

氏名	はかま 袴	だ 田	まさ 昌	たか 高
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)			
学位記番号	エネ博第 150 号			
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 23 日			
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当			
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻			
学位論文題目	FABRICATION AND PROPERTIES OF MICROPOROUS AND NANOPOROUS METALS (マイクロポーラスおよびナノポーラス金属の創製と特性評価)			
論文調査委員	(主査) 教授 馬 潤 守 教授 宅 田 裕 彦 教授 福 中 康 博			

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、 μm および nm オーダーの微細かつ均一な気孔性状を有するマイクロポーラス金属およびナノポーラス金属の創製プロセスと、それらの各種特性を論じた研究の成果をまとめたもので、12章からなっている。

第1章は序論で、軽量化・多機能化の観点からエネルギー問題の解決に資する新素材として注目されるポーラス金属について、現行の製造法および各種特性、応用例について概説した後、現在製造されているポーラス金属の気孔性状が不均一かつ粗大であるがゆえに十分な材料特性が得られていないという問題点を指摘し、それらを踏まえた上で、本研究の目的である気孔性状の均一化・微細化についてその学術的、実用的効用を述べている。

第2章では、 μm オーダーの均一な気孔性状を有するポーラス金属を創製するために粉末冶金スパーサー法を開発し、本法によるマイクロポーラス Al およびマイクロポーラス Cu の製造プロセスについて記述している。

第3章では、異なる条件で作製したマイクロポーラス Al の室温圧縮特性を明らかにするとともに、セル壁の引張り伸びがマイクロポーラス Al の圧縮特性に影響することを見出している。

第4章では、マイクロポーラス Al および緻密 Al の高温圧縮特性を、温度 573-773K およびひずみ速度 $8 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ の条件で調べている。マイクロポーラス Al の応力指数および変形の活性化エネルギーは、緻密 Al のそれらとほぼ等しくなることから、マイクロポーラス Al では均一な気孔性状に起因し局所変形が抑えられることを示唆している。また、変形中の試料の微視組織観察からこのことを確認している。

第5章では、マイクロポーラス Al と粗大で不均一な孔径を有する市販のポーラス Al の単純圧縮特性および圧縮-圧縮疲労特性を比較している。単純圧縮試験においては、マイクロポーラス Al は市販のポーラス Al に比べ変動の少ない流動応力を示し、圧縮-圧縮疲労試験においては、市販のポーラス Al ではある繰り返し数でひずみが急増するひずみジャンプが見られるが、マイクロポーラス Al では繰り返し载荷が進むにつれ圧縮ひずみが漸次的に増加することを明らかにしている。また、これら力学特性結果と微視組織観察結果から、単純圧縮特性には試料に含まれる気孔数が影響し、圧縮-圧縮疲労特性では気孔性状の均一性が強く影響することを示している。

第6章では、種々の相対密度を有するマイクロポーラス Cu の圧縮特性を調べている。降伏応力と相対密度の関係は、相対密度により3つの領域に分かれ、第1領域(相対密度0.22-約0.5)では(降伏応力)=(定数) \times (相対密度) n で表される降伏応力の相対密度依存性指数 $n=2.3$ であり、第2領域(相対密度約0.5-0.9)では $n=1.3$ となること、また、第3領域(相対密度0.9-1)ではごく少量の気孔が応力集中やクラックの発生源となり、降伏応力は相対密度の減少とともに急激に減少することを明らかにしている。変形中の試料の観察から、セル壁の変形様式は第1領域では主に曲げおよび座屈、第2領域では主に降伏であることを確認している。

第7章では、マイクロポーラス Al の流体透過特性を調べ、スパーサー法で作製したマイクロポーラス Al のダルシー透水係数は、従来のポーラス材料に比べ $10^2 - 10^3$ のオーダーで小さいことを見出している。これは、粉末冶金スパーサー法に

より作製したマイクロポーラス Al が閉気孔構造のセル壁に連通路の開いた特異な構造を有するためであると考察している。

第8章では、マイクロポーラス Al の吸音特性を調査している。測定結果は連通路を考慮したモデルの計算結果とよく一致し、連通路の大きさが吸音特性に大きく影響することを指摘している。また、連通路の大きさを変えて作製したマイクロポーラス Al の吸音率測定結果からこのことを確認している。さらに、背後空気層を適切に導入することによって、厚さ 1mm の薄いマイクロポーラス Al 板において吸音率がほぼ1となることを見出している。

第9章では、マイクロポーラス Al の電気抵抗を調べている。試料が十分な数の気孔を含む場合の電気抵抗の測定結果は、連通路の存在を考慮に入れた単位胞モデルによる計算結果とよく一致するものの、気孔を試料寸法内に1-2個しか含まないような大孔径を有する試料では、試料内での局所的な有効断面積の減少から電気抵抗が増加することを明らかにしている。このことから、電気抵抗の評価には試料寸法内に最低3つの気孔を含む試料を用いる必要があることを指摘している。

第10章では、脱成分腐食法による孔径、セル柱径が約 5nm であるナノポーラス Au の創製プロセスについて示すとともに、熱処理および酸処理による孔径の制御について述べている。すなわち、熱処理においては均一なセル柱径の粗大化が生じセル柱径は一様に数百 nm まで粗大化したのに対し、酸処理では局所的なセル柱径の粗大化が起こり緻密壁にナノポーラス構造が囲まれた特異形状が得られることを明らかにしている。これらの結果は、熱処理や酸処理によりナノポーラス Au の気孔性状を制御できる可能性を示している。

第11章では、ナノポーラス Au の力学特性をナノインデンテーション試験により調べている。セル柱径が小さいほどナノポーラス Au の強度は向上するとともに、セル柱の強度はバルクの多結晶 Au の数十倍～200倍程度と非常に高いことを明らかにしている。このようなナノポーラス Au の高強度は、ホール・ベッチの式に表される結晶粒微細化強化機構では説明できず、ナノポーラス Au のセル柱は転位等の欠陥が少ない、すなわち完全結晶に近い状態になっているため降伏強度が理想強度に漸近していることを示唆している。

第12章は結論であり、本論文において得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、 μm および nm オーダーの微細かつ均一な気孔性状を有するマイクロポーラス金属およびナノポーラス金属の創製プロセスと、それらの各種特性を論じた研究の成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 粉末冶金スペーサー法により μm オーダーの微細かつ均一な気孔性状を有するマイクロポーラス金属を作製し、その力学特性（単純圧縮特性、高温圧縮特性、圧縮-圧縮疲労特性）を調査した。その結果、単純圧縮特性においては流動応力に変動が少なく、また圧縮-圧縮疲労特性においてはひずみが漸次的に増加するなど、マイクロポーラス Al がこれまでのポーラス Al と異なる力学特性を有していることを明らかにした。これらのことにより、気孔性状の均一化・微細化がポーラス金属の力学特性向上に有効な手段であることを提示した。また、種々の相対密度を有するマイクロポーラス Cu の圧縮特性を調査し、圧縮特性の相対密度依存性がセル壁の変形様式と密接に関わっていることを明らかにした。
- (2) スペーサー法により作製したマイクロポーラス Al の機能特性（流体透過特性、吸音特性、電気抵抗特性）を調査した結果、これらの機能特性が、気孔率、孔径、連通路径等の気孔性状と密接に関連していることを示した。特に吸音特性の調査においては、適切な気孔性状の制御により、厚さ 1mm のマイクロポーラス Al において吸音率ほぼ1を達成できることを見出した。これらのことにより、ポーラス金属の機能特性を向上させるためには気孔性状の精緻な制御が必須であることを提示した。
- (3) 脱成分腐食法により孔径、セル柱径約 5nm のナノポーラス Au を作製し、熱処理および酸処理に供した結果、熱処理と酸処理においてはセル柱の粗大化過程が異なり、特に酸処理においてはナノポーラス構造と緻密壁が混在する特異な気孔性状を有するナノポーラス Au を作製できることを示した。これらのことから、熱処理や酸処理によりナノポーラス Au の気孔性状を制御できることが示唆された。
- (4) ナノポーラス Au の力学特性を調査した結果、セル柱径が小さいほど強度が高くなることがわかった。セル柱の強度は理想強度に匹敵しており、このような高強度は結晶粒微細化強化機構では説明できない。ナノポーラス Au のセル柱

では、転位等の欠陥が少なく完全結晶に近づいているため、降伏強度が理想強度に漸近していることが示唆された。

以上、本論文は軽量化・多機能化等の観点からエネルギー問題に対応可能な新素材として期待されるポーラス金属において、気孔性状の均一化・微細化を実現し、それらが各種特性に与える影響を明らかにしており、エネルギー科学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年12月25日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。