

ポーラス化によって創られる材料機能

- 一方向気孔を有するポーラス金属 -



研究室紹介

中嶋 英雄*

Material Functional Properties created through Pore Formation

Key Words : porous metals, solidification, hydrogen, porosity

1. はじめに

樹木や竹はしなやかさや強度を兼ね備え、骨も多孔質化による軽量化と強度保持をうまく利用した材料である。このように自然界には、多孔質でありながら材料として優れたものがたくさんある¹⁾。ところで、従来の発泡金属や焼結金属などのポーラス金属は気孔が等方的で球状であるために応力を負荷した時に気孔周辺に応力集中が生じて材料は脆弱なものになってしまう。それに対し、ここで取り挙げる一方向に気孔を有するロータス型ポーラス金属(以下、ロータス金属と言う)は気孔の成長方向には応力集中が起こらないために優れた強度特性を持つ材料として注目されている²⁻³⁾。本稿では、ロータス金属の製法および多孔質化によって創られる材料機能特性を利用した応用開発例を紹介する。

2. 高圧ガスを用いたロータス金属の作製法

ロータス型ポーラス金属は、

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孔を形成することを利用して作製される。このようなロータス金属の作製方法には3つの方法 - 鋳型鋳造法、連続帯溶融法、連続鋳造法 - が挙げられる^{2, 4)}。

図1(a)に、鋳型鋳造法によるロータス金属の作製装置を示した。高圧容器の中に溶解部と凝固部が

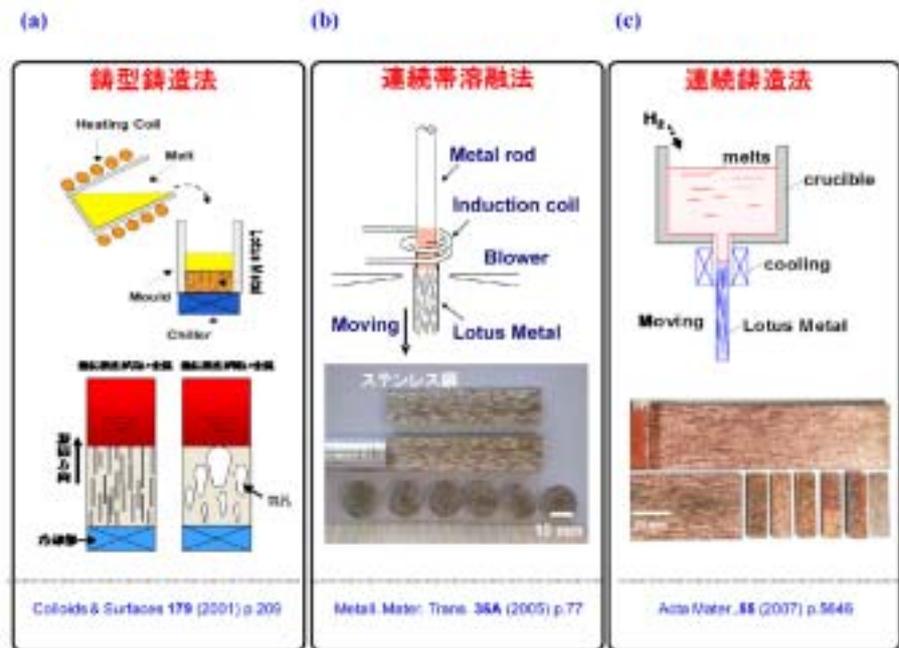


図1 ロータス金属の作製法。(a) 鋳型鋳造法、(b) 連続帯溶融法、(c) 連続鋳造法



* Hideo NAKAJIMA

1949年2月生
 東北大学大学院工学研究科金属材料工学
 専攻博士課程修了(1977年)
 現在、大阪大学産業科学研究所 金属材料
 プロセス研究分野 教授 工学博士
 材料工学
 TEL : 06-6879-8435
 FAX : 06-6879-8439
 E-mail : nakajima@sanken.osaka-u.ac.jp

設けてあり、高周波加熱によって坩堝内の金属を溶解し、所定の圧力のガス中で溶融金属中にガスを溶解させる。底面部を水冷チラーによって冷却した銅盤を有する鋳型の中に鋳込んで下方から上方への一方向凝固をさせると気孔が上に伸びたロータス金属を作製することができる。鋳型の一端を冷却しつつ一方向凝固を行わせるので、本製法による長尺のロータス金属の作製には限界があるという欠点がある。

一方、連続帯溶融法では、図1(b)に示すように、高圧ガスの下で金属ロッドを高周波加熱コイルで部分的に溶解させ、その溶融部に雰囲気からガスを吸収させ連続的に移動させることにより、一定の凝固速度で均一な気孔サイズと気孔率をもつロータス金属を作製することができる。本製法によってステンレス鋼や金属間化合物などの熱伝導率の低い材料でも均一な気孔径や気孔率を有するロータス金属を作製することができる。しかしながら、溶融部は表面張力によって保持されるため、直径十数mmのロッドや25mm幅程度の板材に限定されてしまう。

そこで、著者らは凝固速度を制御できて量産化に適した連続鋳造法を開発した。図1(c)に示したように、連続鋳造装置は加圧容器内に設置された加熱溶解部、凝固のための鋳造部および凝固材を連続的に引き出すための移動機構より構成されている。坩堝内で高周波加熱により金属素材を溶解し坩堝底部の孔に設置した鋳型にあるダミーと接触させダミーをピンチロールの移動機構によって一定速度で連続的に凝固材を引き出すことができるので、長尺のロータス金属を作製できる。連続鋳造法によって作製されたロータス銅を図2に示した。



図2 連続鋳造法で作製されたロータス銅。
作製条件：水素ガス雰囲気圧力1.0MPa、
引出速度10 mm・min⁻¹
出典：日本金属学会発行「まてりあ」Vol.47 No.4

3. ガス化合物熱分解法を用いたロータス金属の作製法

金属中に水素などのガスを溶解させるために高圧の水素ガス雰囲気下で金属を溶解、一方向凝固させてロータス金属が作製されてきた。しかしながら、

作製の際に、暴爆性の水素ガスを高圧にて用いなければならないことがロータス金属を実用化する場合の大きな障害であった。最近、著者のグループではこの障害を克服するために高圧の水素ガスをせずに溶融金属にガス化合物（ガス元素と金属元素より構成される化合物、以降、ガス化合物と呼ぶ）を添加するロータス金属の新規な製法「ガス化合物熱分解法」を開発した⁵⁾。図3にガス化合物熱分解法を用いた鋳型鋳造法によるロータス金属作製装置の概略図を示した。0.075から0.25gのTiH₂粉末ペレットを鋳型底面にセットし、0.1MPaのアルゴン雰囲気下で銅200gを高周波加熱により坩堝内で溶解し、底部を水冷した鋳型に鋳込んで一方向凝固させた。ガス化合物熱分解法は水素化物や窒化物を溶融金属に添加し、鋳型で一方向凝固させるだけでロータス金属を作製することができるので、安価で、安全、簡単な製法である。また、熱分解で生成した金属元素は酸化物微粒子などを生成するので、それが気孔の核発生になり、結果的にはより均一な気孔分布を有するロータス金属を作製することができる。高圧容器の不要な量産化向けの製法である。

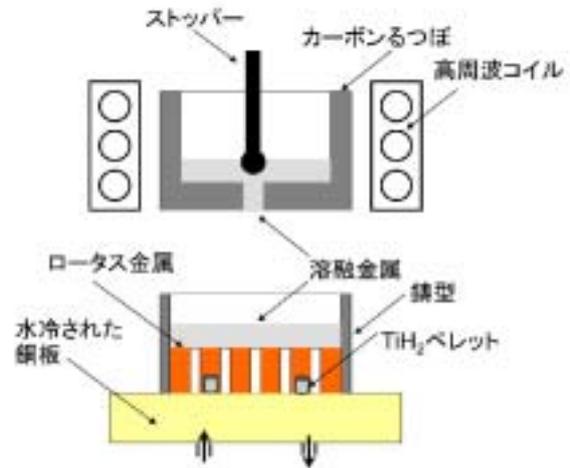


図3 ガス化合物熱分解法を用いた鋳型鋳造型ロータス金属作製装置の概略図
出典：(株)アグネ技術センター発行「金属」Vol.80 No.10

4. ロータス金属を用いた工作機械およびヒートシンクの開発

ロータス金属は軽量性、制振性、直線的貫通気孔に冷媒を流すことによる冷却特性などの機能的性質を有している。これらの特性を利用した応用開発の2つの例を紹介する。

4.1 ロータス金属を用いた工作機械

工作機械には従来以上に省エネルギー化・高精度化が望まれており、工作機械の移動体を軽量化して運動性能を向上させ、消費エネルギーを低減させる必要がある。現在主に用いられている鋳鉄に代わって、近年新たな軽量構造材料として注目されているロータス金属に着目した。それは、従来の球形気孔を有するポラス金属では気孔率の増加に伴って比強度は低下するが、ロータス金属は気孔長手方向に負荷がかかった場合でも、応力集中が生じずに比強度を一定に保ちながら気孔率を増加できるという優れた機械的性質があり^{2, 3)}、さらに熱膨張係数はノンポラス金属と同様といった特性がある²⁾。これらの特性を生かしたロータス金属を工作機械へ適用する試みを行った。

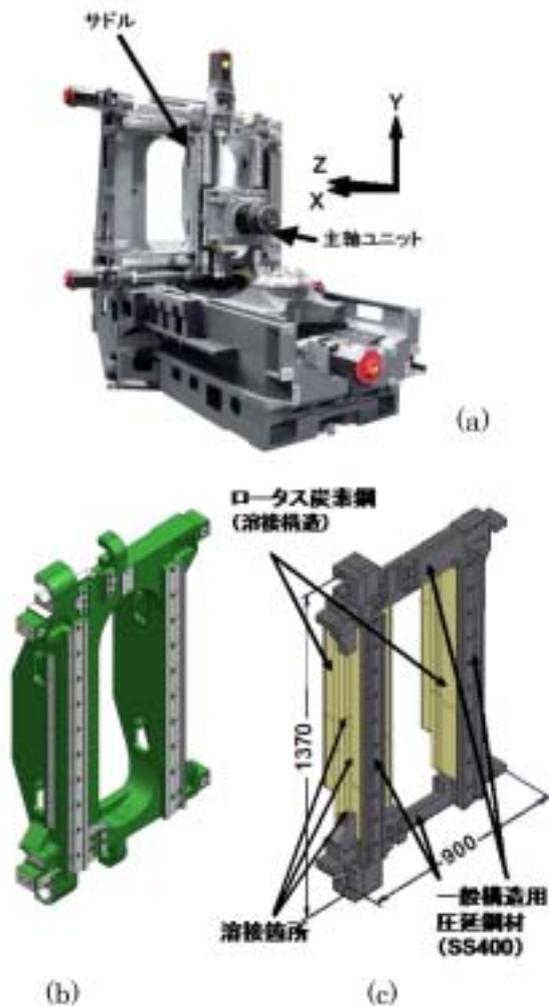


図4 (a) 横型マシニングセンター、
 (b) 既存の鋳鉄製サドル、
 (c) ロータス炭素鋼製サドル (単位: mm)
 出典: 日本鉄鋼協会発行「ふえらむ」Vo.16 No.9

横型マシニングセンター NH4000DCG ((株)森精機製作所製)(図4(a))の既存の鋳鉄(FC300)製サドル(図4(b))を、図4(c)に示すロータス炭素鋼厚鋼板溶接構造のサドルに置き換えた。サドルのサイズは、幅900×高さ1370×奥行き250mm³である。従来の鋳鉄製サドルの重量360kgと比較して作製したロータス炭素鋼製サドルは212kgで41%軽くなり、主軸ユニットを含めた移動体全体では18%の軽量化となった。X軸切削送り速度5000mm・min⁻¹におけるロータス炭素鋼製サドル及び鋳鉄製サドルのX軸方向残留振動の結果は、ロータス炭素鋼製サドルでは減速時間を32msに、鋳鉄製サドルでは減速時間を64msで最大振幅が±1μm以内となった。同様に、早送り12500mm・min⁻¹では、ロータス炭素鋼製サドルの11msに対し、鋳鉄製サドルは44msとなった。以上の様に、ロータス炭素鋼による軽量化により慣性力が小さくなり、加減速性能を2倍以上に高められた。鋳鉄製サドルと比較して、ロータス炭素鋼製サドルの消費電力量は、15~20%削減できた。このように、軽量化により、残留振動の抑制および消費電力の削減効果があった⁶⁾。

4.2 ロータス銅を用いたヒートシンクの開発

近年、電子デバイスの小型化、高性能化に伴ってデバイスからの発熱密度(発熱損失を発熱面積で除した値)は飛躍的に上昇しており、その効果的な冷却のために高性能なヒートシンクが求められている。これまでに、発泡型ポラス金属や銅繊維からなる多孔質金属を用いたヒートシンクの開発が行われ、高い伝熱性能をもつことが明らかになっている^{7・8)}。しかし、これらの多孔質金属に冷媒を流した場合、気孔が3次的に連結しているため、隣合う気孔を流れる冷媒の合流あるいは分流によって発生する圧力損失により、ヒートシンク全体の圧力損失が大きくなる欠点があった。そのため、これらの多孔質金属をヒートシンクとして応用するためには、冷媒を送り出すための大きな動力が必要となっていた。圧力損失を減少させるためには、気孔内の冷媒流れを1次元化することが有効であることが考えられる。一方向性の気孔を多数もつロータス銅をヒートシンクに利用した場合、微細な気孔径による温度境界層厚さの低減に伴う熱伝達率の増大と、直進性の気孔

による圧力損失の低減とが同時に得られる利点がある。

図5はロータス銅ヒートシンクを使用したパワーモジュールの水冷方式を示したものである⁷⁾。発熱体である電子デバイスの直下にロータス銅を配置し、冷却水としてエチレングリコール水溶液からなる不凍液をロータス銅の気孔内に流すシンプルな構成になっている。この構成により電子デバイスで発生した熱は、ロータス銅の気孔内を通過する冷却水に熱伝達される。

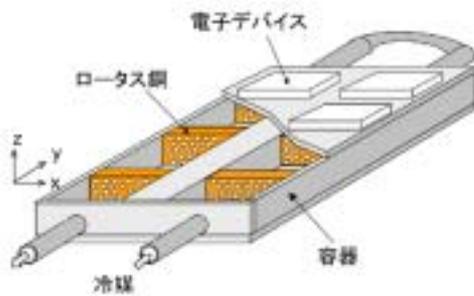


図5 ロータス銅ヒートシンクを用いたパワーモジュール構成
出典：日本鉄鋼協会発行「ふえらむ」Vo.16 No.9

圧力損失 ΔP と流量 U との積で表されるポンプ動力 $\Delta P \cdot U$ に対する各ヒートシンクの熱伝達率 h_{bi} の比較を図6に示す。ポンプ動力 $\Delta P \cdot U = 0.02W$ 時の熱伝達率 h_{bi} を比較すると、ロータス銅ヒートシンクAの実測値は溝型マイクロチャンネルより2倍、従来の溝型ヒートシンクより5倍高い値を示している。以上から、ロータス銅ヒートシンクの熱伝達特性は非常に高く、 $100000 W/(m^2 \cdot K)$ 以上の熱伝達率を示すことが明らかになった⁸⁾。

5. おわりに

ロータス金属は従来の多孔質金属にはないユニークな特性を有し、ロータス炭素鋼を用いた工作機械は制振性や省エネに効果的である。また、ロータス銅を使った高性能水冷ヒートシンクは高い熱伝達特

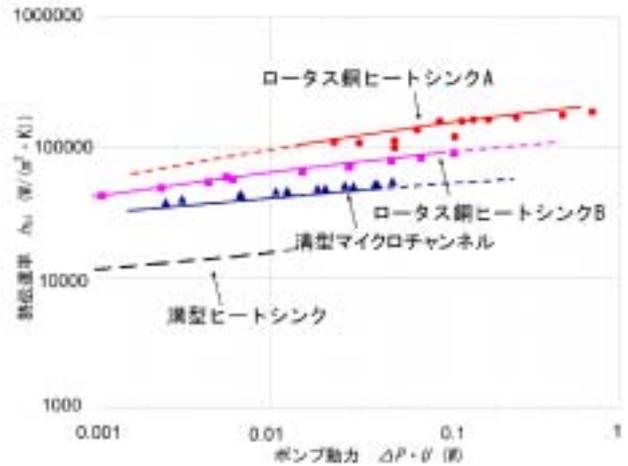


図6 ポンプ動力に対する各ヒートシンクの熱伝達率の比較
出典：日本鉄鋼協会発行「ふえらむ」Vo.16 No.9

性を示すことから、今後、特に発熱密度の高いパワー素子、レーザーダイオード、高周波素子用のヒートシンクとして期待されている。

参考文献

- 1) L. J. Gibson, M. F. Ashby and B. A. Harley: Cellular Materials in Nature and Medicine, Cambridge University Press, Cambridge, (2010).
- 2) H. Nakajima: Prog. Mater. Sci., 52(2007), 1091.
- 3) H. Nakajima: Proc. Jpn. Acad., Ser. B, 86(2010), 884.
- 4) V. Shapovalov: MRS Bull., XIX(1994), 24.
- 5) H. Nakajima and T. Ide: Metall. Mater. Trans., 39A(2008), 390.
- 6) 森精機製作所：高度機械加工システム開発事業報告書、平成20年度、新エネルギー・産業技術総合開発機構、機械システム技術開発部
- 7) H. Chiba, T. Ogushi, H. Nakajima: JSME Int. J. Series B, 47, (2004), 3, 516-521.
- 8) H. Chiba, T. Ogushi, H. Nakajima: J. Thermal Sci. Tech., 5,(2010), 2, 222.