

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月15日現在

機関番号：12301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860012

研究課題名（和文） アルミニウムプリカーサの発泡プロセスを利用したポーラスアルミニウムの接合法

研究課題名（英文） Bonding process for aluminum foams using foaming of aluminum precursor

研究代表者

鈴木 良祐 (SUZUKI RYOSUKE)

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10612400

研究成果の概要（和文）：セル構造の破壊や密度増加なしにポーラスアルミニウム同士を接合する方法として発泡接合法を提案し、その有効性を実験的に調べた。アルミニウム合金ろう材からブレイジングプリカーサを作製した。プリカーサには発泡剤が分散しているため、加熱することで発泡する。溝加工を施した2つの純アルミニウム系ポーラスアルミニウムの溝内部にプリカーサを設置して発泡させた。結果として、ポーラスアルミニウム同士を接合することに成功した。しかしながら、接合強度は接着剤による接合よりも低かった。接合部の顕微鏡観察を行った結果、広域にわたり明確な接合界面が観察された。発泡接合により強固な接合を達成するためには、接合部の表面処理を検討する必要がある。

研究成果の概要（英文）：The foaming bonding was proposed as a bonding method for aluminum foams. The aluminum foams can be bonded without collapse of the cell wall and density increase. In this study, the effectiveness of the foaming bonding was investigated experimentally. The brazing precursor was manufactured from brazing aluminum alloy. The precursor foams by heating because the foaming agent particles were dispersed in the precursor. The precursor was put into two grooved pure aluminum foams and heated over the melting point of the precursor. Two grooved pure aluminum foams can be bonded by foaming bonding. However, the bonding strength with foaming bonding was lower than that of the adhesive. Microscopy of the bonded area between brazing aluminum and pure aluminum foams was carried out. The bonding boundary was clearly observed. The surface treatment should be considered in order to obtain the high bonding strength with foaming bonding.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：金属材料，複合材料，接合，破壊力学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：ポーラスアルミニウム，アルミニウム合金，粉末冶金，接合

## 1. 研究開始当初の背景

代表的なポラスアルミニウム ALPORAS(神鋼鋼線製)の断面写真を図 1 に示す。ALPORAS は、体積の 90 %以上の気孔を内包する高気孔率ポラスアルミニウムである。軽量、断熱、吸音、衝撃吸収といった多くの工業的利点を有している。特に、自動車をはじめとする輸送機器分野から軽量構造材料や衝撃吸収材料として注目を集めている。ポラスアルミニウムの代表的な作製法に鋳造法とプリカーサ法がある。鋳造法では、まず、熔融したアルミニウムに、高温でガスを放出する発泡剤粉末を添加し攪拌する。高温で保持し気泡を生成・成長させた後に急冷することで発泡体を得る。大型ポラスアルミニウムを安価に生産することが可能な作製方法であり、ALPORAS はこの方法で作製されている。プリカーサ法は、粉末冶金技術を応用しアルミニウム粉末と発泡剤粉末の混合粉末を固化し、加工後もしくは金型内で加熱発泡させることで複雑形状のポラスアルミニウムを比較的簡単に作製することが可能な作製方法である。

ポラスアルミニウムを用いて構造体を作製する場合、接合や締結が必要となるが、ポラスアルミニウム同士の接合や締結は、セル構造に起因して極めて困難である。例えば、ポラスアルミニウムに有効なねじ溝を設けることは不可能であり(図 2(a)), ボルト・ナットを用いた締結は、その締結力でセル構造を破壊する(図 2(b))。また、接着剤を用いる場合、有効な接合面積が小さいため、接合強度が低くなる(図 2(c))。加えて、接着剤の使用限界温度は低いので、高温で用いることができない。ポラスアルミニウムの接合に関して、これまでに、超塑性アルミニウム合金板をポラスアルミニウムの間にはさみ高温で拡散接合する方法が提案されている。超塑性材料は高温での変形応力が著し

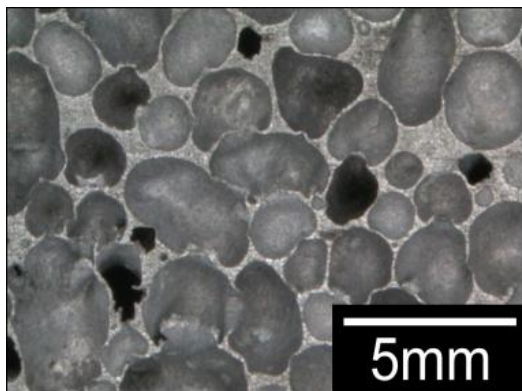


図 1 ポラスアルミニウム ALPORAS の断面写真。

く低いため、ポラスアルミニウムの間に挟むことで拡散接合が容易になる。しかしながら、接合に必要な応力はポラスアルミニウムの強度(初期最大圧縮応力)に対して高い。

密度増加、特性劣化、セル構造の破壊なしにポラスアルミニウム同士を強固に接合する方法が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、ポラスアルミニウムにほとんど外力を与えずにポラスアルミニウム同士を接合する発泡接合法を提案する。本接合法は、高温に加熱することで発泡する発泡前駆体(プリカーサ)を、溝加工を施した接合対象のポラスアルミニウムの溝内部で加

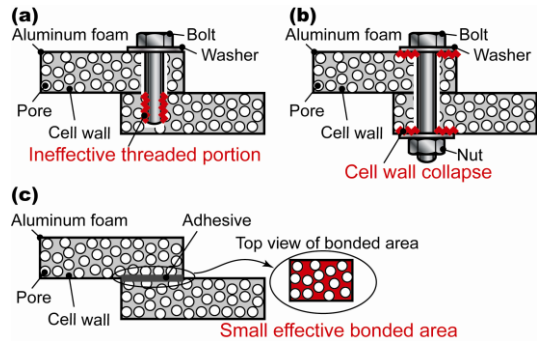
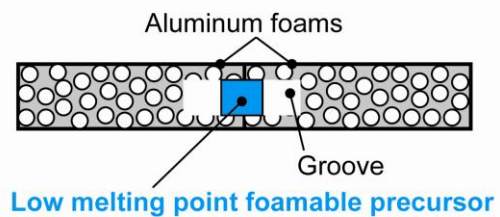


図 2 ポラスアルミニウムの締結と接合の模式図。(a) ねじ締結, (b) ボルト・ナットを用いた締結, (c) 接着剤を用いた接合。

### Step.1 Setting



### Step.2 Heating

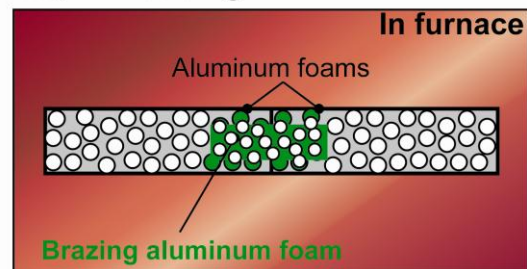


図 3 発泡接合法の模式図。

熱発泡させることで、ポーラスアルミニウム同士を接合する方法である(図3)。

まず、ろう材として用いられる低融点アルミニウム合金を素材としてブレイジングプリカーサを作製する。溝加工を施した接合対象の溝内部にブレイジングプリカーサを挿入して、接合対象の融点以下かつ低融点アルミニウム合金の溶融温度以上の高温に加熱する。ブレイジングプリカーサは発泡し、接合対象の気孔内部にブレイジングポーラスアルミニウムが充填される。機械的締結の効果と接合対象とブレイジングポーラスアルミニウムの金属学的接合により、接合対象同士は接合される。

接合対象の融点以下で接合させるため、成形後の形状を維持することが可能であり、大きな外力を与えないため接合対象のセル構造を破壊することもない。加えて、接合部にもポーラスアルミニウムが形成されるため、接合部における衝撃吸収などの特性劣化もほとんどないと考えられる。

本接合法を用いて接合試験を行い、接合した試験片を用いて4点曲げ試験を行うことで接合強度を評価し、提案するポーラスアルミニウム同士の接合法の有効性を検証する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 試験装置の作製

プリカーサの作製を粉末冶金を用いて行うため、クリープラプチャー試験機を改良してホットプレス装置を作製した。自作管状炉を用い、プレスを行う主軸部を加熱することができる。最大荷重容量は10 tonであり、楊定は150 mmである。管状炉は、1273 Kまで加熱可能な容量を持つ半円状セラミックスヒーターを2つ用いて作製された。管状炉の内径は267 mmであり、高さは470 mmである。比較的大きな金型を用いた粉末冶金が可能である。

#### 3.2 プリカーサの作製

本研究では2種類のプリカーサを作製した。一つは接合対象のポーラスアルミニウムの作製用であり、純アルミニウムをマトリックスとした。もう一方は、ブレイジングプリカーサであり、一般的にろう材として用いられるAl-Si系4045アルミニウム合金をマトリックスとした。

粒子径180  $\mu\text{m}$ 以下の純アルミニウム合金アトマイズ粉末に対して、発泡剤として粒子径45  $\mu\text{m}$ 以下の $\text{TiH}_2$ 粉末を1 mass%、増粘剤として粒子径約1  $\mu\text{m}$ の $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末を2 mass%添加して混合した。混合粉末を内径 $\phi$ 25のステンレス鋼製の金型に充填した。金型を自作したホットプレス装置にセットし、5 ton(100 MPa)の荷重を負荷しつつ炉温を723 Kまで加熱して2 h保持する一軸ホットプレスを行

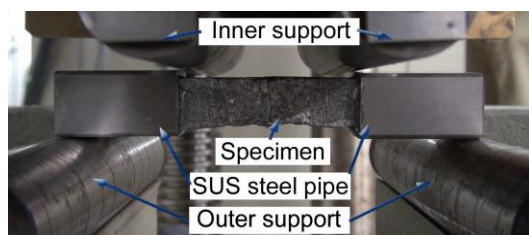


図4 4点曲げ試験。

った。

ブレイジングプリカーサ用の粉末を得るために、4045アルミニウム合金バルク体を金属やすりで研削した。研削粉を $\text{Al}_2\text{O}_3$ ボールとともにミルポットに入れ、ボールミルにかけて粉砕した。粉砕した研削粉をふるい、粒子径300  $\mu\text{m}$ 以下のアルミニウム合金粉末を得た。これを素材として、上述した割合で発泡剤と増粘剤を混合し、同様の一軸ホットプレスを行うことでブレイジングプリカーサを得た。

#### 3.3 発泡試験

ファインカッタを用いて純アルミニウム粉末から作製したプリカーサを $15 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ に切出し、正方形断面を有するステンレス鋼角管(内寸法 $16 \times 16 \text{ mm}^2$ )の内部に挿入した。プリカーサをこの角管ごと予熱した電気炉に入れ、加熱・発泡した。得られた発泡体の密度をアルキメデス法を用いて調べた。加熱温度と保持時間を変化させ、高気孔率を得ることが可能な条件を実験的に調べた。

ブレイジングプリカーサについても純アルミニウムプリカーサと同様に高気孔率が得られる条件を調べた。

#### 3.4 発泡接合試験

発泡試験で調べた最適発泡条件を用いて接合対象となるポーラスアルミニウム(約 $15 \times 15 \times 45 \text{ mm}^3$ )を作製した。接合面に放電加工機を用いて $5 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ の溝加工を施した。溝加工を施した二つの接合対象の溝同士を突合せて溝内部に $5 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ のブレイジングプリカーサを設置した(図3)。これを発泡試験に用いたステンレス鋼角管の中に再び挿入して、903 Kに加熱した電気炉に入れて15 min保持した。得られた接合体の接合部近傍を切出し、断面観察を行った。

#### 3.5 4点曲げ試験

接合した試験片の接合強度を評価するために4点曲げ試験を行った(図4)。内側と外側の支点間距離をそれぞれ、50 mm, 100 mmとした。支持部のセルが局所的に座屈しないよう、試験片端部にステンレス鋼角管を被せ、ポリエスチル樹脂を流し込むことで接着した。比較のために、接着剤で接合した試験片と接合部のない一本のポーラスアルミニウ

ムの4点曲げ試験も行った。

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 プレス装置

自作したホットプレス装置の模式図を図5に示す。設計仕様を満たすホットプレス装置の開発に成功した。ただし、管状炉内部の高さが大きいので、高さ方向に温度むらが生じた。炉温が723 Kに達したとき、上部と下部に約100 Kの温度差があった。

##### 4. 2 プリカーサ

自作したホットプレス装置を用いて、充填率99%を超えるφ25x50の円柱状プリカーサを得ることができた。しかしながら、プリカーサの高さ方向にわずかに密度差が生じた。

##### 4. 3 プリカーサの発泡特性

加熱温度および保持時間を変えて純アルミニウムプリカーサの発泡特性を調べた結果をそれぞれ図6, 7に示す。保持時間を20 minに固定して発泡試験を行った結果、融点である933 Kで加熱した発泡体の気孔率が最も高かった。温度を933 Kに固定し、保持時間を変化させて加熱した結果、20 minの気孔率が最も高かった。得られた最大気孔率は76%であり、比較的高い気孔率を得ることができた。

プリカーサの高さ方向に生じた密度差を利用して、得られる発泡体の気孔率におよぼすプリカーサ充填率の影響を調べた(図8)。加熱温度993 K、保持時間を20 minとした。密度の増加に伴い、気孔率は増加した。充填率98%でおおむね一定になった。図6および

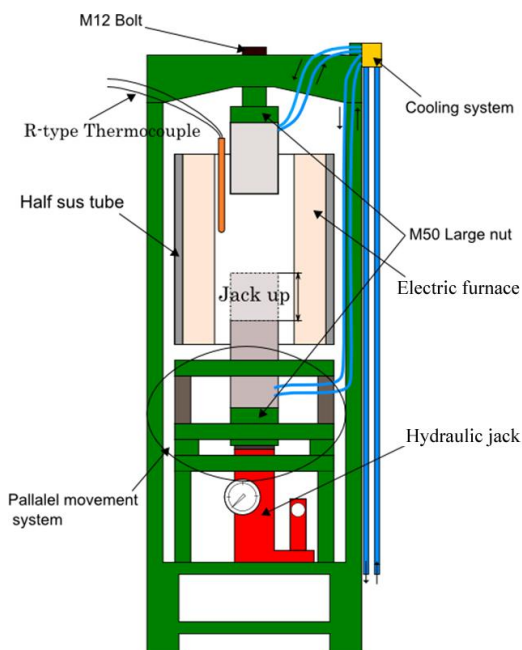


図5 開発されたホットプレス装置の模式図。

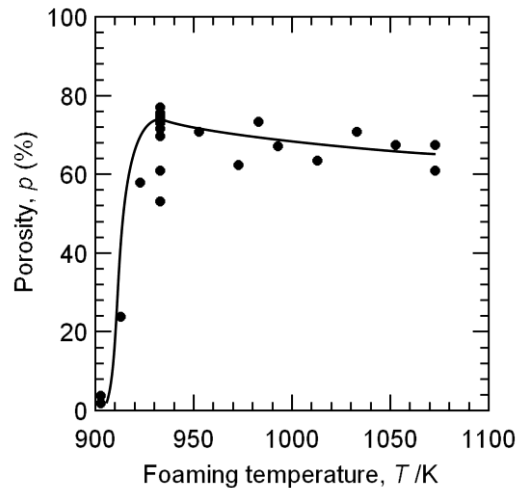


図6 加熱温度と気孔率の関係。

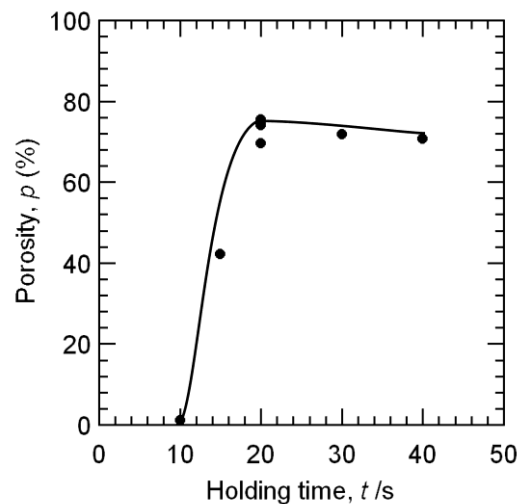


図7 保持時間と気孔率の関係。

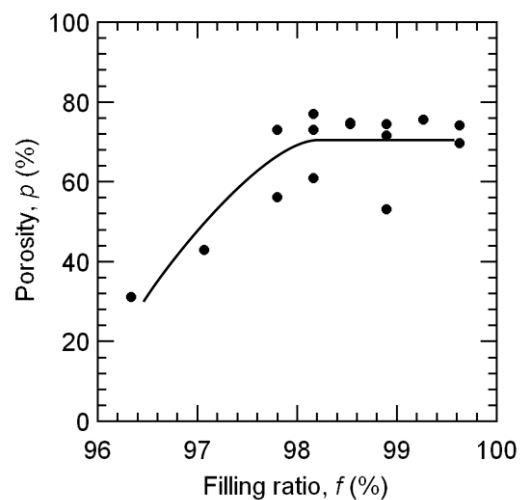


図8 純アルミニウムプリカーサの充填率と気孔率の関係。

図7は、充填率98%以上のプリカーサを用いた発泡試験結果についてプロットされている。

ブレイジングプリカーサについては、903Kで保持時間を変化させて発泡試験を行った(図9)。ブレイジングプリカーサを純アルミニウムの融点以下の温度で加熱しても、最大気孔率70%の発泡体が得られることが分かった。

#### 4.4 接合体の観察

発泡接合を行った試験片の外観および断面観察結果を図10に示す。接合対象のポーラスアルミニウムの気孔内部にブレイジングポーラスアルミニウムが充填されていた。接合対象はブレイジングプリカーサによって接合されていた。しかしながら、接合対象とブレイジングポーラスアルミニウムの間には明確な接合界面が広範囲で確認された。つまり、金属学的接合はなされていなかった。

#### 4.5 接合強度の評価

荷重-変位曲線を図11に示す。接合部のないポーラスアルミニウムの最大荷重は0.6kNであった。接着剤で接合した場合、塗むらにより、最大荷重が大きく変化した。均一に接着された試験片の最大荷重は0.26kNである。しかしながら、最大荷重に達する前に破壊していた。発泡接合を施した接合体の最大荷重は0.2kNであり、3種類の中で最も低かった。破断荷重はどちらも約0.1kNであり接着剤と発泡接合は同程度の強度であった。接合部に表面処理を施さずに発泡接合を行った場合、接合対象とブレイジングポーラスアルミニウムの金属学的接合がなされず、接合強度が低い。

4点曲げ試験後の発泡接合体の外観写真を図12に示す。発泡接合、接着剤、接合部

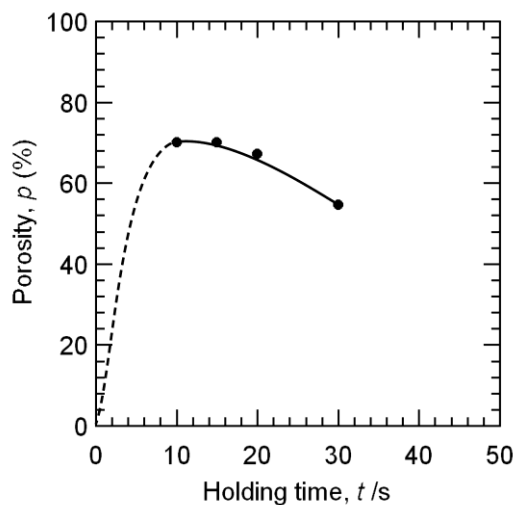
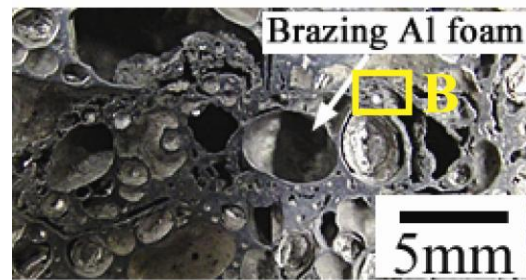
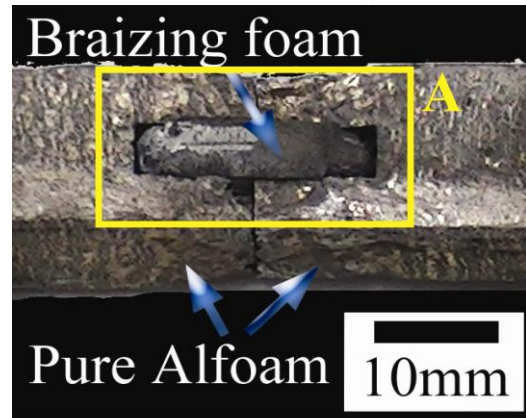
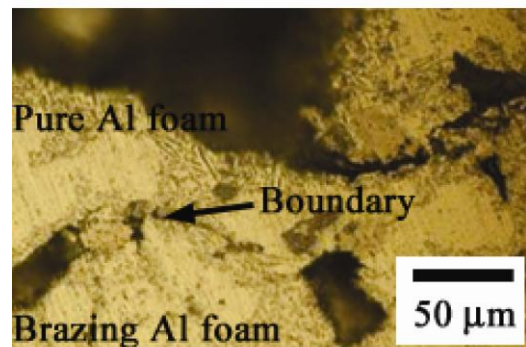


図9 ブレイジングプリカーサの発泡特性。



Cross section of A



Micrograph of B

図10 接合部の観察結果。

なしの試験片は、すべて支持部のセル壁の局所座屈なしに試験を行うことができた。また、すべての試験片は接合対象のポーラスアルミニウムで破断した。発泡接合を行った試験片は母材溝部の最深部で破壊しており、適切な接合強度評価が行われていない可能性がある。接合強度評価法については検討を要する。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

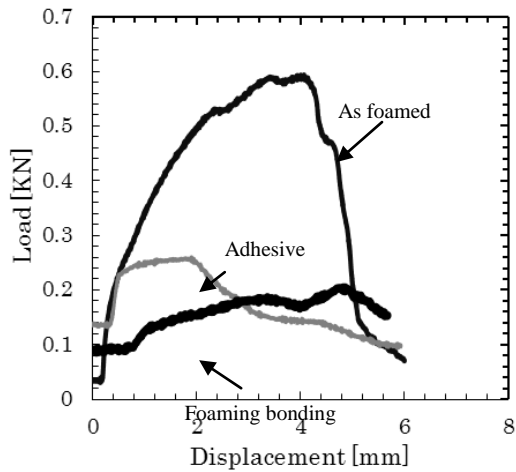


図 11 発泡接合を施した試験片の外観写真.



図 12 4点曲げ試験後の発泡接合体の外観写真.

(1) 研究代表者  
鈴木 良祐 (SUZUKI RYOSUKE)  
群馬大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：10612400

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
なし

6. 研究組織