

材料の一方方向性多孔質化と機能*

中 嶋 英 雄**

1. ポーラス金属研究の契機

この度は日本金属学会賞を受賞することになり、身に余る光栄に存じます。この受賞の主な研究対象は著者が前半期の20年間ほど行ってきた固体金属中の拡散研究と後半期の25年ほどの間に行ってきたポーラス金属の研究です。本受賞は恩師、諸先輩、共同研究者である同僚や研究室の当時の学生諸君のお陰によるものであり心より感謝と御礼を申し上げます。本講演では、後者のポーラス金属の製法、物性および応用開発に関する研究内容を紹介します。1992年に岩手大学に教授として着任後、著者には地場産業の育成への大きな期待が寄せられました。岩手の特産品である南部鉄鉄の工場などを頻繁に見学する機会が設定されました。そこでは地元企業から南部鉄鉄の引け巣や铸造欠陥を無くす研究への要望が強かったのですが、今さら他の研究者と同じことを研究しても埒が明かないと思い、铸造欠陥を忌み嫌うのではなくそれを積極的に利用した素材の研究をやることにしました。

2. 自然界に多く存在するポーラス材料

自然界を眺めてみると、樹木、葉や茎、動物の骨を始めとして実に多くのポーラス材料が存在すること気づくであろう。さらに、食品、衣料品から建築物に至るまで多くの人工物は無垢ではなくポーラス(多孔質)である。木材、葉、茎などは気孔が縦に貫通したポーラス材料で、水分や栄養素を補給するための導管の役目を果たしている。骨は密度の高い外殻と網目の繊維質状のポーラスの海綿骨より成る。それらの骨には軽量化が図られ荷重のかかる関節部では負荷断面積を大きくして応力の緩和を図っている。木材、竹、柱状骨の気

孔形態はすべて異方的であり、それらの機械的強度は気孔方向に依存して変化する。この異方性を積極的に活用し材料にかかる負荷を最も低減させるように機械的強度の効率的利用を図る工夫がなされているのは驚きであり、我々材料研究者は自然界に存在する生体材料の設計理念を大いに学ぶべきである⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

ところで、工業製品の製造過程で生じる気泡のような铸造欠陥や焼結欠陥は工業製品の機能性や効率性を阻害する有害な欠陥と見なされ、可能な限りそれらを低減させることが不可欠であった。ここで紹介するポーラス金属の気孔は正に铸造欠陥利用であり、気孔形態を制御して铸造欠陥を有効に機能材料として利用しようとする試みである。発泡金属、セル構造体、焼結金属などの多くのポーラス材料の気孔は球状あるいは多面体形の等方的構造をもつが、一方方向性気孔をもつポーラス材料は異方的構造を有しロータス材料と呼ばれる。

3. 高圧ガスを用いたロータス金属の作製法

ロータス金属は、熔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。水素ガスを用いて鉄、ニッケル、銅、マグネシウム、アルミニウムなどの多くの金属とそれらの合金を、窒素、酸素ガスを用いてそれぞれ鉄、銀などをポーラス化することができる⁽⁴⁾。このようなロータス金属の作製方法には3つの方法が挙げられる。

(1) 鋳型鋳造法

図1に、鋳型鋳造法によるロータス金属の作製装置を示した。数十気圧に耐える高圧容器の中に溶解部と凝固部が設け

* 2019年3月20日、東京電機大学東京千住キャンパスにおける本会第164回春期講演大会にて講演

** 公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター；所長、大阪大学名誉教授(連絡先：〒914-0192 敦賀市長谷64-52-1)

Directional Porosification of Materials and its Functionality; Hideo Nakajima (Director, The Wakasa Wan Energy Research Center, Tsuruga)

Keywords: porous materials, lotus metals, directional solidification, porosity, gas pores, mechanical property, thermal conductivity, electrical conductivity, heat sinks, damping effect

2018年11月26日受理[doi:10.2320/materia.58.252]

てあり、坩堝に金属素材を充填した後、高周波加熱によって金属を溶解し、所定の圧力のガス中で熔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板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⁽⁵⁾⁽⁶⁾。鋳型の一端を冷却しつつ一方向凝固を行わせるので、本製法では長尺のロータス金属の作製には限界がある。

(2) 連続帯溶融法

図2(a)に示すように、鋳型鋳造法によって熱伝導率の高い銅やマグネシウムでは、均一な気孔サイズ、気孔率をもつロータス金属を作製することができるが、熱伝導率の低い金属の場合(b)、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となり凝固速度が遅くなるため、上部で気孔の粗大化が起これ、均一な気孔サイズや気孔率をもつロータス金属を作製することができなかった⁽⁷⁾。この難点を克服するために、「連続帯溶融法」が開発された(図

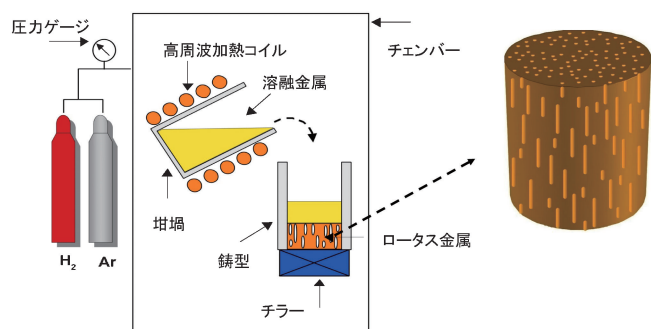


図1 鋳型鋳造法による高圧ガス雰囲気下でのロータス型ポーラス金属の作製原理。

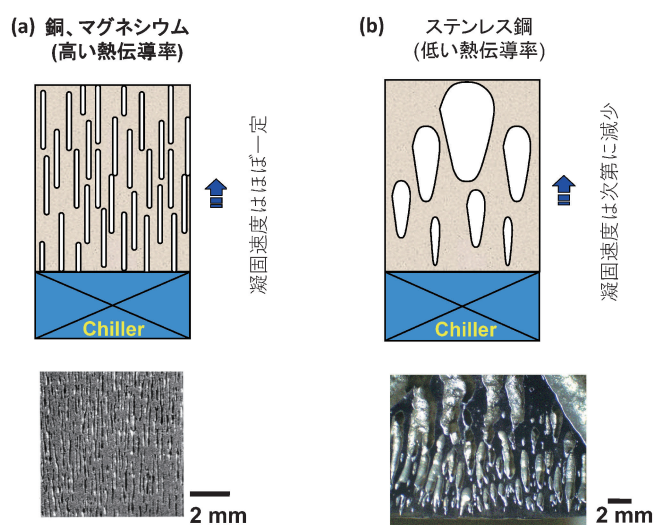


図2 熱伝導率の違いによる一方向性気孔の成長過程。鋳型鋳造法によって作製された(a) 熱伝導率の高い金属の気孔の成長形態とロータス銅の凝固方向に平行な断面写真、(b) 熱伝導率の低い金属の気孔の成長形態とロータスステンレス鋼の凝固方向に平行な断面写真。

3(a)~(c)参照)⁽⁸⁾。高圧ガス雰囲気中で金属ロッドを高周波加熱コイルで部分的に溶解させ、その熔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、一定の凝固速度の下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。このようにして作製された長尺のロータスステンレス鋼の縦および横断面写真を図3(d)に示した。どこをとっても気孔サイズや気孔率がほぼ均一である。

(3) 連続鋳造法

鋳型鋳造法や連続帯溶融法では、作製されるロータス金属のサイズに制限があった。実用量産化のためには均一な気孔サイズや気孔率を有する大きなロータス金属を作製しなければならない。そこで、連続鋳造法を考案した⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。既存のノンポーラス金属作製のための連続鋳造法では、凝固収縮により凝固させたインゴットを鋳型内で円滑に移動させることができるが、ロータス金属の場合には気孔の形成による大きな体積膨張が起これ、凝固させたインゴットを鋳型内に移動

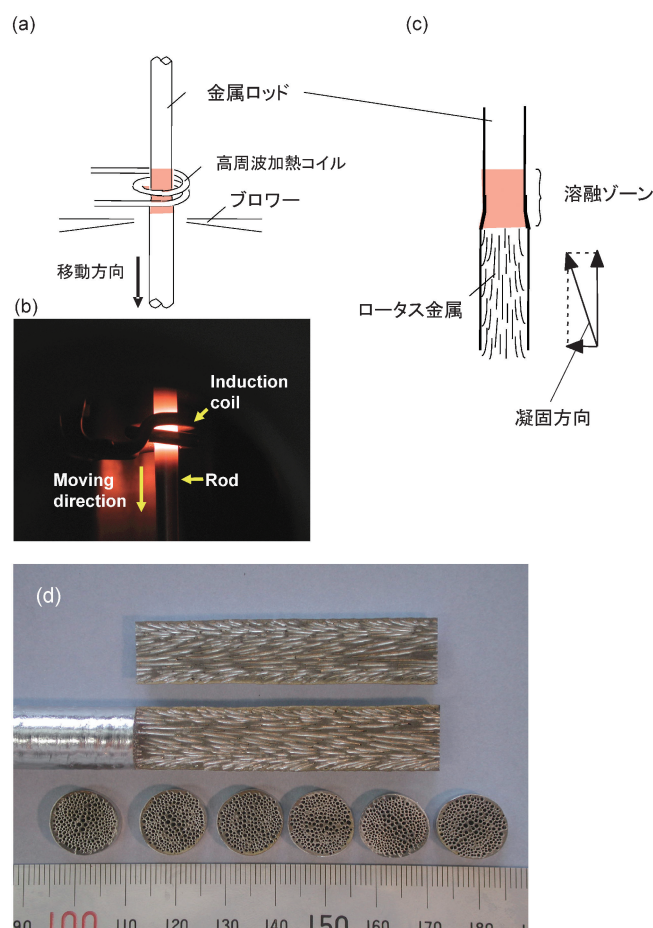


図3 (a) 連続帯溶融法によるロータス金属の作製原理および(b) 溶融部分の写真、(c) 溶融部分と凝固したロータス金属の断面。(d) 2.0 MPaの水素雰囲気中で連続帯溶融法で作製されたロータスステンレス鋼ロッド。凝固方向に平行な断面と垂直な断面(輪切り)を示した。ロッドの移動速度は $330 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、気孔率40%、平均気孔サイズ $320 \mu\text{m}$ 。

させることは困難であると予想された。しかしながら、著者らはこの気孔生成による体積膨張を流動性ある溶湯の方に導くことによりこの問題を解決しロータス金属の作製が可能な連続鋳造法を開発した。図4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溶解させた熔融金属を坩堝底部の孔に設置した鋳型にあるダミーバーに接触させ、そのダミーバーをピンチロールの移動機構で一定速度で連続的に引き出すことによって、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5に示した。

図6にロータス銅の平均気孔径の移動速度依存性を示す。移動速度の増加と共に気孔径は著しく減少する。移動速度を増加させると凝固速度が増大し、過冷却により気孔の核生成

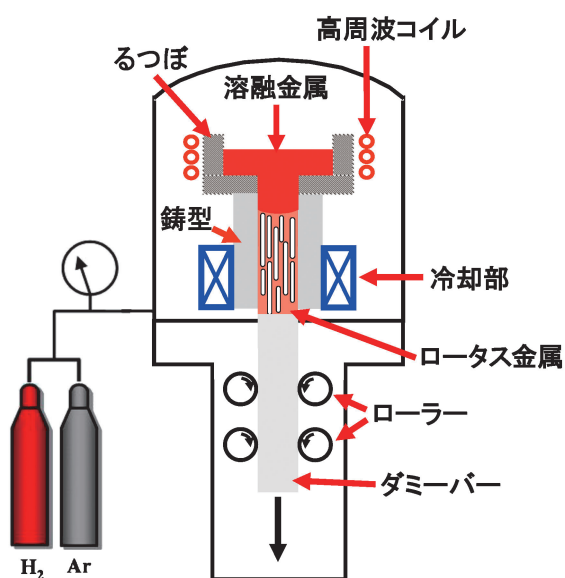


図4 連続鋳造法によるロータス金属の作製装置。

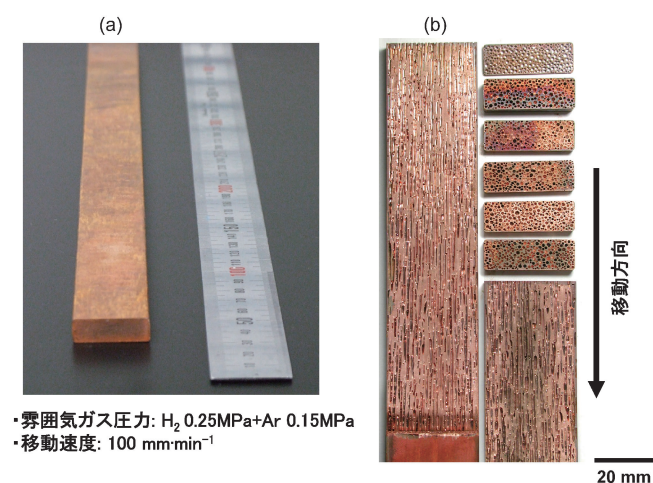


図5 連続鋳造法で作製されたロータス銅。作製条件：水素雰囲気ガス圧力：H₂0.25 MPa + Ar0.15 MPa，移動速度 100 mm・min⁻¹。

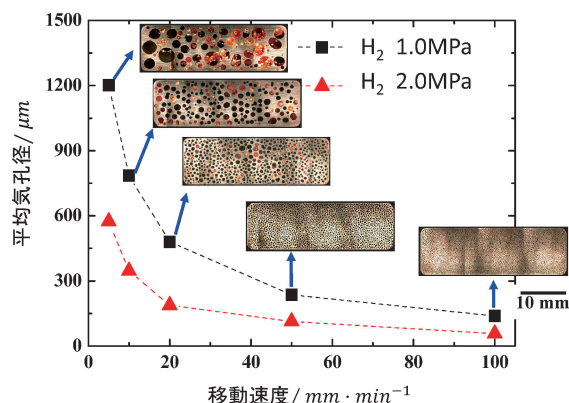


図6 水素ガス圧1.0 MPaおよび2.0 MPaの下で作製されたロータス銅の平均気孔径の移動速度依存性。

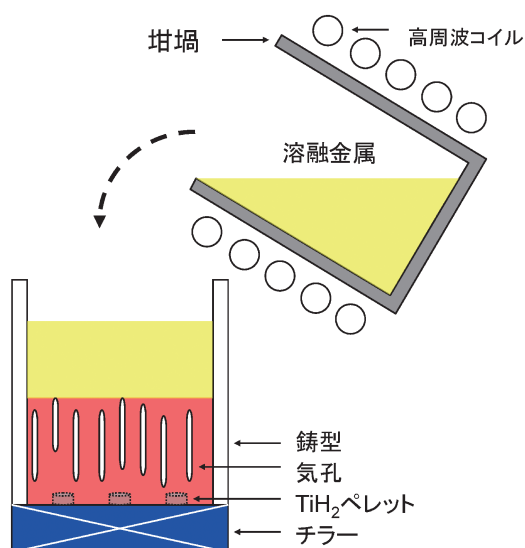


図7 鋳型鋳造法を用いたガス化合物熱分解法によるロータス金属作製法の原理。チタン水素化合物ペレットを鋳型に置いた。

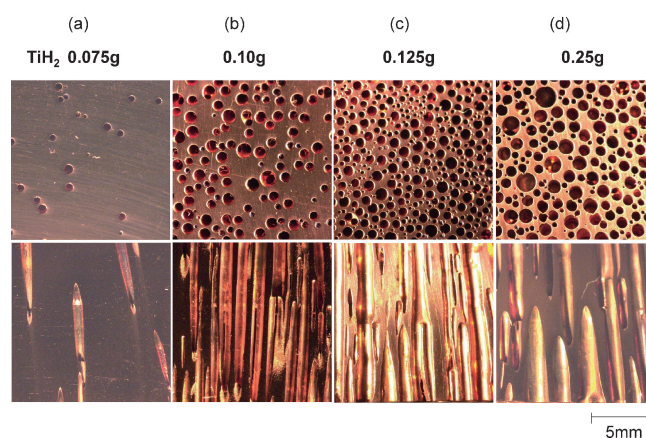


図8 アルゴン0.1 MPaの雰囲気下で一方方向凝固により作製したロータス銅の凝固方向に垂直(上段)および平行(下段)な断面写真。200 gの熔融銅に添加したチタン水素化合物の重量はそれぞれ(a) 0.075 g, (b) 0.10 g, (c) 0.125 g, (d) 0.25 gである。

サイトが増加するため多数の気孔が微細化すると考えられる⁽⁹⁾。

4. ガス化合物熱分解法を用いたロータス金属の作製法

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用いずに熔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)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⁽¹²⁾。図7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の原理を示した。0.075から0.25 gのTiH₂粉末ペレットを鋳型底面にセットし、0.1 MPaのアルゴン雰囲気下で銅200 g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。図8には、ロータス銅の凝固方向に平行および垂直な断面写真を示した。0.1 g以上のTiH₂を添加しても気孔率は変化せず約60%で一定であった。0.1 gのTiH₂の添加でも熔融銅中の水素濃度は飽和溶解度を超過しているので、これ以上ではいくらTiH₂量を増加させても気孔率が変化しない。このように、ガス化合物熱分解法は水素化合物⁽¹²⁾⁽¹³⁾や窒化物⁽¹⁴⁾を熔融金属に添加し、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。

5. ロータス金属の機械的性質

(1) ロータス金属の引張強度

これまでに発泡金属や焼結金属のような球状に近い気孔を持つポーラス金属の強度に関する研究は多数行われてきたが、一方向に伸びた気孔を持つロータス金属の強度の研究はほとんど行われてこなかった。図9に示すように、著者らは水素ガスを用いて作製したロータス銅の引張強度の気孔率依存性を調べた⁽¹⁵⁾。引張方向に平行な一方向気孔を有するロータス銅の最大引張強度は気孔率100%で0 MPaの点を通るような直線的な変化をする。つまり比引張強度(単位重量当たりの引張強度)はこの直線の傾きで示され、気孔率の大小に関わらず一定である。このことは引張方向に平行に配列した気孔の近傍にはほとんど応力集中が生じないことを示唆している。

ポーラス材料の強度 σ は次の経験式で気孔率 p と関係付けることができる⁽¹⁶⁾。

$$\sigma = \sigma_0(1-p)^K \quad (1)$$

ここで、 σ_0 はノンポーラス材料の強度である。 K は応力集中係数であり、応力負荷方向に対する気孔の形状と向きに依存し、 $K = \sigma_{\max}/\sigma$ と表すことができる。ここで、 $\sigma_{\max}$ は応力の最大値である。図10(a)に示すように、楕円形状の気孔の長半径を a 、短半径を b とすると、 $\sigma_{\max}$ は

$$\sigma_{\max} = \sigma(1+2a/b) \quad (2)$$

で示される。引張方向に平行な一方向気孔を有するロータス

試料では $K=1$ であり、 $\sigma = \sigma_0(1-p)$ となる。一方、垂直方向では、 $\sigma = \sigma_0(1-p)^3$ と表すことができる。式(1)および(2)から評価した理論曲線を図9中に点線で示した。それらは実験結果とよく一致することから、(1)引張方向に平行な気孔を有するロータス銅の最大引張強度は応力集中に依らないこと、(2)図10(b)に示すように垂直方向では最大引張

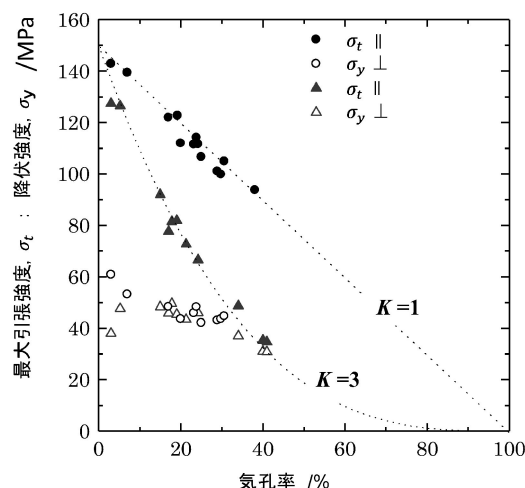


図9 一方向気孔に平行と垂直方向のロータス銅の最大引張強度および降伏強度の気孔率依存性。

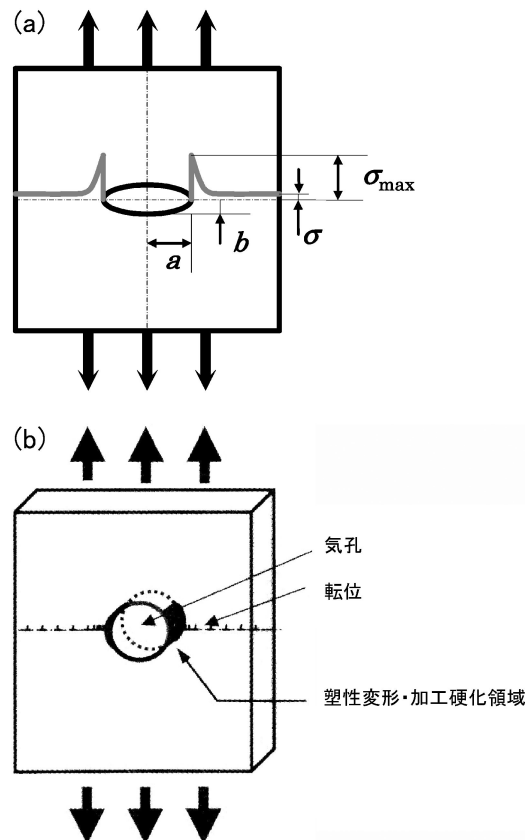


図10 (a) 楕円形状の気孔の周辺の応力分布．気孔の端で応力集中が起こっている．(b) 気孔の端で転位がパイルアップの様子．

強度は応力集中によると結論付けられる．これは気孔の端で塑性変形中に転位がパイルアップして加工硬化が生じるためであると考えられる．

ところで，多くの金属は水素ガスを用いてポーラス化できるが，暴爆性，引火性のある水素を用いた製法は量産化には適当ではない．そこで，我々は安全な窒素を用いてロータス鉄を作製することに成功した⁽¹⁷⁾．これには更なる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⁽¹⁸⁾．図11には窒素ガスおよび水素ガスで作製されたロータス鉄の引張強度の測定結果を示した．窒素で作製されたロータス鉄では，気孔率が40～50%でも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，「鉄より半分軽くても強度は鉄と変わらない」という結果で，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) ロータス金属の低ひずみ速度での圧縮強度

発泡金属の圧縮に関する研究は活発に行われてきた．発泡金属の圧縮試験では応力—ひずみ曲線にはプラトーと言われ

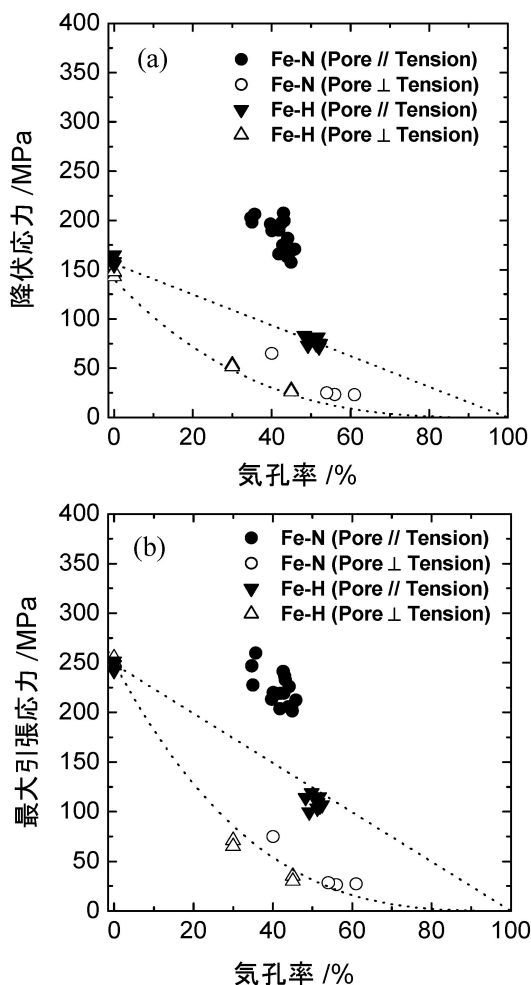


図11 水素あるいは窒素ガスを用いて作製されたロータス鉄の(a) 降伏強度の気孔率依存性，(b) 最大引張強度の気孔率依存性．

る平坦な部分が存在する．そこではひずみが増加しても応力は変化せずほとんど一定値を示す．この領域ではエネルギーが吸収される．Hyun と Nakajima は気孔が圧縮方向に平行と垂直方向のロータス銅の圧縮挙動を初めて詳細に調べた⁽¹⁹⁾．図12に示すように応力—ひずみ曲線の勾配は気孔率の増加と共に減少し同じ気孔率で比較すると，低ひずみ領域では圧縮方向に平行の気孔をもつロータス銅の応力は垂直方向の気孔をもつロータス銅の応力よりも大きい．しかしながら，この大小関係はひずみの増大と共に逆転する．圧縮方向に垂直な気孔をもつ試料では気孔近傍に応力集中が起こるが，平行方向では応力集中はほとんど起こらない．

(3) ロータス金属の高ひずみ速度での圧縮変形挙動

著者らはロータス鉄をモデル材として用い，ホプキンソンプレッシャーバー法の圧縮試験機および万能試験機を用いて，高ひずみ速度($\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$)，中ひずみ速度($\sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$)および低ひずみ速度($\sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)での圧縮試験を気孔に平行および垂直な方向に対して行い，ひずみ速度および方向気孔の向きが圧縮変形および吸収エネルギー量[†]に及ぼす影響を調べた⁽²⁰⁾⁽²¹⁾．

図13に低ひずみ速度，中ひずみ速度，高ひずみ速度での圧縮試験によって得られたロータス鉄の気孔に(a) 平行および(b) 垂直な方向における公称応力—塑性ひずみ曲線を示す．気孔に平行および垂直な方向において，変形抵抗はひずみ速度の増加に伴って増加する．これは，鉄母材の変形抵抗がひずみ速度に依存して増加するためである．気孔に平行な方向の低および中ひずみ速度での圧縮では，全てのひずみの範囲で，変形抵抗は単調に増加する．一方，高ひずみ速度での平

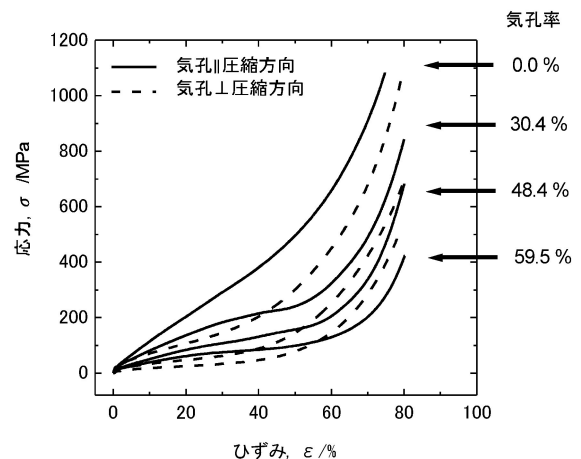


図12 ノンポーラス銅および異なる気孔率を有するロータス銅の圧縮応力—ひずみ曲線．

[†] 気孔率の高いロータス金属の圧縮試験における圧縮応力 σ —ひずみ ε 曲線はひずみが小さい方から弾性域，プラトー領域および緻密化領域の3つに分けることができる．いま，緻密化開始のひずみを ε_D とすると吸収エネルギー(圧縮変形中に吸収されたエネルギー) W の大きさは $W = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$ で示される．

行方向の圧縮では、塑性ひずみが15.0～22.5%の領域で、変形抵抗がひずみの増加に伴って減少する。これによって、応力値がほぼ一定の値で変形が進行するプラトー領域が現れる。一方、気孔に垂直な方向の圧縮ではすべてのひずみ速度において、ひずみの増加とともに応力値が単調に増加し、プラトー領域は出現しない。このプラトー領域が発生する原因として、気孔に平行な方向の圧縮では座屈変形が起こり易いことが挙げられる。

高ひずみ速度圧縮試験により得られたロータス鉄の気孔に平行(//)および垂直(⊥)な方向の単位重量当たりの吸収エネルギー W (応力—ひずみ曲線のプラトー領域における積分値)は、それぞれ $30 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $15 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ で、発泡アルミニウムの吸収エネルギー ($2 \sim 8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) よりも大きく、特に気孔に平行な方向においては、吸収エネルギー W が発泡アルミニウムの吸収エネルギーよりも4倍程度大きい。このようにロータス鉄は従来の発泡アルミニウムと比較して優れた吸収エネルギー特性を示すことがわかる。

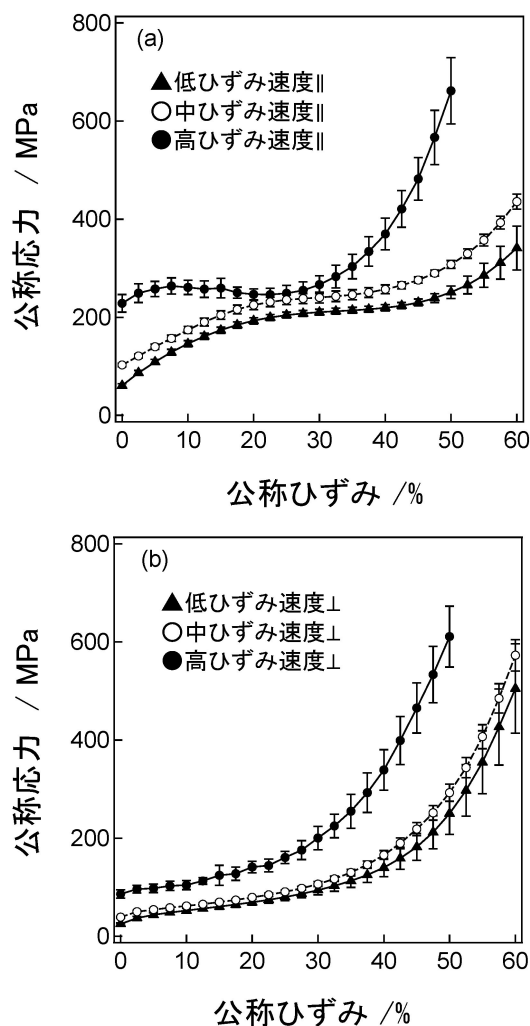


図13 低ひずみ速度、中ひずみ速度、高ひずみ速度での圧縮試験によって得られたロータス鉄の気孔に(a)平行および(b)垂直な方向における公称応力—塑性ひずみ曲線。ロータス鉄の気孔率47.9～49.7%。

6. ロータス金属の物理的性質

(1) ロータス金属の吸音特性

現在実用化されている吸音材にはグラスウールや発泡アルミニウムなどがあるが、それらはいずれも十分な強度を保持していない。吸音材に軽量性のほかに強度が付与されるならば、用途はさらに拡大する。著者らによってロータス金属は優れた吸音性を示すことが明らかにされた。ロータス銅の気孔径、気孔率および試料の厚さの関数として定常法によって吸音率 α_0 を測定した結果、気孔率および試料厚さが一定の下では α_0 は気孔径の減少と共に増加し、気孔径および試料厚さが一定の下では気孔率の増加と共に増加し、気孔率および気孔径が一定の下では試料の厚さの増加と共に増大することがわかった。ポーラス材料の吸音性には気孔内壁の空気の粘性抵抗が重要な役割を果たしているが、上の結果はいずれも気孔内壁の面積が増大すると吸音性が増えることを示している⁽²²⁾。

図14には、材料の厚さ20 mmの3種の異なる吸音材の吸音特性を示した。クローズド気孔を有する発泡アルミニウム自体は吸音性を示さないで、発泡アルミニウムの壁にクラックを生じさせて気孔同士が空間的に連結するように圧延加工を施さなければならない。気孔率も違うので、3者を直接比較することはできないが、ロータス金属は気孔率が低くても市販吸音材よりも高強度で同等の吸音特性を有していることがわかった。

(2) ロータス金属の熱伝導

次節に述べるように、ロータス金属をヒートシンクに应用する場合、基礎物性値として熱伝導率の知見は重要である。著者らは定常法を用いてロータス銅の熱伝導率を測定した⁽²³⁾。ロータス金属の気孔の異方性によって気孔に平行方向と垂直方向とでは有効熱伝導率は大きく異なることが見出された。ロータス金属の有効熱伝導率 k_{eff} は次式で定義される。

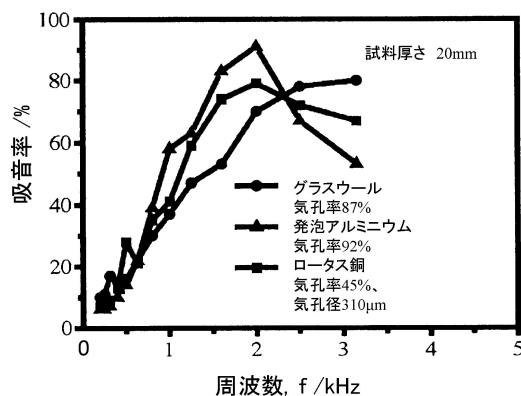


図14 さまざまな材料の吸音率の比較。

[†] エネルギー I_0 の音波が物体に当たり、そのうち I_r のエネルギーが反射されたとき、 $(I_0 - I_r)/I_0 = \alpha_0$ の値をその物体の吸音率という。

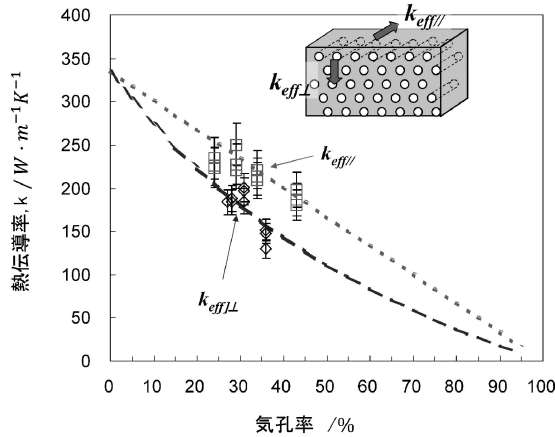


図15 一方向気孔に平行および垂直方向のロータス銅の有効熱伝導率の実測値(□◇)と解析データ(点線)。

$$q = \frac{Q}{A} = -k_{\text{eff}} \nabla T \quad (3)$$

ここで、 q は気孔を含むロータス金属の断面積 A に流れる熱量 Q からの熱流束であり、 T はロータス金属の温度である。いま熱流が一方向気孔に平行に流れるロータス銅の断面積は $(1-\varepsilon)$ に比例するので、平行方向の有効熱伝導率 $k_{\text{eff}||}$ は次式で表わされる。

$$\frac{k_{\text{eff}||}}{k_s} = 1 - \varepsilon \quad (4)$$

ここで、 k_s はノンポーラス銅の熱伝導率、 ε は気孔率である。一方、垂直方向の有効熱伝導率 $k_{\text{eff}\perp}$ は次式で表わされる。

$$\frac{k_{\text{eff}\perp}}{k_s} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (5)$$

である。図15には有効熱伝導率の測定結果と上式で評価された結果を示した。両者はよく一致している。 $k_{\text{eff}\perp}$ は $k_{\text{eff}||}$ より低くなっている。このように、ロータス銅の有効熱伝導率は気孔の方向に依存して変化し顕著な異方性を示す。

(3) ロータス金属の電気伝導

気孔の長手方向に平行および垂直方向での電気伝導度が4端子プローブ法を用いて室温で測定された。図16は一方向気孔に平行および垂直方向のロータスニッケルの電気伝導度 ($\sigma_{||}$ および $\sigma_{\perp}$) の気孔率依存性を調べた結果である⁽²⁴⁾。このように電気伝導度には気孔の向きに依存した顕著な異方性が認められる。一方向気孔に平行な比電気伝導度は気孔率の大小にかかわらずほぼ一定である。一方向気孔に平行な電流担体の流れがある場合、気孔率の増加は電流担体の減少をもたらすので、電気伝導度は気孔率の増加と共にほぼ線形的に減少する。これに対して、一方向気孔に垂直な比電気伝導度は平行方向の場合よりもだいぶ小さくなる。この方向では電流担体が気孔を迂回したり散乱しながら流れるために電流担体が移動する距離が増大し電気抵抗率が増加するためである。

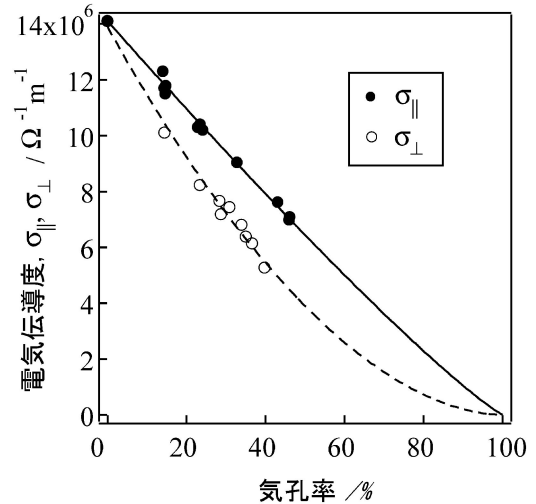


図16 ロータスニッケルの電気伝導度の気孔率依存性。丸印は実測値、実線と点線は式(1)にフィットさせた曲線。気孔に平行および垂直方向の電気伝導度に対するべき係数 K 値はそれぞれ1.1および1.8と見積もられた。

7. 異方的強度、熱伝導および電気伝導の統一的解釈

機械的強度、熱伝導率および電気伝導度の気孔率依存性は等しくべき法則の式(1)に従うことが明らかになった。前者の強度は転位の挙動に、後者の熱伝導および電気伝導は電子の挙動に影響される。気孔が存在すると、塑性変形中に動く転位が気孔の周囲にパイルアップし応力集中が生じる。そのため、一方向気孔に垂直方向の強度は著しく減少する。つまり、気孔は転位の増殖を妨げるピンニングサイトと見なすことができる。一方、熱伝導は一般には格子振動と電子伝導によって生じるが、金属では電子伝導が支配的である。ロータス金属ではこの電流担体が気孔を迂回したり、散乱することによって熱伝導率が低下する。また、同様に電気伝導でも電流担体の気孔による迂回や散乱によって電気伝導度が低下すると考えられる。

図17には一方向気孔に平行あるいは垂直方向における気孔の断面を図解した。気孔の断面積はおおよそ、

$$\text{気孔に平行方向の場合, } S_{||} = \pi \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (6)$$

$$\text{気孔に垂直方向の場合, } S_{\perp} = 2 \sum_{i=1}^n r_i l_i \quad (7)$$

と示すことができる。ここで、 n は単位体積当たりの気孔数、 r は気孔の半径、 l は気孔の平均長さである。ロータス金属では $l_i \gg r_i$ であるので、 $S_{\perp} \gg S_{||}$ となる。一方向気孔に垂直な方向では気孔の断面積が平行の場合よりもかなり大きくなるので、転位の気孔近傍のピンニングサイトも増大し、電流担体の気孔近傍の迂回経路や散乱体も増大することによって、それぞれ強度や熱伝導、電気伝導の低下がもたらされることが考えられる。以上のように、一見異なる現象の異方性を気孔の形態異方性によって統一的に解釈することができる⁽²⁵⁾。

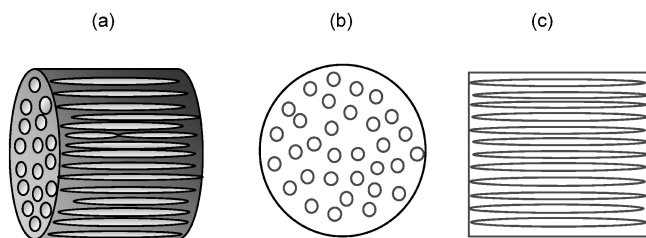


図17 (a) ロータス金属の外観, (b) 凝固方向に垂直に切断したロータス金属の断面, (c) 凝固方向に平行に切断したロータス金属の断面.

8. ロータス金属の工業製品への応用

近年, パワーデバイスやレーザーダイオードの発熱密度は $100 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ にも達し, 高周波デバイスではさらにデバイスの高密度化に伴って発熱密度は $1000 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ に達しようとしている. 従来の溝型ヒートシンクでは十分な放熱を達成することができなくなりつつある. そのためこれらのデバイスを冷却するためには高い熱伝達率を有するヒートシンクが必要になる. ロータス金属をヒートシンクに用いると気孔率が高いので冷媒に接する接触面積が大きくなり, 直進性の気孔を有するので冷媒の圧力損失も低減させることができるために, ヒートシンクとして極めて有望である. 図18(a)および(b)にはそれぞれ溝型ヒートシンクおよびロータス銅を用いたヒートシンクの形状を示した. 図18(c)には空冷ヒートシンクの熱伝達率を測定する実験装置を示した. 空気がヒートシンクを設置したダクトにブローによって送風される. ヒートシンクは銅ベース板の片面に銀ロウ付けされたフィンとベース板の他方の面にロウ付けされた加熱ブロックより構成される. 冷たい空気の上流側の入口の温度を T_i , 銅のベース板の温度を T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} , 空気の出口の温度を T_o とし, これらの温度は熱電対で測定された. ヒートシンクの熱伝達率特性はベース面積 A_b を基準とした熱伝達率 h_b で評価された.

$$h_b = \frac{Q}{A_b(T_b - T_i)} \quad (8)$$

ここで, Q はヒートシンクの入熱量である. 著者らはこの装置を用いて熱伝達率を測定した結果, 図19に示すように, ロータス銅フィン厚 $L=1 \text{ mm}$ の熱伝達率は非常に大きく, 試験ダクト速度が $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ のときには $5000 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ にも達し溝型フィンのものよりも13.2倍も大きかった. このようにロータス型ヒートシンクは従来の溝型ヒートシンクよりもはるかに優れた性能を有している⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾.

このような空冷ヒートシンクはプロジェクターの大容量LEDの放熱装置として実用化される予定である. さらに, コンピューターや自動車のIGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)のヒートシンクとしての実用化が検討されている.

ロータス金属には優れた振動減衰性のあることが見出さ

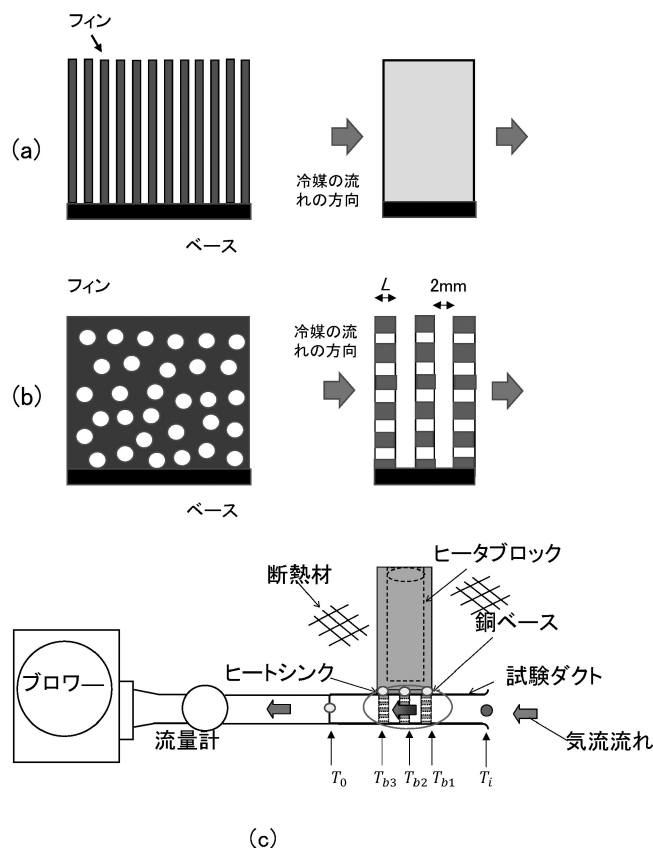


図18 (a) 溝型ヒートシンクの形状. フィンの厚さ 1 mm , フィン間の距離 3 mm . 冷媒がフィン間に流される. (b) ロータス金属を用いたヒートシンクの形状. ロータスフィンの厚さを 1 mm , 2 mm , 3 mm と変化させた. フィン間の距離は 2 mm . 冷媒はロータス銅の貫通気孔に流される. (c) 空冷ヒートシンクの熱伝達率の測定装置.

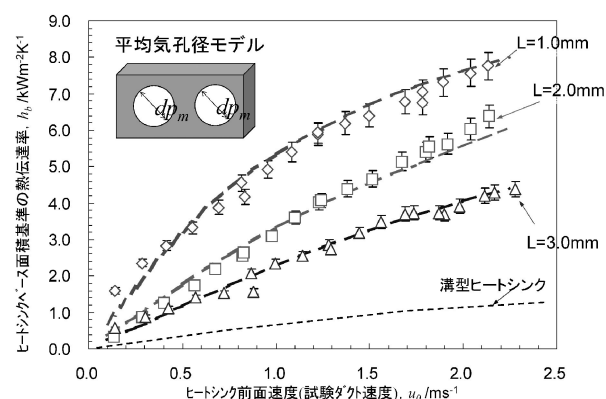


図19 ロータスヒートシンクおよび溝型ヒートシンクの熱伝達率の入口の前面速度依存性. $\diamond \square \triangle$ は実験データ, 線は熱解析による予想値.

れ, ゴルフパターのヘッドのインサート材としてロータス銅が使われた. この製品はスポーツ会社から販売された. ゴルフパターでボールを打った時の衝撃をロータス銅内の気孔が吸収するため, 打感がソフトになるというメリットがあ

