

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 3 月 6 日現在

機関番号：83401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249107

研究課題名(和文) 磁場中凝固による高アスペクト比・規則化ロータスメタルの製法開発と機能材料への応用

研究課題名(英文) Fabrication of ordered lotus metals with high aspect ratio due to high magnetic field and its application to functional materials

研究代表者

中嶋 英雄 (Nakajima, Hideo)

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター・ 所長

研究者番号：30134042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,500,000円

研究成果の概要(和文)：金属の熔融状態と凝固状態の水素の溶解度差を利用して一方向凝固によって気孔が一方向に揃ったロータス(レンコン)型ポーラス金属を作製することができる。固相から吐き出された水素が固液界面で濃化して固相の気孔の形成源として供給されるならば、気孔の成長は持続して長い気孔が形成されるはずであるが、液相中では重力の影響を受けて対流が起こっているため濃化するはずの水素が対流によって液相中に広く拡散してしまい、凝固する固相内の気孔の成長に寄与しなくなってしまい、気孔が途切れてしまう。本研究では10テスラの強磁場を金属の溶解凝固過程に印加して融液の対流を抑制してアスペクト比の改善を図ることができた。

研究成果の概要(英文)：Lotus-type porous metals with directional pores can be fabricated by unidirectional solidification utilizing the solubility gap of hydrogen between solid and liquid. If hydrogen rejected in solidified metal at the solid/liquid interface is supplied into pores, the pores can continue to grow in the solidification direction without termination, resulting in forming long pores. However, owing to convection due to gravity, hydrogen diffuses away and does not contribute to the growth of pores. In the present work, high magnetic field as much as 10 Tesla was used to suppress such convection of the liquid and enhance the long-directional pores. The aspect ratio is defined as the ratio of length against the diameter of pore. The aspect ratio of the pores was improved by 10 Tesla magnetic field.

研究分野：材料工学

キーワード：ポーラス材料 一方向凝固 磁場 溶解凝固 多孔質金属 気孔 水素 マグネット

1. 研究開始当初の背景

我々は金属の溶融状態と凝固状態のガス原子の溶解度差を利用して、一方向凝固法によって軽量でかつ機械的性質に著しく優れたロータス型ポーラスメタル(ロータスは蓮根の意味、以下ロータスメタルという)を開発した。このロータスメタルは気孔が一方向に揃っているために、さまざまな物性が気孔の向きに依存して異方性を示すという興味深い結果が得られている。通常のポーラスメタルでは気孔は球状であるので、それらの物性には異方性が生じない。その意味で、ロータスメタルは特異な多孔質金属であると言える。しかしながら、気孔の向きや気孔サイズにバラつきがあるためにロータスメタルのより詳細な理解にはより完全度の高い気孔分布を有するロータスメタルの創製が必須である。また、ロータスメタルの貫通孔を利用した製品として実用化しようとする場合、図1(b)のように気孔が枝分かれしたり、気孔サイズが不均一であると、製品の性能にばらつきを生じ機能材料としての信頼性を損なってしまう。

ここで、円柱状気孔の直径に対する気孔長さの比をアスペクト比と定義する。高アスペクト比の直線気孔(図1(a))を有し、貫通気孔を利用したロータスメタルの有望な用途としては、電子デバイス用ヒートシンク、航空機ジェットエンジン用冷却パネル、流体ろ過用フィルターや静圧軸受などがある。これらの実現には現状のロータスメタルの仕様では無理で、気孔サイズが均一で気孔に直線性があり貫通気孔利用のための高いアスペクト比を有するロータスメタルの開発が要求される。これまでに作製されたロータスメタルは気孔が一方向に配向しているものの、気孔サイズにバラつきがあり高アスペクト比の細長い気孔の生成は困難であった。このような現状のロータスメタルでは、気孔が不均一であればフィ

ルターや静圧軸受としての機能を果たさないし、低アスペクト比の気孔では貫通気孔を有する体積分率(貫通気孔率)が低く、流体や空気の圧力損失が大きくなって冷却能力が不十分なヒートシンクや冷却パネルとなってしまう。

そこで、高アスペクト比の直線気孔を有し、高い貫通気孔率の気孔を有するロータスメタルの出現が望まれる。このような気孔を生成させるために、本研究では定常磁場を溶解凝固のプロセスで負荷する。1961年 W.Chester は磁場を液相に負荷した場合、ローレンツ力によって生じたエディーカレントが液体の対流を抑制することを理論的に明らかにした(J.Fluid.Mech., (1961)459.)。安田らは定常磁場の下で Al-In 合金を溶解して一方向凝固させると、一方向に揃った偏晶組織が生成することを実験的に見出し、組織制御に磁場が有効であることを明らかにした(H.Yasuda et al.: Mater. Lett., 58(2004)911-915.)。本研究では従来、行われてこなかった金属ガス(水素)系において定常磁場を負荷し、高アスペクト比を有する細長い、均一サイズの気孔を生成させたロータスメタルの創製を主な目的とし、それらを機能性材料に応用しようとするものである。

2. 研究の目的

金属の溶融状態と凝固状態の水素の溶解度差を利用して一方向凝固によって気孔が一方向に揃ったロータス(レンコン)型ポーラス金属を作製することができる。固相から吐き出された水素が固液界面で濃化して固相の気孔の形成源として供給されるならば、気孔の成長は持続して長い気孔が形成されるはずであるが、液相中では重力の影響を受けて対流が起こっている。その結果、濃化するはずの水素が対流によって液相中に広く拡散してしまい、凝固する固相内の気孔の成

長に寄与しなくなってしまう。本研究では 10 テスラの強磁場を金属の溶解凝固過程に印加して融液の対流を抑制し大きなアスペクト比を有するロータス金属を創製することを目的とした。

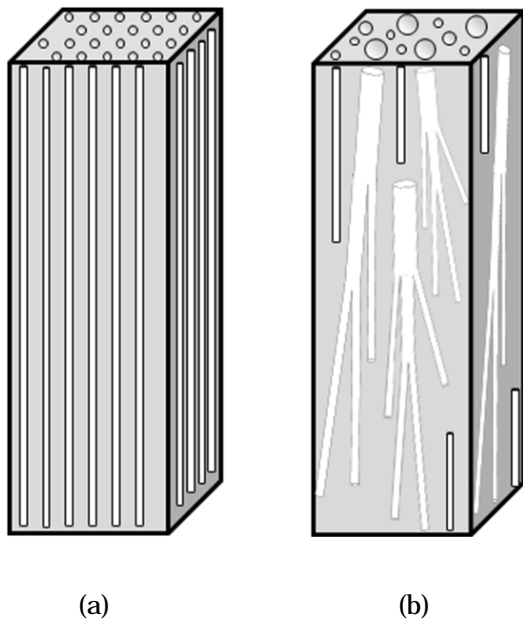


図 1 (a)磁場印加により期待される高アスペクト比を有するロータス金属, (b)無磁場で作製されたロータス金属 (気孔が癒着したり枝分かれしている)

3. 研究の方法

(1) 定常強磁場を印加できる連続鋳造装置の作製

本研究ではこの目的を達成するために、10 テスラの定常磁場を発生できる無冷媒型超電導マグネット JMTD-10T100 をジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社から購入した。超電導マグネット本体の他に、励磁用電源、冷凍機用コンプレッサー、クライオ排気装置、チラーなどを取り付けた。マグネットの中心部 $\pm 50\text{mm}$ の領域には、定常強磁場 $10\text{T} \pm 1\text{T}$ を発生することができる。この超電導マグネットの中心部の直径 100mm のボア内に高真空の排気が可能であり、耐圧 0.5MPa の高圧ガス

を負荷できるチェンバーを設置した。このチェンバー壁面はすべて水冷され、チェンバー内が 1200K に加熱されていてもチェンバー外壁は 323K 以下に保持できる。このチェンバー内には、ロータス金属を作製するための連続鋳造装置を作製した。この連続鋳造装置の加熱は白金抵抗加熱炉を採用した。加熱炉内部にはグラファイト坩堝を設置し、このグラファイト坩堝内で溶解された金属は冷却された鋳型を介して一方向凝固され、その凝固材はグラファイトダミーバーに固着されたのちチェンバー外部に直結したアクチュエーターにより坩堝の下方に連続的に引き出されるような駆動装置を取り付けた。チェンバー内の加圧雰囲気からチェンバー外の大気圧に移動するためのトランスファーロードはオムニシールにより高圧をリークさせることなく駆動することができた。作製された連続鋳造装

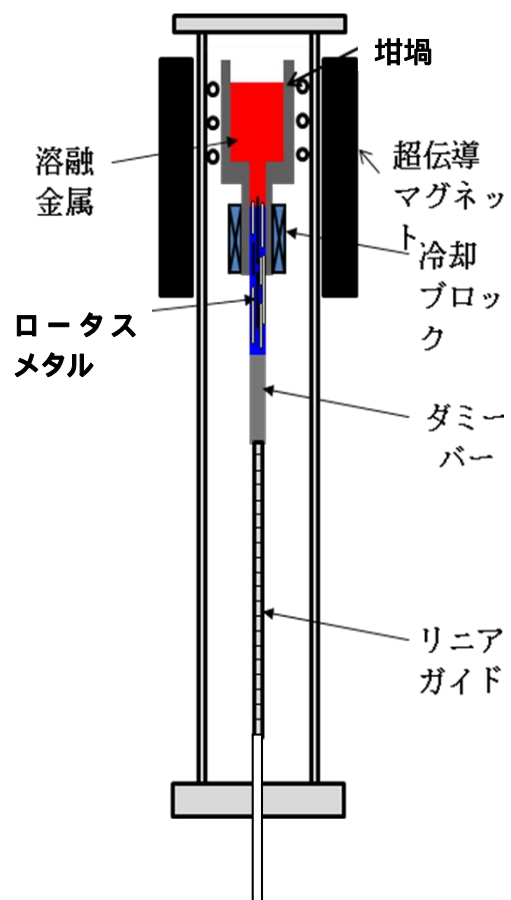


図 2 ロータス金属作製のための連続鋳造装置

置の概略図を図 2 に示した。

(2) 無磁場および定常強磁場 10T における連続鋳造法によるロータスマグネシウムの作製

グラファイト坩堝にマグネシウム（純度 99.9%）素材を挿入し、図 2 に示された連続鋳造装置を用いて無磁場および定常強磁場 10T におけるロータスマグネシウムの作製実験を行った。所定の加圧水素雰囲気下でマグネシウムを溶解し 600s の間、所定の温度にした後、アクチュエーターによりトランスファーロッドを所定の一定速度で下方に移動させることによって一方向凝固を行わせた。作製されたマグネシウム鋳塊ロッドはワイヤーカット放電加工機で切断後、断面観察を行った。また、X線 CT スキャナーにより鋳塊ロッド内の気孔形態を非破壊的に観察した。さらに、アルキメデス法によりロータスマグネシウムの密度を測定し気孔率を評価した。

4. 研究成果

チャンバー内の所定の水素雰囲気下でマグネシウムを溶解した際、溶融液面に全く揺動を与えず融液をアクチュエーターで下方に降下させて凝固させてロータスマグネシウムを作製した。このようにして作製されたロータスマグネシウムではその気孔サイズや気孔率の実験ごとのバラつきが大きくよい再現性が得られなかった。そこで、アクチュエーターによって上下移動操作を与え溶融金属液面に揺動を与えた後に、下方に降下させて凝固させてロータスマグネシウムを作製した。その結果、作製されたロータスマグネシウムの気孔サイズや気孔率は実験ごとのバラつきはなくなり良い再現性が得られた。液面に揺動を与えたことによって液面に形成されていた酸化膜が破壊され雰囲気から水素が液相に十分に供給されたためであると結論付けることができた。

このような改善を施した上で、10 テスラの強磁場を印加して一方向凝固を行わせて、口



図 3 作製されたロータスマグネシウム

ータスマグネシウムを作製した。図 3 には水素 0.2MPa とヘリウム 0.2MPa、溶解温度 750、アクチュエーター移動速度 0.33mm/s、10 テスラで作製されたロータスマグネシウムの断面写真を示した。気孔のアスペクト比の大きなロータスマグネシウムを作製することができた。今後、これらのロータスマグネシウムの気孔長さをより伸長させるための制御法の確立を目指すと共にその応用を検討していく計画である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

M.Tane, T.Mayama, A.Oda and H.Nakajima, Effect of Crystallographic Texture on Mechanical Properties in Porous Magnesium with Oriented Cylindrical Pores, Acta Materialia, **84**(2015),80-94,査読有

<http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2014.10.24>

中嶋英雄、井手拓哉、ロータス型ポーラスアルミニウムおよび合金の製法開発、アルトピア、**45**(2015),29-37. 査読有

藤本慎司、中嶋英雄、伏屋実、Kelly Alvarez、玄丞均、ロータス型ポーラスステンレス鋼の腐食挙動と生体適合性、材料と環境、**63**(2014),365-370、査読有

T.Ide, A.Tsunemi and H.Nakajima, Fabrication of Porous Copper with Directional Pores by Continuous Casting Technique through Thermal Decomposition of Hydride, Metallurgical and Materials

Transactions B, **45**(2014), 1418-1424. 査読有

F.Yang, M.Tane, J.P.Lin, Y.H.Song and H.Nakajima, Pore Formation and Compressive Deformation in Porous TiAl-Nb Alloys containing Directional Pores, Materials Design, **49** (2013), 755-760, 査読有

T.Ide, M.Tane and H.Nakajima, Effect of Solidification Condition and Alloy Composition on Formation and Shape of Pores in Directionally Solidified Ni-Al Alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, **44**(2013), 4257-4265, 査読有

M.Tane, F.Zhao, Y.H.Song and H.Nakajima, Formation Mechanism of a Plateau Stress Region during Dynamic Compression of Porous Iron: Interaction between Oriented Cylindrical Pores and Deformation Twins, Materials Science and Engineering A, **591**(2014), 150-158, 査読有

中嶋英雄、ポーラス金属の製法、金属、**84**(2014), 201-207, 査読有

井手拓哉、中嶋英雄、高い気孔率を有するロータス型ポーラスアルミニウムの作製、金属、**84**(2014), 208-212, 査読有

中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属の応用開発、金属、**84**(2014), 232-242, 査読有

鈴木進補、宇津宮裕、中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属のECAE加工と強化、金属、**84**(2014), 220-226, 査読有

村松憲志郎、John K.Eaton, 井手拓哉、中嶋英雄、金属、**84**(2014), 227-231, 査読有

〔学会発表〕(計13件)

池田輝之、児島孝文、川口裕美、井手拓哉、中嶋英雄、一方向に孔の揃った多孔質熱電材料の創製、日本熱電学会学術講演会、2015年9月7日~8日、九州大学筑紫地区総合研究棟

児島孝文、池田輝之、川口裕美、井手拓哉、中嶋英雄、一方向に伸びた孔をもつ多孔質熱電材料の創製、日本金属学会秋期講演大会、2015年9月16日~18日、九州大学伊都キャンパス

井手拓哉、中嶋英雄、ガス化合物熱分解法によるロータス型ポーラス銅の作製と気孔形態制御、日本銅学会講演大会、2015年11月2日~3日、大阪大学吹田キャンパス

中嶋英雄、松田進、谷口仁美、田島朋子、ポーラス銅の抗菌効果、日本銅学会講演大会、2015年11月2日~3日、大阪大学吹田キャンパス

井手拓哉、川口裕美、村上政明、中嶋英

雄、高アスペクト比伸長気孔を有するロータス型ポーラス銅の作製、日本銅学会講演大会、2015年11月2日~3日、大阪大学吹田キャンパス

児島孝文、池田輝之、川口裕美、井手拓哉、中嶋英雄、一方向に伸びた孔をもつ多孔質SiおよびMg₂Siの創製、日本金属学会春期講演大会、2016年3月25日~27日、東京理科大学葛飾キャンパス

Hideo Nakajima, New Improved Heat Sinks, Cross-Pacific Technology Innovation Partnership Seminar Series (招待講演) 2015年3月11日、Four Seasons Palo Alto, Calif., USA

Hideo Nakajima, New Improved Heat Sinks, Tech Ranch SXSWi (招待講演) 2015年3月13日~17日、Austin City Hall, Austin, TX, USA

中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属の作製、性質および応用、日本機械学会(招待講演) 2014年9月7日~9日、東京電機大学

Hideo Nakajima, Fabrication, Properties of its Application, Lee Hsun Award Memorial Lecture (招待講演) 2014年9月10日、中国、瀋陽、金属研究所

中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属の作製、性質および応用、日本金属学会・村上記念賞受賞講演(招待講演) 2014年9月24日~26日、名古屋大学

H.Nakajima and T.Ide, Development of Dental Implants and Porous Heat Sink, Metfoam2013(International Conference on Porous Metals and Metal Foaming Technology)(招待講演), 2013年6月25日~27日、Raleigh, USA 査読有

中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属の製法、物性および応用開発の現状と展望、日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部・本多光太郎記念講演(招待講演) 2013年7月12日、大阪市、大阪科学技術センター

〔図書〕(計5件)

中嶋英雄、ポーラス材料学、内田老鶴圃、2016年、300ページ

Hideo Nakajima, Porous Metals with Directional Pores, Springer, 2013年、284ページ

Hideo Nakajima, Progress in Advanced Structural and Functional Materials Design, edited by T.Kakeshita, 2013年、p.15-26

Hideo Nakajima, Metal Foams -Fundamentals and Applications-, edited by N.Dukhan, DEStech Publications, Inc., 2013年、p.381-421
中嶋英雄、日本学術振興会第133委員会50周年記念誌、編集委員長 竹内伸、2013

年, p.35-49

〔産業財産権〕

取得状況(計1件)

名称: 多孔質体の製造方法
発明者: 中嶋英雄、井手拓哉
権利者: ロータスアロイ株式会社
種類: 特許
番号: 第5398260号
取得年月日: 2013年11月1日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

URL: <http://www.lotus-alloy.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 英雄 (NAKAJIMA, Hideo)
(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・
所長
研究者番号: 30134042

(2) 研究分担者

安永 和史 (YASUNAGA, Kazufumi)
(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・
研究開発部・主任研究員
研究者番号: 20404064

山岸 隆一郎 (YAMAGISHI, Ryuichiro)
(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・
技術相談室・嘱託
研究者番号: 60647048

(3) 連携研究者

井手 拓哉 (IDE, Takuya)
株式会社ロータスサーマソリューション・代表取締役
研究者番号: 40507183