X線CTを用いたシタクティックフォーム／アルミニウム フォーム相互浸透複合材料の圧縮変形挙動の解析

成瀬 亘*・近藤 紗也子**・小橋 眞***
金武 直幸***・岩間 由希****・西脇 武志****

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 64, No. 11 (2014), 598–603
© 2014 The Japan Institute of Light Metals

X-ray CT observation and analysis of compressive deformation behavior of syntactic foam/aluminum foam interpenetrating phase composites

Wataru NARUSE*, Sayako KONDO**, Makoto KOBASHI***
Naoyuki KANETAKE***, Yuki IWAMA**** and Takeshi NISHIWAKI****

Interpenetrating phase composites (IPCs), in which each phase forms a 3-dimensionally interconnected network, show a new class of reinforcement morphology. In this study, syntactic foams, which are made of hollow glass microspheres embedded in a polymer matrix, are reinforced with open-cellular porous aluminum foams. Both deformation behavior and a strengthening mechanism of the syntactic foam/aluminum foam IPCs (SF/AF IPCs) are investigated with the help of an X-ray Computed Tomography (X-ray CT). Deformation behavior of the aluminum foam in the SF/AF IPC during compressive deformation is observed by the X-ray CT. The von-Mises stress distribution in the aluminum foam under compression was simulated by a finite element method for both the aluminum foam alone and the SF/AF IPC. High von-Mises stresses are detected in a layer with a relatively higher porosity of aluminum foam alone. Cell edges in the aluminum foam of the SF/AF IPC are fractured in the perpendicular direction to the compressive direction.

(Received June 5, 2014 Accepted July 29, 2014)

Keywords: syntactic foam, aluminum foam, interpenetrating phase composite, X-ray computed tomography, image-based simulation

1. 緒 言

樹脂中に中空フィラーを混合したクローズドセル型のポーラス材料であるシタクティックフォームは、その軽量性、高比剛性、高耐衝撃性などから注目を集めている。現在、海中探査船の浮力材やサンドイッチパネルのコア材などに用いられている^{1),2)}。その用途から、さらなる圧縮強度、エネルギー吸収能の向上が求められており、金属系素材との複合化が検討されている³⁾。

従来、複合材料の複合形態は、粒子強化、不連続繊維強化、連続繊維強化などに分類されてきた⁴⁾。これに対して、各相が三次元的に連続して結合した複合形態を、その構造から相互浸透複合材料 (Interpenetrating Phase Composite, IPC) と呼ぶ⁵⁾。ほとんどの複合材料では強化相がマトリックスに三次元的には不連続に分散するが、IPCでは強化相自体が完全に連続した一つの相を形成している。このような構造から、三

次的に等方的で方向に依存せず、複合化により各相が持つ特性が有効に発揮されるという特長を持つ。前述のシタクティックフォームとオープンセル型のアルミニウムフォームと複合化したIPCは、圧縮強度が大幅に向上することが報告されている³⁾。しかし、その変形挙動や強化機構は明らかにされていない。そこで本研究では、X線CTを用いてシタクティックフォーム／アルミニウムフォームIPC（以下、SF/AF IPCと表記する）の圧縮変形過程におけるアルミニウムフォームの形状変化を3Dモデルにより可視化した。3Dモデルにより圧縮中のアルミニウムフォームの変形挙動を明らかにすることにより、複合化による強化機構について検討した。また、X線CT像から構成したイメージベースモデルを用いたシミュレーションにより、圧縮変形によりアルミニウムフォーム内に生じる応力状態を解析し、実際の変形挙動との比較を行った。

*名古屋大学大学院生 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)。Graduate Student, Nagoya University (Furou-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8601).

**名古屋大学大学院生 (名古屋市) [現在：ドルトムント工科大学大学院生]。Graduate Student, Nagoya University (Nagoya-shi, Aichi). [Present: Graduate Student, Technische Universität Dortmund]

***名古屋大学 (名古屋市)。Nagoya University (Nagoya-shi, Aichi). E-mail: kobashi@numse.nagoya-u.ac.jp

****名古屋市工業研究所 (名古屋市)。Nagoya Municipal Industrial Research Institute (Nagoya-shi, Aichi).

2. 実験方法

2.1 試料

シンタクティックフォームのマトリックスとしてエポキシ樹脂を、その硬化剤として変性脂肪族ポリアミンを用いた。中空フィラーとして硼珪酸ナトリウムガラスの中空ビーズ (Q-cel 5020, 粒径50~100 μ m, ポッターズパロティーニ) を用い、アルミニウムフォームとして相対密度11.5%のオープンセル型アルミニウムフォーム (Duocel, 気孔目開き寸法約2mm, ERG) を用いた (Fig. 1)。

SF/AF IPCの作製方法の概略を Fig. 2 に示す。まず中空フィラーをエポキシ樹脂に対して体積配合率が30%になるように秤量して混合し、中空フィラーを全体に均一に分散させ、硬化剤を混合して十分に攪拌した。なお、中空フィラー体積率が40%とすると樹脂との複合化が困難であり、健全な試料が作製できなかったため、中空フィラー体積率は30%とした。それを直径30mm, 高さ35mmの成形型に流し込み、そこに20mm四方, 高さ30mmの直方体に切出したアルミニウムフォームを浸漬し、真空脱泡を繰り返すことによってフォームの空隙部に樹脂を浸透させた。その後、室温にて4日かけて樹脂を硬化させ、硬化後、試料を直径15mm, 高さ22.5mmの円柱形状に加工した。

Fig. 1 Appearance of (a) aluminum foam (Duocel®) and (b) micro hollow beads (Q-cel®) used in this research.

Fig. 2 Schematic illustration of the manufacturing process of syntactic foam/aluminum foam IPCs.

比較材として、アルミニウムフォーム単体、シンタクティックフォーム単体もそれぞれ直径15mm, 高さ22.5mmの円柱形に加工した。

2.2 圧縮試験

SF/AF IPC, シンタクティックフォーム単体, アルミニウムフォーム単体それぞれを、油圧万能試験機を用いて連続的に圧縮ひずみを与え、応力-ひずみ曲線を測定した。このときのクロスヘッドスピードは1.4mm/minとした。また、クロスヘッドとの接触面である試料上下面には約20mm角に切取ったテフロンシートを敷いて潤滑した。

2.3 圧縮変形中の変形過程観察

2.3.1 X線CT像からの気孔率計測

アルミニウムフォーム単体, SF/AF IPCの外観を Fig. 3 に示す。これらを高分解能マイクロCT TOSCANER-32252 μ hd (東芝ITコントロールシステム㈱)を用いてスキャンし、アルミニウムフォーム単体とSF/AF IPC中のアルミニウムフォームのX線CT像を得た。このとき用いたX線管のターゲット材質はタングステンであり、また、X線管の管電流、管電圧はそれぞれ50kV, 100 μ Aとした。

得られたX線CT像に対し、試料全体でアルミニウムフォームの体積率が11.5%に最も近くなるように閾値を設定して二値化画像を得た。さらに、得られた画像を積層して3Dモデル化を行った。このようにして得たアルミニウムフォームの3Dモデルを、円柱高さ方向に10等分し、それぞれの領域に含まれるアルミニウムと空気 (SF/AF IPCではシンタクティックフォーム) の画素数を得た。そこから、その領域にある全画素数に対する空気もしくはシンタクティックフォームの画素数の割合を求めることで、その領域のアルミニウムフォームの気孔率を算出した。これらの画像処理には、VOXELCON 2011 (㈱くいんと)を用いた。

2.3.2 変形過程観察

アルミニウムフォーム単体, SF/AF IPCの各試料において、円柱の高さ方向に油圧万能試験機を用いて圧縮ひずみを与えた。与えたひずみがおおよそ0%, 5%, 10%, 20%, 40%になった段階で試料を取出してX線CTによる撮像を行い、そのときのアルミニウムフォームの形状をモデル化することで、変形過程の観察を行った。このとき、観察の際に正確に同じ位置を探しやすくするため、目印として5mm角の銅のシールをそれぞれの試料に2か所貼付して圧縮、X線CTを行った。再構成によって得た断面図の画素サイズは0.031 $\times$ 0.031mm,

Fig. 3 Appearance of (a) aluminum foam alone and (b) syntactic foam/aluminum foam IPC.

Fig. 4 Appearance of aluminum foam alone under compression test.

Fig. 5 Appearance of syntactic foam/aluminum foam IPC under compression test.

Table 1 Physical properties used for FEM analysis.

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio (—)
Aluminum ⁶⁾	69	0.33
Syntactic foam ⁷⁾	2.2	0.34

スライスピッチは0.02 mmであった。

2.4 イメージベースシミュレーション

VOXELCON 2011を用いて、圧縮変形前のアルミニウムフォーム単体およびSF/AF IPC中のアルミニウムフォームのボクセルモデルを作製した。このときのボクセルサイズは0.031×0.031×0.02 mmであり、アルミニウムとシンタクティックフォームの物性値にはTable 1に示す値を用いた^{6), 7)}。このモデルに、拘束条件として円柱底面の上下変位を拘束し、上面を下方向に5%変位させて解析を行った。側面と、上下面の上下方向以外の変位は拘束しなかった。ただし、剛体移動を防止するため、上下面中心付近の各1ボクセルは上下面方向以外の変位も拘束した。解析は、アルミニウムもシンタクティックフォームも線形弾性体として行った。また、アルミニウムとシンタクティックフォームは完全に結合していると仮定して解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 圧縮試験

アルミニウムフォーム単体、SF/AF IPCの圧縮試験中の変形の外観をそれぞれFig. 4およびFig. 5に示す。アルミニウムフォーム単体では圧縮に伴って半径方向への広がりほとんど見られなかったが、SF/AF IPCは圧縮によって樽型に変

Fig. 6 Stress-strain curves of syntactic foam/aluminum foam IPC, syntactic foam alone, aluminum foam alone obtained by compression test.

形していた。SF/AF IPCでは、アルミニウムフォームはシンタクティックフォームとほぼ一体となって変形しており、分離して変形するような部分は見られなかった。

圧縮試験により得た応力-ひずみ曲線をFig. 6に示す。シンタクティックフォーム単体、アルミニウムフォーム単体と比較して、SF/AF IPCでは圧縮強度が大幅に向上していた。これは、従来研究の結果と一致するものであった³⁾。

3.2 変形過程の観察

3.2.1 巨視的変形過程の観察

アルミニウムフォーム単体の外観写真、3Dモデル画像とCT画像から測定した気孔率分布をFig. 7に示す。この試験片では、Fig. 7中上部の気孔率が相対的に下部より高いことが理解できる。なお、このときの3Dモデルの視野全体の気孔

率は87.8%であり、実際の気孔率88.5%と良好な一致を示している。次に、X線CTにより変形過程の3Dモデルを作製したものをFig. 8に示す。ここでは、観察しやすくするために円柱形のモデルの写真手前側と奥側をそれぞれ5~10mmほど切り取り、中央部のみを表示している。アルミニウムフォーム単体では、ひずみが小さい段階(6.3%)から試料上部において局所的な変形帯が観察され、ひずみを増すにつれて、その変形帯の周囲が徐々に変形する様子が観察された。この試料について、圧縮ひずみを5%付与した際の試料内部のミーゼス相当応力分布をシミュレーションした結果をFig. 9に示す。気孔率が相対的に高い試料上部に相対的に高いミーゼス相当応力が発生し、変形が優先的に進行することが確認できた。このように試料内部に存在する気孔率の分布により、試料内部に発生する応力状態にも不均一性が現れ、圧縮軸方向の変形が局所的に生じたものと考えられる。

次に、SF/AF IPCの外観写真と、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームを撮像した3Dモデル画像、CT画像から算出したアルミニウムフォームの気孔率分布をFig. 10に示す。このときの3Dモデルの視野全体の気孔率は89.0%であり、実際の気孔率88.5%と良好な一致を示している。この試験片でも、アルミニウムフォーム単体と同じようにFig. 10中上部の気孔率が相対的に下部より高かった。変形過程をX線CTにより3Dモデル化した結果をFig. 11に示す。SF/AF IPC中

Fig. 7 Porosity measurement processes and porosity distribution of aluminum foam alone.

Fig. 8 3D models of aluminum foam alone under compression test obtained by X-ray CT.

のアルミニウムフォームでは、初期のアルミニウムフォームには気孔率分布があるにも関わらず、変形初期の局所的な変形帯は観察されず、比較的均一に変形が進行していた。SF/AF IPC中のアルミニウムフォームはアルミニウムフォームの空隙部分がシンタクティックフォームで満たされており、圧縮によってシンタクティックフォームが圧縮軸に垂直方向に広がる。それに伴ってアルミニウムフォームが圧縮軸に垂直方向の引張変形をするため、比較的均一に変形したものと考えられる。この試料についても、圧縮ひずみを5%付与した際にアルミニウムフォーム部分に生じるミーゼス相当応力分布をシミュレーションした結果をFig. 12に示す。Fig. 9に示したアルミニウムフォーム単体の結果と比較すると、試料全体に比較的均一にミーゼス相当応力が発生していることが確認できた。また、シンタクティックフォーム部に発生する応力は、アルミニウムフォームの応力集中部に発生する応力と比較すると1%程度と非常に小さかった。

3.2.2 微視的変形過程の観察

アルミニウムフォーム単体、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームそれぞれについて、試料中の一部の変形過程を追った結果をFig. 13に示す。ここでは、変形前に圧縮軸に対してほぼ平行であったセルエッジを四角で、ほぼ垂直であったセルエッジを丸で囲ってその変形過程を比較する。まず、変形前に圧縮軸に対してほぼ平行であったセルエッジの変形過程を比較する。アルミニウムフォーム単体では圧縮初期段階から座屈変形をしているのに対し、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームでは、セルエッジが座屈することなく、最終的には圧縮軸に垂直方向に配向する様子が観察された。これは、シンタクティックフォームが圧縮ひずみによって圧縮軸に垂直方向、すなわち試料の直径方向に広がることによる。その広がりに伴い、セルエッジが圧縮軸に垂直方向に配向したと考えられる。次に、変形前に圧縮軸にほぼ垂直であったセルエッジの変形過程を観察すると、アルミニウムフォーム単体では曲げ変形をしているのに対し、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームは圧縮軸に垂直方向にセルエッジが引張破断している様子が観察された。これも、圧縮によってシンタクティックフォームが試料の直径方向に広がったため起こったと考えられる。

この変形過程観察より、アルミニウムフォーム単体とSF/AF IPC中のアルミニウムフォームでは変形モードが大きく異なることがわかった。SF/AF IPC中のアルミニウムフォームではセルエッジが圧縮軸に垂直方向に伸長・破断する変形モードとなることで、大きな外力を負担し、アルミニウムフォームとの複合化によって生じるシンタクティックフォー

Fig. 9 Von Mises stress distribution in aluminum foam alone with a 5% compressive strain obtained by image-based simulation.

Fig. 10 Porosity measurement processes and porosity distribution of aluminum foam in syntactic foam/aluminum foam IPC.

Fig. 11 3D models of aluminum foam in syntactic foam/aluminum foam IPC under compression test obtained by X-ray CT.

ムの圧縮強度の大幅な向上に寄与していると考えられる。

また、このように、目視では確認できないIPC中のアルミニウムフォームの変形挙動も、X線CTを行うことによって細部にわたって明確に観察することが可能であった。

4. 結 言

オープンセル型ポーラスアルミニウムフォームと、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームの変形挙動をX線CTを用いて観察し、さらにイメージベースシミュレーションを行うことで、以下の知見が得られた。

(1) イメージベースシミュレーションから、アルミニウムフォーム単体ではフォーム内で相対的に気孔率の高い部分に大きな応力が発生するのに対し、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームでは初期の気孔率分布によらず比較的均一な応力分布となることがわかった。

(2) アルミニウムフォーム単体で圧縮した場合は、低ひずみ段階から相対的に気孔率の高い部分で局所的な変形帯が観察された。一方、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームでは局所的な変形帯は観察されず、比較的一様な変形が観察された。

Fig. 12 Von Mises stress distribution in aluminum foam in syntactic foam/aluminum foam IPC with a 5% compressive strain obtained by image-based simulation.

Fig. 13 Local compressive deformation processes of (a) aluminum foam alone and (b) aluminum foam in syntactic foam/aluminum foam IPC.

(3) セルエッジの局所的な変形過程を見ると、アルミニウムフォーム単体では曲げ・座屈変形をしていたのに対し、SF/AF IPC中のアルミニウムフォームでは圧縮軸に垂直方向に配向したり、伸張・破断したりしている様子が観察された。圧縮試験の結果を見てもSF/AF IPCはアルミニウムフォーム単体、シンタクティックフォーム単体と比較して大きな圧縮強度を示しており、アルミニウムフォームがこのような変形モードとなることで大きな外力を負担し、アルミニウムフォームとの複合化によって生じるシンタクティックフォームの圧縮強度の大幅な向上に寄与していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 高川真一, 前田逸郎, 京橋 誠: 海洋科学技術センター試験研究報告 (「しんかい6500」用浮力材の開発について), (1990).
- 2) L. Bardella and F. Genna: Int. J. Solids Struct., **38** (2001), 307–333.
- 3) R. Jhaver and H. Tippur: Mater. Sci. Eng. A, **499** (2009), 507–517.
- 4) P. Rohatgi: JOM, **43** (1991), 10–15.
- 5) L. D. Wegner and L. J. Gibson: Int. J. Mech. Sci., **42** (2000), 925–942.
- 6) 軽金属学会: アルミニウムの組織と性質, (1991), 413–414.
- 7) E. Rizzi, E. Papa and A. Corigliano: Int. J. Solids Struct., **37** (2000), 5773–5794.