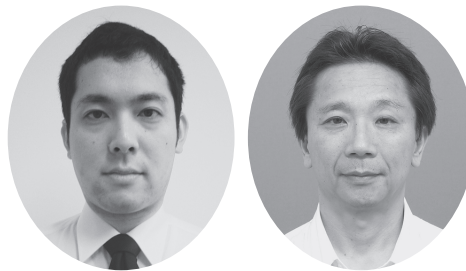


スペーサー法による微細孔ポーラス金属の創製と特性評価



袴田 昌高*・馬淵 守*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 62, No. 8 (2012), 313-321
© 2012 The Japan Institute of Light Metals

Fabrication by spacer method and evaluation of porous metals

Masataka HAKAMADA* and Mamoru MABUCHI*

Keywords: porous metals, spacer method, sintering, mechanical properties, functional properties

1. 軽量化とポーラス金属

構造材として金属材料に求められる特性は、まずは機械的強度であるが、環境負荷低減のため自動車等輸送機器の軽量化が叫ばれる昨今においては、軽量性も重要な要素である。

機械的強度は、種々の合金成分を添加したり、微視組織を作りこんだりすることで向上でき、構造材用の金属材料研究はこの機械的強度をいかに上げるかという観点から大いに発展してきた。一方、軽量性（軽さ）は金属元素の常温常圧で安定な相の密度で決まってしまう、もっと大ざっぱに言えば原子番号の大小で決まってしまう。言うまでもなくこの理由により、原子番号の小さい元素のうち常温大気下で安定して存在できるアルミニウムやマグネシウム、チタンが軽金属に分類されている。物質を構成する元素の原子番号をいじることは事実上無理であることから、機械的強度に比べ軽さに対する取組みは軽んじられてきた。実用金属中最軽量であるマグネシウムの密度は約 1.74 Mg/m^3 であり、（リチウムとの合金を除けば）事実上これが到達しうる最低密度である。

ポーラス金属はこの最低密度よりさらに小さい密度の金属素材を提供できる、新しい金属材料の形である。スポンジのような多孔質（ポーラス）構造により高い気孔率で材料内に気孔をもつポーラス金属は、 0.05 Mg/m^3 以下という超低密度をも実現しうる^{1),2)}。これまでの金属材料研究において光のあたることのない軽さ（密度）という要素に着目し、これをうまく制御・利用しようとする研究はここ数十年間で活発化し、ポーラス金属に関する国際会議も種々開かれている。

もちろんポーラス構造を有していれば緻密材に比べて機械的強度は低下する。しかし、適材適所という言葉で表されるように、強度が低いことが逆に活きる応用例もある。たとえば後述するように、輸送機器の衝突エネルギー吸収材は、人体への負担を避けるために、ある程度低い力がかつ大きな変形をする必要がある。このような変形能を有する素材として

ポーラス金属は最適である。ポーラス金属のこのような特性を伸ばすためには、ポーラス構造と機械的特性の関係を精査することが欠かせない。

ところで、ポーラス金属の作製法は種々存在し、気孔性状（孔径・気孔率・気孔の形など）の種類も作製法の数だけあると言っても過言ではない^{3),4)}。たとえば金属溶湯を発泡させる手法では、サブミリ～ミリメートルオーダーの孔径を有する球状気孔ができる⁵⁾。発泡法では均一な気孔形成のために高温溶湯中で発生する気泡の膨張過程を制御する必要がある、増粘のための添加剤の最適化研究などが進められている⁶⁾。

気孔性状はポーラス金属の特性に大きく影響するため、その制御は重要である。本稿で紹介するスペーサー法は気孔性状を簡便に制御できる優れた手法であり、特にマイクロメートルオーダーの微細気孔の均一形成に有効である。そこで以下ではスペーサー法の概要と、作製された微細孔ポーラス金属の種々の特性について述べる。

2. スペーサー法

スペーサー法（スペースホルダ法、レプリカ法）では、スペーサー粒子を金属中に何らかの手法（ casting や焼結、めっきなど）で配置し、作製過程で除去することにより、そのスペーサー粒子の大きさや形をした空間（気孔）をほぼそのまま金属内に残す。気孔はスペーサー粒子の形状をそのまま転写したものになり、たとえばマイクロメートルオーダーの大きさのスペーサー粒子を用いれば、その大きさの気孔が形成される。このため精緻な細孔制御（均一化、局所化、傾斜化等）が容易である。

スペーサー法では、母材となる金属とスペーサー材質との組合せを検討する必要がある。たとえば casting スペーサー法によるポーラスアルミニウムの作製では、スペーサーとして塩化ナトリウム粒子が用いられる⁷⁾。塩化ナトリウム粒子をゆるやかに充填した鑄型に溶湯アルミニウムを流し込み、凝固

* 京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）。Department of Energy Science and Technology, Graduate School of Energy Science, Kyoto University (Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8501).

E-mail: hakamada.masataka.3x@kyoto-u.ac.jp

受付日：平成24年1月30日 受理日：平成24年3月22日

後水洗により塩化ナトリウムを除去すれば、ポーラスアルミニウムを作製することができる(図1)。塩化ナトリウムはアルミニウムの融点(660°C)より高い温度でもスペーサーとして安定して存在でき、溶湯アルミニウムと反応せず、さらに凝固後に水洗によって除去できる。このため、鑄造スペーサー法でポーラスアルミニウムを作製する場合のスペーサーとして適している。近年ポーラス金属に注目が集まって以降、Mortensenらにより鑄造スペーサー法を用いたポーラスアルミニウムの製造・諸特性調査の研究が精力的に行われ

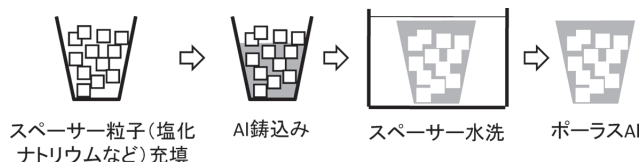


図1 鑄造スペーサー法によるポーラスアルミニウム作製の模式図

ている。詳細は文献^{8)~14)}を参照されたい。

スペーサー法は焼結にも適用可能である。この場合は原料金属微粉末とスペーサー粒子を混合し焼結する(図2)。加熱中、低温域にてスペーサーが気体に分解して除去される場合と、焼結後に水洗等によって除去する場合がある。前者の場合のスペーサーとしては樹脂や尿素、炭酸水素アンモニウムが、後者の場合のスペーサーとしては塩化ナトリウム等が(母材金属との反応性を考慮したうえで)用いられる。焼結スペーサー法により作製されたポーラスアルミニウムおよびポーラス銅の顕微鏡写真をそれぞれ図3および図4に示す。アルミニウムの場合は塩化ナトリウム粒子を¹⁵⁾、銅の場合は炭酸水素アンモニウム粒子をスペーサーとして¹⁶⁾、ふるい分けにより大きさを整えて用いた。発泡法で問題となるような局所的に大きな気孔は見られず、マイクロメートルオーダーの微細かつ均一な気孔を有していることがわかる。なお、アルミニウムの焼結には放電プラズマ焼結を用いた。

この焼結スペーサー法では大掛かりな鑄造設備を必要とせ

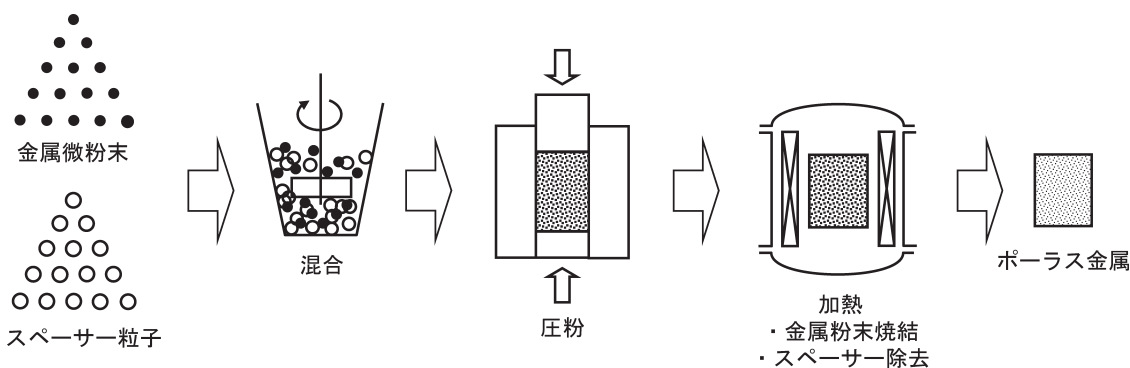


図2 焼結スペーサー法によるポーラス金属作製の模式図

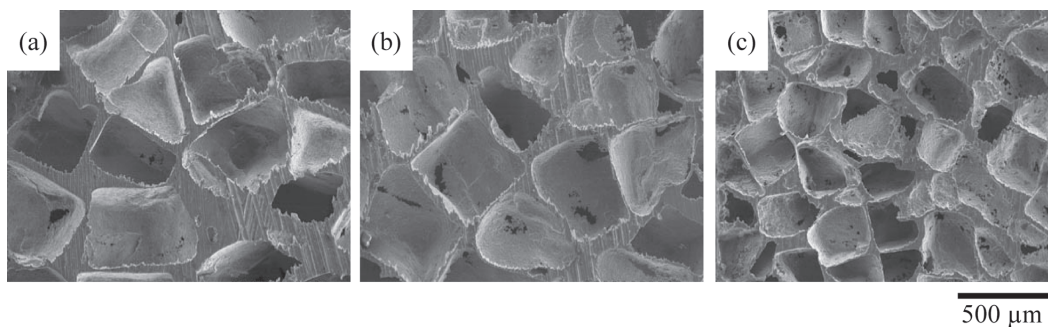


図3 焼結スペーサー法で作製されたポーラスアルミニウムの電子顕微鏡写真(気孔率および孔径は(a) 75%, 425~500 μm ; (b) 85%, 425~500 μm ; (c) 85%, 212~300 μm)

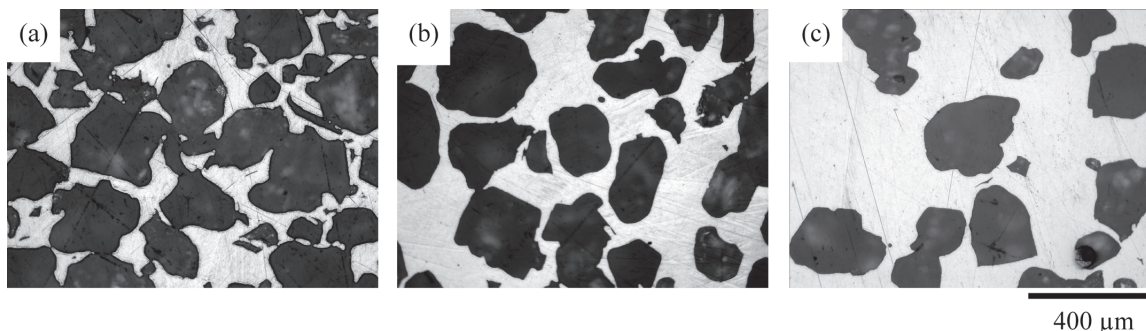


図4 焼結スペーサー法で作製されたポーラス銅の光学顕微鏡写真(気孔率は(a) 77%, (b) 55%, (c) 30%)

ず、熔融温度以下の加熱で製造することからエネルギー消費も抑えられる。以降、本稿では比較的新しい手法であるこの焼結スパーサー法で作製したポーラス金属について説明することとし、単にスパーサー法といえばこの焼結スパーサー法を指すこととする。

3. 機械的特性

ポーラス金属の圧縮応力-ひずみ曲線の模式図を図5に示す。高気孔率ポーラス金属の圧縮特性は、変形初期の弾性領域・一定の変形応力で大変形をするプラトー領域・高ひずみ域において応力が再上昇する緻密化領域に分けることができる¹⁷⁾。中でもプラトー領域はポーラス金属を衝撃吸収材として適用する際に重要であり、一定の応力（プラトー応力）で大変形をすることで、衝突エネルギーを効果的に吸収することができる。ここではスパーサー法によって均一かつ微細に気孔性状を制御されたポーラスアルミニウムおよびポーラス銅の各種圧縮特性について述べる。

3.1 室温圧縮特性：基本事項

衝突エネルギー吸収性、とりわけ人体保護の観点から、プラトー領域における変形応力は変形中なるべく一定で変動しないことが求められる。この変形応力の安定性には、試料サイズに対する孔径の大きさが影響する。図6に、発泡法およびスパーサー法で作製されたポーラスアルミニウムの室温圧

縮応力-ひずみ曲線を示す。前者の孔径は3~4mm、試験片形状は20×20×22mm³であり、後者は孔径300~425μm、試験片形状φ20mm×22mmである。スパーサー法で作製されたポーラスアルミニウムでは試料サイズに比べて気孔径が充分小さいため、発泡アルミニウムに比べプラトー応力の変動は少なかった。このように孔径を微細にすることで、衝突エネルギーをより安定に吸収することがわかる¹⁸⁾。また図7に示すように、アルミニウムの原料微粉末粒径を変えることで母材強度を変え、気孔率や孔径を一定に保ちつつプラトー応力の値を調整できる¹⁹⁾。

なお、ポーラス金属の圧縮試験は機械的強度を考えるうえで最も基本的な試験であるため、2008年にJIS規格化されており、試験片寸法と気孔径の関係も標準化されている^{20)~22)}。これによれば、安定した圧縮応力-ひずみ曲線を得るためには圧縮試験片の直径（円柱試験片の場合）あるいは短辺の長さ（角柱試験片の場合）が孔径の10倍以上である必要がある。逆にいえば、ポーラス金属を構造物として応用する際には、気孔を10個以上含むような寸法を有した部材でなければ、機械的強度の信頼性を確保できない。スパーサー法では微細なスパーサー粒子を用いることで約100μmの微細気孔が実現できることから²³⁾、たとえばその孔径の10倍である1mm程度の厚さのポーラス金属薄板を作製し、

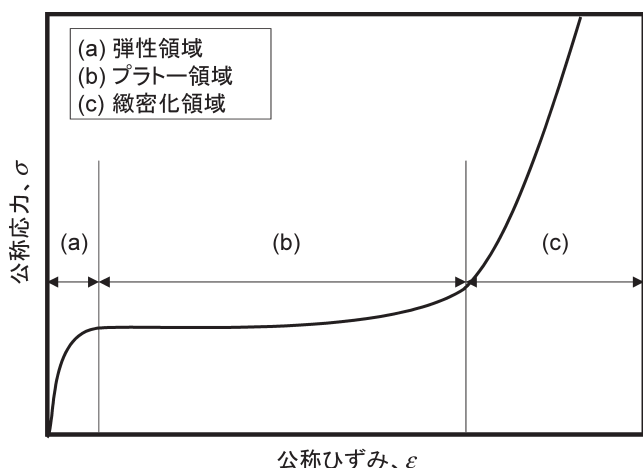


図5 ポーラス金属の圧縮応力-ひずみ線図の模式図

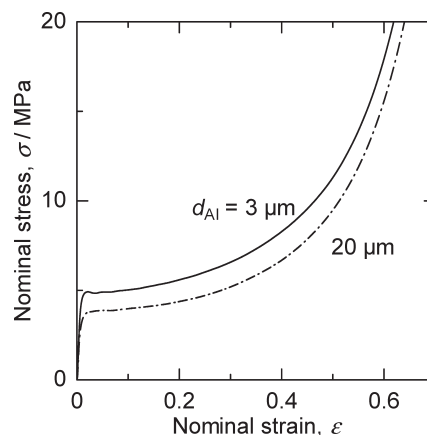


図7 異なる原料アルミニウム粉末粒径 (d_{Al}) からスパーサー法で作製したポーラスアルミニウムの圧縮応力-ひずみ線図

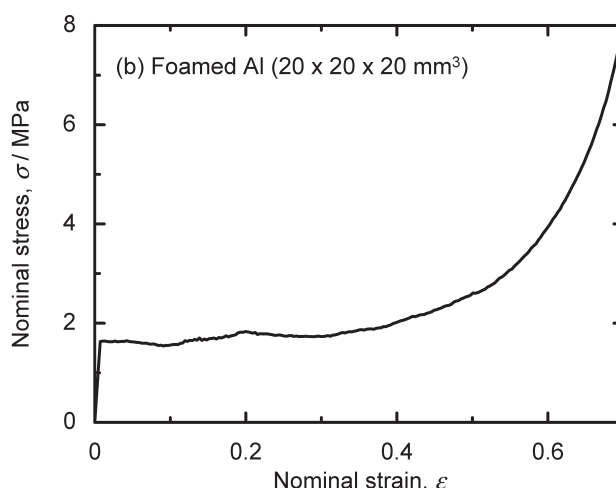
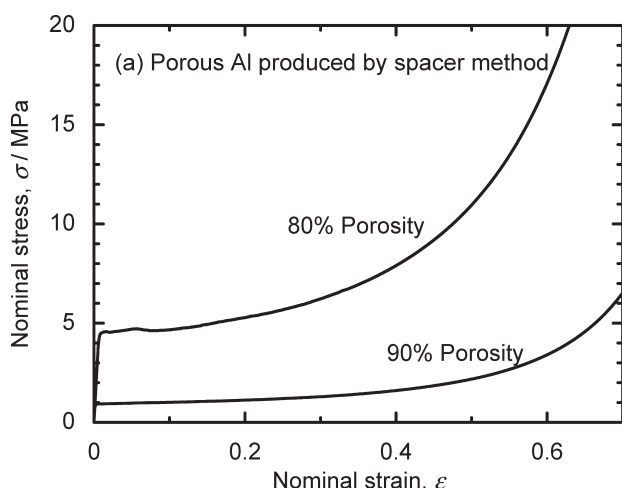


図6 (a) スパーサー法、(b) 発泡法で作製したポーラスアルミニウムの圧縮応力-ひずみ線図

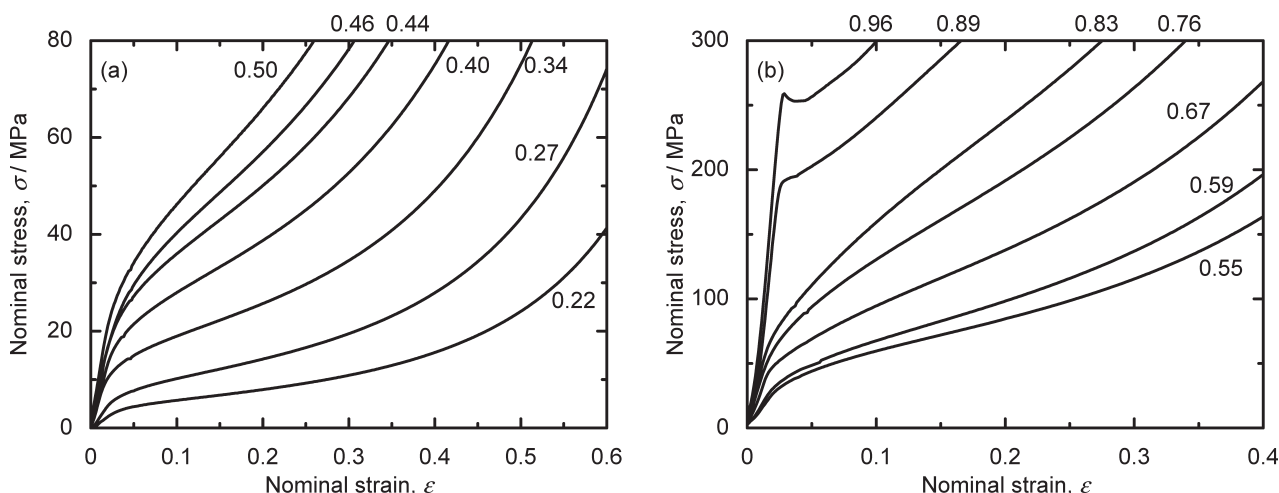


図8 異なる相対密度を持つようにスパーサー法で作製したポーラス銅の圧縮応力-ひずみ線図 ((a) 相対密度0.22~0.50, (b) 相対密度0.55~0.96)

小型制振部材として家電製品等にも実装することも充分期待できる。

3.2 室温圧縮特性：相対密度依存性

ポーラス金属の相対密度 ρ^*/ρ_s (ρ^* はポーラス金属の密度, ρ_s は母材金属の密度)とポーラス金属の強度 σ^* の関係は、以下の式で表される。

$$\sigma^* \propto (\rho^*/\rho_s)^p \tag{1}$$

ここで p は相対密度への依存性を表す指数であるが、同時にセル壁の変形様式(曲げ・座屈・降伏)と密接に関連する値でもある。Gibsonによるポーラス材料の材料力学的な解析によれば²⁴⁾、閉気孔ポーラス金属の圧縮変形において、セル壁が曲げによって変形するならば $p=2$ であり、座屈ならば $p=3$ 、降伏ならば $p=1$ である。

スパーサー法の利点を活かし、孔径や気孔形状を同じくして気孔率のみを4~78%という広範囲で変えたポーラス銅を作製し、その室温圧縮特性を調べた¹⁶⁾。圧縮試験結果を図8に示す。気孔率の大きい試料ほど変形応力は小さくなり、また緻密化ひずみは大きくなった。高気孔率を有する試料の圧縮応力-ひずみ曲線には、ポーラスアルミニウムの場合と同様に、ポーラス金属に特有の弾性領域・プラトー領域・緻密化領域が現れた。一方、低気孔率を有する試料の圧縮応力-ひずみ曲線では、3つの領域、とくにプラトー領域と緻密化領域の区別が不明瞭となった。プラトー領域の存在はポーラス材料特有のものであるから、気孔率の大小により、変形機構が異なることが示唆される。

種々の気孔率を有する試料の降伏応力と相対密度(=1-気孔率(%)/100)との関係を図9に示す。圧縮強度の相対密度依存性は、相対密度の大小によって3つの領域に分かれた。領域I(低密度領域)においては、プロットの傾き((1)式の p に相当)が2と3の中間の値をとっており、セル壁の曲げおよび座屈が支配的な変形様式であることが示唆される。それに対し領域II(中密度領域)ではプロットの傾きが1に近く、圧縮変形中のセル壁の変形様式が降伏であると考えられる。圧縮したポーラス銅を実際に観察すると(図10)、低密度試料ではセル壁が主に曲げあるいは座屈によって変形していた一方で、中密度試料では降伏により変形しているセル

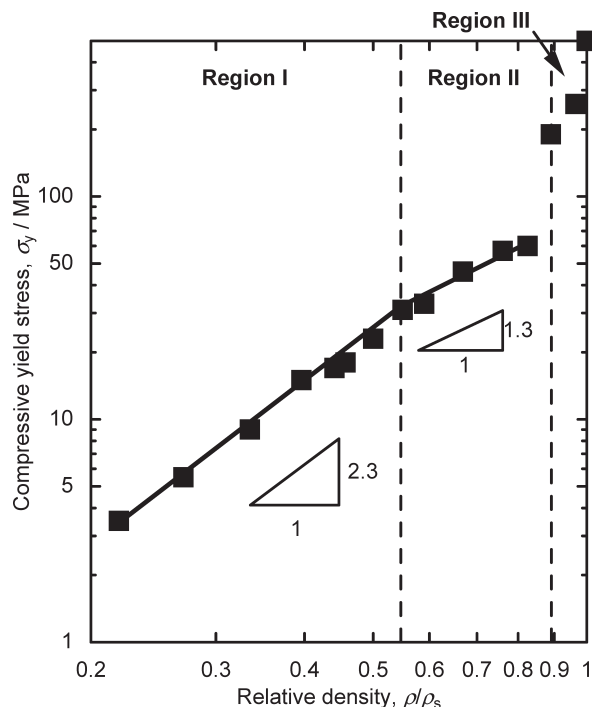


図9 スパーサー法で作製したポーラス銅の降伏応力と相対密度の関係

壁が多かった。また、領域IIIはわずかな気孔が応力集中の源となり、気孔率の増加に伴い強度が急激に減少する領域である。

このように、ポーラス金属の圧縮において、相対密度の大小によってセル壁の変形様式が異なり、それが圧縮強度の相対密度依存性指数の違いとしても如実に表れた。このことは、種々の気孔率を有する材料が、荷重を担うことのできない「欠陥」としての気孔を含む低気孔率のバルク材料と、セル壁や柱(梁)からなる「機能的な構造」としての気孔を含む高気孔率のポーラス材料とに分かれていることを意味する。

また別の見方をすれば、気孔性状の制御によりセル壁の変形様式を変えることができれば、圧縮特性の向上を狙うことができるともいえる。たとえば、もし座屈の起こりにくいよ

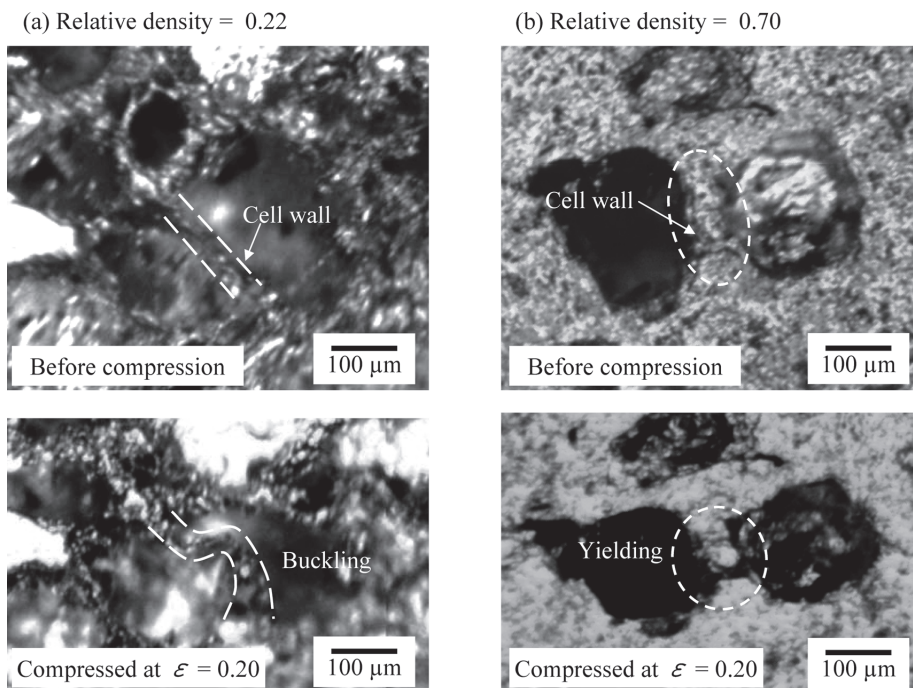


図10 スペーサー法で作製したポラス銅の変形前後の組織観察写真(相対密度は (a) 0.22 および (b) 0.70)

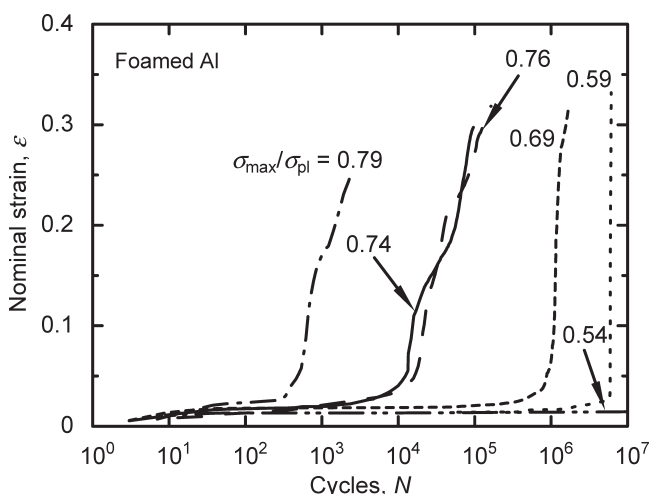


図11 市販の発泡アルミニウムの圧縮-圧縮疲労試験におけるひずみ-繰返し数の関係 (σ_{max} は疲労試験の最大圧縮応力, σ_{pl} は単純圧縮時のプラトー応力)

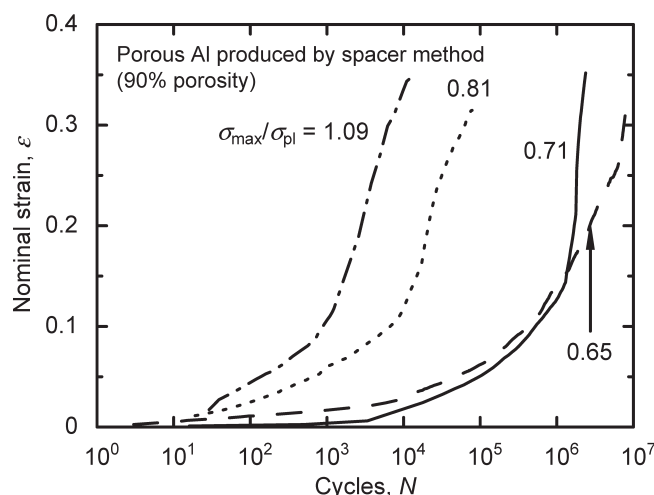


図12 スペーサー法で作製したポラスアルミニウムの圧縮-圧縮疲労試験におけるひずみ-繰返し数の関係 (σ_{max} は疲労試験の最大圧縮応力, σ_{pl} は単純圧縮時のプラトー応力)

うな気孔性状を実現できれば、 p の値をより小さくでき、相対密度の低減 (=軽量化) に伴う強度減少を抑えられる可能性がある。

3.3 圧縮-圧縮疲労特性

材料の疲労特性は実用上重要であるが、ポラス金属の疲労特性についての研究例は単純圧縮特性についてのそれに比べ少ない。ポラス金属の圧縮-圧縮疲労特性の特徴として、ある繰返し数において急激にひずみが増加する現象、いわゆる「ひずみジャンプ」(図11)が知られている^{25),26)}。これは繰返し圧縮を施した際に、局所変形帯(圧縮方向にほぼ垂直に表れる、気孔が局所的に変形した帯状の領域)が形成されることに由来する。

スペーサー法で作製したポラスアルミニウムを圧縮-圧

縮疲労試験に供した結果、圧縮ひずみは繰返し数の増加につれ漸次的に増加し、明らかなひずみジャンプは起こらなかった(図12)。疲労試験を中断して試料の気孔を観察した結果、局所変形帯以外の部分の気孔も変形していることがわかった。スペーサー法によりポラスアルミニウムの気孔がより均一に制御され、局所変形が抑えられたことが推測される。このように、気孔性状の均一性と局所変形帯の有無、ひずみジャンプの発生の間には密接な関係がある¹⁸⁾。

なお、発泡法およびスペーサー法で作製したポラスアルミニウムのS-N曲線は、試料種や気孔率によらずおおむね同一の傾向を示し、通常の(ポラスでない)材料同様、最大圧縮応力が大きいほど小さな繰返し数で破壊に至ることがわかった(図13)¹⁸⁾。このことは、図11および図12に示した

ようなひずみと繰返し数の関係が、S-N曲線には表れないポーラス金属ならではの大きな特徴であることを意味する。したがって、ポーラス金属の疲労特性を考慮して実部材に適用する際には、通常のS-N特性だけでなくひずみの挙動にも注意する必要がある。

3.4 高温圧縮特性

熱交換装置や航空・宇宙用など、応用分野によってはポー

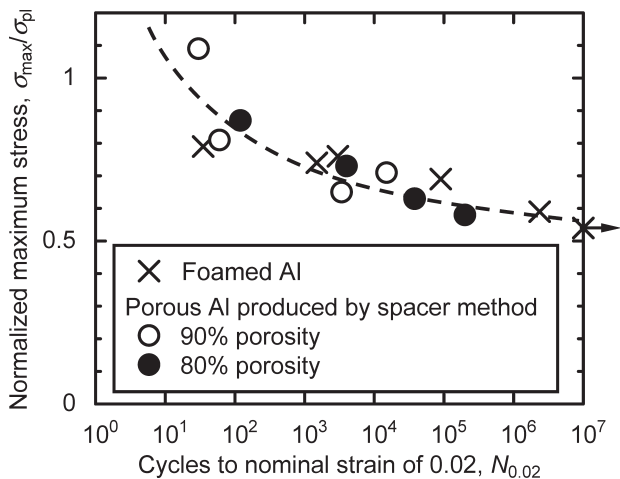


図13 スペーサー法および発泡法で作製したポーラスアルミニウムの圧縮-圧縮疲労試験における最大圧縮応力と圧縮ひずみが0.02に達するときの繰返し数の関係 (σ_{max} は疲労試験の最大圧縮応力, σ_{pl} は単純圧縮時のプラトー応力)

ラス金属の高温変形挙動の把握が重要である。金属の高温変形においては応力指数 n や活性化エネルギー Q が変形機構を表す代表的なパラメータであり、これらは材料の局所変形とも密接に関係する。たとえばZhangらは、発泡法で作製したポーラスアルミニウムにおいては、 n の値が母材である緻密アルミニウムよりも大きくなると報告しており、その原因は局所変形であるとしている²⁷⁾。このように、局所変形がつきもののポーラス金属は通常と異なる n や Q の値を呈する可能性があり、検討する必要がある。

スペーサー法により作製したポーラスアルミニウム、および母材である緻密アルミニウムを高温圧縮試験に供した結果、応力指数 n および活性化エネルギー Q は、ポーラスアルミニウムと緻密アルミニウムでほぼ同じ値をとることがわかった(図14, (a)および(b)のプロットの傾きが n に、(c)のプロットの傾きが $-Q/R$ (R は気体定数)に相当)。さらに、ポーラスアルミニウムの高温変形応力 σ^* を相対密度で補正し、変形時のZ因子($=\dot{\epsilon}\exp(Q/RT)$, $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度, T は変形温度)との関係を緻密アルミニウムの場合と比較すると、ほぼ同一の直線上に表されることがわかる(図15)。変形応力とひずみ速度の関係が緻密材の場合と(どの温度でも)一致したということは、スペーサー法で気孔を均一制御することにより局所変形が抑えられたことを示唆する²⁸⁾。

4. 内包流体に関連した特性

ポーラス金属の特徴のひとつは、気孔内に流体を内包することである。緻密な金属材料では考えられないこの特徴

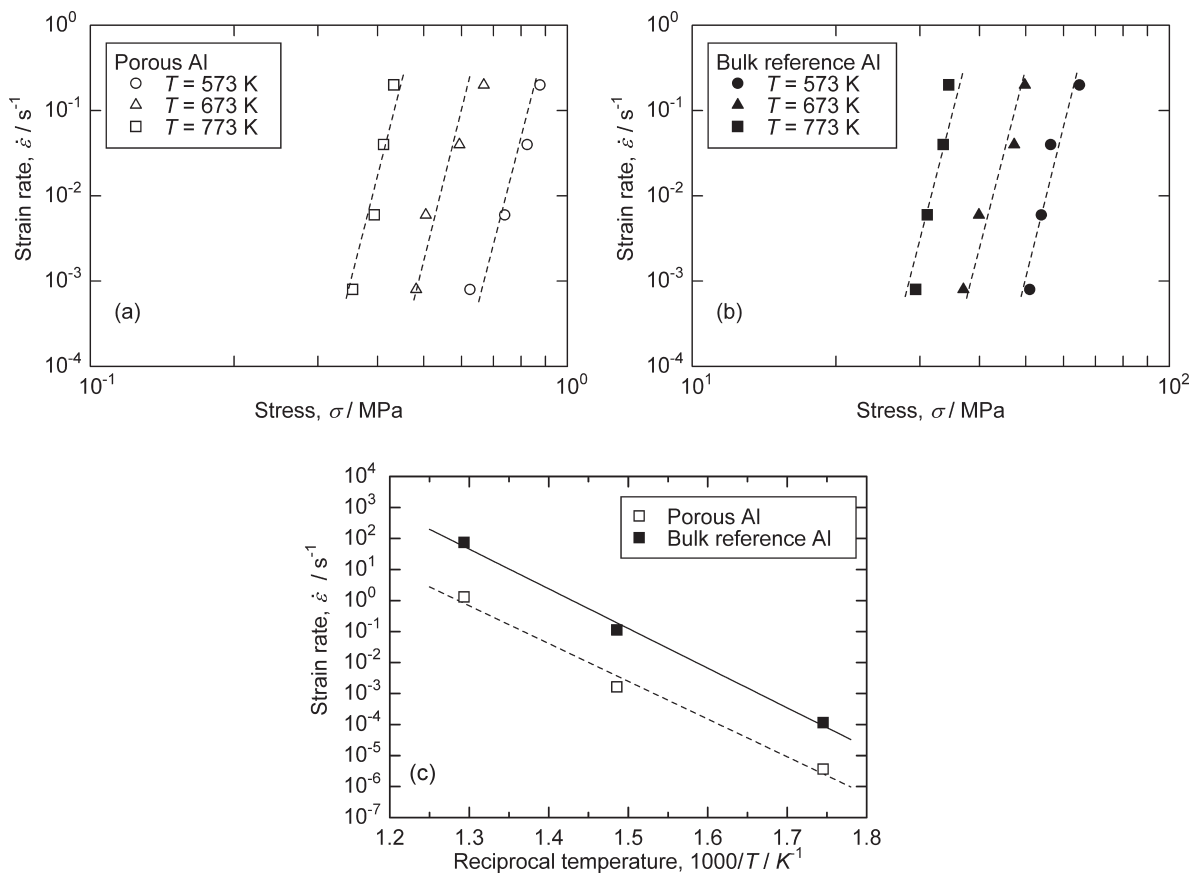


図14 (a) スペーサー法で作製したポーラスアルミニウムおよび(b) 緻密アルミニウムの高温圧縮試験における応力とひずみ速度の関係および(c) 両者のアレニウスプロット。(a) および(b) のプロットの傾きが n に、(c) のプロットの傾きが $-Q/R$ (R は気体定数)に相当する

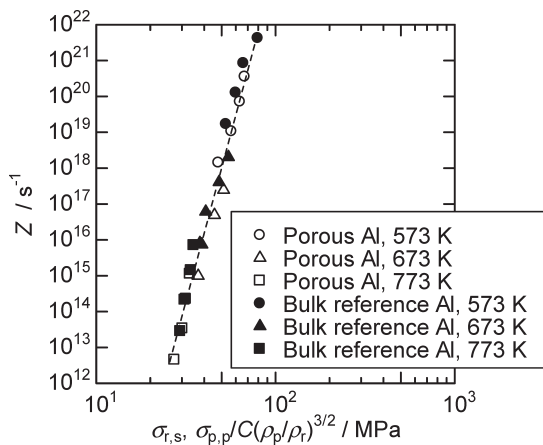


図15 ポーラスアルミニウムおよび緻密アルミニウムの高温圧縮試験における変形応力とZ因子の関係(ポーラスアルミニウムの変形応力は相対密度と定数Cにより補正して表示)

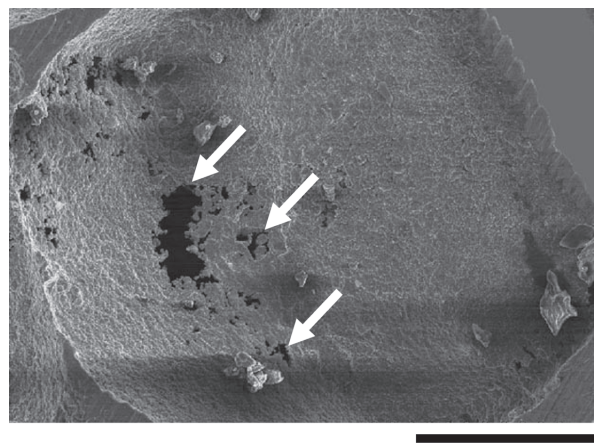


図16 スペーサー法で作製したポーラスアルミニウムのセル壁に見られる連通孔

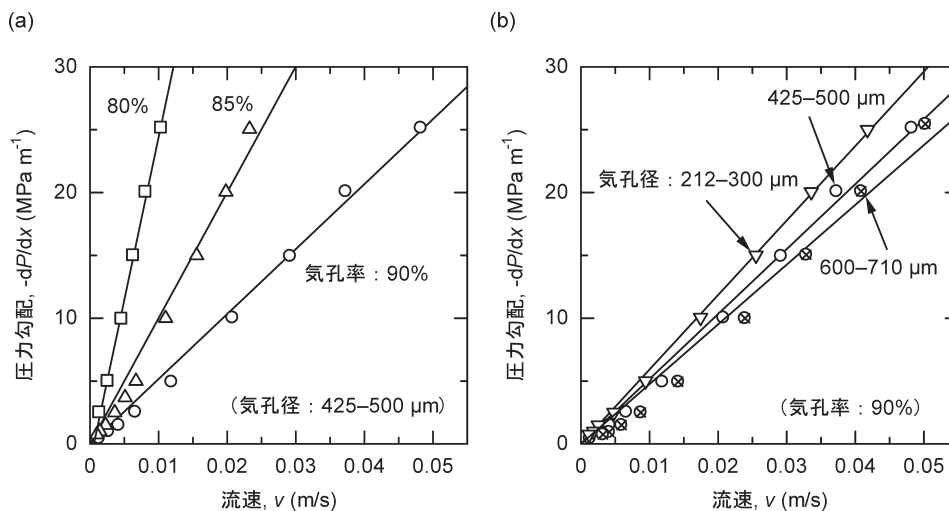


図17 スペーサー法で作製したポーラスアルミニウムの圧力勾配と流速の関係。(a) 気孔率の影響, (b) 気孔径の影響

は、ポーラス金属ならではの特性・応用を実現する。特に開気孔型のポーラス金属では材料外からさまざまな流体を導入することができ、そのことを活かしてヒートシンク²⁹⁾・³⁰⁾・電極³¹⁾・触媒担持素材³²⁾等への適用が可能である。

スペーサー法により作製される多孔質金属は、開気孔・閉気孔どちらの構造もちうる。たとえば、塩化ナトリウム粒子をスペーサーとして作製したポーラスアルミニウムでは、セル壁に小さな連通孔が開いており(図16)、開気孔構造を有していることがわかる。混合時にスペーサー粒子どうしが触れ合っている点がこれらの連通孔となっており、セル柱の3次元網目構造からなる通常の開気孔ポーラス金属¹⁾と大きく異なる特徴である。一方、低温域でスペーサーが気化して除去される場合は、焼結時に体積収縮が起こるため連通孔は少なく、閉気孔構造をとる場合が多い。

ここでは、スペーサー法で作製されたポーラスアルミニウムが流体を内包できることに着目した研究例を紹介する。

4.1 流体透過特性

スペーサー法を用いて作製したポーラスアルミニウムに水道水を流し込み、流体透過特性(流体抵抗)を測定した。図17に圧力勾配と流速の関係を示す。圧力勾配は流速にほぼ

線形比例し、孔径の微細化あるいは気孔率の減少に伴ってプロットの傾きが大きくなった³³⁾。孔径が微細になるほど表面積が増えて流体に与える抵抗も増え、また気孔率が低くなるほど流体の流れる経路の断面積が小さくなるので、この傾向は妥当である。

流速(v)と圧力勾配(=-dP/dx)の関係を線形近似し、次式で表されるダルシー則を用いてダルシー透水係数Kを求める。

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K} v \tag{2}$$

ここでμは流体の粘性係数である。求めた透水係数Kを気孔径dの2乗で除して正規化し、相対密度(=1-気孔率)との関係を示したものが図18である³³⁾。スペーサー法で作製したポーラスアルミニウムの透水係数は、他の(セル柱の3次元網目構造からなる)開気孔ポーラス材料の透水係数¹¹⁾に比べて2~3桁のオーダーで低い。スペーサー法で作製したポーラスアルミニウムは、図16で示すような、セル壁に連通孔が開いた開気孔構造を有しており、この連通孔はスペーサー径(≒孔径)に比べて非常に小さい。この連通孔の小ささが

原因でポーラスアルミニウムの流体抵抗が通常のポーラス材料より大きくなったと考えられる。

4.2 吸音特性

前節で述べたように、スパーサー法で作製したポーラスアルミニウムは内包流体の流れに対して他材料より強い抵抗を示す。この特徴を積極的に利用する応用例として吸音材がある^{34),35)}。

図19にスパーサー法で作製したポーラスアルミニウムの吸音率と周波数の関係を示す。どの試料においても、吸音率は周波数の増加に伴い単調増加した。吸音率は気孔率が高いほど増加した(図19(a))。一方で、孔径の異なる試料の測定結果からは、最小(212~300 μm)の孔径を有するポーラスアルミニウムで最も大きな吸音率を示すが、次に大きな吸音率は最大孔径(600~710 μm)のもので得られ、中間的な孔径である425~500 μm の孔径の試料の吸音率は最も低かった(図19(b))。

ポーラス材料はその孔径が小さいほど大きな表面積を有する。表面積の大きい多孔質材料では空気とセル壁との粘性摩擦も大きいので、孔径が小さいほどよい吸音率を示すと期待されたが、孔径に関する図19(b)の結果はそれに反しており、

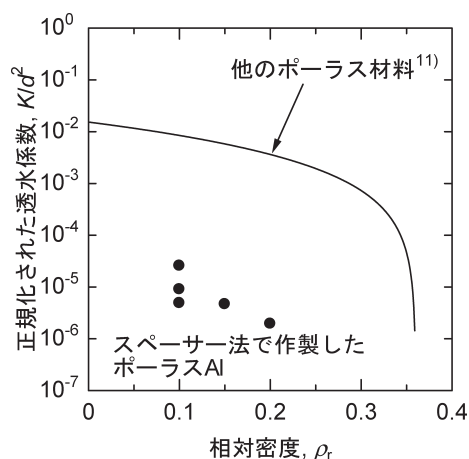


図18 スパーサー法で作製したポーラスアルミニウムおよび他のポーラス材料の透水係数と相対密度の関係

単に表面積が大きければ吸音率が向上するわけではないことを示している。

吸音多孔質材料内での音波減衰は、主に(1)母材表面と気孔内空気との粘性摩擦・(2)連通孔での縮流による圧力損失・(3)母材の振動減衰という3つの機構が組合されて起こる。本研究で作製したポーラスアルミニウムでは(3)の母材の振動減衰の影響は小さい。また、図19で示したように、表面積が大きい試料でも必ずしも吸音率が向上していないことから、(1)の粘性摩擦だけでは説明がつかない。このことから、(2)の縮流による圧力損失の影響が大きいと推測される。

Luらは連通孔を有する多孔質材料の吸音特性を評価するモデルを提案した³⁶⁾。このモデルにより計算された吸音率と周波数の関係を図19(b)に破線で示す。モデルは異なる孔径を有するポーラスアルミニウムの吸音特性をよく再現している。このことから、連通孔での縮流による圧力損失が顕著であり、連通孔の大きさが吸音特性を決める重要な変数であることがわかる。

5. その他・最近の動向

スパーサー法により作製できる微細孔ポーラス金属は上記のアルミニウム・銅にとどまらず、チタン^{37)~39)}・マグネシウム^{40),41)}・ニチノール(ニッケル-チタン形状記憶合金)^{42),43)}・フェライト鋼⁴⁴⁾での作製例が報告されている。また、铸造スパーサー法では金属ガラスのポーラス化も行われている^{45),46)}。いずれにおいても、焼結あるいは溶融のための加熱中に母相金属と反応せず、かつ焼結中や焼結後に簡単に除去できるスパーサー粒子の選定が必要であるが、多くの場合マイクロメートルオーダーの微細かつ均一な孔径を創出できている。

6. まとめ

ポーラス金属の作製法のひとつ、スパーサー法の具体的な手法と作製されたポーラス金属の諸特性について概説した。スパーサー法は孔径や気孔率などの気孔性状を制御することに長けており、特にマイクロメートルオーダーの微細気孔をもつポーラス金属を作製することができる。気孔性状の均一性

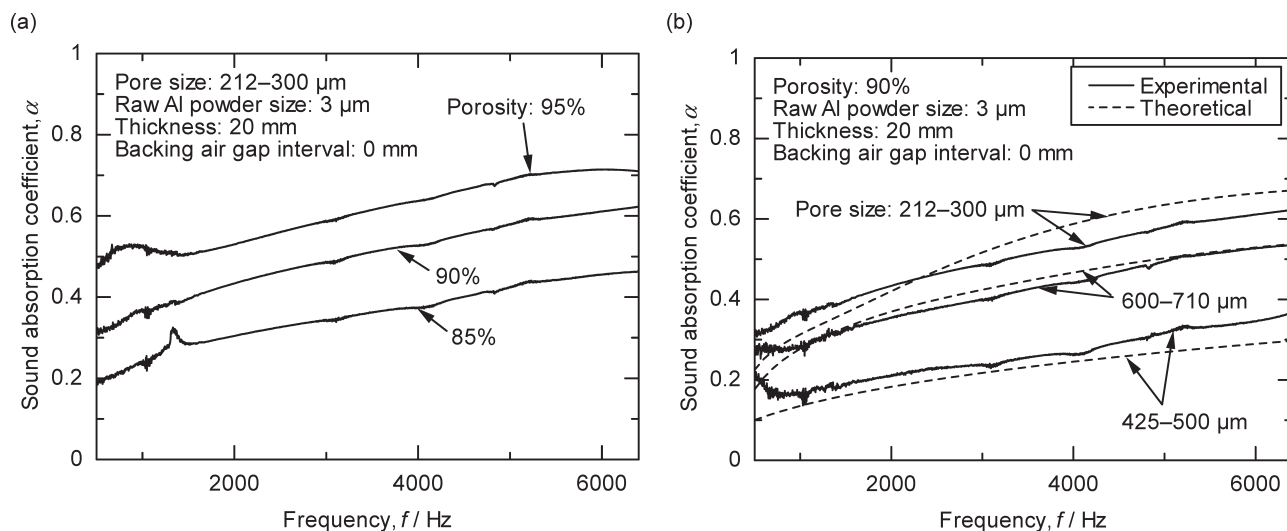


図19 スパーサー法により作製したポーラスアルミニウムの吸音特性と(a)気孔率、(b)孔径の関係

にも優れ、局所変形に由来する機械的特性のばらつきを抑え、信頼性を向上できる。さらに、流体を内包できるという緻密材にはない特徴を活かし、吸音などの機能材料への応用も有望視される。

従来の金属研究での元素添加等の手法を「足し算」とするならば、気孔を導入して軽さを追求するポーラス金属の研究はむしろ「引き算」であり、これまでのアプローチとはまったく異なるアイディアや努力が必要とされる。しかし、この引き算の難しさこそが現在のポーラス金属研究の多様性を生んでいる。スパーサー法も含めて今後の展開を期待したい。

謝 辞

スパーサー法によるポーラスアルミニウムの作製は産業技術総合研究所の山田康雄博士の助言のもと、公益財団法人軽金属奨学会教育研究資金の援助を受けて行った。また、各種特性試験は著者らの研究室の大学院生の協力によって実現できた。流体透過性の試験は佐賀大学海洋エネルギー研究センターの池上康之准教授・和嶋隆昌研究員（現：秋田大学助教）との共同で行った。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Sakaguchi, M. Mabuchi, M. Nakamura, T. Asahina, T. Mukai, H. Kanahashi and K. Higashi: *J. Mater. Sci. Lett.*, **18** (1999), 1477–1480.
- 2) T. A. Schaedler, A. J. Jacobsen, A. Torrents, A. E. Sorensen, J. Lian, J. R. Greer, L. Valdevit and W. B. Carter: *Science*, **334** (2011), 962–965.
- 3) J. Banhart: *Prog. Mater. Sci.*, **46** (2001), 559–632.
- 4) H. Nakajima: *Prog. Mater. Sci.*, **52** (2007), 1091–1173.
- 5) T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama and A. Kitahara: *Adv. Eng. Mater.*, **2** (2000), 179–183.
- 6) K. Kadoi and H. Nakae: *Mater. Trans.*, **52** (2011), 1912–1919.
- 7) L. Polonsky, S. Lipton and H. Markus: *Modern Cast.* **65** (1961), 57–71.
- 8) C. San Marchi and A. Mortensen: *Acta Mater.*, **49** (2001), 3959–3969.
- 9) C. Gaillard, J. F. Despois and A. Mortensen: *Mater. Sci. Eng. A*, **374** (2004), 250–262.
- 10) C. San Marchi, J. F. Despois and A. Mortensen: *Acta Mater.*, **52** (2004), 2895–2902.
- 11) J. F. Despois and A. Mortensen: *Acta Mater.*, **53** (2005), 1381–1388.
- 12) J. F. Despois, R. Mueller and A. Mortensen: *Acta Mater.*, **54** (2006), 4129–4142.
- 13) A. Pollien, Y. Conde, L. Pambaguian and A. Mortensen: *Mater. Sci. Eng. A*, **404** (2005), 9–18.
- 14) J. F. Despois, A. Marmottant, L. Salvo and A. Mortensen: *Mater. Sci. Eng. A*, **462** (2007), 68–75.
- 15) C. E. Wen, M. Mabuchi, Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Chino, H. Hosokawa and T. Asahina: *J. Mater. Sci. Lett.*, **22** (2003), 1407–1409.
- 16) M. Hakamada, Y. Asao, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *Acta Mater.*, **55** (2007), 2291–2299.
- 17) L. J. Gibson and M. F. Ashby: *Cellular Solids Structure and Properties* (2nd Ed.), Cambridge Univ. Press, (1997), 175–183.
- 18) M. Hakamada, T. Kuromura, Y. Chino, Y. Yamada, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *Mater. Sci. Eng. A*, **459** (2007), 286–293.
- 19) M. Hakamada, Y. Yamada, T. Nomura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *Mater. Trans.*, **46** (2005), 2624–2628.
- 20) 日本規格協会：ポーラス金属用語, JIS H 7009, (2008), 1–24.
- 21) 日本規格協会：ポーラス金属の圧縮試験方法, JIS H 7902, (2008), 1–14.
- 22) 金武直幸：塑性と加工, **50** (2009), 1004–1008.
- 23) M. Hakamada, H. Watanabe, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *Mater. Trans.*, **50** (2009), 427–429.
- 24) L. J. Gibson: *J. Biomech.*, **18** (1985), 317–328.
- 25) Y. Sugimura, A. Rabiei, A. G. Evans, A. M. Harte and N. A. Fleck: *Mater. Sci. Eng. A*, **269** (1999), 38–48.
- 26) A. M. Harte, N. A. Fleck and M. F. Ashby: *Acta Mater.*, **47** (1999), 2511–2524.
- 27) P. Zhang, M. Haag, O. Kraft, A. Wanner and E. Arzt: *Philos. Mag. A*, **82** (2002), 2895–2907.
- 28) M. Hakamada, T. Nomura, Y. Yamada, Y. Chino, H. Hosokawa, T. Nakajima, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *J. Mater. Res.*, **20** (2005), 3385–3390.
- 29) T. J. Lu, H. A. Stone and M. F. Ashby: *Acta Mater.*, **46** (1998), 3619–3635.
- 30) T. Ogushi, H. Chiba, H. Nakajima and T. Ikeda: *J. Appl. Phys.*, **95** (2004), 5843–5847.
- 31) Y. Yu, C. H. Chen, J. L. Shui and S. Xie: *Angew. Chem. Int. Ed.*, **44** (2005), 7085–7089.
- 32) L. Giani, G. Groppi and E. Tronconi: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44** (2005), 4993–5002.
- 33) M. Hakamada, T. Wajima, Y. Ikegami, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, **45** (2006), L575–L577.
- 34) M. Hakamada, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *Appl. Phys. Lett.*, **88** (2006), 254106.
- 35) M. Hakamada, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi: *J. Appl. Phys.*, **100** (2006), 114908.
- 36) T. J. Lu, F. Chen and D. He: *J. Acoust. Soc. Am.*, **108** (2000), 1697–1709.
- 37) C. E. Wen, Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Chino, H. Hosokawa and M. Mabuchi: *J. Mater. Res.*, **17** (2002), 2633–2639.
- 38) C. E. Wen, Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Chino, T. Asahina and M. Mabuchi: *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, **13** (2002), 397–401.
- 39) Y. Bing and D. C. Dunand: *Mater. Sci. Eng. A*, **528** (2010), 691–697.
- 40) C. E. Wen, Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Chino, H. Hosokawa and M. Mabuchi: *Mater. Lett.*, **58** (2004), 357–360.
- 41) G. L. Hao, F. S. Han and W. D. Li: *J. Porous Mater.*, **16** (2009), 251–256.
- 42) A. Bansiddhi and D. C. Dunand: *Intermetallics*, **15** (2007), 1612–1622.
- 43) A. Bansiddhi and D. C. Dunand: *Acta Biomater.*, **4** (2008), 1996–2007.
- 44) J. A. Scott and D. C. Dunand: *Acta Mater.*, **58** (2010), 6125–6133.
- 45) T. Wada and A. Inoue: *Mater. Trans.*, **44** (2003), 2228–2231.
- 46) A. H. Brothers and D. C. Dunand: *Adv. Mater.*, **17** (2005), 484–486.