

## マイクロ・ナノポーラス金属材料の塑性変形挙動

袴田 昌高\*

## 1. はじめに

ポーラス（多孔質）金属は70%以上といった高気孔率を有し低密度であることに加え、圧縮時に一定応力で大ひずみまで変形するという特異な塑性変形挙動（応力-ひずみ曲線においてこの領域をプラトー領域と称する）を示す<sup>1)</sup>。このため、自動車など輸送機器の衝突エネルギー吸収材としての応用が期待される。

また、ポーラス金属は質量あたりの表面積（比表面積）が大きい。孔径を微細化することでさらに表面積が大きくなり、流体抵抗や吸音等の表面に由来する効果も格段に強くなる。この表面効果を積極的に活用するためには、孔径の微細制御（マイクロ化・ナノ化）によって表面積を大きくすることが不可欠である。

しかし、現行のポーラス金属の孔径は多くの場合ミリメートルオーダーと粗大であり、また大きさ・形状などのばらつきが大きい。そのような背景から最近、孔径がマイクロメートルあるいはナノメートルオーダーのマイクロポーラス・ナノポーラス金属が注目を集めている。本研究ではこれらマイクロポーラス金属・ナノポーラス金属を創製し、その塑性変形挙動を調べた。

## 2. マイクロポーラス金属

## 2.1 スペーサ法によるマイクロポーラス金属の創製

図1に焼結スペーサ法の模式図を示す。原料として金属微粉末およびスペーサ粒子を用意し、これらを所与の比率で混合したのち圧粉し、加熱して焼結する。焼結中あるいは焼結後にスペーサを除去することで、スペーサとほぼ同じ大きさ・形状を有する気孔が形成される。この手法により、図2に示すようにアルミニウムおよび銅のマイクロポーラス化に成功した<sup>2)~4)</sup>。

## 2.2 単純圧縮特性

マイクロポーラス Al と発泡法で作製された市販のポーラス Al 合金の室温圧縮試験結果を図3に示す。マイクロポーラス Al では明瞭にプラトー領域が表れており、しかもプラトー領域の応力変動幅は発泡法で作製されたポーラス

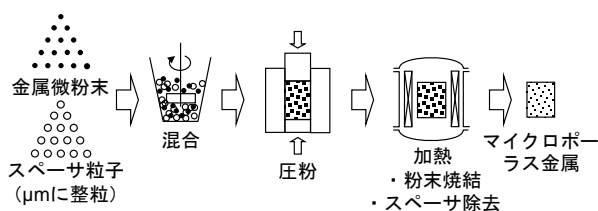


図1 焼結スペーサ法によるマイクロポーラス金属の作製

\*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 京都市左京区吉田本町

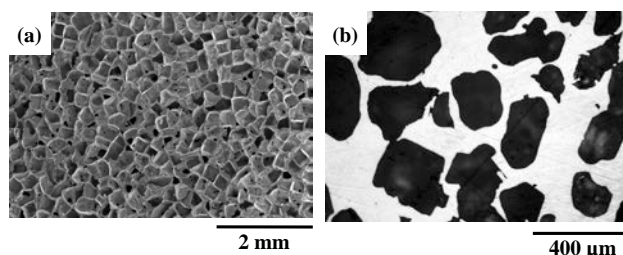


図2 スペーサ法により作製された (a) マイクロポーラス Al および (b) マイクロポーラス Cu の顕微鏡写真

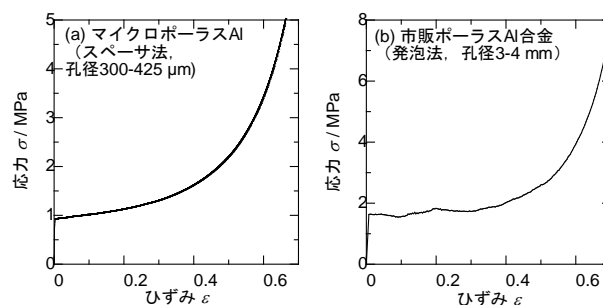


図3 (a) マイクロポーラス Al および (b) 市販のポーラス Al 合金の室温圧縮試験における応力-ひずみ曲線

Al 合金に比べ小さい。スペーサ法により均一微細に気孔形状を制御した結果、このように一定応力で安定して塑性変形するマイクロポーラス金属を得ることができた<sup>5)</sup>。

## 2.2 圧縮 - 圧縮疲労特性

実用上の観点からはポーラス金属の疲労特性を調べるのが欠かせない。マイクロポーラス Al および市販のポーラス Al を圧縮 - 圧縮の繰返し载荷に供した結果、市販のポーラス Al ではある繰返し数でひずみが急激に増加する“ひずみジャンプ”が発生した。ひずみジャンプの発生する繰返し数は荷重が大きくなるほど小さくなった。一方、マイクロポーラス Al ではこのひずみジャンプが明瞭に見られず、繰返し数の増加にともないひずみが漸次的に増加した（図4）。市販のポーラス Al は発泡法で作製されているため孔径が粗大かつ不均一であり、圧縮 - 圧縮繰返し载荷中に局所変形を生じたが、マイクロポーラス Al では孔径が微細であるために局所変形が抑えられ、ひずみジャンプが明瞭に生じないことがわかった<sup>5)</sup>。

## 3. ナノポーラス金属

## 3.1 脱合金化法によるナノポーラス金属の創製

ナノポーラス金属の作製法として、脱合金化法が知られている<sup>6)</sup>。貴な金属と卑な金属の2成分からなる完全固溶

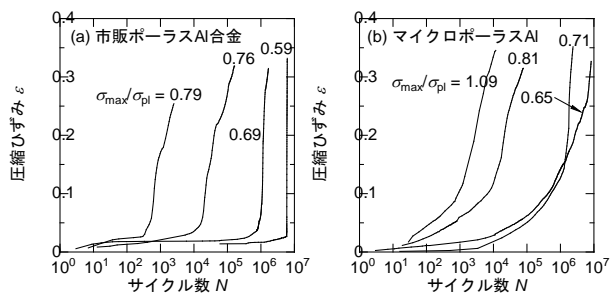


図4 (a) 市販のポーラス Al 合金および (b) マイクロポーラス Al の圧縮 - 圧縮疲労試験における圧縮ひずみと繰返し数の関係 ( $\sigma_{\max}$  は試験時の最大応力,  $\sigma_{pl}$  はポーラス金属のプラトー応力)

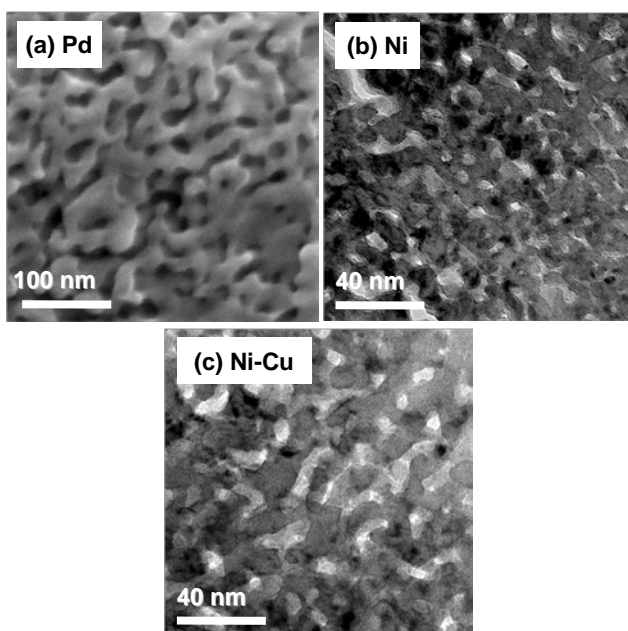


図5 脱合金化により作製したナノポーラス金属の電子顕微鏡写真 (a) Pd, (b) Ni, (c) Ni-Cu ((a) は走査電子顕微鏡, (b) および(c) は透過電子顕微鏡)

単相合金を作り、卑な成分を酸などにより選択的に除去すると、腐食中に貴な成分の金属原子が自己集合し、ナノメートルオーダーの非常に微細な開気孔構造を形成する<sup>9)</sup>。

脱合金化法により Au-Ag 単相固溶合金から Ag を選択除去することでナノポーラス Au を得る研究が多い中で、著者らはパラジウム (Pd)・ニッケル (Ni)・ニッケル - 銅 (Ni-Cu) といった多種のナノポーラス金属の創製に成功し (図5), ナノポーラス構造の形成機構や孔径微細化の指針を明らかにした<sup>7~9)</sup>。

### 3.2 力学特性

連続体力学の観点からは、ポーラス金属の圧縮特性は、セル形状が同一 (相似) である限り気孔径あるいはセル柱寸法に依存しない<sup>1)</sup>。しかし、脱合金化法により作製したナノポーラス Au のナノインデンテーション試験の結果、孔径が小さくなるほど強度が向上した (表1)<sup>10)</sup>。このようにナノポーラス金属においては、従来のミリ~マイクロメートルオーダーの孔径を有するポーラス金属では見られない微小寸法による強化機構が発現する。この強化機構は、ナノワイヤ等で提唱されている転位欠乏による強化機構<sup>11)</sup>

表1 ナノポーラス Au のナノインデンテーション試験結果

試料	セル柱径 (≒孔径) $d_L$ / nm	硬さ $H$ / GPa
腐食まま材	5	$0.99 \pm 0.18$
473 Kアニール材	29	$0.74 \pm 0.12$
573 Kアニール材	126	$0.52 \pm 0.14$

と類似するものと推測される。ポーラス構造をナノメートルオーダーまで微細化することで強度を上げ、気孔の導入による強度の低下を補える可能性が示唆された。

## 4. おわりに

マイクロメートルおよびナノメートルオーダーの均一な孔径を有するマイクロポーラス金属・ナノポーラス金属を創製し、塑性変形挙動を調べた。マイクロポーラス金属では気孔の微細均一性により圧縮変形時の局所変形が抑制されることを、ナノポーラス金属では孔径のナノ化による従来にない高強度化を明らかにした。

## 謝辞

今回日本塑性加工学会新進賞を賜ることができたのは、馬淵守教授 (京都大学) のご指導、および同教授研究室の学生・大学院生のご尽力、また著者の前所属機関である産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門の諸先輩・同僚のご協力のおかげである。各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Gibson, L. J. & Ashby, M. F.: Cellular Solids — Structure and Properties (2nd Ed.), (1997), 1–234, Cambridge University Press.
- 2) Hakamada, M., Yamada, Y., Nomura, T., Kusuda, H., Chen, Y. & Mabuchi, M.: Mater. Trans., **46**-2 (2005), 186–188.
- 3) Hakamada, M., Yamada, Y., Nomura, T., Chen, Y., Kusuda, H. & Mabuchi, M.: Mater. Trans., **46**-12 (2005), 2624–2628.
- 4) Hakamada, M., Asao, Y., Kuromura, T., Chen, Y., Kusuda, H. & Mabuchi, M.: Acta Mater., **55**-7 (2007), 2291–2299.
- 5) Hakamada, M., Kuromura, T., Chino, Y., Yamada, Y., Chen, Y., Kusuda, H. & Mabuchi, M.: Mater. Sci. Eng. A, **459**-1–2 (2007), 286–293.
- 6) Erlebacher, J., Aziz, M. J., Karma, A., Dimitrov, N. & Sieradzki, K.: Nature, **410**-6827 (2001), 450–453.
- 7) Hakamada, M. & Mabuchi, M.: J. Alloys Compd., **479**-1–2 (2009), 326–329.
- 8) Hakamada, M. & Mabuchi, M.: J. Alloys Compd., **485**-1–2 (2009), 583–587.
- 9) Hakamada, M., Tajima, K., Yoshimura, K., Chino, Y. & Mabuchi, M.: J. Alloys Compd., **494**-1–2 (2010), 309–314.
- 10) Hakamada, M. & Mabuchi, M.: Scr. Mater., **56**-11 (2007), 1003–1006.
- 11) Wu, B., Heidelberg, A. & Boland, J. J.: Nat. Mater., **4**-7 (2005), 525–529.