

E. Sato

# 超塑性固相接合による 金属フォームサンドイッチパネルの作製

佐藤 英一\*

## 1. 研究の目的と背景

材料内部に多数の気泡を有する金属フォームは、断熱、防音、衝撃吸収、制振特性等に優れた軽量構造材料である。特に3次元構造を有する金属フォームは、従来から使用されてきた2次元のハニカム構造に比べて、材料設計の自由度が増加するため、多くの工業的応用が期待されている<sup>1)</sup>。金属フォームは、容易に切削や曲げ加工ができるが、本質的に溶接には適さない。したがってサンドイッチ構造部材を作製する場合、化学接着剤やろう付けによりパネルとコアを接合するしかなかった。しかしながらこの方法では、ポリマーフォームに対する金属フォーム特有の耐熱性を最大限に発揮することができないという問題が生じる。

拡散接合を用いれば、接着剤の耐熱性の問題を乗り越えられるけれども、金属フォームは小さな荷重で容易に降伏、座屈が生じるため、通常の拡散接合が不可能であった。そこで本研究では、最近我々は、超塑性5083アルミニウム合金圧延材をインサート材料として用いることにより、発泡アルミニウムALPORAS<sup>2,3)</sup>を超塑性拡散接合を試みた<sup>4)</sup>。ALPORASフォームは、熔融アルミニウム中に発泡剤として水素化チタン( $TiH_2$ )粉末を導入して発泡させた典型的なクロズドセル型フォームである。この結果を踏まえ、次に本研究では、工業的に重要なサンドイッチ構造部材の作製にこの手法を応用し、発泡アルミニウムALPORAS、超塑性5083アルミニウム合金圧延材をスキン材とするサンドイッチパネルの作成を試みた<sup>5)</sup>。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

クロズドセル型アルミニウムフォームALPORASは神鋼鋼線製で、純アルミニウムに $TiH_2$ を発泡材として用いた溶湯法で作成されたものであり、Caが溶湯の粘度上昇のため添加されている。フォームの化学組成は、1.04wt%Ti, 1.61wt%Caであり、セルサイズと相対密度 $\rho$ は、3~6 mm, 0.11のものと2~4 mm, 0.16のものを使用した。

超塑性5083アルミニウム合金圧延材はスカイアルミニウム製で、化学組成は4.7wt%Mg, 0.65wt%Mn, 0.13wt%Cr, 0.04wt%Fe, 0.04wt%Si, 0.03wt%Tiである。熱

間、冷間圧延と再結晶処理により作成され、結晶粒径 $12\mu m$ の等軸粒組織となっている。本合金の超塑性特性はIwasaki et al.により報告されている<sup>6)</sup>。

### 2.2 拡散接合試験

放電加工機を用いて $10 \times 10 \times 20 \text{ mm}$ に加工した $\rho=0.11$ のALPORASフォームと $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}$ の5083Al合金板を図1に示すように配置した。供試材の表面は試験直前にKeller氏液(HF:2ml, HCl:3ml,  $HNO_3$ :5ml,  $H_2O$ :190ml)で仕上げた。1ターンの高周波加熱コイルによりインサート板を優先的に加熱するようにした。接合界面の酸化を減らすため、接合温度までほぼ5minで急速に加熱した。真空中で823Kまで加熱し、0.2MPaの圧縮荷重を付加した。

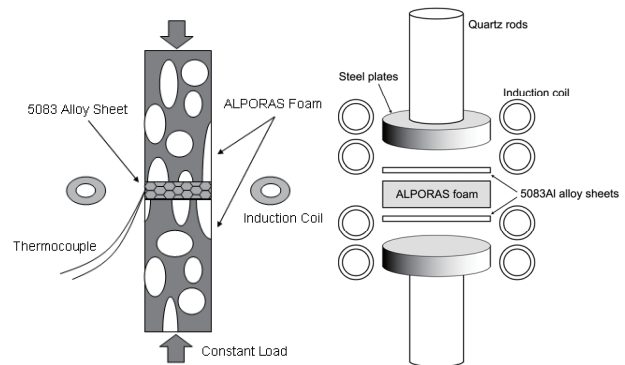


図1 拡散接合試験およびサンドイッチパネル作成の模式図

### 2.3 サンドイッチパネル作成

$\phi 50 \times 10 \text{ mm}$ に加工した $\rho=0.16$ のALPORASフォームと $\phi 50 \times 1 \text{ mm}$ の5083Al合金板2枚を図1のように配置し、一軸応力を付加した。スキン材を優先的に加熱させるために中心部の間隔が広い特殊な高周波加熱コイルを使用し、ジグは鋼製としたが、ALPORASフォームの中心から上下の鉄板までの温度はほぼ等しかった。拡散接合試験と同様に、接合界面を化学研磨した後、張り合わせ、真空中で823Kまで加熱し、圧縮荷重を付加した。ただし荷重は0.35MPaとし、約1mmの圧縮変位が得られた時点で接合試験を終了した。

### 2.4 作成試料の評価

拡散接合試料の接合強度は、スパン間隔30mmの4点

\* 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授

曲げ試験により評価した。インサート材がロッドの中心で垂直になるように配置し、0.5mm/min で曲げられた。試験は室温(298K)と高温(423K)で行った。比較のため、同様の曲げ試験を、ALPORAS 単体および接着剤で接合した ALPORAS に対しても行った。

サンドイッチパネルの接合強度は、パネル面に垂直方向の引張り試験により評価した。接合後のサンドイッチパネルから 10 mm 角の試験片を放電加工により切り出し、パネル面と治具とを化学接着剤を用いて完全に固定し、0.5 mm/min のクロスヘッドスピードで室温試験を行った。

### 3. 接合条件の検討

拡散接合は、当然、ALPORAS のセル壁金属がクリープする高温で行われる。アルミニウムフォームのクリープ挙動は報告されているが<sup>7)</sup>、ALPORAS についての報告はない。そこで本研究では、使用する2つの ALPORAS の高温での単軸圧縮変形挙動を、大気中、773および823Kにて、0.1mm/min の速度で測定した。

図2に得られた公称応力-公称ひずみ曲線を示す。その様子は、クローズドセル型金属フォームに一般にみられる室温圧縮変形挙動<sup>8)</sup>と同じものであった。変形初期に変形応力が増加した後、広いひずみ範囲で変形応力がほとんど変化しないプラトー領域がみられ、その後セル壁同士が接触するようになり変形応力が急速に増加する。プラトー応力は、 $\rho=0.11$  の ALPORAS では 773K では 0.35MPa、823K では 0.22MPa であり、 $\rho=0.16$  の ALPORAS では 823K では 0.38MPa であった。

外部応力 $\sigma^{ext}$ が ALPORAS に負荷されたとき、5083 板の表面にかかる局所応力は $\sigma^{ext}$ より $\rho$ 倍大きなものになる。 $\rho=0.11$  と 0.16 の ALPORAS に 823K でのプラトー応力よりも小さな 0.2 と 0.35MPa を負荷すると、局所応力は 1.8 と 2.2MPa となることになる。

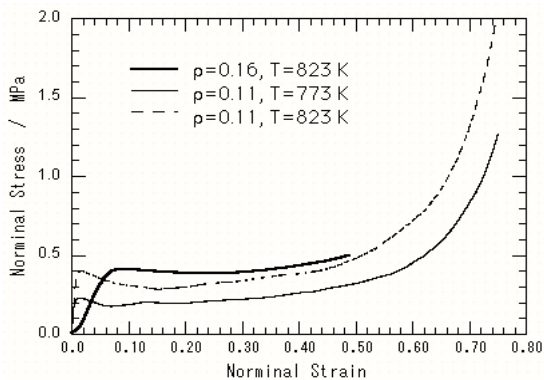


図2 ALPORAS の高温一軸圧縮変形挙動

本研究で使用した 5083 板の高温一軸引張り変形挙動はすでに報告されており<sup>6)</sup>、823K で 1.8~2.2MPa はひずみ速度感受性指数が高い領域(0.4<m<0.7)に相当する。したがって、上述の外力が 0.2 と 0.35MPa は 5083 板の最適超塑性条件に相当することとなり、拡散接合条件として、

$\rho=0.11$  と 0.16 の ALPORAS に対し 823K で 0.2 と 0.35MPa と設定することができる。ただし、拡散接合中の 5083 板の変形モードはインデンテーションクリープモードであり、通常の引張クリープモードとは挙動が少し異なるものと思われ、今後インデンテーションクリープデータの蓄積が必要である。

## 4. 結果および考察

### 4.1 拡散接合試料の観察

拡散接合後の試験片断面写真を図3に示す。実体顕微鏡による(a)では、5083 板が塑性変形して曲がっているが、ALPORAS のセル構造は壊れていないことが分かる。(b)は金属顕微鏡縦による観察であり、矢印が2種金属の界面を示す。ALPORAS フォームのセル壁が 5083Al 合金に食い込み、そこで 5083Al 合金が優先的に超塑性変形していることがわかる。また接合界面の一部において界面の消失も観察できた。

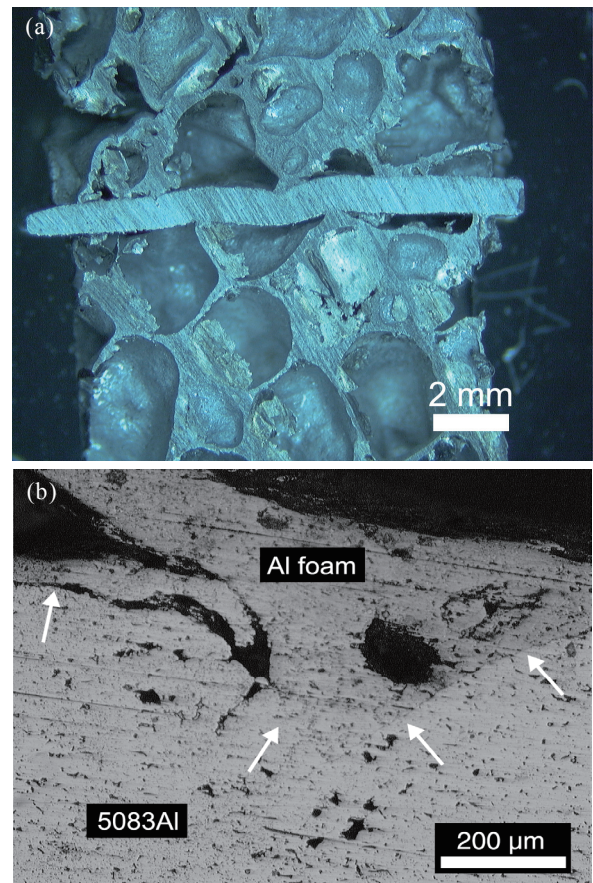


図3 拡散接合試料のマクロ(a)およびミクロ(b)組織

接合時に拡散が生じていることを確かめるため、接合界面近傍の Mg の濃度プロファイルを SEM/EDS システムで測定した。もとの ALPORAS は Mg を含んでおらず、5083 は Mg を 4.7%含んでいる。断面を化学研磨した後、EDS のスタンダードレス測定を行った。図4に示すように、5083 領域では 5.8%と評価された Mg 濃度が ALPORAS 領域になるにつれ 1%程度まで 300 $\mu$ m の範囲で徐々に減少している。このことは Mg が 5083 から

ALPORAS へ 300 $\mu$ m の範囲で拡散したことを示している。

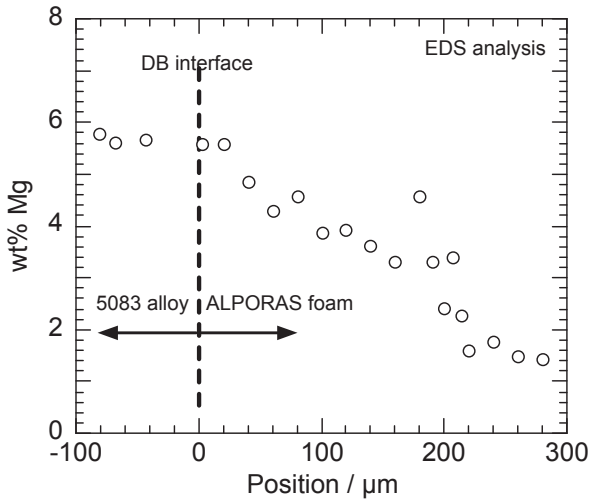


図 4 EDS による拡散接合界面での Mg 組成プロファイル

#### 4.2 拡散接合試料の接合強度

もとの ALPORAS は、曲げ試験において、最大荷重を示した後、セル構造の圧壊による急激な加重の低下を示したが、破断はしなかった。これに対し、拡散接合試料では、最大荷重にて拡散界面にて破壊した。このときの曲げ強度はもとの ALPORAS の半分ほどであった。

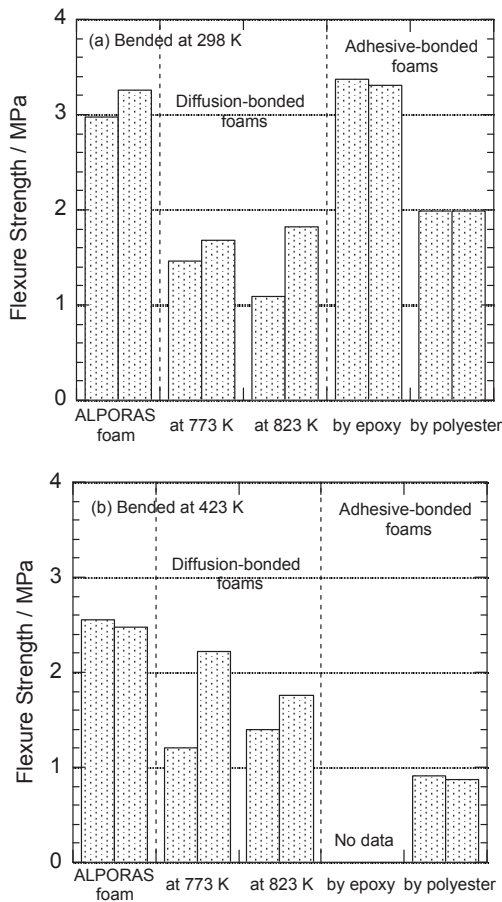


図 5 各種接合試料の(a)298K と(b)423K での 4 点曲げ試験結果

図 5 には様々の曲げ試験の結果をまとめる。室温では (a), もとの ALPORAS とエポキシ接着剤接合材の曲げ強度はほぼ同等であった。ポリエステル接着剤接合材と拡散接合材の曲げ強度はその 50~60%程度であった。拡散接合温度の影響は、本実験では見られなかった。

423K という高温では(b), もとの ALPORAS と接着剤接合材の曲げ強度は大幅に低下した。特にエポキシ接着剤接合材は接合状態を保つことができなかった。これに対し拡散接合材は室温とほぼ等しい曲げ強度を示した。423K での接合効率は 60%を超えた。

#### 4.3 サンドイッチパネルの観察

拡散接合後の試験片写真を図 6 に示す。半分に切断された試験片の外観(a)を見ると、きれいなサンドイッチパネルが作製できたことがわかる。また縦断面(b)を拡大すると、ALPORAS フォームのセル壁が 5083Al 合金に食い込み、そこで 5083Al 合金が優先的に超塑性変形していることがわかる。また接合界面の一部において界面の消失も観察できた。

接合後のサンドイッチ構造において、発泡材料の特性を最大限に発揮するためには、セル構造の維持が重要である。本実験後の ALPORAS フォームは、セル壁の薄い部分でわずかに座屈が見られたものの、大部分の領域で元のセル形状を保っていた。

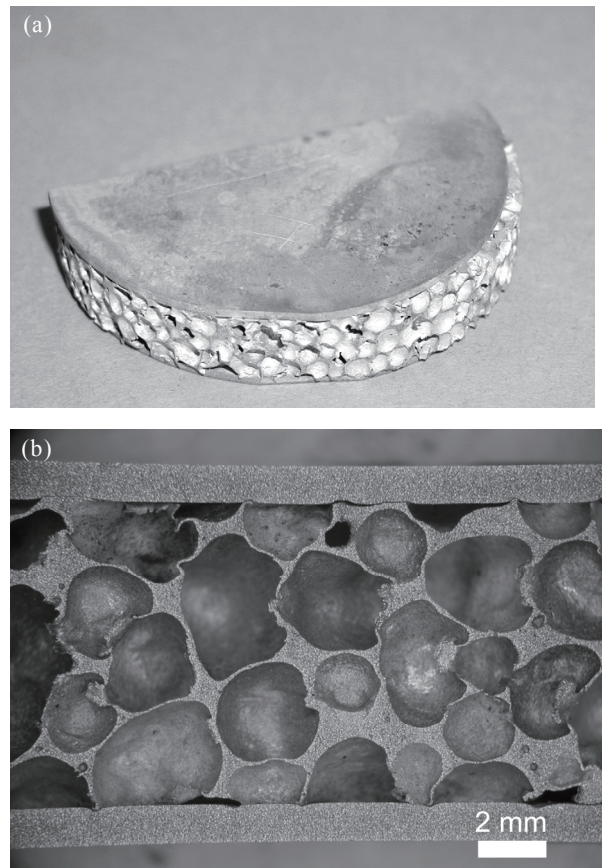


図 6 作製したサンドイッチパネルの (a)外観と(b)断面

#### 4.4 サンドイッチパネルの接合強度

接合後の引張り試験における応力-ひずみ曲線の一例を図7に示す。接合した試験片は降伏する前に接合界面で脆性的に破断し、破断応力は1.0 MPaであった。一方、同じ断面積を有するALPORASフォームの引張り強度は3.1 MPaであることから、本実験における接合強度は32%と評価できた。

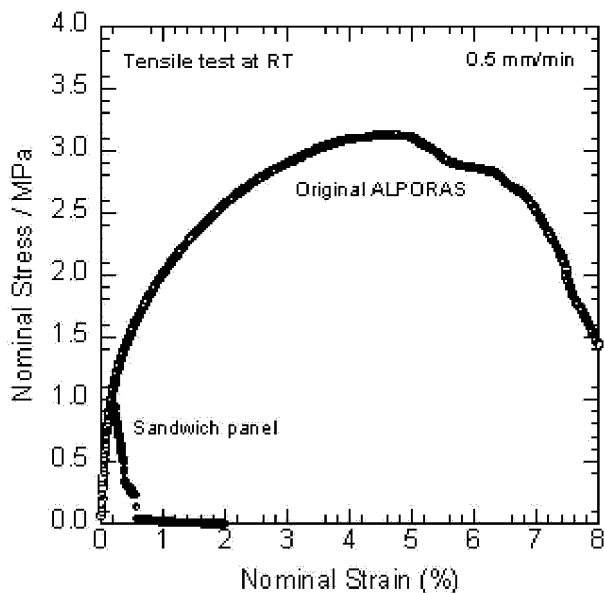


図7 ALPORAS と作製したサンドイッチパネルの引張り試験結果

#### 5. まとめ

金属フォーム同士の超塑性拡散接合の手法を応用し、金属フォームをコア材としたサンドイッチ構造部材を作製することができた。典型的な超塑性合金と金属フォームとして、5083Al合金圧延材とALPORASフォームを選択し、5083Al合金を優先的に加熱できるような高周波加熱方式を用いた。接合後の試験片はほぼ元のセル形状を

保っており、良好なサンドイッチ構造が得られた。

接合断面を観察した結果、ALPORASフォームのセル壁が5083Al合金に食い込んでおり、界面の消失および5083Al合金側からALPORASフォーム側へのMg原子の拡散を確認できた。また接合強度を曲げ試験により評価した結果、大気中で接合試験を行ったにもかかわらず、元のALPORASフォームの60%の曲げ強度が得られた。接合強度を一軸引張り試験により評価した結果、元のALPORASフォームの32%の破断応力が得られた。基本的にアルミニウム系は、拡散接合困難であることから、本研究で得られた手法は、その他の金属フォームにも容易に適用できると考えられる。

#### 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の平成14年度研究助成金によるものであり、ここに特記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) J. Banhart: Prog. in Mater. Sci. **46** (2001), 559.
- 2) S. Akiyama et al., United States Patent No. 4713277 (1987).
- 3) T. Miyoshi, M. Ito, S. Akiyama, A. Kitahara, Adv. Eng. Mater. **2** (2000) 179.
- 4) K. Kitazono, A. Kitajima, E. Sato, J. Matsushita and K. Kuribayashi: Mater. Sci. Eng. **A327** (2002), 128.
- 5) E. Sato, K. Kitazono, K. Kuribayashi, A. Kitajima and J. Matsushita: Mater. Sci. Forum **447-448** (2004), 521.
- 6) H. Iwasaki, H. Hosokawa, T. Mori, T. Tagata and K. Higashi: Mater. Sci. Eng. **A252** (1998), 199.
- 7) E. W. Andrews, L. J. Gibson, M. F. Ashby, Acta mater. **47** (1999) 2853.
- 8) F. Han, Z. Zhu, J. Gao, Metall. Trans. **29A** (1998) 2497.