

システム技術開発調査研究
17-R-4

ポラス金属の利用技術の
可能性に関する調査研究
報告書
- 要 旨 -

平成18年3月

委託先 財団法人 機械システム振興協会
財団法人 素形材センター

KEIRIN 00

この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 政策研究院 リサーチフェロー 藤正巖氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「ポーラス金属の利用技術の可能性に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が 財団法人素形材センターに委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成18年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

我が国製造業では、国際競争力が激化する中で、経済全体の生産性の低迷、厳しい雇用情勢、エネルギー・環境・リサイクル問題の重要性の増大等、その環境が厳しさを増す中、情報技術革新への対応、企業の事業再構築、グローバル化等の動きが加速しており、経済構造改革の推進の重要性が高まっています。

このような中で、素形材産業は素材に形を与えて機械産業に供給するという、素材産業と機械産業を結びつける重要な役割を担っており、機械産業を中心とする我が国経済発展にとって、素形材産業が今日まで果たしてきた役割は極めて大きく、今後もその重要性に変わりはないでしょう。

技術革新が急速に進む機械産業界にあって、素形材産業は、求められるニーズに即応した機動的な生産体制を確立し、提案型企業への転換、高品質で安価な素形材製品を安定的に供給するため、素形材産業の技術基盤を強化する必要があります。

素形材産業では、CAD/CAM/CAEの進展、新材料の出現、新たなプロセスや型技術等の開発を受けて様々な技術革新が行われておりますが、ユーザニーズの多様化、生産性・歩留り向上、技術・技能の継承、リサイクル・省エネルギー等の諸課題にさらに積極的に対応し、素形材産業の活性化を図ることが強く望まれています。

このような観点に立って、本年度、財団法人素形材センターでは、財団法人機械システム振興協会から「ポラス金属の利用技術の可能性に関する調査研究」について委託を受け、本テーマを推進するために当センター内に「ポラス金属の利用技術の可能性に関する調査研究委員会(委員長 名古屋大学大学院工学研究科 金武直幸教授)」を設置し、事業を推進してきました。本報告書は、この開発成果をとりまとめたものです。

ここに、本報告書を作成するにあたり、ご指導・ご援助をいただいた経済産業省および財団法人機械システム振興協会に深く感謝の意を表するとともに、金武委員長をはじめとする委員会委員及び協力者、並びに実験を担当した京都大学大学院エネルギー科学研究科 馬淵守教授に対し、厚く御礼申し上げます。

本書が関係各方面で十分に活用され、我が国素形材の発展に寄与することを願う次第であります。

平成18年3月

財団法人 素形材センター

目 次

序

はじめに

1 調査研究の目的	1
2 調査研究の実施体制	2
3 調査研究成果の要約	5
3-1 ポーラス金属材料の製造技術の現状	5
3.1.1 ポーラス金属の概要	5
3.1.2 各種ポーラス金属の製造法と特徴	9
3-2 ポーラス金属の利用拡大可能性に関する検討	41
3.2.1 ポーラス金属の利用可能性の概要	41
3.2.2 各ポーラス金属を使用する製品イメージ	43
3.2.3 自動車におけるポーラス金属の適用可能性	44
3-3 ポーラスアルミニウム合金薄板の製造技術可能性に関する検討	48
3.3.1 目的	48
3.3.2 スペーサー法によるマイクロポーラスアルミニウムの作製	48
3.3.3 最適作製条件の究明	49
3.3.4 圧縮特性評価	52
3.3.5 圧縮疲労特性評価	53
3.3.6 厚さ 1 mm のマイクロポーラスアルミニウム薄板の作製	56
3.3.7 まとめ	57
3-4 ポーラス金属の利用技術開発テーマの抽出	57
4 調査研究の今後の課題及び展開	59

1 調査研究の目的

(1) 目的

機械部品等の軽量化、高付加価値化への貢献が期待されるポーラス金属の利用拡大に向けて課題を抽出するため、種々のポーラス金属材料の製造技術動向、ポーラス金属の特性と用途展開可能性調査、成形加工プロセスについて調査研究を行う。

なお、本調査研究の成果は、平成 18 年度以降におけるポーラス金属の利用技術開発プロジェクト展開の基礎資料とする。

(2) 必要性

我が国の鋳鍛造等の素形材産業は、機械部品等を供給する重要な基幹産業である。国際的な価格競争に直面しているものの、高い技術力に裏打ちされた優位性が再認識されているところではある。しかし、素形材産業ひいては機械産業の国際競争力を維持、向上するためには、革新的技術であって、相当程度の用途展開が期待できる技術開発が待望されている。

近年、製造技術の研究開発が進みつつあるポーラス金属は、実用金属で最も軽量な Mg 合金による軽量化を超える、いわば緻密材の軽量化の限界を超える軽量化を実現するものである。すなわち、自動車におけるアルミニウム化、電機製品におけるマグネシウム化などの軽量化が進められているが、金属をポーラス化することにより、これを上回る超軽量化を可能にするもので、機械産業における軽量化ニーズに応えるものである。

また、ポーラス金属は、多孔質で比表面積が大きい構造のため、高いエネルギー吸収能、熱交換容量、断熱特性、吸音特性等を有する機能性材料としても有望である。

現在は、ロータス型ポーラス金属を工作機械等に使用する研究をはじめ、衝撃吸収材、防音材、生体医療材などの実用化開発が一部で進められているが、ポーラス金属の構造、製造技術は種々あり、これによって期待される特性も多岐に亘るため、広範な分野での今後の展開が期待されている。

ポーラス金属を自動車部品等に適用すれば、軽量化に加え、制振性、断熱性などの機能向上も可能になる。また、高効率の熱交換器等への適用も有望である。さらに、鋳物の鋳包み技術や、複合化技術によって、種々のポーラス金属の広範な部品への適用可能性が拡大すると考えられる。また、ポーラス金属板でいえば実用化されているものはポア径が 4mm 程度であるため板厚を 4mm 以下にすることができないが、板厚 1mm 程度の薄板ポーラス金属が開発されれば、電気製品の筐体など、ポーラス金属板の利用範囲が格段に拡大すると考えられる。

そこで、薄板開発を含め、使用目的に適合するポーラス構造の最適化技術、加工技術の開発が望まれるところから、本調査研究を実施するものである。

本調査研究は、軽量化材料と高機能材料の側面を合わせ持つポーラス金属の高度利

用による機械部品の軽量化、高機能化を図ることを目指す調査研究であって、機械産業の活性化に寄与すると考えられる。

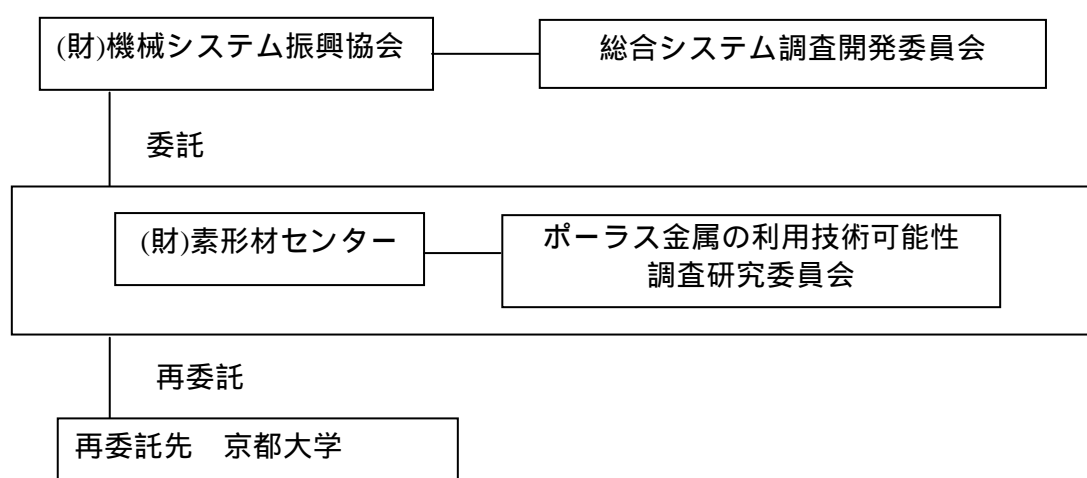
2 調査研究の実施体制

(1) 実施体制(委員会の設置等)

本スタディは、(財)機械システム振興協会より(財)素形材センターが委託を受け、実施した。なお、(財)機械システム振興協会内に「総合システム調査開発委員会(詳細は「(3)委員会構成」ののとおり)」を設置し、同委員会指導のもと、(財)素形材センターがスタディを推進した。

さらに、(財)素形材センター内に、ポラス金属の技術動向に詳しく、利用に向けての展開に関心を有する学識経験者、素形材企業等からなる委員会を設置し、この委員会において本事業の実施計画の策定、調査研究を行い、得られた成果を報告書にまとめた。

なお、具体的な調査研究の遂行は、素形材センターが主となり実施するが、このうち「ポラスアルミニウム合金薄板の製造技術可能性の検討」については、京都大学へ再委託した。



(2) 業務分担

1) (財)素形材センター

分担内容：ポラス金属材料の製造技術に関する情報収集
ポラス金属の利用拡大可能性に関する検討
ポラス金属の利用技術開発テーマの抽出

2) 再委託先；京都大学

分担内容：ポラスアルミニウム合金薄板の製造技術可能性の検討

(3) 委員会構成

「(1)実施体制」に示した、総合システム調査開発委員会及びポラス金属の利用技術可能性調査研究委員会の委員構成は、以下のとおりである。

総合システム調査開発委員会 (順不同・敬称略)

委員長	藤正 巖	政策研究院リサーチフェロー
委員	太田 公廣	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ
〃	志村 洋文	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ
〃	中島 一郎	東北大学未来科学技術共同研究センター センター長
〃	廣田 薫	東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授
〃	藤岡 健彦	東京大学大学院工学系研究科 助教授
〃	大和 裕幸	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授

ポラス金属の利用技術可能性調査研究委員会

委員長	金武 直幸	名古屋大学大学院 工学研究科マテリアル理工学専攻 材料工学分野 教授
委員	小坂田宏造	大阪大学 大学院基礎工学研究科機能創成専攻 機能デザイン領域制御生産情報講座 教授
〃	五家 政人	財団法人材料科学研究助成基金 常務理事
〃	清水 透	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 難加工材成形研究グループ 主任研究員
〃	鮎川 佳弘	財団法人日本自動車研究所 安全研究部衝突安全グループ 研究員
〃	千野 靖正	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 研究員
〃	馬淵 守	京都大学大学院 エネルギー科学研究科エネルギー応用 科学専攻資源エネルギーシステム学分野 教授
〃	三原 豊	香川大学工学部 知能機械システム工学科 教授
〃	三好 鉄二	神鋼鋼線工業株式会社開発本部アルボ室 室長
〃	横山 鎮	ホンダエンジニアリング株式会社 2K1Gr
オブザーバ	野邊 裕	経済産業省素形材産業室 技術統括専門職
協力者	中嶋 英雄	大阪大学 産業科学研究所 教授
〃	塩見 誠規	大阪大学 大学院基礎工学研究科機能創成専攻 機能デザイン領域 助教授
〃	廻 秀夫	ホンダエンジニアリング株式会社 2K1Gr
〃	山本 大介	ホンダエンジニアリング株式会社 2K1Gr
〃	箆 利博	ホンダエンジニアリング株式会社 2K1Gr

事務局 荻布真十郎 財団法人素形材センター 専務理事
 " 笹谷 純子 財団法人素形材センター 技術部長
 " 田邊 秀一 財団法人素形材センター技術部 技術課長

(4) 実施日程

項目	17年						18年			
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
ポーラス金属材料の製造技術に関する情報収集	→									
ポーラス金属の利用拡大可能性に関する検討					→					
ポーラスアルミニウム合金薄板の製造技術可能性の検討			→							
ポーラス金属の利用技術開発テーマの抽出							→			
報告書の作成									→	

(5) 執筆者一覧

本報告書の執筆者及びその分担は、下記のとおりである。 (敬称略)

1~2 調査研究の目的、実施体制	素形材センター
3 調査研究成果の要約	
3.1 ポーラス金属材料の製造技術の現状	
3.1.1 ポーラス金属の概要	金武直幸
3.1.2 各種ポーラス金属の製造法と特徴	
3.1.2.1 発泡溶融法	三好鉄二
3.1.2.2 ガス膨張法	千野靖正
3.1.2.3 プリカーサ法	金武直幸
3.1.2.4 燃焼合成法	金武直幸
3.1.2.5 連続帯溶融法(ロータス金属)	中嶋英雄
3.1.2.6 塗布法とスラリー発泡法	清水透
3.1.2.7 スペーサー法	馬淵守
3.1.2.8 MHS 法	三原豊
3.1.2.9 押し出し発泡法	塩見誠規
3.2 ポーラス金属の利用拡大可能性に関する検討	
3.2.1 ポーラス金属の利用可能性の概要	金武直幸
3.2.2 各ポーラス金属を使用する製品イメージ	鮭川佳弘、千野靖正、馬淵守 清水透、五家政人
3.2.3 自動車におけるポーラス金属の適用可能性	横山鎮、箆利博
3.3 ポーラス AI 合金薄板の製造技術可能性に関する実験	馬淵守
3.4 ポーラス金属の利用技術開発テーマの抽出	鮭川佳弘、千野靖正、馬淵守 金武直幸、清水透、五家政人
4 スタディの今後の課題及び展開	金武直幸

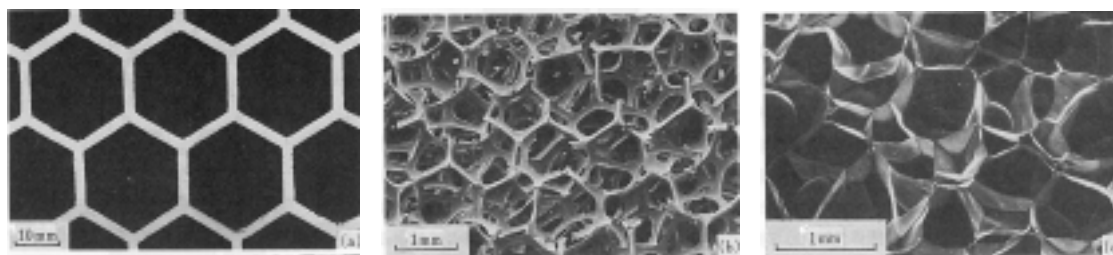
3 調査研究成果の要約

3-1 ポーラス金属材料の製造技術の現状

3.1.1 ポーラス金属の概要

人間が工業的に製造する物のほとんどが緻密体であるのに対して、自然界が作る物の多くが内部に多数の気孔を有する多孔質体であることは良く知られている。その代表例としては、サンゴ、蜂の巣、木材、茎や葉、生体骨など多孔質の形態や大きさは様々である。緻密な金属材料を多孔質化(ポーラス化)して、緻密材料では得られない高付加価値を有する材料を開発する試みは半世紀以上前から行われてきた。そして、21世紀の大きな課題である環境・エネルギー・高齢化への対応材料として、このポーラス金属(多孔質金属)の有用性が再認識され、研究開発が活発化しつつある。

内部に多数の空孔(セル)を有する材料には、数十 μm の微細空孔から数 mm の空孔を有する材料まで多様であり、それらは“セル構造材料”、“多孔質材料”、“ポーラス材料”、“発泡(フォーム)材料”など様々に呼ばれている。セル構造体とは、セルの稜及び面を構成する緻密固体の支柱または平板を相互につなぎ合わせたネットワークからなる固体のことである。その三つの代表的な構造を図 1-1-1 に示す¹⁾。最も単純な構造(図 1-1-1(a))はハチの巣の六角形のセルのように多角形を二次元的に配列して空間を隙間なく充填したもので、この種の二次元的なセル構造体は“ハニカム”と呼ばれる。一般的なセル構造体は三次元空間を隙間なく満たすことのできる多面体をセルとするもので、大きく二つに大別される。一つは、セル構造を構成する固体がセルの稜部に集中している場合(セルとセルの境界面が開いている場合)で、“オープンセル型”と呼ばれる(図 1-1-1(b))。これに対して、セルの境界にも固体がある場合(セル同士が互いに分離されている場合)で、“クローズドセル型”と呼ばれる(図 1-1-1(c))。



(a)二次元ハニカム (b)オープンセル型 (c)クローズドセル型

図 1-1-1 セル構造体の例 (出典：セル構造体、内田老鶴圃、1993)

このような広いセル構造体の中で、金属によってセルの稜や面が構成されるものが“ポーラス金属”、“多孔質金属”と称される。数十 μm の微細空孔を有するポーラス金属の例としては、含油軸受けや生体硬組織代替材料(人工骨)があげられる。それらの製造には、粉末原料を適度に固めた成形体を焼結する方法、あるいは粉末原料とセルを形成するためのスペーサー材料を混合焼結した後にスペーサー材料を取り除く方法で、材料内に微細な気孔を残存させる粉末冶金法が多く利用されている。一方、数

mm の空孔を有するポーラス金属の代表としては、いわゆる発泡(フォーム)金属がある。フォーム金属の製造法の一つは、セルを形成するためのスペース材料を利用した精密鑄造法や粉末冶金法で、主にオープンセル型のフォームが製造される。また、熔融金属中にガスを吹込んだり、ガス発生助剤を添加する方法、あるいは粉末金属とガス発生助剤を混合成形して加熱発泡する方法などがあり、主にクローズドセル型のフォームが製造される。また、ハニカムのような規則的な二次元配列ではないが、熔融金属の一方向凝固法によって蓮根状に一方向に伸びた気孔を有するロータス型ポーラス金属も開発されている。

セル構造体では、セルのタイプ(オープン、クローズ)の他にセルの大きさや相対密度も、その特性を支配する重要な因子である。これらの因子は製造法によって様々に変化し、用途目的に応じて作り分けられる。図 1-1-2 は、ポーラス金属の主な製造法において作製可能なセルサイズ、セルタイプ、相対密度をまとめた図である²⁾。そして、このポーラス金属は、空孔(セル)の形態、大きさ、量、さらには金属の種類に応じて機械的、物理的、熱的、電氣的に様々な特徴を有しており、その特徴を生かして超軽量材料、高比剛性材料、エネルギー吸収材料、振動吸収材料、防音材料、断熱材料、電極材料、フィルター材料、生体医療材料、熱交換器材料、含油軸受け材料など、極めて広い応用展開が期待される魅力ある材料として注目されている。

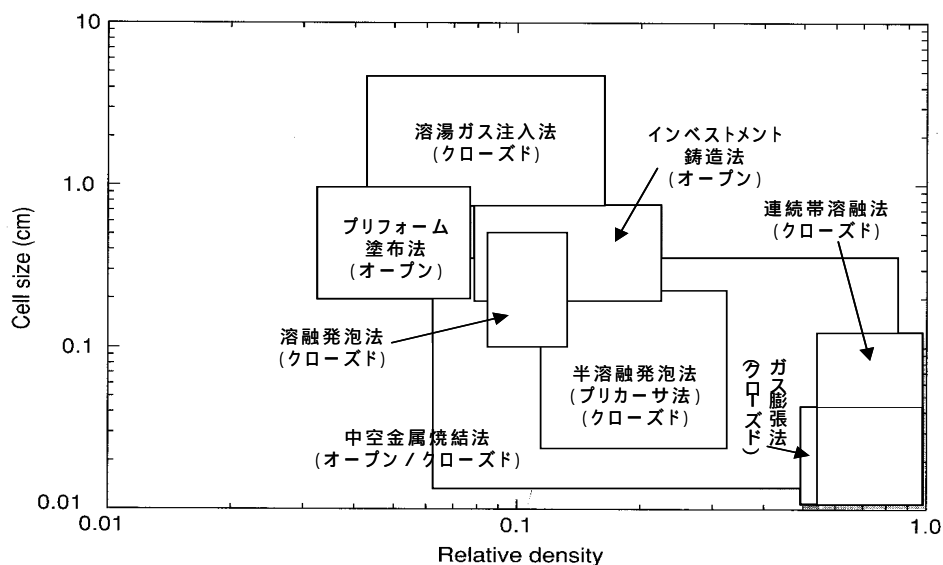


図 1-1-2 ポーラス金属の主な製造法と気孔率、気孔サイズの関係
(出典：Metal Foams, A Design Guide, Butterworth-Heinemann, 2000)

以下に、日本国内において研究開発されている各種ポーラス金属の製造法や特徴を一覧として表 1-1-1 にまとめると共に、3.1.2 ではそのうちの代表的な製造法についての詳細を説明する。

参考文献

- 1) 大塚正久訳：セル構造体、内田老鶴圃、1993、p.2 .
- 2) M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley : Metal Foams, A Design Guide, Butterworth-Heinemann, 2000, p.6.

表 1-1-1 ポーラス金属に係る技術開発の現状一覧

ポーラス金属

ポーラス構造 オープンセル構造(連続孔、ロータス型等)、クローズドセル構造(独立気泡)

気孔率 ~97% (30%以上:セル構造体、30%以下:ポーラス金属 という分類もあり)

金属 アルミニウム、ニッケル、銅、ステンレス鋼 他

【クローズドセル構造】

	主な開発機関	製造方法	材料等	特徴	用途
1	神鋼鋼線工業 神戸製鋼所 他	発泡溶融法(溶融増粘法, 鑄造法) (商品名:アルポラス) 気泡の生成制御のため、カルシウムを増粘材として使用	Al	・比重 0.2~0.3 (Al:2.7)	防音(道路、機械)、音響調整 電磁波シールド 軽量構造材、光触媒担持体
2	京都大学(馬淵) 産業技術総合研究所 (千野) 他	ガス膨張法 金属粉末に不活性ガス(Ar)を注入後、加圧焼結で固化、ガスが膨張し、ポアを形成	Al	・発泡時間が長い、超塑性等を利用して短縮化	
3	産業技術総合研究所 電力エネルギー部門	鑄型合成法に微量のガラス相を加え、高温焼結	金属酸化物ナノポーラス材料	・ナノ細孔が規則的に整列 ・フレームワークが結晶性金属酸化物	触媒担体、吸着剤、太陽電池 エネルギー貯蔵デバイス
4	名古屋大学 (金武, 小橋)	ブリカーサ法(粉末成形法) 粉末金属と発泡助剤を混合固化したブリカーサを加熱発泡	Al 合金	・型内発泡による複雑形状品が可能 ・各種成分の合金に適用可能	
5	名古屋大学(金武, 小橋)	燃焼合成法 2種類以上の混合粉末の反応によって化合物や複合材料を生成	金属系複合材料 金属間化合物	・低コスト、省エネルギー ・短時間プロセス	

【オープンセル構造】

	主な開発機関	製造方法	材料等	特徴	用途
7	大阪大学(中島英雄)他	連続帯溶融法 溶融金属に窒素を吸蔵させ、冷却した鑄型に注入して一方向凝固	鉄鋼 チタン 銅		生体材料(チタン) ゴルフパター(銅、市販) 工作機械の構造物(森精機と共同研究着手)
8	超音速輸送機用推進システム技術研究組合	溶融法(鑄造法)		・ロータス型	航空エンジン部品 軽量断熱、冷去陪材
9	三菱マテリアル	スラリー発泡法(粉末焼結法)	Ni, Cu, ステンレス 他	・気孔率 90~97% ・比表面積 大 15,000m ² /m ³ ・セル 50, 150, 300, 600 μm	

10	住友電気工業	スラリー塗布法(粉末焼結法) (セルメット)	ステンレス系 Fe-30Cr-4Mo-2Ni	・アルミ溶湯との濡れ性良好 ・気孔率 90%以上 ・耐熱、耐食性良好	アルミ鋳物を強靱化する複合強化材 自動車部品 二次電池電極材料 触媒担持体
		めっき法	ニッケル	・高気孔率 ・量産性良好	
11	京都大学(馬淵) 産業技術総合研究所 (千野) 他	粉末冶金法 スパーサー法 金属粉末とスパーサー粉末を混合し、プレス成形後に焼結	チタン	・スパーサーサイズ、形状、量によりポラス構造制御が容易 ・ μ オーダーのポア成形、混合割合により気孔率が変化する傾斜構造化が可能	人工骨 機械部品等
		自己燃焼合成法 2種類以上の物質の反応熱により化合物を合成	棒状 Al とチタン粉末	・比較的低コスト ・ロータス構造 ・スパーサー法と同様の特徴	
12	安来製作所 日立メタルプレシジョン	粉末焼結法	鋼	・大空孔及び微細空孔が混在 ・線、中実円筒、中空円筒、板材 ・空隙率 35~90%	
13	産業技術総合研究所 (清水透)	スラリー発泡法(粉末焼結法) スラリーに界面活性剤、発泡剤を投入して形状固定後、過熱、焼結	ステンレス 他	・気孔率 95%以上 (他に、スラリーを固体で、発泡剤で発泡する方法、ワックスエマルジョンにより気孔形成を行う方法等を開発)	
14	名古屋大学(金武,小橋)	燃焼合成法 2種類以上の混合粉末の反応によって化合物や複合材料を生成	複合材料 セラミック	・低コスト,省エネルギー ・短時間プロセス	
15	香川大学(三浦) IFAM Japan	MHS(Metallic Hollow Spheres)法	鋼 他	・多種金属での製造が可能 ・低コスト ・エネルギー吸収性能高 ・焼結、接着、はんだなどの成形法がある	外套材
16	太盛工業 大阪府立工業高専(西藪)	MIM(Metal Injection Mold)法			

注：本表はインターネット検索、「金属」等雑誌から得た情報を元に作成したもので、誤記、遺漏の可能性ある。

3.1.2 各種ポーラス金属の製造法と特徴

3.1.2.1 発泡溶融法

(1) 製造工程

発泡溶融法(商品名 ; アルポラス)の製造工程を図 1-2-1-1 に示す¹⁾。溶融アルミニウムにガスを導入しポーラスアルミニウムを製造する場合、気泡の上昇及び結合による気泡の消失を抑制するために溶湯の粘性を増加させる必要がある。本製造法では、金属カルシウムで、カルシウム酸化物を生成させ、溶湯中に分散させることで粘性を増している。粘性の増加した溶湯を鋳型に注湯し、鋳型内において発泡剤である水素化チタンを添加し、強撹拌することで溶湯内に均一分散させる。水素化チタンから解離した水素ガスにより、溶湯は発泡し、膨張して鋳型内を満たし、その後、強制空冷で凝固させることによりポーラスアルミニウムを得ることができる。水素化チタン添加量が多いほど気孔率は増し、量産では 1.6% 添加することで気孔

率 90% 以上の発泡体を得ることができる。発泡体のサイズは最大 2400 × 450 × 750

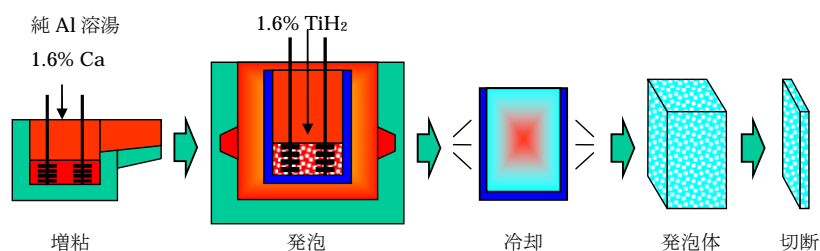


図 1-2-1-1 製造工程

mm³ で、重量は 230kg である。

典型的なクローズドセル型のポーラスアルミニウムの断面組織を図 1-2-1-2 に示す³⁾。

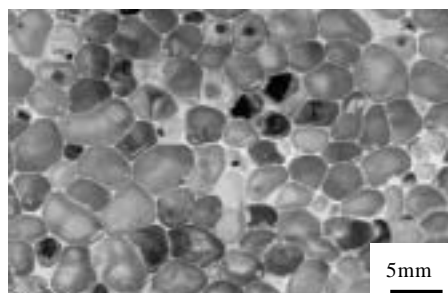


図 1-2-1-2 断面組織(空隙率 90%)

(3) 特性と適用事例

ポーラスアルミニウムの典型的な圧縮変形の公称応力—ひずみ曲線を図 1-2-1-3 に示す。サンプルサイズはいずれも 9×9×6 mm³ で、気孔率は 90% である。ひずみ速度は準静的ひずみ速度(1×10⁻³s⁻¹)と高ひずみ速度(2.5×10³s⁻¹)で行った。いずれも変形初期に線形弾性領域がみられる。降伏後ほぼ一定の応力で変形するいわゆるプラトー領域が

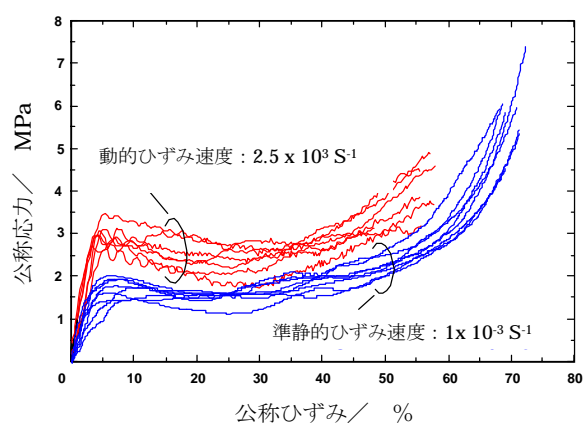


図 1-2-1-3 公称応力—ひずみ曲線(圧縮)

観察され、そのひずみ量は 50%以上になる。さらに変形が進行すると応力は急増する。ポーラスアルミニウムが 55%ひずんだ場合の単位体積当たりのエネルギー吸収量を計算すると静的ひずみ速度と衝撃ひずみ速度ではそれぞれ 1.00 と 1.51MJ/m³になる。ひずみ速度は速い方がプラトー応力とエネルギー吸収量は高く、ひずみ速度依存性があることがわかる²⁾。

クローズドセルタイプのポーラスアルミニウムは独立気泡の集合体であり、外表面は金属膜であるから空気音の内部への伝搬は非常に少なく、表面で反射されるために吸音されることはほとんどない。しかし、適当な加工によってセル壁に亀裂を生じさせ、通気性を付与することができる。

また加工により吸音特性を付与したポーラスアルミニウムの背後に空気層を配置することによって実用的な周波数領域において高い吸音性を実現できる。図 1-2-1-4 に示すように吸音材であるグラスウールと比較し、1kHz 以下の低周波域で優れた吸音性を示す³⁾。用途とし

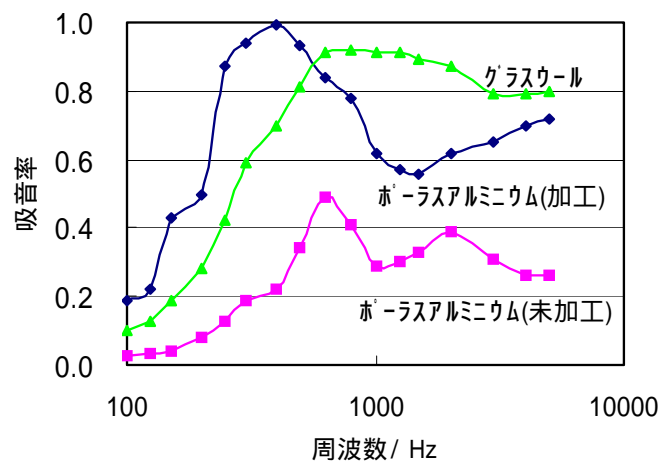


図 1-2-1-4 残響室法によるポーラスアルミニウムの吸音

ては、道路、工場、変電所等の騒音対策、ショッピングモールやコンサートホールなどの残響時間調整に用いられている。図 1-2-1-5 にショッピングモールとその残響時間を示す。約 10 万 m²の空間に 3500 m²のポーラスアルミニウム吸音材を設置することで残響時間を 1/2 以下にした例である。

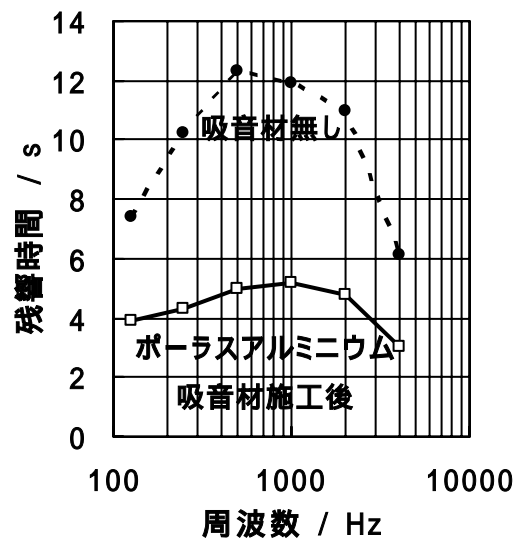


図 1-2-1-5 ポーラスアルミニウム吸音材施工事例

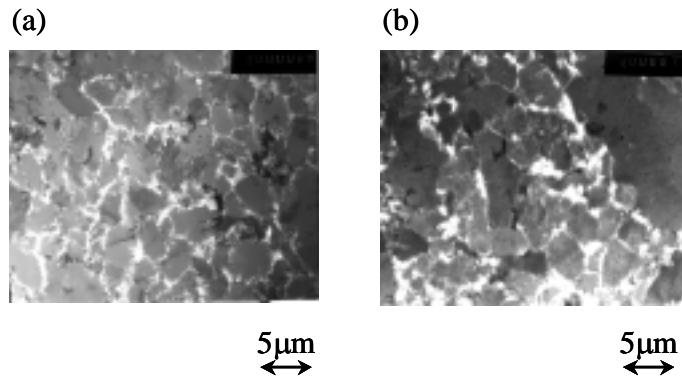


図 1-2-2-2 熱間押し後の 7075 粉末+Ar ガス焼結体の TEM 観察結果
 (a) 粉末粒径 $\sim 25 \mu\text{m}$ 、(b) 粉末粒径 $\sim 355 \mu\text{m}$ ³⁾

図 1-2-2-3 は平均粒径 $50 \mu\text{m}$ 以下の粉末焼結体を各種温度で 24 時間保持した後の組織である。粉末の固相線温度は 752 K 、液相線温度は 908 K である。

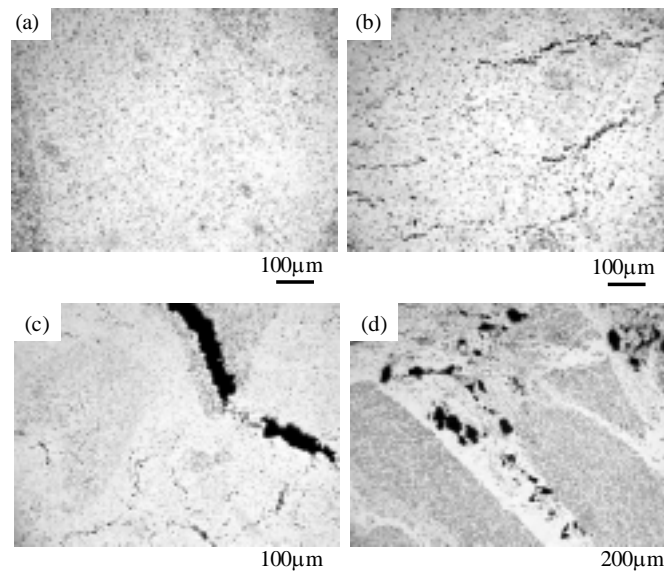


図 1-2-2-3 24 時間加熱保持後の 7075 粉末(平均粒径 $\sim 50 \mu\text{m}$)+
 Ar ガス押し材の発泡挙動
 (a) 保持温度 733 K 、(b) 保持温度 823 K 、(c) 保持温度 873 K 、(d) 保持温度 903 K ³⁾

固相線温度以上で焼結体を熱処理すると 24 時間の熱処理でもポアの生成が始まり、保持温度の上昇と共にポアの形成は顕著となる。 903 K では液相部分(白色部)からポアが生成することがわかる。図 1-2-2-2 によると、Ar ガスは結晶粒界に蓄積されており、粒界部分を部分融解すると Ar ガスの膨張を促進することが推測できる。

本法では、発泡するのに長時間必要であり、その改善が急務の課題である。固液共存相を利用して発泡時間を短縮する手法や焼結体の発泡中に超塑性変形を付与することが提案されている²⁾。

図 1-2-2-4 に Ar ガスを充填せずに焼結した試料を 903K(24h)にて熱処理に供した結果を示す。平均粒径 $\sim 25\ \mu\text{m}$ の粉末焼結体には薄くかつ均一な液相が粒界に形成される。一方、平均粒径 $\sim 355\ \mu\text{m}$ の粉末焼結体には不均一な厚み分布の液相が粒界に形成される。液相の厚み分布は発泡時の Ar ガス周辺の流動応力に大きな影響を及ぼす事が今までに報告されており⁴⁾⁶⁾、液相状態で均一なポア径分布での発泡を発現するためには、組織の均一化、すなわち粉末粒度が重要な因子の一つであることがわかる。

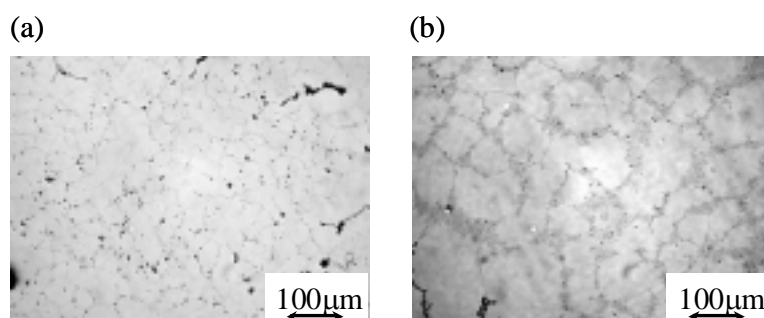


図 1-2-2-4 24 時間(903 K) 加熱保持後の 7075 粉末押し出し材の組織
(a) 粉末粒径 $\sim 25\ \mu\text{m}$, (b) 粉末粒径 $\sim 355\ \mu\text{m}$ ⁹⁾.

(3) おわりに

今まで報告されている空孔率は、Ti-6Al-4V 合金で 20~50%、Ni-Ti 合金で約 20%、アルミ合金で 20~40%である。現状の空孔率では、ポーラス金属特有の特性(衝撃吸収特性、吸音特性等)を発現するのは困難である。現時点では、インプラント材の弾性率を制御する手段⁷⁾として提案されている程度であり、用途は極めて限定されている。

ガス膨張法での発泡過程におけるポアの合体・凝集のような物理現象を解明することがポア膨張過程の制御、空孔率の向上を達成するための課題であるといえる。

参考文献

- 1) 山田康雄, 千野靖正, 馬淵守: 金属 74 (2004) 622-666.
- 2) N.G. Davis, J. Teisen, C. Schuh, D.C. Dunand: J. Mater. Res. 16 (2001) 1508-1519.
- 3) Y. Chino, H. Nakanishi, M. Kobata, H. Iwasaki, M. Mabuchi: Scr. Mater. 47 (2002) 769-773.
- 4) Y. Chino, M. Mabuchi, H. Nakanishi, H. Iwasaki, A. Yamamoto, H. Tsubakino: Mater. Sci. Eng. A 382 (2004) 35-40.
- 5) G.M. Pharr, M.F. Ashby: Acta Mater. 31 (1983) 129-138.
- 6) H. Iwasaki, T. Mori, M. Mabuchi, K. Higashi: Acta Mater. 46 (1998) 6351-6360.

3.1.2.3 プリカーサ法(粉末冶金法)

(1) 基本概念

この方法は金属粉末を原料とすることから、“粉末冶金法”あるいは“粉末成形発泡法”と呼ばれている。図 1-2-3-1 はこの方法によって発泡アルミニウムを製造する基本プロセスである。

(2) 発泡プロセス

① 原料粉末と混合

金属粉末の選択においては、純度、合金成分、粒径・形状及びそれらの分布などが発泡特性に影響する基本因子となる。市販のアトマイズ粉末は十分に適用可能であるが、その他の製造法による粉末は発泡特性の検証が必要となる。発泡アルミニウムの製造における発泡助剤としては、現在のところ TiH_2 が最適であると考えられている。

均一な気孔サイズ分布を有する高品質な発泡アルミニウムを製造するためには、合金粉末と発泡助剤粉末との均一な混合が要求されることは当然である。

② プリカーサの成形

プリカーサを製造するための粉末固化成形法は、いずれの方法においても発泡助剤が金属マトリックスに完全に埋め込まれて残留気孔(開気孔)を有しないことが重要である。相対密度 100%に近い緻密なプリカーサを製造する一つの方法としては、冷間等方加圧成形(CIP)と押し出し加工の組合せプロセスである。

押し出しされた棒状のプリカーサは、そのまま加熱発泡させることも可能であるが、切削加工や塑性加工によって必要な形状にした後に加熱発泡されることもある。さらには、そのような薄板プリカーサを深絞り成形などで 3 次元形状に成形して、特殊な用途の発泡部品を製造することも可能である。

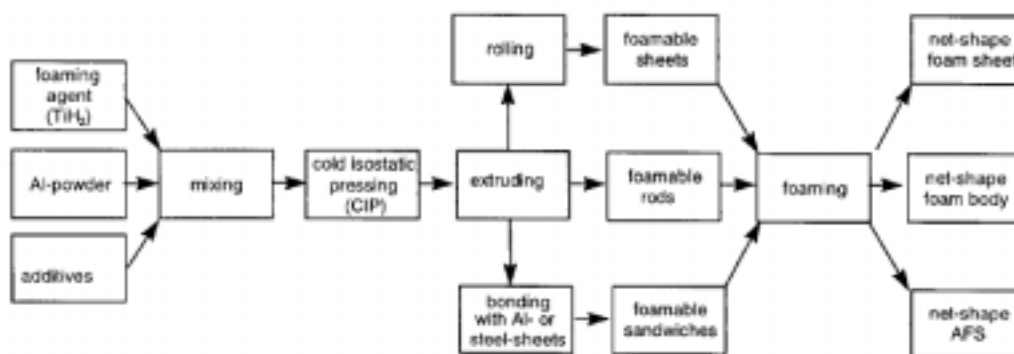


図 1-2-3-1 プリカーサ法(粉末冶金法)の基本プロセス¹⁾

③ 加熱発泡

成形したプリカーサから発泡アルミニウムを作製するには、使用した合金の融点近くまで加熱することが必要である。図 1-2-3-2 は TiH_2 の熱分解曲線であり、500～600℃で分解して水素ガスを発生することがわかる。使用する合金粉末の融点と関係するが、合金マトリックスが溶融すると共に、発泡助剤から分解発生するガスが気孔を生成しプリカーサの膨張が始まる。作製される発泡アルミニウムの密度や密度分布は、様々なプロセス因子によって支配される。プリカーサへの発泡助剤の添加量が重要であり、加熱温度や加熱速度も重要な因子である。通常、プリカーサは金型内に装填して加熱発泡されるため、加熱炉から金型を介してプリ

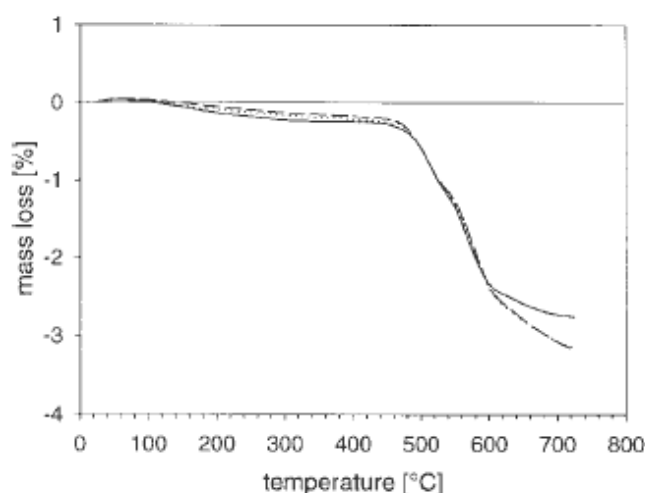


図 1-2-3-2 TiH_2 の熱重量分析曲線(Ar 雰囲気, 加熱速度:15K/min)¹⁾

カーサに熱が伝えられることになり、発泡途中のそれらの熱伝達を十分考慮して加熱条件を注意深く制御することが、高品質な発泡アルミニウムを製造する基本となる。

この方法で作製される発泡アルミニウムには“スキン”と呼ばれる緻密な表層を有しているのが一般である。また、この方法による発泡アルミニウムの一般的な密度は $0.4\sim 0.8\text{g/cm}^3$ の範囲であるが、発泡後の最終密度は加熱発泡に使用する金型の内体積とプリカーサの体積から容易に見積もることができる。

(3) プロセスの特徴

この方法はアルミニウム合金に限ることなく、発泡助剤を適切に選択することによって、錫、亜鉛、鉛、金など各種金属への適用が可能である。この方法の大きな特徴としては、金型内でプリカーサを加熱発泡することによって、複雑形状の発泡アルミニウム部品の製造が容易にできることである。図 1-2-3-3 はその一例で、電車のパンタグラフの部品であり、従来のアルミニウム鋳造部品を発泡アル

ミニウム部品に変更することによって、30%以上の重量削減を実現した。

更なる特徴として、発泡アルミニウムと緻密金属との複合構造部材を接合・接



図 1-2-3-3 発泡アルミニウム製品例
(電車のパンタグラフ部品)¹⁾

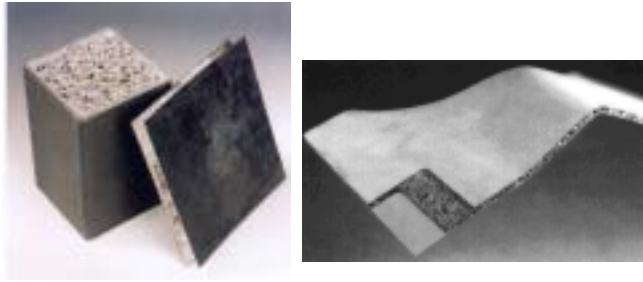


図 1-2-3-4 発泡アルミニウム充填部材及び
サンドイッチパネル

着なしで成形できることがある。すなわち、スチールやアルミニウムの中空形材に発泡アル

ミニウムを充填した部材や、2枚に金属板の間に発泡アルミニウムを挟んだサンドイッチパネルなどである(図 1-2-3-4)。これら複合部材の成形には、あらかじめクラッド押しやクラッド圧延によって発泡プリカーサと緻密金属部材との一体化を行い、その後にプリカーサを加熱発泡して発泡アルミニウムと緻密金属との複合構造部材が作製される。

プリカーサ発泡法では、他の発泡アルミニウム製造法のように増粘剤(セラミック微粒子など)の添加は不必要である。しかし、特別な要求特性(強度、耐摩耗性、耐熱性など)に対しては、混合粉末にセラミック粒子や繊維、金属繊維などを添加する場合もある。

一方、プリカーサ法(粉末法)の課題としては、原料となる金属粉末が高価であり、工業的にこのプロセスの特徴を生かすためには、現在の粉末コストよりはるかに安価な原料が必要とされる。さらには、より大きなニアネット部材の容易な製造を可能にすることも、今後の工業化のために解決されるべき課題である。

参考文献

- 1) F. Baumgaertner, I. Duarte, J. Banhart : Adv. Engng. Mater., 2 (2000), 168.
- 2) 小橋 眞, 棚橋 伸也, 金武 直幸 : 軽金属, 53 (2003), 427.

3.1.2.4 燃焼合成法

(1) はじめに

本項では、高温環境や腐食環境でも使用可能な金属間化合物やセラミック、あるいはそれらを含む金属系複合材料を対象とし、それらの材料を合成する際の化学反応を利用してポーラス材料を製造する方法について解説する。

(2) 燃焼合成反応¹⁾⁻³⁾

金属間化合物やセラミックなどの無機化合物を合成する方法として燃焼合成法がある。この方法は図 1-2-4-1 のように、目的とする化合物(A-B)を構成する元素あるいはその元素を含む別化合物の粉末(A と B)を原料とし、それらを混合成形して加熱することによって化学反応を誘起して目的の化合物を合成する。この際、大きな発熱反応を生ずるような原料粉末(A と B)の組み合わせを選定すると、外部からの加熱によって混合粉末の一部で反応が誘起された後は、自身の発熱によって隣接部分の反応が誘起され、発熱反応が次々に伝播して(自己伝播反応)、燃焼するように全体の合成反応が極めて短時間に完了する。この方法では反応時の温度が高いため、高純度な化合物を容易に得られる一方で、緻密な化合物を得るのが難しいという特徴を有する。素粉末 A と B の反応から化合物 AB を得る燃焼合成を次のように表記する。



この反応による発熱量 ΔH は反応系に固有な量であり、反応系の原料と生成物の種類に応じて反応系の温度が決まり、発生する気孔の状態もほぼ決定される。図 1-2-4-2 は、一例として Ni と Al 粉末の混合比を変えて、3 種類の Ni-Al 系金属間化合物を合成した際に生成する気孔の状態である。各反応系の反応熱量と生成化合物の融点などが影響して、各化合物独自の気孔状態になるものと思われる。

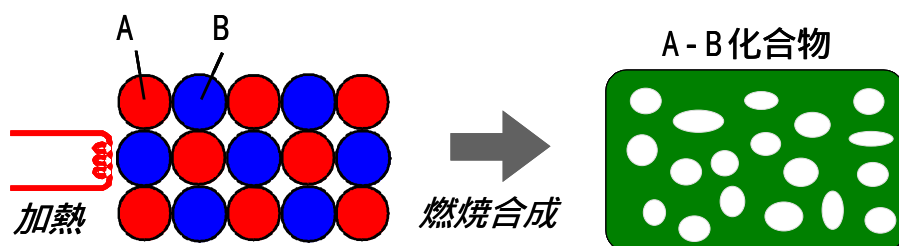


図 1-2-4-1 燃焼合成反応による金属間化合物・セラミックの製造原理



図 1-2-4-2 Ni-Al 系化合物の燃焼合成後の気孔状態 5mm

(3) ポーラス材料の創製⁴⁾

① 燃焼合成法によるポーラス化

燃焼合成反応によって生成される化合物が多孔質になり易い特徴を有効に利用し、気孔の性状(気孔率、大きさ、形状)を積極的に制御することにより、様々なポーラス材料(金属間化合物、セラミック、複合材料)を製造することが可能となる。

このような気孔性状を変化させる方法の原理として、反応系全体の熱量、すなわちエンタルピーを制御する方法が開発された。反応系のエンタルピーは、反応前の混合粉末成形体の空隙率や反応前の予熱などによっても変化するが、より積極的にエンタルピーを制御する助剤の添加が有効である。すなわち、エンタルピーを増大させるためには、僅かの反応量でも大きな反応熱を発生する別の反応系物質を添加し、一方、エンタルピーを減少させるためには、反応には関与せず反応系の熱を吸収する物質を添加する方法である。

② 金属間化合物フォーム⁵⁾

エンタルピー増大助剤の添加例として、図 1-2-4-2 の NiAl₃ の気孔性状を大きく変化させて発泡体(フォーム)を作製した例を紹介する。図 1-2-4-3 に示すように、Ni : Al=1 : 3(モル比)となる原料粉末に、Ti : B₄C=3 : 1(モル比)の粉末を助剤として少量添加して混合成形した後、加熱して燃焼合成反応を誘起する。Ti と B₄C は次のような反応によって、微細な TiB₂ 粒子と TiC 粒子を生成すると同時に極めて大きな熱を発生して、反応系のエンタルピー(発熱量)を増大させる。

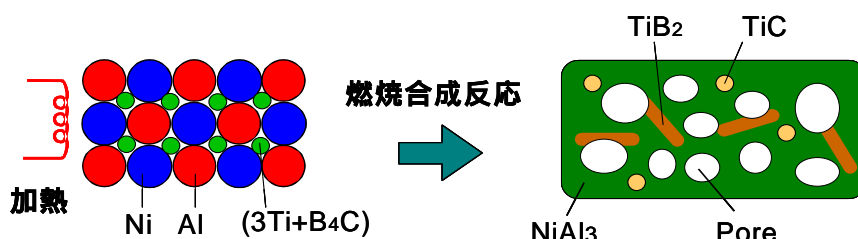
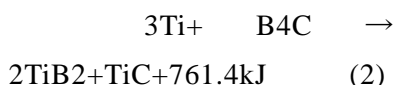


図 1-2-4-3 NiAl₃ 発泡材料(フォーム)の製造原理

少量添加して混合成形した後、加熱して燃焼合成反応を誘起する。Ti と B₄C は次のような反応によって、微細な TiB₂ 粒子と TiC 粒子を生成すると同時に極めて大きな熱を発生して、反応系のエンタルピー(発熱量)を増大させる。



また、これら微細粒子の生成は、反応途中の液相に混在してその粘性を増大させることも考えられ、その面からの気孔性状の安定制御にも寄与できる。図 1-2-4-4 は、助剤である(3Ti + B₄C)粉末を添加して燃焼合成反応を誘起した試料の気孔性状である。また、図 1-2-4-5 はその助剤添加量(体積率)と気孔率及び見かけ密度との関係である。

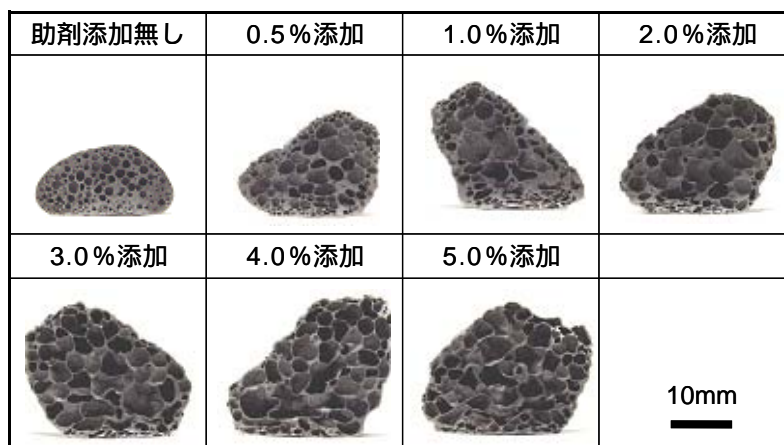


図 1-2-4-4 発泡助剤(3Ti + B₄C)添加による NiAl₃ フォームの気孔性状

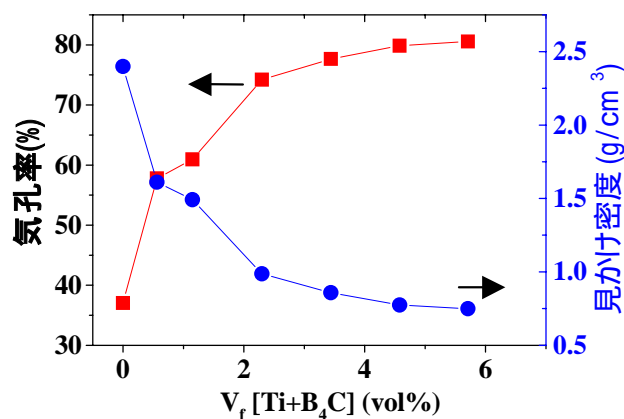


図 1-2-4-5 気孔率、見かけ密度に対する助剤添加量の影

助剤を少量でも添加することにより、気孔サイズ，気孔率とも上昇している。そして、3%以上の添加によって気孔率が80%程度となり、かさ密度が1.0以下になる。すなわち、水に浮くような金属間化合物(NiAl₃)の発泡体(インターメタリックフォーム)の製造が可能となる。

(4) 多孔質セラミック

セラミックの例として、チタン化合物系セラミックのポーラス材料を紹介する。



上式のようにTiとCからTiCセラミックを合成する反応もやはり発熱反応で、Ti:C=1:1(モル比)の混合粉末成形体を同様に加熱すると多孔質なTiCセラミックとなる。この際、粉末成形体の空隙率や反応前の予熱温度を変えることによって合成反応系全体のエンタルピーが変化し、図1-2-4-6のように均一微細な気孔を有するポーラスTiCセラミックの製造が可能となる。またTiの量を過剰に混合すると、Tiが残存してTiとTiCのポーラス複合材料となる。この際、相対的にTiとCの反応が減少して反応熱が低下すると共に、過剰に混合したTiが反応熱を吸収する助剤となり反応系のエンタルピーが低下する。さらに、反応系の液相量(Ti)の変化も影響し、混合粉末のTi量に応じて図1-2-4-7のように気孔の形態が変化する。

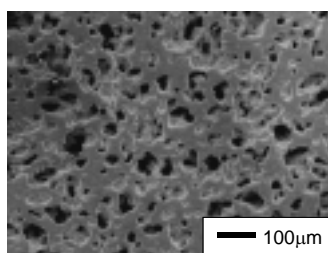


図 1-2-4-6 ポーラス TiC セラミック

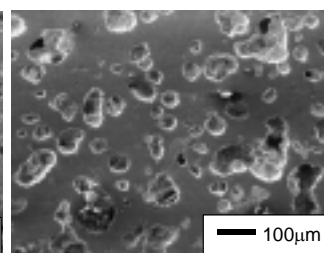


図 1-2-4-7 ポーラス Ti/TiC 複合材料

前出の式(2)によってTiとB₄C

の混合粉末からTiB₂とTiCを同時に合成する反応においても、同様にポーラスセラミックの製造が可能である。Ti:B₄C=3:1(モル比)の混合粉末の反応熱は式(3)に比べて大きく、さらに粉末成形体の空隙率

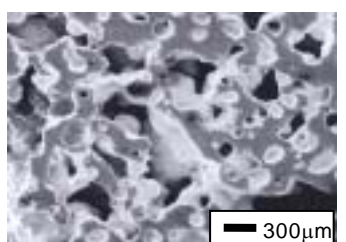


図 1-2-4-8 ポーラス TiC/TiB₂ 複合セラミック

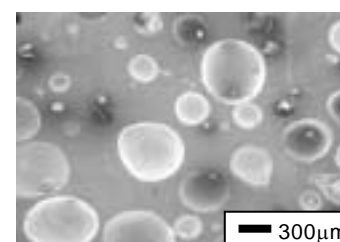


図 1-2-4-9 ポーラス Ti/TiC/TiB 複合材料

を大きくすると、図1-2-4-8のように気孔がネットワーク状に連結したようなポーラスセラミック(TiB₂とTiCの複合セラミック)となる。一方、Tiの量を過剰に混合するとTiが残存し、この場合はTiBとTiCが生成してTi、TiB、TiCのポーラス複合材料となるが、Ti量が多いと図1-2-4-9のように球形に近い単独気孔が分散したポーラス材料が製造できる。

(5) 特徴及び工業利用への展望

燃焼合成反応は、材料の一部で化学反応が生ずると、その場で発生する反応熱によって隣接部分が加熱され、次々と反応を起こして自己伝播する現象である。

例えば、上述の Ni-Al 系化合物の場合、混合粉末成形体の一部分の Al 粉末が溶融するまで加熱して一部の反応を誘起すれば瞬時に試料全体の反応が完了し、それ以上に外部から加熱保持する必要は全くない。従って、製造するポーラス材料の大きさに関係なく、部分加熱だけでポーラス製品の製造が可能となり、従来の粉末焼結法や鋳造法に比べて、極めて省エネルギーで製造時間が短い高生産的な方法である。

ポーラス材料は構造部材あるいは機能部材として様々な用途が考えられるが、ポーラス材料単独で製品として使用するよりも、その外部を緻密体で覆ったポーラス複合構造体として使用することが一般的であろうと予想される。そのような場合にも、外部を覆う中空部材の中で粉末成形体を直接加熱することによって、ポーラス材料を合成製造すると同時に緻密中空部材への充填が可能となる。この場合、ポーラス材料と中空部材との接合にも反応合成時に発生する反応熱を有効に利用して、十分な接合状態を得ることが可能となる。

参考文献

- 1) A.H.Advani et al. : J. Mat. Sci., 27 (1992), 3309.
- 2) W.R.Wrzesinski and J.C.Rawers : J. Mater. Sci. Let., 9 (1990), 432.
- 3) H.J.Feng et al. : Met. Trans. A, 23A (1992), 2373.
- 4) 金武直幸, 小橋 眞 : 金属, 74 (2004), 657.
- 5) M.Kobashi, N.Kanetake : Adv. Eng. Mater., 4(2002), 745.

3.1.2.5 連続帯溶融法(ロータス金属)

(1) はじめに

中嶋らは、最近、微細孔を精密に制御した蓮根のようなポーラス(孔質)金属の製法を確立し、従来の多孔質金属よりも格段に強度が優れていることを見出した^{1,2)}。本稿では、その製造方法やいくつかの特性とその産業応用などについて最近の研究成果を基に紹介する。

(2) ロータス(蓮根)型ポーラス金属の作製法

ポーラス金属の作製原理は、溶融金属におけるガス原子の溶解度が大きく、その固体金属中での固溶解度が小さい場合、凝固時に固溶しきれないガス原子が気泡(ポア)を形成することを利用している³⁾。図 1-2-5-1 には代表的な金属の水素標準気圧中の水素溶解度を示した。それらはいずれも温度上昇とともに増加するが、融点における溶解度の不連続的变化は、凝固の際の多量のガス放出を意味し、ポアの生成原因となる。特に、固・液相における溶解度差の大きい Mg、Ni、Fe、Cu

などは気泡が生成しやすい。これらの水素溶解度差を利用して、さらに、図 1-2-5-2 のように熔融金属の一方向凝固を行わせることで気泡(ポア)に方向性をもたせることができる。一見、蓮根に似ていることから蓮根型(ロータス型)ポーラス金属と呼んでいる。本製造方法によるポーラス金属はポアの方向、ポアサイズ、ポロシティ(空隙率)を自由に制御できることや、後述するように強度の極端な劣化を生じないことなど従来の発泡金属、焼結金属などとは全く異なり際だった特徴を有している。これらのポア形態制御のためのパラメーターとしては、熔融温度、凝固冷却速度、溶解時の雰囲気ガス圧力、不活性ガスとの混合体積比・圧力、凝固時のガス圧力などが挙げられる。

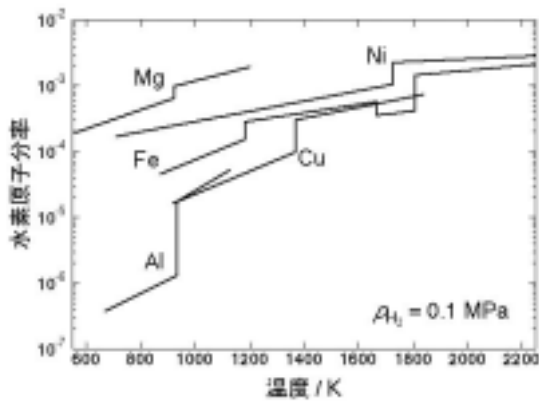


図 1-2-5-1 各種純金属の水素溶解度
(水素圧:101325Pa)

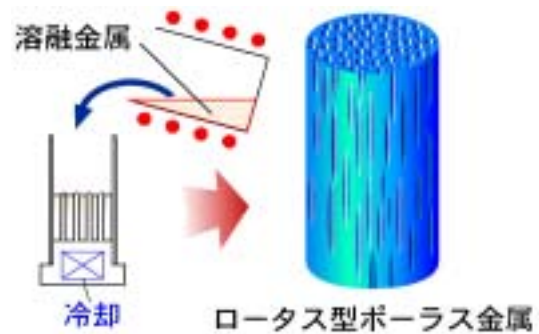


図 1-2-5-2 ロータス(蓮根)型ポーラス金属の作製原理

実際には、水素雰囲気では、Fe、Ni、Cu、Mg、Al、Ti などの多くの金属合金を

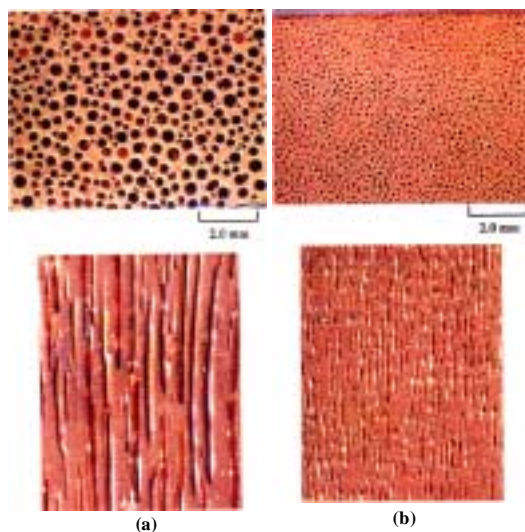


図 1-2-5-3 ロータス型ポーラス Cu の(写真上)横断面及び(写真下)縦断面の光学顕微鏡写真

(a)圧力 0.4MPa,ポロシティ 45%
(b)圧力 0.8MPa,ポロシティ 37%。

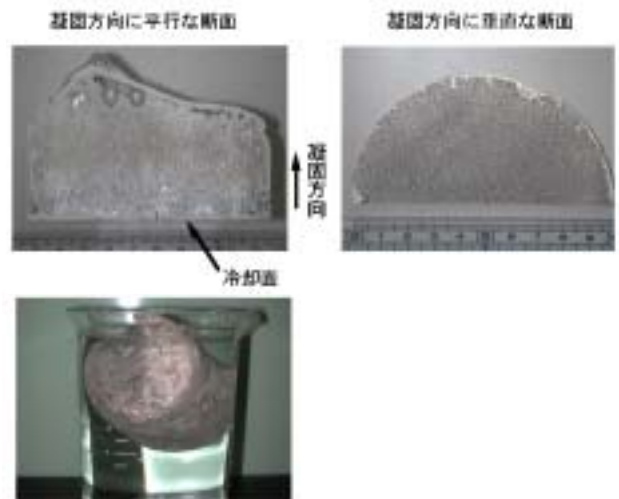


図 1-2-5-4 ロータス型ポーラス Mg:多孔性のために軽量で水に浮く

ポーラス化することができ、窒素ガスを用いて鉄などの金属をポーラス化することができる。酸素雰囲気では、凝固時に融点直下で金属酸化物を作らない銀でポーラス化ができる。図 1-2-5-3 及び 1-2-5-4 にはこのようにして作製したロータス型ポーラス Cu 及び Mg の光学顕微鏡観察による断面写真を示した。この Mg は、ポロシティが 50 % を越えると、密度は 0.8 g/cm^3 程度となり、水に浮く軽い材料となった⁴⁾。

図 1-2-5-5 には、ガスを吸わせた溶融金属を鋳型に入れて凝固させる「鋳造法」によるポーラス金属作製装置の原理図と写真を示した。この装置を用いると 10kg 程度の大きなポーラス金属を作製することができる。図 1-2-5-6 に示すように、熱伝導度の高い Cu や Mg を作製する場合、底面の冷却部からの放熱性が十分であるため、凝固速度を一定に保つことにより均一なポアサイズ、ポロシティをもつロータス型金属ができた。しかしながら、ステンレス鋼などをはじめとする熱伝導度

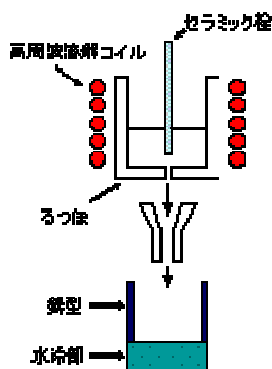
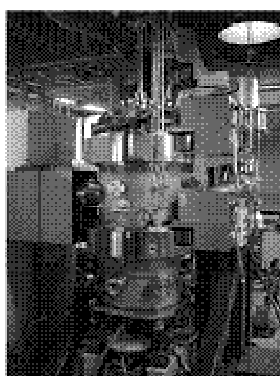


図 1-2-5-5 鋳造法によるポーラス金属作製装置と原理.

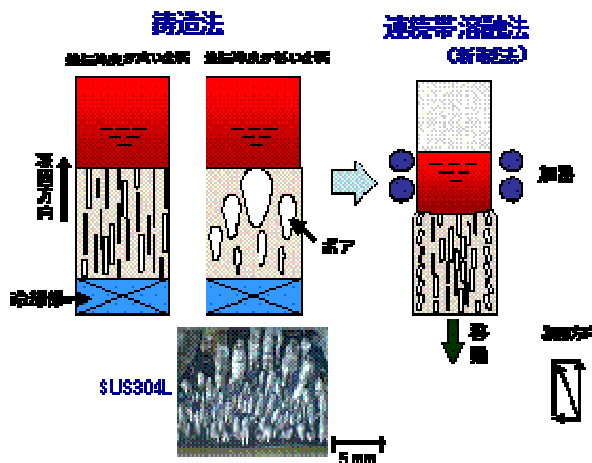


図 1-2-5-6 熱伝導度の違いによる一方向ポアの成長過程と連続帯溶融法の原理

の低い金属では冷却部に近い部分では、凝固速度が速いが、遠ざかるにつれて放熱が不十分で凝固速度が遅くなるため、上部でポアの粗大化が起り、均一なポアサイズやポロシティをもつロータス型金属を作製することができなかつた。この難点を克服するために、中島らは世界初の「連続帯溶融法」を發明した⁵⁾。この方法は、金属棒を高周波コイルで部分溶解させ、溶融状態で吸収されたガスが凝固に伴い過飽和ガスとなってポアを形成させることを利用している。ポアサイズとポロシティは凝固速度に依存して変化することが知られているが、この凝固速度は棒の移動速度と比例している。従って、棒の移動速度を一定に保てば均一なポアサイズとポロシティをもつポーラス金属を作製することができる。このようにして作製された長尺のロータス型ポーラスステンレス鋼のロッドとその輪切り断面の写真を図 1-2-5-7 に示した。どこもポロシティやポアサイズが均一であることがわかる⁶⁾。

(3) ロータス型ポーラス金属の強度

ロータス型ポーラス金属中の直線的なポアの向きと強度はどのような関係にあるか興味深い。水素ガスを用いて作製したロータス鉄の引張強さとポロシティの関係を図 1-2-5-8 に示した²⁾。図 1-2-5-8 では、引張方向がポアと平行な場合には引張強さのデータ点は、ポロシティが 100% のときに 0 MPa を表す点を通るそれぞれの直線上にのっている。

このことは試験片中に応力集中がほとんど起こらず、ポアの存在に関わらず比強度(単位重量当たりの強度)はノンポーラス金属のそれと同じであることを表している。しかしながら、ポアの成長方向が引張方向と垂直な場合の引張強さは応力集中によって低下している。

ところで、多くの金属は水素ガスをを用いてポーラス化できるが、

爆爆性・引火性のある水素を用いた製法は量産化には不適と指摘されてきた。中島らは、安全な窒素ガスを用いてロータス鉄を作製することに成功した。これには意外な長所があり、窒素で作製したロータス鉄は水素で作製した場合より格段に強度が高いことを見出した。図 1-2-5-8 には、窒素ガスで作製したロータス鉄の引張強度の測定結果も示した。窒素で作製したロータス鉄では、ポロシティが 40~50% でも、孔のないノンポーラス鉄と同等の強度を示すという興味深い結果が得られた。

つまり、「鉄よりも半分軽くても強度は鉄と変わらない」という結果で、材料研究者の長年の夢である「軽くて強い材料」を創出できたことになる。これは、微量に固溶した窒素原子による固溶強化のためであると考えられる。²⁾

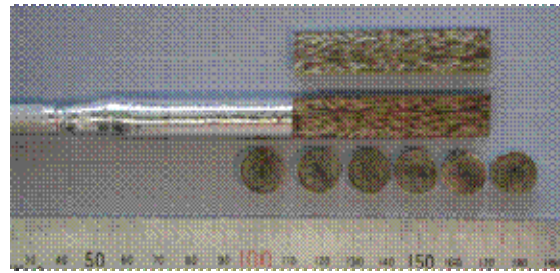


図 1-2-5-7 連続帯溶融法で作製した長尺のロータス型ポーラスステンレス鋼

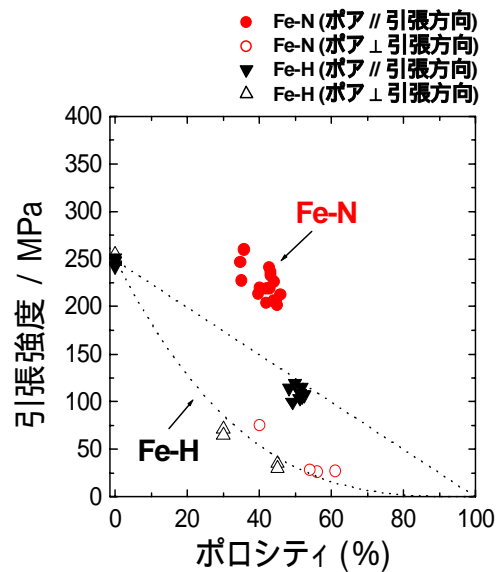


図 1-2-5-8 水素あるいは窒素ガスを用いて作製したロータス鉄のポーラスステンレス鋼

(4) ロータス型ポーラス金属の弾性

ロータス型ポーラス金属は、その優れた強度特性を生かして、構造材料への応用が期待される。構造材料に使用するためには、ロータス型ポーラス金属の弾性的性質について詳細に理解する必要がある。これまでに、中島らは超音波共鳴法を用いて種々のロータス型ポーラス金属の弾性的性質について研究を行ってきた。図 1-2-5-9 にロータス型ポーラス Mg のヤング率のポロシティ依存性を示す。ポロシティの増加に伴って、ポアに平行な方向のヤング率 $E_{//}$ はほぼ線形的に減少するのに対して、ポアに垂直な方向のヤング率 E_{\perp} はポロシティの増加に伴って、急激に減少する。これは、ポアに平行な方向の応力負荷ではポア近傍にほとんど応力集中は起こらないが、ポアに垂直な方向の応力負荷ではポア近傍に高い応力集中が起こるためである。⁷⁾

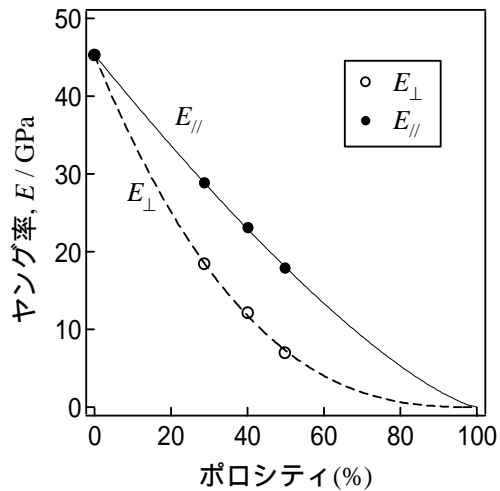


図 1-2-5-9 ロータス型ポーラス Mg のヤング率

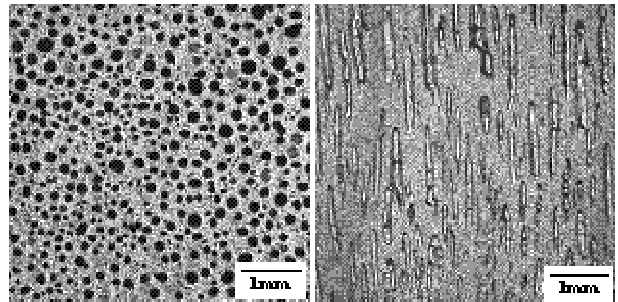


図 1-2-5-10 水分を利用して作製したロータス型ポーラスニッケル

(5) ロータス型ポーラス金属の電気伝導

Ni においては、ガスではなく水分との反応による水素を利用してロータス型のポーラスニッケルを作製することが可能である(図 1-2-5-10)。このロータスニッケルは、燃料電池の電極材料としての利用が期待されている。電極材料への応用を考えた場合、その電氣的性質を把握することが必要である。そこで、ロータス Ni の電気伝導率にポアの方角性及びポロシティが与える影響について調べた。図 1-2-5-11 にロータスニッケルの電気伝導率のポロシティ依存性を示す。ポロシティの増加に伴って、ポア電気伝導率... はほぼ線形的に減少すに平行な方向の... のに対して、ポアに垂直な方向のヤング

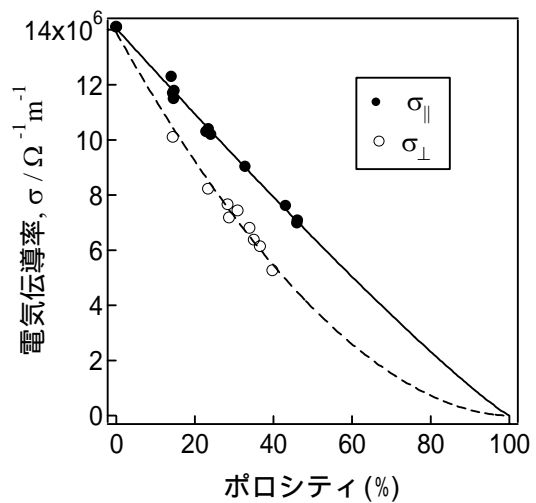


図 1-2-5-11 ロータス型ポーラスニッケルの電気伝導率

率はポロシティの増加に伴って、急激に減少する。これは、ポアに垂直な方向に電場を負荷した場合は、ポアを迂回して電流が流れるため、電流の流れる距離が増加し見かけの電気抵抗が増加するためである。⁸⁾

(6) ロータス型ポーラス金属の応用展開

中島らが作製したロータス金属の特徴をまとめてみると、ポアサイズは直径数 μm から 10 mm 程度であり、ポアの方向を自由に制御可能、ポロシティは最大 70% 程度であり、ポアに直進性があり、ポアサイズが比較的均一であり、閉口ポア内はガスが充填されている。従来の発泡金属や焼結金属に比べて強度に優れ、内部摩擦が大きく、制振性に優れていることなどが挙げられる。現在、これらのロータス金属の機械的性質^{1,2)}、疲労試験、塑性加工性、溶接性⁹⁾、弾性的性質⁷⁾、熱伝導¹⁰⁾、電気伝導⁸⁾、熱膨張、耐腐食性をはじめとする基礎的研究を系統的に行っている。このようにロータス金属は強さを備えているばかりではなく吸音性¹¹⁾

やエネルギー吸収性にも優れている。図 1-2-5-12 のように、このエネルギー吸収性を利用したポーラス銅を用いたゴルフパターが昨年 4 月にスポーツメーカーから発売された。打感がソフトなことが特徴である。金属を用いた人工骨や人工歯根¹²⁾も開発中である。Ti やステンレス鋼の無垢材料でできた人工歯根や

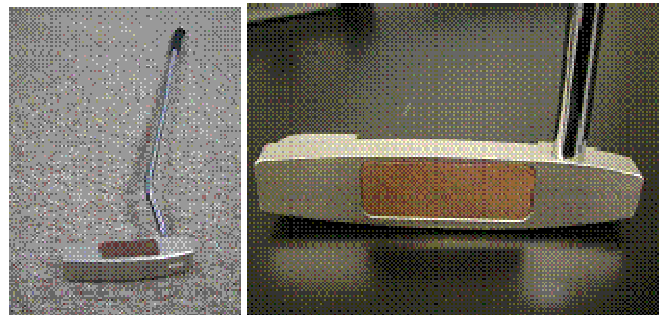


図 1-2-5-12 制振性を利用したゴルフパターの製品化

人工骨は、重さが本物の骨の 3~5 倍あるほか周囲の骨とうまく結びつかない場合があり時間が経過すると固定部が緩みひどい痛みや感染症の原因になる。それをロータス金属にすると骨組織が孔のなかに侵入するのでしっかりした固定ができる上に、人工歯根の場合、線維芽細胞による咬合力に対する緩衝作用が期待でき天然歯に類似のものを作ることができる。図 1-2-5-13 には、ハイドロキシアパタイトを $1\mu\text{m}$ 表面被覆したロータスステンレス鋼をビーグル犬の顎骨に 8 週間埋入後の観察結果である。新生骨がポア中に侵入し成長している様子が見える。また、ロータス金属は無垢の金属に比べて表面積が数百倍にもなるので、冷却装置ヒートシ



図 1-2-5-13 ハイドロキシアパタイトを $1\mu\text{m}$ 表面被覆したロータスステンレス鋼をビーグル犬の顎骨に 8 週間埋入後の観察結果：骨組織が開口ポア内に侵入している

ンクの小型化が可能になる¹³⁾。

パソコンの中央演算装置(CPU)の冷却や、自動車のエンジンやモーターの回転を制御する装置(インバーター)のヒートシンクに使える可能性がある(図 1-2-5-14)。大手電機メーカーが量産化を計画している。図 1-2-5-15 には、航空機エンジンの燃焼器の冷却パネルにこのロータス超合金を用いる試みも行っている。従来品よりも穿孔が簡単で格段に製造コストを低減できる長所がある。以上のようにロータス型ポーラス金属は基礎と応用の分野でさまざまな可能性を秘めた魅力的な素材であり、21世紀の革新的材料の1つとして今後の発展が期待されている。

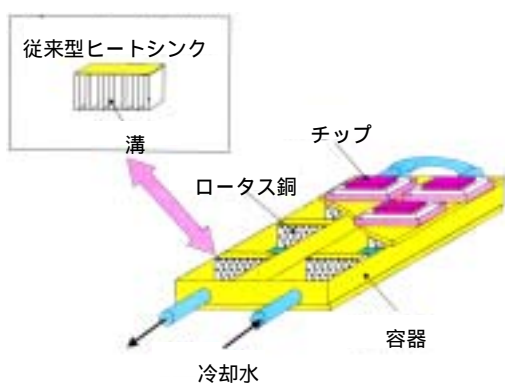


図 1-2-5-14 ロータス型ポーラス Cu を用いたヒートシンク

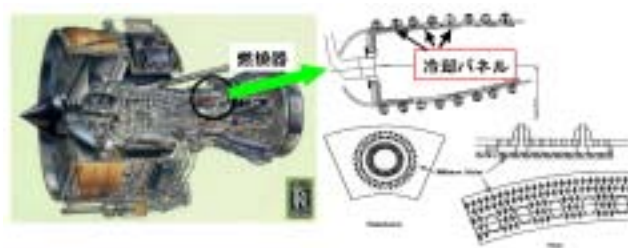


図 1-2-5-15 ロータス超合金を用いた航空機エンジンの燃焼器の冷却パネル試作品

参考文献

- 1) S.K.Hyun, K.Murakami and H.Nakajima, Mater.Sci.Eng., **A299**, 241 (2001).
- 2) S.K.Hyun, T.Ikeda and H.Nakajima, Sci. Tech. Adv. Mater., **5**, 201 (2004).
- 3) S.Yamamura, H.Shiota, K.Murakami and H.Nakajima, Mater.Sci.Eng., **A318**, 137 (2001).
- 4) 星山英男, 池田輝之, 村上健児, 中嶋英雄: 日本金属学会誌, **67**, 714 (2003).
- 5) H.Nakajima, T.Ikeda and S.K.Hyun, Adv.Eng.Mater., **6**, 377 (2004).
- 6) T.Ikeda, T.Aoki and H.Nakajim, Metall.Mater.Trans., **36A**, 77 (2005).
- 7) M.Tane, T.Ichitsubo, M.Hirao, T.Ikeda and H.Nakajima, J.Appl.Phys., **96**, 3696 (2004).
- 8) M.Tane, S.K.Hyun, H.Nakajima, J.Appl.Phys., **97**, 103701 (2005).
- 9) T.Murakami, K.Nakata, T.Ikeda, H.Nakajima and M.Ushio: Mater.Sci.Eng., **A357**(2003), 134.
- 10) T.Ogushi, H.Chiba, H.Nakajima and T.Ikeda, J.Appl.Phys., **95**, 5843 (2004).
- 11) Z.K.Xie, T.Ikeda, Y.Okuda and H.Nakajima, Mater.Sci.Forum, **449-452**, 661 (2004).
- 12) 樋口裕一, 中嶋英雄: Biophilia, **1**, 22 (2005).
- 13) H.Chiba, T.Ogushi, H.Nakajima and T.Ikeda, JSME International J., **47**, 516 (2004).

3.1.2.6. 塗布法とスラリー発泡法

ポーラス金属を作成する手法のうち、金属粉のスラリーをテンプレートとなる材料に塗布して乾燥・焼結する手法、あるいはテンプレートとなる材料表面に金属を化学的にコーティングし、その後、加熱等によりテンプレートを除去する方法を塗布法と呼ぶことにする。また、そのスラリーを発泡剤あるいは気体の注入や攪拌によって発泡させ、その発泡状態を何らかの方法で固定して焼結する方法をスラリー発泡法と呼ぶことにする。

(1) 塗布法

セラミックスでまず製品化されスラリー塗布法によって気孔率 97%を超える気孔率のポーラス金属の作成が可能であるが、スラリーの流動性などの制限から作成できる気孔径には限界がある。気孔構造はオープンセル構造で、セル壁を持つような気孔構造の作成は困難である。

金属粉スラリーにポリウレタン等のオープンセル構造をもつテンプレート材料を浸し、引き上げた後に余分なスラリーを除去して乾燥する。

加熱してテンプレート材料を消失させると同時に焼結する。

スラリーのバインダーには PVA、セルロース系高分子など金属粒子の分散性が高く適度な粘性を持つ水溶性高分子の水溶液を用いることが多い。実際の製品例として、住友電気工業ではステンレス鋼の高気孔率ポーラス材料を「セルメット」の商品名で製品化しており¹⁾、日本重化学工業ではニッケル系ポーラス材料を供給している²⁾。また、米国では Porvair 社がセラミックス、金属のオープンセルポーラス材の製造を行っている³⁾。

テンプレート上に金属をメッキ、あるいは CVD によりコーティングし、その後テンプレートを加熱除去する手法も開発されており、ニッケル系材料のポーラス金属が生産されている。住友電気工業においては、30 年近く前から開発が進められたメッキによる高気孔率ポーラスニッケル「セルメット」の生産されており、自動車排気ガス用フィルタ(図 1-2-6-1)等への利用が試みられてきたが、90 年代以降、電池電極用材料として使用されている⁴⁾。また、カナダ、INCO 社において $\text{Ni}(\text{CO})_4$ からの CVD よりポーラスニッケルが生産されており、その多くは電極用材料として使用されている模様である⁵⁾。



図 1-2-6-1 DPF への利用
(セルメット)⁴⁾

(2) スラリー発泡法

スラリーを発泡させ、その状態を乾燥して固定し、焼結する方法で、気孔率の高いポーラス金属の作成が可能である。スラリーを発泡させる方法としては直接攪拌や、発泡剤を利用する方法があるが、実際には後者が多く、発泡剤としては LPG、ペンタン、ヘキサン等が用いられる。スラリーの発泡時に金属粒子は表面張

力によりセルフェース(気泡膜面)からセルエッジに移動するため、多くの場合、セル構造はオープンセル構造となる。

三菱マテリアルにおいては、図 1-2-6-2 のようにセルローズ系水溶性高分子の水溶液バインダーと金属粉のスラリーに発泡剤、界面活性剤を添加し、それをドクターブレードで引き伸ばすと同時に加熱、発泡させる事によって気孔率 97%以上、気孔径 100ppi 以上の発泡金属の作成を可能にしている^{6,7)}。

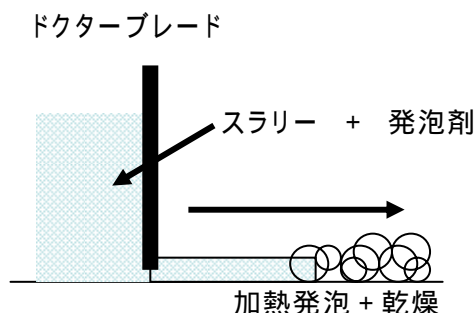


図 1-2-6-2 三菱マテリアルによる「発泡金属」作成法

産業技術総合研究所においては、バインダーに凍結後解凍することによってゲル化する PVA(ポリビニールアルコール)水溶液を使用して、高気孔率のポーラス金属を作成した⁸⁾。この方法はバインダーに金属粉を分散させてスラリーとし、発泡剤を添加し、そのままスラリーを凍結・解凍してゲル化する。ゲル化したスラリーを発泡剤の発泡温度まで加熱し、乾燥させることによって作成したポーラス金属の前躯体を焼結して、高気孔率のポーラス金属を作成する。きわめて細かいステンレス鋼粉(平均粒径 3 μm)を用いて、気孔率 98%を超え、クローズドセル構造の様に気泡のセルフェースが残るポーラス金属ができた。(図 1-2-6-3)

産業技術総合研究所においては、バインダーに凍結後解凍することによってゲル化する PVA(ポリビニールアルコール)水溶液を使用して、高気孔率のポーラス金属を作成した⁸⁾。この方法はバインダーに金属粉を分散させてスラリーとし、発泡剤を添加し、そのままスラリーを凍結・解凍してゲル化する。ゲル化したスラリーを発泡剤の発泡温度まで加熱し、乾燥させることによって作成したポーラス金属の前躯体を焼結して、高気孔率のポーラス金属を作成する。きわめて細かいステンレス鋼粉(平均粒径 3 μm)を用いて、気孔率 98%を超え、クローズドセル構造の様に気泡のセルフェースが残るポーラス金属ができた。(図 1-2-6-3)

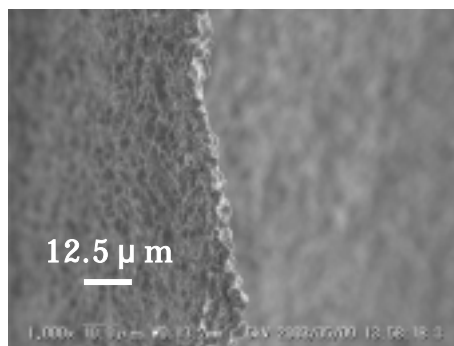
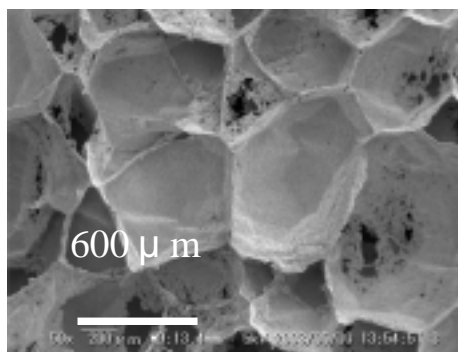
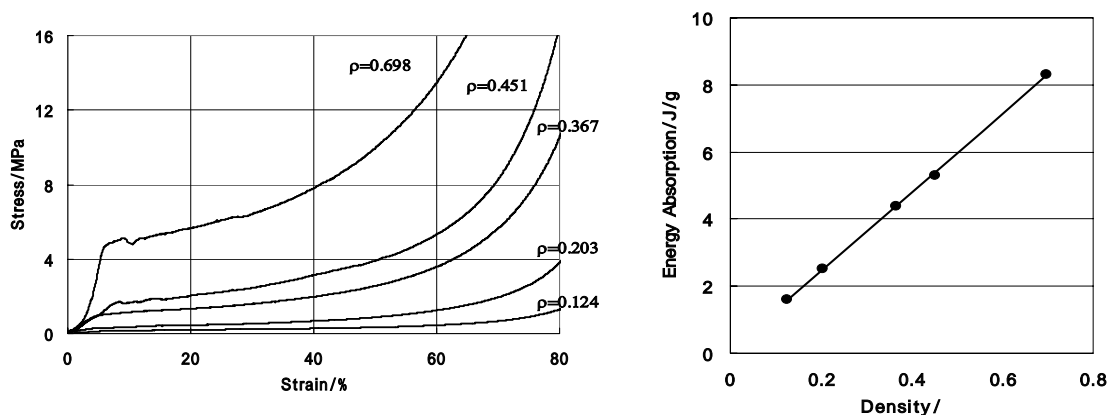


図 1-2-6-3 ゲル化法によるポーラス金属のセル構造と拡大したセル壁

この手法で作成したステンレス鋼(SUS316)のポーラス金属の圧縮の圧縮試験による応力 - ひずみ曲線及び公称ひずみ 70%まで圧縮した場合のエネルギー吸収率を図 1-2-6-4 に示す。このポーラス金属の変形抵抗は材料の密度の自乗に比例しており、その結果として密度と単位重さあたりのエネルギー吸収率は線形な関係となる。また、一般のポーラス金属の圧縮試験で見られるような変形抵抗の乱高下はみられない。これは試験片の寸法に対して気孔孔が十分に小さいためと考えられる。

また、産業技術総合研究所では、耐圧容器内で LPG と金属粉スラリーを混合し、大気圧中に噴出してスラリーを発泡し、これを冷却した金属板に噴出させて凍結

し、そのまま凍結乾燥して焼結する方法により 500-1000ppi 程度の細かい気孔径を持つオープンセル構造ポーラス金属を作成した(図 1-2-6-5)。ステンレス鋼粉による製品では $2000-4000\text{cm}^2/\text{g}$ の比表面積を持つ多孔質体の作成が可能である。



a) ポーラス金属(SUS316)の応力ひずみ曲線 b) エネルギー吸収率と密度の関係

図 1-2-6-4 ゲル化法によるポーラス金属の圧縮試験変形抵抗と変形時のエネルギー吸収率

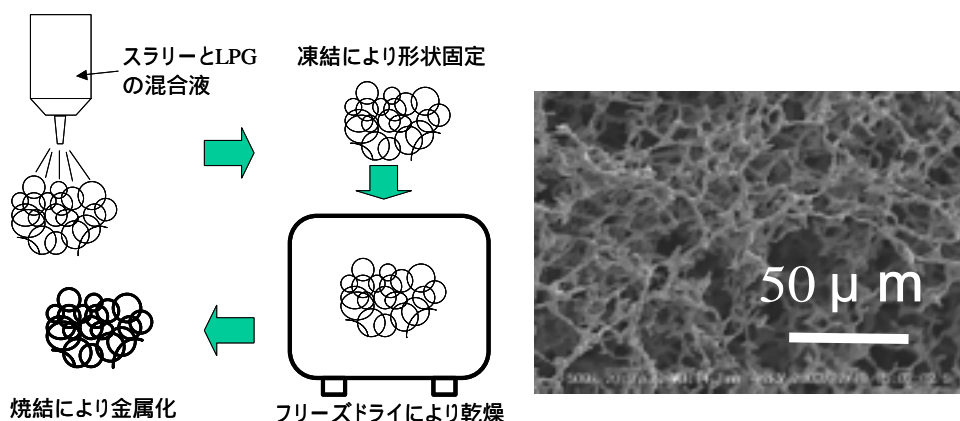


図 1-2-6-5 LPG による高比表面積ポーラス金属の作成方法とそのセル構造写真

参考文献

- 1) <http://www.sei.co.jp/RandD/electro/se1.html>(検索 2006 年 2 月 28 日)
- 2) <http://www.jmc.co.jp/241psm.htm#L3>(検索 2006 年 2 月 28 日)
- 3) <http://www.porvairfuelcells.com/> (検索 2006 年 2 月 28 日)
- 4) 本田正明：「発泡金属の技術発展とアルカリ二次電池の高性能化」, 材料及び材料, 38-6(1999)470-474 .
- 5) V. Paserin, S. Marcuson and J. Shu: "The chemical vapor deposition technique for Inco nickel foam production-manufacturing benefits and potential applications", Proceedings of MetFoam 2003 ed. J. Banhart, N. Fleck and A. Mortensen(2003)31-38.
- 6) 特開 2003-155503 「多孔質金属体の製造方法」
- 7) 和田正弘：「スラリー発泡法による発泡金属」化学と工業、54-7(2001)811-813.
- 8) 清水透：「発泡金属の作成と特性」、材料の科学と工学、43-1(2006)2-7.

3.1.2.7 スペーサー法

(1) はじめに

スペーサー法(スペースホルダー法ともいう)とは、消失する物質をスペーサーとして利用しポーラス材料を作製する方法で、気孔率や気孔サイズの制御が容易であることが特徴として挙げられる。スペーサー法は、粉末冶金プロセス及び鑄造プロセスのいずれの場合も適応可能であるが、本項では、高精度で気孔率や気孔サイズの制御ができる粉末冶金プロセスによるスペーサー法について概説する。

(2) プロセス

スペーサー法は焼結の段階でスペーサーが消失する場合と焼結後スペーサーを消失させる場合の2つに大別される。前者のスペーサー法の模式図¹⁾を図1-2-7-1に示す。本法によって得られたポーラスチタン²⁾を図1-2-7-2に示す。スペーサー材には炭酸水素アンモニウムを使用した。スペーサーが消失するための“抜け穴”が必要なため、スペーサー法で作製されたポーラス金属の構造はオープンセル型となるが、クローズドセル型とオープンセル型の中間のような構造になることもある。

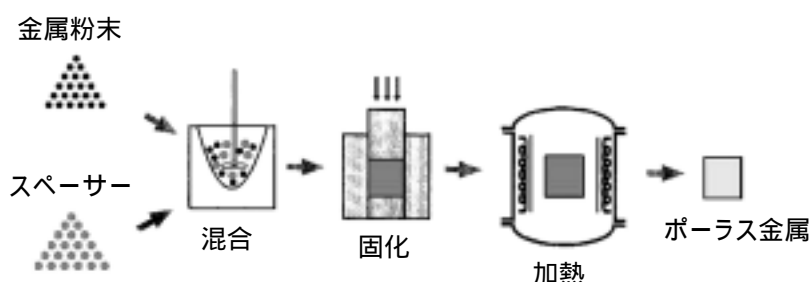


図 1-2-7-1 焼結の段階でスペーサーが消失する場合の
スペーサー法の模式図

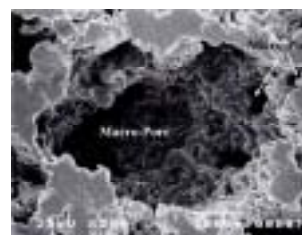


図 1-2-7-2 スペーサー法によって
得られたポーラスチタン

このプロセスは、比較的焼結しやすい金属粉末を用いた場合に適している。一方、表面に強固な酸化膜が存在するため焼結に加圧が必要な場合には、焼結後にスペーサーを消失させる方法がとられる。例えば、アルミニウムと塩化ナトリウム(食塩)の混合粉を加圧焼結後、塩化ナトリウムを溶解除去することによりポーラスアルミニウムを作製できる(図1-2-7-3)。焼結後水に浸しておくだけで塩化ナトリウムが水に溶解し、ポーラスアルミニウムを得られる。本法により作製したポーラスアルミニウムの組織は、ポアはセル壁に囲まれそれぞれが独立しているように見られるが、セル壁を詳細に観察すると小さな孔が見られ(図1-2-7-4)、クローズドセル型とオープンセル型の中間のような構造といえる。

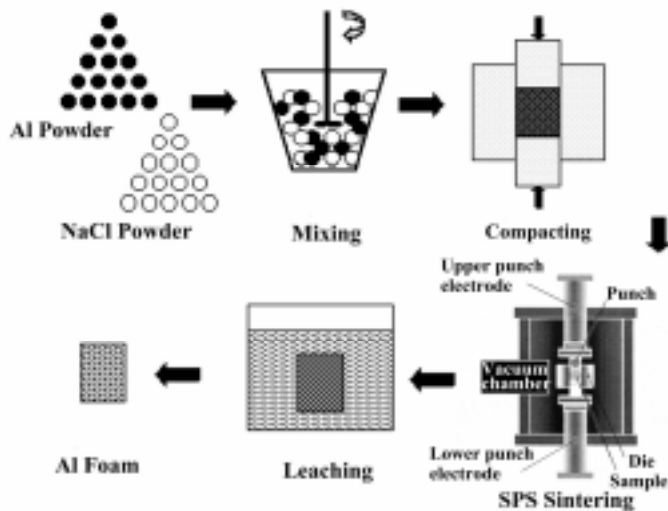


図 1-2-7-3 焼結後スペーサーを消失させる場合のスペーサー法の模式図

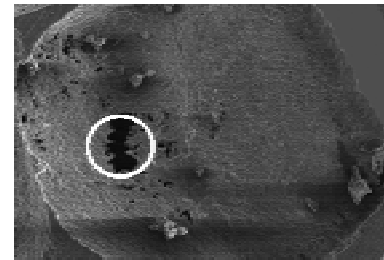


図 1-2-7-4 セル壁に存在する微細なポア

スペーサー法では、スペーサーのサイズ、形状、量のある程度自由にコントロールできるため、ポーラス構造の制御が比較的容易といえる(図 1-2-7-5)。例えば、発泡法の場合ポア径をミクロンオーダーにすることは困難であるのに対し、スペーサー法ではミクロンサイズのスペーサーを使用すればミクロンオーダーのポア径を容易に達成することができる。また、金属粉末とスペーサーの割合が連続的に変化している混合粉を準備すれば、気孔率が連続的に変化する傾斜材料を製造することができる。

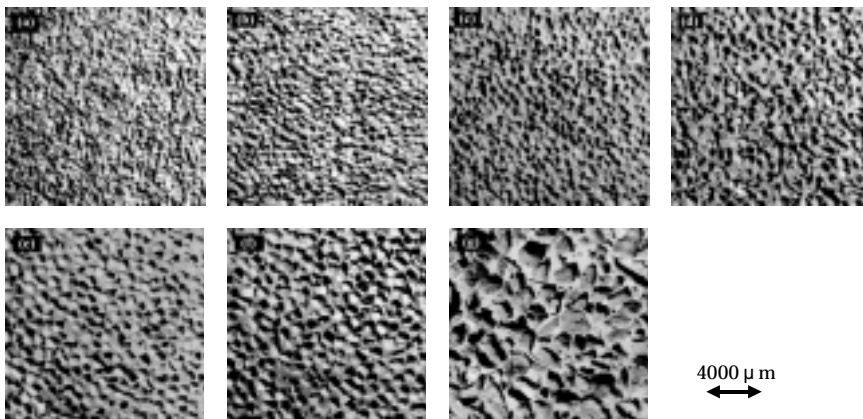


図 1-2-7-5 スペーサー法により作製したポア径の異なるポーラスアルミニウム

(3) 機械的性質

図 1-2-7-6 に示すスペーサー法で作製されたポーラスアルミニウムの相対密度とプラトー応力の関係により、セル壁の曲げ変形であることが示唆され、実際、変形後組織観察を行った結果、図 1-2-7-7 に示すようにセル壁の曲げが確認されている³⁾。

次に自己燃焼合成を利用したポーラス金属製造プロセスの模式図⁴⁾を図 1-2-7-8 に示す。まず、棒状のアルミニウムにチタン粉末を固めグリーン体を作製し、焼結すると、アルミニウム

ムとチタンが自己焼結合成反応を生じ、チタン/チタンアルミのロータス型のポーラス体となる。本材料のポア周辺では、チタンアルミが生成されている(図 1-2-7-9)。本方法は自己燃焼合成が生じる材料の組み合わせに制限がある。

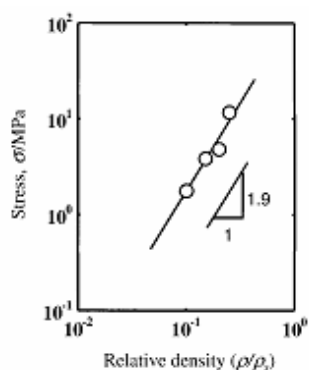


図 1-2-7-6 スペーサー法で作製されたポーラスアルミニウムの相対密度とプラトー応力の関係



図 1-2-7-7 スペーサー法で作製されたポーラスアルミニウムの変形後の組織

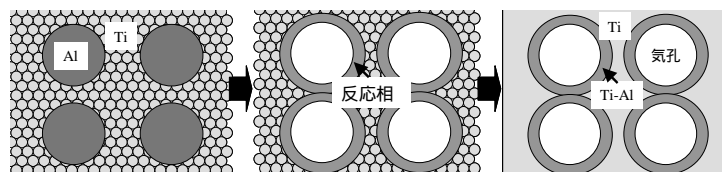


図 1-2-7-8 自己燃焼合成を利用したポーラス金属製造プロセスの模式図

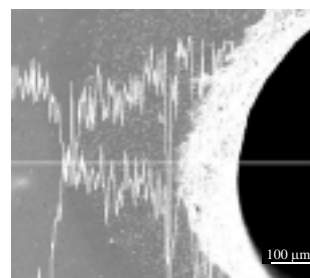


図 1-2-7-9 気孔周辺のチタンとアルミニウムの元素分析結果

(4) おわりに

以上、粉末冶金法を利用したスペーサー法について概説した。本法の特徴として、鋳造法では得られない微細なポーラス構造が得られることやポーラス構造の自由度が高いことが挙げられる。

参考文献

- 1) C.E.Wen, M.Mabuchi, Y.Yamada, K.Shimajima, Y.Chino and T.Asahina: Scripta Mater., **45** (2001), 1147.
- 2) C.E.Wen, Y.Yamada, K.Shimajima, Y.Chino, H.Hosokawa and M.Mabuchi: J. Mater. Res., **17** (2002), 2633.
- 3) C.E.Wen, Y.Yamada, T.Asahina, K.Kato, T.Sonoda, A.Watazu, K.Shimajima and M.Mabuchi: Mater. Trans., **45** (2004), 327.
- 4) Y.Yamada, C.E.Wen and M.Mabuchi: J. Jpn Soc. Powder & Powder Metall., **50** (2003), 848.

3.1.2.8 MHS (Metallic Hollow Sphere : 金属ホロースフェア)法

(1) MHS とは

MHS とは金属中空球を意味し、一般的に中空球の集合体により所要の形状に成形し、超軽量金属として利用する方法を MHS 法と呼んでいる。一個の中空球を図 1.2.8-1 に、MHS 成形体を図 1.2.8-2 に示す。

MHS 法の特徴は、大きさ、厚さを揃えて、機械的な特性や物理特性のばらつきの少ない成形体を作ることができることである。一方、球の大きさや肉厚を変えることにより、幅広い密度の成形体を成形できる。



図 1-2-8-1 MHS の単球



図 1-2-8-2 中空球成形体(MHS)

(2) MHS の製造方法

現在、MHS の製造方法として、ドイツ・フランフォーファー研究所で実施されている製造工程を図 1-2-8-3 に模式的に示す。この工程で安定して焼結体を製造できるようになったが、焼結時に 20%に及ぶ収縮が発生し、この収縮発生量にばらつきが有る為、製品精度が悪く仕上げ切削が必要となるという欠点がある。また、粉末を利用し、工程が多いため高価になる。

図 1-2-8-4 に溶融金属より中空球を製造する方式を示す。この方式では、適度な球を作るのが困難でばらつきが大きく、歩留まりも数十%程度となり実用化にはほど遠い状況である。

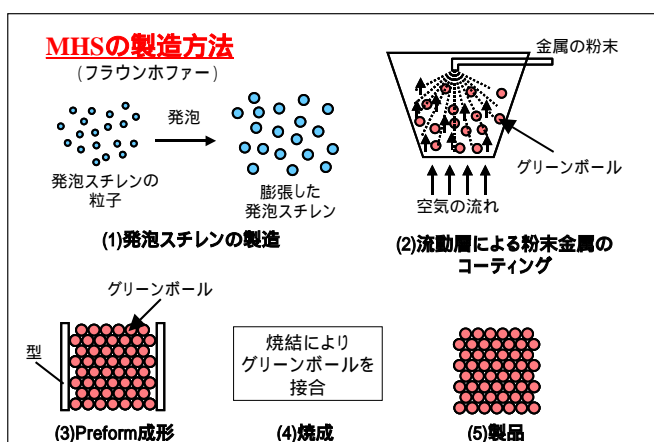


図 1-2-8-3 MHS 製造工程の例

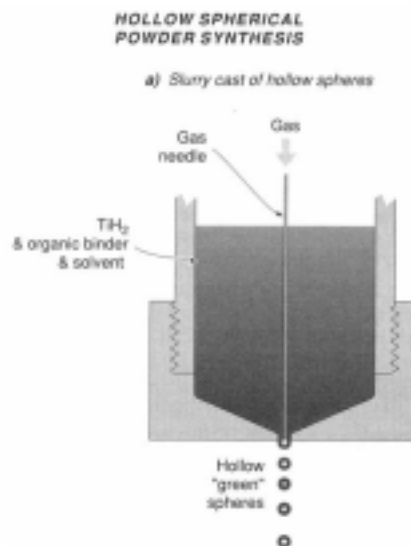


図 1-2-8-4 溶融金属からの中空球製造方法

これに対し、パイプからスタ

ートし、転造により中空球を製造する新しい方式が研究されている。また、鋼板から深絞り技術を利用した MHS 作成方法や、単球を接着剤で固め所定の寸法・形状に成形する方法も研究が進んでいる。

(3) MHS 単球及び成形体の機械的特性

フランフォーファー研究所で製造された焼結 MHS を用い、単一の中空球圧縮試験、成形体の圧縮、引っ張り、曲げ特性、比剛性、衝突エネルギー吸収能力特性について調べた。また、外套パイプを付けた場合の特性についても検討した。

(a) MHS 単球の圧縮

図 1.2.8-5 に圧縮中及び圧縮後の MHS 単球の形状を示す。初期 MHS 形状は直径 $D_0 = 2.6\text{mm}$ 、肉厚 $t = 40 \sim 50 \mu\text{m}$ である。圧下率 $\Delta D/D_0 = 75\%$ 付近(図中の写真)では、座屈により、上から見るとオニギリ形になり、その後は、同じ形状のまま押し潰される。

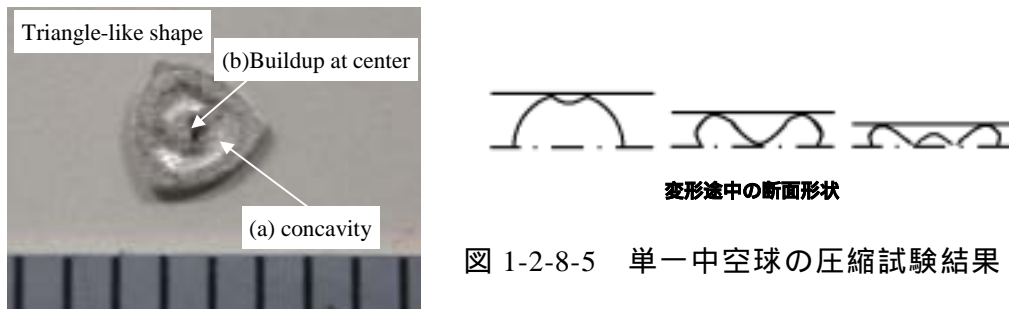


図 1-2-8-5 単一中空球の圧縮試験結果

図 1-2-8-6 に荷重ストローク曲線を示す。初期の荷重にトップピークもなく、荷重の増加が少ないプラトー領域が長く、衝撃吸収材として優れた特性を持つことが伺える。これは、初期に接触する領域が狭く、荷重の立ち上がりが低いところから始まり、変形は中央部のくぼみが拡大することで進むためと考えられる。

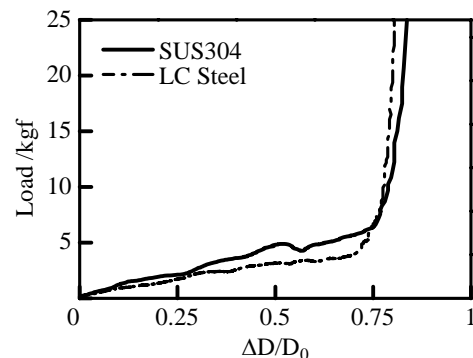


図 1-2-8-6 MHS 単一球の圧縮荷重・変位曲線 MHS 外径 $2.6 \mu\text{m}$ 肉厚 $40 \sim 50 \mu\text{m}$

(b) 成形体の圧縮特性

MHS 直径、肉厚、組成の異なる円柱状試験片(円柱直径約 50mm 、高さ約 50mm)を用い、油圧プレスにより試験を行った。

試験中、圧縮により MHS が剥がれて、周りに散らばるものがあり、球の径が小さいほどその傾向は大きい。球同士とはいえ点接触ではなく面接触であるため、接合強度は球同士の接合面積に依存し、球が小さいほど接触面積が小さくなり、剥離

しやすくなると思われる。

図 1-2-8-7 に応力-ひずみ曲線を示す。試験片の相対密度が上昇していく間、広いひずみ領域で応力をほぼ一定に保っており、高いエネルギー吸収性を有していることが確認できる。t=100 μm の応力値が大きい理由として、炭素含有量が他の 100 倍以上異なり、変形抵抗が増加したためと考えられる。ほぼ同じ肉厚、炭素含有量では、MHS 直径が大きい 8mm の応力値が小さくなっている。MHS 成形体にて圧縮部材を製造する場合、直径、肉厚、炭素含有量を調節することにより、強度を制御できる可能性があると思われる。また、初期密度の大きい方がプラトーの応力値が高いことがわかった。

次に、錐体のある高さから落とし、錐体の重量、錐体の高さを変え MHS 成形体のひずみ速度依存性を試験した結果を図 1-2-8-8 に示す。図中、1 E-2 はひずみ速度が 10^{-2} であることを示す。ひずみ速度が速い方が応力値は少し高くなっている。MHS では、ばらつきはあるが、ひずみ速度依存性が認められる。

(c) 引張り特性

MHS 成形体試験片をクリップゲージではさみ、引張試験を実施した(図 1-2-8-9)。写真に見られるように、破断部はチャック部より離れたところで発生している。

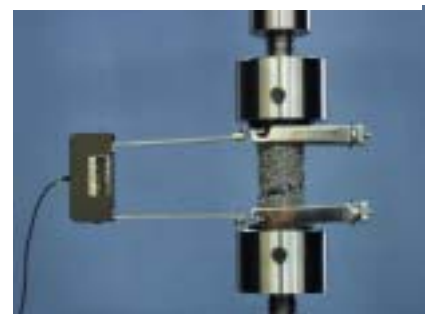


図 1-2-8-9 引張試験片と測定方法

図 1-2-8-10 に引張り破断した断面を示す。破断部では MHS の単球に孔の空いているのが確認できる。これは、焼結により他の球と結合していた部分が破断し、

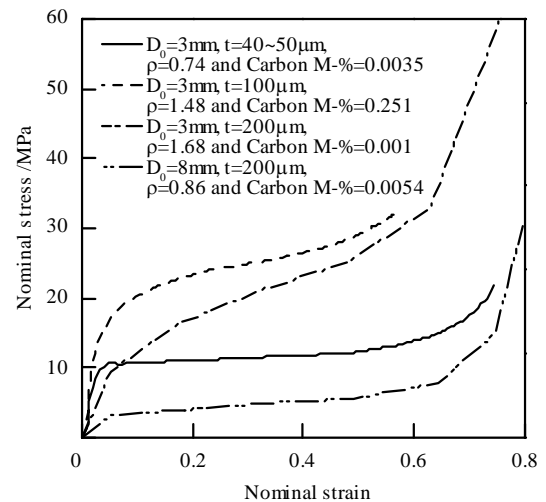


図 1-2-8-7 圧縮試験による
応力 - ひずみ曲線

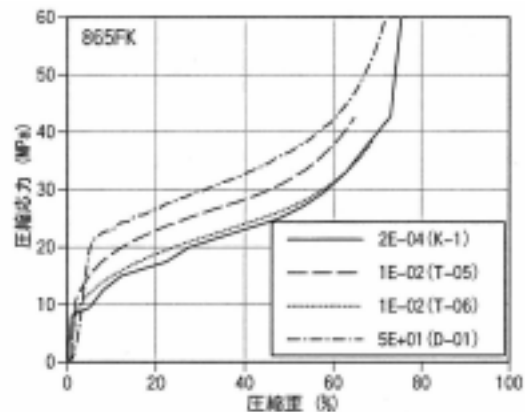


図 1-2-8-8 MHS 成形体のひずみ速度依存性
(d=3mm、t=200 μm)

円形に孔があいたものと考えられる。

図 1-2-8-11 に、引張試験時の応力と伸びの関係の一例を示す。引っ張り試験では、破断荷重、破断伸びのばらつきが大きくなった。この伸びを、ひずみに換算すると 5% 前後であるが、破断までの一様伸びが少なく、破断が一断面で発生していること、中空球の一部が破断していることから、破断ひずみとするには問題が多いと考えられる。



図 1-2-8-10 破断部の断面

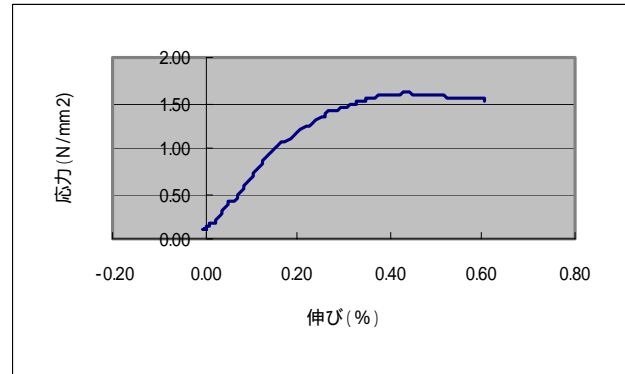


図 1-2-8-11 代表的な応力と伸び線図

(d) 曲げ特性

円柱状試験片(円柱直径約 30mm、長さ 130mm)を用い、万能試験機により試験を行った。

図 1-2-8-12 に試験後試験片形状を示す。引張りに対する強度は低く、わずかなストロークで曲げ外側にクラックが発生し、V字型に折れ曲がるように破断している。MHS では比較的均一な気孔分布になるため、おおよそ押し金具の反対側(試験片ほぼ中央下側)にクラックが発生、進展している。



図 1-2-8-12 曲げ試験後の試験片

図 1-2-8-13 に荷重-ストローク曲線を示す。密度の大きいもののほうが、最大荷重が大きくなる傾向がみられる。割れの発生時期は目視レベルで確認したところ、ほぼ最大荷重に達したところである。MHS の肉厚が $t=40\sim 50\mu\text{m}$ では $100\mu\text{m}$ よりも遅く割れが発生した。

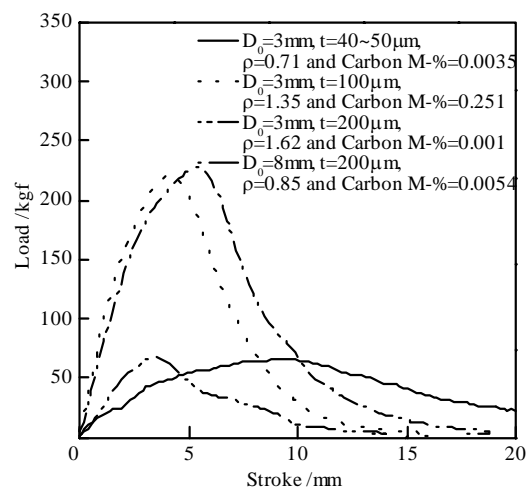


図 1-2-8-13 曲げ試験による荷重 - ストローク曲線

(e) 外套管を使った MHS の特性

引張応力の作用する側で、ひずみの小さい段階で破断が起こり、これが伝播して破壊に至るため、曲げ破断応力が低くなる。この破断の進展を、外部からの拘束により押さえた場合、どのような現象が見られるかについて、丸い MHS 成形体の外周をパイプで巻いて曲げ試験

を実施した。パイプ外套をつけた MHS は、3 点支持の荷重点が圧縮変形をして、この部分から折れ曲がる(図 1-2-8-14)。また、パイプのみの場合、低い荷重でパイプが扁平し折れ曲がってしまう。MHS が内部に充填されているパイプでは、扁平が抑制され、円形を保ったまま変形が進むため、変形荷重は大きな値となり、パイプ、MHS それぞれが単独の場合より、剛性は何倍にも上がっている(図 1-2-8-15)。この様に、MHS 単独では曲げに対し弱い、パイプ外套で破断の進展が防止されることにより、剛性上昇効果が十分に発揮され、MHS 成形体の軽量、高比剛性の特徴を生かすことができる。

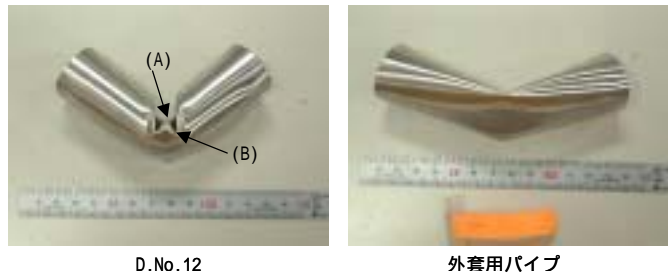


図 1-2-8-14 パイプ外套を有する MHS 成形体の曲げ試験

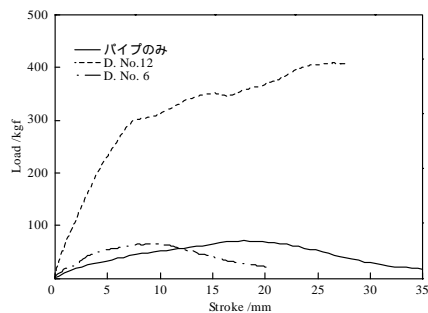


図 1-2-8-15 パイプ外套された MHS 成形体の曲げ試験における荷重-ストローク曲線

(4) 疲労特性

MHS 材に関しては、従来その圧縮強度、曲げ強度等の静的強度特性が評価されてきたが、疲労強度試験を行った。30×240mm(小球形 3.8mm)試験片 10 本の疲労試験結果の例を図 1-2-8-16 に示す。図中の近似線は最小 2 乗法で求めた。いずれも応力振幅と繰返し数の関係が右下がりになる疲労特性が認められた。また、引張り試験結果と比較するため、図中に繰返し数 0.5 回の所に引張り試験のデータをプロットした。

引張り試験では、強度が高いものほど小球接合率が高いという関係が得られたが、疲労試験では強度だけではなく、応力振幅と繰返し数の関係も考慮しなくてはならないため、正規化疲労強度 = (σ_i / σ_0) を求め、小球接合率との関係を図 1-2-8-17 に示す。

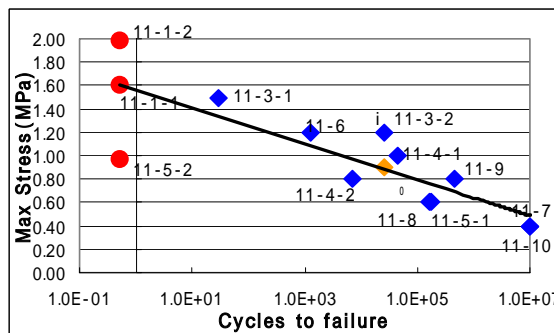


図 1-2-8-16 疲労試験結果 S - N 曲線 (試験片 No.11)

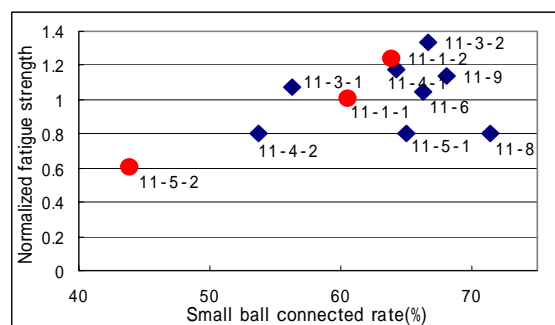


図 1-2-8-17 小球接合率と正規化疲労強度の関係

(5) おわりに

MHS 成形体は、応力 - ひずみ線図において、広いひずみ領域で応力をほぼ一定に保っており、高いエネルギー吸収性を有している。一方、引張り力の作用する状態では非常に小さいひずみで破断が生じ、曲げ試験においては破断が一断面で進行し、V 字型に折れ曲ってしまうため、MHS 成形体のみでの使用は困難である。

そのため、MHS 成形体をパイプで外套するなどし、強度を高めた状態で衝突エネルギー吸収材や剛性向上材として適用することが不可欠といえる。

参考文献

- 1) M.F.Ashby et.al.; “Metal Foam, A Design Guide”, Oxford BUTTERWORTH HEINEMANN
- 2) 池田輝之、中嶋秀雄；*鑄造工学* 74(2002)812-816
- 3) S.Gasser, F.Paun, A.Cayzeele, Y.Brechet；*Scripta Materialia* 48(2003)1617-1623
- 4) W.S.Sanders, L.J.Gibson；*Materials Science and Engineering A347*(2003)70-85
- 5) 鮭川佳弘, 松川不二夫, 三原豊, 吉村英徳；(社)自動車技術会 2002 年春季大会 学術講演会前刷集 材料, No.32-02 p9-12 (No.20025041)

3.1.2.9 押し出し発泡法

押し出し発泡法は、アルミニウム合金を発泡させながら金型内に押し出し、充填させることにより任意の三次元形状を有する低密度の発泡アルミニウム製品を作製する加工方法である。射出成形に類似した方法で、自動車部品の製造を目標に、クラッシュボックスやサイドピラー充填材などへの実用化を目指して研究、開発が行われている。

発泡金属の作製原理はプリカーサ法と同じで、粉末を原料とし、発泡剤粉末を混合して緻密固化体(プリカーサ)を作製し、母材合金の融点以上に加熱して発泡させる。プリカーサ法との違いは押し出しダイスで加熱し、発泡させながら金型に充填する点で、金型への熱負荷を小さくし、製造サイクルを高めて生産性の向上を目指している。なお、アルミニウム合金粉末と発泡剤の混合粉末から発泡アルミニウムを直接作製する方法も研究されている。

(1) 固化体からの成形

図 1-2-9-1 に固化体を利用して発泡アルミニウムを作製する押し出し発泡装置を示す。成形は、まず発泡剤を含むアルミニウム円柱材をパンチと押し出しダイスで固定する。高周波誘導加熱装置を用いて押し出しダイスをアルミニウムの融点以上に加熱し、材料試験装置を用いて加熱したダイスを金型、誘導コイルと共に押し下げ、伝熱によりアルミニウムを加熱、発泡させながら金型内に押し出し、成形する。加熱ダイスの温度は熱電対により測定し、一定になるように誘導コイルの出力は

制御されている。

図 1-2-9-2 にダイス温度 740 ℃、加工速度 $v=3.0$ 、 7.0mm/s で作製した発泡アルミニウムを示す。金型加熱がない場合は金型内に発泡アルミニウムを充填させることは困難であるが、金型を加熱した場合は発泡アルミニウムを金型形状に近づけることができる。押出された発泡アルミニウムが金型に接触しても急激に冷却されないため、金型細部へ充填することができると考えられる。

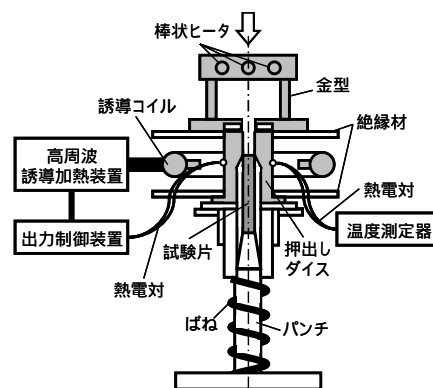


図 1-2-9-1 固体体を利用した押し出し発泡装置

図 1-2-9-3 に各加工速度における相対密度の変化を示す。金型を加熱することにより、全ての加工速度において相対密度 0.20 程度の発泡アルミニウムが得られている。また、加工速度が大きいほど、金型加熱の影響が大きいことがわかる。金型を加熱することにより、金型内に押出された発泡アルミニウムが固化するまでの時間が長くなり、また加工速度が速いほど金型上部から充填する傾向があるため、金型加熱の影響が大きく表れると考えられる。

以上のように、発泡剤を含む固化体を、アルミニウム合金の融点温度以上に加熱したダイスを利用して金型内に押し出すことにより、相対密度約 0.2 の円柱形発泡アルミニウムが成形されている。本方法では、発泡剤を含む固化体の作製が必要であること、伝熱により固化体を加熱するため加工速度に制限があること、金型に充填するために金型を加熱、保温する必要があることなどが制約として挙げられる。

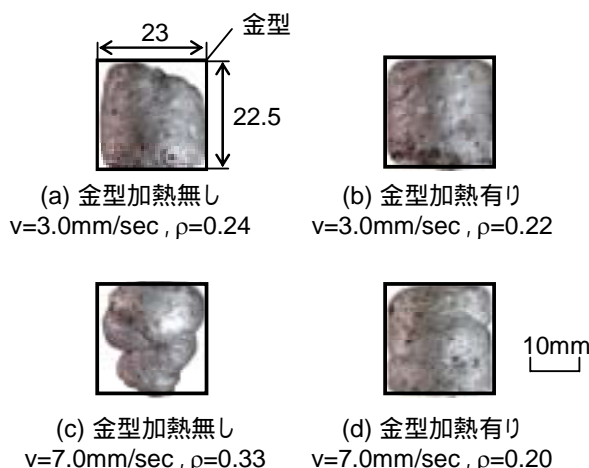


図 1-2-9-2 金型充填における金型加熱の影響

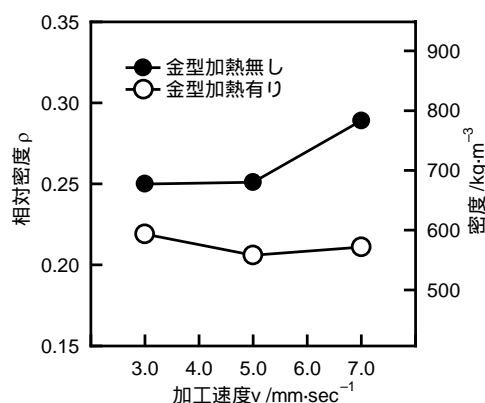


図 1-2-9-3 相対密度と加工速度の関係

(2) 粉末からの成形

図 1-2-9-4 に粉末から発泡アルミニウムを直接作製する装置を示す。発泡剤を混合した粉末の側方押し出しと発泡アルミニウムの作製を連続で行う。図中(a)の圧粉固化体作製部では、コンテナ内にアルミニウム合金 A6061 粉末と発泡剤として用いる水素化チタン(TiH_2)粉末の混合粉末を入れて圧粉し、コンテナより圧粉固化体

を側方に押出す。そして、図中(b)の押し出し発泡成形部において、A6061 合金の液相線温度(652)以上に加熱された発泡ダイス内に押し込み、発泡ダイスからの伝熱により圧粉固化体を熔融、発泡させながら、ヒータにより加熱、保温する円筒形金型内へ押し出し、成形する。加工終了後、冷却孔より圧縮空気を吹きつけ、金型及び発泡アルミニウムを冷却する。

図 1-2-9-5 に円筒形金型に充填した発泡アルミニウムの断面を示す。発泡アルミニウムは金型内に十分充填しており、平均相対密度は 0.24 である。

発泡アルミニウムの密度分布を図 1-2-9-6 に示す。冷却時間は、加工終了後、金型の最高温度がアルミニウム合金の固相線温度(582)を下回るまでに要した時間である。冷却時間が短いほど発泡アルミニウムの密度分布は均一になることがわかる。冷却時間が長くなると気泡の漏出、粗大化が進むため、密度分布は均一になりにくい。

本方法では、コンテナに混合粉末を供給することにより連続的に発泡アルミニウムを金型内に押し出すことが可能である。現在のところ鋼管への充填だけであるため、成形形状の限界は不明である。

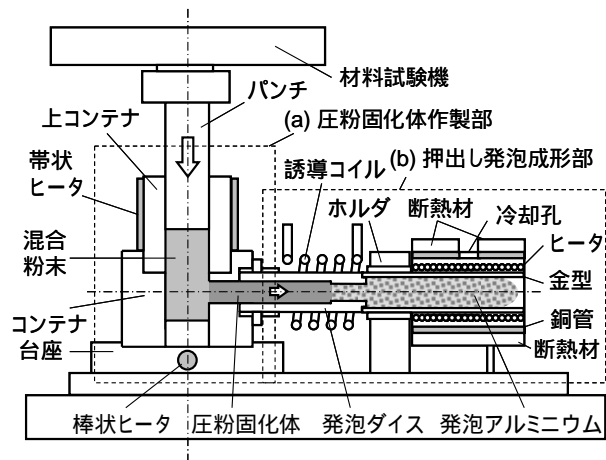


図 1-2-9-4 粉末から作製する押し出し発泡装置

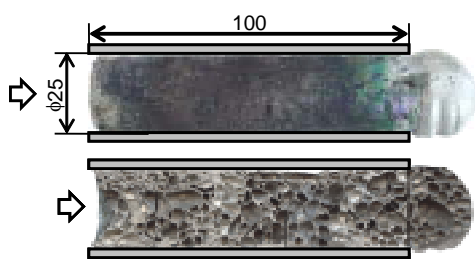


図 1-2-9-5 金型に充填した発泡アルミニウム

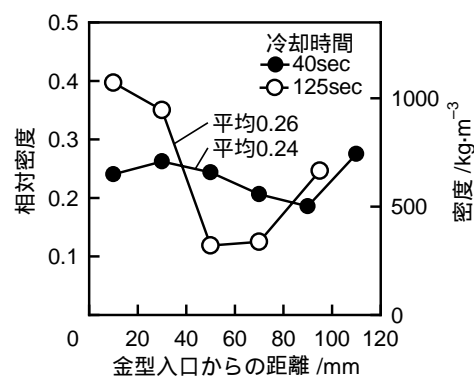


図 1-2-9-6 発泡アルミニウムの相対密度分布

参考文献

- 1) 大西智之,塩見誠規,小坂田宏造:押し出し発泡法による多孔質アルミニウムの成形、平成 16 年度塑性加工春季講演会講演論文,177-178.
- 2) 今釜俊介,塩見誠規,小坂田宏造:押し出し発泡法による発泡アルミニウムの金型への充填,平成 17 年度塑性加工春季講演会講演論文,31-32.
- 3) 今釜俊介,塩見誠規,小坂田宏造:粉末押し出し発泡法による発泡アルミニウムの金型成形,第 56 回塑性加工連合講演会講演論文,353-354.

3-2 ポーラス金属の利用拡大可能性に関する検討

3.2.1 ポーラス金属の利用可能性の概要

前章に記述されているように、製造法に応じて様々な気孔形態(オープンセル型、クロードセル型)、気孔率、気孔サイズを有するポーラス金属の研究開発が展開されている。そして、素地となる金属の種類にも関連して、機械的、物理的、熱的、電気的に様々な特徴を発現し、その特徴を生かして極めて広範囲な利用可能性を有している。今回の調査研究で各種工業分野における利用可能性について調査した結果を表 2-1-1 のように気孔形態、気孔率、気孔サイズによって大まかに分類して整理した。

オープンセル型ポーラス金属の利用対象としては、金属内部を貫通する気孔を気体や液体が通過することによって様々な機能を発揮する利用方法が主体である。その一つが熱交換機能であり、金属本来の良好な熱伝導性と貫通気孔による比表面積の拡大を特徴とした利用方法である。この場合、気孔率の大小や気孔サイズの大小に応じて様々な熱交換部品が考えられ、大型燃焼機器の熱交換装置から電子部品の熱交換部品まで利用可能性は極めて広い。そして、各熱交換機の温度範囲や部品サイズに適した金属の種類と気孔率や気孔サイズの選択とその成形技術の開発が必要となる。もう一つの利用対象はフィルター機能であり、様々な大きさの貫通気孔を通過する気体や液体から特定の物質を分離する利用方法である。比較的気孔率の高いポーラス金属については、自動車排気ガス用の触媒フィルター担体や溶湯金属の不純物除去フィルターへの利用可能性が上げられる。これらは、既にポーラスセラミックによって製品化されている分野であるが、耐熱衝撃性や熱伝導性など金属の特長を生かしてポーラス金属への利用転換の可能性が期待できる。そのためには、気体や液体の透過率を左右する貫通気孔の大きさや形状を細かく制御する技術が必要となる。オープンセル型ポーラス金属のその他の利用可能性としては、高い振動吸収性能を利用した吸音材やスポーツ用品、貫通気孔による通気性を利用した鋳造用あるいは樹脂成形用の金型への利用などの可能性もある。

クロードセル型ポーラス金属の利用対象としては、金属内部に分散する独立気孔による一種の複合材料的な機能を発揮する利用方法が主体となる。大きな利用対象の一つは、気孔の分散による重量の大幅な軽減を利用した軽量化材料としての利用である。工業製品の軽量化のためには必ずしもクロードセル型である必要はないが、一般には軽量と同時に剛性、強度、衝撃吸収性、制振性など他の機能の要求が伴う製品が多く、それら要求機能によってはオープンセル型も利用材料としての候補となる。軽量化材料としては、その目的からも構造用材料としての利用可能性が多く、今後の大きな期待としては自動車用構造材料としての利用拡大である。その利用部材としては、衝撃吸収性を主体とするバンパービーム、衝撃吸収性と剛性を必要とするピラー、サイドフレームやフード、制振性や防音性を必要とするフロアパネルやダッシュボードなど多岐に亘っている。そして、部品形状も棒状部品から板状部品まで様々であり、

それぞれの部品形状やサイズに応じた気孔サイズの適正化も必要とされる。これら自動車部品と同様の機能を期待される利用可能性として、工作機械、産業用ロボット、福祉・介護機器などへの利用拡大の可能性も大いに期待できる。以上のような、軽量化要求の構造用部品として利用する場合、ポーラス金属単体での利用よりは、ハニカムサンドイッチ構造や生体骨の微視構造を模したように、緻密金属との複合構造体として利用する可能性が大きく、このような複合構造の設計や成形も今後の課題となる。クローズドセル型ポーラス金属のその他の利用可能性としては、断熱材、保温材としての建築用材料、微細気孔を有する人口骨など生体用インプラント材料も考えられる。

以上のように、金属内部に数十 μm から数 mm の気孔を多数有するポーラス金属には、広い工業分野において様々な利用の可能性を秘めている。そして、ポーラス材料としての機能・特徴と金属材料としての機能・特徴を有機的に融合させることによって、ポーラスプラスチックやポーラスセラミックでは対応できない利用の可能性が益々拡大するものと期待される。次節以降では、前述の各利用可能性部材について、その詳細を解説する。

表 2-1-1 ポーラス金属の利用可能性

1. 開気孔(貫通気孔)

気孔率	気孔サイズ	適用可能部材	備考
高い (50%以上)	大 (1mm 以上)	電極用材料 熱交換用材料 自動車用触媒担体 吸音材	セル壁の部分連結
	小 (1mm 以下)	熱交換用材料 自動車用触媒担体 溶湯フィルター	単位容積当りの表面積 耐熱性・耐熱衝撃性・熱交換特性(Ni 超合金)
低い (50%以下)	大 (1mm 以上)	熱交換用材料	
	小 (1mm 以下)	電子部品ヒートシンク 液体・気体用フィルター 液通気性金型 通水舗装材 体含浸材料(摺動部品) ゴルフ用パターヘッド	高熱伝達特性(Cu 合金) 通気性、目詰まり無し；鉄、アルミ 通水性、錆びない、強度；アルミ、鉄 鉄、アルミ、セラミックス 制振性

2. 閉気孔(独立気孔)

気孔率	気孔サイズ	適用可能部材	備考
高い (50%以上)	大 (1mm 以上)	自動車：フロアパネル，ダッシュ ボードパネル 工作機械，産業ロボット，福祉機 器のフレーム 断熱材(床，壁)，保温材	制振・防音 軽量，剛性，制振性 強度，低熱伝導率；鉄，アルミ
	小 (1mm 以下)	人工海绵骨 超軽量薄板 工作機械，産業ロボット，福祉機 器のフレーム	ポアサイズは数百ミクロン程度(表面 開気孔) 数ミリ程度の板厚材 軽量，剛性，制振性
低い (50%以下)	大 (1mm 以上)	軽量構造材料，低弾性率材料	気孔率により強度，熱伝導率等を制 御した材料

	小 (1mm 以下)	軽量構造材料，低弾性率材料 軽量薄板 生体用インプラント 人工緻密骨	気孔率により強度、熱伝導率等を制御した材料 数ミリ程度の板厚材 超弾性特性、低弾性率、生体親和性 ポアサイズは数百ミクロン程度(表面開気孔)
--	---------------	---	---

3. 開気孔 / 閉気孔の区別なし

気孔率	気孔サイズ	適用可能部材	備考
高い (50%以上)	大 (1mm 以上)	自動車：ピラー，サイドシルの充填材 自動車：サイドフレーム，バンパービーム 自動車：ボンネット，フード 軽量構造材料，衝撃吸収材料 断熱材料	比剛性 / 強度，制振性 軽量，エネルギー吸収性． 外板と同素材(鉄鋼，アルミ)，三次元形状の成形
	小 (1mm 以下)	自動車：ピラー，サイドシルの充填材 軽量構造材料，衝撃吸収材料 断熱材料	比剛性 / 強度，制振性
低い (50%以下)	大 (1mm 以上)	自動車：サスアーム マイクロ・アクチュエータ	比剛性 / 強度，制振性 形状記憶合金
	小 (1mm 以下)	自動車：サスアーム	比剛性 / 強度，制振性

3.2.2 各ポラス金属を使用する製品イメージ

各ポラス金属の特性に照らして、実際にどのような適用の可能性があるかについて、想定製品として表 2-2-1 にとりまとめた。なお、自動車については提要範囲が広いことから、3.2.3 として別掲する。

表 2-2-1 想定されるポラス金属の適用製品

想定製品	必要とされるポラス性状	活かされる特性とその効果	現在の技術レベル
自動車搭載用車椅子	<ul style="list-style-type: none"> 軽量で衝突安全性能に優れた構造材料 軽量で強度に優れていること(できれば、制振性があること)。 オープン or クローズド構造などの制約はなし。 現行構造からすると、パイプ状、または板状になり、アルミとの腐食などが無いことやアルミとの溶接が可能なこと。 	ポラス金属は、軽量でエネルギー吸収性能に優れているといわれている。現行車椅子の構造や材料では、現行の利便性(軽量で利用時や持ち運びが楽)と自動車搭載時の安全性能を両立することは不可能であり、材料技術からの大幅な努力が必要である。	不明
熱交換器(ヒートシンク)	<ul style="list-style-type: none"> 銅合金、アルミ合金等 マイクロチャンネル型ヒートシンクを模すものであり、冷媒を通過させる必要上、オープンポラス構造である必要がある。ヒートシンクの重要な特性の一つに高比表面積が挙げられ、高い比表面積を有するためには、微細な連結孔を緻密に有するポラス金属が必要である。 	中嶋らの報告によると、ロータス型ポラス銅により作製したポラス金属をヒートシンクとして利用した場合、従来型ヒートシンクの4倍の性能を示すことが報告されており、発熱密度が高い近年の電子デバイスへの適用が見込まれる。	ロータス型ポラス銅を利用したヒートシンクが開発されているが、実用化に至っていない。

SOFC(固体酸化物形)型燃料電池用燃料極	<ul style="list-style-type: none"> ・ニッケル、あるいはステンレス鋼 ・オープンセル構造 ・気孔率；50-70% ・気孔径；1-10 μm 	単位面積あたりの発電効率の向上	十分に微細な気孔径、気孔率のポーラス電極が作成されていない。
インプラント材	<ul style="list-style-type: none"> ・チタン ・オープンセル構造 ・自家骨と同様な傾斜構造 ・骨細胞が形成されるために適したポアサイズ(数百ミクロン) ・気孔径数百ミクロン程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ポアサイトにおける骨生成の活発化→骨セメントなしで人体と強固な結合 ・自家骨と同じ特性(強度、弾性率)→筋肉の弱体化を防止 	数センチ程度のサンプルであれば、スベーター法によって数百 μm のポアサイズを有するポーラス Ti を作製することが可能。
ポーラス金属金型(局部使用を含む)	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄系材料、非鉄系材料(アルミなど) ・内側から外面にかけて連通するオープン型ポーラス構造。 ・できれば、内側は溶湯、ビーズの浸入を防ぐために小さい開口で、外側に向かって大きな開口である、いわゆる傾斜開口度のものが望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・鋳造ではガス抜け性が向上し、ガス欠陥が少なくなる。 ・発泡成形では蒸気の通気性が向上し、成型の均一性が改善される。 ・鋳造、成型とも、生産性の向上が期待される。 	予備テスト段階であり、具備すべき諸特性等は解明されていない。

3.2.3 自動車におけるポーラス金属の適用可能性

3.2.3.1 最近時の自動車ニーズ

近年、自動車は環境保護を背景にした燃費向上に因るため、自動車の軽量化が急激に進められている。一方、搭乗者保護や歩行者保護などの観点から安全性能の向上が求められており、フロント/リア周りのエネルギー吸収能向上、キャビン周り的高剛性化、エアバッグやABSなど安全装置搭載や x-by-wire などの IT 化が進められている。さらには動力性能など商品魅力の向上も求められ、自動車に対するニーズは多種多様化し、その要求も高く厳しくなって、商品機能向上による重量増加を超える軽量化が求められている。

3.2.3.2 自動車へのニーズとポーラス金属

軽量化ニーズに因る、鉄からアルミニウム合金、マグネシウム合金への材料置換が進められてきたが、実用金属では材料置換による更なる軽量化は困難と考えられる。しかし、金属のポーラス化により、緻密材では達成できない超軽量化が可能になる。また、ポーラス金属は緻密材に比べ高比強度、高比剛性であり、エネルギー吸収能も大きいことから衝撃エネルギー吸収部位への適用を検討されてきた。軽量化と高強度化、高剛性化、高エネルギー吸収能化は相反する問題であり両者を同時に満たすことは不可能と考えられてきたが、ポーラス金属はそれらを同時に満たすことができる材料と考えられる。

新規材料を自動車に適用するには高付加価値か、コストダウンのどちらか、もしくは両者を満たすことが求められる。一般的に自動車用材料に求められる特性を整理すると、軽量、高剛性、高強度、高耐久性、良好な成形性、リサイクル性、耐食性、さ

らには低コスト(材料費・加工費)が挙げられる。ポラス金属による付加価値の一つとして緻密材では達成できない超軽量化が挙げられるが、自動車における最重量物は群を抜いてホワイトボディであり次に蓋物(Hood、Door、Trunk)であるため、ポラス金属の自動車適用可能性は重量原資の大きい車体、蓋物をターゲットにして検討する。

3.2.3.3 ポラス金属の自動車適用可能性

ポラス金属の車体への適用候補を図 2-3-1 に、各々に必要な特性、適用後の効果、課題、コスト比較を部品ごとにまとめたものを表 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 ポラス金属の車体・蓋物適用時の課題

適用部位	必要な特性	適用後の効果	課題	コスト比較
バンパービーム 内充填	衝撃吸収能	軽量化 運転性能向上	内部固定方法	現行バンパービームとの比較
バンパービーム 単独存在	衝撃吸収能 形状保持能力	圧倒的軽量化 運転性能向上	生体骨構造製造 技術 接合技術	現行バンパービームとの比較
フロントサイド フレーム単独存在	衝撃吸収能 形状保持能力	軽量化 安全性能向上	生体骨構造製造 技術 接合技術	現行フロントサイドフレームとの比較
フード (スキン/フレーム)	衝撃吸収能 (歩行者保護)	圧倒的軽量化 安全性能向上 運動性能向上	薄板製造技術 接合技術	現行スキン/フレームとの比較
フロアパネル	制振 防音 断熱	圧倒的軽量化 メルシート・防 音材レス	薄板製造技術 接合技術	フロア+メルシート・防音材との比較
ダッシュボード ローア	制振 防音 断熱	圧倒的軽量化 防音材レス	薄板製造技術 接合技術	防音材との比較

単純なコスト比較では現行のものにかなわないが、ポラス金属を車体・蓋物に適用することにより、より高い付加価値を自動車にもたらすことができるなら適用可能性は十分あると思われる。例えば、バンパービームは衝突時の衝撃をボディ骨格であるサイドフレームに伝える役割をしている一方、軽衝突で発生した衝撃に対しては交換困難なサイドフレームに伝えず、交換可能なバンパービームの変形だけで全ての衝突エネルギーを吸収させるための部品である。そこでポラス金属を利用して高衝撃エネルギー吸収能と高剛性が両立されると、その空孔率によっては

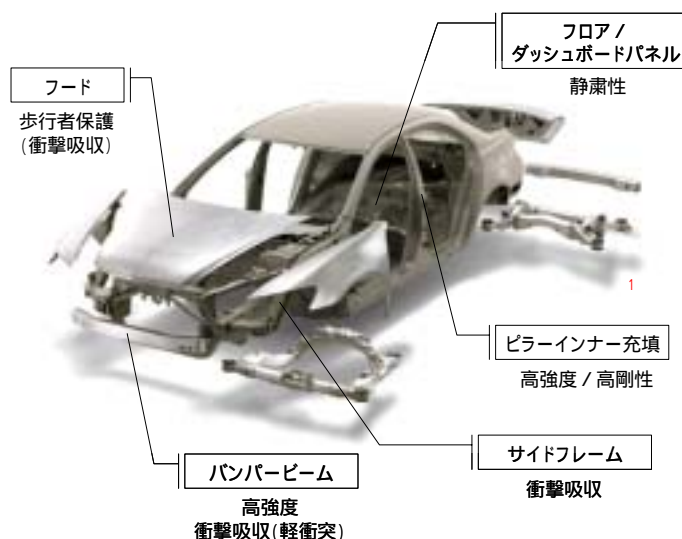


図 2-3-1 車体への適用候補

軽量化できる可能性がある。特に、押し出し材にポラス金属を充填する構造でなく、ポラス金属単独であれば圧倒的な軽量化が期待できる。このようにポラス金属を自動車に適用するには、より大きな付加価値を与えられるような適用方案を検討する必要がある。

2.3.3.4 実部品想定での効果と課題

(1)ポラス金属薄板製造技術の開発

板厚 1mm 程度のポラス金属薄板が製造可能であれば、フードスキン/フレーム、フロアパネルともに剛性支配なので高剛性材であるポラス金属の適用により超軽量化という大きな付加価値が得られる。さらにフードが衝撃エネルギー吸収能を持つと衝突時の歩行者保護(フード下にあるエンジンなどの剛体への頭部衝突といった致命的ダメージを負わせない)といった安全性能向上、超軽量化により設置位置が高いことから重心を下げられたことによる運動性能の向上が付加される。フロアに関してはポラス金属の特性から制振、防音、断熱が付加されることからメルシート、防音材の削減という大きな付加価値が付随することになる。ただし、フードスキンは外観を重視するため、表面に数百 μm のポアは許容しにくい。そのため片面に限っては通常圧延材と同様の品質が求められる。また板材である以上プレス加工が可能であることが前提であり、プレス加工やヘミングで内部気孔がつぶれないことが必要となる。

適用後の効果試算として現状の鉄製フードスキン/フレーム、フロントフロアにポラスアルミ板材を適用した時の超軽量化効果を表 2-3-2 に示す。

表 2-3-2 材料置換による軽量化効果

	Hood Skin	Hood FRM	Front Floor
鉄	約 6kg	約 5kg	約 9kg
アルミニウム合金板	約 3.6kg	約 3.0kg	約 5.5kg
ポラスアルミ(気孔率 50%)	約 2.9kg	約 2.3kg	約 4.4kg
ポラスアルミ(気孔率 70%)	約 2.4kg	約 2.0kg	約 3.7kg
ポラスアルミ(気孔率 90%)	約 1.7kg	約 1.4kg	約 2.6kg

各々の重量は一般的なセダン車の重量とし、鉄からアルミニウム合金への重量換算は等価剛性を基本とした。またポラスアルミのヤング率はアルミニウムのヤング率に“ $\{1-(\text{気孔率})^2\}$ ”を乗じたものとした。

(2)生体骨構造製造技術(図 2-3-2)

ポラス金属を内部に充填という方法ではコスト高と圧倒的な軽量化には寄与しにくい、さらには充填方法の確立が必要という課題が考えられる。そこで、内部充填という方案ではなくポラス金属単体で構造部材として存在できる生体骨構造を検討した。求められる特性は構造部材として存在できる

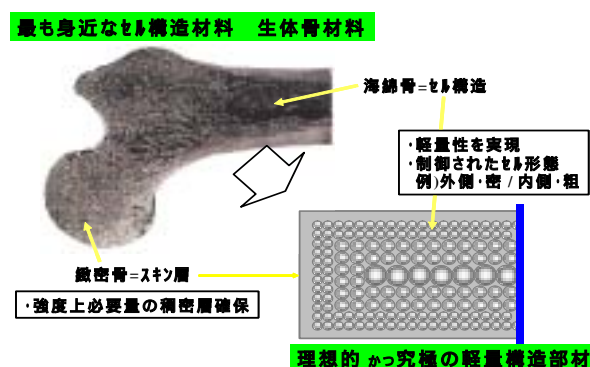


図 2-3-2 生体骨材料のイメージ

よう外側は接合ができる程度には緻密さが必要である。しかし、軽量化のために、生体骨のように密度が内部から外側へかけて傾斜化し、内部が粗の構造であることが望まれる。これにより現状の押し出し材と遜色なく接合ができ、高エネルギー吸収能が付加された構造部材が作成できる。適用部品としては、バンパービーム、フロントサイドフレームである。課題としては形状作成、セルサイズ制御、密度の傾斜制御、強度保証などが挙げられる。

3.2.3.5 ポーラス金属への開発提案

ポーラス金属の自動車適用可能性を検討した結果を踏まえた開発の提案書(案)を以下に提示する。

開発テーマ(案)

テーマ
自動車車体用最軽量金属パネル開発
(板材or成形部品)

開発目的
車体超軽量化 衝撃吸収 制振性 遮音性

ターゲット部品
車体パネル部品

- ・キャビン系: フロアパネル、ルーフ
- ・蓋物: ドア、フード、フェンダー、トランク

目標性能

適用ターゲット候補と効果

ルーフ SKIN/FRM

トランク SKIN/FRM

フード SKIN/FRM

フロアパネル

フェンダー

ドア SKIN/FRM

車体超軽量化
 衝撃吸収
 吸音性
 制振性

1

2

目標性能	セル形態	材質	気孔率 (密度 g/cm ³)	ヤング率	必要板厚 mm	機械的性質			コスト目標 (板材)
						耐力	伸び	曲げ比強度	
軽量化 (鉄比75%減)	表面クローズドなセル (傾斜構造)	アルミ	> 50% (< 1.35g/cm ³)	> 36GPa	< 1.65	> 90MPa	素材30% (2次加工要件) 製品12% (車体要件)	アルミ同等	1000円/kg
アルミ参考値 (鉄比50%減)	-	-	(2.7)	72	1.3	150MPa	30%	-	約500円/kg

商品化への課題

単純に材料置換を考えた場合、下記のアプリケーション技術が必要。

適用候補	生産技術性				商品性			
	形状自由度	接合	ヘミング (180°曲げ)	外観品質 (塗装後)	強度	ベコ剛性 & 耐デント性 (局部凹み)	耐食性	閉まり感
ドア	SKN				-			
	PNL				-	-	-	
ルーフ					-			-
フード	SKN				-			-
	FRM				-	-	-	-
フロアパネル					-			-
フェンダー		-			-			-
トランク	SKN				-			
	FRM				-	-	-	

参考文献

- 1) <http://www.honda.co.jp/factbook/auto/LEGEND/200410/17.html> (2006.03.07 検索)
- 2) <http://www.honda.co.jp/auto-lineup/legend/photo-lib/photo08.html> (2006.03.07 検索)

3-3 ポーラスアルミニウム合金薄板の製造技術可能性に関する検討

3.3.1 目的

板厚 1mm 以下のポーラスアルミニウムを製造するには、ポア径を板厚以下(1 mm 以下)に微細化する必要がある。そこで、本研究では粉末冶金法を応用したスパーサー法に着目し、同法によりポア径数百 μm のマイクロポーラスアルミニウムのプロセス技術を開発し、ポーラスアルミニウム合金薄板製造の可能性について検討する。

3.3.2 スパーサー法によるマイクロポーラスアルミニウムの作製

スパーサー法については、3.1.2.7 に記載しているが、アルミニウム粉末とふるい分けによって整粒したスパーサー粒子を所与の気孔率に対応した混合比で混合し、焼結後、スパーサーを除去することで、スパーサー粒子の粒径に対応したポア径を持つマイクロポーラスアルミニウムを作製する。ここでは、スパーサーとして塩化ナトリウムを採用した。その理由は、焼結時に焼結温度(773 K 以上)にてアルミニウムと反応せず、放電プラズマ焼結の際の加圧・加熱に対し十分な強度を有し、さらに、焼結後の水洗により容易に除去できるからである^{1,2)}。また、通常の加熱では表面酸化膜を有するアルミニウム粉末の焼結は困難である。そこで本研究では真空中での放電プラズマ焼結(図 3-1)を採用することにより、アルミニウム粉末の良好な焼結を試みた³⁾。

アルミニウム粉末(平均粒径はそれぞれ(a) 3 μm 、(b) 20 μm 、(c) 300 μm 、高純度科学研究所(株)製、純度 99.9% 以上)と塩化ナトリウム粒子(大きさは(a) 300-425 μm 、(b)425-500 μm 、(c)500-600 μm 、(d)600-710 μm 、(e)710-850 μm 、(f)850-1000 μm 、ナカライテスク(株)製、純度 99.5% 以上)の混合体を種々の焼結条件(焼結温度、焼結圧力、焼結時間、原料アルミニウム粉末の粒径)にて放電プラズマ焼結に供した後、水洗で塩化ナトリウム粒子を除去することにより、ポア径数百 μm 、気孔率 75-90%(密度 0.68-0.27 g/cm^3)を有するマイクロポーラスアルミニウムの作製に成功した。

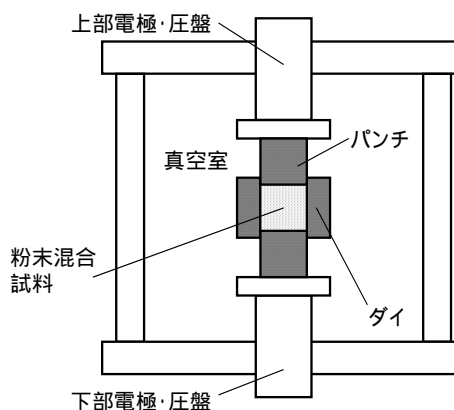
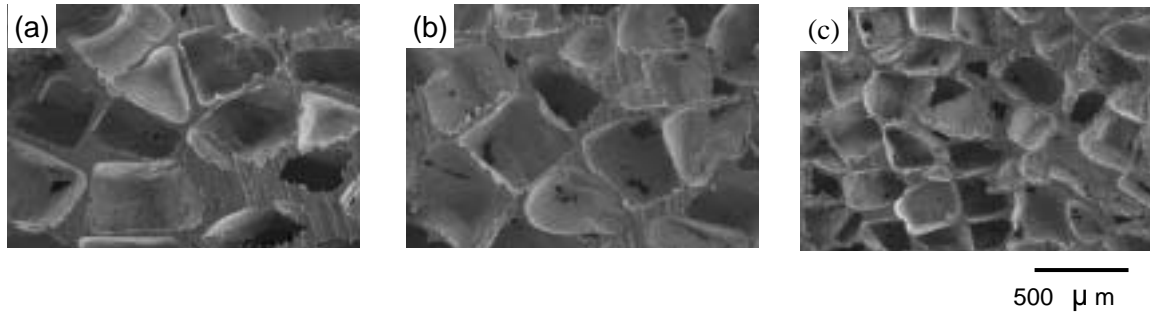


図 3-1 放電プラズマ焼結装置の模式図

図 3-2 にその写真を示す。スパーサーである塩化ナトリウム粒子の粒径に応じた、大きさ数百 μm の微細なポアが、偏りなく形成されていることがわかる。また、採寸・秤量の結果、塩化ナトリウム粒子は水洗により完全に除去されており、目的とする気孔率が実現していることがわかった。塩化ナトリウムが水洗により除去されていることから、作製されたマイクロポーラスアルミニウムはオープンセル(開気孔)構造を有していることがわかる。また、詳細な観察により、作製された試料は、セル柱(梁)から構成される典型的なオープンセル構造とは異なり、クローズドセル(閉気孔)構造のセル壁に小孔が開いた特異な構造をしていることがわかった。この小孔より塩化ナトリウムが水に溶解し、除去されたものと考えられる。



気孔率及びポア径は、それぞれ(a)75%, 425-500 μm 、(b)85%, 425-500 μm 、(c)85%, 212-300 μm

図 3-2 スペーサー法により作製されたマイクロポーラスアルミニウム

3.3.3 最適作製条件の究明

次に、焼結条件を変えて作製したマイクロポーラスアルミニウムの力学特性を圧縮試験によって評価し、構造材として十分な強度を有するマイクロポーラスアルミニウムの最適条件を検討した。ここでは、気孔率 78%、ポア径 850-1000 μm のマイクロポーラスアルミニウム試料を評価対象とした。異なる条件で作製したポーラスアルミニウムのポア性状を図 3-3 に示す。焼結条件の違いによるポア構造の違いはなかった。なお、圧縮試験は室温で行い、クロスヘッド速度は 1 mm / min で一定とした。

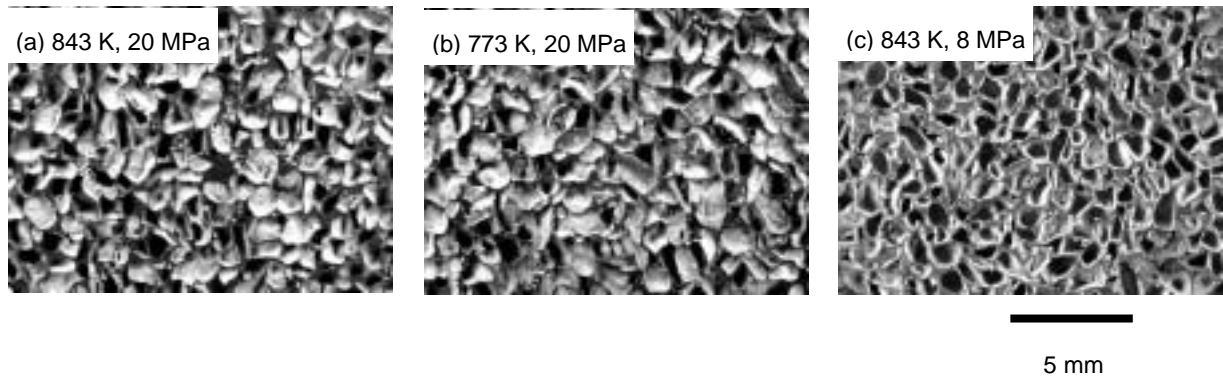


図 3-3 異なる条件で作製したポーラスアルミニウムの外観

一般に、理想的なポーラス金属の圧縮応力 ひずみ曲線は、図 3-4 に示すように、弾性領域(変形初期)、プラトー領域(一定変形応力での大変形)、緻密化領域(試料の圧縮・緻密化に伴う変形応力の上昇)を示す⁴⁾。種々の焼結温度で焼結した試料の圧縮応力 ひずみ曲線(図 3-5)では、833 K 以上で焼結された試料については弾性領域・プラトー領域・緻密化領域が明確に現れ、また、延性的に変形した様子が観察された(図 3-6)が、813 K 以下の温度で焼結された試料においてはプラトー領域が現れない、あるいは緻密化の際の応力が低く(図 3-5)、さらに、圧縮中に試料の一部が脆性的に破壊する様子が観察された(図 3-6)。詳細な観察により、焼結温度の高い試料を圧縮した場合にはセル壁が延性的な曲げ変形を受けているのに対し、焼結温度の低い試料を圧縮した場合にはセル壁が脆性的に破壊していることがわかった。また、焼結温度の低い試料では、焼結によるアルミニウム粉末同士の結合が十分に得られていないことがわかった(図 3-7)。

したがって、焼結温度は 833 K 以上必要であることが推察される。

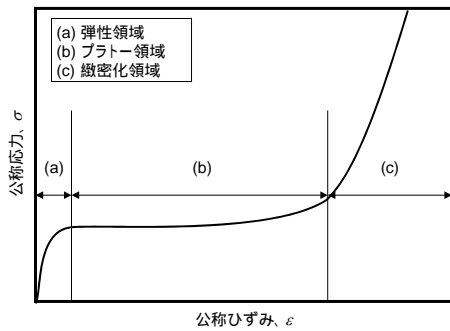


図 3-4 理想的なポーラス金属の圧縮応力 ひずみ曲線

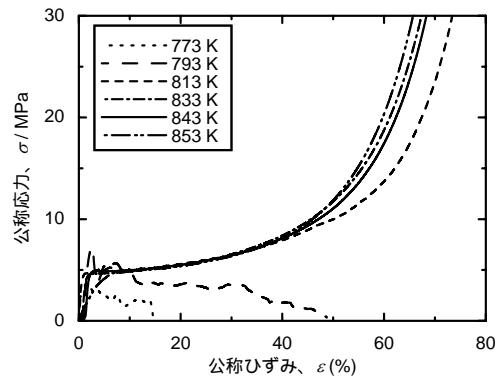


図 3-5 異なる焼結温度で作製されたマイクロポーラスアルミニウムの圧縮応力 ひずみ曲線(焼結圧力 20 MPa、焼結時間 10 分、原料アルミニウム粉末平均粒径 3 μm)

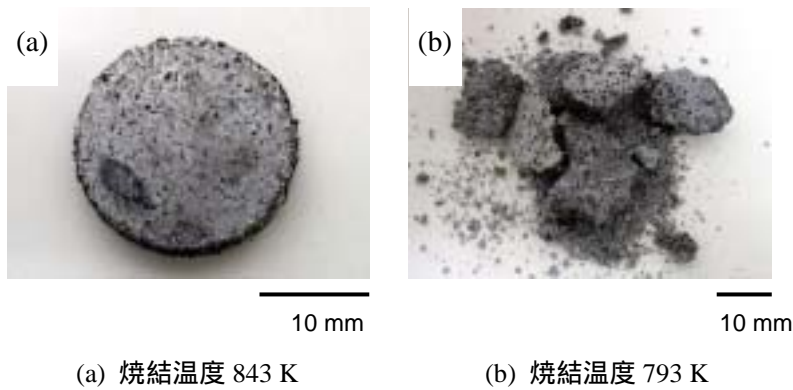


図 3-6 圧縮後試料の外観

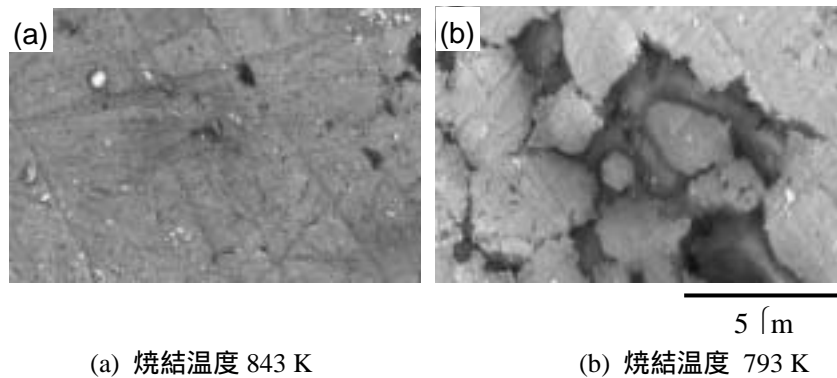


図 3-7 スペーサー法で作製されたマイクロポーラスアルミニウムのセル壁写真

圧縮特性に関する焼結条件の検討を、焼結圧力(図 3-8)、焼結時間(図 3-9)、原料アルミニウム粉末の平均粒径(図 3-10)についても行った。焼結圧力・焼結時間については焼結温度と同様、焼結によりアルミニウム粉末同士の十分な結合が得られるような圧力・時間が必須であることを明らかにした。また、異なる焼結条件で作製した緻密アルミニウムに対する引張・圧縮試験の結果(図 3-11)から、アルミニウム母材の引張特性(延性、

伸び等)がマイクロポーラスアルミニウムの圧縮特性に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。これは、ポーラス金属の変形においてセル壁が局所的に引張変形を受けるためと考えられる(図 3-12)。さらに、原料アルミニウム粉末の粒径が小さいほどプラトー応力(プラトー領域での変形応力)が高いこと、及びスペーサー粒子と同じオーダーの粒径をもつアルミニウム粉末を原料として用いたマイクロポーラスアルミニウムはほとんど変形抵抗を示さないことを見出した(図 3-10)。一方、異なる平均粒径のアルミニウム粉末から作製した緻密アルミニウムでは圧縮・引張ともに良好な変形能を示した(図

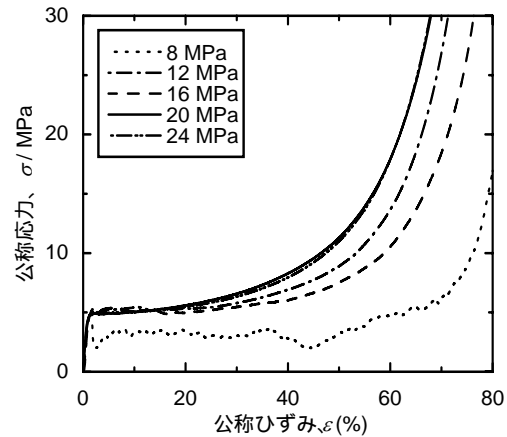


図 3-8 異なる焼結圧力で作製されたマイクロポーラスアルミニウムの圧縮応力 ひずみ曲線

(焼結温度 843 K、焼結時間 10 分、原料アルミニウム粉末平均粒径 3 μm)

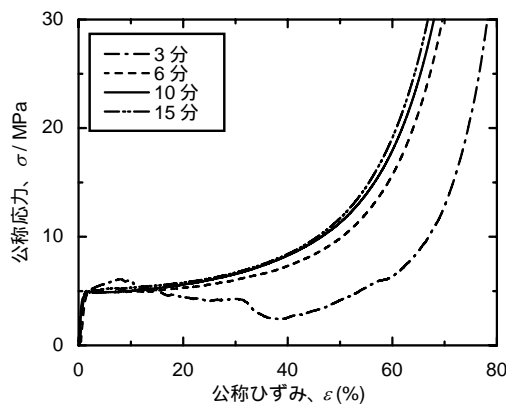


図 3-9 異なる焼結時間で作製されたマイクロポーラスアルミニウムの圧縮応力 ひずみ曲線

(焼結温度 843 K、焼結圧力 20 MPa、原料アルミニウム粉末平均粒径 3 μm)

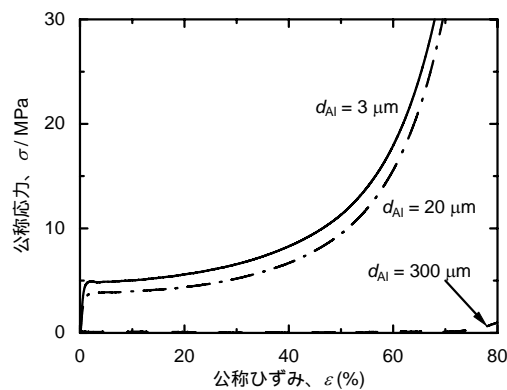


図 3-10 異なる平均粒径の原料アルミニウム粉末から作製されたマイクロポーラスアルミニウムの圧縮応力 ひずみ曲線

(焼結温度 843 K、焼結圧力 20 MPa、焼結時間 10 分)

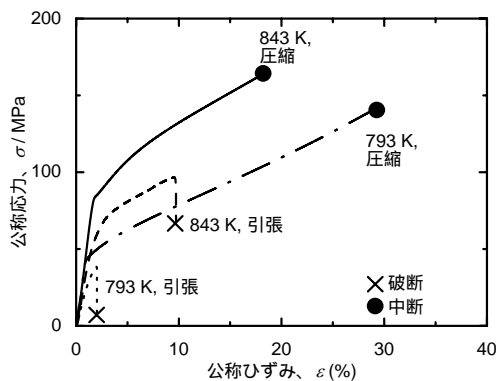


図 3-11 異なる焼結温度で作製した緻密アルミニウムの引張及び圧縮応力 ひずみ曲線

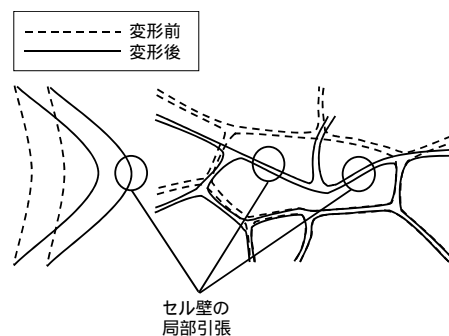


図 3-12 セル壁の変形様式の模式図

3-13)。したがって、スペーサー粒子と同じオーダーの粒径をもつ原料粉末を混合した場合、アルミニウム粉末同士が接触しないため焼結による粉末同士の結合が得られず(図 3-14)、全く変形抵抗を示さなかったと推察される。

以上の実験から、スペーサー法によるマイクロポーラスアルミニウムの最適焼結条件を、焼結温度 843 K、焼結圧力 20 MPa、焼結時間 10 分であると結論した。また、原料アルミニウム粉末の粒径はスペーサーに比べ十分に小さい必要があることを明らかにした。

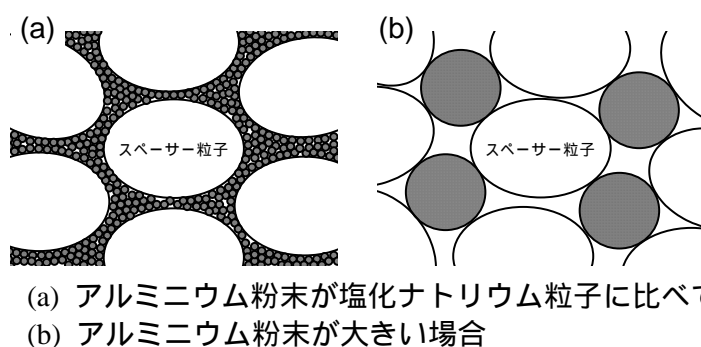


図 3-14 塩化ナトリウム粒子とアルミニウム粉末の混合状態の模式図

3.3.4 圧縮特性評価

スペーサー法により上記の最適条件にて作製したマイクロポーラスアルミニウム、及び国内で先行的に市販されているポーラスアルミニウム合金であるアルポラス(神鋼鋼線工業(株)製)に対して圧縮試験を行った。なお、実験に供した試験片の形状は、直径 20mm、高さ 20 mm である。

試験に供したマイクロポーラスアルミニウムのポア径は 300-425 μm、気孔率は 90% であり、アルポラスのポア径は 3-4 mm、気孔率は 90% である。なお、アルポラスは発泡鋳造法で作製されているため、不均一なポア構造を有している。圧縮試験は室温で行い、クロスヘッド速度は 1mm / min で一定とした。

圧縮試験の結果、マイクロポーラスアルミニウム、アルポラスどちらにおいても弾性領域、プラトー領域、緻密化領域が圧縮応力 ひずみ曲線に現れた(図 3-15)。プラトー応力はマイクロポーラスアルミニウムで約 1.2 MPa、アルポラスで約 1.7 MPa であった。マイクロポーラスアルミニウムのプラトー領域における流動応力はなめらかに変化しているのに対し、アルポラスのそれは不規則に変動した。これはマイクロポーラスアルミニウムの試料内でのポア構造すなわち強度の分布が一様であることに起因すると推察される。

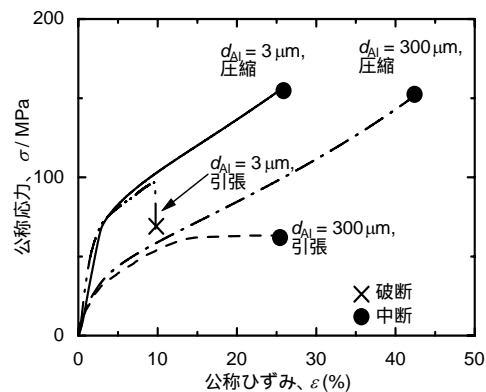


図 3-13 異なる平均粒径のアルミニウム微粉末から作製した緻密アルミニウムの引張及び圧縮応力 ひずみ曲線

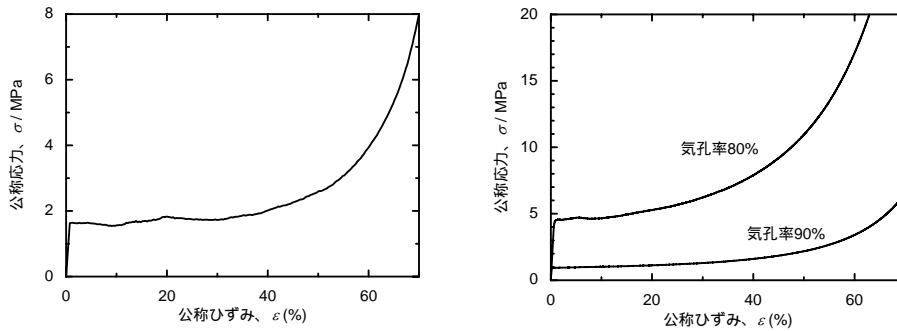


図 3-15 (a) アルポラス、(b) スペーサー法で作製したマイクロポーラスアルミニウムの圧縮応力 ひずみ曲線

圧縮変形中の試料を観察した結果、マイクロポーラスアルミニウムに関しては、圧縮方向にほぼ垂直に並んだセルが変形する局所変形帯が現れたが、局所変形帯以外のセルも部分的に変形していた。一方、アルポラスでは明瞭な局所変形帯が形成され、それ以外のセルはほとんど変形していないことがわかった。この違いもマイクロポーラスアルミニウムの試料内でのポア構造がアルポラスのそれより均一であることに由来すると考えられ、これより、ポア構造の均一性と局所変形帯の有無、プラトー領域内の流動応力の間には密接な関係があることが推察される。

以上の結果、スペーサー法により作製したマイクロポーラスアルミニウムは従来のポーラス金属に比べポア構造がより精緻に制御され、その結果、安定した単純圧縮特性を有することがわかった。

3.3.5 圧縮疲労特性評価

実用上重要となる疲労特性を評価するため、スペーサー法により上記の最適条件にて作製したマイクロポーラスアルミニウム、及びアルポラスに対して圧縮 圧縮疲労試験を行った。なお、実験に供した試験片の形状は、直径 20 mm、高さ 20 mm である。

試験に供した試料は 3.3.4 で述べた試料と同様の試料である。圧縮 圧縮疲労試験は室温下、周波数 15-20 Hz、応力比(=最大圧縮応力/最小圧縮応力)0.1 の正弦波荷重で、最大 10^7 回まで繰り返し载荷を行った。また、载荷中の平均変位を連続的に計測した。

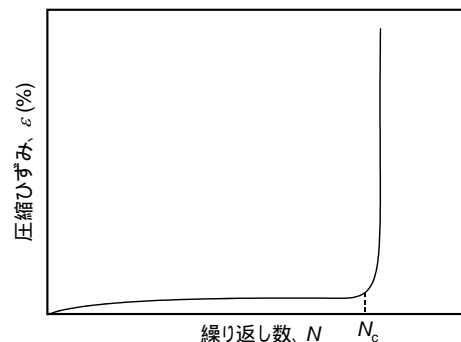


図 3-16 これまでに報告されているポーラス金属の繰り返し载荷における圧縮ひずみ 繰り返し数曲線の模式図

図 3-16 にこれまでに報告されているポーラス金属の圧縮ひずみ 繰り返し数の模式図を示す⁵⁾。圧縮ひずみは一定の繰り返し数 N_c までほとんど一定で変化せず、 N_c を超えると急激に増加する(ひずみジャンプ)。ひずみジャンプは多くの場合局所変形帯の発現を伴い、最大圧縮応力が大きいほど N_c は小さくなる。

アルポラスを圧縮 圧縮疲労試験に供した結果、いずれの最大圧縮応力においても明らかなひずみジャンプが確認され、また、最大圧縮応力が大きいほどひずみジャンプが起きる繰り返し数 N_c は小さかった(図 3-17)。それに対し、スパーサー法で作製したマイクロポーラスアルミニウムを圧縮 圧縮疲労試験に供した結果、80%、90%いずれの気孔率においても、またいずれの最大圧縮応力においても、圧縮ひずみは繰り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 3-18)。これはスパーサー法によりマイクロポーラスアルミニウムのポア構造がより均一に制御されたためであると考えられる。

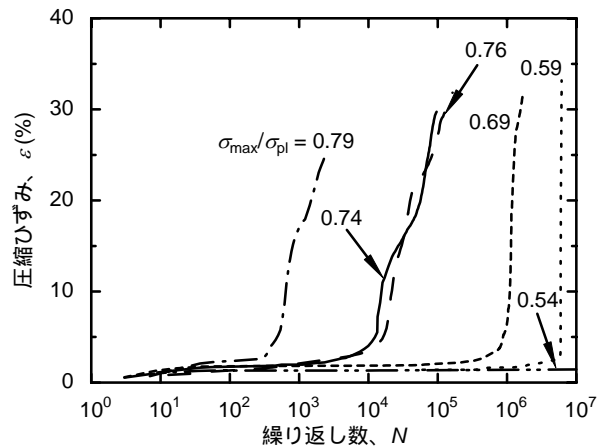


図 3-17 アルポラスの圧縮ひずみ 繰り返し数曲線

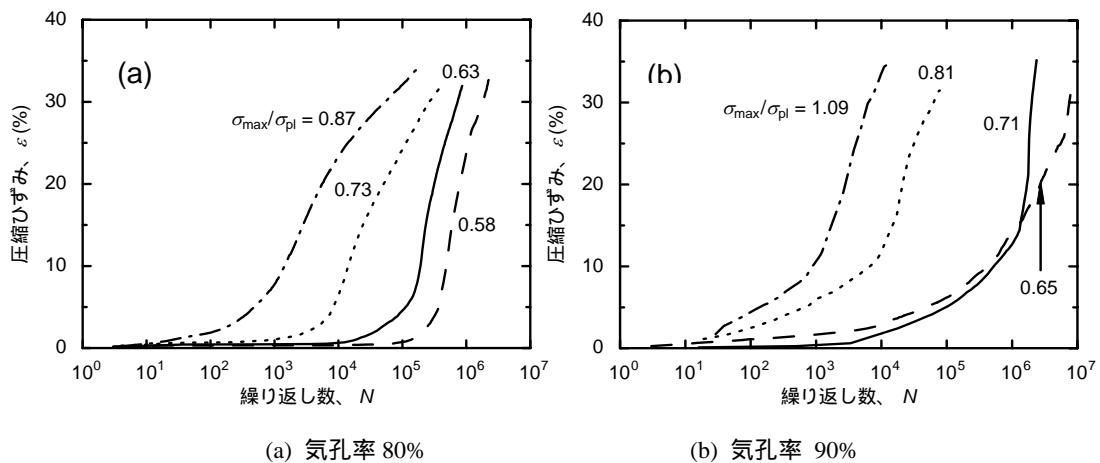
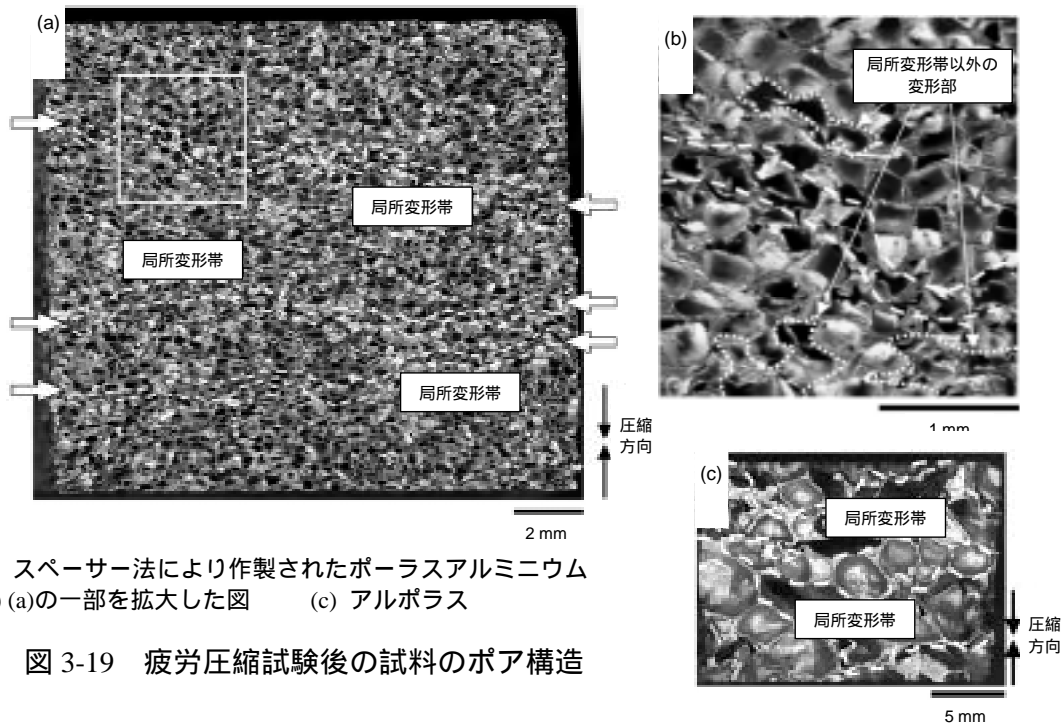


図 3-18 スパーサー法で作製したマイクロポーラスアルミニウムの圧縮ひずみ 繰り返し数曲線

繰り返し圧縮変形中の試料を観察した結果(図 3-19)、単純圧縮試験と同様に、マイクロポーラスアルミニウムに関しては、圧縮方向にほぼ垂直にセルの局所変形帯が現れたが、局所変形帯以外のセルも部分的に変形していた。一方、アルポラスでは明瞭な局所変形帯が形成され、それ以外のセルはほとんど変形していないことがわかった。これもマイクロポーラスアルミニウムの試料内でのポア構造がアルポラスのそれより均一で

あることに由来すると考えられる。また、より大きな試料寸法のアルポラスを圧縮 圧縮疲労試験に供した場合においてもひずみジャンプが発生した(図 3-20)。ポア径に比べ試料寸法が十分に大きいアルポラスにおいてもひずみジャンプが発生したことから、ポア構造の均一性は圧縮 圧縮疲労载荷における変形挙動に多大な影響を及ぼすものと考えられる。すなわち、ポア構造の均一性と局所変形帯の有無、ひずみジャンプの発生



(a) スペース法により作製されたポーラスアルミニウム
(b) (a)の一部を拡大した図 (c) アルポラス

図 3-19 疲労圧縮試験後の試料のポア構造

の間には密接な関係があることが推察される。

なお、スペース法で作製したマイクロポーラスアルミニウム及びアルポラスの $S-N$ 曲線は、気孔率や試料種によらずおおむね同一の傾向を示し、通常の方法と同様、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 3-21)。

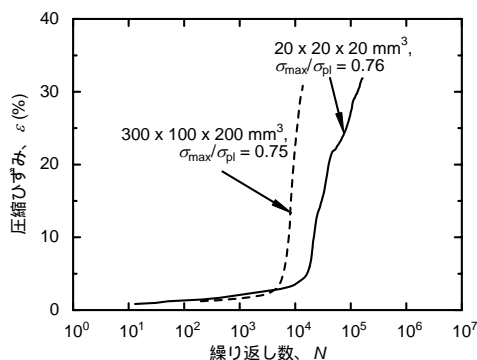


図 3-20 サイズの異なるアルポラスの圧縮ひずみ 繰返し数曲線

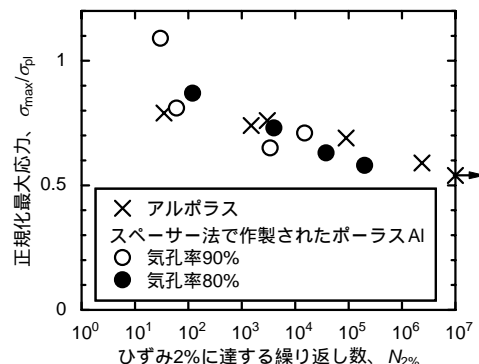
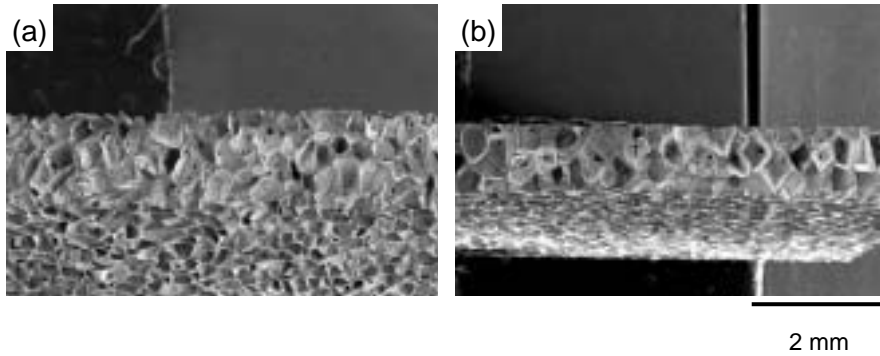


図 3-21 ポーラスアルミニウムの $S-N$ 曲線

以上の結果、スペース法により作製したマイクロポーラスアルミニウムは従来のポーラス金属に比べポア構造がより精緻に制御され、その結果、従来のポーラス金属にみられた繰返し圧縮载荷中のひずみジャンプが解消されることがわかった。

3.3.6 厚さ 1 mm のマイクロポーラスアルミニウム薄板の作製

3.3.3 項で求めた最適プロセス条件を用いて、スペーサー法により厚さ 1 mm のマイクロポーラスアルミニウム薄板の作製に成功した。目標とする気孔率は 90% とし、目標ポア径(原料として用いるスペーサーの径)は、板厚の 1 mm より小さい 212-300 μm 及び 425-500 μm とした。図 3-22 にその写真を示す。図 3-2 同様、薄板内にスペーサーと同じ大きさのポアが一様に分散していることがわかる。また、目標気孔率である 90% が達成されていることも採寸・秤量により確認された。



気孔率は 90%、ポア径は(a) 212-300 μm 、(b) 425-500 μm

図 3-22 板厚 1 mm のマイクロポーラスアルミニウム薄板

3.3.7 まとめ

本研究において、以下のことが明らかとなった。

- (1) スペーサー法でマイクロポーラスアルミニウムを作製するには、放電プラズマ焼結において、焼結温度 843 K、焼結圧力 20 MPa、焼結時間 10 分が最適である。また、アルミニウム微粉末の粒径はスペーサーに比べ十分に細かいことが望ましい。
- (2) スペーサー法で作製されたマイクロポーラスアルミニウムはポア構造の均一性が高いことから、発泡鋳造法で作製された従来のポーラスアルミニウムと大きく異なる圧縮特性を有する。
- (3) スペーサー法を用いて、板厚 1 mm、ポア径数百 μm 、気孔率 90% のマイクロポーラスアルミニウム薄板を作製できる。

参考文献

- 1) Y. Y. Zhao and D. X. Sun, *Scr. Mater.* **44** (2001) 105.
- 2) C. E. Wen, M. Mabuchi, Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Chino, H. Hosokawa and T. Asahina, *J. Mater. Sci. Lett.* **22** (2003) 1407.
- 3) M. Omori, *Mater. Sci. Eng. A287* (2000) 183.
- 4) L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd Ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge (1997).
- 5) A. M. Harte, N. A. Fleck and M. F. Ashby, *Acta Mater.* **47** (1999) 2511.

3-4 ポーラス金属の利用技術開発テーマの抽出

3-1 から 3-3 までの調査に基づき、ポーラス金属の機械部品等への適用に伴い予想される問題点を整理し、利用技術に係る今後の開発課題を以下の通りととりまとめた。

開発課題	開発の目的	開発内容	想定開発期間	期待効果
ポーラス金属の自動車用軽量パネル(ボンネットフード)への利用技術	軽量化(燃費向上)と衝突安全性の両立が必要な自動車用軽量パネルに最適なサンドイッチパネル材の開発	ポーラス金属のサンドイッチパネル材の静的曲げ試験による基礎特性調査、自動車用軽量パネルの目標設定、製造技術の開発(試験体製作)、パネルの性能評価	少なくとも2年間	自動車用パネルの軽量化と衝突安全性向上、制振効果、吸音効果。・最適なポーラス金属のサンドイッチパネル材の選定とその性能、さらに適用した際の特徴を提示することができる。
高効率ヒートシンクの開発	電子デバイスの低消費電力化の中で高い発熱密度に対応可能な高効率なヒートシンクの開発。	熱伝導率だけでなく、比重等も考慮した最適素材の追求。熱伝達係数が最大となる最適ポーラス形状の追求。	3年間	ヒートシンクの高効率化・小型化・軽量化
熱交換(取鍋用蓄熱式バーナ)	近年、セラミックスハニカム蓄熱体を用いた蓄熱式バーナが適用されているが、熱衝撃性の低さや熱伝導度の低さによる局部加熱が問題となっており、この蓄熱体を高融点金属ポーラス金属への代替の可能性を探る。	<ul style="list-style-type: none"> ・Ni基超合金等の1000℃での操業に耐えることのできる高融点金属によるポーラス金属の開発。 ・高融点ポーラス金属の高熱容量化(複合化等)。 ・蓄熱体の熱回収能力の最大化とコンパクト化を両立するための最適ポーラス構造設計。 	5年間	蓄熱体の高寿命化
テイラーメイド人工骨の開発	男性と女性、若者と老人など一人一人自家骨の構造は異なる。人それぞれに合った人工骨、すなわち“テイラーメイド人工骨”の創製を目的に行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・人工骨に適したポア径に制御可能なプロセス技術 ・人工骨にかかる荷重に適した骨構造とするため、ポーラス材特有の応力解析技術、最適な骨構造設計技術 ・人工骨に適した機械的性質を有し、最適骨構造設計に対応したポーラス傾斜材料の製造プロセス、加工技術 	5～10年間	既存の人工骨は自家骨(ポーラス)と異なり緻密材で以下の問題点を有するが、これを解決可能。 <ul style="list-style-type: none"> ・人体との結合のため骨セメントが必要 ・自家骨より弾性率が高いため周りの筋肉が弱体化 ・自家骨に比べ重いことによる患者の生活への支障

開発課題	開発の目的	開発内容	想定開発期間	期待効果
福祉・介護機器に適した軽量構造材料の開発	軽快な動きと安全性が必要な車椅子、訓練機器、介護機器等の構造材料として、軽量・高剛性・高安全性を併せ持つ金属材料の開発と、その加工プロセスの開発	<ul style="list-style-type: none"> 緻密中空材にポーラス金属を充填した複合構造部材、又は薄板金属の間にポーラス金属を挟んだ複合構造薄板の開発 表面は緻密金属で内部が気孔率や気孔サイズが傾斜的に変化するポーラス金属の開発 ポーラス金属の三次元形状成形技術及び加工技術（塑性加工、機械加工、接合）の開発 	3～5年間	軽量化とともに剛性向上と衝撃吸収性向上が期待され、各種福祉機器の駆動性能や安全性能の大幅な向上が期待できる。福祉・介護機器は、他の工業機器に比べてコスト対性能の指数が多少高くても普及の可能性が大きく、今後の高齢化社会の進展により需要増が見込まれる。
DPF へのポーラス金属の応用	ディーゼル排気ガス問題への対応策として、DPF の実用化と高性能化が急務。高価で通気性能も構造から限界がある現在のセラミックス系 DPF に代わる低価格、高性能な DPF の開発を目指す。	<ul style="list-style-type: none"> 大きな振動を連続して受ける環境での信頼性が、従来のセラミックスフィルターに比し高いフィルター触媒担体 通過差圧が小さいなど最適なフィルター構造 捕集された PM の再燃条件とその温度上昇など、フィルター再生条件の検討 	5年間	従来のセラミックス製 DPF は、製造プロセスが複雑、強度等の信頼性が不十分、高価であった。金属製フィルターによって、十分な強度を保ちつつ、軽量化を、コンパクトな設計が可能となる。大型のみならず小型のディーゼルエンジンにも適す。
発泡ビーズと砂を用いたポーラス金属の製造法の開発	発泡ビーズの間隙に砂を充填した鋳型に、溶湯を注湯して発泡ビーズを消失させることによってポーラス金属を製造する。	<ul style="list-style-type: none"> 最適な発泡ビーズ材質、直径などの選定 ビーズ径を変化させて傾斜開口率とする方法 充填材である砂の充填方法、硬化方法 製造されたポーラス金属の品質検査方法 	2年間	<ul style="list-style-type: none"> 金型材質としては、鉄系、非鉄系とも比較的安価 金型の局部的使用も可能 開気孔でエア冷却や水冷却が可能となり、生産性向上、材料強度向上 通気性ありの金型となり、鋳物品質が向上
ショット玉をスパークプラズマ融着させるポーラス金属の製造法の開発	ショット玉を容器又は鋳型に充填し、スパークプラズマを連続的に発生させることによって、ショット玉の接点を融着させてポーラス金属を製造する。	<ul style="list-style-type: none"> 最適なショット玉径と異径サイズの混合割合 ショット径を変化させて傾斜開口率とする方法 ショット玉接点の抵抗値の制御 接点を連続的に融着させるためのパルス電圧の付加方法 製造されたポーラス金属の品質検査方法 	2年間	<ul style="list-style-type: none"> 金型材質としては、鉄系、非鉄系とも比較的安価 金型の局部的使用も可能 ある程度の大きさの金型は一体製造が可能 通気性ありの金型となり、鋳物品質が向上 開気孔でエア冷却や水冷却が可能となり、生産性向上、材料強度向上

4 調査研究の今後の課題及び展開

近年、製造技術の研究開発が活発に展開されているポーラス金属の利用拡大に向けての課題の抽出を目的に、各種ポーラス金属の製造技術動向、ポーラス金属の特性と利用可能性、成形加工プロセスについて調査研究を行った。

製造技術の動向について、日本国内においても、様々な気孔形態や気孔サイズのポーラス金属に対応した製造技術の開発が展開されている。それらは、液相プロセスから固相プロセスまで様々であるが、その多くは開発段階の技術であり、具体的な工業製品への利用例はまだ少ないのが現状である。従って、今後の工業利用に際しては、個別の製品展開に応じた高度な製造技術の進展が必要となる。一方、ポーラス金属の利用可能性については、その機械的、物理的、熱的、電気的な様々な機能を生かして超軽量材料、高比剛性材料、衝撃吸収材料、振動吸収材料、防音材料、断熱材料、フィルター材料、生体医療材料、熱交換器材料など、極めて広い用途展開の可能性が考えられる。調査研究では、個別の想定製品について、必要とされる機能やポーラス性状、考えられる製造方法、実用化のために必要となる開発要素技術などの抽出整理を行った。さらに、開発が比較的遅れているポーラス金属薄板材料の製造可能性を検討するために、粉末冶金法を応用して気孔径数百 μm のマイクロポーラスアルミニウムの製造技術を開発し、ポーラスアルミニウム合金薄板の製造可能性とその機械的特性を明らかにすることができた。

以上の調査結果を基に、今後のポーラス金属の利用技術開発テーマとして6件のテーマを提案した。それは、自動車用部品、福祉・介護機器、成形金型など構造用部材としての利用と、熱交換器、フィルター、生体材料など機能性部材としての利用に分類される。いずれの利用技術テーマにも今後の展開において様々な課題が考えられるが、製造技術に関する直接的な開発課題とは別に、それ以前に、想定する対象製品にポーラス金属を利用する必然性を明確にすることが重要な課題である。ポーラス金属と同様の機能・特徴を有する材料にはポーラスセラミックや樹脂系ポーラス材料があり、いずれもポーラス金属よりも研究開発及び用途展開が進んでいるように思われる。今回提案した開発テーマの一部は、既にこれらのポーラス材料によって製品化されているものもあり、これら競合材料との比較の中で、ポーラス金属である必然性を明確にした上で利用技術開発が展開されるべきである。

自動車用部材や各種熱交換器への適用はポーラス金属の利用展開の大きな可能性であり、特に板状ポーラス金属の製造技術とその3次元形状への成形技術の開発は、その可能性を左右する大きな鍵になるものと予想される。さらに、その技術は各種産業機械や福祉・介護機器、電子機器への用途展開の可能性も秘めており、大きな開発テーマの一つと期待される。

今後は、ポーラス金属の実用化を図るためポーラス金属の材料製造技術、自動車等への適用技術の確立に向けて、NEDO等の公的助成制度の活用も視野に入れつつ、プロジェクト化を目指すこととなろう。また、これと併行して、ポーラス金属の早期活用戦略を有する企業については、先行的に開発を進めることが想定される。

禁無断転載

システム技術開発調査研究 17 - R - 4

ポラス金属の利用技術の可能性に関する
調査研究報告書
(要 旨)

平成18年3月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
TEL 03-3454-1311

委託先 財団法人 素形材センター
東京都港区芝公園三丁目5番8号
TEL 03-3434-3907