッチ構造の曲げ強度評価法については、単一ポーラス Al コアに対しても検討された事例はない。実用化のためには、曲げ強度評価法の確立が必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

上述の背景を考慮し、本研究の目的をまとめると以下のようになる。

- (1) 金属組成や発泡剤量が変化しても、発泡剤を Al 内に混合でき、金属同士および表面材が接合可能な摩擦攪拌 (FSW) を用いたポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製法を確立する。
- (2) 単一ポーラス Al コアサンドイッチ構造の曲げ/引張り試験を実施し、破損特性および力学特性を明らかにする。
- (3) 金属組成を変化させ、各金属層の厚み・気孔形態を均一化した複合化ポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製法の構築を行う。
- (4) 単一ポーラス Al コアサンドイッチ構造の応力分布の評価を試み、破損時の応力推定法の検討を行う。この推定法を複合化ポーラス Al コアのサンドイッチ構造に応用・展開し、ポーラス Al コアサンドイッチ構造全体としての強度評価法 (破損基準) を導出する。

### 3. 研究の方法

- (1) FSW を用いた作製法にしたがって、アルミニウム合金ダイカスト ADC12 の単一ポーラス Al コアサンドイッチ構造を作製する。
- (2) 作製したサンドイッチ構造の曲げ試験/引張りを実施し、発生する破損形態、破損荷重等の破損特性を調査する。さらに、強度計算に必要なコア部のヤング率等の力学特性値を求める。
- (3) ADC12 (低強度) と A6061 Al 合金 (高強度) を用いて、コア部を複合化したポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製法の検討を試みる。この作製法では、均一な気孔形態を有し、かつ 2 つのポーラス層の厚みが均等な構造の作製条件を見出す。
- (4) 単一ポーラス Al コアサンドイッチ構造の曲げ試験における破損時の応力分布を、有限要素解析を用いて評価する。この応力分布と、曲げ試験結果との比較を通して単一ポーラス Al コアサンドイッチ構造に対する破損基準を見出す。さらに、この破損基準を複合化サンドイッチ構造の曲げ強度に応用・展開し、サンドイッチ構造の破損基準の導出を試みる。

### 4. 研究成果

#### (1) 単一ポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製法

図 1 に、FSW を用いたポーラス Al コアサンドイッチ構造作製法の概略を示す。作製は、片面に A1050 を接合したプリカーサを対向するように固定して発泡させる方式 (図 1(a) ~ (f): 以下、対向発泡方式と呼ぶ) と、両面に A1050 を接合しサンドイッチ構造を持たせたプリカーサを発泡させる方式 (図 1(a), (b), (b)' ~ (f)': 以下、サンドイッチプリカーサ方式と呼ぶ) の 2 種類の方法を試みた。図 1(a) に示すように、はじめに、2 枚のアルミニウム合金ダイカスト ADC12 板材の間に添加剤粉末を散布し、これらの ADC12 板材を純アルミニウム A1050 板材の上に重ね積層板とした。添加剤粉末については、低気孔率のコア部を作製する場合、発泡剤の水素化チタン ( $\text{TiH}_2$ ) 粉末は添加せず、高気孔率のコア部を作製する場合、FSW を施す体積分の Al 質量に対して 1 mass% 添加した。気孔安定剤は、低気孔率、高気孔率ともアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 粉末を 5 mass% 添加した。続いて、図 1(b) に示すように FSW を施し、粉末を ADC12 板材内に攪拌混合させると同時に、A1050 板材と接合させた。FSW はツール回転速度 1000 rpm、走査速度 100 mm/min で行い、8 列 × 4 パスのマルチパス法を用いた。サンドイッチプリカーサ方式では、図 1(b)' のように、さらに積層板の上面に添加剤粉末を同量散布し、もう一枚 ADC12 板材を重ねて同様の FSW を施した後、表面材の A1050 板材を重ね FSW により接合した。この FSW はツール回転速度 2200 rpm、走査速度 100 mm/min、8 列 × 1 パスで行った。その後、図 1(c), (c)', (d), (d)' に示すように、表面材を含んだ形でプリカーサを機械加工により切り出した。作製したプリカーサを、図 1(e), (e)' のように治具に固定し、電気炉内で発泡させた。炉内の保持温度は 948 K とし、保持時間は、対向発泡方式で高気孔率のものを作製する場合 8.5 min、低気孔率のものを作製する場合 11 ~ 12 min とした。また、サンドイッチプリカーサ方式で低気孔率のものを作製する場合 10 min、低気孔率のものを作製する場合 13 min とした。発泡後、図 1(f), (f)' に示すように機械加工により 15 mm × 16 mm × 120 mm の形状に切り出し曲げ試験片とした。コア部の気孔率  $p$  は、対向発泡方式で作製した低気孔率のものは 61 ~ 65 %、サンドイッチプリカーサ方式で作製した低気孔率のものが 65 ~ 68 % であった。また、対向発泡方式で作製した高気孔率のものは 77 ~ 82 %、サンドイッチプリカーサ方式で作製した高気孔率のものは 82 ~ 83 % であった。

作製したサンドイッチ構造の内部を観察するため、X 線透過検査装置 (松定プレジジョン

$\mu$ Ray 8700-LCTN) を用いて X 線 CT 撮像を行った。図 2 に、作製したサンドイッチ構造の例として、対向方式で作製した高気孔率のポーラス Al コアサンドイッチ構造と、その X 線 CT 画像をそれぞれ示す。X 線 CT 画像をもとに算出した気孔の平均相当円直径 (平均気孔径)  $d_m$  は、対向発泡方式で作製した低気孔率のものは 1.0 mm 程度、サンドイッチプリカーサ方式で作製したそれは 1.0 ~ 1.1 mm 程度であった。また、対向発泡方式で作製した高気孔率のものは 1.1 ~ 1.2 mm、サンドイッチプリカーサ方式で作製したそれは 1.2 mm 程度であり、ほぼ同程度であった。

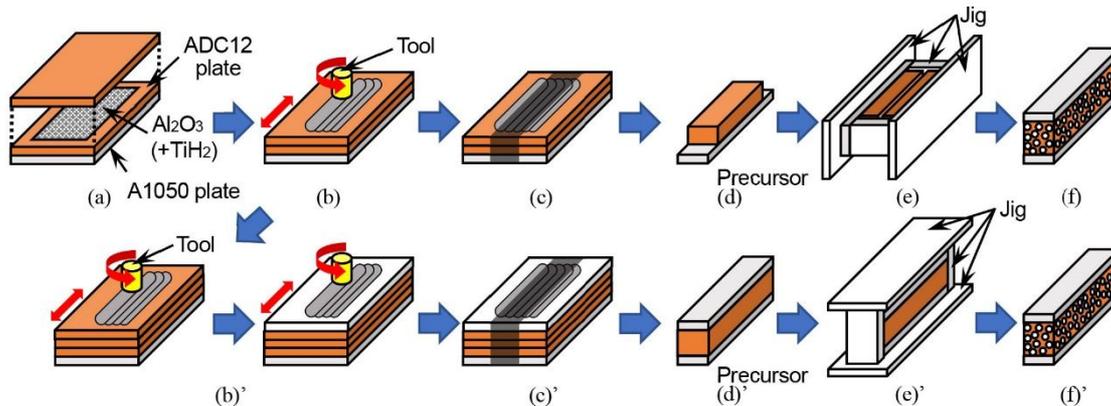


図 1 FSW を用いたポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製概略

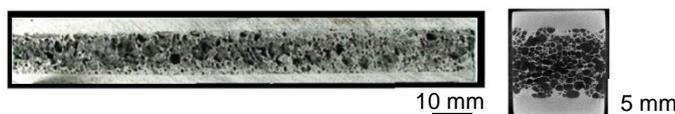
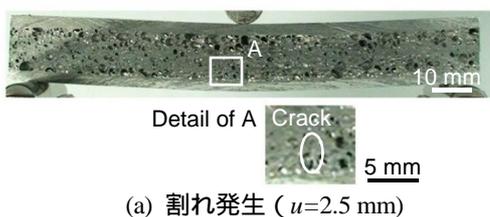
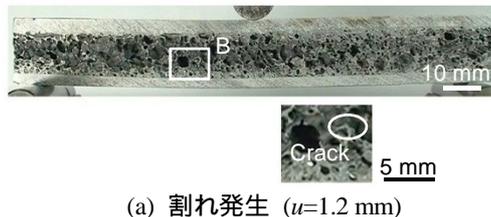


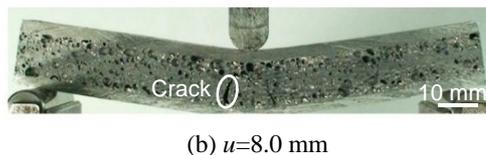
図 2 ポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製例 ( $p=77\%$ )



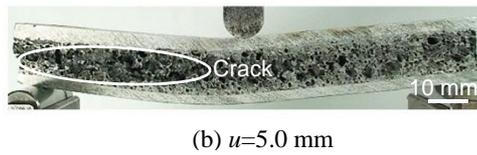
(a) 割れ発生 ( $u=2.5$  mm)



(a) 割れ発生 ( $u=1.2$  mm)



(b)  $u=8.0$  mm



(b)  $u=5.0$  mm

図 3 曲げ変形と破損状態 ( $p=65\%$ )

図 4 曲げ変形と破損状態 ( $p=77\%$ )

## (2) 単一ポーラス Al コアサンドイッチ構造の曲げ試験と破損特性

作製したサンドイッチ構造の 3 点曲げ試験を実施した。図 3, 4 に、試験結果の例として、それぞれ、対向発泡方式で作製した低気孔率および高気孔率の試験片の圧子変位に伴う変形・破損状態を示す。図 3 の低気孔率の試験片では、圧子直下の下部表面材近傍のコア部に縦方向に割れが発生し、図 4 の高気孔率の試験片では、コア部高さ方向ほぼ中央位置で、長手方向に割れが発生した。低気孔率の試験片では、下部表面材近傍のコア部に曲げ (引張り) 応力による破損が、高気孔率の試験片では、せん断応力が最大になるコア部高さ方向中央の位置近傍でせん断による破損が発生したと考えられる。なお、これらの破損特性は、サンドイッチプリカーサ方式で作製した試験片においても同様であった。したがって、これら 2 つの破損形態に対応した破損基準が必要となることがわかる。また、図 5 に、曲げ試験で得られた圧子荷重と変位の関係を示す。高気孔率の試験片は、低気孔率の試験片より小さい変位で、割れが発生したことにより荷重が低下し始めている。これは、せん断による破損限界値が低いことを示唆している。この図には、サンドイッチプリカーサ方式で作製した高気孔率の試験片の結果も載せているが、この試験片では、割れの発生が対向発泡方式より遅く (破損限界値が高く) なっていることがわかる。これは、対向発泡方式では、発泡した 2 つのプリカーサが合体してコア部を構成するため、コア部中央近傍でセル壁が薄くなると予想されるが、サンドイッチプリカーサ方式では、FSW によりコア部は一体となるため、中央部近傍でのセル壁が厚くなったことによるものと思われる。

さらに、サンドイッチ構造より長手方向に幅 15 mm の試験片を切り出し、引張り治具を接着し引張り試験を実施した。図 6 に、試験で得られた平均実応力 - 公称ひずみの関係の例として、低気孔率のコア部の関係を示す。ここで、平均実応力  $\sigma_{mT}$  は、公称引張り応力をコア部の気孔率

$p$  を用いて  $(1 - p)$  で除した値として定義した．この関係からコア部ヤング率  $E$ ，降伏応力  $\sigma_y$  および破損応力  $\sigma_c$  を定め，コア部の真応力 - 真ひずみ関係として用いた．

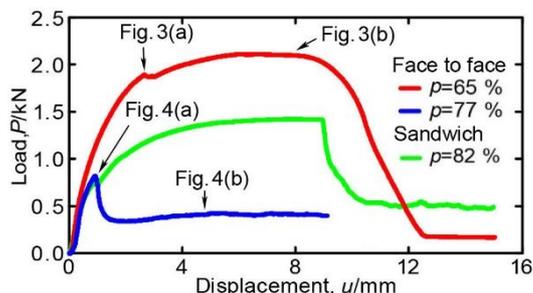


図 5 圧子荷重とひずみの関係

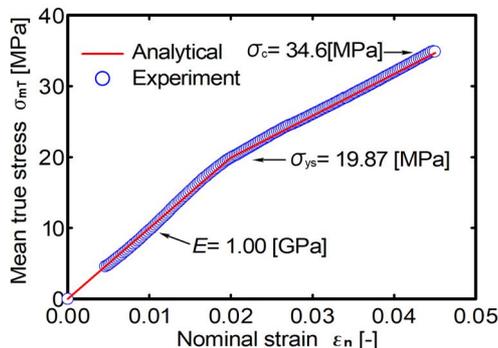


図 6 平均実応力と公称ひずみ関係 (低気孔率)

### (3) コア部を複合化したサンドイッチ構造の作製法

ADC12 および A6061 をコア部材料として，複合化ポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製を試みた．ADC12 板材および A6061 板材を用い，図 1(a) ~ (c) と同様の方法で A1050 板材を表面材としたプリカーサを作製した (図 7(a), (a)')．ただし，ADC12 プリカーサについては，図 1(b)' のように ADC12 板材をさらに 1 枚重ねたものを作製した (図 7(a))．また，作製するサンドイッチ構造のコア部の気孔率  $p$  を 70% 程度に設定し，ADC12 プリカーサには発泡剤 (TiH<sub>2</sub> 粉末) は添加せず，A6061 プリカーサの発泡剤添加量は，後述するように，コア部内の気孔形態の状態により調整した．作製した ADC12, A6061 プリカーサ (図 7(b), (b)') は，図 7(c) のように，対向発泡方式で，973 K に保った電気炉内で発泡させた．発泡後は，図 7(d) に示すように，機械加工により 15 mm × 120 mm × 16 mm の形状に切り出した．図 8 に，作製したサンドイッチ構造の例を示す．さらに，作製したサンドイッチ構造の内部を観察するため，単一のサンドイッチ構造と同様に X 線 CT 撮像を行った．その画像の解析結果を基に，コア部各層の気孔形態や厚みが同程度になるように発泡剤添加量，発泡時の保持時間  $t_H$ ，A6061 プリカーサ厚み  $t_{6061}$  を調整した．

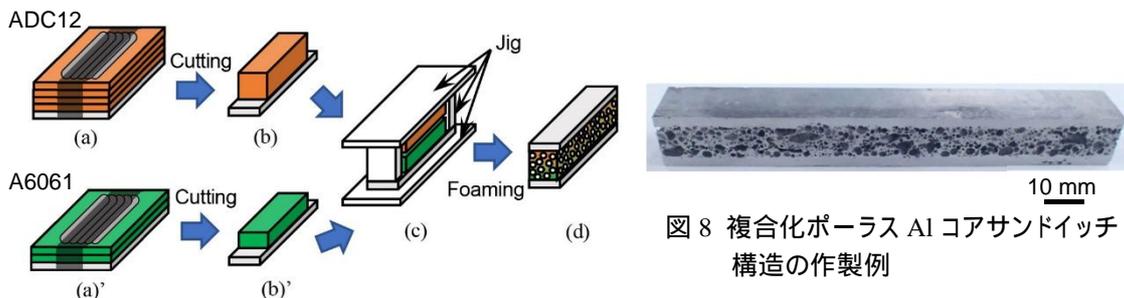
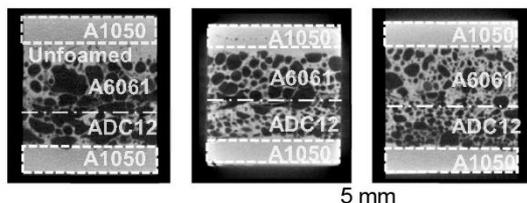


図 7 複合化ポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製概略



(a)  $t_{6061}=5.7$  mm, (b)  $t_{6061}=5.0$  mm, (c)  $t_{6061}=5.0$  mm, TiH<sub>2</sub>: 0.6 mass%, TiH<sub>2</sub>: 0.6 mass%, TiH<sub>2</sub>: 0.55 mass%,  $t_H$ : 10 分 30 秒  $t_H$ : 9 分 40 秒  $t_H$ : 9 分 30 秒

図 9 X 線 CT 画像 ( $t_{ADC}=9.5$  mm)

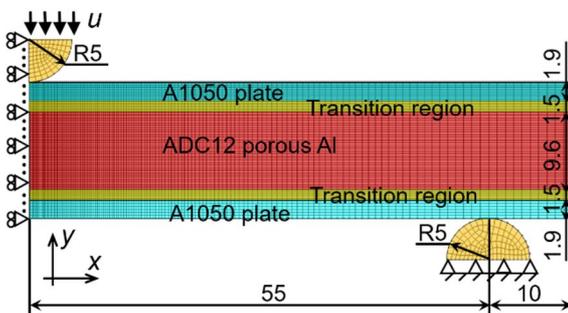


図 10 サンドイッチ構造の有限要素モデル

図 9(a), (b), (c) に，作製結果の例として，それぞれ，厚み  $t_{ADC}=9.5$  mm の ADC12 プリカーサと厚み  $t_{6061}=5.7, 5.0$  mm の A6061 プリカーサに発泡剤を 0.6 mass% 添加させて作製したサンドイッチ構造，および  $t_{6061}=5.0$  mm の A6061 プリカーサに TiH<sub>2</sub> を 0.55 mass% 添加させて作製したサンドイッチ構造の長手方向中央断面の X 線 CT 画像を示す (ただし，プリカーサ厚み  $t_{ADC}, t_{6061}$  は表面材を含んだ厚みである)．図 5(a) では，ADC12 層は A6061 層より薄く，さらに A6061 層に未発泡領域が現れていることがわかる．これは，熔融温度が低い ADC12 プリカーサが発泡を終えた後に，熔融温度が高く，発泡剤を含んだ A6061 が発泡し，ADC12 層を押し潰したことによるものと考えられる．そこで，A6061 層の発泡を促進させ，かつ層の厚みを減少させるため，A6061 プリカーサの厚みを薄くし，作製を行った． $t_{6061}=5.0$  mm の図 5(b) では，コア部の ADC12 層の厚みが増加し，A6061 層の未発泡領域も減少した．さらに，A6061 層の気孔が小さくなり

ADC12 層の気孔形態との差は小さくなったが、若干 A6061 層が ADC12 層を押し潰す傾向がみられた。 $t_{6061}=5.0$  mm の A6061 プリカーサの発泡剤添加量を 0.55 mass% とした図 5(c) では、A6061 層の発泡を抑え気孔の粗大化を防ぐことにより、A6061 層、ADC12 層の厚みをほぼ等しくでき、さらに A6061 層の気孔形態を ADC12 層のそれに近づけることができた。発泡剤添加量 0.55 mass% のサンドイッチ構造のコア部気孔率  $p=66\%$  程度、平均気孔径  $d_m=0.9 \sim 1.1$  mm であった。

以上のことから、保持時間、プリカーサ厚みおよび発泡剤添加量を適切に調整することにより、A6061 層と ADC12 層の厚みが同程度で、各層における気孔形態が良好な複合化ポーラス Al コアサンドイッチ構造の作製が可能となることがわかった。

#### (4) 曲げ試験に対する有限要素解析とサンドイッチ構造の破壊基準

図 10 に、有限要素解析に用いた要素分割の例を示す。要素分割は曲げ試験に用いた単一ポーラス Al サンドイッチ構造の寸法にあわせて作成し、その対称性を利用して 1/2 の領域を解析対象とした。要素として、8 節点四角形要素を用いた。この要素分割では、表面材とポーラス Al 部の界面近傍に、材料特性値を表面材の値からコア部の値に連続的に変化させる遷移層を設けた。表面材の真応力 - 真ひずみ関係は、A1100 工業用 Al の引張り試験をもとに求め、コア部のそれは、先に実施したポーラス Al の引張り試験で得られた関係を用いた(図 6 参照)。遷移層内のヤング率、ポアソン比および真応力 - 真ひずみ関係は、表面材の値からポーラス Al コア部のそれに、次式の 3 次式で変化するように定めた。

$$A_{TR} = 2 \frac{A_{SS} - A_{AF}}{L} l^3 - 3 \frac{A_{SS} - A_{AF}}{L} l^2 + A_{SS} \quad (1)$$

ここで、 $A$  はヤング率や降伏応力等の値、添字の  $TR, SS, AF$  は、それぞれ、遷移層内、表面材およびポーラス Al 部の値を示す。 $L, l$  は、それぞれ、遷移層の厚みおよび表面材界面から遷移層側に測った距離である。ポアソン比  $\nu$  は、全ての材料で 0.3 とした。圧子および支持部は剛体とし、これらと表面材の摩擦係数  $\mu=0.15$  とした。解析では、圧子上面の節点に一樣変位  $u$  を、曲げ試験で得られた破損開始時点の値(低気孔率で  $u=2.5$  mm、高気孔率で  $u=0.92$  mm)まで加えた。解析は、ANSYS APDL (CYBER-NET) を用いて行った。

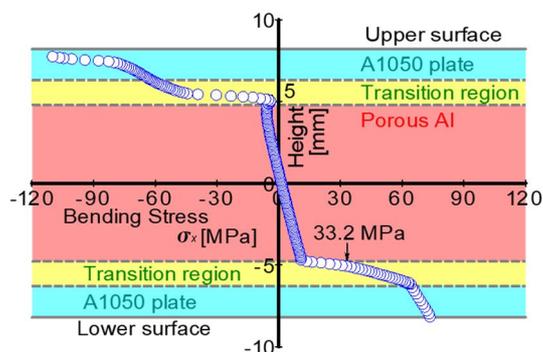


図 11 ポーラス Al コアサンドイッチ構造における曲げ応力  $\sigma_x$  の分布

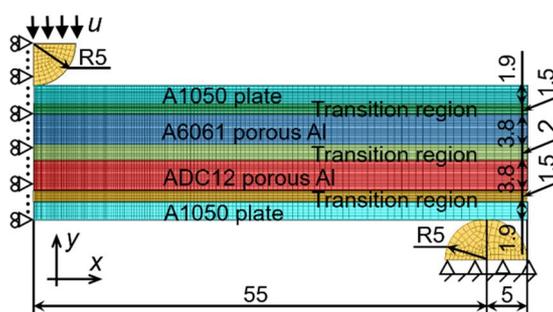


図 12 複合化サンドイッチ構造の有限要素モデル

図 11 に、解析で得られた、低気孔率のサンドイッチ構造における、圧子直下の(長手方向中央)断面における曲げ応力  $\sigma_x$  の分布を示す。下部の遷移層とポーラス Al の境界近傍(下部表面材から 3.1 mm の位置)で  $\sigma_x = 33.2$  MPa が得られた。この位置は、試験で現れたき裂発生位置とほぼ一致し、また  $\sigma_x$  の値は、低気孔率の引張り試験で得られたき裂発生時の引張り応力  $\sigma_c = 34.6$  MPa (図 6 参照) と近い値となった。これらのことより、引張りによる破壊基準は

「サンドイッチ構造下部の遷移層とポーラス Al の境界における  $\sigma_x$  が引張りの限界値に達したとき破損が起こる」

と定義できる。一方、解析結果は省略するが、高気孔率のサンドイッチ構造の、圧子直下から長手方向に 10 mm 離れた、せん断によるき裂が発生した位置を含む断面におけるせん断応力  $\tau_{xy}$  の分布では、この断面の中立軸において、せん断応力が最大値 ( $\tau_{xy\max} = 4.1$  MPa) となっていることがわかった。したがって、せん断による破壊基準は

「サンドイッチ構造中立軸の  $\tau_{xy\max}$  がその限界値に達したときせん断による破損が起こる」

と定義できる。図 12 に、複合化ポーラス Al コアのサンドイッチ構造に対する要素分割の例を示す。複合化のサンドイッチ構造の場合は、表面材とポーラス Al 部の界面に加え、コア部内の ADC12 層と A6061 層の界面近傍にも遷移層を設けている。A6061 の単一ポーラス Al の平均実応力 - 公称ひずみの関係は、ADC12 の場合と同様に引張り試験より求めることができた。このように、複合化のサンドイッチ構造では、コア部各層の界面に遷移層を設けることにより、発生する引張りによる破損に対する曲げ応力  $\sigma_x$  やせん断応力  $\tau_{xy}$  の分布を評価でき、上記の各破損形態に対応した基準の適用が可能となった。

以上のことより、単一・複合化のいずれのポーラス Al サンドイッチ構造に対しても上記の引張り・せん断の破壊基準が適用可能であり、強度評価に有効と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Utsunomiya, K. Otsuki, Y. Hanga	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication of Aluminum Foam Core Sandwich Using Sandwich-Type Foamable Precursor with Two Face Sheets by Friction Stir Welding Route	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 999 - 1004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018037">https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018037</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 宇都宮登雄, 大槻晃平, 半谷禎彦, 金明秀	4. 巻 69
2. 論文標題 摩擦攪拌接合を用いて作製したサンドイッチ構造プリカーサの曲率付与と発泡後のアルミニウムフォームコアの気孔形態評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 軽金属	6. 最初と最後の頁 107 - 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2464/jilm.69.107">https://doi.org/10.2464/jilm.69.107</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 廣西滉也, 宇都宮登雄, 半谷 禎彦
2. 発表標題 アルミニウムフォームコアサンドイッチ構造の破損形態に対応した曲げ強度評価
3. 学会等名 軽金属学会第137期秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井豪太, 宇都宮登雄, 半谷禎彦, 天谷賢児, 橋村真治
2. 発表標題 光加熱発泡を用いて作製した複合化ポラスアルミニウムの気孔形態の改善
3. 学会等名 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇都宮登雄, 廣西滉也, 半谷禎彦
2. 発表標題 傾斜機能ポラスアルミニウムをコアとしたサンドイッチ構造の作製
3. 学会等名 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ラウス勉, 宇都宮登雄, 青木孝史朗, 半谷禎彦
2. 発表標題 傾斜機能化したアルミニウムフォームをコアにもつサンドイッチ構造の作製
3. 学会等名 軽金属学会第138回春期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大槻晃平, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 吉川暢宏
2. 発表標題 ポラスAIをコアとしたサンドイッチ構造体の接合界面における強度
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期(第163回)講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣西滉也, 宇都宮登雄, 仲谷昂一郎, 半谷禎彦
2. 発表標題 アルミニウムフォームコアサンドイッチ構造の曲げ試験における破損特性
3. 学会等名 軽金属学会第135回秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大槻晃平, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 吉川暢宏
2. 発表標題 発泡アルミニウムと金属平板サンドイッチ構造体の形状付与
3. 学会等名 軽金属学会第135回秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仲谷昂一郎, 廣西滉也, 宇都宮登雄, 半谷禎彦
2. 発表標題 ポラスアルミニウムコアサンドイッチ構造の気孔率と破損形態
3. 学会等名 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大槻晃平, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 吉川暢宏
2. 発表標題 摩擦攪拌接合を応用したA6061プリカーサ/A1050サンドイッチパネルの作製とその発泡挙動
3. 学会等名 日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 仲谷昂一郎, 宇都宮登雄, 須藤俊, 半谷禎彦, 吉川暢宏
2. 発表標題 ポラスアルミニウムコアサンドイッチ構造の作製とX線CT撮像による気孔形態観察
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2017材料力学カンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大槻晃平, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 吉川暢宏
2. 発表標題 摩擦攪拌接合で作製したA6061プリカーサコア/A1050サンドイッチパネルの曲げ加工およびその発泡挙動
3. 学会等名 第68回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大槻晃平, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 吉川暢宏
2. 発表標題 ポラスAIプリカーサをコアとしたサンドイッチ構造体の形状付与と発泡による影響
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季(第162回)講演大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	半谷 禎彦  (HANGAI Yoshihiko)  (80361385)	群馬大学・大学院理工学府・教授   (12301)	