



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

微細孔ポーラス金属とメッキ接合の研究

Research on Micro/nanoporous Metals and Electrodeposition Joining

袴田昌高

Masataka Hakamada

京都大学大学院
エネルギー科学研究科
准教授

筆者はこれまで、金属材料分野では比較的日の浅い「ポーラス金属」を主に研究し、最近では電気メッキ（電析）をひとひねりした新しい技術である「メッキ接合」の研究も行っている。どちらも金属材料分野・鉄鋼分野の研究開発の本流からは遠い内容であり、未熟な段階を含んではいるが、その分、広い分野を横断する機会に恵まれたと考えている。その帰結のひとつとして今回この「躍動」欄に執筆機会をいただけたことに感謝しつつ、これまでの研究内容を概説させていただく。

1 スペーサ法による微細孔ポーラス金属の創製と特性評価

鑄造発泡法等をベースとして製造される市販のポーラス金属は、部分的には衝撃吸収部材・吸音材などの構造用素材として利用されているが、ミリメートルオーダーの粗大・不均一な孔径を有し（図1 (a)）、材料の各種特性およびその信頼性

には向上の余地が残されている。筆者らはこのポーラス金属の孔径を微細・均一化することにより、表面効果の増加、あるいはそれにとどまらない、ポーラス金属ならではの科学的知見を開拓・開発してきた。

金属粉末をマイクロメートルオーダーの大きさのスペーサ粒子と混合して焼結し、スペーサを除去することで、スペーサ粒子の形状を気孔として残し、マイクロメートルオーダーの孔径を均一に持つ微細孔ポーラス金属を作製した（図1 (b)）^{1,2)}。この微細孔ポーラス金属は市販のポーラス金属に比べ変形のバラつきが抑えられ、信頼性の高い素材であることを、単純圧縮／高温圧縮／圧縮 - 圧縮疲労試験により明らかにした³⁻⁵⁾。また、流体透過性や吸音特性などの機能特性も調査し⁶⁻⁸⁾、特に吸音特性については、孔径・気孔率への依存性が理論モデルと良く一致し、条件によって吸音率ほぼ1を示すポーラス金属の製法や吸音メカニズムを実証できた（図2）^{7,8)}。

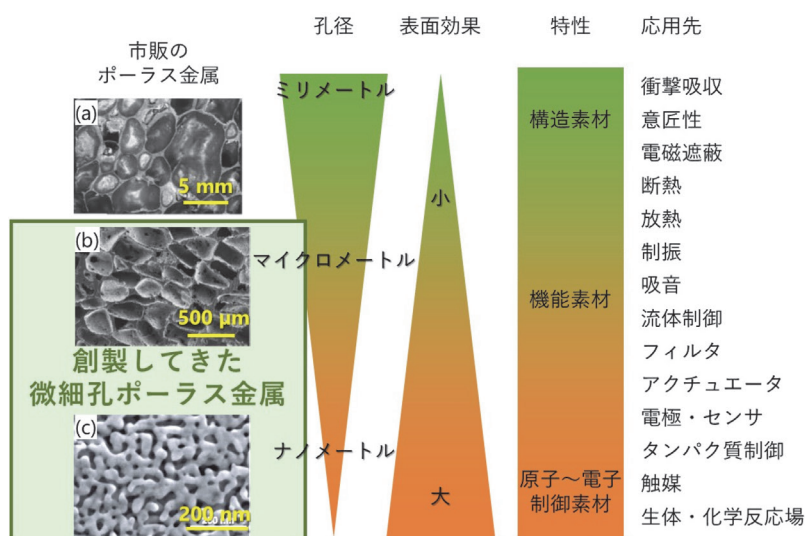


図1 著者らが開発した微細孔ポーラス金属と想定される応用先 (Online version in color.)

2 脱合金化法による ナノポーラス金属の創製と特性評価

前節で述べたスぺーサ法でもサブミクロンオーダーまで孔径を小さくできることが知られているが、それ以下にまで孔径を小さくすると、別の手法を採る必要がある。筆者らは、二元系合金から片方の成分を酸等で溶解除去し、ナノメートルオーダーの超微細孔を均一に有する「ナノポーラス金属」を作製し、その特性評価を行ってきた(図1(c))。作製条件のよく知られている金に加えて、筆者らは白金⁹⁾・パラジウム¹⁰⁻¹²⁾・ルテニウム¹³⁾といった貴金属、またニッケル等¹⁴⁾のより安価な金属についてもナノポーラス化の条件を明らかにしている。

特性評価の面では、ナノメートルオーダーにまで孔径が微細化されると転位の活動が抑えられる結果、機械的強度が飛躍的に向上し、ナノポーラス金属を構成するリガメント

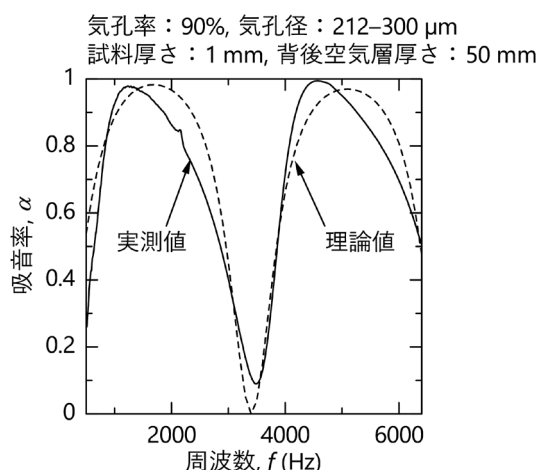
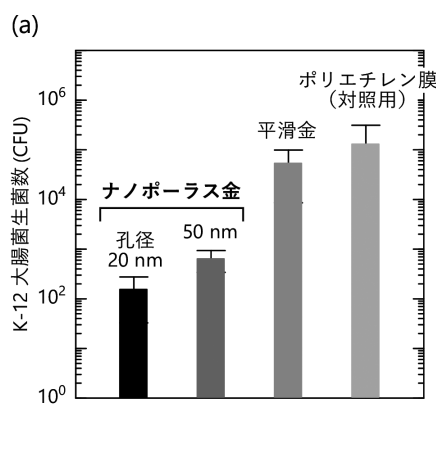


図2 スぺーサ法で作製したポーラスアルミニウムの吸音特性(ヘルムホルツ共鳴による吸音を考慮した理論値と実測値の傾向がほぼ一致している)



(柱)が理想強度のオーダーまで強化されうることを明らかにした¹⁵⁾。また、リガメント表面に結晶格子の大きなひずみがあり、それによってナノポーラス金属の物性(水素吸蔵特性・磁性・触媒特性等)が通常のパルク金属と大きく異なることをつきとめた¹⁶⁻²¹⁾。さらに、この表面格子ひずみが原因で、ナノポーラス金が従来の金属材料と全く異なるメカニズムの抗菌特性・細胞接着特性を示すことを明らかにしつつある(図3)²²⁻²⁵⁾。ナノポーラス化によって単純に表面積が増加した、というだけでなく、ナノメートルオーダーの凹凸に起因して表面の性質(格子ひずみ等)そのものが変わる点が興味深いと考えている。

3 メッキ接合

金属同士の接合、あるいは樹脂・セラミックスなどの素材も含めた異材接合は、これまで数多くの研究開発がなされてきており、製造分野、輸送機器等で提唱されるマルチマテリアル化において重要である。著者らは素材間にメッキを析出して接着剤の役割をさせる「メッキ接合」を検討している(図4)。特に、被接合材であるアルミニウムへの陽極酸化処理、また炭素繊維強化樹脂へのエッチング・スルホン化処理等により、メッキの密着性を上げ、条件は限定的ながら高い接合強度を得ることに成功しており^{24,25)}、継続して改良を試みている段階である。

以上に述べたように、筆者は材料創製から特性評価に至るまで種々の実験や測定を行ってきた。この過程で、金属学をベースとしながら、材料力学・流体力学・物理化学・電気化学・生物学など多分野の知見に触れ、モノづくりだけ、評価だけ、ではなく、その両者を全方位的に担当し、新素材・技術の研究を進めている。その縁で鉄鋼協会でも創形創質工学部会の若手交流フォーラムに参加させていただいており、そこで製

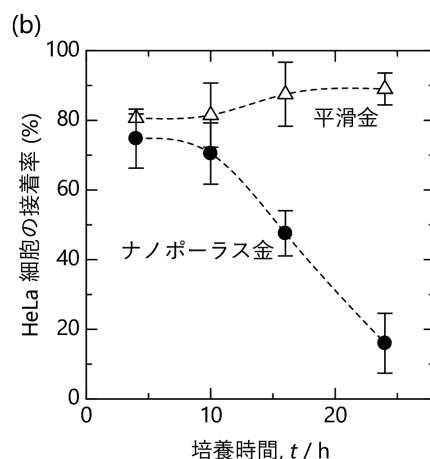


図3 ナノポーラス金基板が(a)大腸菌生菌数および(b)HeLa細胞の接着率に及ぼす影響

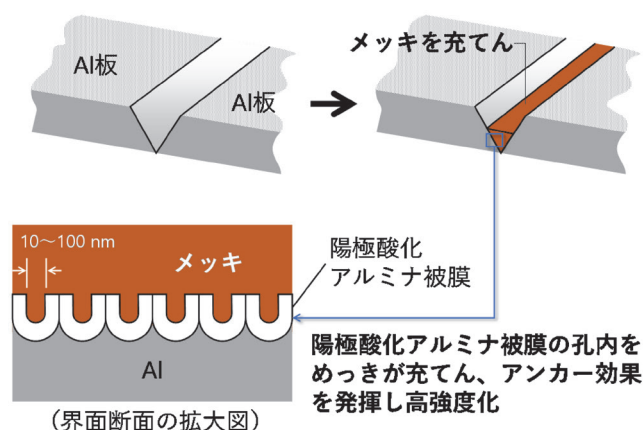


図4 アルミニウム板のメッキ接合の模式図
(Online version in color.)

造の現場に近い、また幅広い技術者の方々と交流させていただいている。このことは、鉄鋼分野・鉄鋼業界そのものが、上流から下流までを含めて幅広い学術・技術分野の集大成であるということと決して無縁ではないように感じている。

ただ最初に述べたように、それぞれの分野の本流からは離れているのも事実であり、深い掘り下げができていないのでは、という実感も持っている。特に最後に述べた、いちばん新しいテーマであるメッキ接合の研究は、何をどうすればよいのか行き当たりばったりの状態でスタートし、今もそのような状況ではある。幸い、研究室主宰の馬淵守教授の巧みな運営のおかげもあり、優秀な大学院生・学部生とともに研究を進めて来られている。今後も試行錯誤を繰り返すことと考えているが、本稿を読んでいただいた方に、何か言ってやりたいなどのご意見も含め、学会活動を通じてご指導・ご支援いただければ幸いである。

参考文献

- 1) M. Hakamada, Y. Yamada, T. Nomura, H. Kusuda, Y. Chen and M. Mabuchi : Mater. Trans., 46 (2005), 186.
- 2) M. Hakamada, Y. Yamada, T. Nomura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi : Mater. Trans., 46 (2005), 2624.
- 3) 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.
- 4) M. Hakamada, T. Kuromura, Y. Chino, Y. Yamada, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi : Mater. Sci. Eng. A, 459 (2007), 286.
- 5) M. Hakamada, Y. Asao, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi : Acta Mater., 55 (2007), 2291.
- 6) M. Hakamada, T. Wajima, Y. Ikegami, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi : Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, 45 (2006), L575.
- 7) M. Hakamada, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi : Appl. Phys. Lett., 88 (2006), 254106.
- 8) M. Hakamada, T. Kuromura, Y. Chen, H. Kusuda and M. Mabuchi : J. Appl. Phys., 100 (2006), 114908.
- 9) 袴田昌高, 千野靖正, 馬淵守: 日本金属学会誌, 75 (2011), 42.
- 10) M. Hakamada and M. Mabuchi : Mater. Trans., 50 (2009), 431.
- 11) M. Hakamada and M. Mabuchi : J. Alloy. Compd., 479 (2009), 326.
- 12) M. Hakamada, K. Tajima, K. Yoshimura, Y. Chino and M. Mabuchi : J. Alloy. Compd., 494 (2010), 309.
- 13) M. Hakamada, J. Motomura, F. Hirashima and M. Mabuchi : Mater. Trans., 53 (2012), 524.
- 14) M. Hakamada and M. Mabuchi : J. Alloy. Compd., 485 (2009), 583.
- 15) M. Hakamada and M. Mabuchi : Scr. Mater., 56 (2007), 1003.
- 16) M. Hakamada, H. Nakano, T. Furukawa, M. Takahashi and M. Mabuchi : J. Phys. Chem. C, 114 (2010), 868.
- 17) M. Hakamada, M. Takahashi, T. Furukawa and M. Mabuchi : Appl. Phys. Lett., 94 (2009), 153105.
- 18) M. Hakamada, M. Takahashi, T. Furukawa and M. Mabuchi : Philos. Mag., 90 (2010) 1915.
- 19) M. Hakamada, F. Hirashima and M. Mabuchi : Catal. Sci. Technol., 2 (2012), 1814.
- 20) M. Hakamada, Y. Sato and M. Mabuchi : MRS Commun., 9 (2019), 292.
- 21) N. Miyazawa, M. Hakamada, Y. Sato and M. Mabuchi : J. Mater. Res., 34 (2019), 2086.
- 22) M. Hakamada, S. Taniguchi and M. Mabuchi : J. Mater. Res., 32 (2017), 1787.
- 23) N. Miyazawa, M. Hakamada and M. Mabuchi : Sci. Rep., 8 (2018), 3870.
- 24) S. Deguchi, M. Hakamada, J. Shingu, S. Sakakibara, H. Sugiyama and M. Mabuchi : Materialia, 7 (2019), 100370.
- 25) S. Deguchi, R. Yokoyama, T. Maki, K. Tomita, R. Osugi, M. Hakamada and M. Mabuchi : Mater. Sci. Eng. C, 119 (2021), 111461.

(2022年9月16日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 研究グループ長

千野 靖正

袴田先生は博士後期課程の時より、馬淵守先生の指導のもとでポーラス金属の研究を開始し、特に、ナノポーラス金属の特異な表面特性の解明に、一貫して情熱を注いでいる新進気鋭の研究者です。私と袴田先生の付き合いは古く、先生が学生時代の時にポーラス金属の製造をお手伝いしたことから始まり、先生が産総研に在籍していた時には、同じグループ員としてマグネシウムに関する研究に従事しました。

先生の研究姿勢は「躍動」に記載の通り、ナノポーラス金属の製造技術を軸として、様々な金属を対象として、様々な機能を追求するという、全方位型で研究を進めることが大きな特徴です。記事には触れていませんが、ナノポーラス金属の凹凸構造が誘起する触媒・抗菌作用を、第一原理計算を活用して理論的に究明する姿勢も、忘れてはいけない特徴です。近年、メッキ接合の研究を開始されていますが、これも、アルマイト表面のポーラス構造をメッキ接合に活かしており、ポーラス金属の研究と言って過言ではありません。

マグネシウムを専門とする私としては、先生の産総研時代のマグネシウムに関する成果も紹介しない訳には行けません。先生は、NEDO「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」(2006～2010)に従事し、従来、 casting用途に限定されていた、高い難燃性を示すMg-Al-Ca-(RE)合金を、展伸材(鍛造材)として利用するための研究に従

事しました。そこでは、鍛造時の組織形成と鍛造後の材料特性に関する基礎的な知見を数多く創出しました。特に、溶体化処理に伴いMg-Al-Ca-(RE)合金の鍛造成形性が改善する理由を、溶質濃度の均質化(局所的な積層欠陥エネルギーの増減の抑制)と結びつけて整理した知見は、現在も実装業で活用されていると認識しています。

この様に、先生は20代から40代前半にかけて数多くの業績を創出しました。今後の40代後半以降は、得られた知見を軸として、是非、多様な研究者・技術者が集まるプロジェクトやフォーラムを積極的に構築して頂きたいです。自身の経験としまして、40代にNEDOプロジェクト(革新的新構造材料等研究開発)に関わらせて頂き、個人では到達できない高みを、プロジェクト参加者と一緒に見る事ができました。目指す方向は、ナノポーラス金属の実用化、学理の追求のどちらでも良いと思います。先生を魅了するナノポーラス金属をベースとして、数多くの人を巻き込む形で、さらなる高みを目指してください。

「創形創質工学部会」は、鉄鋼にまつわる多種多様なプロセスの研究者が集う、他では見ることができない部会と聞いています。研究体を形成するには絶好の場所かもしれません。部会メンバーとの積極的な交流を通じて、ナノポーラス金属を軸とした大きな展開を期待したいです。今後の益々のご活躍をお祈りしています。

日本製鉄(株) 先端技術研究所 環境基盤研究部 上席主幹研究員

上代 洋

科学の研究、と言っても、一つの現象を深く掘り下げていくものもあれば、実用に必要な様々な要素を取り入れて研究を総合化、広域化していく場合もある。大学か企業か、企業でも基礎部門か応用部門か、あるいは若い研究者か経験を積んだシニア層かでも研究スタイルは大きく変化する。むりやり分類すれば、大学の若手は深堀り、企業のシニア研究者は総合的な研究が好ましい、とでもなろうか。しかし、現代にあっては、ただひたすら原理を追い求める基礎研究のみに専従するのも困難があるし、応用研究であっても基礎を軽視しては発展がない。結局、どの立場の研究者でも自分の研究を高める上で、基礎と応用の両方のバランスをとることを要求されるが、実際にはそう簡単な話ではない。また、元来多孔体は、触媒や吸音材、ガス吸着・分離材料のような産業応用に重要な材料であるとともに、材料の表面、界面の基礎的な学問分野でもあるが、基礎から応用まで、あるいは多様な材料分野を横断的に一人の研究者がカバーする例は多くない。その意味において、袴田先生のご研究は、その守備範囲の広さに感心させられる。先生ご自身の言葉を拝借すれば、「金属学をベースとしながら、材料力学・流体力学・物理化学・電気化学・生物学など多分

野の知見に触れ、モノづくりだけ、評価だけ、ではなく」、結果、文字通り、「全方位的に担当し、新素材・技術の研究を進めている」ということになる。このことについて、ご自身は「それぞれの分野の本流からは離れているのも事実であり、深い掘り下げができていない」と謙遜なさっているが、過去のご研究をみると、額面通りでないことは明らかである。すなわち、単なる種々の材料創出と物性測定でとどまらずに、ナノポーラス金属の機械強度が向上する原理や、金属表面の格子ひずみが水素貯蔵や磁性等の各種物性に影響していることを明らかにされるなど、基礎をきちんと踏まえたうえで、さらにその物性を、抗菌特性・細胞接着特性という、およそ水素貯蔵等のいわゆる金属材料に期待される物性からかけ離れた現象にまで発展させておられることには驚かされる。

こうした袴田先生の幅広い領域でのご活躍からは、多孔体をキーワードに、現象から材料まで、先生ご自身が楽しんで研究に取り組まれていることが伺われる。また、先生の研究室には若い学生さんも多く、そうした先生の研究姿勢に薫陶を受け、視野の広い若手研究者が育つことも期待される。先生ご自身のご研究についても、今後ますますのご発展をお祈り申し上げたい。