

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360289

研究課題名(和文) 生体骨に倣う発泡アルミニウムの傾斜気孔構造の形成

研究課題名(英文) Development of gradually distributing pore structure like in vivo bone in ultra-light aluminum foam

研究代表者

金武 直幸 (KANETAKE, Naoyuki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00115552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：気孔率70%以上の超軽量ポーラス金属を、生体骨に倣って適材適所に気孔率や気孔サイズの分布を変化させた傾斜気孔構造を形成する技術の確立を目的に、異なる技術の可能性を検討した。発泡助剤を含有するアルミニウム合金プリカーサ(発泡前駆体)の加熱発泡温度を傾斜分布にして、気孔率や気孔サイズが傾斜構造となる発泡アルミニウムの作製技術を確立した。緻密表面層を有するポーラス積層サンドイッチ板を部分的に圧縮成形するプレス加工によって、室温加工においても緻密金属と同様に三次元形状を付与できるポーラス金属加工技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop the technology to form gradually distributing porosity or pore size like in vivo bone in ultra-light porous metals with more than 70% porosity, the possibility of some processes were investigated. By the process to make gradually increasing heat temperature distribution in the foamable precursor including foaming agent, an aluminum foam with gradually distributing porosity or pore size was successfully produced. By the process to compress partially the aluminum foam sandwich (AFS) with an aluminum sheet surfaces, the press forming complex shape into the AFS was possible even at room temperature.

研究分野：材料工学

キーワード：エコマテリアル ポーラス金属 気孔構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 気孔率70%以上となるポーラス金属(発泡金属とも呼ばれる、図1)は、緻密材による軽量化の限界を超える超軽量材料である。さらに、比剛性・比強度、衝撃エネルギー吸収能、制振性、断熱性などに優れる特徴を有し、超軽量構造材料としての工業利用が期待されている。しかし、この材料の研究開発や工業利用の歴史は浅く、気孔性状(気孔サイズ・気孔率・気孔構造)を制御する技術や、その学術的基礎研究は十分には進められていない。

(2) このようなポーラス金属を構造材料として工業利用する際、中空部材に充填した複合部材や金属板を接合したサンドイッチパネルとして利用されている。しかし、それら単純な複合構造では、緻密体とポーラス体との接合面の状態が力学特性を大きく支配することは自明である。同様にポーラス構造である生体骨は、表面の緻密な硬質層の下部に微細な気孔が存在し、内部ほど気孔が大きく、適材適所に気孔サイズが異なる傾斜気孔構造を有しており、力学的に理想的な構造材料と言われている。

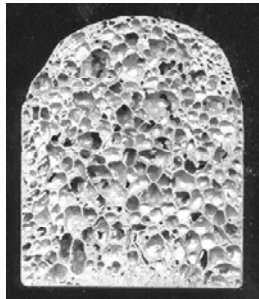


図1 発泡アルミニウム

2. 研究の目的

(1) 生体骨に倣って発泡アルミニウムの適材適所に緻密層や気孔率・気孔サイズの分布を変化させた、傾斜気孔構造を形成する基礎技術を確立する。
 (2) そのための手法として、プリカーサ発泡法を利用し、加熱発泡温度分布や冷却温度条件を高度に制御する方法、あるいは発泡後の部分的な加圧成形による局所緻密層を形成する方法について、その可能性とプロセス条件の最適化を検討する。

3. 研究の方法

(1) 発泡プリカーサの加熱発泡時に、プリカーサ内部で温度勾配が生じるように加熱方法を制御して、内部の気孔構造(気孔率、気孔サイズ)を傾斜させる可能性を検討した。
 (2) 発泡助剤を含有したプリカーサ(発泡前駆体)とアルミニウム板を圧延によって固相接合した積層プリカーサを炉内で加熱発泡してポーラス積層サンドイッチ板を製造する方法について、特に、圧延加工を受けたプリカーサの発泡特性(気孔率、気孔サイズ、気孔形状)について検討した。
 (3) 発泡アルミニウムの部分加圧圧縮による気孔構造の変化と節構造の形成: 表面に緻密層(スキン層)を持つ発泡アルミニウムや

ポーラス積層サンドイッチ板を、部分的に加圧成形して緻密化する方法によって、様々に節構造を形成する技術について、ポーラス材料の変形挙動など基礎的検討を実施した。

4. 研究成果

(1) 二種類のアルミ合金(6061、Al-7Si)に発泡助剤(TiH₂)を0.5wt%混合して固相成形した円柱状プリカーサ(φ20×100mm)を使用し、その一端を高周波誘導炉内で局所的に加熱して、試料内に不均一な温度分布が生じた状態で発泡させた。図2に、6061合金プリカーサを異なる3条件で加熱した試料の、取り出し時点の非加熱端からの距離と温度分布の関係を示す。6061合金の融点である約650℃までは100mmのプリカーサ全体が大きな温度勾配がなく温度上昇するが、試料の加熱端近くで融点を超えると試料温度の上昇が速くなり、試料内部に大きな温度勾配が生じた。

(2) 各合金の不均一加熱後の試料断面の一例を図3に示す。写真の右が加熱端、左が非加熱端である。6061合金の場合、加熱端に向けて気孔の大きさや量が傾斜的に増大し、この気孔分布傾向は温度勾配の傾向とよく一致する。一方Al-7Si合金の場合は、非加熱端から約20mmの位置までプリカーサはほとんど発泡せず、20mmから加熱端にかけて

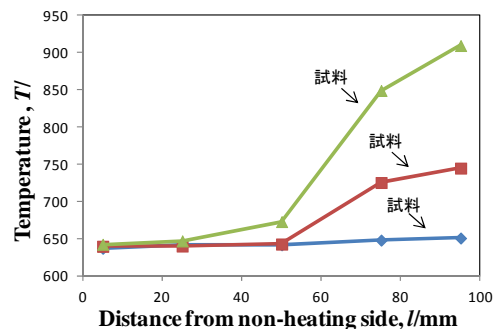


図2 プリカーサ内の温度分布(6061)

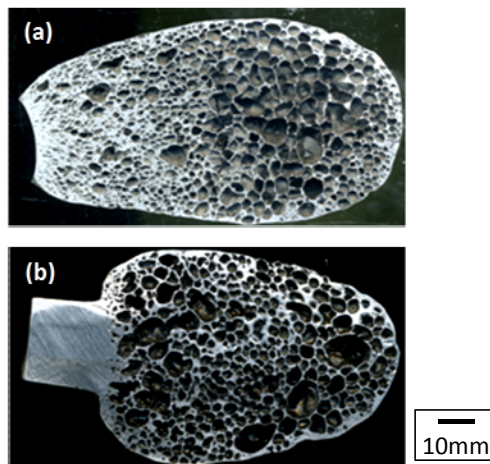


図3 (a)6061 および (b)Al-7Si の不均一加熱による試料断面の気孔形態

は大きく発泡して、発泡部と未発泡部に分かれる形となった。両者の発泡特性の違いは、各合金の温度と液相率の関係で説明できる結果であった。その結果、6061 合金のように液相が徐々に増加する合金系では、試料内部の温度勾配によって気孔を不均一に制御できることが明らかになった。

(3) Al-7Si 合金の板状プリカーサを、500 °C・15min 加熱保持した後、圧下率 0% ~ 43% で熱間圧延、および室温で圧下率 5 ~ 43% の冷間圧延をした。圧延時のロール温度はいずれも室温である。圧延加工されたプリカーサを赤外線イメージ炉で加熱発泡し、発泡途中の様々な温度で試料を取り出して急冷した。その結果、いずれの圧延温度でも、圧下率の大きいプリカーサは十分に発泡せず、その傾向は冷間圧延の方が顕著であった。

(4) 熱間・冷間圧延プリカーサの内、順調に発泡した試料と十分に発泡しなかった試料の、共晶温度付近での微視組織を図4に示す。順調に発泡している(a)と(b)の試料には、TiH₂ 粒子の周りに生成した気孔が見られる。また、TiH₂ 粒子が存在しない合金中には微細な粒状の気孔が多数見られた。一方、順調に発泡していない(c)と(d)の試料には、TiH₂ 粒子の周りに発泡の様子はなく、合金中の微細な気孔も見られず、100 ~ 200 μm 間隔の層状の割れのような空隙が観察された。すなわち、圧延加工とその後の加熱処理によって、微細析出 Si の挙動が変化して発泡特性を支配していると予想される。

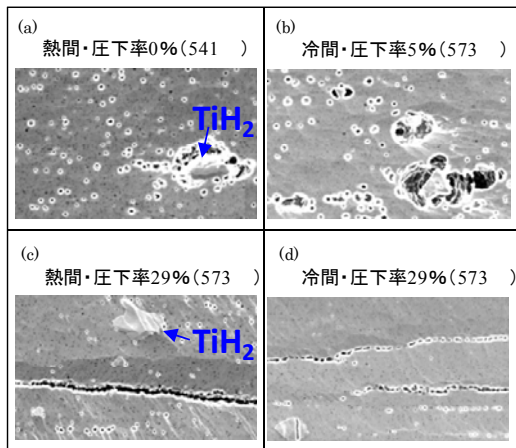


図4 発泡初期試料断面の微視組織

(5) 発泡アルミニウム積層板 (AFS) の作製にはプリカーサ法を採用した。供試材として、発泡助剤 (0.5wt% TiH₂) を含有した Al-7Si 合金プリカーサ(板厚 2.4mm)を純 Al 板(板厚 2mm)で挟み、500 °C に加熱後に圧下率 20% で圧延接合して、Al-7Si プリカーサと純 Al 板の積層プリカーサを作製した。この積層プリカーサを赤外線加熱炉にて昇温速度 60 °C/min で加熱発泡し、AFS 試料(厚さ約 13mm) を作製した。この AFS 試料を用いて、図5に示すような3種類(、 、)の金型で

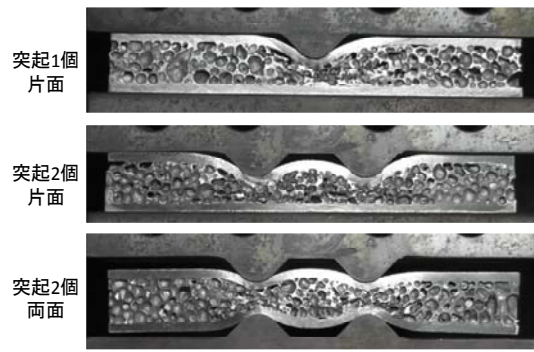


図5 AFS の部分圧縮成形

部分圧縮成形実験を実施した。成形温度は室温で、成形中の試料端面の動画を撮影し、端面画像の解析から試料各部位の形状変化(ひずみ)を測定して変形挙動を評価した。

(6) コアの発泡アルミニウムと表層の Al 板とは変形抵抗が大きく異なるが、室温加工でも突起部を中心に部分圧縮が可能である。しかし、金型の転写性については、突起部両側や二つ山突起の中間部では金型に接しないまま変形している様子が分かる。図6は、条件Iで長さの異なる試料を成形した際の突起両側位置の圧縮ひずみを示す。突起両側では金型と接触しないまま圧縮変形が進行し、試料長が長いほど圧縮ひずみが大きくなり、非接触領域が広がった。

(7) 二つ山突起成形(条件 Ⅱ)の突起部中央部の圧縮ひずみを図7に示す。上型のみ突

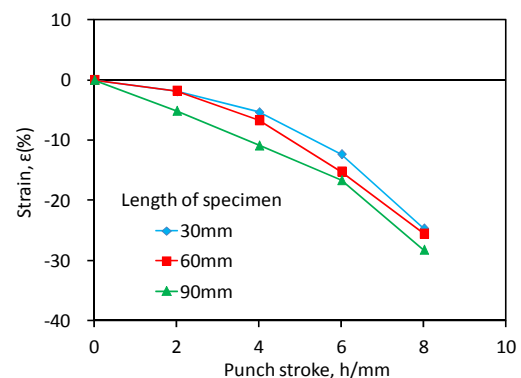


図6 突起部両側の圧縮ひずみ(条件 I)

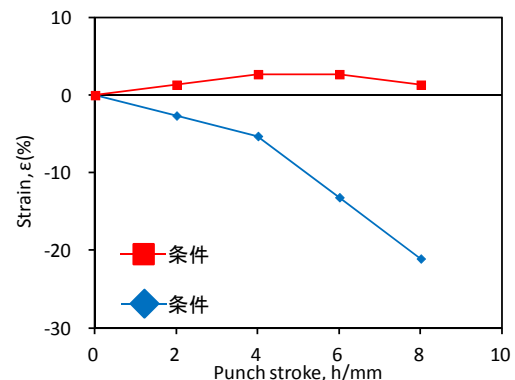


図7 二つ山突起部中間の圧縮ひずみ

起を有する条件 では圧縮変形しているのに対し、上下に突起を有する条件 では伸び歪となり厚さが増加していることが分かった。また、図 8 に突起間隔の異なる二つ突起金型による加工中の様子を示す。試料端部の様子は両者に大差は見られないが、突起間内側において、突起間隔 25 mm では曲面のまま金型平面部と大きく離れて変形している。

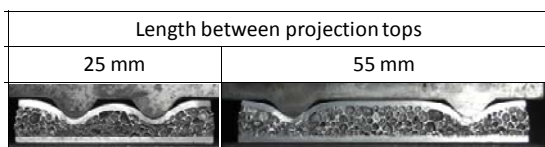


図8 間隔が異なる突起金型の加工

(8) 以上の研究成果より、本研究の目的である、生体骨に倣って発泡アルミニウムの適材適所に緻密層や気孔分布を変化させた、傾斜気孔構造を形成する基礎技術の確立に対し、以下のことが明らかとなった。

プリカーサ発泡法において、プリカーサ内部に温度勾配が生じるように加熱方法を制御して、内部の気孔構造を傾斜させることが可能である。しかし、この技術の実用化には、昇温時に液相が徐々に増加する合金組成のプリカーサが適している。

表面に緻密層を有するポーラス積層サンドイッチ板の製造において、プリカーサとアルミニウム板を圧延によって固相接合した積層プリカーサを加熱発泡する場合、圧延接合時の圧延条件が、その後の発泡特性に大きく影響して、気孔構造が変化することが明らかになった。

ポーラス積層サンドイッチ板を部分的に加圧成形して一部を緻密化する方法について、室温のプレス成形でも様々に節構造を形成することが可能である。金型の転写性は、金型形状や試料寸法に依存して変化するため、その最適化が必要である。

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1件)

久米裕二、磯村圭祐、小橋 眞、金武直幸：
ポーラスアルミニウムの圧縮特性に及ぼす合金組成およびスキン層の影響、軽金属、査読有、Vol. 63, No. 12, 2013, pp. 446-451

[学会発表](計10件)

金武直幸：生き残りを賭けるポーラス金属の将来、日本金属学会 2012 年秋期大会、2102 年 9 月 (招待講演)

久米裕二、鈴村祐司、小橋 眞、金武直幸：
圧延積層プリカーサの発泡挙動に及ぼす圧延条件の影響、日本塑性加工学会 H24 年度春季講演会、2012 年 6 月

中ノ森嵩、久米裕二、小橋 眞、金武直幸：
発泡アルミニウムの気孔性状に及ぼす加

熱温度勾配の影響、第 64 回塑性加工連合講演会、2013 年 11 月

竹腰 功、久米裕二、小橋 眞、金武直幸：
アルミニウムフォームサンドイッチの部分圧縮成形における変形挙動、第 64 回塑性加工連合講演会、2013 年 11 月

王 鋭、久米裕二、小橋 眞、金武直幸：
圧延したアルミニウムプリカーサの発泡特性と微視組織、日本金属学会第 154 回春期大会 2014 年 3 月

王 鋭、久米裕二、小橋 眞、金武直幸：
アルミニウムプリカーサの発泡特性に及ぼす圧延条件の影響、軽金属学会第 127 回秋期大会、2014 年 11 月

竹腰 功、久米裕二、小橋 眞、金武直幸：
発泡アルミニウム積層材の部分圧縮成形における工具寸法の影響、第 65 回塑性加工連合講演会、2014 年 10 月

竹腰 功、久米裕二、小橋 眞、金武直幸：
発泡アルミニウム積層材の部分圧縮成形における加工温度の影響、軽金属学会第 127 回秋期大会、2014 年 11 月

N. Kanetake, I. Takekoshi, Y. Kume, M. Kobashi：
Plastic Deformation of Aluminum Foam Sandwich by Partial Compression, Int. Conf. on Cellular Materials (CellMat 2014), 2014 年 10 月
I. Takekoshi, Y. Kume, M. Kobashi, N. Kanetake：
Deformation Behavior in Die Forging of Aluminum Foam Sandwich, 11th Int. Conf. on Technology of Plasticity (ICTP-14), 2014 年 10 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金武直幸 (KANETAKE, Naoyuki)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00115552

(2) 研究分担者

久米裕二 (KUME, Yuji)
名古屋大学・大学院工学研究科・招へい教員
研究者番号：30377890

(3) 連携研究者

小橋 眞 (KOBASHI, Makoto)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90225483

(4) 研究協力者

中ノ森 嵩 (NAKANOMORI, Takashi)
王 鋭 (WANG, Rui)
竹腰 功 (TAKEKOSHI, Isao)